

# L'électrification des transports : une perspective québécoise



## Rapport du groupe de travail

Audrey Durand, étudiante au doctorat, REPARTI  
Nicolas Lavigne-Lefebvre, étudiant à la maîtrise, CRAD  
Jean-François Rougès, étudiant au doctorat, CIRRELT

Mario Carrier, professeur, CRAD  
Christian Gagné, professeur, REPARTI  
Jean Mercier, professeur, CRAD  
Benoit Montreuil, professeur, CIRRELT

Décembre 2014

Mise à jour : octobre 2015



UNIVERSITÉ  
LAVAL

Institut Technologies  
de l'information et Sociétés

# Avant-propos

Depuis la fin des années 2000, le Gouvernement du Québec a inscrit à l'ordre du jour de ses perspectives de développement l'axe de l'électrification des transports. Le Québec compte en effet plusieurs avantages comparatifs pour fonder ce choix pour les prochaines années, les principaux étant son immense potentiel hydro-électrique, de même que les nombreuses expertises scientifiques et techniques qu'il a développées en la matière, au fil des ans.

Par ailleurs, l'Université Laval compte en son sein un grand nombre de chercheurs et plusieurs centres de recherche qui ont développé, au cours de la dernière décennie particulièrement, une expertise en matière de transport intelligent, interconnecté et électrifié, de même que plus globalement en transport durable. C'est pourquoi l'Université Laval tient à jouer un rôle actif dans cet important axe de développement du Québec pour le futur. Aussi, c'est dans l'esprit de cet intérêt marqué que la vice-rectrice à la recherche et à la création de l'Université, madame Sophie D'Amours, a confié au cours du printemps dernier à l'Institut Technologies de l'Information et Sociétés (ITIS) le mandat de constituer un groupe de travail, pour demander à ce dernier de réaliser un état des lieux sur cet enjeu de l'électrification des transports dans une perspective québécoise. Ce rapport de recherche constitue un premier aboutissement en ce sens.

En plus du soutien financier fourni par le Vice-rectorat à la recherche et à la création (VRRRC) de l'Université Laval, ce travail a été rendu possible grâce aux soutiens financier et logistique des regroupements suivants au sein de l'Université Laval : l'Institut Technologies de l'information et Sociétés (ITIS), le Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), le Regroupement stratégique pour l'étude des environnements partagés intelligents répartis (RÉPARTI), le Centre de recherche en aménagement et en développement (CRAD) ainsi que le Centre de recherche en géomatique (CRG).

Des remerciements particuliers sont adressés aux collègues suivants, soit madame Sylvie Daniel, directrice par intérim de l'ITIS, et son équipe, madame Marie-Hélène Vandersmissen, directrice du CRAD, et monsieur Mir Abolfazl Mostafavi, directeur du CRG, pour leur collaboration à ce travail.

Finalement, des remerciements sont adressés à Alexandre Maltais, conseiller indépendant en électromobilité, pour sa contribution à la mise à jour de ce rapport.

Le Groupe de travail sur l'électrification des transports  
Université Laval

# Sommaire

Ce rapport se veut un état des lieux en matière d'électrification des transports et un questionnement sur la position du Québec dans ce domaine : son potentiel, ses atouts et ses limites. Les sujets abordés sont à la fois le transport individuel (voitures), les transports publics (trains et autobus), le transport de marchandises, ainsi que les nouveaux transports électrifiés, interconnectés et intelligents.

En un premier temps, le rapport aborde l'électrification des transports individuels et ses corollaires, en particulier les aspects technologiques couvrant les technologies de batteries, la recharge et son impact sur les réseaux de distribution, ainsi que la motorisation électrique. L'adoption de véhicules électriques par les utilisateurs est une notion importante, considérant les freins et leviers à l'achat, l'émergence de nouveaux modèles d'affaires, les impacts environnementaux et les politiques publiques encourageant son adoption. Les efforts de recherche et le développement et les politiques publiques nécessaires au déploiement de réseaux de recharge sont également des notions importantes à tenir en compte dans un contexte d'électrification des transports individuels. Et pour soutenir ceci, des aspects portant sur la réalisation de réseaux de distribution d'électricité intelligents, la recherche et le développement et les politiques publiques sont également abordés.

Le rapport traite également de l'électrification des transports publics et de marchandises. Comme pour les transports individuels, un état de l'art des technologies de stockage d'énergie et de recharge est présenté, avec une discussion de leur impact sur les réseaux de distribution. Le rapport dresse un portrait de l'électrification actuelle des camions, des autobus et du transport sur rails, avec les impacts économiques et environnementaux qui y sont associés, ainsi que les politiques publiques existantes pour encadrer les actions. Un constat est que les limites imposées par les batteries freinent l'électrification des camions, qui se développe essentiellement pour les livraisons intra-urbaines. En ce qui concerne les autobus, des alternatives comme le biberonnage ou l'induction sont expérimentées. L'électrification des flottes d'autobus est planifiée pour la décennie 2020. Entre temps, l'hybride apparaît, pour les camions comme pour les autobus, comme une solution de transition. En ce qui concerne le rail, l'électrification massive n'est pas d'actualité au Québec. Seules certaines lignes de trains de banlieue autour de Montréal ont un potentiel d'électrification.

La logique de substitution d'un véhicule à moteur à combustion interne par un véhicule électrique ne permet pas de résoudre fondamentalement les problèmes de transport : l'engorgement reste le même. De plus, les impacts environnementaux associés au cycle de vie des véhicules électriques rendent la seule électrification comme une solution moins attrayante. Pour développer des modes de transport durables, une transition socio-technique est indispensable. Au-delà des évolutions technologiques, elle nécessite une évolution culturelle et des modes d'organisation du transport. Cela suppose de faire évoluer les usages, en réduisant le besoin de mobilité et de longueur des trajets et en réorganisant les espaces à travers l'aménagement du territoire et le développement urbain. En ce qui concerne l'organisation du transport, le rapport explore les voies ouvertes par la combinaison de l'électrification, de l'interconnectivité et de l'intelligence des transports. Le concept d'Internet Physique, est introduit comme une façon de repenser les systèmes de transport. Le but est d'optimiser globalement la circulation des marchandises et des passagers au sein d'un réseau de hubs exploitant les différents modes de transport existants. Le rapport décrit comment l'organisation de la livraison intra-urbaine dans certaines villes s'inspire de ces principes et permet de réduire le nombre de véhicules sur les routes et les impacts environnementaux.

Les freins à la mise en œuvre d'un transport électrifié, intelligent et interconnecté sont multiples : incertitude technologique, nécessité de faire évoluer les valeurs et la culture de transport et le cadre légal, niveau d'investissement nécessaire élevé, etc. Pour les lever, un engagement fort de la puissance publique est nécessaire afin de stimuler et accompagner la transition. Le rapport explore les différents modes d'intervention possibles et les politiques qui y sont associés. Elles se résument en deux catégories : une première catégorie prônant des solutions technologiques, telle que l'électrification des transports, et une deuxième catégorie recherchant un transfert modal, c'est-à-dire un transfert du mode de transport individuel en automobile vers les modes de transport public ou actif (bicyclette, marche).

Le Québec a de nombreux atouts pour être un leader dans la transition vers un transport électrifié, intelligent et interconnecté. L'énergie hydroélectrique est n'émet pratiquement pas de gaz à effet de serre et son prix est relativement bas. Depuis la recherche jusqu'à la fabrication de véhicules électriques, la filière est dynamique et compte de grands donneurs d'ordres comme Hydro-Québec, Bombardier et Nova-Bus, qui peuvent avoir un effet d'entraînement. La vente des véhicules électriques est aussi plus dynamique au Québec qu'ailleurs au Canada.

La conclusion de ce rapport est qu'au-delà des seules innovations technologiques ou des améliorations du système existant, un changement de régime socio-technique est nécessaire. Il s'agit en fait de combiner des évolutions technologiques, des évolutions culturelles en matière de valeurs et de représentations des utilisateurs (par exemple, l'attachement à posséder une voiture, la perception des enjeux environnementaux), ainsi que des évolutions dans les modes d'organisation du transport. Pour saisir ces opportunités un engagement fort et convergent de tous les acteurs est nécessaire : puissance publique, industriels et citoyens. La transition vers un transport électrifié, intelligent et interconnecté est, au-delà de l'opportunité technologique, un choix de société.

# Table des matières

Chapitre 1 : L'électrification des transports individuels .....	3
1.1 La technologie .....	5
1.1.1 Les batteries .....	5
1.1.2 La recharge.....	7
1.1.3 Les réseaux de distribution .....	8
1.1.4 La motorisation électrique .....	9
1.2 L'adoption des véhicules électriques.....	10
1.2.1 Les freins et les leviers à l'achat .....	11
1.2.2 L'émergence de nouveaux modèles d'affaires.....	13
1.2.3 La recherche et le développement.....	14
1.2.4 Les impacts environnementaux .....	15
1.2.5 Les politiques publiques .....	18
1.3 Le déploiement de réseaux de recharge.....	18
1.3.1 La recherche et le développement.....	19
1.3.2 Les politiques publiques .....	20
1.4 La réalisation de réseaux de distribution intelligents.....	20
1.4.1 La recherche et le développement .....	21
1.4.2 Les impacts économiques et autres bénéfiques .....	21
1.4.3 Les politiques publiques .....	22
Chapitre 2 : L'électrification des transports publics et de marchandises .....	23
2.1 La technologie .....	23
2.1.1 Les batteries.....	24
2.1.2 La recharge.....	24
2.1.3 Les réseaux électriques.....	25
2.2 L'électrification des camions.....	26
2.2.1 Un état des lieux .....	26
2.2.2 Les impacts économiques sur les compagnies .....	26
2.2.3 Les impacts environnementaux .....	27
2.2.4 Les politiques publiques .....	27
2.3 L'électrification du transport par autobus .....	27
2.3.1 Un état des lieux .....	27
2.3.2 Les impacts économiques.....	28
2.3.3 Les impacts environnementaux .....	29
2.3.4 Les politiques publiques .....	29
2.4 L'électrification du transport sur rail.....	29
2.4.1 Un état des lieux .....	29
2.4.2 Les impacts économiques et autres bénéfiques.....	30
2.5 Des innovations de véhicules et de pratiques de transport public .....	30
2.6 L'adoption de nouveaux systèmes de transport .....	31

Chapitre 3 : Les nouveaux transports électrifiés.....	33
3.1 Les véhicules autonomes.....	34
3.1.1 Les véhicules autonomes individuels.....	34
3.1.2 Les enjeux technologiques et économiques.....	35
3.1.3 Les solutions automatisées de transport en commun.....	35
3.1.4 Les solutions automatisées de transport des marchandises.....	36
3.2 Vers un Internet Physique.....	36
3.2.1 Le transport interconnecté des personnes.....	36
3.2.2 Le transport interconnecté des marchandises.....	37
3.2.3 De nouveaux paradigmes dans la livraison de marchandises.....	38
3.3 Les nouveaux transports et l'électrification.....	41
3.3.1 Les véhicules autonomes et l'électrification des transports.....	42
3.3.2 L'Internet Physique et l'électrification des transports.....	42
3.4 Les systèmes de transport intelligents et l'électrification des transports.....	42
3.4.1 Vers un transport multimodal intégrant passagers et marchandises.....	43
3.4.2 Un changement de paradigme nécessaire.....	44
3.4.3 Les politiques publiques.....	45
Chapitre : Les politiques publiques en matière de transport durable.....	46
4.1 L'électrification des transports.....	46
4.2 Le transfert des parts modales.....	50
4.2.1 Techniques de scénarios.....	50
4.2.2 Un paradigme de transport durable.....	51
Bibliographie.....	58

## FIGURES

1.1 Croissance de la population et du parc automobile de 2006 à 2011 au Québec (STM 2014).....	3
1.2 Découplage entre les nombres de véhicules en circulation et de titulaires du permis de conduire au Québec.....	4
1.3 Impact du contexte d'utilisation sur l'autonomie de deux voitures 100 % électriques.....	7
1.4 Part de marché (en pourcentage) des véhicules 100 % électriques comparativement à l'ensemble des véhicules en 2013.....	10
1.5 Évolution des caractéristiques des batteries selon le U.S. Department of Energy (2010).....	12
1.6 Compétitivité des véhicules écoénergétiques avec les véhicules à combustion interne.....	12
1.7 Comparaison de l'émission de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie entre voitures électrique et thermique (Warburg et collab. 2013).....	16
1.8 Comparaison des émissions de GES des véhicules électriques tout au long de leur cycle de vie dans quelques pays (en 2009), en g CO <sub>2</sub> -eq/km, et consommation théorique équivalente pour un véhicule à combustion interne (Wilson 2013).....	17
3.1 Positionnement de l'avenir du transport.....	33
3.2 Schéma illustrant l'application des principes de l'Internet Physique à la livraison urbaine.....	39

## TABLEAUX

1.1 Caractéristiques énergétiques des différents types de batteries (Tie et Tan 2013).....	6
1.2 Temps de recharge de différents véhicules (Yilmaz et Krein 2013).....	8
1.3 Prospective sur les ventes de véhicules électriques dans le monde en 2020.....	11

1.4	Comparaison des impacts des véhicules électriques et à combustion interne (Hawkins et collab. 2013; Warburg et collab. 2013) .....	16
2.1	Caractéristiques physiques et de recharge pour différents camions électriques.....	24
2.2	Les autobus électriques au Québec – situation et perspectives.....	27
5.1	Quatre approches en matière d'évolution des transports .....	56





# Introduction

La planète entière est confrontée à un très grave problème : les changements climatiques (Giddens 2009). Ces changements vont provoquer une perte de régions habitables, la réduction de la capacité de production alimentaire et la destruction d'écosystèmes. Au Québec, le secteur des transports est responsable de 43,5 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), faisant de lui le plus important émetteur. Au sein du secteur des transports, les trois quarts des émissions sont imputables au transport routier (gouvernement du Québec 2012).

C'est donc dans un premier objectif de réduction des émissions de GES que le Gouvernement du Québec (2011) a présenté le Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques. En plus des avantages environnementaux, l'électrification des transports au Québec est également considérée comme une stratégie économique. En 2010, les importations de pétrole par le Québec se chiffraient à 11 G\$, faisant de lui le premier produit importé. Considérant qu'en 2008, l'automobile et le camionnage urbain consommaient 44 % des ressources pétrolières importées par le Québec, l'électrification des transports pourrait permettre au Québec de réduire sa dépendance au pétrole. Disposant d'une hydroélectricité abondante et peu coûteuse, le Québec est dans une position avantageuse qui lui permettrait de conserver sa richesse. Le Québec possède également une expertise en recherche et développement ainsi que des entreprises qui se démarquent dans les différents créneaux associés à l'électrification des transports. Il apparaît donc bien positionné pour profiter des opportunités de création de richesse, d'emplois et de perspectives d'exportations associées à l'expansion mondiale de la filière des véhicules électriques.

Dans ce contexte, le présent rapport a pour but de faire un état de la situation du Québec relativement au projet d'électrification des transports. À cet effet, on distingue deux volets : l'électrification des transports et les nouveaux transports électrifiés, intelligents et interconnectés.

## Électrification des transports

Ce premier volet du rapport couvre l'électrification des transports dits classiques, tels l'automobile personnelle, les autobus, les trains et les camions. Il s'intéresse au remplacement des véhicules communs, typiquement avec un moteur à combustion interne, par leurs homologues électriques. Ici, l'électrification est considérée dans l'optique où elle devrait s'insérer dans des habitudes d'utilisation qui se sont développées autour des véhicules à combustion interne. En termes technologiques, l'électrification des transports repose sur quatre aspects clés : le stockage de l'énergie, les infrastructures de recharge, les infrastructures de distribution d'électricité et la motorisation électrique.

Sachant que le Québec compte actuellement 4,5 millions d'automobiles et devrait en compter 5 millions en 2020<sup>1</sup>, l'impact de l'électrification des véhicules individuels sur le réseau de distribution d'électricité mène à considérer son intégration à une évolution pressentie des infrastructures vers un réseau de distribution intelligent (smart grid) incorporant des concepts de recharge intelligente et de recharge bidirectionnelle (V2G). Ces concepts sont tous couverts par le volet sur l'électrification des transports.

## Nouveaux transports électrifiés, interconnectés et intelligents

Ce second volet couvre l'électrification des nouveaux transports, résultant essentiellement d'une évolution des véhicules utilisés actuellement et/ou de leur utilisation. L'électrification est ici considérée dans l'optique où elle doit s'insérer dans des habitudes d'utilisation qui sont en train de se définir (ou à définir). Ce volet est présenté dans une optique plus prospective basée sur le développement de trois grands axes technologiques qui devraient mener à des changements importants dans la façon de transporter les gens et les biens : l'électrification, l'interconnectivité et l'intelligence.

L'intelligence (dans les transports) se retrouve déjà dans les véhicules, par exemple sous la forme de systèmes d'assistance au stationnement ou au changement de voie. Poussée à l'extrême, elle tend vers des véhicules complètement autonomes, sans conducteur. L'intelligence peut également se retrouver dans les infrastructures de transport à plus grande échelle, par exemple pour balancer une flotte de véhicules d'autopartage de manière optimale, en fonction de la demande. De la même manière, la recharge de véhicules électriques pourrait être coordonnée pour répartir la charge sur le réseau de distribution (dans le temps et l'espace).

---

1. Mayrand, K. « Dans un cul-de-sac. » *La Presse*, 21 juin, 2014.

L'interconnectivité correspond à la connexion entre les véhicules, les infrastructures, les utilisateurs et les objets transportés. À un niveau informationnel, elle exploite l'Internet des objets (Internet-of-Things), dans lequel les objets matériels forment un réseau avec lequel il est possible d'interagir et d'échanger des informations. À titre d'exemple applicatifs, notons la possibilité pour un utilisateur de véhicule électrique de connaître, à distance par une application, le niveau de charge de son véhicule électrique ou de localiser des bornes de recharge.

L'interconnectivité ne se limite pas au niveau informationnel, s'étendant aux niveaux matériel et opérationnel. Elle s'inscrit ainsi dans le concept novateur de l'Internet physique provenant du Québec, déjà devenu la vision européenne stratégique sur l'horizon 2030-2050 en termes de transport, de logistique et de chaînes d'approvisionnement. Ce système ouvert transforme notamment le transport des personnes et des biens vers un transport interconnecté permettant une mutualisation ouverte à grande échelle à travers un flux à relais entre des hubs multimodaux, orchestrant de façon distribuée de multiples prestataires de service certifiés respectant l'encapsulation, les protocoles et les interfaces mondialement standardisés. Des exemples applicatifs embryonnaires s'avèrent les services d'autopartage de véhicules en libre-service (ex. : Bixi, Communauto, ZipCar) et les services de transport et de livraison crowdsourcés (ex. : Deliv, Uber).

La convergence de l'électrification, l'interconnectivité et l'intelligence sera au cœur de changements de paradigme dans l'utilisation et la conception des transports, lesquels seront encore plus accentués par l'arrivée des véhicules autonomes<sup>2</sup>, ce qui devrait provoquer des changements significatifs et profonds à long terme.

## Objectif et plan

Dans l'objectif de faire un état de la situation mondiale et québécoise relativement à l'électrification des transports, le présent rapport regroupe les transports en trois catégories : les transports individuels, les transports publics et de marchandises, ainsi que les nouveaux transports.

Il couvre dans un premier temps la situation actuelle et prospective au plan technologique, économique, environnemental et politique. Il met l'emphase sur la perspective québécoise. Ainsi, le premier chapitre de ce rapport porte sur l'électrification des transports individuels, soit les voitures, et le second porte sur l'électrification des transports publics et de marchandises, comme les autobus, les camions et les trains. Un troisième chapitre traite ensuite des nouveaux transports électrifiés. Puis, un quatrième chapitre fait un état de l'art de l'éventail des politiques publiques pouvant être mises en œuvre pour soutenir l'électrification des transports et effectuer le transfert modal associé à l'apparition des nouveaux transports électrifiés. Le rapport termine avec une conclusion synthétisant les principaux résultats et ouvrant des pistes de réflexion, de recherche, d'action et de choix de société.

---

2. Keeney, T. « Autonomous cars, enormous opportunity. » Seeking Alpha, 28 septembre, 2014.

# Chapitre 1

## L'électrification des transports individuels

On compte environ quatre millions et demi de véhicules individuels à combustion au Québec et ceux-ci consomment actuellement 35 % de l'ensemble des produits pétroliers (gouvernement du Québec 2011). Malgré les problèmes que cela engendre, le recours à la voiture est de plus en plus important du fait de nos modes de vie et d'un étalement urbain. Deux statistiques en témoignent. Au Québec entre 2006 et 2011 le parc automobile a cru presque deux fois plus vite que la population. La figure 1.1 montre que c'est le cas même à Montréal. Depuis le milieu des années 90, le nombre de voitures en circulation croît plus vite que le nombre de titulaires du permis de conduire (figure 1.2) Cette utilisation abondante de l'automobile a deux effets majeurs : la congestion des routes et un impact environnemental négatif.

FIGURE 1.1 Croissance de la population et du parc automobile de 2006 à 2011 au Québec (STM 2014)

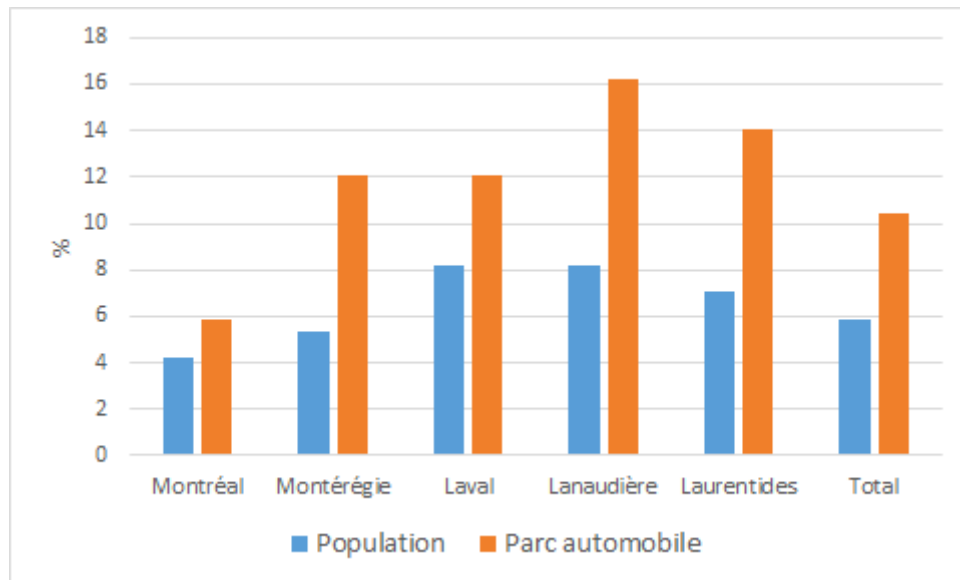
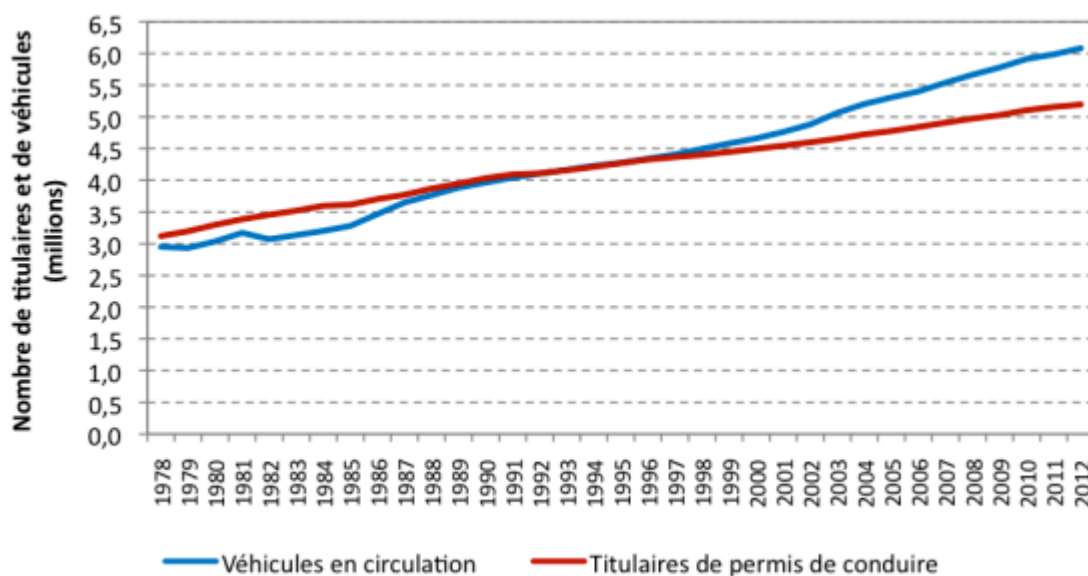


FIGURE 1.2 Découplage entre les nombres de véhicules en circulation et de titulaires du permis de conduire au Québec



Source : SAAQ citée dans Perrault et Bouque (2014)

Pour fluidifier la circulation, la tentation est forte de densifier le réseau routier. Cette solution est pourtant contre-productive comme le montre de nombreuses études depuis 50 ans (Duranton et Turner 2011). Le trafic augmente quasiment au même rythme, voire plus vite dans certains cas, que la capacité des routes. Dès lors les embouteillages sont condamnés à se multiplier aux abords des villes. Le second impact est environnemental. Les voitures contribuent fortement aux émissions de gaz à effet de serre, aux rejets de microparticules et à la pollution sonore.

Dans ce contexte, les voitures électriques attirent l'attention. Ce n'est pas la première fois : l'électricité se confond avec les débuts de l'automobile<sup>3,4</sup>. La batterie rechargeable au plomb acide est inventée en 1859. En 1899, en Belgique, la « jamais contente » est la première voiture à dépasser les 100 km/h. En 1900, 4192 voitures sont fabriquées aux États-Unis, dont 1575 sont électriques contre 936 à essence, et 1681 à vapeur. La production de véhicules électriques atteint son apogée en 1912, mais elle est victime de ses propres faiblesses (autonomie, vitesse, puissance, prix), des limites technologiques pour développer les batteries et du développement de sa concurrente à combustion. Le pétrole est bon marché. De plus, Ford lance la production en série, ce qui fait chuter les prix de ses automobiles à combustion. La voiture électrique quitte alors le devant de la scène jusqu'aux années 60.

En 1966 le Congrès américain recommande la voiture électrique pour réduire la pollution de l'air. Dans les années 70, les crises pétrolières lui redonnent une nouvelle actualité, mais les limites technologiques lui interdisent toujours le succès. Au cours des années 2000, l'intérêt se porte sur les véhicules hybrides. Ces derniers combinent un moteur à combustion interne alimenté par un carburant (par exemple, de l'essence) et un moteur électrique (dont l'énergie est typiquement stockée dans une batterie). Le moteur à combustion interne fournit au véhicule l'autonomie énergétique permettant d'effectuer de longs déplacements, tandis que le moteur électrique améliore son efficacité et permet d'économiser du carburant en régénérant de l'énergie au freinage et en stockant l'énergie excessive produite par le moteur à combustion (Chan et collab. 2010). La Prius a été lancée en 1997, suivie par plusieurs modèles chez, entre autres, Honda, GM, Ford, Nissan. L'hybride prépare le grand retour de l'électrique en éduquant les consommateurs à l'intérêt du moteur électrique. Les investissements en R ET D accélèrent les progrès technologiques et des constructeurs mettent enfin sur le marché des voitures électriques.

Ce chapitre débute par un état de l'art de la technologie nécessaire à l'électrification des véhicules individuels à la section 1.1. Le processus d'adoption des véhicules électriques est discuté à la section 1.2, à commencer par la position actuelle de la voiture électrique sur le marché, suivie pas les leviers et les freins influençant l'achat de ces véhicules, les nouveaux modèles d'affaires émergeant dans ce contexte, la R ET D en cours sur le sujet et les impacts

3. « Histoire de la voiture électrique. » Voiture Électrique.net, consulté le 4 novembre, 2014. <http://www.voitureelectrique.net/histoire-de-la-voiture-electrique>.

4. « Véhicule électrique en histoire. » Avere-France Mobilité Électrique, consulté le 4 novembre, 2014. <http://www.france-mobilite-electrique.org/experts,012.html>.

environnementaux qui seraient associés à une adoption massive des véhicules électriques. Le déploiement des réseaux de recharge est ensuite traité à la section 1.3, où la situation actuelle est présentée avec les modèles d'affaires et la R ET D. Finalement, la réalisation des réseaux de distribution intelligents, la recharge intelligente et le V2G sont discutés à la section 1.4. La situation actuelle est présentée avec une discussion sur les enjeux de réalisation.

## 1.1 La technologie

Cette section couvre quatre aspects clés liés à l'électrification des véhicules individuels : le stockage, la recharge et la distribution de l'énergie, ainsi que la motorisation électrique. L'électricité est typiquement emmagasinée dans des batteries situées à bord des véhicules. De cette composante dépend l'autonomie des véhicules et, pour l'instant, leur coût. Les différents systèmes de recharge sont également importants puisqu'ils permettent de faire le plein d'énergie à différentes vitesses, moyennant des infrastructures de complexité variable et un impact allant de négligeable à significatif sur le réseau de distribution d'énergie. Cette dernière composante est donc également présentée, avec les adaptations qui lui permettront de supporter l'arrivée des véhicules électriques.

### 1.1.1 Les batteries

On distingue actuellement cinq types de batteries disponibles sur le marché et adaptées au transport routier (Tie et Tan 2013). Le tableau 1.1 présente ces types de batteries et leurs caractéristiques énergétiques associées. La charge spécifique correspond à la quantité d'énergie pouvant être emmagasinée dans une batterie, par unité de masse. La densité énergétique correspond à la quantité d'énergie pouvant être emmagasinée par une batterie, par unité de volume. La puissance massique correspond à la puissance pouvant être délivrée par une batterie, par unité de masse. Le cyclage correspond au nombre de charges/décharges pouvant être effectuées avec une batterie. Toutes ces caractéristiques doivent être maximisées.

Les batteries au plomb (lead-acid) sont très communes : on les retrouve dans tous les véhicules standards (non électriques). Elles ne sont cependant pas adaptées aux véhicules électriques de par leur poids et leur faible capacité (Tanguy 2013).

Les batteries au nickel ne sont pas non plus adaptées aux véhicules tout électriques. Les nickels-fer ont un poids trop élevé et une capacité trop faible. Les nickels-zinc supportent un nombre de charges/décharges trop bas. Les nickels-cadmium possèdent un effet mémoire : leur autonomie se détériore progressivement lorsque la batterie est rechargée avant d'être vide. Les batteries nickel-métal-hydrure, qui étaient utilisées dans les premières générations de véhicules électriques, souffrent également d'un effet mémoire.

Les batteries ZÉBRA (Zero-Emission Battery Research Activities) sont des accumulateurs à sels fondus considérées comme une avenue très prometteuse pour les batteries de véhicules électriques par certains (Hueso, Armand et Rojo 2013). Leur température de fonctionnement se situe cependant entre 300 °C et 350 °C, ce qui les empêche d'être utilisables dans leur état actuel.

Les batteries au lithium sont celles que l'on retrouve dans les voitures électriques actuellement sur le marché. Elles sont considérées comme un dispositif de stockage très prometteur de par leur faible poids, leur grande charge spécifique, leur grande densité énergétique ainsi que leur importante puissance massique. De plus, elles ne souffrent pas d'effet mémoire et ne contiennent pas de métal dangereux comme le plomb, le mercure ou le cadmium. Leur principal désavantage est qu'elles sont plus coûteuses à produire que les batteries au nickel (Tie et Tan 2013). Ces batteries sont présentement les plus adaptées aux véhicules électriques. Les batteries lithium-ion polymère sont une variante des batteries lithium-ion classiques utilisant un polymère comme électrolyte, ce qui leur donne l'avantage de pouvoir prendre n'importe quelle forme, facilitant ainsi leur intégration aux véhicules. Les batteries lithium-titanate et lithium-fer-phosphate ont une charge spécifique et une densité énergétique moins importantes que les batteries lithium-ion classique et lithium-ion polymère, mais possèdent une puissance massique beaucoup plus importante.

Finalement, les batteries métal-air constituent une autre technologie prometteuse de par leur charge spécifique et leur densité énergétique hautement supérieures aux batteries au lithium. Cependant, elles sont actuellement inutilisables dans les véhicules électriques de par leur faible puissance massique, leur faible cyclage et le fait qu'elles sont encombrantes (Tie et Tan 2013).

Les technologies au lithium sont donc présentement les seules à être réellement adaptées à la réalité des véhicules électriques.

TABLEAU 1.1 Caractéristiques énergétiques des différents types de batteries (Tie et Tan 2013)

Type	Charge spécifique (Wh/kg)	Densité énergétique (Wh/L)	Puissance massique (W/kg)	Cyclage
<b>Plomb</b>				
Acide-plomb	35	100	180	1000
<b>Nickel</b>				
Nickel-fer	50 - 60	60	100 - 150	2000
Nickel-zinc	75	140	170 - 260	300
Nickel-cadmium (Ni-Cd)	50 - 80	300	200	2000
Nickel-métal-hydrure (Ni-Mh)	70 - 95	180 - 220	200 - 300	< 3000
<b>ZÉBRA</b>				
Sodium-nickel-chlorure (NaNiCl <sub>2</sub> )	90 - 120	160	155	1200 +
<b>Lithium</b>				
Lithium-ion	118 - 250	200 - 400	200 - 430	2000
Lithium-ion polymère (LiPo)	130 - 225	200 - 250	260 - 450	> 1200
Lithium-titanate (LiTiO/NiMnO <sub>2</sub> )	80 - 100	Inconnu	4000	18 000
Lithium-fer-phosphate (LiFePO <sub>4</sub> )	120	220	2000 - 4500	> 2000
<b>Métal-air</b>				
Zinc-air	460	1400	80-140	200

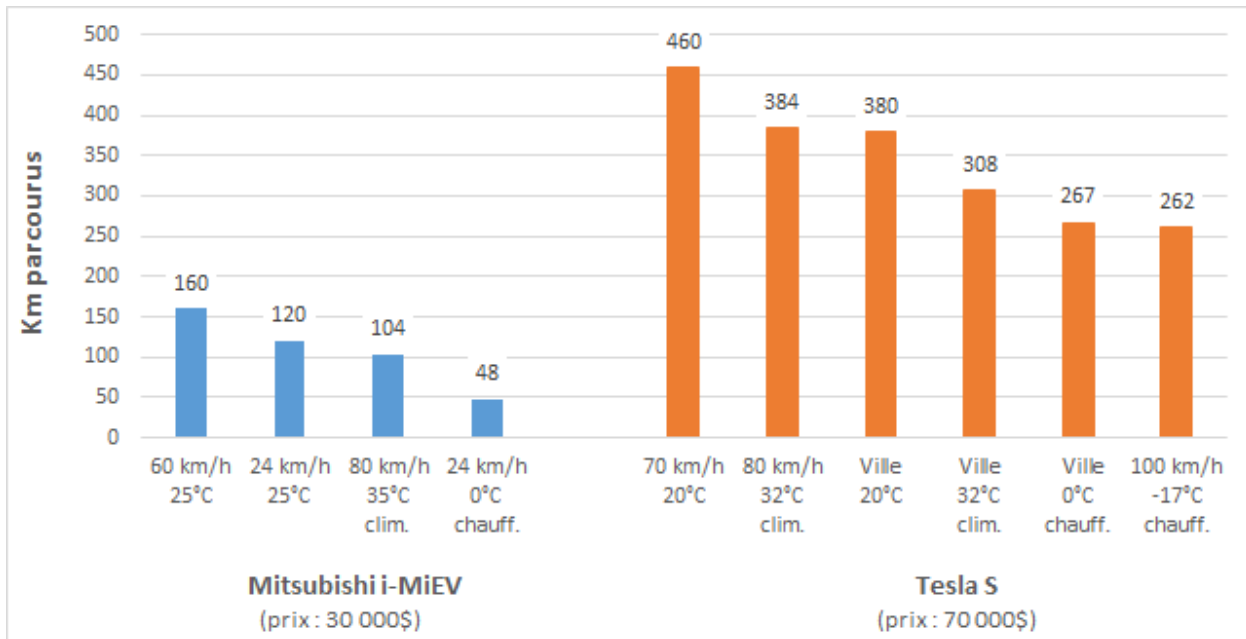
Depuis 2012, le prix<sup>5</sup> d'une batterie au lithium-ion est passé d'entre 500 \$ US/kWh et 600 \$ US/kWh (Hensley et collab. 2012) à près de 300 \$ US/kWh<sup>6</sup>. Ainsi, Nissan offre une batterie de 24 kWh au 150 km à près de 7000 \$ US<sup>7</sup>. Cependant, considérant que le coût de fabrication est de 150 \$ US/kWh pour une lithium-ion classique ou lithium-ion polymère, de 350 \$ US/kWh pour une lithium-fer-phosphate et de 2000 \$ US/kWh pour une lithium-titanate (Tie et Tan 2013), on comprend que le prix des batteries basées sur des variantes plus avancées de la technologie lithium-ion ne sont pas encore très accessibles et influencent particulièrement le prix des véhicules.

Outre le prix, l'autonomie est une autre caractéristique importante des véhicules électriques ayant un fort impact sur leur accessibilité et leur adoption. Si l'autonomie des véhicules dépend de la charge spécifique de la batterie utilisée (c'est-à-dire le volume requis pour stocker une certaine quantité d'énergie) et de son prix par kWh emmagasinable, elle varie également avec les conditions d'utilisation du véhicule. En effet, la température extérieure influence l'autonomie d'une batterie puisque cette dernière augmente/diminue avec la température et est réduite par l'utilisation de l'air conditionné ainsi que du chauffage. Les véhicules électriques sont également soumis aux mêmes contraintes énergétiques que les véhicules à essence. Ainsi, plus un véhicule se déplace à une vitesse élevée, plus il est soumis à la résistance de l'air (c'est-à-dire la force de traînée) et plus il nécessite d'énergie pour franchir une distance donnée, ce qui réduit son autonomie. La figure 1.3 donne l'autonomie de la i-MiEV de Mitsubishi Motors et de la Tesla Model S (85 kWh) de Tesla Motors pour différentes conditions d'utilisation. Mitsubishi Motors estime que la batterie devrait se dégrader à environ 80 % de sa capacité initiale après 5 années d'utilisation, et à approximativement 70 % de sa capacité initiale après 10 années d'utilisation. Le contexte de ville considéré par Tesla Motors implique une vitesse réduite avec des arrêts fréquents. De son côté, la Nissan LEAF offre une autonomie de

5. Comme dans Hensley et collab. (2012), le terme « prix » utilisé ici représente le coût que les fabricants d'automobiles doivent payer pour se procurer les batteries, et non pas seulement le coût de production brut.
6. Evans, S. « Electric vehicle batteries 'already cheaper than 2020 projections'. » The Carbon Brief, 23 mars, 2015.
7. Cole, J. « BREAKING: Nissan Prices LEAF Battery Replacement at \$5,499, New Packs More Heat Durable » Inside EVs, 2014.

199 km en conduite de loisir (61 km/h, 20°C), de 183 km en périphérie de ville (38 km/h, 22°C), de 124 km l'hiver en ville (24 km/h, -10°C, chauffage) et de 122 km sur l'autoroute l'été (88 km/h, 35°C, air climatisé)<sup>8</sup>.

FIGURE 1.3 Impact du contexte d'utilisation sur l'autonomie de deux voitures 100 % électriques<sup>9,10</sup>



Finalement, une autre avenue potentielle pour le stockage de l'énergie des véhicules électriques réside dans l'utilisation de piles à combustible, plus spécifiquement de piles à hydrogène. Cette technologie pourrait permettre de remédier à certains désavantages des véhicules électriques à piles classiques, comme l'autonomie et le temps de recharge (Veziroglu et Macario 2011). Si plusieurs constructeurs ont annoncé avoir des modèles de véhicules à hydrogène en développement<sup>11</sup>, les experts s'entendent pour dire que l'application sur le marché des piles à combustible aux véhicules commencera à éclore vers 2020 (Veziroglu et Macario 2011) et qu'elles deviendront économiquement concurrentielles autour de 2030 (Ajanovic 2008).

## 1.1.2 La recharge

Tout comme les véhicules à essence passent à la pompe, les véhicules électriques doivent aussi s'arrêter pour recharger leur réservoir d'énergie, c'est-à-dire leur batterie. Pour ce faire, on distingue trois types de chargeurs standards (Tanguy 2013; Ménigault 2014) :

- un chargeur de niveau 1 correspond à une prise de courant conventionnelle, en courant alternatif à faible puissance (1,4 /1,9 kW, 120 V);
- un chargeur de niveau 2 est une installation spécifiquement destinée à la recharge de véhicules, en courant alternatif à plus grande puissance (3 à 7 kW, 240 V);
- un chargeur rapide correspond à un chargeur en courant continu de grande puissance (typiquement de 50 kW, jusqu'à 120 kW, 200 à 500 V).

Le connecteur standard SAE (Society of Automotive Engineers) J1772 est utilisé en Amérique du Nord pour les chargeurs de niveau 2, autant pour les véhicules hybrides branchables que pleinement électriques. Pour la recharge rapide, trois standards existent<sup>12</sup> : 1) le CHAdeMO (utilisé entre autres par Nissan, Mitsubishi, Kia, Honda et Toyota)

8. « Quelle distance pouvez-vous parcourir ? » Nissan France, consulté le 24 septembre, 2015. <http://www.nissan.fr/FR/fr/vehicule/electric-vehicles/leaf/charging-and-battery/range.html>.

9. « i-MiEV FAQ. » Mitsubishi Motor Sales, consulté le 10 novembre, 2014. <http://www.mitsubishi-motors.ca/en/i-miev/faq/>.

10. « Your questions answered. » Tesla Motors, consulté le 10 novembre, 2014. <http://www.teslamotors.com/goelectric>.

11. Agence France-Presse. « Toyota: un concept à pile à combustible à Tokyo. » La Presse, 5 novembre, 2013.

12. Merritt, J. 2014. « Assess the challenges of next-generation EV charging. » Electronic Design, Juin, 2014.

est le plus commun; 2) le SAE J1772 « Combo » (utilisé entre autres par BMW, Ford et GM); et 3) le standard de Tesla basé sur le Combo.

Le tableau 1.2 résume les temps de chargement de différents véhicules pour les trois variantes de chargeurs. La durée de la recharge avec un chargeur rapide est influencée par différents facteurs comme la charge résiduelle de la batterie (plus la batterie est déchargée, plus la puissance de recharge est rapide), la température ambiante (la recharge est optimale autour de 15 à 25 °C) et la température de la batterie. Avec un chargeur de niveau 2, la durée de recharge n'est pas affectée par la température ambiante : elle demeure uniforme en toute saison (Hydro-Québec 2013c).

Il est important de noter que le chargeur de niveau 1 ne constitue pas une solution réaliste pour les véhicules électriques à grande autonomie. De plus, le chargeur rapide fait partie de la borne de recharge, contrairement aux chargeurs de niveau 1 et 2, qui font plutôt partie du véhicule. Il est peu adapté au contexte résidentiel de par son coût élevé (entre 50 000 \$ US et 100 000 \$ US) et le fait qu'il utilise du courant continu (Yilmaz et Krein 2013).

TABLEAU 1.2 Temps de recharge de différents véhicules (Yilmaz et Krein 2013)

Véhicules	Énergie (kWh)	Autonomie <sup>13</sup> (km)	Niveau 1 (heures)	Niveau 2 (heures)	Rapide (80%) (heures)
Mitsubishi i-MiEV	16	99	14	7	0,5
Nissan Leaf	24	135	12 - 16	6 - 8	0,25 - 0,5
Tesla Model S	85	425	30 +	4 - 12	0,5

Il faut savoir que la recharge classique discutée précédemment n'est pas la seule solution possible. Parmi les alternatives, on retrouve l'échange de batterie, consistant simplement à échanger la batterie vide contre une batterie à pleine capacité. Tesla Motors mise sur cette stratégie en proposant un système permettant d'échanger la batterie de la Tesla Model S en 90 secondes<sup>14</sup>. Une alternative est offerte par ELIX, une entreprise dérivée de l'Université de la Colombie-Britannique. Cette dernière commercialise un chargeur sans fil permettant d'atteindre une charge complète en quatre heures<sup>15</sup>. L'information disponible sur le projet est cependant assez limitée actuellement.

### 1.1.3 Les réseaux de distribution

Il est connu que les chargeurs rapides et de niveau 2 peuvent causer des pics de demande énergétique et ainsi entraîner une surcharge du réseau de distribution (Ramchurn et collab. 2012; Yilmaz et Krein 2013). Il est donc nécessaire de prendre en compte l'impact de l'électrification des véhicules individuels les infrastructures électriques. Considérons une flotte de 300 000 véhicules, soit l'objectif du Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques (gouvernement du Québec 2011). Si les véhicules de la flotte étaient tous rechargés en même temps sur des bornes de niveau 1, la puissance requise serait de 570 MW, comparativement à 2100 MW sur des bornes de niveau 2 et 15 000 MW sur des bornes rapides. Considérant que la puissance de pointe pour les besoins québécois en 2013 était de 39 031 MW (Hydro-Québec 2013), la puissance additionnelle requise par la recharge correspondrait à 1,47 % avec des chargeurs de niveau 1, 5,38 % avec des chargeurs de niveau 2 et 38,43 % avec des chargeurs rapides. Sachant qu'un véhicule électrique équipé d'un moteur consommant 16,5 kWh/100 km et parcourant 15 000 km annuellement requiert environ 2 500 kWh/an, la quantité d'énergie requise annuellement par une flotte de 300 000 véhicules serait d'environ 0,75 TWh. Considérant que les ventes d'électricité au Québec par Hydro-Québec atteignaient 173,3 TWh en 2013 (Hydro-Québec 2013), la flotte de véhicules électriques représenterait une augmentation de moins de 0,5 % de l'énergie utilisée actuellement par le Québec. Le défi réside donc dans la gestion de la puissance de pointe et non pas dans la quantité d'énergie requise, là où le Québec est grandement avantagé.

#### Les réseaux électriques intelligents, la recharge intelligente et le V2G

Certains des problèmes de capacité énergétique requise peuvent être contournés en adoptant des comportements de recharge intelligente (Tanguy 2013; Tie et Tan 2013; Yilmaz et Krein 2013). Aussi connue sous le nom de recharge coordonnée, la recharge intelligente consiste à ajuster la recharge d'un véhicule en fonction de la demande sur le

13. « Compare Side-by-Side. » U.S. Department of Energy. Consulté le 24 septembre 2015.

<https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=34918&id=33358&id=35980>.

14. « Battery swap. » Tesla Motors. Consulté le 20 août, 2014. <http://www.teslamotors.com/batteryswap>.

15. « Park and charge: UBC researchers invent safe wireless vehicle charging technology. » UBC News, 26 octobre, 2012.



réseau. Par exemple, dans un moment de pic important de demande, il est plus judicieux d'éviter de recharger une grande flotte de véhicules électriques avec des chargeurs rapides ou de niveau 2.

Les réseaux électriques intelligents intègrent des capteurs, typiquement des compteurs intelligents, et des mécanismes de contrôle leur permettant de s'adapter aux variations dans la demande (Ramchurn et collab. 2012). Ils sont capables de communication bidirectionnelle et permettent de mesurer la consommation d'énergie (électricité, gaz, eau) de différents appareils. Parmi leurs fonctionnalités attendues, on retrouve (Fan et collab. 2013) :

- l'offre de plusieurs tarifs dynamiques variant moment d'utilisation;
- des prises de mesures programmables et variables;
- du contrôle de la demande.

Un système intelligent de recharge tient compte à la fois des besoins de l'utilisateur et de l'état du réseau pour essayer de concentrer la recharge quand la demande est moins élevée, en situation hors pic.

Si l'arrivée en grand nombre des véhicules électriques sur le réseau représente un supplément significatif, il faut aussi savoir que ceux-ci constitueront une forme de stockage distribué qui pourra aider les réseaux intelligents à s'adapter à la demande (Ramchurn et collab. 2012). Ainsi, le U.S. Department of Energy (2003) pousse le concept de réseau électrique intelligent en le décrivant comme :

« Un réseau de distribution d'énergie entièrement automatisé qui surveille et contrôle chaque client et nœud, assurant une circulation bidirectionnelle de l'électricité et de l'information entre la centrale et l'appareil, et tous les points entre les deux. Son intelligence distribuée, couplée avec des communications à large bande et des systèmes de contrôle automatisés, permet des transactions en temps réel sur le marché et des interfaces transparentes entre les personnes, les bâtiments, les installations industrielles, installations de production et le réseau électrique. »

Selon cette définition, les réseaux électriques intelligents incorporent le concept V2G (vehicle-to-grid, véhicule-vers-grille) dans lequel les véhicules sont en mesure de transférer de l'énergie vers le réseau. Les bornes de recharge deviennent donc bidirectionnelles et un marché complexe peut s'installer entre les véhicules et le réseau de distribution électrique. Les expériences montrent que l'intégration des véhicules électriques au réseau de distribution facilite l'intégration d'autres sources d'énergie renouvelable comme l'éolien et le solaire, et permet d'éviter les surcharges des réseaux de distribution (Richardson 2013).

En plus des défis technologiques en termes de communication et d'automatisation, les réseaux électriques intelligents intégrant la recharge intelligente et le V2G présentent des défis technologiques en termes d'ingénierie de systèmes de puissance, de cybersécurité, d'intelligence distribuée et d'échange d'information (Ramchurn et collab. 2012). Voilà pourquoi la recharge intelligente des véhicules électriques est un sujet récurrent dans les publications scientifiques (Richardson 2013).

## 1.1.4 La motorisation électrique

Dans un véhicule électrique, la batterie alimente un onduleur en courant continu pour être transformé en courant alternatif et transmis au moteur. Le moteur est constitué d'un rotor, un cylindre d'aimants, et d'un stator, un cylindre d'électroaimants. Le courant magnétise les électroaimants du stator de manière à ce que leur interaction avec les aimants fassent tourner ce dernier. La vitesse de rotation est contrôlée par la fréquence et l'intensité du courant alternatif. Au moment du freinage, le moteur devient un alternateur produisant du courant qui est réacheminé à la batterie<sup>16</sup>. Le moteur-roue est un concept de motorisation consistant à utiliser un moteur électrique par roue.

Un moteur électrique est caractérisé par une architecture simple : il n'y a pas d'intermédiaire entre son axe et celui des roues. Il est donc constitué de beaucoup moins de pièces qu'un moteur à combustion interne, ce qui le rend plus léger, facilite son entretien et lui confère une durée de vie plus longue. L'efficacité du moteur électrique est également remarquable. Elle se situe entre 80 % et 85 % « de la prise aux roues », ce qui signifie qu'environ seulement 20 % de l'énergie est perdue entre la station de recharge et le mouvement du véhicule (les pertes étant essentiellement causées par les conversions de courant). À titre comparatif, l'efficacité « réservoir aux roues » d'un moteur à combustion interne se situe entre 17 % et 21 % (les pertes correspondant essentiellement à une diffusion de chaleur). Cependant, il ne faut pas oublier qu'une partie des pertes peut survenir lors de la production, du transport et de la transformation de de l'énergie (Ménigault 2014).

Les véhicules hybrides ont la particularité de combiner la motorisation électrique avec un moteur à combustion interne. Dans une topologie hybride parallèle, les deux moteurs sont connectés à l'axe des roues et le moteur à

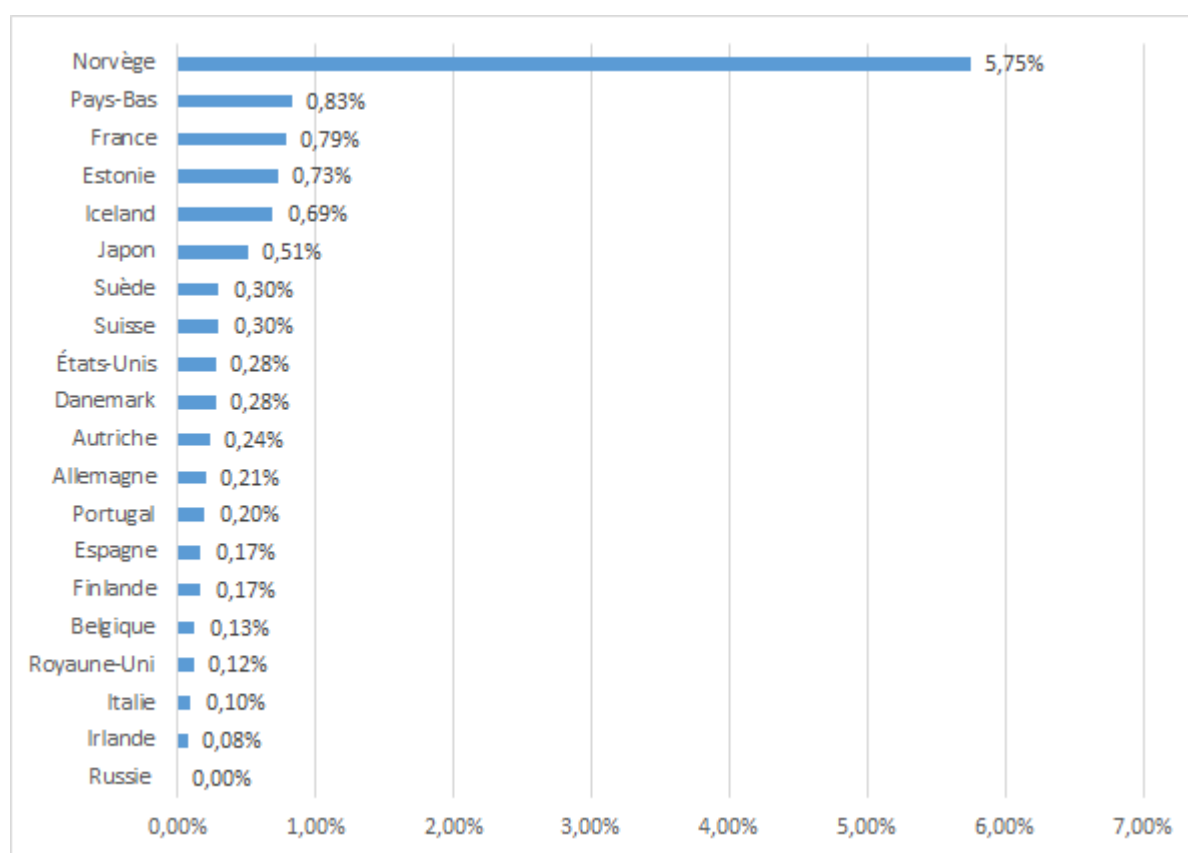
16. « Électrification des transports. » Hydro-Québec, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/moteur.html>.

combustion interne est utilisé pour certaines tâches spécifiques (par exemple, les démarrages). Dans une topologie série, le moteur à combustion interne fait partir d'un groupe électrogène dont le rôle est de recharger la batterie au besoin. Le véhicule est donc uniquement propulsé par le moteur électrique. Finalement, la topologie à dérivation de puissance est une combinaison des deux précédentes dans laquelle une portion limitée de l'énergie du moteur à combustion interne peut être transmise aux roues alors que la balance sert à recharger la batterie. Les véhicules Toyota, Ford et Chevrolet utilisent cette architecture<sup>17</sup>.

## 1.2 L'adoption des véhicules électriques

Comme le montre la figure 1.3, les parts de marché des voitures électriques sont très faibles. Elles dépassent 1 % dans un seul pays : la Norvège. Cette avance s'explique par la sensibilité écologique des populations et par les aides à l'achat généreuses décidées par les gouvernements<sup>18</sup>.

FIGURE 1.4 Part de marché (en pourcentage) des véhicules 100 % électriques comparativement à l'ensemble des véhicules en 2013



Les ventes de voitures électriques croissent rapidement. Aux États-Unis, le nombre de ventes se chiffrait à 11 104 en 2011, 31 377 en 2012 et 67 979 en 2013, comparativement à 15,6 millions de voitures vendues annuellement<sup>19</sup>. Au Québec aussi, les ventes ont doublé en un an. On prévoyait dépasser le cap de 3000 véhicules en 2014, ce qui

17. Maroselli, Y. « Voitures hybrides: comment ça marche? » Le Point, 9 mai, 2012.

18. Shahan, Z. « Electric vehicle market share in 19 countries. » ABB, 7 mars, 2014.

19. « Electric drive sales dashboard. » Electric Drive Transportation Association, consulté le 4 novembre, 2014. <http://www.electricdrive.org/index.php?ht=d/sp/i/20952/pid/20952>.

représenterait près de la moitié des voitures électriques vendues au Canada<sup>20</sup>. À l'été 2015, le nombre le nombre de véhicules électriques au Québec se chiffrait à 6167<sup>21</sup>.

De nombreux sondages montrent qu'une part importante de la population a une opinion positive des véhicules électriques et se dit même prête à considérer un achat. Au début 2013, un sondage pancanadien<sup>22</sup> constatait que 42 % des Québécois « opteraient peut-être ou probablement pour un véhicule entièrement électrique lors d'un prochain achat ». Seuls les Britanno-Colombiens étaient plus nombreux à 45 %. Ces chiffres sont comparables à ceux d'une étude de GfK<sup>23</sup> comparant la perception des consommateurs sur les voitures électriques dans six pays : États-Unis, Chine, Japon, France, Espagne et Russie. Les résultats montrent que 55 % des répondants ont une bonne opinion des véhicules électriques et 43 % se disent plutôt ou très prêts à en acheter un, contre 31 % pas vraiment ou pas du tout.

Quand on se projette dans le futur, les prévisions de ventes mondiales varient (voir le tableau 1.3). Pour Xerfi (2014), les véhicules propres (hybrides ou électriques) devraient représenter entre 6 % et 8 % des ventes en 2020 (contre 2 % aujourd'hui). La répartition entre les voitures hybrides et tout électriques varie significativement en fonction des analystes. Les véhicules tout électriques devraient constituer entre 1 % et 3 % des ventes.

TABLEAU 1.3 Prospective sur les ventes de véhicules électriques dans le monde en 2020

Étude	Part des hybrides dans les ventes de véhicules en 2020	Part des véhicules tout électriques dans les ventes de véhicules en 2020	Nombre de véhicules tout électriques et hybrides
Research and Market (2014)			7,5 millions de véhicules
Xerfi (2014)	7 %	1 %	8,6 millions de véhicules (dont 1,1 million tout électriques)
Navigant (2013)	4 % des véhicules légers en 2023	3 % des véhicules légers en 2023	6,4 millions de véhicules légers
PwC (2012)	3,2 %	3,2 %	
ABI Research (2013)			2,4 millions de véhicules tout électriques

## 1.2.1 Les freins et les leviers à l'achat

Les motivations varient en fonction du niveau de maturité des marchés. Au Japon, pays le plus familier avec la voiture électrique, les bénéfices les plus fréquemment cités sont ceux liés directement à l'utilisation du véhicule : la facilité d'utilisation, la sécurité et la fiabilité. Au contraire dans les autres pays, où la population est moins sensibilisée, ce sont des bénéfices indirects qui sont d'abord évoqués : les faibles émissions qui font que c'est « bon pour l'environnement », le caractère innovant, le silence et la réduction de la pollution auditive. Ces réponses un peu théoriques peuvent laisser deviner un biais de désirabilité sociale chez les sondés.

Tant que les bénéfices pour l'utilisateur ne sont pas vraiment perçus, il est peu probable que les consommateurs achètent des voitures électriques. Cela fait apparaître un vrai besoin de promotion des bénéfices. Au-delà des intentions louables, les freins à l'achat restent encore dominants.

### Le prix

Le prix d'achat supérieur s'explique en grande partie par le coût de la batterie. Par exemple, la batterie de la Nissan Leaf coûte 6 500 \$ US, soit environ le quart du prix de vente de la voiture, celle de la Ford Focus coûte la moitié du prix de vente. Cependant, une analyse de Hensley et collab. (2012) prévoit une diminution du prix des batteries

20. Gerbet, T. « De plus en plus de voitures électriques au Québec. » ICI Radio-Canada.ca, 17 avril, 2014.

21. Dubuc, A. « Le Québec, terreau fertile pour l'auto électrique. » La Presse, 20 août, 2015.

22. « Sondage CAA : Les Québécois parmi les plus enclins à envisager l'achat d'un véhicule électrique. » CAA Québec, 17 janvier, 2013. <https://www.caaquebec.com/fr/actualite/communiques-de-presse/article/sondage-caa-les-quebecois-parmi-les-plus-enclins-a-envisager-lachat-dun-vehicule-electr/>.

23. « Electric vehicles held back by perceived lack of personal benefits. » GfK, 20 août, 2013. <http://www.gfk.com/news-and-events/press-room/press-releases/Pages/Electric-Vehicles-held-back-by-perceived-lack-of-personal-benefits.aspx>.

lithium-ion à environ 200 \$ US/kWh d'ici 2020 et 160 \$/kWh d'ici 2025. Ainsi, le prix d'une batterie actuellement fixé à environ 14 000 \$ US pour une autonomie de 150 km devrait chuter pour atteindre 4 000 \$ US d'ici 2025. Cela concorde avec un rapport du U.S. Department of Energy (2010) prévoyant une réduction d'un facteur 10 du coût des batteries d'ici 2030, par rapport au coût en 2009. Ce dernier prévoit également une réduction de 83 % du poids des batteries d'ici 2030 et une augmentation de 3,5 fois de leur durée de vie (toujours par rapport à 2009). La figure 1.4 illustre ces prévisions.

FIGURE 1.5 Évolution des caractéristiques des batteries selon le U.S. Department of Energy (2010)

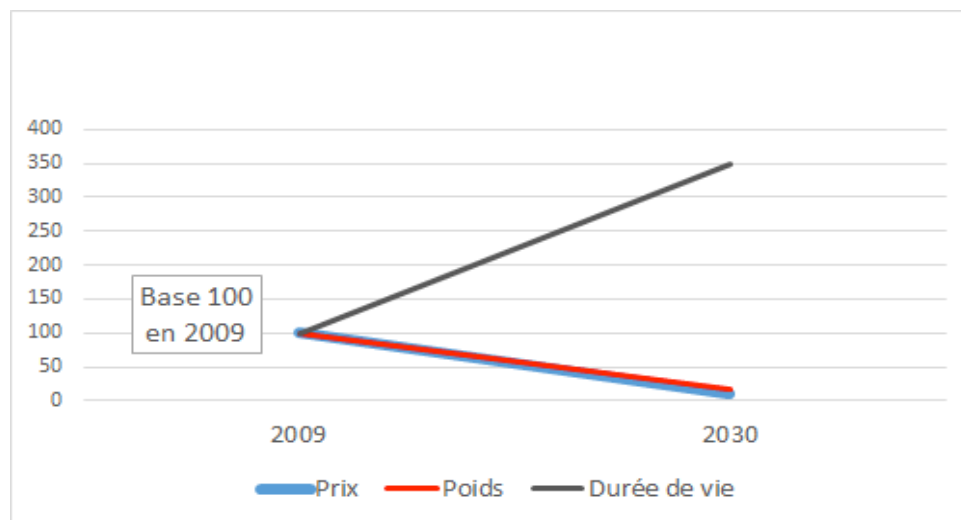
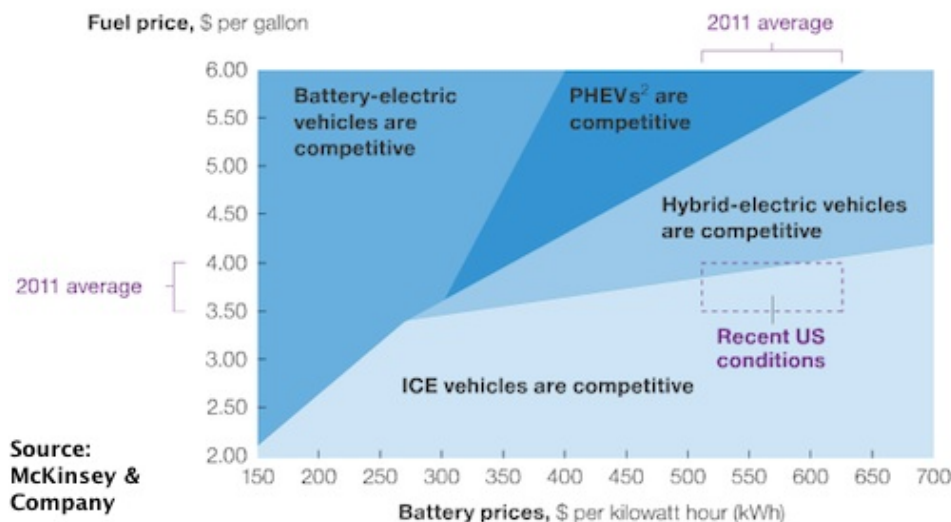


FIGURE 1.6 Compétitivité des véhicules écoénergétiques avec les véhicules à combustion interne<sup>24</sup>

Electrified vehicles' projected competitiveness with internal-combustion-engine (ICE) vehicles, based on total cost of ownership<sup>1</sup> (US example)



Source: McKinsey & Company

Il faut aussi considérer le coût d'usage. Plusieurs études ont comparé celui des voitures électriques et à essence. Elles

s'entendent que l'écart en matière de coût total d'usage entre une voiture électrique et une voiture à combustion interne serait entre 30 % et 35 % en faveur de la voiture électrique (IEA 2013; IFA 2012<sup>25</sup>). Ceci s'explique par les

24. Hensley, R., Newman, J. et Rogers, M. « Battery technology charges ahead. » McKinsey Quarterly, Juillet, 2012.

économies réalisées sur les coûts d'énergie, d'entretien et de réparation. La figure 1.5 illustre l'impact du coût de l'énergie (l'essence et les batteries) sur la compétitivité des véhicules écoénergétique avec véhicules à combustion interne (aux États-Unis). La diminution du prix des batteries autour de 200 \$ US, prévue par Hensley et collab. (2012), couplée à une augmentation du coût de l'essence pourrait donc être avantageuse pour les véhicules électriques. De plus, comme il a été présenté à la section 1.1.4, les moteurs électriques sont moins complexes, comportent moins de pièces et requièrent moins d'entretien. Ainsi, avec une voiture électrique, pas de vidange d'huile, de remplacement de pot d'échappement ou de filtres. Selon l'étude de l'IFA (2013), l'institut allemand de l'économie automobile, une voiture citadine à combustion interne parcourant 8000 km/an sur 8 ans nécessiterait 3650 € de frais annuels d'entretien en moyenne, contre 2350 € pour un véhicule électrique.

En intégrant ces diverses composantes, le délai avant qu'un véhicule électrique ne devienne profitable varie selon les études : 4 à 5 ans dans une expérience menée en Écosse (2012) et 6 à 8 ans dans l'étude de l'IEA (2013). Ménigault (2014) compare le coût total de possession, au Québec, de trois véhicules à combustion interne (Ford Focus Titanium 2013, Matrix 4A 2013 et Corolla CE 6M 2013) avec trois véhicules électriques (Ford Focus VE 2012, Nissan Leaf et Mitsubishi i-MiEV 2012), tous vendus au Québec (au moment de l'étude). En considérant le coût de l'essence à 1,38 \$/L, le coût de l'électricité à 8 ¢/kWh et un parcours de 20 000 km/an pendant sept ans, les véhicules électriques présentent généralement un coût total de possession inférieur, sinon équivalent, à leurs homologues à combustion interne. L'impact de la revente n'est cependant pas abordé dans les analyses et pourrait constituer un désavantage économique non négligeable pour les véhicules électriques étant donné la détérioration de la batterie (Ménigault 2014).

## L'autonomie

La crainte notoire de manque d'autonomie du véhicule électrique est, pour la plupart des utilisations quotidiennes, fondée sur une fausse perception. Du projet pilote d'essai de véhicules électriques Mitsubishi mené par Hydro-Québec ressortent les statistiques suivantes (Hydro-Québec 2013c) :

- la distance moyenne journalière est de 45 km, soit 48 km la semaine et 36 km la fin de semaine;
- 80 % des déplacements sont effectués sur une distance inférieure à 60 km, la semaine comme la fin de semaine;
- 50 % des déplacements sont effectués sur une distance inférieure à 35 km en semaine et 25 km en fin de semaine.

Ainsi, pour 80 % des déplacements, une recharge de niveau 2 à la maison est suffisante.

En revanche, hormis avec la Tesla, des trajets, au-delà de 200 km obligent les conducteurs à s'arrêter pour recharger. Là encore, les arrêts nécessaires se concilient très bien avec la plupart des situations de voyage. Toutefois dans un territoire vaste et peu densément peuplé comme le Québec, la limite d'autonomie peut constituer un frein important. Surtout quand l'utilisateur a besoin régulièrement d'aller pour des raisons professionnelles ou familiales dans une zone éloignée où il n'y a pas de borne de recharge. Pour rassurer ses clients, BMW va plus loin en proposant en option sur sa i3 un moteur à combustion de secours permettant d'augmenter l'autonomie de la voiture d'environ 180 kilomètres<sup>26</sup>.

## La crainte des incendies

Une vingtaine de cas d'incendies de batteries, dont certains très médiatisés, comme celui d'une Tesla Model S, entretiennent des craintes en matière de sécurité<sup>27</sup>. Les données démontrent cependant que ce risque n'est pas supérieur à celui encouru avec les véhicules à pétrole<sup>28</sup>. En outre l'utilisation de nouvelles substances comme électrolyte devrait permettre d'améliorer davantage la sécurité des batteries au lithium, voire de les rendre ininflammables<sup>29</sup>.

## 1.2.2 L'émergence de nouveaux modèles d'affaires

Pour lever les freins à l'achat de véhicules électriques, les constructeurs automobiles font évoluer leurs modèles d'affaires. Par exemple, le modèle de location pourrait permettre de rendre les voitures électriques plus accessibles.

- 
25. Étude menée par l'IFA (Institut für Automobilwirtschaft) rapporté par Loveday E. « Study: Electric 35% less costly than comparable gas vehicles. » Plugin Cars, 18 décembre, 2012. <http://www.plugin-cars.com/study-electrics-35-less-costly-maintain-comparable-ice-vehicles-125755.html>
  26. De Turbary, A. « L'essai de la BMW i3 – conduite et prolongateur d'autonomie. » Voiture Électrique Populaire, 11 novembre, 2013.
  27. Biello, D. « Should battery fires drive electric cars off the road? » Scientific American, 12 novembre, 2013.
  28. Boughriet, R. « Pas de risques supplémentaires d'incendie pour les véhicules électriques en sous-sol ? » Actu-Environnement.com, 4 janvier, 2012.
  29. Agence France-Presse. « Une nouvelle substance pourrait rendre les batteries au lithium plus sûres. » AVÉQ, 15 février, 2014.

Ainsi, comme Daimler avec sa Smart Fortwo, Renault loue les batteries pour sa Zoe et sa Twizy. Cinq formules de 49 à 102 € par mois sont proposées, en fonction du kilométrage annuel. Les batteries sont remplacées gratuitement si leur capacité est inférieure à 75 %<sup>30</sup>. Pour faire face à l'autonomie réduite, BMW propose un service mettant à disposition des propriétaires de i3, des voitures de sa gamme conventionnelle à combustion pendant un nombre limité de jours par an<sup>31</sup>. BMW compterait également procéder à une intégration verticale en développant son propre réseau de stations de recharge ouvert à tous. Le constructeur a développé, avec Bosch Automotive, un petit chargeur, plus léger et moins gros que la concurrence, vendu 6 548 \$ l'unité à un réseau de partenaires sélectionnés<sup>32</sup>.

Fondé en 2003, Tesla Motors est devenu un leader technologique sur le marché de la voiture électrique<sup>33</sup>. Son succès repose actuellement sur trois piliers : des investissements massifs en R ET D qui en font le leader technologique du secteur, la maîtrise de la mise en marché et une stratégie d'intégration verticale totale.

## Recherche et développement

En juin, le constructeur a annoncé qu'il souhaitait accélérer le progrès technologique dans le secteur de la voiture électrique en mettant ses brevets à la disposition de ses concurrents. Effet de la culture associée au logiciel libre (open source) de son fondateur, Elon Musk, également cofondateur de PayPal et de SpaceX, mais aussi une stratégie rationnelle permettant de réduire les frais juridiques et asseoir son leadership technologique.

## La mise en marché

La compagnie vend ses voitures dans ses propres magasins et en ligne, ce qui lui vaut des conflits juridiques avec les concessionnaires automobiles dans différents états américains.

## L'intégration verticale

Dans un communiqué du 26 février 2014<sup>34</sup>, la compagnie a annoncé son plan de production massive de batteries destinées aux véhicules électriques dans une « giga-usine ». Tesla Motors prévoit que d'ici 2020, le volume de batteries produites par cette usine dépassera le volume de batteries produites dans le monde en 2013. Tesla Motors prévoit également une diminution de plus de 30 % du prix des batteries d'ici 2017<sup>35</sup>. La compagnie développe également son propre réseau de stations de charge, réservé à ses clients et gratuit à vie.

En partant d'une page blanche, sans les limitations des paradigmes des constructeurs automobiles historiques, inspirée par sa culture issue du monde de l'Internet, Tesla Motors invente avec succès un modèle d'affaires nouveau pour la voiture électrique.

### 1.2.3 La recherche et le développement

Dans un communiqué de presse du 5 mars 2014<sup>36</sup>, Hydro-Québec indique que l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) détient plus de 800 brevets et 40 licences touchant des matériaux utilisés par certains des plus grands fabricants de batteries et fournisseurs de matériaux de batterie au monde et annonce une collaboration de recherche entre l'IREQ et la compagnie canadienne Arkema pour le développement d'un nouvel électrolyte destiné à être utilisé dans les batteries lithium-ion et lithium-ion polymère. Bathium Canada, une filiale du groupe français Bolloré, développe également des batteries lithium métal polymère (LMP) testées dans les voitures Bluecar du projet de voitures libre-service en France, Autolib », depuis 2011<sup>37</sup>. Bathium Canada utilise des brevets liés à l'utilisation du phosphate de fer dans la fabrication de batteries LMP résultant d'une collaboration entre Hydro-Québec et le Centre national de la recherche scientifique français<sup>38</sup> et souhaite multiplier par trois d'ici 2019 la production de batteries

---

30. « Location de batterie. » Renault ZOE - Mode d'emploi, consulté le 13 novembre, 2014. [http://c/oe.renault.fr/mode\\_demploi/budget\\_services/location\\_de\\_batterie](http://c/oe.renault.fr/mode_demploi/budget_services/location_de_batterie).

31. « Une expérience de conduit électrifiant. » BMW Canada, consulté le 24 novembre, 2014. <http://www.bmw.ca/ca/fr/newvehicles/i/i3/2013/showroom/drive.html>

32. Davies, A. « BMW launches its answer to Tesla's supercharger network. » Wired, 4 août, 2014.

33. Bullis, K « How Tesla is driving electric car innovation. » MIT Technology Review, 7 août, 2013.

34. Tesla Motors. « Gigafactory. » Tesla Motors Blog, 26 février, 2014. <http://www.teslamotors.com/blog/gigafactory>.

35. Gorzelany, J. « Why Tesla's vertical manufacturing move could prove essential to its success. » Forbes, 27 février, 2014.

36. « Arkema et l'IREQ signent un partenariat de R&D sur un nouvel électrolyte pour les batteries pour les véhicules électriques. » AVÉQ, 5 mars, 2014.

37. « Les batteries LMP (lithium métal polymère) une batterie électrique haute performance. » Bluecar, consulté le 19 août, 2014. <http://www.bluecar.fr/les-batteries-lmp-lithium-metal-polymere-une-batterie-electrique-haute-performance>.

38. « Hydro-Québec, en collaboration avec le Centre National de la Recherche Scientifique français (CNRS), accorde une licence à Bathium Canada pour l'utilisation du phosphate de fer lithié dans la fabrication de batteries au lithium métal polymère. » CNW Telbec, 5 juillet, 2012.

dans son usine à Boucherville<sup>39</sup>. Clariant Canada est également un joueur important opérant l'usine de batteries lithium-fer-phosphate de Candiac, au Québec. Dans le cadre du partenariat Partenariat automobile du Canada, ils collaborent avec des chercheurs de l'École Polytechnique de Montréal, de l'Université de Montréal et de l'Université de Western Ontario pour développer un nouveau procédé qui pourrait réduire de moitié le coût de fabrication des batteries destinées aux véhicules électriques<sup>40</sup>. L'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) de l'Université du Québec à Trois-Rivières s'intéresse, entre autres, aux piles à combustible. Aux États-Unis, les compagnies A123 Systems, Valence Technology et Celgard sont des acteurs importants dans la recherche, le développement et la fabrication de batteries et de leurs composantes.

Le Québec dispose également d'un savoir-faire québécois en motorisation électrique grâce à l'entreprise TM4 (Hydro-Québec 2009). Cette dernière propose des technologies innovantes et brevetées<sup>41,42</sup>. Elle collabore également avec des chercheurs de l'Université McGill ainsi que les entreprises internationales Linamar et Infolytica au développement de moteurs électriques haute-performance à faible coût<sup>43</sup>. L'Université McGill a été l'hôte de l'IEEE Symposium on Advanced Electric Vehicle Drivetrains qui s'est tenu le 14 novembre 2014. Parallèlement, dans le cadre du Partenariat automobile du Canada, des chercheurs de l'Université McMaster collaborent avec Chrysler Canada, pour développer la prochaine génération de groupes motopropulseurs électriques<sup>44</sup>.

Le rapport de Couillard et Desaulniers (2012) présente une liste exhaustive des entreprises centres de recherche et québécois impliqués dans les divers aspects de la recherche et du développement de véhicules électriques.

## 1.2.4 Les impacts environnementaux

Cette section discute des impacts environnementaux des véhicules électriques, qui sont communément considérés comme un de leurs principaux avantages concurrentiels sur les véhicules à combustion interne. Pour les analyser véritablement, il est indispensable de réfléchir en terme de cycle de vie incluant les phases de fabrication du véhicule et de la batterie ainsi que d'utilisation du véhicule. Il faut également prendre en compte les modes de production de l'électricité.

Il existe peu d'études comparant les impacts environnementaux des cycles de vie des voitures électriques et à combustion interne. Les travaux de Hawkins et collab. (2013), Warburg et collab. (2013) et Wilson (2013) sont les plus complets. Ils comparent différents impacts environnementaux dans plusieurs scénarios : véhicules à essence ou diesel, véhicules électriques alimentés par différents bouquets énergétiques mixant des énergies renouvelables, nucléaires et des centrales thermiques. Notons qu'il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude réalisant cette comparaison avec les conditions québécoises.

Notons qu'une difficulté méthodologique majeure des études comparatives est la grande dépendance des résultats aux hypothèses qui sont posées. Or les technologies de fabrication des batteries sont multiples et évoluent rapidement. Les performances des véhicules sont très variables (poids, consommation). Les bouquets énergétiques ont un impact majeur sur les gaz à effet de serre (GES) générés dans la production de l'électricité. En fonction des hypothèses qui sont posées, les auteurs constatent des variations importantes dans les résultats obtenus : de l'ordre de 20 % pour Hawkins et collab. (2013), 50 % pour Warburg et collab. (2013). Par exemple, en fonction des études, l'impact de la production des batteries peut être jusqu'à trois fois plus important en fonction des hypothèses posées (Hawkins et collab. 2013). Les résultats sont donc à prendre avec beaucoup de précautions.

Le tableau 1.4 présente de manière très synthétique les résultats des études de Hawkins et collab. (2013) et Warburg et collab. (2013). Lorsqu'on prend en compte le cycle de vie, les voitures à combustion interne ont un net avantage sur plusieurs critères environnementaux : l'eutrophisation des mers, la toxicité humaine, l'écotoxicité de l'eau douce et des mers, l'épuisement des métaux, la transformation des terres agricoles et les radiations ionisantes. En revanche, les véhicules électriques sont meilleurs en matière de rejets d'oxydants photochimiques, d'épuisement des ressources fossiles, de transformation des terres naturelles. Enfin, les impacts sont peu différents en ce qui concerne l'acidification terrestre, les particules fines et l'écotoxicité terrestre.

39. Pelous, A. « L'usine canadienne de batteries de Bolloré en grève depuis cinq mois. » Le Monde, 29 septembre, 2014.

40. « Canadian battery technology could make electric cars profitable. » Partenariat automobile du Canada, modifié la dernière fois le 25 octobre, 2013. [http://www.apc-pac.ca/About-Renseignements/Project-Project\\_eng.asp?ID=28](http://www.apc-pac.ca/About-Renseignements/Project-Project_eng.asp?ID=28).

41. « Technologies de rotor externe. » TM4, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.tm4.com/fr/technologies/technologies-de-moteurs-electriques/topologie-rotor-externe/>.

42. « Technologies de stator brevetées. » TM4, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.tm4.com/fr/technologies/technologies-de-moteurs-electriques/technologies-de-stator-brevetees/>.

43. « McGill researchers to help make electric cars cheaper. » McGill, 27 février, 2013. <http://www.mcgill.ca/newsroom/node/18274>.

44. « Véhicules électriques de la prochaine génération. » Partenariat automobile du Canada, modifié la dernière fois le 25 octobre, 2013. [http://www.apc-pac.ca/About-Renseignements/Project-Project\\_fra.asp?ID=32](http://www.apc-pac.ca/About-Renseignements/Project-Project_fra.asp?ID=32).

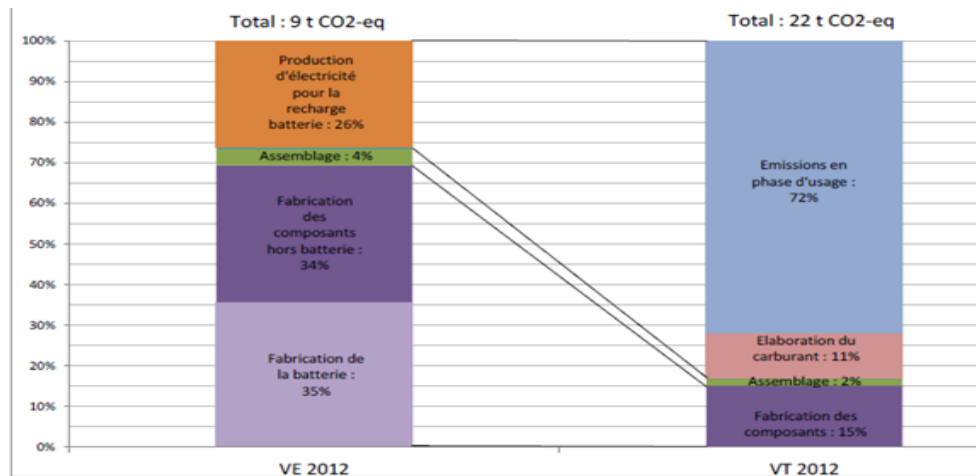
**TABLEAU 1.4** Comparaison des impacts des véhicules électriques et à combustion interne (Hawkins et collab. 2013; Warburg et collab. 2013)

Impact environnemental	Avantage au véhicule électrique	Avantage au véhicule à combustion interne	Impacts peu différenciés
Changement climatique (gaz à effet de serre)			
Épuisement des ressources fossiles			
Transformation des terres naturelles			
Oxydant photochimique			
Eutrophisation de l'eau douce			
Toxicité humaine			
Ecotoxicité eau douce			
Ecotoxicité mer			
Épuisement des métaux			
Transformation des terres agricoles			
Radiations ionisantes			
Acidification terrestre			
Particules fines			
Écotoxicité terrestre			

Lorsqu'on prend en compte l'ensemble du cycle de vie, il apparaît que l'impact en matière d'émission de GES est très différent pour les deux types de véhicules. La figure 1.6 montre qu'avec un bouquet énergétique issu à 91 % de moyens n'émettant pas de gaz à effet de serre (nucléaire, renouvelable), les voitures électriques produisent les trois quarts de leurs émissions de gaz à effet de serre durant la phase de fabrication, la batterie comptant pour le tiers. Au contraire, les voitures à combustion interne rejettent les trois quarts de leurs GES durant la phase d'utilisation (Warburg et collab. 2013).



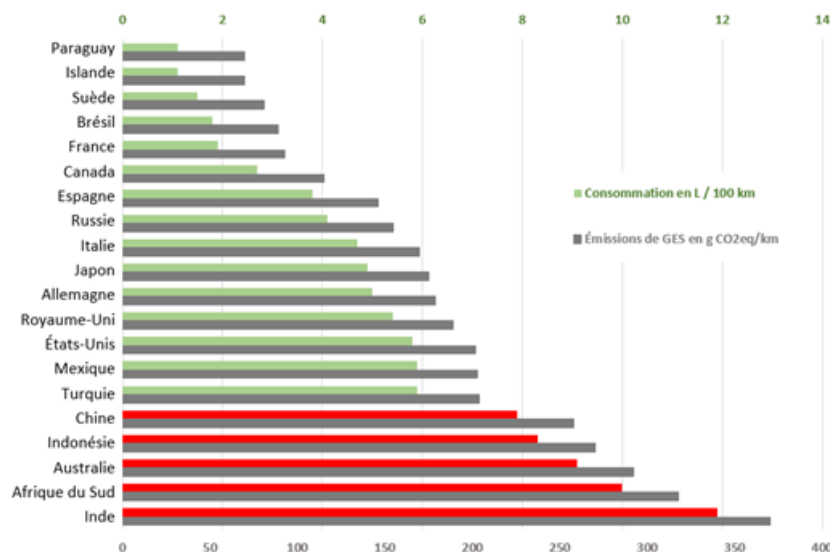
FIGURE 1.7 Comparaison de l'émission de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie entre voitures électrique et thermique (Warburg et collab. 2013).



Pendant la phase d'usage du véhicule, l'émission de GES est conditionnée par les modes de production de l'électricité utilisée pour recharger les batteries. Hawkins et collab. (2013) notent qu'avec une production éolienne les émissions seraient de 106 g CO<sub>2</sub>-eq/km, contre 352 g CO<sub>2</sub>-eq/km pour des centrales à charbon. De ce point de vue la situation au Québec est très favorable à l'électrique. En effet, 99,8 % de l'électricité est hydroélectrique. Les émissions sont 100 fois inférieures à celles d'une centrale au charbon et 40 fois inférieures à celles d'une centrale au gaz naturel.

La figure 1.7 compare les émissions de GES tout au long du cycle de vie dans différents pays (Wilson 2013). Elle permet de constater que la situation est très variable en fonction des pays. Les pays ayant des productions électriques renouvelables à 100 %, le Paraguay et l'Islande ont les chiffres les plus bas avec des émissions de GES de 70 g CO<sub>2</sub>-eq/km. Pour émettre aussi peu, un véhicule à combustion interne devrait consommer 1,1 L aux cent kilomètres. De par son bouquet énergétique, le Québec a théoriquement des résultats équivalents à ces deux pays. Dans les autres pays, la situation se dégrade à mesure que le bouquet énergétique fait moins de place à l'électricité nucléaire ou renouvelable. Dans cinq pays : la Chine, l'Indonésie, l'Australie, l'Afrique du Sud et l'Inde, les véhicules électriques sont même autant voire plus polluants en matière d'émission de GES que des véhicules à combustion interne.

FIGURE 1.8 Comparaison des émissions de GES des véhicules électriques tout au long de leur cycle de vie dans quelques pays (en 2009), en g CO<sub>2</sub>-eq/km, et consommation théorique équivalente pour un véhicule à combustion interne (Wilson 2013)



En rouge : pays dans lesquels les véhicules électriques n'ont pas davantage sur les véhicules à combustion interne en matière d'émission de GES

Quand on se tourne vers le futur, de nombreux facteurs vont faire varier ces résultats : l'efficacité des technologies dans la fabrication des batteries, l'évolution du bouquet énergétique, l'efficacité des technologies de production de l'électricité, ainsi que la performance des moteurs thermiques. Cependant selon Warburg et collab. (2013) ces différents éléments devraient plutôt jouer en faveur des moteurs à combustion interne. En matière d'émission de GES en 2020, l'amélioration est importante pour les véhicules essence et diesel, alors que l'impact est jugé quasi-équivalent pour les véhicules électriques. Par exemple les études citées (Hawkins et collab. 2013; Warburg et collab. 2013; Wilson 2013) ont des hypothèses de consommation de 6 à 8 litres aux 100 km. Cependant, certains constructeurs comme Renault ou Peugeot annoncent déjà des véhicules consommant 2 litres aux 100 km<sup>45</sup>.

La production hydroélectrique situe le Québec en tête des classements en ce qui concerne la réduction des GES. Il y a donc un intérêt environnemental à développer le parc de véhicules électriques. Cet impact serait encore amélioré si le Québec n'importait pas des véhicules dont les batteries ont été produites dans des pays où le bouquet énergétique est moins favorable, mais les produisait sur place. Le faible coût de l'énergie pourrait être un argument vis-à-vis des industriels. De fait le Groupe Bolloré a déjà implanté une usine à Boucherville et compte tripler la production d'ici 2019<sup>46</sup>.

### 1.2.5 Les politiques publiques

Depuis 2009, le gouvernement du Québec accorde un soutien financier aux particuliers et aux entreprises à l'achat ou à la location d'un véhicule écoénergétique (gouvernement du Québec 2011). Ce dernier estime à 9,6 M\$ la valeur des crédits octroyés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2009 et le 31 décembre 2011 en vertu de cette mesure. En 2012, le crédit d'impôt a été remplacé par un rabais à l'achat. Depuis le 1<sup>er</sup> février 2014, les particuliers, entreprises, municipalités et organismes peuvent recevoir un rabais entre 4 000 \$ et 8 000 \$ à l'acquisition d'un hybride rechargeable et de 8 000 \$ pour un véhicule tout électrique par les concessionnaires membres du programme Roulez électrique<sup>47,48</sup>.

À titre comparatif, la Norvège, chef de file dans le domaine de l'électrification des véhicules, maintient des politiques telle que (Hydro-Québec 2009, p. 62) :

- une exemption des droits à l'achat d'un véhicule (jusqu'à 12 000 \$ pour une voiture compacte);
- une exemption de la taxe de vente;
- une exemption de la taxe annuelle sur l'utilisation des voies publiques;
- une exemption des péages sur les autoroutes;
- une exemption des taxes sur les véhicules de fonction;
- du stationnement gratuit
- un accès à des voies réservées.

Aux États-Unis, suite au rapport du U.S. Department of Energy (2010), l'administration américaine a injecté près de 5 milliards de dollars, sous forme de prêts à taux nul, à l'électrification du parc automobile national. Ces investissements comprenaient à la fois l'implantation d'usines de fabrication de véhicules électriques (Nissan, Tesla et Fisker) avec leurs composants (Delphi Automotive Systems), de batteries avec leurs composants (A123 Systems, Celgard) et d'infrastructures de recharge (Coulomb Technologies). La recherche et le développement de nouvelles technologies de batteries ainsi que le développement de projets existants (par exemple, la Chevrolet Volt) ont également été subventionnés (Tanguy 2013).

L'étendue des politiques publiques applicables pour appuyer l'électrification des véhicules est présentée au chapitre 4.

## 1.3 Le déploiement de réseaux de recharge

Parmi les acteurs importants dans la fabrication des infrastructures de recharge au Canada, la compagnie québécoise AddÉnergie propose des bornes de niveau 2 et de recharge rapide. La compagnie GRIDbot, possédant une filiale canadienne, propose des bornes de niveau 1, 2 et de recharge rapide. Finalement, la compagnie américaine AeroVironment propose aussi des bornes de niveau 2 et de recharge rapide.

45. Gaboulaud, A. « 2 litres aux 100 km : La bataille des ingénieurs français. » Paris Match, 4 octobre, 2014.

46. Pelouas, A. « L'usine canadienne de batteries de Bolloré en grève depuis cinq mois. » Le Monde, 29 septembre, 2014.

47. « Rabais à l'achat ou à la location. » Québec roule à puissance verte!, consulté le 10 novembre, 2014. <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/particuliers/rabais.asp>.

48. « Rabais à l'achat ou à la location. » Québec roule à puissance verte!, consulté le 10 novembre, 2014. <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/entreprises/rabais.asp>.

Le gouvernement du Québec présente différents réseaux de recharge offerts aux particuliers<sup>49</sup> sur son site Internet « Québec roule à puissance verte! ». Il y est mentionné qu'en septembre 2015, environ 700 bornes de recharge publiques étaient en fonction au Québec, dont plus de 25 bornes de recharge rapide.

Lancé en juin 2011 par Hydro-Québec, en collaboration avec St-Hubert, Rona, Metro et l'Agence métropolitaine du transport, le réseau Circuit électrique provincial est le premier réseau de bornes de recharge publiques au Canada. Il compte, en septembre 2015, 461 bornes de niveau 2 (sur les 700) et 18 bornes rapides (sur les 25), ainsi que plus de 70 partenaires privés et institutionnels. Le nombre de partenaires qui proposent des bornes de recharge est en constante croissance. Une recharge coûte 2,50 \$ sur une borne de niveau 2 et 10 \$/heure (tarifié à la minute) sur une borne rapide. Une application mobile permet de trouver les bornes et de suivre le cycle de recharge à distance. Lancé en octobre 2012 par l'entreprise québécoise AddÉnergie, RéseauVER proposait, en septembre 2014, 95 bornes de niveau 2 au Québec et en offrait également quelques-unes en Ontario, au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse. Le coût de la recharge varie selon la politique de l'exploitant de la borne (typiquement 1 \$/heure). Depuis 2015, le Circuit électrique et RéseauVER sont interopérables<sup>50</sup>.

L'entreprise Sun Country Highway comptait également près de 50 bornes de niveau 2 au Québec en août 2014. Elle a déployé près de 200 bornes de niveau 2 le long de l'autoroute Transcanadienne en 2012 et le long d'autres autoroutes canadiennes et aux États-Unis en 2013-2014. Ce réseau de bornes de recharge, installé en partenariat avec des municipalités et des entreprises privées, est offert gratuitement.

Le Réseau Azra<sup>51</sup> regroupe plusieurs partenaires commerciaux qui, en plus d'offrir des bornes de recharge à leurs membres, leur offrent des rabais sur des produits dans le but d'encourager l'utilisation de véhicules électriques. Ce réseau contient des bornes, entre autres, au Québec, au Canada et aux États-Unis.

Aux États-Unis, le réseau ChargePoint<sup>52</sup> offre 19 100 bornes rapides et de niveau 2 et en ajoute 500 de plus chaque mois. Il commence à s'étendre au Canada, avec quelques stations près de Québec, Montréal et Trois-Rivières. Le réseau Car Charging Group<sup>53</sup> regroupe quant à lui plusieurs réseaux de recharge, dont Blink<sup>54</sup>, un réseau constitué de 15 000 bornes de recharge rapides et de niveau 2.

Tesla Motors est également un gros joueur à considérer dans la recharge, avec son réseau Supercharger<sup>55</sup> composé entièrement de bornes rapides et accessibles gratuitement aux détenteurs de véhicules Tesla. D'ici 2015, l'entreprise prévoit être en mesure de desservir 98 % de la population des États-Unis ainsi qu'une partie du Canada. L'entreprise compte actuellement 480 sites de chargement dans le monde, soit 2 705 bornes, dont 10 au Québec.

Finalement, BMW a annoncé un partenariat avec la compagnie américaine d'électricité NRG Energy pour permettre aux utilisateurs de véhicules électriques BMW i3 de se recharger gratuitement aux stations NRG eVgo en Californie, à partir de 2015<sup>56</sup>. L'entreprise a également développé un petit chargeur rapide (80 % en 30 minutes), léger et peu coûteux (6 548 \$ US pour les partenaires) utilisant le connecteur Combo. Les 100 unités qui seront installées sur le réseau NRG eVgo d'ici la fin 2015 seront donc accessibles à tous les détenteurs de véhicules utilisant ce connecteur standard<sup>57</sup>.

### 1.3.1 La recherche et le développement

Depuis juillet 2008, Hydro-Québec collabore avec une trentaine d'autres entreprises d'électricité, General Motors et l'Electric Power Research Institute (EPRI), à l'élaboration des technologies nécessaires à la mise en place d'infrastructures nord-américaines de recharge de véhicules électriques. Cette collaboration vise à développer des installations et des bornes de recharge sécuritaires, adaptées à la capacité des réseaux et compatibles sur l'ensemble du continent (Hydro-Québec 2009).

---

49. « Recharge dans les lieux publics. » Québec roule à puissance verte!, consulté le 24 septembre, 2015. <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/particuliers/recharge-publics.asp>.

50. « Le Circuit électrique et le RéseauVER unissent leurs forces. » Hydro-Québec, 31 mars, 2015. <http://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiqués-de-presse/750/le-circuit-electrique-et-le-reseau-ver-unissent-leurs-forces/>.

51. « Réseau Azra. » Azra, consulté le 10 novembre, 2014. <http://reseauazra.com/azra/>.

52. « Who we are. » ChargePoint, consulté le 10 novembre, 2014. <http://www.chargepoint.com/about/>.

53. « About us. » CarCharging, consulté le 10 novembre, 2014. <http://www.carcharging.com/about/>.

54. « Our history. » Blink, consulté le 10 novembre, 2014. <http://www.blinknetwork.com/blink-history.html>.

55. « Supercharger. » Tesla Motors, consulté le 10 août, 2014. <http://www.teslamotors.com/supercharger>.

56. White, J. B. « BMW to expand electric-car fast charging. » The Wall Street Journal, 18 juillet, 2014.

57. Davies, A. « BMW launches its answer to Tesla's Supercharger network. » Wired, 4 août, 2014.

### 1.3.2 Les politiques publiques

Au Québec, le programme Roulez électrique permet aux particuliers de bénéficier, par véhicule admissible, d'une aide financière pour l'achat et l'installation d'une borne de recharge de 240 V à domicile<sup>58</sup>. Le programme Branché au travail permet aux entreprises d'obtenir un remboursement pour acheter et installer des bornes de recharge de 240 V. L'employeur devra ensuite offrir gratuitement la recharge à ses employés durant les trois ans suivant l'installation de la borne<sup>59</sup>.

Dans son Plan d'action 2011-2020, le Gouvernement du Québec (2011) annonçait des mesures visant à « maximiser les innovations technologiques et les retombées économiques dans la conception et la fabrication des équipements de recharge. » À titre d'exemple, AddÉnergie a bénéficié d'un soutien financier totalisant 763 000 \$ pour développer des bornes de recharge adaptées au climat québécois<sup>60</sup>. En 2014, cette entreprise a ouvert une usine de fabrication de bornes de recharge à Shawinigan<sup>61</sup>. Cependant, suite à l'élection de 2014, le gouvernement du Québec n'a pas encore dévoilé un nouveau plan d'action sur l'électrification des transports publics<sup>62</sup>.

## 1.4 La réalisation de réseaux de distribution intelligents

Au Québec, Hydro-Québec a installé près de deux millions de compteurs intelligents jusqu'à présent et prévoit accroître ce nombre jusqu'à 3,8 millions d'ici 2018<sup>63</sup>. De plus, l'IREQ teste actuellement un projet de réseau intelligent adaptatif à la demande (CATVAR) à Boucherville, composé de 247 km de réseau et regroupant 13 500 clients (56 % résidentiel, 41 % commercial et 3 % industriel)<sup>64</sup>. Ce projet s'inscrit dans le Plan d'action de développement durable 2013-2016 d'Hydro-Québec (2013b).

Un rapport de Ressources naturelles Canada (Hiscock et Beauvais 2013) indique que 37 projets de réseaux électriques intelligents sont en cours au Canada et que 49 % des compteurs à l'intérieur du pays sont intelligents. En Nouvelle-Écosse, où l'électricité est disponible à un tarif variable en fonction de la demande, plus de 10 000 compteurs intelligents capables de s'adapter à la variation du prix ont été installés dans la province (Hiscock et Beauvais 2013).

Aux États-Unis, le premier réseau électrique intelligent complet de grande envergure a été déployé en 2013 en Floride<sup>65</sup>. Selon un rapport de la Commission européenne (Catalin et collab. 2014), 459 projets de réseaux électriques intelligents sont actuellement en cours dans 47 pays d'Europe, avec un financement global de 3,15 G€. Parmi ceux-ci, on compte 211 projets de R ET D et 248 projets déployés.

En ce qui concerne la recharge intelligente, l'entreprise québécoise AddÉnergie, associée au concepteur et fabricant d'équipements Gentec basé à Québec, conçoit, développe et commercialise des systèmes de bornes de recharge intelligentes (gouvernement du Québec 2011). Ces bornes permettent d'ajuster la recharge en fonction de la demande sur le réseau ou d'imposer une limite sur la recharge à des moments spécifiques (jours et heures), par exemple, entre 17 h et 19 h l'hiver (Tremblay et Desjardins 2010). Cette compagnie travaille également à la mise en place d'un système de gestion de réseau de bornes de recharge pour véhicules électriques, un projet financé par le programme de recherche canadien d'Initiative écoÉNERGIE sur l'innovation<sup>66</sup>. La compagnie américaine Itron<sup>67</sup> offre des chargeurs de niveau 2 disposant de capteurs pour effectuer le suivi des habitudes des utilisateurs et s'intégrant au réseau intelligent

---

58. « Remboursement pour les bornes de recharge. » Québec roule à puissance verte!, consulté le 10 novembre, 2014. <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/particuliers/remboursement.asp>.

59. « Remboursement pour les bornes de recharge. » Québec roule à puissance verte!, consulté le 10 novembre, 2014. <http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/entreprises/remboursement.asp>.

60. Béline, F. « Le Gouvernement du Québec soutient AddÉnergie. » AddÉnergie Technologies (Blog), 19 mars, 2011. <http://blog.addenergietechnologies.com/actualites-addenergie/le-gouvernement-du-quebec-soutient-addenergie/>.

61. Équipe AddÉnergie. « Des milliers de bornes de recharge sortiront de l'usine AddÉnergie de Shawinigan avec le label "fabriqué au Québec". » AddÉnergie Technologies (Blog), 25 février, 2014. <http://blog.addenergietechnologies.com/actualites-addenergie/des-milliers-de-bornes-de-recharge-sortiront-de-lusine-addenergie-de-shawinigan-avec-le-label-fabrique-au-quebec/>.

62. Bourque, O. « Confusion entourant le plan d'électrification libéral. » Canoë.ca, 17 juin, 2015.

63. Cousineau, J.-C. « Hydro-Québec a installé près de 1,4 million de compteurs de nouvelle génération. » Éco-Énergie à Montréal, 9 avril, 2014.

64. « Démonstration d'une zone de réseau interactif, Hydro-Québec – Institut de recherche. » Ressources Naturelles Canada, modifié la dernière fois le 7 octobre, 2014. <http://www.rncan.gc.ca/energie/financement/programmes-financement-actuels/fep/4958>.

65. Bullis, K. « With Florida project, the smart grid has arrived. » MIT Technology Review, 2 mai, 2013.

66. « Démonstration commerciale d'un système de gestion pour réseaux de bornes de recharge pour véhicules électriques. » Ressources Naturelles Canada, modifié la dernière fois le 16 juin, 2014. <http://www.rncan.gc.ca/energie/financement/programmes-financement-actuels/iei/16158>.

67. « Electric vehicle smart charging station. » Itron, consulté le 10 novembre, 2014. <https://www.itron.com/na/productsAndServices/Pages/Electric%20Vehicle%20Smart%20Charging%20Station.aspx>.

Itron OpenWay. La compagnie américaine AeroVironment<sup>68, 69</sup> propose également des bornes intelligentes de niveau 2 qui concentrent la recharge quand le coût de l'énergie est plus bas.

### 1.4.1 La recherche et le développement

L'IREQ<sup>70</sup> a lancé en 2012 un projet d'expérimentation sur les concepts d'échange d'énergie V2G et V2H (véhicule-to-home, véhicule-vers-maison) en collaboration avec les compagnies TM4, B3CG Interconnect, Briconcept et le Centre National du Transport Avancé (CNTA) de Saint-Jérôme. Dans le cadre de ce projet, l'IREQ soutient le développement d'une borne de recharge bidirectionnelle avancée. Le Groupe de recherche en électronique de puissance et commande industrielle (GREPCI) de l'École de technologie supérieure à Montréal s'intéresse également, entre autres, aux réseaux de distribution intelligents et au V2G.

En 2012, l'Ontario a accueilli le IBM Canada Research and Development Centre. Ce centre de recherche soutenu par un consortium de sept universités canadiennes couvre un éventail de projets d'infonuagique et de données massives (big data), dont les réseaux électriques intelligents (Hiscock et Beauvais 2013). La même année, toujours en Ontario, GE Canada a démarré le Grid IQTM Global Innovation Centre pour favoriser l'innovation et la collaboration dans des projets visant à améliorer l'efficacité du réseau, sa fiabilité et sa sécurité (Hiscock et Beauvais 2013). En 2013, Siemens Canada a démarré le Smart Grid Centre of Competence au Nouveau-Brunswick. En partenariat avec New Brunswick Power, ce centre assurera le développement et le déploiement de logiciels pour les réseaux électriques intelligents dans le but de moderniser le réseau de distribution actuel. À cet effet, Siemens est actuellement à la recherche de partenaires dans les institutions universitaires (Hiscock et Beauvais 2013).

Le NSMG-NET<sup>71</sup>, un réseau stratégique du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG), regroupe plusieurs partenaires dans la recherche et le développement de réseaux de distribution intelligents. Il regroupe des chercheurs des milieux universitaires suivants : British Columbia Institute of Technology, Université de Toronto, Université McGill, Université du Nouveau-Brunswick, Université de Waterloo, Université du Manitoba and Université Ryerson. Parmi les organisations partenaires, on retrouve entre autres : Hydro-Québec, BC Hydro, Ontario Power Authority, et Énergie NB Power.

Plusieurs chercheurs universitaires, entreprises et organisations (dont Hydro-Québec) font partie de SmartGrid Canada, un regroupement organisant chaque année la SmartGrid Canada Conference et visant, entre autres, à promouvoir l'intérêt et le développement de réseaux de distribution intelligents<sup>72</sup>.

### 1.4.2 Les impacts économiques et autres bénéfiques

Selon Faruqui et collab. (2010), une répartition de la demande généralement concentrée en pics, grâce à la recharge intelligente, pourrait réduire de 67 G€ les coûts associés à la capacité de production et de transmission électrique. Selon McKinsey<sup>73</sup>, un réseau électrique intelligent complètement déployé sur le territoire américain pourrait générer jusqu'à 130 G\$US d'ici 2019. Le National Energy Technology Laboratory (2007) indique que même une estimation prudente prévoit des économies annuelles potentielles liées à la modernisation du réseau de distribution électrique à 40 G\$ US. En plus de ces économies, les réseaux électriques intelligents apportent plusieurs autres bénéfices sociaux et économiques comme la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, l'intégration de sources d'énergies renouvelables, l'amélioration de la fiabilité du réseau et la réduction des coûts opérationnels (Fan et collab. 2013).

Les réseaux électriques intelligents permettent également de décentraliser la production d'énergie. Ce n'est plus seulement l'État ou une entreprise privée qui sont producteurs. Les citoyens peuvent également produire de l'électricité à leurs domiciles par des sources d'énergie alternatives que sont les éoliennes, panneaux solaires ou installations géothermiques. L'énergie produite peut aller dans le réseau électrique et être payée au citoyen-producteur selon le tarif en vigueur à ce moment. On envisage dans ce nouveau paradigme énergétique (Rifkin 2012) un ensemble de petits citoyens-producteurs intégrés dans un système hautement efficace.

---

68. « Connect to the grid with smart home charging. » AeroVironment, consulté le 10 novembre, 2014. [http://evsolutions.avinc.com/products/multi-unit/smart\\_charging\\_station1](http://evsolutions.avinc.com/products/multi-unit/smart_charging_station1).

69. « Turning garages into filling stations of the future. » AeroVironment, consulté le 10 novembre, 2014. [http://evsolutions.avinc.com/products/workplace/evcharging\\_station2](http://evsolutions.avinc.com/products/workplace/evcharging_station2).

70. « Hydro-Québec lance un projet d'expérimentation touchant les véhicules rechargeables et le réseau électrique. » CNW Telbec, 3 mai, 2012.

71. NSMG-NET, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.smart-microgrid.ca/>.

72. SmartGrid Canada, consulté le 17 novembre, 2014. <http://smartgridcanadaconf.ca/>.

73. Booth, A., Greene, M. et Tai, H. « U.S. smart grid value at stake: The \$130 billion question. » McKinsey Report on Smart Grid, Juin, 2012.

### 1.4.3 Les politiques publiques

Les réseaux de distribution intelligents sont sur le radar du gouvernement canadien<sup>74</sup>, notamment avec CanmetÉNERGIE, considéré comme un « chef de file canadien en matière de développement technologique et de recherche se rapportant à l'énergie propre »<sup>75</sup> et avec un centre de recherche à Varennes, au Québec<sup>76</sup>.

Parmi les enjeux de réalisation importants, on retrouve la nécessité d'établir des standards ouverts de réseaux de distribution (Fan et collab. 2013). C'est pourquoi la SunSpec Alliance, un regroupement de participants de l'industrie de l'énergie, visant à définir des standards pour faciliter l'interopérabilité des systèmes. Cette alliance développe actuellement des standards non propriétaires de communications et de stockages d'énergie dans le but de réduire les coûts, promouvoir l'innovation technologique et accélérer la croissance industrielle (SunSpec Alliance 2012). Au Canada, une feuille de route a été présentée par le CNC/IEC Task Force on Smart Grid Technology and Standards (2012) du Conseil canadien des normes pour faire progresser les standards en vue du déploiement du réseau électrique intelligent canadien et soutenir un réseau électrique intelligent nord-américain.

Dans son mandat M/441, la Commission européenne (2009) attribuait au CEN (European Committee for Standardization), au CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) et à l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) la tâche d'établir des standards européens pour permettre l'interopérabilité des différents compteurs pour améliorer la connaissance de l'état des réseaux et de la consommation réelle d'énergie, permettant ainsi d'adapter dynamiquement la demande, afin d'en faire des compteurs intelligents. Ces travaux sont poursuivis et étendus dans le mandat M/490 (Commission européenne, 2011) visant le développement et la mise à jour d'une « série de standards cohérents au sein d'un cadre européen commun intégrant diverses technologies numériques de calcul et de communication et des architectures électriques, avec les processus et services associés. »

---

74. « Smart grid. » Ressources naturelles Canada, modifié la dernière fois le 22 janvier, 2014.  
<http://www.mcan.gc.ca/energie/electricite-infrastructures/smart-grid/4566>.

75. « CanmetÉNERGIE. » Ressources naturelles Canada, modifié la dernière fois le 28 mai, 2014.  
<http://www.mcan.gc.ca/energie/bureaux-labos/canmet/5716>.

76. « Centre de recherche de Varennes (QC). » Ressources naturelles Canada, modifié la dernière fois le 22 janvier, 2014.  
<http://www.mcan.gc.ca/energie/bureaux-labos/canmet/varennes/5762>.

# Chapitre 2

## L'électrification des transports publics et de marchandises

Ce chapitre s'intéresse à l'électrification des gros moyens de transport, notamment les autobus, les trains et les camions utilisés dans le transport public et de marchandises. Pour ces deux types de transport, la pression du volume oblige à réinventer les façons de faire.

L'utilisation des transports publics de personnes est en hausse partout dans le monde. Aux États-Unis, elle a atteint son plus haut niveau en 57 ans, avec 10,7 milliards de voyages. Entre 1995 et 2013, son taux de croissance (37,2 %) a été presque le double de celui de la population<sup>77</sup>. Il en est de même au Québec. Par exemple, l'achalandage de la Société de transport de Montréal a connue une croissance de 15 % entre 2006 et 2012, ce qui dépasse largement ses objectifs (STM 2013). Dans son plan stratégique, elle vise une augmentation de 40 % entre 2010 et 2020 (STM 2014). À Québec, cette augmentation entre 2005 et 2013 a été de 23,5 % (RTC 2013).

Le transport des marchandises constitue un enjeu colossal. En effet, la croissance économique se traduit en volumes à transporter. Au Canada, même si le principal moyen de transport des marchandises reste le train, la place des camions est de plus en plus importante. Entre 1990 et 2008, au Canada, le nombre de camions est passé de 1,9 à 3,2 millions, soit une hausse de 68 %, alors que les kilomètres parcourus connaissaient une croissance de 260 % (Office de l'efficacité énergétique 2010). Dans le même temps, selon les données de Statistiques Canada<sup>78</sup>, le PIB augmentait de 74 %. Ainsi, chaque point de croissance s'est traduit par une augmentation de 3,8 % du nombre de kilomètres parcourus par des camions. L'économie est de plus en plus dépendante des camions. D'autant que les nouvelles méthodes de production et de distribution visant à limiter les stocks et à raccourcir les délais de livraison nécessitent des modes de livraison de plus en plus souples et réactifs. Ce qui constitue le principal avantage des camions. Selon le Gouvernement du Québec (2011), la dépendance au pétrole du Québec se retrouve essentiellement dans le secteur du transport routier, qui occasionne la plus grosse partie des émissions de gaz à effets de serre. De plus, le réseau de production hydro-électrique, qui a amené des emprunts considérables lors de sa construction et qui nécessite des dépenses importantes pour se maintenir, pourrait contribuer à une dynamique de transport électrifié qui justifierait encore plus les choix énergétiques du passé et du présent.

Ce chapitre débute par un état de l'art des technologies appliquées aux véhicules électriques destinés au transport public de personnes et au transport de marchandises. La mise en application, soit l'électrification des camions, des autobus et des véhicules sur rails, est ensuite présentée aux sections 2.2, 2.3 et 2.4. Les impacts économiques, environnementaux ainsi que les politiques publiques associés y sont discutés. La section 2.5 présente ensuite de nouveaux concepts de véhicules de transport public électrique actuellement utilisés de par le monde. Finalement, la section 2.6 ouvre la discussion sur l'adoption de nouveaux systèmes de transport.

### 2.1 La technologie

Cette section survole l'état de la technologie actuelle dans une optique d'électrification à batterie des autobus et des camions de marchandises. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques physiques et de recharge de camions électriques disponibles sur le marché. Les données proviennent des sites Internet des compagnies<sup>79, 80, 81</sup>. Ces formats correspondent aux camions de livraison urbaine. Il faut également savoir que la Smith a cessé la production de ses camions électriques vers la fin 2013, pour cause de manque de profit. En 2012, leurs véhicules Newton se vendaient 75 000 \$ US (sans la batterie). Il fallait compter entre 25 000 \$ US et 75 000 \$ US de plus pour la batterie en fonction

77. « Public transportation use is growing. » American Public Transportation Association, 10 mars, 2014.

78. « Produit intérieur brut (PIB). » Statistiques Canada, modifié la dernière fois le 8 novembre, 2013. <http://www.statcan.gc.ca/nea-cen/list-liste/gdp-pib-fra.htm>.

79. « Models and configurations. » Smith Electric, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.smithelectric.com/smith-vehicles/models-and-configurations/>.

80. « Der bessere lastwagen. » E-FORCE, consulté le 14 novembre, 2014. <http://eforce.ch/eforce/leistungsdaten/>.

81. « e-Truck. » EMOSS, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.emoss.biz/electric-truck>.

des capacités désirées<sup>82</sup>. Par exemple, ceux utilisés par la compagnie Frito-Lay se vendaient entre 85 000 \$ US et 95 000 \$ US, comparativement à 60 000 \$ US pour un camion diesel équivalent<sup>83</sup>.

TABLEAU 2.1 Caractéristiques physiques et de recharge pour différents camions électriques

Véhicule	Charge utile (kg)	Énergie (kWh)	Autonomie (km)	Specs du chargeur (kW, V)	Temps de recharge (heures)
Smith Newton	6400 - 12 000	80 - 120	65 - 160	12 /18, 208 - 240	8
Smith Edison	3500 - 4600	36 - 51	90 - 160	12 /18, 208 - 240	6 - 8
E-FORCE	10 000	2 x 120	200 - 300	2 x 22, 350	6
EMOSS e-Truck	6500 - 11500	120 - 240	150 - 250	22 /44, 380 - 700	2,8 - 5,5 /5,5 - 11

En ce qui concerne le prix des autobus électriques, à capacité égale, le Proterra coûte environ 825 000 \$ US, comparativement à 593 000 \$ US pour un hybride diesel et 447 000 \$ US pour un diesel<sup>84</sup>.

## 2.1.1 Les batteries

Les technologies de batteries existantes ainsi que les entreprises actives dans leur développement sont présentées à la section 1.1.1 et leurs caractéristiques sont résumées au tableau 1.1. Tout comme pour les véhicules individuels, les batteries basées sur la technologie lithium-ion sont les plus utilisées dans les camions de livraison et dans les autobus électriques. La compagnie britannique Network Rail, en coopération avec Bombardier, l'opérateur Greater Anglia et le Département des Transports britannique, expérimente actuellement l'utilisation de batteries lithium-fer-magnésium-phosphate, produites par Valence Technology, pour permettre aux trains de couvrir des portions de rails non électrifiées<sup>85</sup>.

La technologie de batterie actuelle permet d'alimenter des autobus (de ville) de 12 m de long et d'une autonomie allant jusqu'à 250 km<sup>86</sup>. Le tableau 2.1 montre que la technologie de batterie actuelle permet d'alimenter des camions de livraison d'une charge utile se situant entre 3500 et 12 000 kg, avec une autonomie de 65 à 300 km. Il faut savoir que les configurations de taille/charge utile et de batteries disponibles sont généralement flexibles et configurables, ce qui explique la grande variabilité dans les mesures de charges utiles, de quantité d'énergie et d'autonomie. La compagnie Smith, par exemple, collabore avec A123 Systems et Valence Technology pour offrir des combinaisons de batteries personnalisées à ses clients. Les batteries sont généralement conçues pour une durée de vie d'au moins 150 000 miles (241 000 km) (Lee, Thomas et Brown 2013).

Évidemment, l'autonomie des véhicules destinés aux transports publics et de marchandises est influencée par la charge du véhicule en question. De plus, comme pour les véhicules individuels, l'autonomie est influencée par l'utilisation du chauffage et de l'air conditionné. Finalement, l'autonomie est également influencée par la vitesse des accélérations et les décélérations, donc par les comportements de conduite. Comme les camions de livraison et les autobus sont soumis à de fréquentes accélérations et décélérations, de bonnes habitudes de conduite de la part des chauffeurs peuvent contribuer à étendre l'autonomie de ces véhicules (Li 2014).

## 2.1.2 La recharge

Plusieurs modes de recharge sont offerts pour les autobus électriques. Ceux-ci diffèrent en fonction des compagnies. Par exemple :

82. Cassidi, W. B. « Smith Electric Vehicles halts truck production. » JOC, 16 avril, 2014.

83. Motavalli, J. « Frito-Lay adds electric trucks to its fleet. » The New York Times (Blog), 8 septembre, 2010. [http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/09/08/frito-lay-adds-electric-trucks-to-its-fleet/?\\_r=0](http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/09/08/frito-lay-adds-electric-trucks-to-its-fleet/?_r=0).

84. Gross, D. « Compared to cars, electric buses could accelerate pollution reduction, fuel savings. » Chicago Tribune, 8 septembre, 2014.

85. Smith, K. « Network Rail steps up tests of batteries for emus. » International Railway Journal, 26 novembre, 2013.

86. « Electric bus. » BYD, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.byd.com/na/auto/ElectricBus.html>.



- Les autobus BYD sont rechargeables en courant alternatif à grande puissance (2 x 30 kW, 480 V) en 5 heures ou à très grande puissance (2 x 100 kW, 480 V) en 1,6 heure.
- Les EMOSS e-Bus sont rechargeables en courant alternatif et à moyenne grande puissance (13,3 à 44 kW, 380 V) en 7 heures avec leur chargeur embarqué. Ils sont également rechargeables rapidement, en 4 à 7 minutes, à très grande puissance par induction (60 à 120 kW) avec le chargeur IPT – Conductix Wampfler<sup>87</sup> et par conduction (120 à 200 kW) avec le chargeur Pantograph – Optrid<sup>88</sup>.
- Bombardier propose également un chargeur par induction (200 kW) pour ses autobus électriques PRIMOVE<sup>89</sup>. Les premiers bus exploitant cette technologie ont été mis en service commercial à partir de janvier 2014 dans la ville de Brunswick en Allemagne<sup>90</sup>.
- Hybricon propose des stations de recharge ultrarapides par conduction à très grande puissance (100 à 1000 kW) permettant de recharger leurs autobus en 5 minutes (pour 60 minutes d'autonomie)<sup>91</sup>. Le principe des autobus Hybricon est de recharger fréquemment les véhicules aux arrêts. D'autres entreprises telles Proterra<sup>92</sup>, Rampini – Siemens<sup>93</sup> et TOSA<sup>94</sup> offrent également des autobus électriques conçus pour se recharger rapidement de borne en borne au long d'un parcours.

Comme pour les autobus, le tableau 2.1 montre que les caractéristiques de recharge des camions électriques sont plus variées que pour les véhicules individuels (présentées au tableau 1.1). On remarque que les chargeurs utilisés par les camions électriques requièrent également des tensions typiquement plus élevées que les systèmes de recharges définis pour les voitures présentés à la section 1.1.2. Siemens a travaillé au développement d'une solution permettant l'électrification des camions sur de longues distances : la eHighway<sup>95</sup>. L'idée est d'installer une caténaire au-dessus de la voie extérieure d'une route. Des camions adaptés utilisent un pantographe pour se connecter à cette source d'électricité. Ces véhicules ont une motorisation hybride capable de fonctionner à l'électrique ou avec un moteur classique lorsqu'ils se déconnectent. Cette technologie permet de bénéficier des avantages du moteur électrique sur de longues distances sur des axes majeurs ayant un flux important de camions, tout en conservant la capacité des camions à desservir n'importe quel point. L'installation d'une Siemens eHighway en Californie devrait débuter en 2015<sup>96</sup>.

### 2.1.3 Les réseaux électriques

Supposons que les 1721 autobus de la Société de transport de Montréal (STM 2014b) ainsi que les 613 autobus du Réseau de transport de la Capitale<sup>97</sup> soient des autobus électriques de marque BYD, comme ceux en essai actuellement à Montréal<sup>98</sup>. S'ils devaient tous être rechargés simultanément avec des chargeurs rapides de 2 x 100 kW = 200 kW, la puissance requise serait de 466,8 MW. Considérant que la puissance de pointe pour les besoins québécois en 2013 était de 39 031 MW (Hydro-Québec 2013), la puissance additionnelle requise par cette recharge correspondrait à 1,2 % de la puissance actuelle.

Sachant que les autobus BYD disposent chacun d'une batterie de 324 kWh leur procurant 250 km d'autonomie, on en déduit que leur moteur consomme environ 1,3 kWh au kilomètre. Sachant que les autobus parcourent annuellement

- 
87. « Inductive power transfer IPT. » Conductix-Wampfler USA, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer-iptr>.
  88. « Optrid b sbaar. » Optrid, consulté le 14 novembre, 2014. [http://optrid.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=52&Itemid=58&lang=en](http://optrid.com/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=58&lang=en).
  89. « Primove. » Bombardier, consulté le 14 novembre, 2014. <http://primove.bombardier.com/fr/>.
  90. Torregrossa M. « LepremierbusélectriqueàinductionPrimoveentreenserviceàBrunswick. » avem, 1er avril, 2014. <http://www.avem.fr/actualite-allemande-le-premier-bus-electrique-a-induction-primove-entre-en-service-a-brunswick-4894.html>
  91. « Hybricon charging solutions. » Hybricon, consulté le 14 novembre, 2014. <http://hybricon.se/word/projects/charging-solutions/>.
  92. « Charging / Battery technology. » Proterra, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.proterra.com/product-tech/charging-battery-technology/>.
  93. « Electric Buses: Rapid Charging in Vienna . » Siemens. Consulté le 24 novembre, 2014. <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors/electric-mobility-electric-buses.html>
  94. « Flash mobility. Clean city. Smart bus. » TOSA, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.tosa2013.com/fr/#/tosa2013>.
  95. « Electric-powered road freight traffic. » Siemens, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/road-solutions/electric-powered-hgv-traffic-eHighway/>.
  96. « Building the world's first eHighway in California. » Thinking Highways, 31 mars, 2015.
  97. « L'entreprise. » Réseau de transport de la Capitale, consulté le 25 septembre, 2014. <http://www.rtcquebec.ca/Default.aspx?tabid=121&language=fr-CA>.
  98. « En route vers l'électrification! La STM débute les essais du bus chinois BYD à propulsion entièrement électrique en service clientèle. » Société de transport de Montréal, 26 mars, 2014. <http://www.stm.info/fr/presse/communiqués/2014/en-route-vers-l-electrification---la-stm-debute-les-essais-du-bus-chinois-byd-a-propulsion-entierement-electrique-en-service-clientele>.

un total de 90 millions de kilomètres à Montréal et 33 millions de kilomètres à Québec, la consommation totale d'énergie par l'ensemble de ces véhicules serait d'environ 0,16 TWh/an. Considérant que les ventes d'électricité au Québec par Hydro-Québec atteignaient 173,3 TWh en 2013 (Hydro-Québec 2013), l'énergie requise par l'ensemble des autobus électriques de Montréal et de Québec représenterait une augmentation de moins de 0,1 % de l'énergie utilisée actuellement par le Québec.

## 2.2 L'électrification des camions

### 2.2.1 Un état des lieux

Du fait de leur autonomie réduite, les camions entièrement électriques à batterie ont deux usages ciblés : les livraisons en milieu urbain et en région ainsi que les activités spécialisées. En plus de réduire la pollution, les camions électriques présentent des avantages pour la livraison en centre-ville. Comme leurs nuisances sonores sont réduites, des réglementations adaptées pourraient leur permettre de livrer la nuit. Cela pourrait réduire les congestions en éliminant des camions sur les routes durant la journée et diminuer les coûts de livraison. Rappelons que selon l'association du camionnage du Québec, chaque heure dans un embouteillage coûte entre 12,5 % et 13,5 % des revenus générés<sup>99</sup>.

L'entreprise québécoise Véhicules Volt-Age<sup>100</sup> fabrique des camions tout électriques destinés à un usage urbain pouvant transporter jusqu'à 450 kg. L'entreprise canadienne PACCAR<sup>101</sup> offre des camions de classe 7 hybrides (diesels-électriques). Aux États-Unis, Siemens a annoncé la construction d'une portion d'eHighway sur l'Interstate 710 qui relie Long Beach à Alhambra en passant par Los Angeles. Les camions devraient pouvoir commencer à rouler en juillet 2015 pour un test qui devrait durer un an<sup>102</sup>. À l'international, la compagnie suisse E-FORCE<sup>103</sup> offre des camions tout électriques pouvant transporter jusqu'à 10 000 kg et la compagnie néerlandaise EMOSS<sup>104</sup> offre des camions tout électriques de pouvant transporter jusqu'à 11 500 kg.

### 2.2.2 Les impacts économiques sur les compagnies

Le prix d'acquisition plus élevé des camions électriques face à leurs équivalents à diesel a été mentionné précédemment à la section 2.1. Dans l'exemple utilisé, des camions électriques (Smith Newton) ont été acquis par la compagnie Frito-Lay à un coût se situant entre 85 000 \$ US et 95 000 \$ US, comparativement à 60 000 \$ US pour un camion diesel équivalent. Cependant, le coût d'utilisation d'un camion électrique est estimé à moins de 10 ¢/mile, comparativement à 40 ¢/mile pour un camion diesel équivalent. De plus, le coût d'entretien est estimé à 10 ¢/mile pour le camion électrique, comparativement à 20 à 30 ¢/mile pour un camion diesel équivalent. Le tout se résume donc à une économie de 50 000 \$ US sur la vie du camion<sup>105</sup>. Un autre exemple est celui de la compagnie Duane Reade, pour laquelle il a été évalué qu'un camion électrique Smith Newton deviendrait rentable après six ans d'utilisation en assumant que le prix du diesel se maintienne en haut de 4 \$ US/gallon<sup>106</sup>.

Si l'on retourne maintenant vers des avantages strictement économiques, et en anticipant quelque peu les éléments présentés au chapitre 4, il importe de mentionner que la filière des véhicules électriques est en pleine expansion en Amérique du Nord, en Europe et en Asie (Plan d'action sur les véhicules électriques 2011-2010). Cette filière est porteuse de possibilités d'emploi et de perspective d'exportation dont le Québec pourrait profiter. Si le Québec n'est pas un joueur majeur pour ce qui est de la production de véhicules à moteur à combustion interne, la situation pourrait être différente dans le cas des activités reliées aux transports électrifiés, pour toutes sortes de raisons, parmi lesquelles son infrastructure hydro-électrique, mais aussi parce qu'on peut penser que les joueurs et les modèles d'affaires du transport électrifié pourraient être différents. D'ailleurs, on a déjà des signes de ce passage actuellement.

99. Bisson, B. « Des pertes de 65\$ à 85\$ l'heure. » La Presse, 9 septembre, 2010.

100. NEMO, consulté le 22 novembre, 2014. [http://www.nev-nemo.com/Nemo/\\_\\_\\_\\_\\_ .html](http://www.nev-nemo.com/Nemo/_____ .html).

101. PACCAR, consulté le 22 novembre, 2014. <http://www.paccar.com/>.

102. Hanley, S. « Siemens eHighway comes to California in 2015. » GAS2, 8 août, 2014.

103. E-FORCE, consulté le 22 novembre, 2014. <http://eforce.ch/>.

104. e-MOSS, consulté le 22 novembre, 2014. <http://www.emoss.biz/electric-truck>.

105. Motavalli, J. « Frito-Lay adds electric trucks to its fleet. » The New York Times (Blog), 8 septembre, 2010.

[http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/09/08/frito-lay-adds-electric-trucks-to-its-fleet/?\\_r=0](http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/09/08/frito-lay-adds-electric-trucks-to-its-fleet/?_r=0).

106. Davies, A. « These electric delivery vehicles are about to take over the streets of NYC. » Business Insider, 5 septembre, 2012.

## 2.2.3 Les impacts environnementaux

Frito-Lay a estimé que l'utilisation de 176 camions électriques (Smith Newton) pour la livraison urbaine leur permettrait de réduire leur consommation de diesel de 500 000 gallons/an<sup>107</sup>. Lee, Thomas et Brown (2013) indiquent qu'aux États-Unis, les camions de livraison urbaine consomment environ 30 % moins d'énergie et émettent environ 40 % moins de gaz à effet de serre, comparativement à leurs homologues au diesel. Cependant, ces données sont fortement influencées par les conditions d'utilisation du véhicule. Dans un contexte de livraison urbaine, donc avec beaucoup d'arrêts, l'utilisation de camions électriques permet de réduire de près de 50 % les émissions de gaz à effet de serre. Hors des villes, les camions électriques perdent cependant leur avantage parce que la vitesse est généralement plus élevée et qu'ils ne bénéficient plus du freinage régénératif produit lors des arrêts fréquents<sup>108</sup>.

## 2.2.4 Les politiques publiques

En matière de politiques publiques pour l'électrification du transport par camion, de 2009 à 2014, le Programme d'aide gouvernementale à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le transport des marchandises comportait l'octroi d'une subvention pour les camions hybrides et électriques équivalant à 30 % de la différence par rapport à un camion à combustion interne, jusqu'à concurrence de 15 000 \$ par véhicule. Les entreprises et les municipalités étaient admissibles à ce programme doté d'un budget global de 45 M\$, dont 27 M\$ pour le volet camionnage (gouvernement du Québec 2011).

Afin de bonifier l'aide, le gouvernement du Québec annonçait, en mars 2010, un nouveau taux de réduction pour amortissement de 60 % (l'ancien taux était de 40 %) pour les camions neufs, hybrides ou électriques, destinés au transport de marchandises et dont le poids excède 11 778 kg. Cette mesure visait à soutenir l'industrie du camionnage face au coût élevé des moteurs de nouvelle génération et à assurer sa participation à la démarche de réduction des gaz à effet de serre (gouvernement du Québec 2011).

## 2.3 L'électrification du transport par autobus

### 2.3.1 Un état des lieux

Au Québec, l'électrification du transport par autobus en est à ses balbutiements, tel qu'indiqué au tableau 2.2. La capitale nationale a fait figure de pionnière<sup>109</sup> avec ses huit Écolobus, des petits bus électriques, en fonction depuis 2008. En 2015, le Réseau de transport de la Capitale prévoit les remplacer par des « midibus » de plus grande taille et envisage de tripler leur nombre d'ici 2016<sup>110</sup>. Cependant, le Plan d'action 2011-2020 du Québec (gouvernement du Québec 2011) est ambitieux. L'objectif est que 95 % des déplacements en transport collectif devront recourir à l'électricité d'ici 2030 pour faire du Québec un leader mondial dans ce secteur d'avenir.

TABLEAU 2.2 Les autobus électriques au Québec – situation et perspectives

Société de transport	Projets
Réseau de transport de la Capitale	<ul style="list-style-type: none"><li>• Huit Écolobus Tecnobus (Italie): depuis 2008</li><li>• Les Écolobus seront remplacés en 2015 par des « midibus »</li><li>• Vise à posséder 24 « midibus » en service d'ici 2016</li></ul>
Société de transport de Laval	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bus DesignLine (États-Unis): en cours de test</li><li>• Vise l'acquisition de bus entièrement électriques en 2018</li></ul>
Société de transport de Montréal	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bus BYD (Chine): testé de mars à avril 2014</li><li>• Trois bus Nova Bus (Canada): livraison fin 2015 pour un test en situation réelle d'une durée de trois ans</li><li>• Vise l'acquisition de bus entièrement électriques en 2025</li></ul>
Réseau de transport de Longueuil	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vise l'acquisition de bus entièrement électriques en 2020</li></ul>

107. Motavalli, J. « Frito-Lay adds electric trucks to its fleet. » The New York Times (Blog), 8 septembre, 2010. [http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/09/08/frito-lay-adds-electric-trucks-to-its-fleet/?\\_r=0](http://wheels.blogs.nytimes.com/2010/09/08/frito-lay-adds-electric-trucks-to-its-fleet/?_r=0).

108. « Diesel or electric? Study offers advice for owners of urban delivery truck fleets. » Georgia Tech, 25 septembre, 2013. <http://www.isye.gatech.edu/news-events/news/release.php?nid=240231>.

109. Champagne, S. « Le transport électrique en chiffres. » La Presse, 19 juin, 2014.

110. Morin, A. « Le RTC remplacera les Écolobus par des “midibus”. » La Presse, 12 décembre, 2013.

Réunies au sein de la Société de gestion et d'acquisition de véhicules de transport, les neuf sociétés de transport en commun du Québec ont décidé d'un passage progressif à l'électricité. L'objectif est de prendre le temps d'évaluer les technologies disponibles, de faire les apprentissages nécessaires et de sensibiliser les fournisseurs aux besoins des sociétés et d'assurer les implications des instances gouvernementales (AVT 2013). Une première étape est le passage aux autobus hybrides, dont 475 devraient être livrés à partir de 2014. Par la suite, les sociétés chercheront à réduire l'utilisation du moteur diesel en électrifiant plusieurs composantes. Dans cette optique, un bus électrique chinois BYD a été testé par la Société de transport de l'Outaouais en 2013 et par la Société de transport de Montréal de janvier à avril 2014<sup>111</sup>. La Société de transport de Laval teste quant à elle un bus de DesignLine, une entreprise de Caroline du Nord qui a fait faillite fin 2013<sup>112</sup>. En parallèle, des évaluations seront menées sur des autobus électriques disponibles et des études seront lancées sur l'implantation d'un réseau de trolleybus, des autobus électriques alimentés à même des lignes électriques grâce à une perche (trolley)<sup>113</sup>.

À Montréal, « la Société de transport de Montréal ambitionne de devenir la meilleure société de transport public au monde dans sa catégorie ». Elle sera la première ville nord-américaine à s'engager dans un projet pilote d'autobus entièrement électriques<sup>114</sup>. Les bus seront développés par le fabricant canadien Nova Bus, une division nord-américaine de Volvo basée à Saint-Eustache. Trois bus de type préproduction seront livrés à la fin 2015 pour suivre un programme de trois ans d'essais en situation réelle d'exploitation. La technologie de recharge rapide par conduction développée par Volvo est déjà utilisée en Europe. Elle permet de n'avoir que deux stations de recharge installées à chaque bout de ligne. Les bus électriques se rechargeront donc en fin de parcours.

L'horizon temporel annoncé par les sociétés de transport public situe la migration vers les bus électriques au cours de la décennie 2020. La Société de transport de Montréal vise l'acquisition de véhicules entièrement électriques à partir de 2025<sup>115</sup>, le Réseau de transport de Longueuil à partir de 2020<sup>116</sup>. La Société de transport de Laval vise plutôt 2018 en évitant la génération hybride<sup>117</sup>. Cette perspective est cohérente avec ce que l'on peut observer ailleurs. Par exemple, la RATP de Paris vise de finir sa migration en 2025<sup>118</sup>. Ajoutons qu'après trois ans de développement, le premier autobus électrique de transport scolaire au monde a été présenté en octobre 2014. Appuyé par une aide financière gouvernementale de 675 000\$, il a été développé par quatre partenaires québécois : le manufacturier Autobus Lion, le Centre national du transport avancé (CNTA), B3CG, fabricant expert en électromécanique de systèmes, et TM4, chef de file dans les technologies de moteurs électriques. Il intègre des technologies de pointe comme une carrosserie en matériaux composites et un moteur à prise directe, qui permet de gagner en efficacité et en fiabilité en éliminant la transmission. Cet autobus a une autonomie de 120 km<sup>119</sup>.

## 2.3.2 Les impacts économiques

Il est estimé qu'aux États-Unis, un autobus au diesel consomme entre 500 000 \$ US et 600 000 \$ US de carburant durant sa vie (12 ans) alors qu'un autobus électrique consommerait environ 80 000 \$ US d'électricité<sup>120</sup>. Considérant qu'un autobus électrique Proterra coûte environ 378 000 \$ US de plus qu'un équivalent à diesel (voir la section 2.1), la différence de coût à l'achat pourrait être compensée par les frais de fonctionnement après la première année. À Edmonton, où deux autobus tout électriques sont en essai, il est attendu que les économies effectuées sur l'énergie et la maintenance permettent à ces autobus d'atteindre des frais d'opération correspondant au tiers des coûts d'un équivalent diesel<sup>121</sup>.

---

111. « En route vers l'électrification! La STM débute les essais du bus chinois BYD à propulsion entièrement électrique en service clientèle. » Société de transport de Montréal, 26 mars, 2014. <http://www.stm.info/fr/presse/communiqués/2014/en-route-vers-l-electrification---la-stm-debute-les-essais-du-bus-chinois-byd-a-propulsion-entierement-electrique-en-service-clientele>.

112. Shaffer, M.-E. « Un premier autobus 100% électrique au Québec. » *Métro*, 14 janvier, 2013.

113. « Électrification des transports. » Hydro-Québec, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/trolleybus.html>.

114. Arseneault, J. « Québec investit dans un projet d'autobus électriques. » *La Presse*, 22 novembre, 2013.

115. « Électrification du réseau de surface. » Société de transport de Montréal, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.stm.info/fr/a-propos/grands-projets/electrification-du-reseau-de-surface>.

116. Lampron, A. « Autobus électriques à Longueuil : pas avant 2020. » *Canoe*, 29 décembre, 2010.

117. Shaffer, M.-E. « Un premier autobus 100% électrique au Québec. » *La Presse*, 14 janvier, 2013.

118. Jacqué, P. « La RATP promet "des bus tout-électrique en 2025". » *Le Monde*, 17 mars, 2014.

119. « eLion. » Autobus Lion, consulté le 24 novembre, 2015. <http://lionbuses.com/elion/>.

120. Gross, D. « Compared to cars, electric buses could accelerate pollution reduction, fuel savings. » *Chicago Tribune*, 8 septembre, 2014.

121. « New electric buses hit Edmonton roads. » *CBC News*, 23 juin, 2014.

### 2.3.3 Les impacts environnementaux

Comme pour les véhicules individuels, l'impact environnemental des autobus électriques n'est pas seulement quantifiable en terme de réduction des gaz à effets de serre lors des déplacements. Il doit aussi inclure les impacts liés à la production des batteries, tel que décrit à la section 1.2.4 pour les véhicules personnels. Cependant, dans le cas des autobus électriques, la distance parcourue est bien plus importante que pour les véhicules individuels, ce qui les avantage considérablement sur le plan environnemental.

Par exemple, selon Hydro-Québec (2009), un trolleybus de 18 mètres parcourant 37 000 km/an consommerait 150 000 kWh d'électricité, ce qui correspond à 1,5 tonne de CO<sub>2</sub> (considérant une production hydroélectrique avec réservoir située en zone nordique, soit 10 g/kWh<sup>122</sup>), alors qu'un autobus diesel de même taille émettrait près de 85 tonnes de CO<sub>2</sub> par année pour le même kilométrage (considérant 2 294 g/km). Supposons que les 1721 autobus de la Société de transport de Montréal (2014b) ainsi que les 613 autobus du Réseau de transport de la Capitale<sup>123</sup> soient électriques, cela permettrait d'éviter l'émission de près de 200 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an.

### 2.3.4 Les politiques publiques

Hydro-Québec, dans son Plan stratégique 2009-2013 (Hydro-Québec 2009) a participé aux études de faisabilité des sociétés publiques de transport. L'objectif étant de déterminer la nature exacte de l'infrastructure électrique nécessaire à leurs projets et le niveau des investissements pris en charge par Hydro-Québec pour le volet électrique. Par exemple, en avril 2009, Hydro-Québec Distribution s'est engagée à participer à l'étude de faisabilité lancée par la Société de transport de Laval dans le cadre de son projet de trolleybus. En mai 2009, Hydro-Québec a également confirmé sa collaboration à l'étude entreprise par l'Agence métropolitaine de transport (AMT) relativement à un projet d'électrification des trains de banlieue. Le plan stratégique quinquennal d'Hydro-Québec (2014-2018) n'étant actuellement pas encore disponible, leur positionnement futur restera à évaluer.

Le Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques (gouvernement du Québec 2011, p. 26) prévoyait le Programme d'aide gouvernementale au transport collectif des personnes et le Programme d'aide aux immobilisations en transport en commun de la Société de financement des infrastructures locales du Québec. Cependant, suite à l'élection de 2014, le gouvernement du Québec n'a pas encore dévoilé un nouveau plan d'action sur l'électrification des transports publics<sup>124</sup>.

## 2.4 L'électrification du transport sur rail

### 2.4.1 Un état des lieux

À l'heure actuelle, 50 % des usagers des transports publics de la région de Montréal — Deux-Montagnes utilisent des transports électrifiés (Hydro-Québec 2009, p. 61). Pour augmenter ce nombre, plusieurs moyens sont envisagés. Notamment, le trolleybus (sur pneus), le tramway électrique (sur rails) et le minibus électrique. Ces deux transports sont déjà présents et éprouvés dans de nombreuses villes du Canada et des États-Unis (Calgary, Toronto, Vancouver, Boston, Seattle). Afin de faciliter l'intégration harmonieuse des infrastructures électriques, des solutions esthétiques ont été élaborées en ce qui concerne les lignes d'alimentation.

Comparativement à l'Amérique du Nord, l'Europe est à l'avant-garde en ce qui concerne l'électrification du transport sur rail. Par exemple, le Royaume-Uni a annoncé un plan 2014-2019 de 9,4 G£ portant sur 19 projets d'électrification de trains de banlieue ou intercity<sup>125</sup>. L'électrification sera poursuivie dans le plan 2019-2024. Au Canada, la ligne Montréal – Deux-Montagnes, qui est totalement électrifiée, constitue l'exception canadienne. La future voie du Train de l'Est le sera au tiers. Étendre l'électrification est un des objectifs affichés par l'Agence Métropolitaine de Transport dans son plan 2020<sup>126</sup>. Cette dernière procède d'ailleurs à l'achat progressif de locomotives bimodes (électrique et diesel) afin de se préparer à l'électrification du réseau. Une vaste étude a été menée pour évaluer le potentiel d'électrification du réseau sur les autres lignes<sup>127</sup>. La région de Toronto, seule autre métropole canadienne disposant d'un réseau de trains de banlieue comparable à celui de Montréal, souhaite aussi s'engager dans l'électrification des

122. « Une source d'énergie propre et renouvelable. » Hydro-Québec, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.hydroquebec.com/a-propos-hydro-quebec/notre-energie/hydroelectricite-quebecoise-source-avenir/source-energie-propre-renouvelable.html>.

123. « L'entreprise. » Réseau de transport de la Capitale, consulté le 25 septembre, 2014. <http://www.rtcquebec.ca/Default.aspx?tabid=121&language=fr-CA>.

124. Bourque, O. « Confusion entourant le plan d'électrification libéral. » Canoë.ca, 17 juin, 2015.

125. Freemark, Y. « UK ramps up intercity rail investments. » The Transport Politic, 17 juillet, 2012.

126. « Vision 2020. » Agence Métropolitaine de Transport, consulté le 14 novembre, 2014. <http://plan2020.amt.qc.ca/Accueil>.

127. Bisson, B. « Ligne Mascouche-Montréal: un train électrique de 1 milliard? » La Presse, 9 décembre, 2011.

lignes tout en améliorant la fréquence des passages. Des études ont été menées à ce propos<sup>128</sup>. Les objectifs sont ambitieux puisqu'il s'agit de doubler le nombre d'utilisateurs d'ici 2031. En ce qui concerne les trains intercités, plusieurs corridors sont régulièrement évoqués pour la construction d'un train à grande vitesse électrifié : Québec – Windsor, Montréal – New York, Calgary – Edmonton ainsi que Vancouver – Seattle. Les études se succèdent (Valli 2010; Transport Canada 2011<sup>129</sup>), les groupes de pression s'organisent<sup>130,131,132</sup>, mais ces projets restent encore des hypothèses.

Ceci dit, le Québec dispose quand même d'une expertise en électrification des transports sur rails. Ainsi, Bombardier<sup>133</sup>, qui développe entre autres des trains et rames de métro électriques, est reconnue sur la scène internationale. L'entreprise Envitech Énergie<sup>134</sup> propose des systèmes de traction électrique destinés à des applications de transport urbain comme des métros ou des tramways. Finalement, Trains & Trams Wattman<sup>135</sup>, basée à Granby, se spécialise dans des petits trains et tramways électriques.

## 2.4.2 Les impacts économiques et autres bénéfiques

L'intérêt d'électrifier un train serait naturellement de réduire les émissions de gaz à effets de serre, mais aussi de réduire les temps de parcours de 4 % à 14 % selon les lignes grâce à une accélération et une vitesse de freinage accrues. Cette amélioration de l'attractivité du service réduirait le nombre de voitures sur les routes, donc les engorgements, en plus de contribuer à l'amélioration de la balance commerciale du Québec. En effet, l'utilisation d'électricité plutôt que l'utilisation du diesel réduirait les importations de pétrole. Le Québec n'exploite pas le pétrole actuellement. Il doit l'importer et cela affecte négativement sa balance commerciale.

Le rapport coûts/avantages de l'électrification varie fortement en fonction des lignes. Compte tenu des coûts d'infrastructure, les lignes entre Vaudreuil et Hudson et entre Blainville et Saint-Jérôme sont les plus rentables, contrairement aux lignes entre Montréal et Saint-Hilaire et Candiac, qui sont très peu profitables<sup>136</sup>. Du fait de son coût, l'électrification des trains de banlieue n'apparaît pas comme une solution idéale. La pertinence est à évaluer sur chacune des lignes.

## 2.5 Des innovations de véhicules et de pratiques de transport public

L'amélioration du transport public donne aussi lieu à des projets de pratiques et de véhicules innovateurs pour le transport public. Par exemple, les véhicules de Dual-mode transit présentent la particularité de pouvoir rouler indistinctement sur des rails ou sur la route grâce à des essieux rétractables. Au Japon, la JR Hokkaido Railway Company a développé et exploite un tel véhicule depuis 2007<sup>137</sup>. L'avantage est de pouvoir sortir de la circulation et utiliser les rails de chemins de fer. Il permet notamment de proposer un service flexible et peu coûteux dans les villages plus reculés. Plusieurs véhicules peuvent être attachés pour constituer un petit train.

Lebustunnel, proposé en 2010 par la Shenzhen Hashi Future Parking Equipment Company<sup>138</sup>, est un bus électrique circulant au-dessus du trafic. Il est surélevé et les voitures peuvent s'engouffrer dessous comme dans un tunnel. Il est capable de remplacer 40 bus et le fait qu'il n'arrête pas la circulation pour charger ou décharger ses passagers fluidifie le trafic. Selon l'entreprise conceptrice il réduirait la congestion de 30 % ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub>. Plusieurs villes ont signifié leur intérêt, mais aucune phase d'expérimentation n'a à ce jour été lancée.

Au delà des véhicules, d'autres pistes de travail s'intéressent à l'amélioration du système de transport en commun. Pour fluidifier la circulation, l'utilisation de voies dédiées se multiplie. Il s'agit pour les bus de grosse capacité ou les tramways de rouler dans une voie préservée de la circulation automobile. Cela permet une vitesse commerciale plus élevée, une meilleure régularité et un meilleur confort des passagers. Autre solution, les systèmes rapides par bus, du type Metrobus à Québec. Dans ce cas l'exclusivité du couloir de circulation n'est pas obligatoire sur toute la ligne, et des lignes collatérales alimentent la ligne d'autobus rapides. Cette dernière solution est privilégiée par les spécialistes

128. Jeffords, S. « Metrolinx plans to electrify GO trains. » Toronto Sun, 26 juin, 2014.

129. « Updated feasibility study of a high speed rail service in the Québec City – Windsor corridor. » Transport Canada, modifié la dernière fois le 14 novembre, 2011. <https://www.tc.gc.ca/eng/policy/acg-acgb-high-speed-rail-2956.htm>.

130. Clean Train Coalition, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.cleantrain.ca/>.

131. High Speed Rail Canada, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.highspeedrailcanada.com/>.

132. « Train rapide Québec-Windsor. » Québec en avant, consulté le 14 novembre, 2014. <http://quebecenavant.ca/projets/train-rapide-quebec-windsor.44.html>.

133. Bombardier, consulté le 22 novembre, 2014. <http://www.bombardier.com/fr/accueil.html>.

134. Envitech Énergie, consulté le 22 novembre, 2014. [http://www.envitech.com/main.php?l=fr&p=00\\_100](http://www.envitech.com/main.php?l=fr&p=00_100).

135. Wattman, consulté le 22 novembre, 2014. <http://www.wattman.ca/>.

136. Bisson, B. « Québec électrifiera les trains de banlieue. » La Presse, 10 juin, 2014.

137. Chu, N. « Techno-squabbles and dual mode vehicles - railbus, busrail. » The Gondola Project, 5 mars, 2012.

138. Lee A. « "Straddling" bus—a cheaper, greener and faster alternative to commute. » China Hush, 31 juillet, 2010.

et se multiplie dans les villes d'Amérique du Nord<sup>139</sup>. Il n'y a qu'un pas à franchir pour faire en sorte que ces voies dédiées sont électrifiées.

## 2.6 L'adoption de nouveaux systèmes de transport

Même si le chapitre a mis l'accent sur les modes de transport spécifiques, il convient de mettre en avant l'importance du développement de l'intermodalité<sup>140</sup> par rapport à l'électrification des transports de personnes et de marchandises. Selon CERTU (1999), l'intermodalité est un principe d'organisation et d'articulation de l'offre de transport visant à coordonner plusieurs systèmes modaux par une gestion et un aménagement spécifique des interfaces entre les différents modes de déplacement. Tous les moyens de transport sont concernés : transports collectifs (trains, métros, bus, trams, navettes fluviales, téléphériques), mais aussi taxis, automobiles personnelles, autopartage, vélo et marche.

Développer l'intermodalité suppose de travailler sur la coordination des différents modes de transport gérés par des opérateurs différents pour maximiser le nombre de trajets et réduire les temps de transport, de transfert et d'attente. Il faut créer des pôles intermodaux qui facilitent les transferts entre les différents modes et créer des stationnements en périphérie donnant accès à des moyens de transport rapides et propres vers les centres-ville. Dans un pays comme le Canada où l'hiver est particulièrement froid, le confort des voyageurs pendant les liaisons est une condition de succès incontournable.

Dans une perspective intermodale, il faut aussi revoir les véhicules. Par exemple certains bus de ville ou trains de banlieue sont équipés pour permettre le transport de vélos. De plus, il faut mettre à disposition de l'utilisateur des outils pour préparer ses voyages et les gérer pendant le transport. Ceci suppose un système sophistiqué de collecte, actualisation et gestion de l'information ainsi qu'une mise à disposition à travers des applications mobiles.

Dans un cadre d'électrification des transports, il convient de faciliter l'exploitation des modes électrifiés en les interconnectant au mieux entre eux et avec les modes non électrifiés pour en faciliter l'accessibilité et la fluidité.

---

139. Yazer, J. « Express bus corridors increasingly popular transit option. » The Globe and Mail, 24 août, 2012.

140. À ne pas confondre avec la multimodalité décrivant l'utilisation de plusieurs modes lors de déplacements distincts.





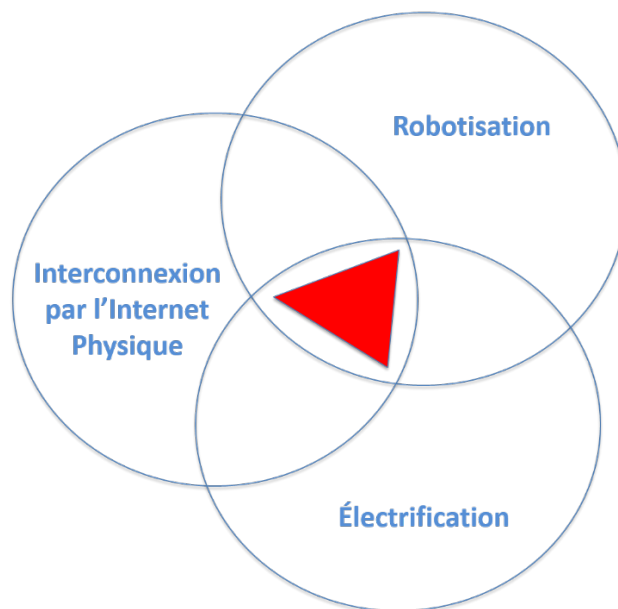
# Chapitre 3

## Les nouveaux transports électrifiés

La mise en rapport des enjeux en matière d'évolution des transports avec les solutions actuelles met en évidence qu'une amélioration de l'existant ne suffit pas. Remplacer les véhicules individuels à essence par des véhicules électriques ne résoudra pas, par exemple, le problème des embouteillages. Étant donné son cycle de vie, la voiture électrique est loin d'être une solution miracle aux problèmes environnementaux. C'est pourquoi, au-delà des seules innovations technologiques, une transition sociotechnique est nécessaire (Dijk 2014). Il s'agit de combiner des évolutions technologiques, des évolutions culturelles en ce qui concerne les représentations (par exemple l'attachement à posséder une voiture) et les pratiques (par exemple le covoiturage) et des évolutions dans les modes d'organisation du transport, ce qui peut mener à un changement de paradigme. Ce nouveau paradigme en transport, plus électrifié, plus intégré, peut aussi induire de nouveaux rapports sociaux, plus conviviaux, moins individualistes. D'une façon globale, tel qu'exprimé par Rifkin (2012), on peut dire que le moteur à combustion interne individualise le transport, alors que par sa nature intrinsèque l'électrification du transport a tendance à réunir les usagers dans un système partagé.

Comme l'illustre la figure 3.1, en matière d'évolution des transports, des solutions très innovantes naissent de la conjonction de trois opportunités, soit l'autonomisation des véhicules, l'interconnexion des modes de transport (l'intermodalité, le covoiturage, etc.) et l'électrification des transports proprement dite.

FIGURE 3.1 Positionnement de l'avenir du transport



Ce chapitre est consacré à l'exploration des trois dimensions. Ainsi, la section 3.1 présente un état de l'art des technologies sous-tendant les véhicules autonomes et l'automatisation des transports en commun et de marchandises. La section 3.2 introduit et détaille le concept d'Internet Physique, un concept émergent qui repense profondément les logiques de transport, tant pour les marchandises que les individus. La section 3.3 discute ensuite des possibilités apportées par les nouveaux transports dans un contexte d'électrification et de la place de l'électrification dans l'Internet Physique. Finalement, la section 3.4 traite de la réalisation des nouveaux transports électrifiés, à la fois dans les changements de perception et d'habitudes sociales que dans les politiques nécessaires au transfert modal impliqué par l'arrivée de ces nouveaux transports.

## 3.1 Les véhicules autonomes

Les véhicules autonomes, aussi appelés véhicules automatisés ou robotisés, sont des véhicules sans conducteur.

### 3.1.1 Les véhicules autonomes individuels

Les véhicules autonomes individuels ont le potentiel de bouleverser les modes de transport. Par exemple, Burns et collab. (2013) a simulé le remplacement des 13 000 taxis de New York par des véhicules autonomes. Les résultats montrent qu'avec 9000 véhicules autonomes, le temps d'attente initial de 5 minutes pourrait être réduit à 1 minute et le coût de la course passerait de 2,50 \$/km à 0,30 \$/km. Les résultats obtenus en simulation dans des contextes plus petits se sont révélés tout aussi intéressants (Burns 2013).

Selon les données recueillies par Google, leurs voitures autonomes de type Google Car auraient une conduite plus régulière qu'avec un conducteur et seraient plus sécuritaires<sup>141</sup>. Google croit que le passage aux véhicules autonomes peut réduire de 90 % le nombre d'accidents, le temps de transport et le nombre de voitures sur les routes. Ils prévoient sauver environ 30 000 vies annuellement aux États-Unis et éviter près de 2 millions de blessés, soit une économie totale de 400 G\$ US par an<sup>142</sup>. La communication intervéhicules pourrait permettre aux véhicules de s'organiser en convoi, pouvant réduire la consommation d'énergie (par exemple, d'essence) de 10 % à 15 %<sup>143</sup>. Les véhicules autonomes peuvent offrir une autonomie de déplacement à des gens qui ne peuvent pas conduire, comme les aînés ou les aveugles.

Les véhicules autonomes ont le potentiel de contribuer à retirer l'élément de propriété dans l'utilisation, permettant une mutualisation accrue des moyens de transport. Par exemple, il sera plus efficace de louer un véhicule pour réaliser un trajet, car une fois le trajet réalisé, la voiture se rend automatiquement disponible pour d'autres utilisateurs (Rifkin 2012). Le nombre et le coût d'utilisation des véhicules autonomes loués seront ainsi inférieurs.

Beaucoup de recherches ont été menées depuis 30 ans sur les véhicules autonomes. Le projet européen PROMETHEUS (PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety), qui s'est déroulé de 1987 à 1995, a cumulé un financement de 749 M€. Aux États-Unis, le DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) a financé et organisé le DARPA Grand Challenge en 2004, 2005 et 2007, des compétitions de véhicules autonomes avec pour objectif d'encourager le développement des technologies de pointe dans ce domaine<sup>144</sup>. La compagnie américaine Google travaille depuis 2010 sur un projet de véhicule sans conducteur pour lequel il a recruté plusieurs ingénieurs ayant remporté différentes éditions du DARPA Challenge<sup>145</sup>. Au printemps 2014, leurs véhicules autonomes avaient parcouru 1,13 million de kilomètres (700 000 miles) sans accident sur des routes et autoroutes publiques en Californie et au Nevada<sup>146</sup>. Google prévoit construire une flotte de 100 véhicules autonomes biplaces pouvant atteindre une vitesse maximale de 40 km/h (Markoff, 2014) et conformes à la législation californienne<sup>147</sup>.

La compagnie française INDUCT, ayant participé au DARPA Grand Challenge 2005 et DARPA Urban Challenge 2007, développe un véhicule complètement autonome<sup>148</sup>. Leur navette (Navia) peut accueillir jusqu'à huit personnes et atteint une vitesse maximale de 20 km/h. Des expérimentations sont actuellement en cours à l'EPFL en Suisse, et d'autres projets sont en développement avec l'University of West Florida aux États-Unis, la Nanyang Technological University de Singapour et la société Oxis Energy au Royaume-Uni. INDUCT est également impliquée dans le projet CATS (City Alternative Transport System), regroupant 11 partenaires de cinq pays européens et d'Israël, ayant pour but de développer une nouvelle génération de véhicules pour faire le lien entre les voitures individuelles et les transports en commun. Ce projet utilise la technologie de la Navia. Les constructeurs automobiles tels Mercedes-Benz<sup>149</sup>, Ford<sup>150</sup>, Audi<sup>151</sup>, Toyota<sup>152</sup>, Nissan<sup>153</sup> et BMW<sup>154</sup> développent maintenant leurs propres voitures autonomes.

---

141. Simonite, T. « Data shows Google's robot cars are smoother, safer drivers than you or I. » MIT Technology Review, 25 octobre, 2013.

142. Mui, C. « Fasten your seatbelts: Google's driverless car is worth trillions (Part 1). » Forbes, 22 janvier, 2013.

143. Bullis, K. « How vehicle automation will cut fuel consumption. » MIT Technology Review, 24 octobre, 2011.

144. « Archives. » DARPA, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.darpa.mil/About/History/Archives.aspx>.

145. Thrun, S. « What we're driving at. » Google Official Blog, 9 octobre 2010. <http://googleblog.blogspot.ca/2010/10/what-were-driving-at.html>.

146. Ackerman, E. « Google's autonomous cars are smarter than ever at 700,000 miles. » IEEE Spectrum, 29 avril, 2014.

147. Markoff, J. « Google's next phase in driverless cars: No steering wheel or brake pedals. » The New York Times, 27 mai, 2014.

148. Induct, consulté le 14 novembre, 2014. <http://induct-technology.com/en/>.

149. Dickmann, J., Appenrodt, N. et Brenk, C. « How we gave sight to the Mercedes robotic car. » IEEE Spectrum, 24 juillet, 2014.

150. Laursen, L. « Ford's smooth-driving autonomous research car. » IEEE Spectrum, 25 février, 2014.

151. Simonite, T. « Audi shrinks the autonomous car. » MIT Technology Review, 8 janvier, 2013.

152. Simonite, T. « Toyota unveils an autonomous car, but says it'll keep drivers in control. » MIT Technology Review, 7 janvier, 2013.

153. Kanellos, M. « Nissan's autonomous car: A test drive. » Forbes, 9 octobre, 2013.

154. Matyszczyk, C. « A self-driving car, but thankfully a BMW. » CNET, 28 janvier, 2012.

Volvo prévoit mettre la sienne en vente d'ici 2017<sup>155</sup> alors que Tesla prévoit rendre leurs systèmes de conduite autonome-assistée en 2015<sup>156</sup>.

Finalement, les véhicules autonomes sont au cœur des ATNs (Automated Transit Networks), aussi référés sous le terme « podcars » ou Personnel Rapid Transit (avant 2010). Un ATN est composé de petits véhicules autonomes pouvant être utilisés individuellement ou en groupe (voyageant ensemble par choix) sur un circuit qui leur est exclusif et qui les guide (pas sur la voie publique). Il est considéré comme un mode de transport public parce que les individus ne possèdent pas les véhicules (Furman et collab. 2014). Un ATN est présentement en fonction à Morgantown, entre l'université et la ville, depuis 1975<sup>157</sup>. On en trouve aussi à l'aéroport de Londres Heathrow<sup>158</sup>, à Masdar (Emirats Arabes Unis) et à Suncheon (Corée du Sud)<sup>159</sup>. Selon Furman et collab. (2014), Bombardier pourrait devenir un acteur majeur dans le développement de technologies destinées aux ATNs.

### 3.1.2 Les enjeux technologiques et économiques

Plusieurs enjeux technologiques doivent cependant être adressés avant que les véhicules autonomes ne deviennent utilisables dans la vie de tous les jours, comme la conduite en conditions difficiles (par exemple, sur neige ou avec forte pluie), l'adaptation à la nouvelle signalisation, l'adaptation aux différences entre la réalité et la carte routière et la capacité à se stationner<sup>160</sup> (Gomes 2014). De plus, les véhicules sans conducteur nécessitent des technologies de pointe coûteuses qui les rendent actuellement peu accessibles. Par exemple, la voiture sans conducteur de Google possède environ 150 000 \$ US d'équipement, dont un LIDAR (radar laser) à 70 000 \$ US<sup>161</sup>. Cependant, des constructeurs automobiles, comme Mercedes, développent leurs propres véhicules autonomes utilisant des technologies plus abordables<sup>162</sup>. S'ajoutent des réticences psychologiques et culturelles dans l'adoption par les consommateurs. Enfin les modèles d'affaires appropriés sont à inventer. En effet, l'arrivée sur le marché des véhicules autonomes risque de ne pas plaire aux constructeurs automobiles actuels<sup>163</sup>. Par exemple les pièces de rechange sont actuellement la source majeure de rentabilité des constructeurs automobiles. Que faire si le nombre d'accidents est réduit avec les voitures autonomes?

### 3.1.3 Les solutions automatisées de transport en commun

Le transport automatisé de passagers n'est pas nouveau. De nombreuses lignes de métro fonctionnent déjà sans chauffeurs. Mais plusieurs projets cherchent à exploiter les évolutions technologiques pour explorer des voies nouvelles. La plupart sont à l'étape du concept.

Le projet apparaissant le plus avancé est le SkyTran<sup>164</sup>, d'une compagnie éponyme couvée par la NASA. Des capsules pouvant contenir deux passagers seraient accrochées dans les airs à un rail par lévitation magnétique. Les passagers appellent les cabines à l'aide d'une application mobile. Le transport s'effectuerait à haute vitesse. En 2014, l'entreprise a passé un accord avec Israel Aerospace Industry pour tester la solution sur une ligne à Tel Aviv, premier pas annoncé d'un projet très ambitieux couvrant l'ensemble de la métropole<sup>165</sup>.

Au Québec, le monorail IREC<sup>166</sup> est un projet promu par l'IREC depuis plusieurs années. Il s'agit de navettes autonomes (sans conducteur) de la taille d'un autobus qui seraient suspendues à un rail situé à 12,5 mètres du sol, et motorisées par 16 moteurs roues électriques. Chaque navette pourrait transporter de 60 à 75 passagers assis ou 10 tonnes de marchandises. Le rail serait supporté par des pylônes espacés de 40 à 50 mètres. Cette installation en hauteur lui permettrait de s'intégrer facilement dans les infrastructures existantes. Rails et moteurs-roues seraient protégés des intempéries par un dôme métallique. Le voyage se ferait à 250 km/h. Une étude de l'IREC chiffre les coûts de construction à 12 M\$/km pour la ligne Montréal-Québec et à 9 M\$/km pour les lignes subséquentes, soit trois fois moins qu'une ligne de TGV. Un trajet Québec – Montréal exigerait environ 40 \$ d'électricité (à 7 ¢/kWh) par navette, soit 70 ¢/passager.

L'Hyperloop<sup>167</sup> est un projet mené par Tesla Motors en partenariat avec SpaceX. Enfermées dans un tunnel et supportées par des coussins d'air, des capsules pouvant transporter 28 personnes seraient propulsées à grande vitesse

155. Stevens, T. « Inside Volvo's self-driving car: Improving driver safety without the driver. » CNET, 16 mai, 2014.

156. Putre, L. « Tesla 'Autopilot' Car Could Hit the Road in Weeks. » IndustryWeek, 11 juin, 2015.

157. Jaffe, E. « Personal rapid transit is probably never going to happen. » CityLab, 19 septembre, 2014.

158. Wood, C. « Personal rapid transit revival? » Government Technology, 28 juin, 2013.

159. Fox, J. « Abu Dhabi to debut personal rapid transit "podcars" later this year. » TreeHugger, 1er février, 2009.

160. Gomes, L. « Hidden Obstacles for Google's Self-Driving Cars. » Technology Review, 28 août, 2014.

161. Priddle, A. et Woodyard, C. « Google discloses costs of its driverless car tests. » USA TODAY, 14 juin, 2012.

162. Dickmann, J., Appenrodt, N. et Brenk, C. « How we gave sight to the Mercedes robotic car. » IEEE Spectrum, 24 juillet, 2014.

163. Mui, C. « 5 reasons why automakers should fear Google's driverless car. » Forbes, 4 août, 2014.

164. SkyTran, consulté le 12 novembre, 2014. <http://www.skytran.us/>.

165. Winer, S. « Futuristic skytrain track to be built near Tel Aviv. » The Times of Israel, 24 juin, 2014.

166. TrensQuebec, consulté le 12 novembre, 2014. <http://www.trensquebec.qc.ca/>.

167. Musk, E. « Hyperloop. » Tesla Blog, 21 août, 2013. <http://www.teslamotors.com/blog/hyperloop>.

par magnétisme. Elles se succèderaient à une fréquence de 30 secondes à 2 minutes pour un voyage de 30 minutes entre San Francisco et Los Angeles<sup>168</sup>, distantes de près de 600 km. Le coût d'une ligne composée de capsules de passagers est estimé à 6 G\$ US, contre 10 G\$ US pour des capsules plus larges pouvant transporter des passagers et des voitures<sup>169</sup>. Un premier projet d'Hyperloop est prévu pour 2016 en Californie<sup>170</sup>.

### 3.1.4 Les solutions automatisées de transport des marchandises

Plusieurs projets imaginent des systèmes automatiques de transport des marchandises qui circuleraient dans des réseaux de tunnels à l'abris des congestions et des intempéries de surface. Dans les tunnels circuleraient des unités autonomes automatisées de transports qui transporterait des palettes. Chacune, dotée de capacités de routage, pourrait tracer sa route dans le réseau vers sa destination de livraison. Le CargoCap est un projet développé par l'université de la Ruhr à Bochum en Allemagne<sup>171</sup> et le Swiss Cargo Tube en Suisse (DRIEA 2010) fonctionnent sur ce principe. Cependant ces concepts restent à l'état de projet faute d'un modèle économique attractif. Ils souffrent aussi d'un manque d'interconnexion avec le système de transport de marchandises existant.

## 3.2 Vers un Internet Physique

Proposé par le professeur Benoit Montreuil de l'Université Laval, le concept d'Internet Physique applique au monde matériel les modes de fonctionnement digital de l'Internet (Montreuil 2011). L'Internet Physique est un changement de paradigme. Il s'inspire des fonctionnements de l'Internet digital, pour organiser les déplacements des personnes et des produits physiques de manière fluide à travers des réseaux logistiques, comme des paquets de données circulent de manière transparente pour l'utilisateur à travers des équipements hétérogènes qui respectent le protocole TCP/IP (adapté de Montreuil 2011). Cette logique de fonctionnement s'applique aussi bien au transport de passagers (avec le covoiturage et l'autopartage), qu'à celui des marchandises. La frontière entre les deux va même jusqu'à se brouiller. Par exemple à travers la livraison crowdsourcée, les particuliers deviennent livreurs.

L'Initiative internationale de l'Internet Physique<sup>172</sup> mobilise les acteurs des milieux académiques, industriels, technologiques et institutionnels autour de projets de recherche et d'innovation ouverte. Des projets sont actuellement actifs dans une douzaine de pays en Amérique, en Asie et en Europe.

La Commission européenne a fait de la logistique une plateforme technologique stratégique. Elle a facilité la mise en œuvre de l'Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe (ALICE) qui regroupe les forces vives industrielles, technologiques, académiques et institutionnelles<sup>173</sup>. ALICE a fait de l'Internet Physique sa vision stratégique pour l'Europe sur l'horizon 2030-2050.

### 3.2.1 Le transport interconnecté des personnes

Le covoiturage et l'autopartage ne sont pas des pratiques nouvelles, mais elles connaissent aujourd'hui des croissances rapides parce qu'elles répondent à des besoins d'optimisation des transports et des réductions des coûts, et parce que l'Internet, les technologies mobiles ou le GPS en facilitent l'usage. Selon le cabinet Roland Berger<sup>174</sup>, l'autopartage devrait connaître une croissance de 30 % par an d'ici 2020, quant au covoiturage, celle-ci devrait attendre 35 %.

La principale entreprise de covoiturage au Québec, Amigo Express compte actuellement plus de 200 000 membres. En 2013, plus de 160 000 trajets ont été proposés sur le site de l'entreprise. Sur la ligne Québec - Montréal, ce mode de transport a même grignoté des parts de marché aux bus Orléans-Express qui y ont vu le nombre de leurs passagers légèrement diminuer en dix ans<sup>175</sup>.

Certaines expérimentations en matière de covoiturage sont très innovantes. Par exemple Clic est un programme de covoiturage électrique menée depuis 2011 par la Société de Transport de Laval<sup>176</sup> en partenariat avec l'Agence

168. Boyle, A. « Musk unveils plans for \$10 billion Hyperloop transportation system. » NBC News, 12 août, 2013.

169. Vance, A. « Revealed: Elon Musk explains the Hyperloop, the solar-powered high-speed future of inter-city transportation. » Business Week, 12 août, 2013.

170. Schupak, A. « Elon Musk to build Hyperloop test track in California. » CBS News, 15 juin, 2015.

171. CargoCap, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.cargocap.com/>.

172. Physical Internet Initiative, consulté le 22 novembre, 2014. <http://www.physicalinternetinitiative.org/>.

173. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe, consulté le 22 novembre, 2014. <http://www.etp-logistics.eu/>.

174. Roland Berger Consultants. « Shared mobility : How new businesses are rewriting the rules of the private transportation game. » Business, Juillet, 2014.

175. Rettino-Parazelli, K. « Transport: une bataille Montréal-Québec nouveau genre. » Le Devoir, 10 février, 2014.

176. « Clic. » STL, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.stl.laval.qc.ca/fr/autobus/clic/>.

Métropolitaine de Transport et Hydro-Québec. Dix Chevrolet Volt sont à la disposition d'équipages composés de quatre personnes qui habitent le même quartier et se déplacent ensemble entre leurs résidences et l'un des trois stationnements intermodaux<sup>177</sup>. Le conducteur peut se servir de la voiture à des fins personnelles sur une distance totale de 200 km par mois.

Lancé à Montréal en 2012, Netlift pousse encore plus loin le covoiturage grâce à son application mobile. Alors que le covoiturage traditionnel regroupe des personnes allant au même endroit, Netlift permet de réunir des personnes qui ne se connaissent pas et qui peuvent avoir des destinations différentes. En outre, Netlift propose une plateforme technologique qui permet de s'interconnecter avec les transports en commun<sup>178</sup>. En échange du transport, chacun a une contribution financière pour son trajet. Enfin, des services comme Uber permettent aussi de réinventer le covoiturage<sup>179</sup> en permettant à tout conducteur de devenir taxi le temps d'un voyage ou plus.

## L'autopartage

Une automobile est utilisée en moyenne une heure par jour<sup>180</sup>. Fort de ce constat, l'autopartage donne accès à une voiture quand on en a besoin. Les véhicules sont stationnés dans des emplacements réservés répartis dans la ville. Les utilisateurs peuvent les réserver via un site Internet ou une application mobile, pour des durées variables : d'une demi-heure jusqu'à plusieurs jours. Comme un véhicule en partage se substitue en moyenne à 8 voitures, le nombre de véhicules en circulation se trouve considérablement réduit, ce qui réduit les besoins de places de stationnement. De plus, le fait de ne pas posséder de voiture personnellement modifie les comportements. L'utilisation de la voiture est plus rationnelle et des moyens substitués sont utilisés tels que la marche, le vélo et les transports en commun. Finalement, une réduction du poste budgétaire « automobile » est observée chez la population dont l'usage est compatible avec l'offre d'autopartage.

En décembre 2012, le nombre d'utilisateurs de services d'autopartage était estimé à 1,7 million dans 27 pays<sup>181</sup>. Le chiffre d'affaires mondial du secteur de 1 G\$ US en 2013, devrait être multiplié par 6 d'ici 2020. Les leaders mondiaux à date sont Zipcar et Car2Go. Ceci pourrait changer avec un engouement des constructeurs automobiles. Par exemple, BMW y voit un marché intéressant. Grâce à Drivenow, une coentreprise avec le loueur Sixt, BMW propose environ 2500 de ses voitures essence ou électriques dans six villes.

Au Québec, l'autopartage a été implanté avec succès par Communauto dans les villes de Montréal, Laval, Longueuil, Québec, Lévis, Sherbrooke et Gatineau. Les bénéfices de ce système sont multiples. Depuis peu, Communauto pousse plus loin le concept. L'entreprise expérimente un service grâce auquel des particuliers propriétaires d'une voiture louent leurs véhicules pendant les périodes où ils ne l'utilisent pas. Avec Communauto, le Québec dispose d'un savoir-faire de pointe. Il s'agit du plus ancien service d'autopartage en Amérique du Nord et d'un des leaders mondiaux. L'entreprise a d'ailleurs acquis en 2012 l'entreprise Mobizen, le concurrent d'Autolib à Paris<sup>182</sup>.

Dans le futur, les voitures sans pilotes traitées en 3.1 pourraient être des véhicules idéaux pour les services d'autopartage. Cette idée est au cœur de la vision du « Google car ». Comme l'explique Sergei Brin dans une entrevue : « with self-driving cars, you don't really need much in the way of parking, because you don't need one car per person. They just come and get you when you need them »<sup>183</sup>.

## 3.2.2 Le transport interconnecté des marchandises

Le Manifeste de l'Internet Physique<sup>184</sup> décrit un fonctionnement global interconnecté des réseaux de transport. Chaque colis ou marchandise est déposé dans un conteneur standardisé modulaire (de la taille d'une boîte à celle d'un conteneur maritime), ce qui permet d'automatiser les opérations de manutention, et d'agréger facilement tous les conteneurs ayant les mêmes destinations. Chaque conteneur est géré de manière indépendante, grâce à un système de suivi et une intelligence artificielle pour prendre les décisions optimales de routage. Les conteneurs tracent leur route dans le réseau. Ils effectuent un ou plusieurs segments de trajets à relais, de hub en hub entre leur origine et leur destination. Dans chaque hub logistique, la destination de chaque conteneur et ses contraintes de transport (type de

177. Station de métro Cartier, station de métro Montmorency et gare de Sainte-Dorothée sur la ligne de train de Deux-Montagnes.

178. Gagné P. « L'ascension de Netlift dans le transport. » Affaires et révolution numérique (Blog), 23 octobre, 2014. <http://www.lesaffaires.com/blogues/patrick-gagne/l-ascension-de-netlift-dans-le-transport/573242>

179. Boucher, F. « UberX : le covoiturage électrifiable! » Roulez électrique.com, 30 octobre, 2014.

180. « Autopartage. » Équiterre, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.equiterre.org/fiche/autopartage>.

181. Forecasts Navigant Research. « Carsharing services will reach nearly \$6.2 billion in revenue by 2020. » Yahoo! Finance, 23 novembre, 2013.

182. « Communauto achète Mobizen pour relancer l'autopartage à Paris. » Communauto (Blog), 11 septembre, 2012. <http://actualites.communauto.com/2012/09/10/paris/>.

183. Gibbs, S. « Google's founders on the future of health, transport – and robots. » The Guardian, 7 juillet, 2014.

184. « Physical Internet manifesto. » Physical Internet Initiative, modifié la dernière fois le 28 novembre, 2012. <http://physicalinternetinitiative.org/>.

marchandise, date de livraison, niveau de sécurité, modes de transport ou transporteurs privilégiés par le client) sont prises en compte pour désigner le prochain segment qui va le rapprocher de sa destination finale. Chaque segment peut être pris en charge par un transporteur différent, voire faire appel à des modes de transport différents. L'objectif est double. D'une part on vise à consolider des routes par une mutualisation ouverte dynamique. D'autre part on vise à s'assurer que le transporteur sur chaque segment soit le mieux adapté à cette route, le plus rempli possible, tout en respectant les contraintes de chacun des conteneurs, du véhicule, ainsi que les législations en vigueur. Les hubs peuvent être utilisés comme des lieux de stockage ou de réalisation d'activités à valeur ajoutée (par exemple de l'assemblage, de la personnalisation du produit, du groupage, de l'emballage).

Aujourd'hui, les réseaux des grands logisticiens comme DHL, Fedex ou UPS présentent des caractéristiques proches de l'Internet Physique. La grande différence réside dans le fait que leurs réseaux sont propriétaires et à plus petite envergure. Chacun a ses camions, ses avions, ses hubs, ses aéroports, etc. Cela conduit à de la sous-optimisation : chacun fait les mêmes choses que les autres, sans qu'il y ait d'optimisation globale. Par exemple deux camions à moitié vides pourraient partir d'endroits proches pour la même destination. Au contraire, l'ouverture et la décentralisation sont au cœur de l'Internet Physique. En d'autres mots, les moyens de transport, les centres logistiques, les entrepôts et les usines/ateliers ne sont pas possédés ou réservés par une entreprise unique, mais ils sont utilisés de manière flexible par n'importe quelle entreprise en fonction de ses besoins (qui vont évoluer dans le temps).

Les simulations et les premières expérimentations (Ballot et Montreuil 2014; Fatnassi et collab. 2014; Kibli et collab. 2014; Meller, Ellis et Loftis 2012; Hakimi, Montreuil et Cloutier 2014) montrent que le mode de l'Internet Physique permet de :

- réduire le fardeau économique;
- par exemple, réduction de 30 % de l'ensemble des coûts induits
- réduire l'impact environnemental;
- par exemple, réduction de 30 à 60 % des émissions de gaz à effet de serre
- améliorer le service aux clients;
- par exemple, capacité de réduction des délais de livraison avec la même capacité d'ensemble, critique notamment en cybercommerce où on vise le même jour dans les mégapoles, le lendemain dans les métropoles et dans deux jours par ailleurs sur le territoire nord-américain
- réduire le volume de trafic par une optimisation des taux de chargement;
- par exemple, augmentation des taux de chargement des véhicules de 15 à 30 %, ce qui a un impact important sur le nombre de véhicules sur les voies de transport
- améliorer les conditions de travail des chauffeurs qui s'éloignent moins de leurs domiciles et peuvent y revenir plus fréquemment;
- par exemple, réduction du taux de roulement de chauffeurs de 100 % à 25 % par année.

### 3.2.3 De nouveaux paradigmes dans la livraison de marchandises

L'Internet Physique amène à repenser l'organisation du transport de marchandises. En matière de livraison urbaine, des modèles nouveaux d'organisation commencent à émerger. Nous les présenterons dans cette section en les illustrant avec des exemples. Puis nous verrons en quoi l'utilisation de transports électrifiés est fortement associée à ces nouvelles façons d'organiser la logistique urbaine.

#### Vers une logistique urbaine interconnectée

Dans un modèle classique, le transporteur prend en charge la marchandise depuis le point de départ jusqu'au point d'arrivée. Il en résulte une sous-optimisation de la tournée de livraison (taux de remplissage du camion, distance parcourue, etc.). Dans des modèles plus sophistiqués, type DHL, UPS ou Fedex, le transporteur procède à une consolidation, un groupage, c'est-à-dire que le chargement est regroupé par destination, ce qui optimise le taux de remplissage et la longueur des tournées. Mais le transporteur reste limité par le volume de demande qu'il a réussi à capter.

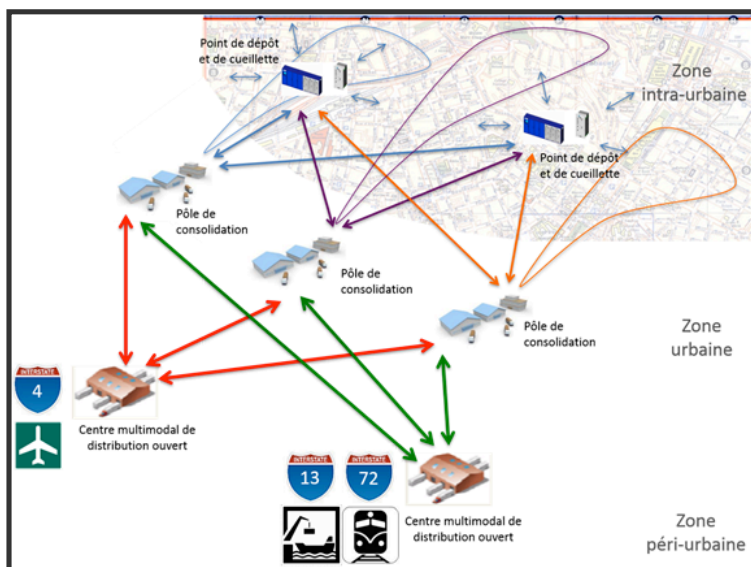
Le principe général de l'approche renouvelée est une segmentation de la livraison. Les marchandises sont livrées dans un centre de consolidation situé en zone périurbaine (ex. : Faure et collab. 2014). Partant de là, des tournées sont organisées dans la ville avec des véhicules électriques (petits véhicules de livraison, vélos électriques, voire véhicules au gaz naturel). Cela permet un meilleur taux de remplissage, donc une réduction des coûts et du nombre de véhicules en circulation. En outre, le silence relatif des moteurs permet d'effectuer les livraisons la nuit en dehors des embouteillages, ce qui permet de gagner en efficacité. Les centres de consolidation peuvent aussi servir d'espace de stockage (plutôt que dans les magasins). Les commerçants y trouvent un intérêt financier puisque l'espace y est moins

cher qu'en centre-ville. Des activités productives peuvent aussi y être réalisées : emballage, étiquetage, etc. Ces espaces peuvent donc être à la fois des centres logistiques intermodaux, des entrepôts et des ateliers.

De nombreuses villes font des expérimentations de logistique urbaine. Binnenstad Service propose un tel service dans une quinzaine de villes néerlandaises de taille moyenne depuis 15 ans. Les commerçants y ont connu une réduction de 10 % de leurs coûts, et les émissions de gaz à effets de serre en lien avec ces activités de livraison ont baissé de 40 %<sup>185</sup>. En revanche la situation à Utrecht où un service équivalent a été mis en place en 1996 illustre bien les limites actuelles des véhicules électriques. La tournée de livraison en ville était réalisée par un train électrique, assez étroit pour se faufiler dans les rues tortueuses, que nous avons présenté plus haut dans ce rapport. Un camion à motorisation thermique apportait la marchandise depuis le centre de consolidation périurbain jusqu'au dépôt intra-urbain où elle était prise en charge par le train. Afin d'améliorer la performance environnementale, décision a été prise de développer un camion électrique pour remplacer le camion à essence. Avec ses maigres 200 kilomètres de rayon d'action, il a fallu mettre en place un point intermédiaire de transbordement, car le camion n'aurait pas eu l'autonomie nécessaire pour faire les allers/retours vers le dépôt de consolidation périurbain<sup>186</sup>.

Dans les grandes villes, du fait de la distance à parcourir et de la complexité de gestion des commandes, une étape intermédiaire de consolidation est souvent incluse. Généralement des camions électriques font le segment dépôt périurbain – micro-dépôt de consolidation. Puis la tournée de livraison finale est réalisée par de petits véhicules électriques (petits camions, vélos ou autres). Ces différentes étapes peuvent être totalement intégrées et gérées par un transporteur unique. C'est le service offert par exemple à Paris, par Distripolis un programme mis en œuvre par Géodis. L'entreprise dispose d'une plateforme de consolidation à Paris Bercy et de huit « bases environnementales » réparties dans la capitale, à partir desquelles les tournées se font avec 126 véhicules électriques ou 104 tricycles assistés par moteur électrique. En 2011, ce mode de fonctionnement a permis à Geodis de réduire de 18 % ses émissions de gaz à effet de serre. Lorsque le système sera totalement fonctionnel, en 2015, Geodis attend 85 % de réduction par rapport à 2014<sup>187</sup>. Ces différentes étapes peuvent aussi être prises en charge par plusieurs acteurs. Ainsi Gnewt intervient comme un spécialiste des « livraisons de dernier mille » dans le cœur de Londres. Il impartit cette tâche pour des transporteurs (ex. : TNT) ou des grands distributeurs. Le client/expéditeur paie le transporteur (TNT), lequel reçoit une facture de Gnewt. Avec ce mode de fonctionnement, Gnewt a réduit de 20 % la distance totale parcourue par paquet, et les émissions de GES par paquet ont baissé de 62 %.

FIGURE 3.2 Schéma illustrant l'application des principes de l'Internet Physique à la livraison urbaine



Les applications actuelles restent souvent limitées, ne rassemblant qu'un mince pourcentage de l'ensemble des livraisons et stockages urbains et périurbains. Toutefois, ils sont une amorce. En extrapolant, on voit là se dessiner les

185. « Binnenstadservice Nederland: Inner city deliveries in The Netherlands. » BestFact Best Practice Case Quick Info, 21 janvier, 2014.

186. « Electric freight vehicle with trailers: Cargohopper in Utrecht. » BestFact Best Practice Case Quick Info, 26 juillet, 2013 .

187. « Premiers déploiements à Paris et en France. » Geodis, consulté le 14 novembre, 2014. [http://www.geodis.fr/premiers-deploiements-a-paris-et-en-france-@/fr/view-768-category.html;jsessionid=0oBYY+u5kJ9BHxQLsgLuPQ\\_\\_](http://www.geodis.fr/premiers-deploiements-a-paris-et-en-france-@/fr/view-768-category.html;jsessionid=0oBYY+u5kJ9BHxQLsgLuPQ__).

web de mobilité, de distribution et de réalisation présents dans l'Internet Physique. La figure 3.2 schématise une application plus assumée des principes l'Internet Physique à la livraison urbaine, dans une logique de logistique urbaine interconnectée.

### Vers une livraison « crowdsourcée » interconnectée

À Stockholm, DHL a implanté un service de « crowdsourcing » appelé MyWays afin de gérer les colis pour lesquels les destinataires souhaitent une heure de livraison incompatible avec les tournées de ses camions. Une application mobile signale ces colis et permet à des habitants de se proposer pour passer les prendre et les livrer à l'heure demandée. Évidemment, ces derniers touchent une petite rémunération. DHL vise particulièrement les gens qui, rentrant du travail, passent régulièrement devant l'entrepôt<sup>188</sup>. Le projet a été testé durant l'automne 2013 et reconduit en 2014<sup>189</sup>.

La livraison « crowdsourcée » est en plein développement (Rougès et Montreuil 2014). Le principe est d'utiliser les technologies mobiles (applications et GPS) pour mettre en contact des expéditeurs de colis avec des livreurs qui ne sont pas des employés de l'entreprise, mais des personnes qui choisissent ou non d'effectuer des livraisons en fonction de leurs déplacements. En réalité, certains livreurs se spécialisent, mais restent indépendants et continuent à choisir les courses. Plus d'une dizaine d'entreprises proposent aujourd'hui ces services aux États-Unis. Les plus performantes sont financées pour plusieurs millions (22 millions pour Postmates<sup>190</sup>, 12,4 millions pour Deliv<sup>191</sup>). Postmates assure la livraison pour, entre autres, 20 000 restaurants à New York, San Francisco, Washington, Chicago et Seattle<sup>192</sup>. Deliv a signé un contrat avec des propriétaires de centres commerciaux pour assurer les livraisons des magasins qu'ils abritent<sup>193</sup>. Walgreens a passé un accord avec Deliver Now pour assurer les livraisons à domicile des commandes passées en ligne<sup>194</sup>. La plupart des entreprises proposent des services intra-urbains. D'autres visent les livraisons interurbaines ou internationales (en exploitant, par exemple, les voyageurs prenant l'avion<sup>195,196,197,198</sup>). Fait à noter, ces entreprises, pour des raisons d'efficacité dans les livraisons urbaines, promeuvent des solutions alternatives à la voiture, en particulier le vélo, ou l'utilisation des métros.

Participant de l'effacement de la distinction entre transport de voyageurs et transport de marchandises, la livraison « crowdsourcée » mise sur les bénéfices suivants (Rougès et Montreuil 2014) :

- un service amélioré, du fait d'une flexibilisation des conditions de livraison, que ce soit en ce qui concerne la nature de ce qui est livré, les horaires, ou les délais souvent plus rapides;
- une réduction des prix de livraison puisque les entreprises exploitent la capacité d'une multitude d'individus ayant leurs propres véhicules, ce qui leur évite d'avoir à investir dans des flottes de camions et d'avions, d'entrepôts géants et d'aéroports (en fait, ces entreprises investissent essentiellement sur une application mobile et un site Internet);
- une externalité environnementale réduite du fait d'une exploitation de véhicules déjà présents sur les trajets demandés, induisant une réduction du nombre de véhicules sur les routes, et de la performance environnementale croissante des véhicules exploitées, comme les vélos électriques utilisés par les livreurs en milieu urbain.

La faiblesse actuelle de la livraison « crowdsourcée » est que la très vaste majorité des entreprises se limitent à des livraisons bout-en-bout de l'origine à la destination au lieu d'exploiter plus à fond les principes de l'Internet Physique en misant sur des livraisons interconnectées où chaque participant n'a pas à livrer le colis jusqu'au bout, mais bien jusqu'au hub le plus pertinent qui est sur sa route, le colis déposé à ce hub étant par la suite repris par un autre participant.

L'Internet Physique propose de standardiser les conteneurs modulaires (Montreuil 2011). Les constructeurs pourraient prévoir dans leurs modèles de voitures des emplacements pour faciliter l'embarquement de ces conteneurs et permettre à chacun de devenir un livreur occasionnel.

188. MyWays, consulté le 14 novembre, 2014. [www.myways.com](http://www.myways.com).

189. Marr, C. « DHL pilots crowdsourcing app for deliveries in Stockholm. » Transglobal Express (blog), 3 septembre, 2013. <http://transglobalexpress.blogspot.ca/2013/09/dhl-pilots-crowdsourcing-app-for.html>.

190. Lawler, R. « On-demand delivery startup Postmates raises \$16 million from Spark Capital. » TechCrunch, 18 février, 2014.

191. Lawler, R. « Crowdsourced delivery startup deliv raises \$4.5 million in strategic funding. » TechCrunch, 24 février, 2014.

192. Postmates, consulté le 24 novembre, 2014. <https://postmates.com/>.

193. Borchersen-Keto, S. « Mall REITs react to e-commerce through delivery, experiences. » REIT.com, 12 février, 2014.

194. Cabebe, J. « Walgreens uses crowdsourced delivery service to get cold medicine to sufferers. » PFSK.com, 9 janvier, 2014.

195. Bistip.com, consulté le 24 novembre, 2014. <http://www.bistip.com/>.

196. Friendshippr.com, consulté le 24 novembre, 2014. <http://friendshippr.com/>.

197. mmMule, consulté le 24 novembre, 2014. <http://mmmule.com/>.

198. PiggyBee, consulté le 24 novembre, 2014. <http://piggybee.com/>.



### 3.3 Les nouveaux transports et l'électrification

Les nouveaux transports présentés précédemment ne sont pas tributaires de l'électrification. Si les véhicules autonomes peuvent, en théorie, être électriques ou à combustion interne, ils ont cependant plusieurs avantages à être

électriques. De la même manière, un modèle de transport basé sur l'Internet Physique pourrait être constitué de véhicules à combustion. Les avantages de l'électrification pour les différents aspects sont donc présentés aux sections 3.3.1 et 3.3.2.

### 3.3.1 Les véhicules autonomes et l'électrification des transports

D'un point de vue technologique, les véhicules à combustion interne ne sont pas adaptés à un fonctionnement complètement autonome<sup>199</sup>. Ils devraient être repensés entièrement pour supporter une commande électrique plutôt que mécanique et intégrer une redondance des systèmes critiques à la sécurité. L'industrie automobile aurait donc besoin de redévelopper une nouvelle plateforme de véhicule pour permettre un fonctionnement entièrement autonome alors que la bien plus faible complexité des véhicules électriques leur permet déjà de recevoir cette technologie<sup>200</sup>.

Il est attendu que l'arrivée des véhicules autonomes amènera des changements importants dans les systèmes de transport, notamment dans la croissance de l'automobile partagée<sup>201,202</sup>. Par rapport aux voitures personnelles, une flotte de véhicules autonomes pourrait fournir la mobilité individuelle avec un niveau comparable de service et de confort, et à un coût nettement inférieur grâce à une meilleure utilisation et optimisation de la flotte. Dans une flotte de véhicules autonomes, les avantages des véhicules électriques peuvent maintenant être mis à profit : des moteurs plus robustes et plus durables, une faible complexité de la chaîne de transmission et des émissions réduites. La plus faible autonomie des véhicules électriques ne serait plus un problème puisque les gens n'auraient plus besoin de posséder un véhicule répondant à tous leurs besoins<sup>203</sup>.

Il faut également noter qu'une telle flotte pourrait être en mesure de se répartir de manière autonome lors de la recharge pour réduire l'impact sur le réseau de distribution électrique. Le projet V-Charge<sup>204</sup>, issu d'un consortium entre l'ETH Zurich, Volkswagen, University of Oxford, Università degli Studi di Parma, Technische Universität Braunschweig et Robert Bosch GmbH, s'attaque à cette question.

### 3.3.2 L'Internet Physique et l'électrification des transports

L'électrification des transports est un des leviers de la mise en œuvre de l'Internet Physique parce qu'elle réduit les frais d'opération des véhicules, permet de livrer la nuit dans les villes, facilite le développement de solutions robotisées de transport et permet de réduire les impacts environnementaux (ce qui est une des raisons d'être de l'Internet Physique). L'électrification des véhicules incite à développer l'autopartage. En effet, l'impact environnemental dans le cycle de vie d'une voiture électrique est situé au moment de la fabrication de la batterie, contrairement à une voiture à essence. Ainsi, pour minimiser son impact environnemental, elle a intérêt à être utilisée au maximum. De plus en plus, les opérateurs de services d'autopartage se tournent vers les voitures électriques qui coûtent moins cher en énergie et en entretien. Communauto dispose d'une flotte de 23 Leaf de Nissan<sup>205</sup>. La Bluecar de Bolloré<sup>206</sup> (utilisée dans les réseaux de Paris, Lyon, Bordeaux et Indianapolis) est même un véhicule électrique spécifiquement conçu pour l'autopartage.

L'électrification est elle-même facilitée par l'Internet Physique en raison notamment de son exploitation des transports interhubs qui limite le besoin d'autonomie à la distance entre hubs, facilite la recharge dans ces hubs durant les périodes de transbordement, et concentre les flux sur les segments interhubs où il peut devenir pertinent de mettre en place une infrastructure électrifiée tel que discuté au chapitre 2.

## 3.4 Les systèmes de transport intelligents et l'électrification des transports

La Société des systèmes de transport intelligents du Canada décrit les systèmes de transport intelligents (Intelligent Transportation Systems, ITS/STI) comme l'utilisation de technologies avancées et émergentes dans les transports dans le but de sauver des vies, d'économiser du temps, de l'argent, de l'énergie et de réduire l'impact environnemental du transport. Les technologies considérées incluent les ordinateurs, les capteurs, les systèmes de contrôle et de communication, ainsi que les dispositifs électroniques.

---

199. Fehrenbacher, K. « The first driverless cars will be electric, thanks to Google & Tesla, and that's important. » Gigagom, 28 mai, 2014.

200. Hars, A. « Autonomous cars: Breakthrough for electric vehicles. » Driverless car market watch, 20 février, 2014.

201. Keeney, T. « Autonomous cars, enormous opportunity. » Seeking Alpha, 28 septembre, 2014.

202. Hars, A. « Autonomous cars: Breakthrough for electric vehicles. » Driverless car market watch, 20 février, 2014.

203. Yglesias, M. « A computer will drive the electric car of the future. » Slate Money Box (Blog), 15 février, 2013. [http://www.slate.com/blogs/moneybox/2013/02/15/autonomous\\_cars\\_and\\_electric\\_vehicles\\_a\\_match\\_made\\_in\\_heaven.html](http://www.slate.com/blogs/moneybox/2013/02/15/autonomous_cars_and_electric_vehicles_a_match_made_in_heaven.html).

204. V-Charge, consulté le 15 novembre, 2014. <http://www.v-charge.eu/>.

205. Quesnel, S. « Communauto : 23 Leaf en libre-service sur Montréal. » Autosphère, 22 mai, 2013.

206. Blanco, S. « Renault, Bolloré get together for new EV, Bluecar production, carsharing. » Autoblog Green, 9 septembre, 2014.

Cette définition s'accorde avec celle de l'Union européenne (Parlement européen et conseil de l'Union européenne 2010), selon laquelle « les systèmes de transport intelligents sont des applications avancées qui, sans pour autant comporter de processus intelligent à proprement parler, visent à fournir des services innovants liés aux différents modes de transport et à la gestion de la circulation et permettent à différents utilisateurs d'être mieux informés et de faire un usage plus sûr, plus coordonné et plus "intelligent" des réseaux de transport. Les STI associent les télécommunications, l'électronique et les technologies de l'information à l'ingénierie des transports afin de planifier, concevoir, exploiter, entretenir et gérer les systèmes de transport. L'application des technologies de l'information et de la communication au secteur du transport routier et à ses interfaces avec d'autres modes de transport contribuera grandement à améliorer les performances environnementales, l'efficacité, notamment énergétique, la sécurité et la sûreté du transport routier, y compris le transport de marchandises dangereuses, la sécurité publique, et la mobilité des passagers et des marchandises, tout en assurant le bon fonctionnement du marché intérieur et en améliorant les niveaux de la compétitivité et de l'emploi. Cependant, les applications STI devraient s'entendre sans préjudice des questions touchant à la sécurité nationale ou qui sont nécessaires dans l'intérêt de la défense. »

Cela va également de pair avec la stratégie canadienne dont la vision est de créer un environnement pour stimuler les collaborations dans la recherche et le déploiement des STI, autant dans les régions urbaines que rurales du Canada, pour accroître la sécurité et maximiser l'efficacité et l'utilisation des systèmes de transports actuels<sup>207</sup>.

Au Québec, l'Association québécoise des transports (AQTr) dirige une table d'expertise sur les STI. Son objectif est d'améliorer la connaissance et la compréhension nécessaire au déploiement des STI dans la communauté québécoise. Pour ce faire, elle regroupe des experts provenant de centres de recherche, d'entreprises privées, de ministères, d'institutions d'enseignement et de l'administration des villes et municipalités. Le Ministère des transports du Québec (MTQ) pilote également un Plan stratégique québécois des STI. La société multidisciplinaire CIMA + a été sélectionnée par le MTQ pour participer à la réalisation du plan stratégique québécois des STI. La ville de Montréal, qui s'est également dotée d'un Plan stratégique des STI, accueillera le Congrès mondial sur les STI prévu pour 2017<sup>208</sup>. Dans son programme fédéral américain sur les STI, le U.S. Department of Transportation<sup>209</sup> regroupe les applications des STI en deux catégories : les infrastructures intelligentes et les véhicules intelligents.

Le DIVA<sup>210</sup>, un réseau stratégique du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG), regroupe plusieurs partenaires<sup>211</sup> dans la recherche et le développement de réseaux de communication intelligents et s'intéresse à leur application aux véhicules. Plus spécifiquement, « il vise à concevoir et à élaborer des protocoles et des applications se rapportant aux réseaux ponctuels et aux réseaux de capteurs pour les véhicules (vehicular ad hoc and sensor networks – VANets) qui permettent les communications haute vitesse entre les véhicules et une infrastructure au sol tout en améliorant l'agrément de conduite. »<sup>212</sup> Le centre interuniversitaire québécois CIRRELT<sup>213</sup> et University of Toronto<sup>214</sup> possèdent chacun leur laboratoire sur les systèmes de transport intelligents regroupant plusieurs chercheurs.

### 3.4.1 Vers un transport multimodal intégrant passagers et marchandises

Le multimodal a encore une place mineure dans la pratique actuelle du transport. Encore plus exceptionnel est le transport couronnant de passagers et de marchandises. Rares sont les occasions où le même véhicule transporte les deux à la fois comme sur certaines lignes de bateaux ou les autobus intercités. Pourtant, dans une perspective de transport interconnecté selon les principes de l'Internet Physique, organiser la multimodalité et la convergence entre transport de personnes et de marchandises pourrait être très profitable dans plusieurs circonstances (Montreuil 2011).

207. « Intelligent Transportation Systems. » Transport Canada, modifié la dernière fois le 22 août, 2013. <http://www.tc.gc.ca/eng/innovation/its-menu.htm>.

208. « Congrès mondial sur les systèmes de transport intelligents de 2017. » Union des municipalités du Québec (UMQ), 30 août, 2013. <http://www.umq.qc.ca/nouvelles/actualite-municipale/congres-mondial-sur-les-systemes-de-transport-intelligents-de-2017-30-08-2013/>.

209. « Intelligence Transportation Systems. » Research and Innovative Technology Administration, consulté le 21 août, 2014. <http://www.itsoverview.its.dot.gov>.

210. NSERC DIVA, consulté le 17 novembre, 2014. <http://nsercdiva.com/>.

211. Les partenaires universitaires sont les suivants : University of Ottawa, University of Waterloo, Queens University, University of Alberta, l'École Polytechnique de Montréal, University of British Columbia, Carleton University, University of Ontario – Institute of Technology et l'Université du Québec à Chicoutimi.

212. « Developing next generation intelligent vehicular networks and applications. » Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada, modifié la dernière fois le 21 novembre, 2012. <http://www.nsercpartnerships.ca/How-Comment/Networks-Reseaux/diva-diva-fra.asp>.

213. Les partenaires sont les suivants : Université Laval, McGill, Université Concordia, École de Technologie Supérieure, UQAM, HEC Montréal, Polytechnique Montréal, Université de Montréal CIRRELT, consulté le 22 novembre, 2014. <https://www.cirreлт.ca/>.

214. « Intelligent transportation systems. » University of Toronto, consulté le 17 novembre, 2014. <http://www.civil.engineering.utoronto.ca/research/transport/its.htm>.

La multimodalité la plus aboutie est focalisée sur les conteneurs de 6m et 12m. Les navires et les ports sont maintenant conçus explicitement pour traiter de tels conteneurs. Les systèmes de manutention adaptés facilitent le chargement et le déchargement des navires, ainsi que le transfert modal des conteneurs vers les wagons ou les semi-remorques. Le ferroutage, embarquant une semi-remorque routière au complet sur un train, est aussi pertinent pour les longues distances (RIQ 2010).

En ce qui concerne la livraison urbaine, plusieurs expérimentations ont été menées pour faire circuler de la marchandise (livrer les magasins, sortir les déchets, etc.) en utilisant les réseaux ferrés (trains de banlieue, trams et métro) (DRIEA 2010). L'intérêt est d'utiliser ces moyens de transport durant les heures creuses du transport de passagers qui correspondent aux heures pleines de livraison. L'idée n'est pas nouvelle. Le tramway a transporté des marchandises dans de nombreuses villes jusque dans les années 1950 (Paris, New York, Berlin). Plus rare, certaines villes ont utilisé le métro : ainsi Saint Petersburg jusqu'en 2007 ou Chicago plus tôt dans son histoire (DRIEA 2010).

Le tram est encore utilisé dans plusieurs villes pour transporter du fret (DRIEA 2010). À Dresden, Volkswagen utilise depuis 2001 le CargoTram pour faire traverser la ville aux équipements entre deux usines. Il est géré par la société exploitant les transports publics. Deux rames circulent toutes les 40 minutes. À Vienne, le GuterBim expérimente le transport de marchandises pour une chaîne de magasins et l'acheminement des déchets. À Zurich depuis 2003 un tramway ramasse les déchets, les encombrants, le verre et le papier. Quatre fois par mois, les habitants peuvent venir déposer leurs déchets. Il est ainsi récupéré 500 tonnes par an. Toutefois à Anvers, Erfurt ou Amsterdam les projets ont été abandonnés faute d'investisseurs après les périodes de test.

D'autres projets visent à exploiter le train de banlieue qui, comme son nom l'indique, a l'immense avantage de partir des zones périphériques (où peuvent être implantées des bases logistiques) pour rejoindre les centres-villes. À Berlin, le Rail Runner devait permettre d'utiliser le réseau de transport de banlieue pour desservir durant les heures creuses les grands magasins du centre-ville depuis les bases logistiques mises en place par les distributeurs (DRIEA 2010).

Siemens a aussi travaillé sur un concept de métro automatisé, le Cargoval, capable de transporter conteneurs ou palettes en fonctionnant avec les infrastructures existantes. Les trains peuvent combiner wagons de voyageurs et de marchandises. Le temps de déchargement d'une voiture sur un quai s'effectuerait en 23 secondes, compatible avec le temps nécessaire pour faire monter/descendre des voyageurs (DRIEA 2010).

L'utilisation du matériel ferroviaire de voyageurs pour transporter des marchandises est théoriquement séduisante. Mais elle est peu mise en pratique. L'enjeu n'est ni technologique, ni opérationnel, mais économique et logistique (DRIEA 2010). D'une part, il manque les investisseurs pour lancer le projet. Les villes ne peuvent plus assumer les efforts financiers nécessaires. D'autre part, les interconnexions avec les autres modes de transport sont inexistantes ou inefficaces, car non conçues selon les principes de l'Internet Physique. Les initiateurs de tels projets sont ainsi actuellement des chargeurs qui y trouvent leur compte (voir par exemple Monoprix en France<sup>215</sup>) ou des prestataires prêts à prendre le risque.

Plusieurs concepts de véhicules modulaires à usages multiples ont été imaginés, par exemple le Citi Transmitter<sup>216</sup> ou le VW Unibloch<sup>217</sup>. Le Citylog EMF, quant à lui, commence ses tests à Klagenfurt (Autriche). C'est un véhicule fonctionnant à l'hydrogène, capable de transporter des marchandises ou huit passagers. Les véhicules peuvent se connecter pour former un petit train, en fonction des besoins (Kern et collab. 2014).

### 3.4.2 Un changement de paradigme nécessaire

L'application de l'Internet physique au transport des personnes et des marchandises doit être considérée comme constituant un changement de paradigme centré sur les systèmes de transport (Montreuil 2011). Les changements dans les systèmes de transport envisagés se situent dans une mouvance plus large, laquelle est à la fois technologique et sociale. Quand les changements qui sont impliqués se répercutent sur un ensemble de dimensions sociotechniques, on peut réellement parler d'un changement de paradigme.

Un paradigme peut être défini brièvement comme un ensemble de technologies, de pratiques, de comportements et d'idées qui forment un système doué d'une certaine cohérence (Kuhn 1962). Dans le domaine du transport des personnes en particulier, on peut dire que nous nous trouvons devant l'émergence d'un changement de paradigme, une transition sociotechnique qui peut s'étendre sur plusieurs décennies (Banister, Schwanen et Anable 2012).

---

215. Noyer, O. « Monoprix s'appuie sur le train pour approvisionner Paris. » Les Échos, 25 mars, 2010.

216. Bredenberg, A. « Vincent Chan's Citi.Transmitter shows how a modular vehicle could support sustainable cities. » Inhabitat, 3 janvier, 2013.

217. Robin, A. « VW uniblock concept car connects in multiples for big open-plan interiors. » Trend Hunter, 4 mars, 2014.

Sur le plan technologique, ce paradigme émergent se fonde davantage sur l'électricité que sur le moteur à combustion interne. Sur le plan des pratiques, on peut dire que le moteur à essence a tendance à individualiser le transport tandis que l'électricité a tendance à réunir les usagers dans un système partagé. Au niveau des comportements, il y a les premiers signes d'un déclin de l'importance de l'utilisation de l'automobile, surtout parmi les jeunes des pays riches, qui ont à leur disposition une gamme de moyens de communication qui réduisent la nécessité de la mobilité physique pour se rencontrer (Sivak et Schoettle 2011).

Sur le plan des comportements, mais aussi sur le plan des valeurs, le changement de paradigme décrit se situe dans la description qu'a donnée Jeremy Rifkin dans *La troisième révolution industrielle* (2012), caractérisé par une utilisation accrue des communications interactives qui, elles-mêmes, ouvrent la voie à des modes plus coopératifs et moins compétitifs.

Sur le plan des idées et des valeurs, il y a un développement des concepts de partage et de vision plus holistique au niveau du transport des personnes, ce qui pourrait donner lieu à des tensions culturelles, entre les défenseurs de la banlieue d'une part, et ceux de la densification urbaine, d'autre part, déjà présentes dans une ville comme Toronto ou New York par exemple (Cohen 2012).

L'exemple ci-haut renvoie à la possibilité de blocage dans la réalisation du dépassement du système de transport actuel (Cohen 2012). Le système sociotechnique de l'automobile, qui domine actuellement dans le monde, est bien installé et Vergragt et Brown (2007) s'attendent à de fortes résistances devant des efforts pour remettre en question sa suprématie.

### 3.4.3 Les politiques publiques

Le passage vers un nouveau paradigme en transport, autant celui des personnes que des marchandises, exigera une grande coordination. Même une fois installées, les nouvelles pratiques de transport exigeront des processus d'intégration et de coordination importants. Il est possible que ces systèmes et processus soient basés sur des systèmes informatiques sophistiqués et performants quand ils seront à maturité, leurs arrivées et leurs développements initiaux nécessiteront une dose importante de coordination humaine.

Théoriquement, la coordination humaine peut être assurée de différentes façons. Le thème de la gouvernance s'attache à la question de savoir jusqu'à quel point on doit se fier à l'État, au marché ou aux contrats pour réaliser tel ou tel objectif. Dans le cas présent, soit le passage vers un nouveau paradigme en transport, certaines caractéristiques du défi orientent vers un mode proactif de coordination. En effet, la construction d'infrastructures intégrées, la production et l'appui de nouvelles technologies et processus qui ne peuvent pas soutenir la compétition dans un marché ouvert à leurs débuts, sans compter la nécessité de contrer les blocages institutionnels qui se présentent inévitablement, constituent autant de facteurs qui rendront l'intervention étatique inévitable.

Par ailleurs, il importe de préciser tout de suite, à la lumière des propos de Anthony Giddens (2009), que l'État envisagé n'est pas l'État de type exclusivement 'top-down', mais bien un État qui pratique la collaboration, les partenariats, les instruments participatifs et incitatifs de la gouvernance contemporaine. Cela n'exclut d'ailleurs pas la législation, lorsqu'elle sera nécessaire. Par exemple, pour permettre aux véhicules autonomes d'intégrer les marchés, il faudra dans un premier temps revoir la législation. Si les données collectées par les véhicules autonomes vont permettre de reconstituer beaucoup plus précisément les circonstances d'un accident et d'identifier le(s) fautif(s)<sup>218</sup>, il faudra encadrer la gestion de la responsabilité en cas de faute de la part d'un véhicule autonome.

---

218. Simonite, T. « Data shows Google's robot cars are smoother, safer drivers than you or I. » MIT Technology Review, 25 octobre, 2013.

# Chapitre 4

## Les politiques publiques en matière de transport durable

Les politiques publiques en matière de transport durable peuvent se classer dans deux catégories : une première catégorie prônant des solutions technologiques, telles que l'électrification des transports, et une deuxième catégorie visant un transfert modal, c'est-à-dire un transfert du mode de transport individuel en automobile vers les modes de transport publics ou actifs (bicyclette, marche). Dans ce chapitre, ces deux grandes catégories de politiques publiques seront examinées à travers le thème de l'électrification des transports (section 4.1) puis du transfert modal (section 4.2). Contrairement aux chapitres antérieurs, où il a été abondamment question du transport des personnes, du transport des marchandises et du transport des marchandises en lien avec le transport des personnes, la revue systématique de littérature dont le présent chapitre rendra compte, a fait ressortir essentiellement des articles traitant de la question de l'électrification du transport du point de vue du transport automobile solo.

Cette revue systématique de la littérature a été réalisée pendant l'été 2014 à partir de la perspective des sciences sociales. Elle a porté sur les articles scientifiques les plus récents, c'est-à-dire, des articles publiés entre 2010 et 2014. Des articles moins récents ont aussi été sélectionnés selon leur pertinence. Les recherches utilisaient des mots-clés traitant de la planification des transports urbains durables et électriques d'avenir : prospective, urban, transport, electric, governance, futures, sustainable, mobility.

### 4.1 L'électrification des transports

Selon Silvester et collab. (2013) et Spickerman, Grienitz et Von der Gracht (2013), il faut d'abord, pour mobiliser la population en vue d'électrifier les transports, proposer des images, des visions de l'avenir du transport. Ces propositions constituent des étapes nécessaires et préalables aux investissements requis pour l'électrification (Silvester et collab. 2013; Spickerman, Grienitz et Von der Gracht 2013). Elles permettent aussi de mettre les antagonismes partisans de côté en faveur d'une image de l'avenir partagée. Par ailleurs, les images et les visions d'avenir précèdent naturellement la planification stratégique et le choix des politiques publiques par l'État. Pour Hickman et collab. (2011), la participation réelle de tous les acteurs concernés est importante pour créer ces images et ces visions de l'avenir du transport. Les acteurs concernés sont les politiciens, les planificateurs, les gens d'affaires, les industriels, les groupes communautaires, les groupes environnementaux et les citoyens. La participation peut se faire dans des forums de discussion tels que les conseils de quartier, les conseils de ville et les parlements. Au niveau municipal, le leadership des élus en faveur de l'électrification est crucial. Les élus qui sont perçus comme champions d'une ville carbonneutre font grandement avancer la cause du transport durable. Par exemple, une ville durable a généralement un maire très proactif, souvent charismatique, qui initie un projet radical et le supervise du début jusqu'à la fin (Carrier et collab. 2011). En ce qui concerne l'État, Wee et collab. (2012) affirment que le gouvernement peut agir sur deux plans : 1) il peut mettre en place des conditions pour que les véhicules électriques puissent concurrencer les véhicules à combustion; 2) il peut s'assurer que l'infrastructure de soutien aux véhicules électriques est disponible, particulièrement, les bornes de recharge. Pour réaliser ces objectifs, ces chercheurs proposent plusieurs actions gouvernementales telles :

- la mise en œuvre de restrictions routières en faveur des véhicules électriques (par exemple, un quartier particulier de la ville qui serait accessible seulement par des véhicules électriques ou des stationnements réservés aux véhicules électriques);
- l'utilisation d'une tarification de l'utilisation routière variable;
- la subvention à l'achat et les avantages fiscaux aux propriétaires de véhicules électriques;
- la planification urbaine obligeant les constructeurs à construire des immeubles munis de bornes de recharge;
- la mise en place de politiques d'infrastructures routières qui prévoient des arrêts routiers munis de bornes de recharge;
- l'offre d'électricité gratuite pour la recharge de véhicules électriques parallèlement à une augmentation des taxes sur l'essence;
- les campagnes de marketing et d'information vantant les divers mérites et avantages du véhicule électrique.

Wee et collab. (2012) affirment que la combinaison de plusieurs actions gouvernementales permettrait des effets de synergie. Nakamura et Hayashi (2013) donnent un aperçu un peu plus synthétique des différentes actions

gouvernementales. Ces chercheurs ont effectué une recherche mondiale sur les villes. Elle visait à classer les mesures prises dans diverses villes pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Les chercheurs ont classé les actions des villes selon trois modes : AVOID, SHIFT et IMPROVE. Pour électrifier les transports, les actions classées au sein du mode IMPROVE sont les plus indiquées. Ce mode regroupe les actions qui s'attachent à : réduire l'intensité des émissions polluantes, restreindre l'usage des véhicules polluants, élargir l'usage des véhicules peu polluants; offrir des subventions à l'achat et des allègements d'impôts à l'achat; diminuer la tarification routière pour les véhicules peu polluants et augmenter la tarification routière pour les véhicules polluants; créer un marché de carbone. Pour réaliser un transfert de parts modales, soit la réduction des parts du transport en automobile et l'augmentation du transport public ou actif, les actions au sein des modes SHIFT et AVOID sont utilisées. Le mode SHIFT emploie l'ensemble des instruments de politiques publiques pour diminuer l'utilisation de l'automobile et promouvoir l'utilisation des transports publics. Le mode AVOID tend à réaliser des villes compactes par la planification urbaine et la réglementation du sol. Le but de ce mode est de réduire la mobilité qui n'est pas nécessaire ou peut être évitée. Ces deux derniers modes seront élaborés en détail dans la section deux.

Le mode IMPROVE inclut, quant à lui, des actions gouvernementales telles que :

- le développement de véhicules à faibles émissions, notamment les véhicules électriques, hybrides et à hydrogène par des investissements en recherche et développement;
- le contrôle des émissions des véhicules par des réglementations sur l'efficacité énergétique et les émissions de gaz à effet de serre;
- la promotion de l'usage des véhicules à faibles émissions de gaz à effet de serre par les taxes vertes (les véhicules qui émettent beaucoup de gaz à effet de serre sont plus taxés que les véhicules qui en émettent peu);
- le développement d'un marché de carbone pour les automobilistes;
- le déploiement de systèmes de transports avancés, comme le contrôle de la vitesse des routes en temps réel et la tarification de l'usage des routes selon l'usage.

Nakamura et Hayashi (2013) ont proposé le développement d'un marché de carbone pour les conducteurs d'automobiles. Bakker et Trip (2013) proposent pour leurs parts d'autres mesures comme :

- établir un standard de prises et de fiches électriques;
- démontrer du leadership politique en ayant des véhicules électriques dans le parc automobile gouvernemental;
- appuyer l'autopartage avec véhicules électriques;
- permettre aux véhicules électriques d'utiliser les voies réservées aux taxis et autobus.

En plus de ces actions gouvernementales plus traditionnelles, la revue de littérature a mis en relief d'autres stratégies, moins classiques, pour faciliter l'électrification des transports. Kemp et collab. (1998) présentent ce qu'ils appellent la « gestion stratégique de niche ». Celle-ci vise à créer une niche pour une nouvelle technologie, comme le véhicule électrique, afin de faciliter son introduction et son adoption par les utilisateurs. D'abord, les auteurs indiquent que la gestion stratégique de niche est nécessaire parce que le changement technologique, en l'occurrence l'introduction des véhicules électriques, est ralenti par des régimes technologiques dominants, ici les véhicules à combustion interne. Les régimes technologiques dominants produisent un effet d'exclusion de nouvelles technologies. On appelle ce phénomène un « blocage technologique ». De plus, les technologies radicalement différentes des anciennes, comme la propulsion électrique, requièrent des changements au plan de la demande et de l'offre. Cela prend énormément de temps et occasionne beaucoup de résistances. Alors, pour offrir une opportunité à la nouvelle technologie, il faut créer des espaces temporairement protégés. En permettant l'apprentissage des utilisateurs dans l'espace protégé, la niche offre une opportunité à la nouvelle technologie de passer du stade d'idée au stade de l'utilisation réelle. Sans la présence d'une niche, cela ne serait pas nécessairement possible.

Pour créer une niche, Kemp et collab. (1998) proposent de suivre cinq étapes : (1) choisir la technologie, (2) sélectionner une expérience, (3) mettre en place l'expérience, (4) accroître l'échelle de l'expérience puis, une fois que la technologie est bien ancrée, (5) retirer les protections, les soutiens, les appuis à la technologie. Les niches peuvent être des zones géographiques ou fonctionnelles, comme le transport entre un aéroport et un centre-ville. Sadek (2012) mentionne d'autres exemples : des quartiers résidentiels où les limites de vitesse sont contrôlées, les villes congestionnées, les stations balnéaires, les taxis et les transports publics. Ce peut être aussi une clientèle particulière. Par exemple, différents gouvernements ou des universités qui utiliseraient des véhicules électriques pour certaines de leurs fonctions.

Cela étant dit, qui peut jouer le rôle de gestionnaire de niche? Kemp et collab. (1998) indiquent que différents acteurs peuvent jouer ce rôle : l'État, des agences de réglementation, les gouvernements locaux, des organisations non gouvernementales, des groupes de citoyens, des regroupements industriels, des groupes d'intérêts et même des individus agissant seuls. Le gouvernement n'est donc pas le seul acteur capable de gérer l'électrification des transports. En l'absence d'intervention de l'État, les citoyens peuvent s'organiser pour l'achat de bornes de recharges communautaires, l'achat de véhicules électriques partagés et la création de niches au niveau du quartier.

En plus de la gestion stratégique de niche, la revue systématique de la littérature a soulevé d'autres stratégies possibles pour le gouvernement. Schot et collab. (1994) proposent d'arrimer ensemble trois stratégies pour accélérer l'adoption des véhicules électriques. En plus de la gestion stratégique de niche, les deux autres stratégies sont le forçage technologique et la liaison technologique. L'arrimage de ces trois stratégies serait plus efficace que leur usage séparé et pourrait donner lieu à des effets de synergies, comme l'affirment Wee et collab. (2012).

Le forçage technologique se produit lorsque le législateur impose, à un constructeur automobile, par exemple, une norme de performance qui ne peut être atteinte avec la technologie existante ou à un coût acceptable par le constructeur. Pour vendre leurs automobiles dans la juridiction concernée par l'action du législateur, les constructeurs sont forcés, par exemple, d'offrir au moins un modèle de voiture électrique ou de réduire du tiers les émissions de gaz à effet de serre d'un modèle de véhicule à combustion. Ce type d'action est déjà entrepris avec succès en Californie, au Vermont et dans l'État de Washington (Schot et collab. 1994).

La liaison technologique vise à créer de nouvelles alliances entre les constructeurs de véhicules électriques, les acheteurs et les agences de réglementation du gouvernement. Schot et collab. (1994) énoncent deux exemples, toujours actuels, d'organismes responsables de la liaison technologique : CALSTART<sup>219</sup> en Californie et NOVEM aux Pays-Bas, devenus SenterNovem en 2004<sup>220</sup>. CALSTART est une organisation sans but lucratif visant à créer une industrie de transport avancé. Elle installe des bornes de recharge, fait des enquêtes de marché et vise à construire un nouveau véhicule électrique de montre. NOVEM coordonne les acteurs importants de l'électrification des transports pour découvrir et développer des marchés pour les véhicules électriques. Dans ce but, il met en place des programmes de recherche et développement pour le Ministère des Affaires économiques des Pays-Bas. Au Québec, la liaison technologique est assurée par le Centre national de transport avancé (CNTA)<sup>221</sup>.

Schot et collab. (1994) proposent une façon, parmi d'autres, d'arrimer ces trois outils. D'abord, le forçage technologique mène à des innovations technologiques. Par exemple, le gouvernement pourrait forcer les constructeurs automobiles à offrir au minimum un modèle de véhicule électrique sur son territoire. Cependant, ce véhicule aurait, il semble bien, une autonomie plus faible qu'un véhicule à combustion. Il y aurait donc une faiblesse technique qui pourrait être compensée éventuellement grâce à l'expérience sur le terrain, dans une niche par exemple, des utilisateurs du nouveau véhicule à moins grande autonomie. Les utilisateurs pourraient apprendre, à gérer l'autonomie réduite du véhicule en privilégiant des déplacements plus courts. Une fois cet apprentissage acquis, l'organisation responsable de la liaison technologique pourrait diffuser l'apprentissage des utilisateurs aux constructeurs automobiles et aux agences de réglementation de l'État.

En plus du forçage technologique, de la gestion stratégique de niche et de la liaison technologique, Nill et Kemp (2009) proposent d'ajouter d'autres voies d'actions possibles pour l'État. Ils font les constats suivants : le système automobile actuel provoque des problèmes persistants (gaz à effet de serre, coûts du pétrole élevé, pollution environnementale, smog); ces problèmes ne peuvent pas être résolus par des changements incrémentaux suivant les sentiers déjà parcourus; pour résoudre les problèmes persistants du système automobile, le gouvernement doit s'atteler à réaliser un changement technologique fondamental. Pour réaliser un changement tel que l'électrification du système automobile, les gouvernements pourraient employer une vision systémico évolutionnaire, issue du courant des approches évolutionnaires. Systémico désigne, dans ce cas, le système automobile. Évolutionnaire est défini comme l'innovation, le changement, les mécanismes de variation, de sélection et de rétention observés dans l'évolution des technologies. La vision systémico évolutionnaire du gouvernement se traduirait alors en action sous la forme de politiques publiques adaptatives, au sein desquelles Nill et Kemp (2009) identifient trois stratégies actuellement à l'œuvre :

- la gestion stratégique de niche;
- la gestion de transition;
- les stratégies de temps.

Nous avons déjà traité de la gestion stratégique de niche. La gestion de transition quant à elle, est un modèle en voie de consolidation, encore flou selon Nill et Kemp (2009). Ce modèle favorise les transitions durables pour traiter des problèmes persistants qui requièrent des innovations fondamentales au niveau du système techno-économique automobile. Le modèle de gestion de transition fait un diagnostic du système automobile : les émissions de gaz à effet de serre sont un problème persistant qui requiert une innovation fondamentale au plan de la production et de l'utilisation d'énergie. Pour effectuer une innovation fondamentale, le modèle emploie des développements du bas vers le haut (bottom-up change), vise des buts à long terme (25 ans et plus) et les utilise comme gabarit d'action à court terme aux niveaux local et national. Le modèle explore plusieurs parcours de transition en même temps (énergie

219. CALSTART, consulté le 15 novembre, 2014. <http://www.calstart.org/>.

220. « Novem. » Dutch industries, consulté le 14 novembre, 2014. <http://www.dutch-industrial.com/novem>.

221. CNTA, consulté le 12 novembre, 2014. <http://cnta.ca/fr/>.



issue de l'hydrogène, des biocarburants, de l'électricité) pour éviter le blocage technologique. Il réfléchit sur de multiples plans (ex. : énergie, transport, pollution, infrastructures, technologies, aménagement du territoire). Il corrige le parcours technologique en ayant recours à la rétroaction de ses politiques publiques et à l'apprentissage social. Finalement, le modèle fusionne les éléments ci-haut au sein d'une modulation orientée vers la transition durable. En résumé, le modèle de gestion de transition est un modèle de gouvernance qui transcende de multiples plans. Il vise à façonner des processus de coévolution par des visions, des expériences de transition et des cycles d'apprentissage et d'adaptation.

La troisième approche proposée par Nill et Kemp (2009) est la stratégie de temps. Elle met aussi l'accent sur le blocage technologique. Elle propose des moyens pour dépasser le blocage afin de faciliter une transition technologique. Cette approche débute avec le diagnostic d'un blocage technologique. Le blocage technologique est ici causé par la technologie actuellement dominante dans les transports : le moteur à combustion interne. Il est assumé que cette technologie dominante empêche plus ou moins fortement l'introduction de toute nouvelle technologie. Le degré et le type de blocage technologique peuvent varier dans le temps. Tout dépend de la force de concurrence de la nouvelle technologie.

Nill et Kemp (2009) rappellent que le véhicule électrique était une option offrant une concurrence potentielle au véhicule à essence suivant la crise pétrolière de 1973. L'utilisation du véhicule à essence était coûteuse dû au prix du pétrole. Les automobilistes cherchaient d'autres options de propulsion automobile moins coûteuses. Certains songèrent au véhicule électrique comme alternative potentielle. Par contre, cette force de concurrence n'a pas duré. Le prix du pétrole a baissé dans les années 1980 et le véhicule électrique a perdu son avantage concurrentiel. L'exemple offert démontre que le blocage technologique peut varier dans le temps et être fort ou faible. Compte tenu de cette variation, les gouvernements peuvent adapter leurs actions à la dynamique du système technologique. En effet, lorsque le système technologique de l'automobile est affecté négativement par un facteur extérieur, comme le prix élevé du pétrole, et qu'une nouvelle solution technologique devient concurrentielle, une fenêtre d'opportunité technologique s'ouvre. Le gouvernement peut exploiter cette fenêtre d'opportunité pour faciliter la transition technologique.

Il existe trois types d'actions pour exploiter la fenêtre d'opportunité : (1) préparation de fenêtres; (2) création de fenêtres; et (3) utilisation de fenêtres. Nill et Kemp (2009) recommandent d'utiliser des actions de préparation de fenêtres lorsque le système technologique est ancien, stable et qu'il existe une solution prometteuse. Les actions de création de fenêtres sont utilisées lorsque le système technologique est instable et que le gouvernement est forcé d'agir suivant de fortes pressions sociales ou politiques. Pour sa part, l'utilisation de fenêtres est appropriée lorsque la concurrence est bien établie entre une vieille technologie bien comprise et bien évaluée et une nouvelle technologie supérieure au plan environnemental. Sans solution technologique de remplacement disponible, l'ouverture d'une fenêtre d'opportunité est impossible. Dans ce cas, le gouvernement pourrait viser à stimuler la recherche scientifique. Cela permettrait de développer des solutions technologiques prometteuses, lesquelles permettraient d'ouvrir une fenêtre d'opportunité.

Malgré tous les avantages de la voiture électrique (Bakker et Trip : 2013), il n'est pas certain qu'elle sera aisément adoptée dans les prochaines décennies. Des difficultés seront présentes lors du processus d'électrification. Steinhilber et collab. (2013) ont analysé les difficultés rencontrées par la Grande-Bretagne et l'Allemagne lors de la mise en place de véhicules électriques. Celles-ci sont : l'absence d'infrastructures de recharge, telles les bornes; des consommateurs sceptiques devant la nouvelle technologie électrique; et des piles insuffisamment développées.

Dans la même veine, Egbu et Long (2012) ont réalisé un sondage auprès d'étudiants de premier et de deuxième cycle universitaire propriétaires de véhicules à essence. Ce sondage a permis aux chercheurs de décrire une gamme de barrières à l'adoption du véhicule électrique ainsi que plusieurs solutions pour les résoudre. La difficulté principale est l'incertitude envers les piles. Les répondants ont peur qu'elles ne durent pas, qu'elles n'offrent pas une autonomie de conduite suffisante et que leur coût de remplacement soit trop important. Pour dépasser ces problèmes, les chercheurs proposent plusieurs recommandations à l'État. Celui-ci pourrait investir davantage en recherche et développement pour augmenter la durée de vie et l'autonomie des piles. Ensuite, pour s'occuper du coût de remplacement des piles, l'État, à l'image de ce que fait Tesla Motors, pourrait créer un programme de remplacement de piles à grande échelle. Ainsi, plutôt que de recharger les piles en cours de route, les automobilistes seraient abonnés à un service de remplacement de piles. Sur les grands axes routiers, ils pourraient s'arrêter et échanger la pile déchargée pour une pile chargée. Egbu et Long (2012) proposent aussi d'améliorer les garanties des manufacturiers pour les piles. Pour informer les acheteurs potentiels de la réalité en matière de technologie des piles, ils proposent d'utiliser les médias traditionnels et sociaux pour informer la population sur certains aspects des véhicules électriques. Une facture d'énergie plus faible et une empreinte écologique plus petite font partie des avantages qu'ils proposent de partager à la population.

En matière de gestion des difficultés présentées ci-haut, Wee et collab. (2012) mettent en garde les pouvoirs publics : l'électrification des voitures ne sera peut-être pas le choix privilégié par les constructeurs automobiles dans le monde. L'État doit garder l'esprit ouvert à d'autres technologies de propulsion automobile, notamment l'hydrogène et les

biocarburants. Il doit intervenir de manière équilibrée, afin d'éviter de choisir les gagnants. L'introduction et la diffusion des véhicules électriques sont un processus hautement incertain selon eux. Pour gérer cette incertitude, ils proposent l'utilisation de politiques publiques adaptatives (Marchau et collab., 2010), conçues pour de telles situations où le but de la politique publique est connu, mais l'avenir incertain. Ce faisant, la politique s'adapte à l'incertitude et varie dans le temps. Par exemple, permettre aux véhicules électriques d'utiliser les voies réservées aux bus et aux taxis est une bonne idée au début de la mise en place des véhicules électriques, lorsqu'ils représentent une fraction des véhicules. Mais, lorsque les véhicules électriques représentent une proportion plus importante des véhicules, cette politique doit être révisée et adaptée.

Puisque les actions des gouvernements ont été énoncées, il importe maintenant de décrire ce que les citoyens peuvent faire. Premièrement, en l'absence de dirigeants politiques sympathiques à l'intervention de l'État, les citoyens peuvent choisir d'exercer leur influence sur un autre niveau de gouvernement, plus attentif à leurs revendications. Cela est appelé un changement du lieu de discussion (Banister et collab. 2012). Deuxièmement, Banister (2010) offre une vision de la ville soutenable réalisée par des citoyens impliqués et actifs dans l'horizon de l'an 2020. Dans ce scénario, les changements proviennent du bas et montent vers le haut (bottom-up change). Ce sont les citoyens qui développent des styles de vie locaux et des valeurs écologiques. Ils s'engagent envers le bien commun et les attitudes envers les actions collectives sont positives, surtout aux niveaux local et régional. Les citoyens font pression auprès des politiciens afin qu'ils adoptent des réglementations environnementales plus strictes, surtout au niveau de la ville. Les citoyens sont prêts à payer davantage pour des produits « verts » comme les véhicules électriques. Certains centres urbains deviennent autosuffisants. Les transports publics, les bicyclettes, les petites voitures électriques sont plus acceptés. Le partage des véhicules est plus courant. La réalisation de cette ville se fait dans le cadre économique du libre marché.

Banister (2010) offre une seconde vision de la ville durable à l'an 2020 où cette fois les changements proviennent du haut et descendent vers le bas (top Down change). Le gouvernement y intervient de façon proactive afin de réduire l'utilisation de la voiture au profit des transports publics et actifs. C'est l'action gouvernementale en ce sens qui permet de réaliser un transfert des parts modales; une réalisation cruciale dans l'atteinte d'un transport urbain durable.

## 4.2 Le transfert des parts modales

Allié à l'électrification des transports, le transfert des parts modales peut réaliser un transport durable. Vergragt et Brown (2007) affirment que le transfert des parts modales est un changement très important : c'est un nouveau paradigme en transport. La réalisation d'un tel changement nécessite les techniques de scénarios énoncées dans la section 4.2.1. Après l'énonciation de ces techniques, Banister (2008) propose un paradigme de la ville durable, parmi d'autres (Masnavi, 2000; Jarrar et Zoabi, 2008), ainsi que plusieurs politiques publiques pour le réaliser.

### 4.2.1 Techniques de scénarios

Selon Vergragt et Brown (2007), l'atteinte d'un transport urbain durable nécessite des façons nouvelles et très différentes de voir le transport. Il s'agit d'un changement de paradigme. Vergragt et Brown (2007) proposent d'y parvenir en passant par l'apprentissage suscité par quatre techniques de scénario :

- le processus de visualisation;
- la construction de scénarios;
- l'exercice de projection à rebours (ou technique d'interpolation rétrospective);
- l'expérience sociotechnique à petite échelle.

Pourquoi utiliser ces techniques? Les auteurs pensent que la réalisation d'un transport durable nécessite avant tout des « changes in the assumptions, norms and interpretive frames which govern the decision-making process and actions of individuals, communities and organizations, or which underlie a policy discourse » (Vergragt et Brown 2007, p. 1108). Le changement des attentes, normes et cadres d'interprétation est important, parce que ceux-ci structurent le processus de décision et d'action des individus, communautés et organisations en transport. Les attentes, normes et cadres d'interprétations forment aussi le fondement discursif des politiques publiques en transport. Les changements visés par Vergragt et Brown (2007) passent par la synthèse, l'analyse et l'évaluation ; trois formes de réflexion (Bloom 1956). Ces trois formes de réflexion permettent aux cadres d'interprétation d'un problème de recevoir de la rétroaction sur leur efficacité à résoudre un problème. En réponse à cette rétroaction, si les cadres ne permettent pas de résoudre le problème de manière satisfaisante, ils sont réévalués et remplacés par d'autres. Les quatre techniques de Vergragt et Brown s'attellent à réaliser ces réflexions au sein de la société.

Les processus de visualisation permettent de créer des visions qui dessinent un avenir possible pour la société. Elles guident les comportements actuels pour atteindre une vision d'avenir. Elles peuvent inspirer les acteurs de la société à vérifier et tester des solutions de rechange au parcours habituel, au statu quo. Lorsque les visions sont partagées par

les acteurs, celles-ci peuvent unifier des opposants dans un cadre d'interprétation du problème qui est partagé. Les visions permettent aussi de créer des scénarios d'avenir durable. Par exemple, la vision d'avenir durable créée par les acteurs s'applique à changer certains comportements indésirables. Elle facilite donc l'activation de changements comportementaux pour l'atteinte de la vision dans le cadre d'un scénario. À cet égard, l'Internet Physique est une avenue possible pour réaliser un transport durable.

Les scénarios permettent de créer plusieurs versions possibles de l'avenir. Ils aident les citoyens, maires ou chefs d'État à reconnaître et adapter leurs comportements selon les aspects changeants de l'environnement. Les scénarios permettent d'articuler différents parcours possibles. Il est alors plus aisé de faire le bon choix aujourd'hui suivant l'effet qu'il produira demain (Schwartz 1991). Pierre Wack (1985) a développé le système de planification des scénarios de décision chez Royal-Dutch/Shell. Son travail a permis de prédire la crise pétrolière de 1973 et préparer l'entreprise à contrer la crise. Wack s'inspirait des travaux de Gaston Berger (Berger 1967) sur la prospective.

La technique d'intrapolation rétrospective est un processus. Elle débute par la construction d'une vision ou d'un scénario d'avenir normatif. Ce scénario ou cette vision est le point de départ utilisé pour créer une stratégie ou un plan d'action qui porte sur la façon de procéder à partir du présent vers l'avenir désiré (Vergragt et Brown 2007, p. 1109 et Davis 1997). Une fois l'objectif stratégique d'avenir identifié, il est possible de travailler à reculons afin d'identifier quelles politiques publiques peuvent être adoptées pour atteindre l'objectif.

L'expérience sociotechnique à petite échelle crée pour sa part une nouvelle configuration technologique ou de service fonctionnel socialement intégré qui peuvent servir de point de départ pour des innovations ou des diffusions futures ou pouvant informer le processus d'élaboration des politiques publiques. Les auteurs citent en exemple, l'autopartage. Ce service existe grâce aux technologies de l'information et des communications, il peut servir à des innovations futures, comme la fin de la propriété privée de l'automobile en faveur de la location (Safdie 1997).

## 4.2.2 Un paradigme de transport durable

Suite à l'utilisation des techniques de scénarios, une variété de futurs sont possibles. Ils facilitent les décisions politiques (Silvester et collab. 2013) et permettent de conceptualiser un paradigme de transport durable (Vergragt et Brown 2007). Banister (2008) propose un paradigme de mobilité durable pour la ville de l'avenir. Pour Banister, la ville est la forme d'organisation la plus durable et elle sera le lieu de résidence de 70 à 80 % de la population mondiale en 2050. Selon lui, la ville durable contient plus de 50 000 citoyens, elle est de densité moyenne (40 personnes par hectare), elle est aménagée afin de permettre des usages mixtes (commercial et résidentiel au sein du même immeuble par exemple), et les développements immobiliers sont réalisés près de corridors de transport public facilement accessibles. Ces caractéristiques sont compatibles et se conforment aux nécessités des économies de savoir et de services, caractéristiques des sociétés post-industrielles. Selon Hall et Pain (2006), une ville de cette taille est liée à d'autres villes pour former des agglomérations à forme polycentriques. Ce type de forme urbaine rend les trajets courts, aisément réalisés par la marche ou le vélo. Elle permet également de donner la priorité aux transports publics. Cela minimise la nécessité d'utiliser l'automobile. Dans l'ensemble, la planification urbaine vise la réalisation d'une ville à l'échelle du piéton. L'objectif est d'assurer un haut niveau d'accessibilité et un environnement de haute qualité. Banister (2008) ne vise pas à empêcher l'utilisation de la voiture. Il vise à réaliser une ville où les citoyens n'auraient pas besoin d'avoir un véhicule pour accéder à tous les services.

En plus de l'électrification des transports, la réalisation de ce paradigme nécessite trois types d'actions (Banister 2008). D'abord, il importe de réduire le besoin de mobilité. Ensuite, le transfert des parts modales est encouragé. Enfin, il faut réduire la longueur des trajets.

### Réduire le besoin de mobilité

Dans l'absolu, Banister (2008) affirme que la réduction du besoin de mobilité signifie qu'un trajet n'est pas réalisé. Il a été remplacé par une activité qui n'implique pas de transport. La technologie, par le magasinage sur Internet par exemple, permet de remplacer le transport. Le télétravail est aussi dans cette catégorie. Déjà, il y a plus de 20 ans, Drucker (1992) avait proposé d'inverser la tendance actuelle. Au lieu de déplacer l'employé de sa résidence à son lieu de travail, il proposait de déplacer le travail à l'employé. Il imaginait cette mesure suivant les développements embryonnaires de l'Internet et de l'ordinateur personnel. Ces moyens de communication s'appellent des technologies de l'information et des communications (TIC). Ces technologies sont davantage utilisées chez les jeunes et il semble, d'après Sivak et Schoette (2011), que les jeunes des pays développés allouent moins d'importance à la mobilité physique que les générations précédentes. Ils peuvent entretenir des relations sociales sans présence physique. Dans la même direction, le « Tiers lieu » correspond à un espace aménagé (bureau ergonomique, éclairage ajustable, vidéoconférence de qualité, salle de réunion, imprimante, etc.) situé entre le bureau et le domicile, pouvant être loué par des travailleurs autonomes, fonctionnaires, consultants, entrepreneurs, pigistes, etc.<sup>222</sup>

222. Living Lab de Montréal. « Avoir son bureau mobile sur demande, près de chez soi. » Je vois mtl, 30 octobre, 2014.

Afin de stimuler, l'utilisation des technologies de l'information et des communications Rajan (2006) propose d'améliorer l'infrastructure existante, notamment la bande passante. À défaut d'une réduction du besoin de mobilité, Moriarty et Honnery (2008) affirment que la réduction de la mobilité sera provoquée par la nécessité. Un coût d'énergie (pétrole, biocarburants, électricité, hydrogène, etc.) extrêmement élevé, à l'avenir, diminuera la possibilité d'une mobilité aussi importante qu'à l'heure actuelle.

### Réaliser le transfert des parts modales

Selon Banister (2008), les gouvernements peuvent agir pour réduire les niveaux d'utilisation des automobiles par la promotion d'alternatives, tels que le transport public, la marche et le vélo. Cela est possible lorsque le gouvernement s'engage à ralentir le transport urbain et à réaffecter aux transports publics certains segments de la route, par des réglementations sur le stationnement, la facturation de l'utilisation des routes et la facilitation de l'utilisation des transports publics. Des techniques de gestion de la demande sont efficaces afin de restreindre l'accès et réaffecter l'espace routier. Ces politiques publiques ont mené, selon Cohen (2012), à des sortes de « guerres » culturelles entre, d'une part, les défenseurs d'un urbanisme plus dense et planifié, et d'autre part, les défenseurs de la banlieue. Selon Cohen (2012 :p. 381), cette « guerre » culturelle prendrait parfois la forme d'un conflit entre cyclistes et automobilistes, comme à Toronto ou à New York.

La première section de ce chapitre a introduit les travaux de Nakamura et Hayashi (2013) portant sur l'amélioration des véhicules automobiles en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les mesures en la matière étaient présentées sous le mode IMPROVE. Ces auteurs proposent un deuxième mode, SHIFT, qui vise à déployer tous les instruments de politiques publiques pour promouvoir le transport en commun. Dans ce mode, on retrouve l'encouragement du développement du transport public plutôt que la construction de nouvelles routes. Aussi, dans le mode SHIFT se retrouve la construction de trains légers, le déploiement de systèmes de transport en commun d'alimentation. Cette dernière mesure vise à transporter les passagers d'un lieu de faible densité à un lieu de forte densité. Aussi, la création de zones urbaines à faible émission de gaz à effet de serre, la facturation de zones fortement congestionnées, le déploiement de systèmes de transport avancé, tels que des systèmes d'information permettant de connaître l'état des routes en temps réels grâce au GPS (Global Positionning System) et l'adaptation de l'offre de transport en commun selon la demande, sont autant de mesures envisagées.

### Réduire la longueur des trajets

Les mesures présentées dans cette sous-section visent à annuler la séparation physique des activités en ville, ainsi qu'à réduire les distances parcourues entre deux activités, en s'appuyant sur les propositions de Banister (2008). La modification de la forme et la disposition de l'espace urbain peuvent amener les citoyens à emprunter davantage les transports urbains et actifs. L'action de l'État vise ici à augmenter les densités et les concentrations urbaines. Cela se produit par le développement immobilier à usage mixte, une nouvelle conception des immeubles, la disposition appropriée des routes et de l'espace, le développement urbain centré sur le transport public, le développement d'espaces résidentiels, commerciaux et industriels sans voitures. Selon Banister (2008), le rythme de réalisation d'une ville visant le transport durable se calcule selon le rythme de renouvellement des immeubles, environ 2 % par an. En suivant ce rythme, une ville pourrait réaliser pleinement un transport durable dans l'horizon de l'an 2064.

Kunstler (2005) propose de réaliser un retour au niveau local, du quartier par exemple. Certaines caractéristiques de ce retour incluent : des jardins communautaires ; des assemblées de quartier qui décident des orientations collectives; la socialisation se réalisant au niveau communautaire. Ce retour est amorcé par les coûts croissants du pétrole et d'une plus grande multifonctionnalité dans l'aménagement des lieux de travail, d'achats et de loisir. Pour Rajan (2006), les villes à forme multinucléaire permettent de réaliser des centres-villes et des régions à usage multifonctionnel. Dans ces villes, les transports sont intégrés pour former une offre de transport multimodale. Il va de soi que le transfert des parts modales nécessite des changements comportementaux dans l'usage des modes de transport (Hickman et collab. 2011).

Il a été énoncé, ci-dessus, que la vitesse de renouvellement des immeubles, soit 2 % par an, conditionne la vitesse à laquelle se réalise une ville durable (Banister 2008). Il va de soi que ce constat concerne les villes déjà construites. L'attente du renouvellement des immeubles est ainsi, une voie à emprunter pour les villes développées. Pour les villes qui ne sont pas encore développées, Nakamura et Hayashi (2013) affirment qu'elles ne sont pas dépendantes de la voiture. Il est beaucoup plus difficile de transformer des villes dépendantes de la voiture en des villes non dépendantes de la voiture que de créer de zéro une ville indépendante de la voiture. Pour les villes en construction, en développement, ces auteurs proposent un dernier mode d'action, AVOID. La réalisation des éléments de ce mode passe par la planification et le contrôle de l'utilisation du sol. Cela signifie, par exemple, la création d'espaces verts et bucoliques venant former des ceintures vertes autour des espaces habités. Par ailleurs, lorsque le développement dense se concentre autour des corridors de transport public (transit-oriented development) la ville peut rester compacte. En Asie, les villes de Tokyo et Osaka illustrent ce type de développement dès le début du XXe siècle. Un peu plus tard, dans les années 1970, Singapour établit un plan maître de développement allant dans le même sens. En Amérique du Sud, Curitiba, au Brésil, est la première ville à développer le transit rapide par autobus (bus rapid

transit). En Europe, plusieurs villes contrôlent l'utilisation du sol en ce sens depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Ces actions, précoces, ont permis à ces villes de demeurer relativement compactes. En Amérique du Nord, le développement urbain compact est plus tardif et commence dans les années 1980. Il vise à régénérer des villes qui souffrent d'étalement urbain.

# Conclusion

Le développement des moyens de transport est un levier du progrès socio-économique. Cependant, les systèmes de transport connaissent aujourd'hui une crise profonde. Leur contribution au réchauffement climatique, leurs effets sur la santé publique, la congestion croissante des villes, la hausse des coûts d'infrastructure et la baisse de productivité induite, amènent à se questionner sur l'évolution du transport. L'électrification des transports est présentée comme une voie possible de solution, tant en termes de transport individuel (voitures), de transport public (train et autobus) que de transport des marchandises. Elle est aussi perçue comme une opportunité pour des États qui, tel le Québec, ont accès à une électricité propre, abondante et peu dispendieuse.

Dans ce contexte, l'objectif de ce rapport était de faire un état des lieux en matière d'électrification des transports et de se questionner sur la position du Québec : son potentiel, ses atouts et ses limites.

## Un potentiel technologique

Les voitures électriques sont très présentes dans le discours sur l'électrification. Les technologies actuelles permettent à quelqu'un ayant un usage urbain de son véhicule électrique de ne pas avoir de problème d'autonomie. Et plus encore, puisqu'une Tesla Model S dans des conditions optimales d'utilisation a une autonomie de 460 km.

Les ventes de véhicules électriques sont en forte croissance, mais les volumes sont encore très faibles. Il se sera vendu en 2014 par exemple autour de 3000 véhicules au Québec et 68 000 aux États-Unis. En 2020, les voitures électriques devraient représenter 1 % à 3 % des ventes, soit encore beaucoup moins que les véhicules hybrides (entre 3,5 % et 7 % des ventes).

Le haut prix des voitures électriques et leur faible autonomie relative sont actuellement les deux principaux freins d'achat. Pour développer les ventes, plusieurs leviers doivent être activés, dont des politiques publiques de subvention à l'achat pour réduire le coût d'acquisition, le développement du réseau de postes de charge, la mise en place de réseaux de distribution intelligents, la réalisation d'une vision partagée de l'avenir du transport durable, l'offre d'électricité gratuite, les taxes vertes, l'établissement d'un standard de prise et de fiche, l'achat de véhicules électriques pour le parc automobile gouvernemental, ainsi que le support aux technologies porteuses.

Il ne faut surtout pas imaginer le futur des véhicules électriques exclusivement sur la base des conditions technologiques actuelles. Le progrès technologique est rapide, notamment en ce qui concerne les batteries qui sont le point clé puisqu'elles représentent par exemple un tiers du prix des voitures et conditionnent l'autonomie des véhicules. Les études prospectives anticipent une baisse du prix, du poids et une augmentation de l'autonomie des véhicules. Le développement de réseaux électriques intelligents va aussi permettre une gestion plus efficace de la ressource en électricité. L'ensemble de ces progrès milite en faveur d'une place grandissante et de plus en plus significative des voitures électriques dans le futur. Il est toutefois important de ne pas focaliser uniquement sur la voiture.

L'électrification des systèmes ferroviaires, tant les trains que les tramways, est technologiquement fonctionnelle. Rappelons que le record de vitesse sur terre est détenu par un train à motricité électrique TGV avec 574,8 km/h. Des expérimentations d'autobus électriques sont actuellement menées, plusieurs au Québec. Déjà, les exploitants de réseaux commencent à investir dans les bus hybrides afin de préparer la migration des flottes électriques qui est planifiée dans la décennie 2020-2030.

En ce qui concerne le transport de marchandises, la capacité limitée des batteries constitue un frein majeur. Si se multiplient les véhicules de livraison électriques intra-urbains, du vélo à la camionnette, il n'existe en revanche pas de camions électriques fonctionnant exclusivement à batterie pour de longues distances. Cependant, il existe des approches novatrices inspirées du ferroviaire, comme la eHighway de Siemens, qui permettent aux véhicules de s'alimenter à même des fils sur les voies principales de longue distance. Tout comme pour la voiture, l'hybride se développe également. Il n'y a pas consensus que l'électrification soit la voie à privilégier pour les poids lourds. Par exemple au Québec, Transports Robert privilégie une expérimentation par l'hydrogène.

## Les limites de la logique de substitution

L'électrification des véhicules s'apparente à une logique de substitution : remplacer un véhicule avec moteur à combustion interne par un véhicule électrique.

Le principal argument est environnemental. Cependant, les études démontrent que sur différents critères, l'impact environnemental n'est pas toujours en faveur des véhicules électriques. En effet, pour mesurer l'ensemble des externalités, il faut raisonner en cycle de vie, et donc intégrer la phase de fabrication ainsi que le bouquet énergétique produisant l'électricité que les véhicules consomment.

Dans un véhicule électrique, la fabrication de la batterie a un impact considérable. Par exemple, elle représente le tiers des émissions de gaz à effet de serre (GES) tout au long du cycle de vie. Ainsi, les trois quarts des GES ont lieu dans la phase de fabrication pour un véhicule électrique, alors que les véhicules à combustion interne rejettent 75 % des GES durant la phase d'usage.

L'impact écologique dépend donc en grande partie du mode de production de l'électricité. Plus elle est produite avec des énergies n'émettant pas de GES (renouvelable, nucléaire), plus l'impact environnemental est réduit. Pour certains pays comme la Chine, l'Inde, l'Indonésie, l'Australie et l'Afrique du Sud, une voiture électrique émet même plus de GES qu'une voiture avec moteur à combustion interne. De ce point de vue, le Québec fait partie des sociétés, avec l'Islande, le Paraguay, l'Éthiopie, la Norvège, la Suède, la Suisse, le Costa-Rica, la France, le Brésil et la Colombie, dont plus de 80 % de l'électricité ne produit pas de GES. Dans ces pays, l'impact environnemental des véhicules électriques est très réduit, même si, dans les pays nordiques, l'hiver diminue significativement la performance des batteries.

On peut ainsi considérer que les émissions de GES de véhicules alimentés avec une électricité « renouvelable » sont inférieures au tiers de ceux alimentés par de l'électricité provenant de centrales à charbon. Le contexte québécois peut donc être considéré comme très favorable au développement des véhicules électriques du fait du prix relativement bas de son électricité et de sa production hydroélectrique à faible taux d'émission de GES.

Cette logique de substitution ne permet pas cependant de répondre aux enjeux du transport. Elle ne règle pas les problèmes de congestion, ou de blessés et morts sur les routes, puisqu'elle ne réduit pas le nombre de véhicules sur les routes. Améliorer l'efficacité des véhicules existants ou rompre les paradigmes technologiques avec l'électrification et les véhicules autonomes ou modulaires ne suffit pas. Il est nécessaire de repenser les systèmes de transport.

### Les limites de l'amélioration des systèmes de transport

Plusieurs pratiques améliorent le fonctionnement des systèmes de transport actuels, sans changer fondamentalement les façons de faire. Le transfert modal des personnes vers la mobilité active et les transports publics, le développement de l'intermodalité tant dans le transport public que le transport de marchandises, l'électrification des trains, le ferroutage dans le transport des marchandises et le covoiturage dans le transport de passagers, sont autant de moyens de réduire le nombre de véhicules sur les routes, tout en répondant aux besoins de transport de plus en plus personnalisés.

Cependant, ces approches trouvent aussi leurs limites. Le transport public par exemple, croît moins vite au Québec que le nombre de voitures. Le ferroutage est limité par une faible densité de voies ferrées. Le covoiturage introduit un aléa lié à la disponibilité d'un chauffeur.

### Un changement de paradigme sociotechnique : transport durable et transport électrifié, intelligent et interconnecté

Une des conclusions principales de ce rapport est qu'au-delà des seules innovations technologiques ou des améliorations du système existant, un changement de régime sociotechnique est nécessaire. Il s'agit en effet de combiner des évolutions technologiques, des évolutions culturelles en matière de valeurs et de représentations des utilisateurs (par exemple l'attachement à posséder une voiture, la perception des enjeux environnementaux), ainsi que des évolutions dans les modes d'organisation du transport.

Le tableau 5.1 permet de classer les différentes évolutions en matière de transport. Celles-ci peuvent être centrées sur les véhicules ou, plus largement, les systèmes de transport. Elles peuvent aussi améliorer l'existant ou constituer des changements de paradigme. Le changement de régime sociotechnique est constitué à partir de la case supérieure droite et intègre tous les aspects des autres cases.

TABLEAU 5.1 Quatre approches en matière d'évolution des transports

<b>Changement de paradigme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Véhicules électriques</li> <li>• Véhicules autonomes</li> <li>• Véhicules modulaires</li> <li>• Moteur-roue</li> <li>• Projets de transports automatisés: monorail IREC, Hyperloop, Cargocap, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paradigme de transport durable: réduction du besoin de mobilité, transfert modal, réduction de la longueur des trajets</li> <li>• Transport électrifié, intelligent et interconnecté</li> <li>• Internet Physique</li> <li>• Évolution des politiques d'aménagement du territoire et de planification urbaine</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration de l'efficacité des moteurs à combustion interne</li> <li>• Hybridation des véhicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration des transports publics</li> <li>• Intermodalité</li> <li>• Ferroustage</li> <li>• Poursuite de l'électrification des trains</li> <li>• Covoiturage</li> </ul>
<b>Amélioration de l'existant</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Travail sur les véhicules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Travail sur les systèmes de transport</li> </ul>

Un paradigme de transport durable aux plans économique, environnemental et social nécessite des changements structurels afin de réduire le besoin de mobilité ou la longueur des trajets. Il s'agit par exemple de repenser l'organisation spatiale (l'aménagement du territoire et le développement urbain). Cela suppose aussi une rupture dans les modes d'organisation du système de transport actuel. Dans cet esprit, la mise en place d'un transport électrifié, intelligent et interconnecté apparaît être une voie prometteuse.

En matière d'organisation des transports, le concept d'Internet Physique propose une nouvelle logique de transport interconnecté, intelligent, efficace et durable. Il s'appuie sur une interconnectivité universelle habilitée par une encapsulation des biens dans des conteneurs modulaires ainsi qu'un ensemble de protocoles et d'interfaces standardisés. En exploitant ces assises, l'Internet Physique vise l'optimisation globale distribuée du transport des passagers et des marchandises au sein d'un réseau de hubs exploitant les différents modes de transport existants dans un cadre de mutualisation ouverte. Autre caractéristique qui rompt avec les paradigmes actuels : la frontière entre transport de marchandises et de passagers se brouille. Déjà plusieurs villes en Europe ont mis en place des systèmes de livraison intra-urbains appliquant certains principes de l'Internet Physique. Ils permettent de réduire le nombre de véhicules de livraison, les impacts environnementaux et les coûts.

Au-delà des véhicules, la mise en place du nouveau paradigme sociotechnique suppose de disposer d'un réseau informationnel puissant et facilement accessible pour les utilisateurs. En effet, que ce soit pour des marchandises ou des voyageurs, l'optimisation des trajets nécessite d'avoir accès à de l'information, et d'appliquer des algorithmes capables d'aider à la prise de décision. Les systèmes de GPS et les applications mobiles permettent de réaliser le travail indispensable de captation et d'analyse de données.

L'électrification accroît les possibilités. Premièrement, parce qu'elle réduit les émissions de GES, de particules fines et autres polluants dans certains pays. Deuxièmement, parce que le silence des véhicules permet de les faire circuler en ville durant la nuit, ce qui permet de fluidifier la logistique. Troisièmement, parce que le coût d'entretien d'un véhicule électrique est réduit. Quatrièmement, parce qu'il y a moins de perte de temps liée aux arrêts aux stations-services. En effet, lorsque les recharges sont bien intégrées dans la façon d'utiliser les véhicules, le temps d'utilisation du véhicule est supérieur à un véhicule avec moteur à combustion interne. Cinquièmement, parce que les véhicules automatisés électriques sont plus faciles à contrôler et à entretenir. Enfin, sixièmement, parce qu'elle permet d'imaginer des formes de transport novatrices au-delà de l'exploitation de véhicules indépendants, par exemple des systèmes de convoyeurs urbains permettant de transporter des conteneurs modulaires ou encore des navettes (shuttles) automatisées sur un réseau interurbain, capables de transporter soit des habitables de personnes ou des conteneurs modulaires.

### Les atouts du Québec

Le Québec a de nombreux atouts en matière de transport électrifié intelligent et interconnecté (TEI2). Son électricité est propre et relativement peu chère, ce qui est un incitatif puissant pour les utilisateurs et les industriels qui souhaiteraient s'implanter pour produire des batteries. La filière électrique est dynamique. Il se fait au Québec de la recherche, de l'innovation technologique, et de la fabrication de véhicules électriques. Des centres de recherche réfléchissent aussi à l'évolution des systèmes de transport. Enfin la vente de véhicules électriques y est plus dynamique que dans le reste du Canada. Le Québec devrait donc être en mesure de se positionner dans la chaîne de valeur mondiale de ce secteur.



## Les obstacles à lever

Cependant, les obstacles au développement d'un transport électrifié, intelligent et interconnecté sont importants. Il y a tout d'abord une incertitude technologique. Les anticipations de progrès dans l'autonomie, le poids et le coût des batteries se révéleront-elles justes? Quels seront les standards qui s'imposeront? Se pose aussi la question de l'adoption des nouveaux modes de transport par les utilisateurs, tant les citoyens que les entreprises). Auront-ils confiance dans la technologie électrique? Changeront-ils leurs comportements de transport pour plus utiliser le transport public, le covoiturage ou l'autopartage? L'aménagement du territoire et le développement urbain seront-ils pensés pour faciliter le transport public, le transfert modal et d'autres formes d'un transport électrifié, intelligent et interconnecté? Le rythme de cette adaptation sera-t-il assez rapide? Enfin, trouvera-t-on des modèles économiques pertinents pour ne pas mettre en péril des pans entiers de l'économie actuelle?

## Le rôle clé de la puissance publique

Le transport électrifié intelligent et interconnecté nécessite des changements profonds dans un contexte de forte incertitude sur l'évolution des technologies, de l'adoption par les utilisateurs, ainsi que des impacts économiques et environnementaux. Ces changements ne peuvent pas être menés sans un rôle actif de la puissance publique. Le TEI2 ne se bâtira pas en un jour, il faudra s'appuyer sur les systèmes existants pour peu à peu les interconnecter et ajouter de nouveaux services.

La puissance publique aura un rôle moteur dans la concertation des acteurs et leur fédération autour d'une vision commune et la sensibilisation des populations. Cela suppose la mise en place de politiques publiques adaptatives dans le temps comme la gestion stratégique de niche, la gestion de transition ou les stratégies de temps. Le cadre légal devra être ajusté. Par exemple, autoriser la circulation de camions électriques la nuit en centre-ville. Elle devra aussi contribuer au financement du développement de certaines infrastructures essentielles comme l'implantation de bornes de recharge dans des endroits non rentables. Elle aura un rôle moteur pour identifier et stimuler le développement de technologies clés. Elle devra s'atteler à transformer les perceptions envers le transport public et l'autonomie des véhicules électriques. Enfin, elle devra travailler à l'évolution de la culture de déplacement des individus, pour les rendre plus conscients de leurs impacts et les amener à faire des choix plus durables. Tout cela aura aussi un impact profond sur la façon dont les villes sont développées.

Le virage nécessite aussi une perspective internationale. Or, au niveau mondial, un débat a lieu dans des pays où le bouquet énergétique est moins favorable qu'au Québec. Des voix s'élèvent pour signifier que les gains seraient plus importants si l'argent investi dans le support à la filière électrique (par exemple par les subventions à l'achat) était réorienté vers le développement du transport en commun ou d'autres modes avancés. Des technologies alternatives comme la pile à combustible ou le gaz naturel ont aussi leurs promoteurs.

En bref, malgré tous les obstacles et incertitudes, le Québec, avec ses ressources hydro-électriques exceptionnelles, ses différents atouts industriels et techniques, mais aussi compte tenu de sa dépendance actuelle aux importations de pétrole, est dans une position favorable et aurait intérêt à aller vers un transport électrifié, intelligent et interconnecté des personnes et des biens. Les obstacles sont multiples : technologiques, culturels, économiques. Ils nécessitent un effort convergent des acteurs du monde de la recherche et des industriels, et un engagement fort de la puissance publique, pour concrétiser ce qui doit en fait être considéré comme étant un choix de société.

## Bibliographie

- AJANOVIC, A. 2008. « On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. » *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (16) : 4223-4234.
- AVT (Société de gestion et d'acquisition de véhicules de transport). 2013. « Autobus hybrides et électriques – Bilan et prospective. » Présenté lors de la 4<sup>ème</sup> journée transport de l'ACMÉ.
- BAKKER, S. et Trip, J. J. 2013. « Policy options to support the adoption of electric vehicles in the urban environment. » *Transportation Research Part D* 25 : 18-23.
- BALLOT, É. et MONTREUIL, B. 2014. *L'Internet Physique : Le réseau des réseaux de prestation logistique*. Paris : La Documentation Française.
- BANISTER, D. 2010. « Sustainable urban development and transport - a Eurovision for 2020. » *Transport Reviews : A Transnational Transdisciplinary Journal* 20 (1) : 113-130.
- BANISTER, D., Schwanen T. et Anable J. 2012. « Introduction to the special section on theoretical perspectives on climate change mitigation in transport. » *Journal of Transport Geography* 24 : 467-470.
- BERGER, G. 1967. *Étapes de la Prospective*. Paris : Presses universitaires de France.
- BLOOM, B. S., ENGELHART, M. D., FURST, E. J., HILL, W. H. et KRATHWOHL, D. R. 1956. *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals*. New York : David McKay Company
- BURNS, L. D., William J. C., SCARBOROUGH, B. A. 2013 « Transforming Personal Mobility. » The Earth Institute Columbia University
- CARRIER, M., MERCIER, J., DUARTE, F., DOMINGUE, J. et RACICOT, F. T. 2011. « Instruments de gouvernance pour un transport durable dans les régions métropolitaines des Amériques : les cas de Seattle (États-Unis) et de Curitiba (Brésil). » Dans *Métropoles des Amériques en mutation*, édité par Luc-Normand Tellier et Carlos Vainer, 209-233. Montréal : Presses de l'Université du Québec.
- CATALIN, F. C., ARDELEAN, M., VASILJEVSKA, J., MENGOLINI, A., FULLI, G., AMOIRALIS, E., JIMENEZ, M. S. et FILIOU, C. 2014. *Smart grid projects outlook 2014*. Rapport EUR 26651, Commission Européenne, JCR's Institute for Energy and Transport.
- Chambre de commerce du montreal metropolitain et SECOR. 2010. *Le transport en commun — Au centre du développement économique de Montréal*.
- CHAN, C. C., BOUSCAYROL, A. et CHEN, K. 2010. « Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. » *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 59 (2) : 589-598.
- CNC/IEC Task Force on Smart Grid Technology and Standards. 2012. *The Canadian smart grid standards roadmap: A strategic planning document*. Conseil Canadien des Normes.
- COHEN, M. J. 2012. « The future of automobile society : a socio-technical transitions perspective. » *Technology analysis & strategic management* 24 (4) : 377-390.
- Commission Européenne. 2009. *Standardization mandate to CEN, CENELEC and ETSI in the field of measuring instruments for the development of an open architecture for utility meters involving communication protocols enabling interoperability*. Mandat M/441.
- Commission Européenne. 2011. *Mandat pour un réseau intelligent*. Mandat M/490.
- COUILLARD, M. et DESAULNIERS, G. 2012. « L'industrie manufacturière des véhicules hybrides et électriques au Québec. » Gouvernement du Québec, 2012.
- DAVIS, B. A. et FIGLIOZZI, M. A. 2013. « A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. » *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 49 (1) : 8-23.
- DAVIS, S. M. 1996. *Future Perfect*. Massachusetts: Addison-Wesley.

- DIJK, M. 2014. « A social-technical perspective on the electrification of the automobile: niche and regime interaction. » 21<sup>st</sup> International GERPISA Colloquium
- DRIEA (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Île-de-France). 2010. Étude de benchmarking pour le projet de fret dans le cadre de la préparation du débat public sur le Grand Paris.
- DRUCKER, P. 1992. *Je vous donne rendez-vous demain : la société post-business*. Boulogne : Maxima Laurent Mesnil.
- DURANTON, G. et TURNER, M. 2011. « The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities. » *American Economic Review* 101 (6) : 2616-2652
- EGBUE, O. et LONG, S. 2012. « Barriers to widespread adoption of electric vehicles : An analysis of consumer attitudes and perceptions. » *Energy Policy* 48 : 717-729.
- FAN, Z., KULKARNI, P., GORMUS, S. et EFTHYMIOS, C. 2013. « Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities. » *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 15 (1) : 21-38.
- FARUQUI, A., HARRIS, D. et HLEDIK, R. 2010. « Unlocking the €53 billion savings from smart meters in the EU: How increasing the adoption of dynamic tariffs could make or break the EU's smart grid investment. » *Energy Policy* 38 (10) : 6222-6231.
- FATNASSI, E., CHAOUACHI, J. et KLIBI, W. 2014. « Towards Creating Sustainable Urban Areas: A Shared Passengers and Goods On-Demand Rapide Transit Proposal. » Dans *Proceedings of 1st International Physical Internet Conference*, Québec, Canada, 12 p.
- FAURE, L., MONTREUIL, B., BURLAT, P. et MARQUES, G. 2014. « Ex ante sustainability improvement assessment of city logistics solutions: learning from a simple interlinked pooling case. » Dans *Proceedings of 1st International Physical Internet Conference*, Québec, Canada.
- FERRERAS, L. E. 2013. « Autonomous vehicles: A critical tool to solve the XXI century urban transportation grand challenge. » Dans *Proceedings of the 3rd International Conference on Urban Public Transportation Systems* : 405-412.
- FERRERAS, L. E. 2014. « The driverless city. » *Civil Engineering* 84 (3) : 52-55.
- FITZPATRICK, N. et TSANG, A. 2012. « Electric vehicles as a driver for smart grids. » Dans *Smart grid : Applications, communications, and security*, édité par L. T. Berger et K. Iniewski, 49-74. John Wiley & Sons.
- Forum International des Transports. 2011. *Perspectives des transports — Répondre aux besoins de 9 milliards de personnes*, OCDE.
- FURMAN, B., FABIAN, L., ELLIS, S., MULLER, P. et SWENSON, R. 2014. *Automated transit networks (ATN): A review of the state of the industry and prospects for the future*. Report 12-31. Mineta Transportation Institute.
- GIDDENS, A. 2009. *The Politics of Climate Change*. Cambridge : Polity.
- Gouvernement du Québec. 2011. *Québec roule à la puissance verte! : Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques*.
- Gouvernement du Québec. 2012. *Le Québec en action vert 2020 : Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques*.
- HAKIMI, D., MONTREUIL, B. et CLOUTIER, C. 2014. « Web de mobilité de charges pleines : une investigation pan-québécoise. » *Rapport final de projet BEIE PAIE 12-13-045*, Québec, Canada.
- HALL, P. et PAIN, K. 2006. *The Polycentric Metropolis : Learning from Mega-City Regions in Europe*. Earthscan, London.
- HARWATT, H., TIGHT, M. et TIMMS, P. 2011. « Personal transport emissions within London: Exploring policy scenarios and carbon reductions up to 2050. » *International Journal of Sustainable Transportation* 5 (5) : 270-288.

- HAWKINS, T. R., SINGH, B., MAJEAU-BETTEZ, G. et STRØMMAN, A. H. 2013. « Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. » *Journal of Industrial Ecology*, 17 (1) : 158-160.
- HENSLEY, R., NEWMAN, J., ROGERS, M. et SHAHINIAN, M. 2012. « Battery technology charges ahead. » *McKinsey Quarterly* 3 : 5-50.
- HICKMAN, R., ASHIRU, O. et BANISTER, D. 2011. « Transitions to low carbon transport futures : strategic conversations from London and Delhi. » *Journal of Transport Geography* 19 (6) : 1553-1562.
- HISCOCK, J. et BEAUVAIS, D. 2013. Smart grid in Canada 2012-2013. Rapport 2013-171 RP-ANU 411-SGPLAN, Ressources Naturelles Canada.
- HUESO, K. B., ARMAND, M. et ROJO, T. 2013. « High temperature sodium batteries: status, challenges and future trends. » *Energy & Environmental Science* 6 (3) : 734-749.
- Hydro-Québec. 2009. Plan stratégique 2009-2013.
- Hydro-Québec. 2013. Rapport annuel 2013.
- Hydro-Québec. 2013 b. Plan d'action de développement durable 2013-2016.
- Hydro-Québec. 2013c. Projet pilote d'essai de véhicules électriques Mitsubishi.
- IEA (International Energy Agency). 2013. Global EV Outlook. Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020.
- JARRAR, O. M. et AL-ZOABI, A. Y. 2008. « The applicability of sustainable city paradigm to the city of Jerusalem: Criteria and indicators of efficiency. » *Building and Environment* 43 (4) : 550-557.
- KERN, S., BARTA, N., FISCHER, C. et SCHIER, M. 2014. « EMF citylog. » Dans *The 5th Conference on Transport Research Arena (Poster)*, Paris.
- KEMP, R., SCHOT, J. et HOOGMA, R. 1998. « Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management. » *Technology Analysis & Strategic Management* 10 (2), : 175-198.
- KHUN, T.S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, USA : University of Chicago Press
- KLIBI, W., LABARTHE, O., DESCHAMPS, J.-C. et BABAI, Z. 2014. « The Role of Peri-Urban Networks in Building Efficient and Sustainable Distribution Systems. » Dans *Proceedings of 1st International Physical Internet Conference*, Québec, Canada, 12 p.
- KUNSTLER, J. H. 2005. *La fin du pétrole : le vrai défi du XXIe siècle*. Paris, France : Plon.
- LEE, D.-Y., THOMAS, V. M. et BROWN, M. A. « Electric urban delivery trucks: Energy use, greenhouse gas emissions, and cost effectiveness. » *Environmental Science and Technology*, 47 (14) : 8022-8030.
- LI, J.-Q. 2014. « Battery-electric transit bus developments and operations: A review. » *International Journal of Sustainable Transportation*. DOI : 10.1080/15568318.2013.872737.
- MARCHAU, V. A. W. J., WALKER, W. E. et VAN WEE, G. P. 2010. « Dynamic adaptive transport policies for handling deep uncertainty. » *Technological Forecasting and Social Change* 77 (6) : 940-950.
- MASNAVI, R. M. 2000. « The New Millenium and the New Urban Paradigm : The Compact City in Practice. » Dans *Achieving sustainable urban form*, édité par K. Williams, 64-73. New York : Taylor & Francis.
- MELLER, R. D., ELLIS, K. P. et LOFTIS, B. 2012. « From horizontal collaboration to the Physical Internet: Quantifying the effects on sustainability and profits when shifting to interconnected logistics systems. » Final research report of the CELDi Physical Internet project, phase I.
- Ménigault, C. 2014. *Quelle place pour le véhicule électrique au Québec? Essai de maîtrise*, Université de Sherbrooke.
- MERCIER, J. et CARRIER, M. 2013. « Le cas de succès en transport urbain durable : une liste exhaustive des types de facteurs. » *Organisations et territoires* 22 (3) : 5-13.

- MONTREUIL, B. 2011, « Towards a Physical Internet: Meeting the global logistics sustainability grand challenge. » *Logistics Research* 3 (2-3) : 71-87.
- MORIARTY, P. et HONNERY, D. 2008. « Low-mobility: The future of transport. » *Futures* 40 (10) : 865-872.
- NAKAMURA, K. et HAYASHI, Y. 2013. « Strategies and instruments for low-carbon urban transport: An international review of trends and effects. » *Transport Policy* 29 : 264-274.
- National Energy Technology Laboratory. 2007. The NETL modern grid initiative - Powering our 21st-century economy, modern grid benefits. Rapport pour le U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability.
- Nations Unies. 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.
- NILL, J. et KEMP, R. 2009. « Evolutionary approaches for sustainable innovation policies: from niche to paradigm. » *Research Policy* 38 (4) : 668-680.
- Office de l'Efficacité Énergétique. 2010. Évolution de l'efficacité énergétique au Canada de 1990 à 2008.
- Parlement européen et conseil de l'Union européenne. 2010. Directive 2010/40/UE.
- PERRAULT, M. et BOURQUE, G. L. 2014. Évolution du transport routier au Québec : La crise d'un paradigme. Institut de recherche en économie contemporaine.
- RAJAN, S. C. 2006. « Climate change dilemma: technology, social change or both? : An examination of long-term policy choices in the United States. » *Energy policy* 34 : 664-679.
- RAMCHURN, S. D., VYTELINGUM, P., ROGERS, A. et JENNINGS, N. R. 2012. « Putting the 'smarts' into the smart grid: A grand challenge for artificial intelligence. » *Communications of the ACM* 55 (4) : 86-97.
- RICHARDSON, D. B. 2013. « Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration. » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 : 247-254.
- RIQ (Réseau des Ingénieurs du Québec). 2010. Propositions pour engager le Québec sur la voie de la mobilité durable. Avis.
- ROUGES, J.-F. et MONTREUIL, B. 2014. « Crowdsourced delivery: New interconnected business models to reinvent delivery. » dans *Proceedings of 1st International Physical Internet Conference*, Québec, Canada, 19 p
- RTC (Réseau de transport de la Capitale). 2013. Vers l'avant — Rapport d'activité 2013.
- SADEK, N. 2012. « Urban electric vehicles: a contemporary business case. » *Transport Problems* 7 (2) : 117-129.
- SAFDIE, M. 1997. *The City after the automobile: an architect's vision*. Toronto : Stoddart Publishing.
- SCHOT, J., HOOGMA, R. et ELZEN, B. 1994. « Strategies for shifting technological systems: The case of the automobile system. » *Futures* 10 (26) : 1060-1076.
- SCHWARTZ, P. 1991. *The Art of the Long View*. Doubleday : New York.
- SCHWARTZ and Co. 2011. « Étude de la seconde vie des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables. » Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).
- SHLADOVER, S. E. 2009. « Cooperative (rather than autonomous) vehicle-highway automation systems. » *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* : 10-19.
- SILVESTER, S., BEELA S.K., TIMMEREN, A.V., BAUER, P., QUIST, J. et DIJK, S.V. 2011. « Exploring design scenarios for large-scale implementation of electric vehicles; the Amsterdam Airport Schiphol case. » *Journal of Cleaner Production* 48 : 211-219.
- SIVAK, M. et SCHOETTLE, B. 2011. Recent changes in the Age Composition of Drivers in 15 countries. University of Michigan Transportation Research Institute.
- STM (Société de transport de Montréal). 2010. Plan stratégique 2020.

- STM (Société de transport de Montréal). 2013. Rapport d'activité 2013.
- STM (Société de transport de Montréal). 2014. Le transport collectif : une force économique pour tout le Québec. Avis présenté dans le cadre des consultations prébudgétaires 2014-2015 du ministère des Finances et de l'Économie du Québec.
- STM (Société de transport de Montréal). 2014b. Budget 2014.
- SPICKERMANN, A., GRIENITZ, V. et VON DER GRACHT, H.A. 2013. « Heading Towards a multimodal city of the future? Multi-stakeholder scenarios for urban mobility. » *Technological Forecasting & Social Change*. DOI : 10.1016/j.techfore.2013.08.036.
- STEINHILBER, S., WELLS, P. et THANKAPPAN, S. 2013. « Socio-technical inertia: Understanding the barriers to electric vehicles. » *Energy Policy* 60 : 531-539.
- SunSpec Alliance. 2012. Communicating the customer benefits of information standards: A guide to defining how standards reduce cost and eliminate risk in solar installations.
- TANGUY, K. 2013. Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques : application à la régulation électrique d'un complexe immobilier. Mémoire (M.Sc.), Université Laval.
- TIE, S. F. et TAN, C. W. 2013. « A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 : 82-102.
- TREMBLAY, L. et DESJARDINS, M. 2010. « Les infrastructures de recharge : catalyseurs de la progression des véhicules électriques. » *La Maîtrise de l'énergie* 25 (3) : 5-7.
- U.S. Department of Energy. 2003. Grid 2030: A national vision for electricity's second 100 years.
- U.S. Department of Energy. 2010. The recovery act: Transforming America's transportation sector.
- VALLI, P. 2010. « High-speed rail in the Quebec-Windsor corridor - A case for public investment. » *Queen's Policy Review* 1 (1) : 47-58.
- VERGRAGT, P. J. et BROWN, H. S. 2007. « Sustainable mobility: from technological innovation to societal learning. » *Journal of Cleaner Production* 15 (11-12) : 1104-1115.
- VEZIROGLU, A. et MACARIO, R. 2011. « Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. » *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (1) : 25-43.
- WACK, P. 1985. « Scenarios : uncharted waters ahead. » *Harvard Business Review*, septembre-octobre, 73-89.
- WACK, P. 1985. « Scenarios : shooting the rapids. » *Harvard Business Review*, novembre-décembre, 139-150.
- WEE, B. V., MAAT, K. et DE BONT, C. 2012. « Improving Sustainability in Urban Areas : Discussing the Potential for Transforming Conventional Car-based Travel into Electric Mobility. » *European Planning Studies* 20 (1) : 105.
- YILMAZ, M. et KREIN, P. T. 2013. « Review of battery charger topologies, charging powerlevels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. » *IEEE Transactions on Power Electronics* 28 (5) : 2151-2169.