

Gestion écologiquement rationnelle des batteries en fin de cycle de vie provenant de véhicules à propulsion électrique en Amérique du Nord

Décembre 2015



cec.org

Citer comme suit :

CCE (2015), *Gestion écologiquement rationnelle des batteries en fin de cycle de vie provenant de véhicules à propulsion électrique en Amérique du Nord*, Commission de coopération environnementale, Montréal, Canada, 107 p.

Le présent rapport a été préparé par Kelleher Environmental, en collaboration avec Gracestone, Inc., et José Castro Díaz pour le Secrétariat de la Commission de coopération environnementale. L'information qu'il contient relève de la responsabilité des auteurs et ne reflète pas nécessairement les vues de la CCE ou des gouvernements du Canada, du Mexique et des États-Unis.

À propos des auteurs :

Kelleher Environmental est un cabinet d'experts-conseils basé à Toronto (Ontario), au Canada, qui se spécialise dans la recherche sur l'environnement, l'élaboration de politiques et l'analyse de politiques liées à la gestion des déchets, à l'énergie et aux changements climatiques.

Gracestone, Inc. est un cabinet d'experts-conseils américain spécialisé dans la gestion des matières complexes d'un point de vue technique et difficiles à recycler (par exemple, les batteries, les produits électroniques ou les pneus), qui offre des services d'analyse de politiques et de programmes et de conformité, et d'analyse technique et opérationnelle.

SAMI Environmental est un cabinet d'experts-conseils spécialisé en environnement basé à Timmins (Ontario), qui dirige des recherches portant sur une grande variété de sujets pour des clients des secteurs public et privé.

José Castro Díaz est un consultant en environnement basé à Mexico, au Mexique, qui fait des recherches en environnement axées sur les déchets dangereux et les substances toxiques.

Ce document peut être reproduit en tout ou en partie sous n'importe quelle forme, sans le consentement préalable du Secrétariat de la CCE, mais à condition que ce soit à des fins éducatives et non lucratives et que la source soit mentionnée. La CCE souhaiterait néanmoins recevoir un exemplaire de toute publication ou de tout écrit inspirés du présent document.

Sauf indication contraire, le contenu de cette publication est protégé en vertu d'une licence *Creative Commons* : Paternité – Pas d'utilisation commerciale – Pas de modification.



© Commission de coopération environnementale, 2015

ISBN 978-2-89700-112-4 (version électronique)

Available in English: ISBN 978-2-89700-110-0 (electronic version)

Disponible en español : ISBN 978-2-89700-111-7 (versión electrónica)

Dépôt légal — Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015

Dépôt légal — Bibliothèque et Archives Canada, 2015

Renseignements sur la publication

Type de publication : rapport de projet

Date de parution : décembre 2015

Langue d'origine : anglais

Procédures d'examen et d'assurance de la qualité :

Révision finale par les Parties : juillet 2015

QA179

Projet : Plan opérationnel 2013-2014 / *Gestion écologiquement rationnelle de certaines batteries à la fin de leur cycle de vie en Amérique du Nord, dont les batteries d'accumulateurs au plomb usées*

Renseignements supplémentaires :

Commission de coopération environnementale

393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montréal (Québec) Canada H2Y 1N9

Tél. : 514-350-4300 Téléc. : 514-350-4314

info@cec.org / www.cec.org



Table des matières

Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
Liste des sigles et acronymes	vii
Résumé	viii
Sommaire	ix
Introduction	1
1 Composition des batteries de véhicules à propulsion électrique, ventes et prévisions	4
1.1 Historique et développement du marché nord-américain des VPE.....	4
1.2 Batteries utilisées dans les VPE	5
1.2.1 Batteries utilisées dans les VEH	5
1.2.2 Batteries utilisées dans les VEHR et les VE.....	6
1.3 Conception et composition des batteries de VPE.....	7
1.3.1 Conception et composition des batteries Ni-MH	7
1.3.2 Batteries lithium-ion et autres batteries au lithium dans les VPE.....	10
1.3.3 Nouvelle composition chimique des batteries	13
1.4 Ventes de VPE au Canada de 2000 à 2013	16
1.5 Ventes de VPE au Mexique de 2000 à 2013	18
1.6 Ventes de VPE aux États-Unis de 2000 à 2013	20
1.7 Projections des ventes de batteries de VPE en Amérique du Nord.....	23
1.8 Limites de l'analyse	27
2 Projections du nombre de batteries de véhicules à propulsion électrique en fin de cycle de vie en Amérique du Nord, d'ici 2030	29
2.1 Exemple de méthode de détermination de la durée de vie permettant de déterminer la FCV	29
2.2 Durée de vie des batteries des VPE	29
2.3 Batteries de rechange, reconditionnement des batteries et deuxième vie pour les batteries des VPE	29
2.4 Projections à propos des batteries de VPE en FCV d'ici 2030	30
2.5 Limites de l'analyse	32
3 Infrastructure actuelle de collecte, de gestion et de traitement des batteries de véhicules à propulsion électrique et législation connexe.....	33
3.1 Valeur des matières se trouvant dans les batteries de VPE et viabilité économique du recyclage de ces batteries.....	33
3.2 Infrastructure de collecte et de gestion des batteries de VPE.....	34
3.3 Recycleurs et démonteurs d'automobiles.....	36

3.4	Reconditionnement des batteries de VPE	37
3.5	Système nord-américain de recyclage et de traitement des batteries de véhicules à propulsion électrique	39
3.6	Recycleurs de batteries de VPE au Canada.....	41
3.6.1	<i>Retriev (Toxco) — Trail (Colombie-Britannique), Canada.....</i>	42
3.6.2	<i>Raw Materials Company, Inc. — Port Colborne (Ontario), Canada.....</i>	43
3.6.3	<i>Glencore/Xstrata — Sudbury (Ontario).....</i>	44
3.7	Infrastructure de recyclage et de traitement des batteries de véhicules à propulsion électrique au Mexique	45
3.7.1	<i>Sitrassa — Irapuato (Guanajuato), Mexique</i>	45
3.7.2	<i>TES-AMM Latin America — Cuautitlán Izcalli, Mexique</i>	45
3.8	Entreprises de recyclage de batteries de véhicules à propulsion électrique aux États-Unis	46
3.8.1	<i>Inmetco (International Metal Company) — Elwood City (Pennsylvanie), États-Unis</i>	46
3.8.2	<i>Retriev (anciennement Kinsbursky Brothers /Toxco) — Ohio, États-Unis</i>	47
3.8.3	<i>Umicore — Maxton (Caroline du Nord), États-Unis.....</i>	48
3.8.4	<i>MCT — Région d’Atlanta (Géorgie), États-Unis.....</i>	49
3.9	Législation actuelle visant les batteries de VPE.....	49
3.9.1	<i>Canada.....</i>	50
3.9.2	<i>Mexique.....</i>	50
3.9.3	<i>États-Unis</i>	51
3.10	Coût du recyclage des batteries de VPE.....	52
4	Gestion écologiquement rationnelle et pratiques exemplaires de gestion des batteries de véhicules à propulsion électrique en fin de cycle de vie	53
4.1	Cheminement dans l’environnement des composants des batteries de VEH, de VEHR et de VE.....	53
4.1.1	<i>Batteries Ni-MH.....</i>	53
4.1.2	<i>Batteries Li-on</i>	54
4.2	Pratiques techniques exemplaires pour le recyclage des batteries de VPE.....	56
4.2.1	<i>Pratiques exemplaires de pointe pour le recyclage des batteries de VPE en Asie.....</i>	57
4.2.2	<i>Pratiques exemplaires de pointe pour le recyclage de batteries de VPE en Europe.....</i>	58
4.3	Recherche sur l’utilisation des batteries de VPE usagées comme dispositifs de stockage d’énergie.....	61
4.4	Législation encadrant les pratiques exemplaires de GER des batteries de VPE ..	62
4.5	Politiques relatives aux pratiques exemplaires	64
4.6	Approche technique des pratiques exemplaires de GER	65
4.6.1	<i>GER des batteries de VPE à l’étape de la conception.....</i>	65
4.6.2	<i>GER des batteries de VPE grâce à l’étiquetage</i>	66
4.6.3	<i>GER des batteries de VPE durant le transport</i>	66

4.6.4 GER des batteries de VPE à l'étape de la fabrication et de l'installation.....	67
4.6.5 GER des VPE à l'étape de l'utilisation.....	68
4.6.6 GER des batteries de VPE à l'étape de la fin du cycle de vie.....	68
5 Conclusions et recommandations	70
5.1 Sommaire des observations.....	70
5.2 Conclusions et recommandations.....	71
Annexe A – Description du modèle de cycle de vie utilisé pour estimer la FCV des batteries de VPE en Amérique du Nord	72
Annexe B – Sommaire des politiques canadiennes, mexicaines et américaines qui encouragent l'achat de VPE.....	74
Bibliographie	91

Liste des tableaux

Tableau 1. Type et poids des batteries utilisées dans les véhicules hybrides (VEH).....	6
Tableau 2. Type et poids des batteries utilisées dans les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et véhicules électriques (VE).....	7
Tableau 3. Composition traditionnelle d'un élément de batterie à hydrure métallique de nickel (Ni-MH).....	10
Tableau 4. Composition moyenne d'une batterie lithium-ion (%).....	13
Tableau 5. Pourcentage moyen des différents composants d'une batterie lithium-ion, par matière	13
Tableau 6. Ventes annuelles et estimation des ventes de VPE au Canada, 2000–2013	17
Tableau 7. Ventes annuelles de VPE (unités) au Mexique de 2006 à 2013.....	18
Tableau 8. Ventes de VPE aux États-Unis de 2000 à 2013.....	22
Tableau 9. Ventes passées et prévues de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) destinées aux véhicules à propulsion électrique (VPE) au Canada, au Mexique et aux États-Unis, de 2000 à 2030	26
Tableau 10. Estimation du nombre de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) provenant de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV) dans le véhicule d'origine au Canada, au Mexique et aux États-Unis, 2010–2030	31
Tableau 11. Valeur des produits se trouvant dans les batteries de VPE.....	33
Tableau 12. Établissements de recyclage qui transforment les batteries de VPE en fin de cycle de vie au Canada et aux États-Unis.....	41
Tableau 13. Effets potentiels sur l'environnement des composants de batteries à hydrure métallique de nickel.....	54

Tableau 14. Effets potentiels sur l'environnement des composants des batteries lithium-ion	56
Tableau B1. Sommaire des incitatifs visant à favoriser l'achat de VEP au Canada	75
Tableau B2. VPE exemptés du test d'émissions des véhicules et du programme « Ne circule pas aujourd'hui » au Mexique.....	79

Liste des figures

Figure 1. Composants d'une batterie à hydrure métallique de nickel (Ni-MH).....	8
Figure 2. Batterie à hydrure métallique de nickel d'un véhicule hybride	8
Figure 3. Schéma des composants d'une batterie lithium-ion.....	11
Figure 4. Batterie lithium-ion d'une Chevrolet Volt électrique	12
Figure 5. Batterie lithium-ion d'une Nissan Leaf.....	12
Figure 6. Ventes de véhicules hybrides, ventes de Prius et part du marché des hybrides aux États-Unis, de 1999 à 2012	21
Figure 7. Part de marché des dix marques de véhicules électriques hybrides les plus populaires aux États-Unis en 2013.....	22
Figure 8. Ventes mensuelles totales de VPE aux États-Unis de 2011 à 2013, et projections pour 2014	23
Figure 9. Ventes passées et prévues de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) destinées aux véhicules à propulsion électrique (VPE) au Canada, au Mexique et aux États-Unis, de 2000 à 2030 (en milliers d'unités).....	27
Figure 10. Estimation du nombre de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) provenant de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV) dans le véhicule d'origine au Canada, au Mexique et aux États-Unis, 2010–2030 (en milliers d'unités)	32
Figure 11. Démontage de batteries de VPE à l'établissement d'Umicore en Caroline du Nord, aux États-Unis.....	49
Figure 12. Organigramme fonctionnel du recyclage des batteries Ni-MH — Sumimoto Metal Mining Corporation, Japon.....	57
Figure 13. Procédé utilisé par Honda pour recycler les batteries Ni-MH et récupérer les métaux des terres rares	58
Figure 14. Organigramme fonctionnel du recyclage des batteries de VPE pour Umicore en Belgique	59
Figure A1. Schéma du flux total de batteries de VPE alimentant le système nord-américain de recyclage et de gestion des déchets, utilisé par le Lifespan Model pour évaluer les quantités en fin de cycle de vie.....	73

Liste des sigles et acronymes

AMDA	<i>Asociación Mexicana de Distribuidores de Autos</i> (Association mexicaine des concessionnaires automobiles)
ANACDE	Accord nord-américain de coopération dans le domaine de l'environnement
ARA	<i>Automotive Recyclers of America</i> (Association de recycleurs automobiles)
CCE	Commission de coopération environnementale
DoE	<i>US Department of Energy</i> (ministère de l'Énergie) États-Unis
DoT	<i>US Department of Transportation</i> (ministère des Transports) (États-Unis)
EAVE	équipement d'alimentation de véhicule électrique
EIA	<i>Energy Information Administration</i> (Administration de l'information énergétique) des États-Unis
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agence de protection de l'environnement) (États-Unis)
FCV	fin du cycle de vie
GER	gestion écologiquement rationnelle
GES	gaz à effet de serre
G/X	Glencore/Xstrata
Inegi	<i>Instituto Nacional de Estadística y Geografía</i> (Institut national de la statistique et de la géographie) (Mexique)
kWh	kilowatt-heure
Li-ion	lithium-ion
NCPS	nanotubes de carbone à paroi simple
NER	normes d'énergie renouvelable
Ni-MH	hydrure métallique de nickel
RCRA	<i>Resource Conservation and Recovery Act</i> (Loi sur la conservation et la récupération des ressources) (États-Unis)
SE	<i>Secretaría de Economía</i> (ministère de l'Économie) (Mexique)
Semarnat	<i>Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales</i> (ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles) (Mexique)
SNAM	Société Nouvelle d'Affinage des Métaux
UL	Underwriters Lab
VCR	véhicule à carburant de remplacement
VE	véhicule (entièrement) électrique
VEH	véhicule électrique hybride
VEHR	véhicule électrique hybride rechargeable
VFV	véhicule en fin de vie
VPE	véhicule à propulsion électrique

Résumé

Le marché des véhicules à propulsion électrique (VPE), qui comprend les véhicules électriques hybrides (VEH), les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et les véhicules entièrement électriques alimentés par des batteries (VE), devrait connaître une croissance à la fois importante et rapide au cours des décennies à venir. En 2013, l'ensemble des VPE représentait 1,44 % des ventes annuelles de véhicules au Canada, 0,09 % au Mexique et 3,81 % aux États-Unis, et ces chiffres sont appelés à augmenter rapidement au cours des prochaines années. L'expansion du marché des VPE va créer l'occasion unique de récupérer et de recycler les matières utilisées dans les batteries des VPE (nickel, cobalt, acier et autres composants précieux) une fois qu'elles atteignent la fin de leur cycle de vie (FCV). Le présent rapport décrit les types de batteries utilisées dans les VPE en Amérique du Nord, leur quantité et leur composition, ainsi que les pratiques exemplaires et technologies utilisées à l'appui de leur gestion écologiquement rationnelle en FCV. On prévoit qu'environ 276 000 batteries de VPE atteindront leur FCV en Amérique du Nord en 2015. La plupart de ces batteries sont des batteries à hydrure métallique de nickel (batteries Ni-MH), qui est le principal type de batterie contenant des produits chimiques utilisé dans les VPE. D'ici 2030, près de 1,5 million de batteries de VPE atteindront leur FCV. Près de la moitié seront des batteries au lithium et les autres, des batteries Ni-MH.

Actuellement, l'infrastructure nationale permettant de gérer les batteries de VPE en FCV est limitée; toutefois, on prévoit qu'elle va prendre de l'ampleur avec le temps. On est en train d'étudier la possibilité de donner une seconde vie à ces batteries, en les utilisant pour stocker de l'énergie.

Sommaire

Au cours des dix dernières années, le marché nord-américain des véhicules électriques hybrides (VEH), des véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et des véhicules électriques (VE), collectivement appelés véhicules à propulsion électrique (VPE), a connu une très forte croissance. Les ventes annuelles de VEH ont atteint près de 520 000 unités en Amérique du Nord en 2013. La plupart des ventes se sont faites aux États-Unis, où elles ont atteint 495 000 unités, soit près de 3,2 % de toutes les ventes de véhicules. On a vendu environ 23 000 VEH au Canada en 2013, soit 1,32 % de tous les véhicules. L'information recueillie indique qu'environ 1 000 unités ont été vendues au Mexique en 2013, représentant 0,09 % des ventes annuelles de véhicules. Plusieurs facteurs ont contribué à cette augmentation de la pénétration du marché par les VPE : préférence accrue des consommateurs pour les véhicules écoénergétiques; augmentation du prix de l'essence; progrès technologiques liés aux batteries; normes visant les carburants faibles en carbone; soutien gouvernemental sous forme d'incitatifs fiscaux et de programmes de remise.

L'augmentation du nombre de VPE en circulation et le fait que leurs batteries atteignent leur fin de vie utile vont créer l'occasion unique de récupérer et de recycler les matières utilisées dans ces batteries. Il est essentiel d'adopter des pratiques de gestion écologiquement rationnelle (GER) pour le recyclage des batteries de VPE, afin de garantir qu'elles seront recyclées dans un souci de protection de la santé humaine et de l'environnement.

La Commission de coopération environnementale (CCE) a approuvé le projet de GER de certaines batteries de véhicules en fin de cycle de vie (FCV) en Amérique du Nord, ce qui inclut les véhicules hybrides et les véhicules électriques, dans le cadre du Plan opérationnel pour 2013–2014. Ce projet a pour but de déterminer les types de batteries de VPE utilisées en Amérique du Nord, leur contenu, leur quantité, leur utilisation et la façon dont elles sont gérées, et de décrire les pratiques exemplaires et les technologies actuelles et futures qui facilitent la GER.

À l'heure actuelle, les VPE utilisent soit des batteries à hydrure métallique de nickel (batteries Ni-MH), soit des batteries lithium-ion (Li-ion). En 2013, environ 80 % des VEH utilisaient des batteries Ni-MH. Les 20 % restants des VEH, et l'intégralité des VEHR et des VE utilisent des batteries Li-ion, même si la composition chimique exacte varie souvent. On mène régulièrement des activités de recherche-développement consacrées aux nouvelles technologies adaptées aux batteries, afin d'en réduire les coûts et de prolonger leur cycle de vie.

Le tableau ci-après indique une forte augmentation du nombre de batteries de VPE qui atteindront leur FCV d'ici 2030 dans les trois pays nord-américains – la plupart des batteries de VPE en FCV se trouvent aux États-Unis, où le nombre de VPE en circulation augmente rapidement. On prévoit que près de 276 000 batteries de VPE atteindront leur FCV en Amérique du Nord en 2015. La plupart de ces batteries sont des batteries Ni-MH, principalement utilisées dans les VEH. D'ici 2020, le nombre total de batteries de VPE atteignant leur FCV passera à 358 000 — là encore, ce seront principalement des batteries Ni-MH. D'ici 2025, certains des VEHR et des VE mis en circulation en 2011 et par la suite auront atteint leur FCV, et l'on prévoit que le nombre de batteries de VPE en FCV augmentera fortement, pour atteindre 849 000 unités. D'ici 2030, près de 1,5 million de batteries de VPE atteindront leur FCV. À ce moment-là, près de la moitié des batteries de VPE en FCV seront des batteries au lithium, et les autres seront des batteries Ni-MH.

Estimation du nombre de batteries de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV) en Amérique du Nord, d'ici 2030 (en milliers d'unités)

Année	Batteries de VPE en FCV au Canada		Batteries de VPE en FCV au Mexique		Batteries de VPE en FCV aux États-Unis		Batteries de VPE en FCV en Amérique du Nord		Nombre total de batteries de VPE en FCV en Amérique du Nord
	Ni-MH	Li-ion	Ni-MH	Li-ion	Ni-MH	Li-ion	Ni-MH	Li-ion	
2015	8	2	0	0	217	49	225	51	276
2020	13	4	0	0	255	86	268	90	358
2025	37	23	6	8	528	247	571	278	849
2030	64	60	25	36	693	580	782	676	1 458

Au Canada, au Mexique et aux États-Unis, il existe une infrastructure permettant de récupérer, de transporter et de recycler les batteries de VPE en FCV, ce qui inclut les étapes de la GER. À l'heure actuelle, seules quelques entreprises possèdent la technologie et les capacités nécessaires au traitement de ces batteries : Retrieiv, Raw Materials Company et Glencore/Xstrata au Canada; Sitrasa et TES-AMM au Mexique; Inmetco, Retrieiv, Umicore et MCT aux États-Unis. Ces entreprises s'intéressent tout particulièrement à la récupération de métaux précieux comme le nickel (des batteries Ni-MH) et le cobalt des batteries Li-ion. Les intervenants de l'industrie ont dit craindre que les produits chimiques intégrés aux nouvelles batteries en cours d'élaboration soient des composants moins précieux à l'avenir, ce qui les inciterait moins à recycler les batteries.

En FCV, les batteries de VPE conservent environ 80 % de leur capacité. Même si on ne peut plus les utiliser dans des véhicules, elles possèdent encore une capacité raisonnable de stockage d'énergie et d'alimentation de secours, utilisable pour gérer une alimentation électrique résidentielle ou commerciale, stabiliser un réseau électrique ou renforcer un réseau d'énergies renouvelables. Aux États-Unis et ailleurs, de nombreuses études cherchent actuellement à exploiter ce potentiel.

Une deuxième utilisation pour les batteries de VPE usagées pourrait être bénéfique pour l'environnement, car elle retarderait le recyclage des batteries et permettrait d'exploiter pleinement leurs capacités avant de les recycler. À long terme, le recyclage et le reconditionnement des batteries de VPE joueront un rôle important dans la réduction du coût des VPE.

Il faudra mettre à jour périodiquement les estimations contenues dans le présent rapport, à mesure que le marché nord-américain des VPE prendra de l'expansion.

Introduction

La Commission de coopération environnementale (CCE) est une organisation intergouvernementale créée par le Canada, le Mexique et les États-Unis en vertu de l'Accord nord-américain de coopération dans le domaine de l'environnement (ANACDE). Elle cherche à répondre aux préoccupations environnementales régionales, à prévenir les différends liés au commerce et à l'environnement, et à promouvoir l'application efficace des lois de l'environnement. L'ANACDE vient compléter les dispositions de l'Accord de libre-échange nord-américain liées à l'environnement.

Le Conseil de la CCE — qui est son organe directeur — a approuvé un projet intitulé *Gestion écologiquement rationnelle de certaines batteries de véhicules à la fin de leur cycle de vie (FCV) en Amérique du Nord*, dans le cadre du Plan opérationnel pour 2013 et 2014.

Compte tenu de la croissance du marché des véhicules à propulsion électrique (VPE), qui comprennent les véhicules hybrides, les véhicules hybrides rechargeables et les véhicules électriques, la CCE a commandé une étude au début de 2014 afin d'obtenir une description de l'utilisation et de la gestion des batteries usagées provenant de véhicules hybrides et électriques, incluant un examen des pratiques exemplaires et technologies actuelles et à venir qui appuient la gestion écologiquement rationnelle (GER). Le projet de GER des batteries de véhicule en FCV vise à déterminer les types de batteries automobiles et industrielles arrivées à la fin de leur cycle de vie utilisées dans les VPE, pour chaque pays nord-américain.

On peut définir la GER comme *l'ensemble des mesures prises pour faire en sorte que les produits usagés et/ou en fin de vie et les déchets soient gérés de manière à protéger la santé humaine et l'environnement*¹. L'adoption de mesures de GER apporte des avantages bien réels :

- Elle peut avoir des effets importants sur la santé des travailleurs, les collectivités et l'environnement, associés au traitement des batteries à la fin de leur cycle de vie. La GER pratiquée dans les établissements appropriés peut améliorer la santé et la sécurité des travailleurs, et protéger la collectivité locale et l'environnement.
- La GER nécessite le respect des règlements applicables à la santé et à la sécurité, ainsi qu'à la protection de l'environnement, ce qui améliore la performance environnementale.
- La GER peut multiplier les occasions d'affaires pour les entreprises. Aujourd'hui, les clients exigent souvent que ceux qui traitent les composants de leurs produits en FCV utilisent des pratiques de GER. La GER peut donc générer un avantage commercial pour toutes les entreprises de la chaîne d'approvisionnement.
- La GER peut faire augmenter le volume de matières récupérables ayant une valeur économique élevée — par exemple, les métaux précieux comme le nickel, le cobalt, l'acier et, parfois, des métaux du groupe des terres rares, peuvent être récupérés dans les batteries visées par la présente étude.
- La mise en œuvre de la GER améliore l'efficacité opérationnelle grâce aux nouveaux systèmes/aux nouvelles procédures qui mettent l'accent sur la réduction des déchets, la réutilisation et le recyclage.

¹ Commission de coopération environnementale (CCE), Outils de formation de la CCE sur la gestion écologiquement rationnelle, non daté. <www.cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=1282>. (Consulté le 26 mars 2015.)

Contexte

Il existe trois types de véhicules à propulsion électrique (VPE)² :

- Les véhicules électriques hybrides (VEH) utilisent deux sources d'alimentation : un moteur à combustion à essence et une batterie. Le moteur à combustion sert à recharger la batterie.
- Les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) utilisent deux sources d'alimentation, mais on peut aussi charger leur batterie en branchant le véhicule dans une borne reliée au réseau électrique. Les catégories de VEHR dépendent de leur autonomie en mode électrique intégral, qui est la distance maximale que peut parcourir le véhicule sans utiliser le moteur à combustion interne.
- Les véhicules électriques (VE) sont alimentés intégralement par des batteries et un groupe motopropulseur électrique. On les recharge en les branchant dans une borne reliée au réseau électrique.

Les différents types de VPE nécessitent des batteries dont les performances varient³. Deux des plus importantes caractéristiques dont il faut tenir compte sont la densité énergétique et la densité de puissance⁴. Les batteries dont la densité énergétique est plus élevée offrent plus d'autonomie au véhicule, tandis que celles dont la densité de puissance est plus élevée privilégient l'accélération au détriment de l'autonomie. Les VE nécessitent des batteries à densité énergétique plus élevée, afin de pouvoir obtenir la plus grande autonomie possible entre les bornes de recharge, tandis que les VEH peuvent bénéficier de batterie à densité de puissance plus élevée⁵, car elles sont rechargées par le moteur à combustion à essence. C'est pourquoi la plupart des VEH (près de 80 % en 2013) utilisent des batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH), alors que les VEHR et les VE utilisent des batteries au lithium-ion (Li-ion).

Dans le reste de l'étude, on désignera les trois types de véhicules collectivement comme des VPE, à moins que le texte fasse référence à un type précis de véhicule au sein du groupe des VPE.

Justification de l'étude

Il faut pratiquer une gestion écologiquement rationnelle (GER) des batteries de VPE atteignant la fin de leur cycle de vie (FCV) avant l'augmentation prévue du nombre de batteries de VPE en FCV. Compte tenu de l'utilisation croissante de tous les types de VPE, la CCE cherche à savoir comment les batteries utilisées dans les VPE sont actuellement gérées en Amérique du Nord, et à déterminer si l'infrastructure en place suffit pour gérer les batteries de VPE en FCV de façon écologiquement rationnelle.

Objectifs et portée du projet

Le présent projet de recherche a pour objet de produire un rapport déterminant les types de batteries en FCV se trouvant dans les VEH, les VEHR et les VE, leur contenu et leur quantité, et la façon dont elles sont utilisées et gérées dans chaque pays nord-américain. Cela inclut l'examen des pratiques

² US EPA, *Lithium-ion batteries and nanotechnology for electric vehicles: A life cycle assessment (DRAFT)*, Office of Pollution Prevention and Toxics et National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, 2012. <<http://nepis.epa.gov>> (Consulté le 21 avril 2015)

³ *Ibid.*

⁴ *Ibid.*

⁵ *Ibid.*

exemplaires et les technologies actuelles et futures qui facilitent la GER. Les tâches à entreprendre dans le cadre de l'étude sont les suivantes :

- Définir les types de batteries utilisés dans les véhicules hybrides et électriques en Amérique du Nord, ainsi que les substances qu'elles contiennent, les risques générés par une manipulation inappropriée de ces substances et leur valeur économique inhérente.
- Déterminer les quantités actuelles et prévues de batteries de VPE qui entreront sur le marché nord-américain et atteindront la fin de leur cycle de vie entre 2010 et 2030.
- Définir l'infrastructure existante et sa capacité à gérer chacun des types de batteries utilisés dans les VPE.
- Déterminer les pratiques exemplaires de gestion des batteries de VPE dans d'autres régions du monde (Europe et Asie) sur le plan technique, et sur le plan de la réglementation et des politiques, par rapport aux pratiques en cours en Amérique du Nord.
- Indiquer à quel degré on pratique actuellement la GER pour le traitement des batteries de VPE en FCV en Amérique du Nord.

Structure du rapport

Les résultats de l'étude sont présentés de la façon suivante :

- La section 1 décrit les types de batteries utilisés dans les VPE, et évalue les ventes actuelles et futures de VPE et de batteries de VPE dans les trois pays nord-américains.
- La section 2 présente une prévision du nombre de batteries de VPE qui atteindront la FCV entre 2010 et 2030 au Canada, au Mexique et aux États-Unis, et les hypothèses sur lesquelles reposent ces projections.
- La section 3 décrit l'actuelle infrastructure de collecte et de traitement des batteries de VPE en FCV au Canada, au Mexique et aux États-Unis.
- La section 4 présente des renseignements sur les pratiques exemplaires de gestion des batteries de VPE en FCV, et les préoccupations relatives au devenir dans l'environnement des éléments des batteries.
- La section 5 présente les conclusions et les recommandations issues de l'étude.

1 Composition des batteries de véhicules à propulsion électrique, ventes et prévisions

La présente section décrit la composition des batteries actuellement utilisées dans les véhicules à propulsion électrique (VPE), ainsi que les ventes actuelles et prévues de batteries de VPE au Canada, au Mexique et aux États-Unis.

1.1 Historique et développement du marché nord-américain des VPE

On a créé les véhicules électriques hybrides (VEH) pour réduire la dépendance vis-à-vis du pétrole comme carburant automobile⁶. La Honda Insight a été le premier VEH grand public lancé sur le marché nord-américain en 2000. Un certain nombre d'autres VEH sont entrés sur ce marché avec le temps. Comme on le verra plus loin, les ventes de VEH étaient modestes au départ, mais ont progressé régulièrement chaque année. Les ventes de véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et de véhicules électriques (VE) progressent elles aussi régulièrement depuis le lancement de ces véhicules sur le marché nord-américain en décembre 2010. Plus de 618 000 VPE se sont vendus en Amérique du Nord en 2013. Cela représente 3,4 % des ventes totales de véhicules (18,3 millions; voir les détails dans les tableaux ci-après).

Voici les facteurs qui ont contribué à la croissance du marché des VPE :

- préférence des consommateurs pour des véhicules « verts » et respectueux de l'environnement;
- augmentation du prix de l'essence, qui encourage les consommateurs à essayer des véhicules moins gourmands en essence;
- réduction du coût des batteries électriques et augmentation de leur autonomie⁷;
- fait que les gens sont plus à l'aise avec la technologie, car les VPE sont sur le marché depuis un certain temps et sont achetés par un plus grand nombre de consommateurs;
- réduction des frais de stationnement, autorisation d'utiliser les voies réservées au covoiturage et autres incitatifs offerts dans certaines villes⁸;
- objectifs imposés de réduction des émissions de GES et obligation qu'ont les véhicules de satisfaire aux normes de faibles émissions, grâce à des spécifications à l'achat;
- efforts que déploient tous les paliers de gouvernement et d'administration pour créer des parcs de véhicules écologiques en vue de réduire les émissions de CO₂;
- normes de faible teneur en carbone pour le carburant et limitation des émissions dans certains endroits, qui incitent les gens à acheter des véhicules à faibles émissions ou à zéro émission;
- soutien gouvernemental sous la forme d'incitatifs fiscaux fédéraux⁹, de programmes de remise ou de subventions.

⁶ Les premières études américaines ont été menées dans le cadre de recherches concertées entre le *US Department of Energy* (DoE, ministère de l'Énergie des États-Unis), le *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, Laboratoire national sur les énergies renouvelables) et l'industrie automobile.

⁷ J. Perdiguer et J. Jimenez, *Policy options for the promotion of electric vehicles: A review*, Institut de Recerca en Economia Aplicada Regional i Publica (IREA, Institut de recherche en économie appliquée), 2012. <www.ub.edu/irea/working_papers/2012/201208.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014.)

⁸ *Ibid.*

1.2 Batteries utilisées dans les VPE

Les batteries de VPE doivent offrir une combinaison des éléments suivants :

- la densité de puissance, qui influe sur la quantité d'énergie pouvant être fournie pendant une période donnée, et donc sur la façon dont le véhicule accélère;
- la densité énergétique, qui est la capacité d'emmagasiner de l'énergie, et influe donc sur la distance que peut parcourir un VPE entre les charges.

À l'heure actuelle, les VPE utilisent deux types de batteries :

- les batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) (principalement utilisées dans les véhicules hybrides, en raison de la puissance nécessaire et parce qu'on peut les charger avec le moteur);
- les batteries au lithium (Li-ion) (nécessaires dans les VE et les VEHR, qu'on recharge en les branchant sur le réseau électrique)¹⁰.

1.2.1 Batteries utilisées dans les VEH

Le tableau 1 ci-après indique le type et le poids des batteries utilisées dans les VEH. Il montre que Toyota (principal acteur du marché des VEH à l'heure actuelle) utilise une batterie Ni-MH dans ses VEH, mais (comme d'autres fabricants) utilise une batterie au lithium dans les VEHR et les VE. Ford utilise une batterie au lithium dans ses VEH (Ford Fusion et Ford C-Max). Hyundai utilise aussi une batterie au lithium dans sa Sonata hybride. Chaque fabricant fonde sa décision sur divers facteurs. Toyota a testé les batteries au lithium dans ses VEH, mais décidé de continuer à utiliser des batteries Ni-MH. Compte tenu de la part du marché américain de chaque constructeur d'automobiles (les États-Unis constituent de loin le plus important marché pour les VEH en Amérique du Nord, comme on le verra plus loin), environ 19 % des VEH utilisent des batteries Li-ion et environ 81 % utilisent des batteries Ni-MH. Ce pourcentage exclut les VEHR, qui utilisent tous des batteries Li-ion.

⁹ A. Beresteanu et S. Li, *Gasoline prices, government support, and the demand for hybrid vehicles in the U.S.*, 2008. <<http://public.econ.duke.edu/Papers//PDF/hybrid.pdf>> (Consulté le 30 septembre 2014.)

¹⁰ DoE, *Batteries for hybrid and plug-in electric vehicles*, non daté, <www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html> (Consulté le 30 septembre 2014.)

Tableau 1. Type et poids des batteries utilisées dans les véhicules hybrides (VEH)

Modèle	Type de batterie	Poids de la batterie	Pourcentage du marché américain des VEH ^a
Toyota Prius hybride à hayon	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 1,3 kWh	42 kg (92 lb) ^b	29,3 %
Toyota Camry hybride	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 1,6 kWh	56 kg (124 lb) ^c	9,0 %
Toyota Prius c hybride	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 0,9 kWh	31 kg (68 lb) ^d	8,5 %
Ford Fusion hybride	Bloc-batterie lithium-ion de 1,4 kWh ^e	48 kg (106 lb) ^f	7,5 %
Toyota Prius v	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 1,3 kWh	41 kg (90 lb) ^g	7,1 %
Ford C-Max hybride	Bloc-batterie lithium-ion de 1,4 kWh ^h	Aucune donnée	5,7 %
Hyundai Sonata hybride	Bloc-batterie lithium-polymère de 1,4 kWh	44 kg (96 lb) ⁱ	4,4 %
Lexus ES hybride/300h	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 1,6 kWh	46 kg (103 lb) ^j	3,3 %
Toyota Avalon hybride	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 1,6 kWh	68 kg (150 lb) ^k	3,3 %
Lexus CT200h hybride	Bloc-batterie à hydrure métallique de nickel de 1,3 kWh	41 kg (90 lb) ^l	3,0 %

Note : kWh = kilowattheure; kg = kilogramme(s); lb = livre(s).

Sources :

- a. Voir la suite de la section pour plus de détails.
- b. SAE International, *NAIAS 2012: Toyota shows smaller, lighter Prius and plug-in concept targeted for 2015, 2012*. <<http://articles.sae.org/10558/>> (Consulté le 23 avril 2014)
- c. Grayson Hyundai, *Hyundai Sonata Hybrid*, non daté. <www.graysonhyundai.com/sonata-hybrid.htm> (Consulté le 23 avril 2014)
- d. SAE International, *NAIAS 2012: Toyota shows smaller, lighter Prius and plug-in concept targeted for 2015, 2012*. <<http://articles.sae.org/10558/>> (Consulté le 23 avril 2014)
- e. J. P. Huffman, « 2013 Ford Fusion Hybrid », *Car and Driver*, 2012. <www.caranddriver.com/reviews/2013-ford-fusion-hybrid-first-drive-review> (Consulté le 23 avril 2014)
- f. Car Buying Strategies, « 2013 Ford Fusion Hybrid review: Buying guide ». *Car Buying Strategies*. <www.car-buying-strategies.com/Ford/2013-fusion-hybrid.html> (Consulté le 23 avril 2014)
- g. Toyota Motor Corporation, *Toyota Prius V gasoline-electric hybrid synergy drive: Hybrid vehicle dismantling manual*, 2011. <<https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/priusvdismant.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014)
- h. A. Robinson, « 2013 Ford C-Max Hybrid », *Car and Driver*, 2012. <www.caranddriver.com/reviews/2013-ford-c-max-hybrid-first-drive-review> (Consulté le 23 avril 2014)
- i. M. Austin, « 2011 Hyundai Sonata Hybrid », *Car and Driver*, 2010. <www.caranddriver.com/reviews/2011-hyundai-sonata-hybrid-prototype-drive-review> (Consulté le 23 avril 2014)
- j. Toyota Motor Corporation, *Lexus ES300h Hybrid 2013 Model: Emergency response guide*, 2012. <<http://afvsafetytraining.com/erg/Lexus-ES300-2013.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014)
- k. J. Raia, « 2013 Toyota Avalon Hybrid: Redesign adds further appeal to surprising sedan », *The Weekly Driver*, 2012. <<http://theweeklydriver.com/2013-toyota-avalon-hybrid-redesign-adds-further-appeal-surprising-sedan/>> (Consulté le 23 avril 2014)
- l. Toyota Motor Corporation, *Lexus CT200h Hybrid 2011 Model: Emergency response guide*, 2010. <<http://afvsafetytraining.com/erg/Lexus-CT200h-2011.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014)

1.2.2 Batteries utilisées dans les VEHR et les VE

Le tableau 2 ci-après indique le type et le poids des batteries utilisées dans les véhicules hybrides rechargeables (VEHR) et les véhicules électriques (VE). Ces deux types de véhicules ont besoin de batteries au lithium, en raison des exigences énergétiques/de puissance. Les batteries des VEHR et des VE sont beaucoup plus lourdes que celles des VEH – elles pèsent chacune entre 150 et 450 kilogrammes (kg).

Tableau 2. Type et poids des batteries utilisées dans les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et véhicules électriques (VE)

Modèle	Type de véhicule	Type de batterie	Poids de la batterie
Toyota Prius VEHR	Hybride rechargeable	Batterie lithium-ion de 4,4 kWh	150 kg (330 lb)
Fisker Karma	Hybride rechargeable	Bloc-batterie lithium-ion de 20 kWh avec technologie nanophosphate ^{MD}	273 kg (600 lb)
Ford Fusion Energi	Hybride rechargeable	Batterie lithium-ion de 7,6 kWh	Aucune donnée
Chevrolet Volt	Électrique	Bloc-batterie lithium-ion de 16 kWh comprenant plus de 200 éléments lithium-ion	182kg (400 lb)
Nissan Leaf	Électrique	Batterie lithium-ion de 24 kWh composée de 48 modules lithium-ion	294 kg (647 lb)
Mitsubishi i MiEV	Électrique	Batterie lithium-ion de 16 kWh composée de 88 éléments	150 kg (329 lb)
Tesla Modèle S	Électrique	3 batteries lithium-ion possibles : 40 kWh, 60 kWh ou 85 kWh	La batterie de 85 kWh pèse 600 kg (1 323 lb)
Ford Focus Électrique	Électrique	Batterie lithium-ion de 23 kWh refroidie par liquide	Aucune donnée
Smart electric drive	Électrique	Batterie lithium-ion de 17,6 kWh	182 kg (400 lb)
Tesla Roadster	Électrique	Bloc-batterie lithium-ion de 56 kWh composé de 6 831 éléments lithium-ion	450 kg (990 lb)
Toyota RAV4 EV	Électrique	Batterie lithium-ion de 41,8 kWh composée de 4 500 éléments	423 kg (845 lb)

Note : kWh = kilowattheure; kg = kilogramme(s); lb = livre(s).

Nous n'avons pas obtenu d'information sur les ventes de chaque type de VEHR et de VE; il a donc été impossible d'établir la part de marché de chaque véhicule.

1.3 Conception et composition des batteries de VPE

Le recyclage des batteries de VPE (décrit à la section 4) dépend de la composition de ces batteries, dont traite la présente section.

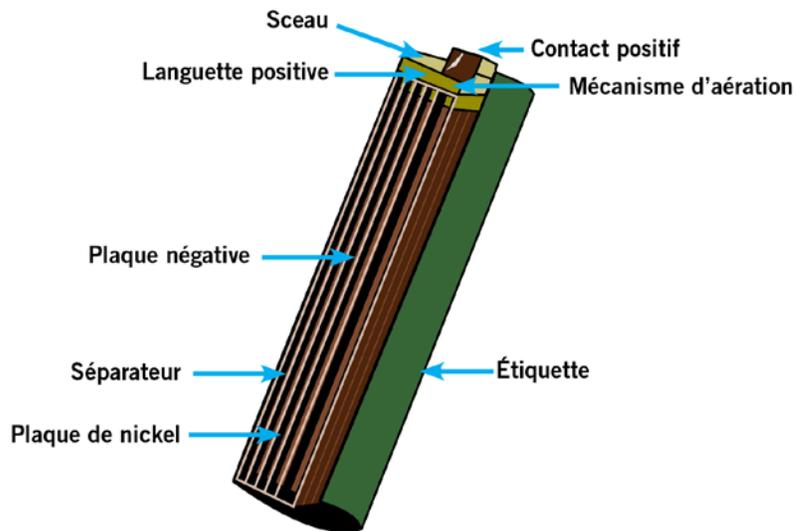
1.3.1 Conception et composition des batteries Ni-MH

Les batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) comprennent une électrode positive, une électrode négative, de l'électrolyte et un séparateur. Dans une batterie Ni-MH, l'électrode positive est généralement composée d'hydroxyde de nickel, d'où son nom. L'électrode négative est généralement composée d'un matériau à hydrure métallique ou d'alliages absorbant l'hydrogène, mais les métaux utilisés varient (par exemple, on utilise souvent des alliages de palladium, de zirconium, de vanadium ou de titane). L'électrolyte est une solution chimique aqueuse (souvent de l'hydroxyde de potassium) qui permet le transfert des ions entre les électrodes positive et négative. Le séparateur est composé de fibres de nylon fin; on l'utilise pour séparer physiquement l'électrode positive et l'électrode négative, tout en permettant le transfert des ions.

La figure 1 qui suit présente un schéma des différents composants d'une batterie Ni-MH.

Elle montre la structure d'une batterie Ni-MH grand public, car nous n'avons pas trouvé de schéma représentant la batterie Ni-MH d'un VPE.

Figure 1. Composants d'une batterie à hydrure métallique de nickel (Ni-MH)



Source : Energizer, Nickel Metal Hydride (Ni-MH) *Handbook and Application Manual*, 2010.
<http://data.energizer.com/PDFs/nickelmetalhydride_appman.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014)

La figure 2 montre la batterie Ni-MH type d'un VEH.

Figure 2. Batterie à hydrure métallique de nickel d'un véhicule hybride



Source : B. Berman, « Toyota: Nickel batteries for hybrids, lithium for electric cars », *Hybrid Cars*, 2010.
<www.hybridcars.com/toyota-nickel-batteries-hybrids-lithium-electric-cars-29073/> (Consulté le 30 septembre 2014.)

Toyota (qui domine actuellement le marché des véhicules hybrides) utilise des batteries Ni-MH dans ses VEH. On trouve également ce type de batterie dans le Ford Escape hybride, la Honda Insight et le Saturn VUE¹¹. Toyota a testé les batteries au lithium dans ses VEH, mais a décidé de continuer à utiliser des batteries Ni-MH.

Le tableau 3 ci-après présente la composition traditionnelle d'une cellule de batterie Ni-MH utilisant deux types d'alliage différents (AB2 et AB5 sont les plus courants)¹². Dans tous les cas, les batteries des véhicules comprennent un certain nombre d'éléments distincts.

Leur composition peut varier considérablement, selon l'usage qu'on en fait :

- Les batteries Ni-MH-AB2 sont celles dont les anodes Ni-MH sont composées du groupe de métaux suivant : titane (Ti), zirconium (Zr), nickel (Ni) et vanadium (V).
- Les batteries Ni-MH-AB5 sont celles dont les anodes sont composées de « misch-métaux » (appartenant à la série des lanthanides — ou des terres rares — du lanthane au lutécium).

¹¹ B. Berman, « The hybrid car battery: A definitive guide », *Hybrid Cars*, 2008.
<www.hybridcars.com/hybrid-car-battery/> (Consulté le 21 avril 2014.)

¹² A. Mathur, « Insight—How Ni-MH cell works », *Engineers Garage*, 2012.
<www.engineersgarage.com/insight/how-Ni-MH-cell-works> (Consulté le 30 septembre 2014.)

Tableau 3. Composition traditionnelle d'un élément de batterie à hydrure métallique de nickel (Ni-MH)

Matière	Composition de la batterie Ni-MH (avec alliage AB2)	Composition de la batterie Ni-MH (avec alliage AB5)
Ni	12 %	15 %
Hydroxyde de nickel(II) [Ni(OH)2]	12 %	15 %
Métaux : nickel [Ni], titane [Ti], vanadium [V], zirconium [Zr]	13 %	
Métaux : lanthane [La], néodyme [Nd], praséodyme [Pr], cérium [Ce]		8 %
Hydroxyde de potassium	3 %	3 %
Polypropylène (plastique)	5 %	5 %
Acier	44 %	44 %
Autre	11 %	10 %

Source : V. Ekermo, *Recycling opportunities for batteries Li-ion from hybrid electric vehicles*, thèse de maîtrise en génie chimique, département de génie chimique et biologique, Chalmers University of Technology, 2009. <www.yumpu.com/en/document/view/3270204/recycling-opportunities-for-li-ion-batteries-from-hybrid-electric-vehicles> (Consulté le 30 septembre 2014)

C'est le nickel présent dans les batteries Ni-MH qui a le plus de valeur pour les recycleurs. Des entreprises comme Umicore (Belgique) disposent de systèmes très évolués qui récupèrent aussi les métaux des terres rares.

1.3.2 Batteries lithium-ion et autres batteries au lithium dans les VPE

Le terme « batterie lithium-ion (Li-ion) » désigne la famille des produits chimiques suivants entrant dans la composition des batteries¹³ :

- Oxyde de lithium et de cobalt (aussi appelé lithium cobalt ou lithium-ion-cobalt)
- Oxyde de lithium-manganèse (aussi appelé manganate de lithium ou lithium-ion manganèse)
- Phosphate de fer lithié
- Oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (aussi appelé oxyde de lithium-manganèse-cobalt)
- Oxyde de lithium-nickel-cobalt-aluminium
- Titanate de lithium

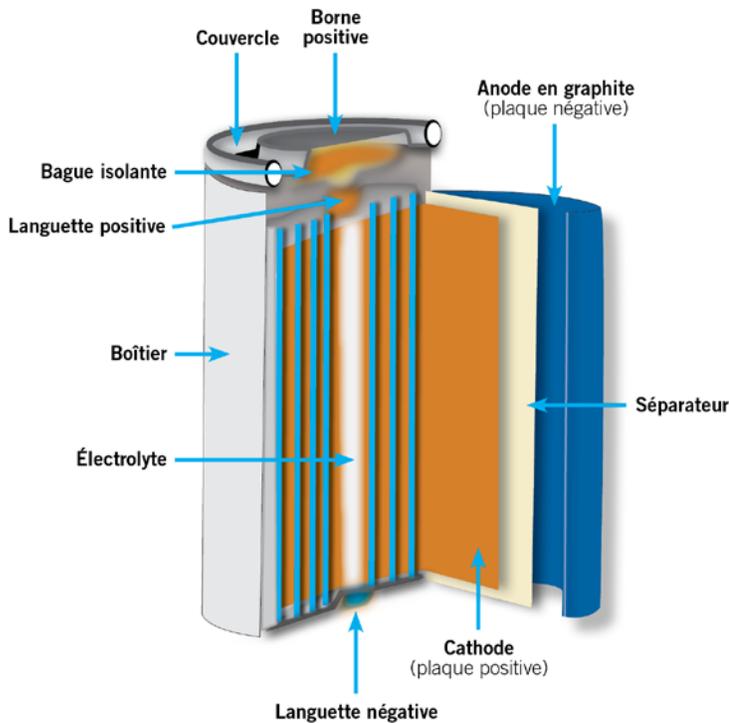
Voici les trois principaux éléments fonctionnels d'une batterie Li-ion :

- l'électrode positive;
- l'électrode négative;
- l'électrolyte.

La figure 3 ci-après présente un schéma illustrant les différents composants d'une batterie Li-ion.

¹³ Battery University, « BU-205: Types of lithium-ion », *Battery University*, non daté. <http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion> (Consulté le 30 septembre 2014.)

Figure 3. Schéma des composants d'une batterie lithium-ion



Source : Chris Hillseth Enterprises, *Lithium battery*, 2014. <<http://chrishillsethenterprises.com/battery/wp-content/uploads/2014/01/lithiumbattery.jpg>> (Consulté le 30 septembre 2014).

En général, l'électrode négative d'une batterie lithium-ion conventionnelle est en carbone. L'électrode positive est faite d'un oxyde métallique et l'électrolyte, de sel de lithium, qui est un solvant organique.

L'électrode négative qu'on trouve le plus couramment sur le marché est en graphite. L'électrode positive est généralement composée de trois matières :

- un oxyde en couches (comme l'oxyde de lithium et de cobalt);
- un polyanion (comme le phosphate de fer lithié);
- un spinelle (comme l'oxyde de lithium-manganèse).

Le lithium pur est hautement réactif. Il réagit très activement au contact de l'eau pour former l'hydroxyde de lithium et l'hydrogène. C'est pourquoi on utilise généralement un électrolyte non aqueux et un contenant scellé, qui élimine toute humidité du bloc-batterie.

L'électrolyte est généralement un mélange de carbonates organiques comme le carbonate d'éthylène ou le carbonate de diéthyle, qui contient des complexes d'ions de lithium. Ces électrolytes non

aqueux utilisent habituellement des anions sels non coordinateurs, comme l'hexafluorophosphate de lithium (LiPF_6), l'hexafluoroarséniate de lithium monohydraté (LiAsF_6), le perchlorate de lithium (LiClO_4), le tétrafluoroborate de lithium (LiBF_4) et le triflate de lithium (LiCF_3SO_3).

La figure 4 qui suit présente la batterie Li-ion d'une Chevrolet Volt électrique.

Figure 4. Batterie lithium-ion d'une Chevrolet Volt électrique



Source : J. O'Dell, « What happens to EV and hybrid batteries? Going green with battery recycling », *Edmunds*, 2014. <www.edmunds.com/fuel-economy/what-happens-to-ev-and-hybrid-batteries.html> (Consulté le 30 septembre 2014.)

La figure 5 montre la batterie Li-ion d'une Nissan Leaf. Le boîtier contient divers blocs qui contiennent chacun un certain nombre d'éléments. Aux fins du recyclage, on extrait généralement les blocs du gros boîtier.

Figure 5. Batterie lithium-ion d'une Nissan Leaf



Source: J. O'Dell, « What happens to EV and hybrid batteries? Going green with battery recycling », *Edmunds*, 2014. <www.edmunds.com/fuel-economy/what-happens-to-ev-and-hybrid-batteries.html> (Consulté le 30 septembre 2014.)

Le tableau 4 présente le poids relatif des différents composants d'une batterie au lithium type.

Tableau 4. Composition moyenne d'une batterie lithium-ion (%)

Composant de la batterie lithium-ion	Composition (% par poids)
Cathode + anode + électrolyte	39,1 % ± 1,1 %
Boîtier en plastique	22,9 % ± 0,7 %
Boîtier en acier	10,5 % ± 1,1 %
Feuille de cuivre	8,9 % ± 0,3 %
Feuille d'aluminium	6,1 % ± 0,6 %
Feuille de polymère (séparateur entre la cathode et l'anode) + électrolyte	5,2 % ± 0,4 %
Solvant non aqueux	4,7 % ± 0,2 %
Contactes électriques	2,0 % ± 0,5 %

Source : ASEAN Environment, non daté. <www.aseanenvironment.info/Abstract/41016797.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014)

Le tableau 5 présente plus de détails sur les matériaux précis dont sont composés la cathode, l'anode, l'électrolyte, le séparateur et le boîtier.

Tableau 5. Pourcentage moyen des différents composants d'une batterie lithium-ion, par matière

Composant de la batterie lithium-ion	Matériau	Pourcentage (%)
Cathodes	Li ₂ CO ₃ (carbonate de lithium)	15–27
	LiCoO ₂ (oxyde de lithium et de cobalt)	
	LiMn ₂ O ₄ (oxyde de lithium- manganèse)	
	LiNiO ₂ (oxyde d'azote lithié)	
	LiFePO ₄ (phosphate de fer lithié)	
	LiCo _{1/3} Ni _{1/3} Mn _{1/3} O ₂	
LiNi _{0,8} Co _{0,15} Al _{0,05} O ₂		
Anodes	LiC ₆ (graphite)	10–18
	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	
Électrolyte	Carbonate d'éthylène	10–16
	Carbonate de diéthyle	
	LiPF ₆ (hexafluorophosphate de lithium)	
	LiBF ₄ (tétrafluoroborate de lithium)	
	LiClO ₄ (perchlorate de lithium)	
Séparateur	Polypropylène	3–5
Boîtier	Acier	40

Source : L. Sullivan et L. Gaines, *A review of battery life-cycle analysis: State of knowledge and critical needs*, Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, 2010. <https://greet.es.anl.gov/files/batteries_lca> (Consulté le 30 septembre 2014)

Le tableau 5 montre que certaines batteries au lithium sont composées de 40 % d'acier et de plus petites quantités d'autres matériaux. Celui qui intéresse le plus les recycleurs est le cobalt (Co), qui est très précieux. Or, à cause du coût élevé du cobalt, les concepteurs de batteries commencent à modifier la composition chimique de leurs batteries au lithium et à délaisser le cobalt. Cette évolution du marché n'incite pas au recyclage des batteries au lithium, car la valeur de la batterie pour le recycleur tient au cobalt que contient celle-ci.

1.3.3 Nouvelle composition chimique des batteries

On a entrepris des activités de recherche-développement visant à réduire le coût et à prolonger le cycle de vie utile des batteries. De nombreux partenariats ont été formés à cet effet, notamment :

Design for Environment et l'*Office of Research and Development on Batteries and Nanotechnology for Electric Vehicles* (Bureau de recherche-développement sur les batteries et la nanotechnologie pour les véhicules électriques) de l'*Environmental Protection Agency* (EPA, Agence de protection de l'environnement des États-Unis); *US Department of Energy* (DOE, ministère de l'Énergie); Arizona State University; Electrovaya Inc., Energel Inc., Umicore Group, Kinsbursky Brothers Inc. (Toxco); RSR Technologies Inc., Novolyte Technologies Inc., Rochester Institute of Technology; NextEnergy; la *Portable Rechargeable Battery Association* (PRBA, Association des fabricants de batteries portatives rechargeables); et la *National Alliance for Advanced Technology Batteries* (NAATBatt, Alliance nationale pour les batteries de haute technologie).

Il existe actuellement de nombreuses compositions chimiques différentes pour les batteries lithium-ion (Li-ion), et on les met à l'essai afin d'en améliorer la conception et les performances, et d'en réduire le coût. On crée des usines de fabrication de batteries Li-ion aux États-Unis, avec le soutien financier d'un programme de subventions d'une valeur de 2,4 milliards de dollars US, qu'a mis sur pied l'administration Obama pour promouvoir les véhicules électriques.

On a mis en œuvre de nombreuses recherches afin de fabriquer des batteries plus sûres, mais plus légères, dont l'autonomie est plus longue et le coût, moins élevé. Voici certaines des nouvelles technologies utilisées pour ces batteries :

- Batterie au lithium avec électrode à nanotubes de carbone — Les scientifiques du Massachusetts Institute of Technology (MIT)¹⁴ sont en train de créer une cathode (électrode à travers laquelle les électrons sortent d'une batterie) capable d'emmagasiner et de libérer beaucoup plus d'ions positifs qu'une batterie au lithium conventionnelle, grâce à des couches de nanotubes — tubes creux microscopiques très résistants qui couvrent une surface relativement grande. Les nanotubes utilisés lors d'une démonstration donnée par le MIT en 2010 sont commercialisés mais, en raison des essais et des délais de conception, il faudra sans doute attendre cinq ans pour que des électrodes de batterie/de condensateur soient commercialisables. Si l'on ajoute à cela le délai habituel de conception d'un nouveau véhicule (qui est de cinq ans), il pourrait s'écouler dix ans avant que ces batteries/condensateurs hybrides ne soient intégrés aux VE en production.
- Batterie au lithium avec cathode en nanofils de cuivre — La batterie au lithium avec cathode en nanofils de cuivre qu'est en train de concevoir la Colorado State University (CSU) remplacerait l'électrode en graphite, poreuse et conductrice, par des fils de cuivre microscopiques. Elle possède une capacité de stockage d'énergie tellement supérieure aux batteries actuelles que cela a généré la création d'une entreprise, financée en partie dans le cadre du nouveau programme de soutien à la recherche sur les véhicules électriques du ministère de l'Énergie des États-Unis.
- Batterie lithium-air avec électrodes en carbone — IBM cherche à accroître l'autonomie des véhicules à batterie, pour la porter à 500 milles (800 km) entre chaque charge. À cette fin, l'entreprise est en train de créer une batterie lithium-air dont la densité énergétique pourrait être nettement supérieure à celle des actuelles batteries lithium-ion. IBM indique que sa batterie peut avoir une autonomie beaucoup plus grande après la charge, parce qu'elle utilise des électrodes en carbone, dans lesquelles les ions réagissent avec l'oxygène, mais sans que l'oxygène appauvrisse l'électrolyte. On ne prévoit pas que cette technologie soit accessible aux fabricants de véhicules électriques avant 2020.

¹⁴ P. Berg, « 8 potential EV and hybrid battery breakthroughs: Why wild new battery technology could soon mean EVs with a 500-mile range », *Popular Mechanics*, non daté.
<www.popularmechanics.com/cars/g785/8-potential-ev-and-hybrid-battery-breakthroughs/> (Consulté le 30 septembre 2014.)

- Batterie au lithium avec silicium — La faculté de la McCormick School of Engineering and Applied Science de l'Université Northwestern est en train d'étudier la possibilité d'utiliser des électrodes en silicium plutôt qu'en carbone, espérant ainsi créer une batterie ayant plus de capacité de stockage, et donc plus d'autonomie.
- Condensateur hybride à mousse de carbone — Les scientifiques de la Michigan Technological University (MTU) travaillent à la création d'un dispositif de stockage d'électricité qui combinerait la densité de stockage d'une batterie chimique à l'efficacité de transmission d'électricité d'un condensateur à semi-conducteurs. Grâce à une anode en carbone, le condensateur/la batterie hybride n'est pas seulement moins lourd(e) qu'une batterie au lithium conventionnelle; il/elle transmet une plus grande partie de sa charge qu'un condensateur traditionnel. On peut recharger l'unité des milliers de fois sans que son rendement montre des signes de faiblesse.
- Batterie lithium-ion polymère avec silicium — Les scientifiques du Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) du département de l'Énergie des États-Unis, en Californie, sont en train de créer une batterie lithium-ion polymère avec silicium, qui utilise des électrodes en silicium et du polymère spécialement conçu pour maintenir la structure de ces électrodes quand elles prennent de l'expansion et se contractent. Cela permet à la batterie de stocker plus d'énergie que les batteries actuelles.
- Batterie lithium-soufre avec nanofibres de carbone — Les scientifiques de la Stanford University¹⁵ sont en train de créer une batterie dont la densité de puissance est plus élevée, grâce à des nanofibres de carbone et à un revêtement de soufre.
- Composite de lithium et de manganèse/nanocomposite de carbure de silicium — La principale création d'Envia Systems est une cathode exclusive basée sur le manganèse, métal abondant qui est stable quand on l'utilise dans une batterie. Par ailleurs, le manganèse est moins coûteux que le cobalt, qui entre traditionnellement dans la composition des cathodes, selon Envia. L'entreprise a reçu des subventions de constructeurs d'automobiles américains et des organismes américains et californiens qui réglementent le secteur énergétique, pour poursuivre l'élaboration de la batterie en vue d'un usage commercial; ses responsables affirment que cette batterie pourrait donner à un VE une autonomie de 480 km (300 milles).
- Amélioration de la conception des batteries Ni-MH — BASF¹⁶ : les batteries Ni-MH ont actuellement une densité énergétique de 1 kilowattheure (kWh). Pour qu'elles remplacent de façon viable les batteries lithium-ion, leur densité énergétique doit être comprise entre 30 et 50 kWh. BASF envisage de concevoir des alliages métalliques hybrides en utilisant des métaux peu coûteux pour remplacer les métaux des terres rares dans les batteries Ni-MH, ce qui en améliorera la composition chimique et les rendra moins chères et plus efficaces. Mais, pour la batterie d'un véhicule 100 % électrique, le lithium conserve un avantage sur le Ni-MH, parce qu'il est nettement plus léger.

Les discussions avec des membres des industries du recyclage et des métaux révèlent qu'ils ne s'attendent pas à voir apparaître des batteries vraiment nouvelles avant un certain nombre d'années et

¹⁵ Pacific Northwest National Laboratory, « Battery development may extend range of electric cars », *Science Daily*, 2014. <www.sciencedaily.com/releases/2014/01/140109175504.htm> (Consulté le 30 septembre 2014.)

¹⁶ K. Hiler, « What's next in electric-car-battery tech », *Popular Mechanics*, 2013. <www.popularmechanics.com/cars/alternative-fuel/electric/whats-next-in-electric-car-battery-tech-16280750> (Consulté le 30 septembre 2014.)

que, à court et à moyen terme, on va continuer d'utiliser les batteries Ni-MH et les diverses batteries au lithium.

1.4 Ventes de VPE au Canada de 2000 à 2013

Ventes de VEH au Canada

Même si l'étude a permis de trouver diverses sources de données sur les ventes de VPE aux États-Unis, il existait très peu d'information sur les ventes annuelles de véhicules électriques hybrides (VEH) jusqu'en 2010. C'est à partir de 2010 (quand les VEHR et les VE ont été lancés sur le marché canadien) qu'on a recueilli des statistiques sur les divers sites Web consacrés aux VPE.

En juillet 2009, le nombre total de VPE vendus au Canada s'élevait à environ 60 000, sur 21,6 millions de véhicules immatriculés¹⁷. L'information sur les VEH vendus au Canada de 2004 à 2009 a été trouvée dans un document préparé par Sustainable Waterloo¹⁸ (organisme à but non lucratif de la région de Waterloo qui aide les organisations à assurer un avenir écologiquement plus durable), qui a obtenu les données des études compilées par Polk Canada (cabinet d'experts-conseils de premier plan dans l'industrie automobile) au terme d'un examen des immatriculations de véhicules hybrides au Canada. Les estimations de ventes de VEH de 2010 à 2013 ont été basées sur le prorata des ventes de VEH aux États-Unis (bien documentées) par rapport au Canada – on a tenu compte du taux de pénétration des différents marchés (en pourcentage des ventes totales de véhicules) dans les deux pays.

Le tableau 6 (voir page suivante) présente les estimations des ventes annuelles de VEH au Canada de 2000 (on n'en avait alors vendu que 400 — 0,03 des ventes totales de véhicules) à 2013 (on a estimé les ventes annuelles à plus de 23 000 unités — 1,32 % des ventes totales de véhicules).

Ventes de VEHR et de VE au Canada

L'information sur les ventes de véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et de VE au de décembre 2010 (année de leur lancement sur le marché canadien) à la fin de 2013 ont été trouvées sur le site Web de l'*Electric Drive Transportation Association* (Association des fabricants de véhicules à propulsion électrique), qui publie les chiffres mensuels sur les ventes de véhicules¹⁹. Le tableau 6 montre qu'il s'est vendu seulement 468 unités en 2011 (première année complète durant laquelle il y avait des VEHR et des VE sur le marché canadien); ce nombre est passé à 2 183 unités en 2013.

Ventes totales de VPE au Canada

Le tableau 6 donne une estimation des ventes annuelles de tous les VPE au Canada, et indique la proportion des ventes totales de véhicules que les VPE représentent.

¹⁷ Agence internationale de l'énergie (AIE), *Canada: On the road and deployments. Hybrid and Electric Vehicle Implementing Agreement (IA-HEV)*, non daté. <www.ieahev.org/by-country/canada-on-the-road-and-deployments/> (Consulté le 4 mai 2014.)

¹⁸ Sustainable Waterloo, *Calculating GHG emissions from personal vehicle travel*, 2010. <www.sustainablewaterlooregion.ca/files/downloads/RCIM/CalculatingGHGEmissionsfromPersonalVehicleTravel.pdf> (Consulté le 26 juin 2014.)

¹⁹ Electric Drive Transportation Association. <<http://electricdrive.org/>> (Consulté le 30 septembre 2014.)

Tableau 6. Ventes annuelles et estimation des ventes de VPE au Canada, 2000–2013

Type de VPE, pourcentage	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
VEH	400 ^a	876	1 510	2 144	2 303 ^b	5 124	8 924	14 832	19,693	17 638	15 255 ^c	11 671	20 894	23 033
VEHR/VE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	468	1 974	2 183
Total des VPE	400	876	1 510	2 144	2 303	5 124	8 924	14 832	19,693	17 638	15 255	12 139	22 868	25 216
Ventes totales de véhicules	1 545 378	1 570 633	1 703 511	1 593 469	1 534 500	1 583 599	1 615 056	1 653 771	1 640 020	1 461 639	1 558 487	1 587 429	1 677 990	1 745 188
% d'hybrides	0,03 %	0,06 %	0,09 %	0,13 %	0,15 %	0,32 %	0,55 %	0,90 %	1,20 %	1,21 %	0,98 %	0,74 %	1,25 %	1,32 %
% de VEHR/VE								0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,03 %	0,12 %	0,13 %
% de VPE								0,90 %	1,20 %	1,21 %	0,98 %	0,76 %	1,36 %	1,44 %

Notes : Ventes de VEHR et de VE : Electric Drive Transportation Association. <<http://electricdrive.org/>> (Consulté en septembre 2014)

Sources

- On a supposé que c'était deux fois les ventes de Prius déclarées, accessibles grâce aux sources de Toyota. On a supposé que les ventes de Prius représentaient la majorité des ventes totales de véhicules hybrides durant les premières années de développement du marché. Cela génère une estimation prudente, donc peu élevée, des ventes totales de véhicules hybrides.
- Ventes de véhicules hybrides de 2004 à 2009 : Sustainable Waterloo. Calcul des émissions de GES générées lors des déplacements personnels en automobile. Annexe 4, page 18. [éd. : plus disponible.]
- Ventes de 2010 à 2013 calculées au prorata des ventes déclarées aux États-Unis (<www.hybridcar.com> et autres sources), et au prorata des plus bas taux de pénétration du marché canadien.
- Good Car Bad Car, *Overall Canada auto industry sales figures—Monthly and yearly*, 2012. <www.goodcarbadcar.net/2012/10/canada-overall-auto-industry-sales-figures.html?m=1> (Consulté le 4 mai 2015)

1.5 Ventes de VPE au Mexique de 2000 à 2013

Le tableau 7 présente l'information fournie à l'équipe chargée de l'étude par l'*Asociación Mexicana de Distribuidores de Autos* (AMDA, Association mexicaine des concessionnaires automobiles)²⁰, qui porte sur les ventes annuelles de VPE au Mexique depuis 2006, le nombre total de véhicules vendus et les ventes de véhicules électriques hybrides (VEH) au Mexique en pourcentage des ventes totales.

Tableau 7. Ventes annuelles de VPE (unités) au Mexique de 2006 à 2013

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Honda Civic Ima	484	465	445	272	246	263	95	166
Honda CR-Z	-	-	-	-	-	-	-	498
Honda Prius	-	-	-	-	168	247	93	213
Infiniti QX	-	-	-	-	-	27	102	120
Ventes totales de véhicules hybrides		465	445	272	414	537	290	997
Ventes totales de véhicules		1 099 866	1 025 520	754 918	820 406	905 886	987 747	1 063 363
Hybrides, en % des ventes totales de véhicules		0,04 %	0,04 %	0,04 %	0,05 %	0,06 %	0,04 %	0,09 %
Nissan Leaf électrique		-	-	-	-	3	88	12

Source : Miguel Ángel Camarena Ramos, *Asociación Mexicana de Distribuidores de Autos* (AMDA). Communication personnelle avec l'auteur, 21 mars 2014.

Ventes de VEH au Mexique

Les VEH sont apparus sur le marché mexicain en 2006, et les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et les VE, en 2011. Le tableau montre que la Honda Civic IMA était le seul VEH offert sur le marché mexicain de 2006 à 2010. L'année record pour les ventes de Honda Civic IMA a été 2006 (484 unités), alors qu'en 2012, elles ont chuté à 95 unités. Honda a vendu 2 436 unités de ce modèle entre 2006 et 2013. Le modèle Honda CR-Z est entré sur le marché mexicain en 2013; il s'en est vendu 498. Par rapport aux deux autres pays nord-américains, où Toyota occupe une position prédominante sur le marché des VEH, à ce jour, Honda occupe la première place sur le marché mexicain des VEH, avec plus de 3 000 véhicules vendus entre 2010 et 2013.

Les ventes de VEH ont représenté une très faible part des ventes totales de véhicules de 2006 à 2012 (près d'un million par an, comme l'indique le tableau 7). Cependant, elles ont augmenté en 2013, et représenté 0,09 % de ventes totales de véhicules au Mexique cette année-là.

Un certain nombre d'entreprises envisagent de lancer (grâce à l'importation et à la production locale) des VPE sur le marché mexicain à court et à moyen terme. Voici certaines de ces initiatives :

- GM²¹ a lancé un projet pilote en 2013, avec 50 Volt importées qui ont été distribuées aux employés de GM et de General Electric.
- La société Via Motors²² a annoncé en mars 2013 qu'elle allait produire des gros modèles de VEH comme le Suburban, et des fourgonnettes et des camionnettes comme le Cheyenne et le

²⁰ Miguel Ángel Camarena Ramos, Communication personnelle avec l'auteur, 21 mars 2014.

²¹ D. Salado, « Autos eléctricos: ¿son sustentables? », *El Economista*, 2013.
<<http://eleconomista.com.mx/industrias/2013/09/02/autos-electricos-son-sustentables>> (Consulté le 30 septembre 2014.)

²² Autos México, « Via Motors inaugura planta de autos híbridos en México », *Autos México*, 2013.
<<http://autosmexico.mx/mundo-verde/via-motors-inaugura-planta-de-autos-hibridos-en-mexico>> (Consulté le 21 avril 2015)

Silverado. La nouvelle usine de San Luis Potosí convertira en VEH ces véhicules GM conventionnels produits à Silao, au Mexique. On estime que 7 000 unités seront produites en 2014 et 10 000 en 2015.

- Ford a annoncé en 2009²³ le lancement d'une version hybride de la Fusion 2010 produite dans son usine d'Hermosillo (Sonora), au Mexique. Malheureusement, durant l'étude, nous n'avons trouvé aucune donnée relative aux unités vendues et produites.
- Infiniti (Nissan) a annoncé sur son site Web mexicain²⁴ le lancement en 2014 de son nouveau et deuxième modèle hybride, le Q50. Nissan a lancé son premier modèle de VEH (l'Infiniti QX) sur le marché mexicain en 2011 (voir le tableau 2). Pour l'instant, aucune information n'est disponible à propos du nombre de Q50 vendus.

Durant l'étude, nous n'avons pu trouver d'information sur d'autres VEH comme le Porsche Cayenne, la Porsche Panamera et le Nissan Pathfinder, qui pourraient être disponibles sur le marché mexicain.

VEHR et VE au Mexique

En octobre 2009, Nissan a conclu une entente avec l'administration municipale de Mexico, qui prévoyait la livraison, d'ici 2011, de 500 véhicules Leaf destinés aux parcs automobiles du gouvernement et de certaines entreprises. En échange, la ville devait installer l'infrastructure de recharge et accorder une exemption de taxe aux propriétaires. Par ailleurs, l'administration du district fédéral de Mexico a conclu une entente avec Nissan en novembre 2010 prévoyant que les 100 premières Leaf vendues au pays seraient affectées au parc de taxis de la capitale. Les premières Leaf ont été livrées à la fin du mois de septembre 2011, faisant du Mexique le premier pays d'Amérique latine où l'on pouvait se procurer une Leaf.

En février 2013, environ 70 Leaf étaient utilisées comme taxis — 50 à Aguascalientes²⁵ et 20 à Mexico. Le programme d'Aguascalientes a débuté en mai 2012; il comprenait la création d'un garage équipé de 58 bornes de recharge, qui était le plus grand de ce type au monde. Carrot Mexico, entreprise de partage de véhicules basée à Mexico, a acquis 3 Leaf, qui sont accessibles à 1 600 clients.

Deux autres entreprises envisagent de lancer des VEH, des VEHR et des VE sur le marché mexicain, à court et à moyen terme :

- La BMW Mini E²⁶ utilise une batterie Li-ion; un projet pilote a été lancé avec 12 unités en 2013.
- MIA Electric México²⁷ (entreprise française) prévoit construire une usine au Mexique afin de produire quatre modèles équipés de batteries au phosphate de fer lithié.

Le marché mexicain des véhicules électriques va sans doute croître plus lentement que le marché des VPE, parce que les VE coûtent généralement 10 000 \$US de plus.

²³ E. H. Mayer, « Fusión híbrido rompe récord », *El Universal*, 2009.

<www.eluniversal.com.mx/articulos/53870.html> (Consulté le 21 avril 2015)

²⁴ Infinity. Infinity Q50, non daté. <www.infiniti.mx/Q50/modelos> (Consulté le 21 avril 2015)

²⁵ Nissan Newsroom, *Growing the grid: EV taxis drive infrastructure transformation in Mexico, Latin America*, 2 mai 2013, clip vidéo sur YouTube. <<http://nissannews.com/en-US/nissan/usa/releases/video-report-growing-the-grid-ev-taxis-drive-infrastructure-transformation-in-mexico-latin-america>> (Consulté le 21 avril 2015)

²⁶ E. Smilovitz, « México venderá su primer coche 100% eléctrico en 2013 », *Altonivel*, 2012.

<www.altonivel.com.mx/22410-mexico-vendera-su-primer-coche-electrico-en-2013.html> (Consulté le 21 avril 2015)

²⁷ MIA Electric México, 2015. <www.mia-electric.mx/> (Consulté le 21 avril 2015)

1.6 Ventes de VPE aux États-Unis de 2000 à 2013

Nous avons trouvé un volume élevé d'information à propos des ventes de véhicules électriques hybrides (VEH), de véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR) et de véhicules électriques (VE) aux États-Unis de 2000 à 2013. Ces données figurent séparément dans la présente section pour les trois catégories de VPE.

Ventes de VPE aux États-Unis

Les chiffres relatifs aux ventes annuelles de VPE aux États-Unis de 2000 à 2013 ont été compilés à partir de deux sources :

- Les ventes effectuées en 2011, 2012 et 2013 ont été compilées, par modèle de véhicule, par HybridCars.com et regroupées en valeurs totales.
- La valeur des ventes de tous les autres véhicules a été obtenue de l'*Alternative Fuels and Advanced Vehicle Data Center* (Centre de données sur les véhicules à carburant de remplacement et les véhicules de pointe) du ministère de l'Énergie.

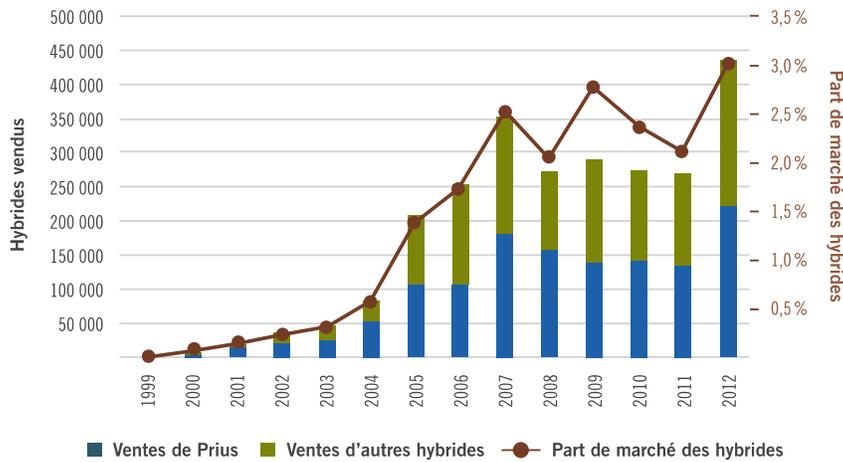
L'information est présentée au tableau 8 ci-après, parallèlement au nombre de VEHR et de VE vendus de 2010 à 2013.

On estime que 3,1 millions de VEH (dont plus de 1,5 million de Toyota Prius) ont été achetés aux États-Unis depuis 1999, sur les 212 millions de véhicules vendus dans le pays durant cette période. Les VEH pourraient donc représenter 1,45 % de l'ensemble des véhicules en circulation aux États-Unis.

Les données présentées au tableau 8 montrent que près de 500 000 VEH ont été achetés aux États-Unis en 2013, ce qui représente 3,2 % des 15,3 millions de véhicules vendus cette année-là. Ce pourcentage a fortement augmenté par rapport au 1,4 % enregistré en 2005.

La figure 6 qui suit montre les ventes annuelles de VEH aux États-Unis de 1999 à 2012, ainsi que le pourcentage des ventes totales de véhicules qu'ont représenté les VEH, et la proportion des VEH vendus chaque année qui étaient des modèles de Toyota Prius. Malgré les effets de la récession de 2008 aux États-Unis (au cours de laquelle le nombre absolu de ventes de véhicules hybrides et traditionnels a chuté de façon spectaculaire), les VEH ont conquis une part importante du marché, puisque l'on observe une croissance rapide des ventes de VEH de 2005, année où ils ne représentaient que 1,5 % des ventes totales de véhicules aux États-Unis, à 2013, lorsque ce pourcentage a dépassé 3 %.

Figure 6. Ventes de véhicules hybrides, ventes de Prius et part du marché des hybrides aux États-Unis, de 1999 à 2012



Source: Hybrid Cars. DOE Alternative Fuels Data Center. *Hybrid cars*. <www.hybridcars.com>. (Consulté le 21 avril 2014)

La figure 7 ci-après montre la part de marché des différentes marques de VEH aux États-Unis en 2013. On voit que Toyota dominait le marché avec plus de 60 % des VEH vendus aux États-Unis (la Prius étant la plus populaire, suivie des versions hybrides des Toyota Camry et Avalon et de deux VEH Lexus). Les modèles représentaient plus de 13 % de VEH vendus aux États-Unis en 2013.

Ventes de VEHR et de VE aux États-Unis

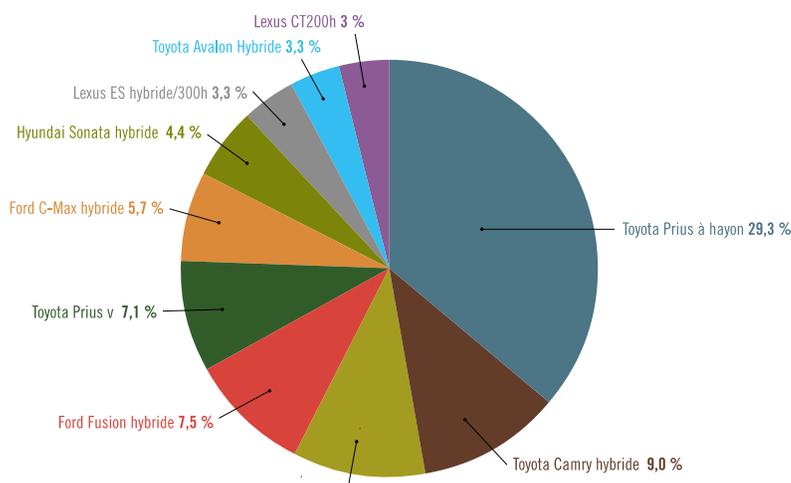
Le tableau 8 (page suivante) présente le nombre de VEHR et de VE vendus aux États-Unis de 2010 à 2013. Les ventes de ces véhicules ont fortement augmenté depuis leur arrivée sur le marché américain en décembre 2010. On a adopté rapidement la technologie des véhicules électriques rechargeables, puisque près de 100 000 unités ont été vendues en 2013. Les VEHR et les VE utilisent des batteries Li-ion car leurs caractéristiques sont différentes pour ce qui est de la charge et de la puissance. La figure 8 (voir page 23) indique les ventes cumulatives de VEHR et de VE aux États-Unis de décembre 2010 à octobre 2013²⁸.

Ventes totales de VPE aux États-Unis

Le tableau 8 et les figures 5 et 7 montrent que le nombre de VPE actuellement sur le marché américain est très peu élevé, mais qu'il progresse rapidement. En 2013, les VEH représentaient 3,2 % de tous les véhicules vendus aux États-Unis – tous les VPE représentaient donc 3,8 % du marché américain.

²⁸ Electric Drive Transportation Association, *Electric drive sales dashboard*, non daté. <<http://electricdrive.org/index.php?ht=d%2Fsp%2Fi%2F20952%2Fpid%2F20952>> (Consulté le 21 avril 2015)

Figure 7. Part de marché des dix marques de véhicules électriques hybrides les plus populaires aux États-Unis en 2013



Source : M. R. Duran Ortiz, Principaux vendeurs de VEH aux États-Unis, en part de marché, 2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_electric_vehicles_in_the_United_States#mediaviewer/File:US_top_selling_HEVs_by_market_share.png> (Consulté le 30 septembre 2014)

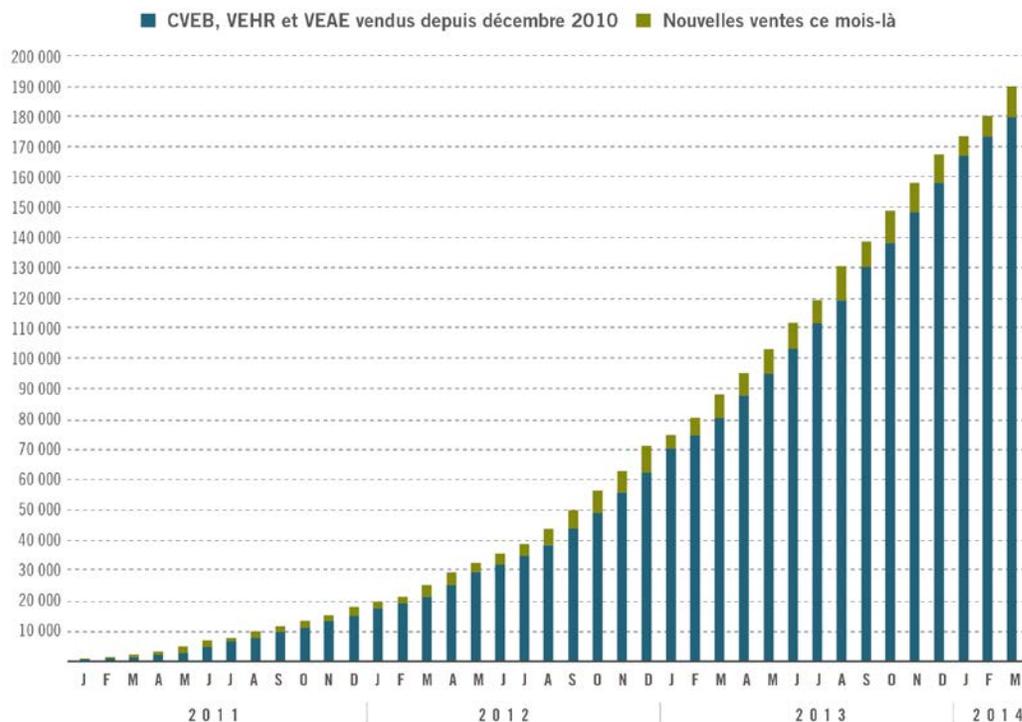
Tableau 8. Ventes de VPE aux États-Unis de 2000 à 2013

Véhicules	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
VEH	9 350	20 282	36 035	47 600	84 199	209 711	252 636	352 274	313 673	290 292	274 210	226 329	434 645	495 530
VEHR et VE								0	0	0	345	17 735	52 835	96 902
Total VPE								352 274	313 673	290 292	274 555	244 064	487 480	592 432
Ventes totales de véhicules (VTV)								11 777 314	13 260 747	10 429 014	11 588 783	12 734 356	14 439 684	15 531 609
% de VEH par rapport aux VTV								3,0 %	2,4 %	2,8 %	2,4 %	1,8 %	3,0 %	3,2 %
% de VEHR et de VE par rapport aux VTV								0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,14 %	0,37 %	0,62 %
% de VPE par rapport aux VTV								2,99 %	2,37 %	2,78 %	2,37 %	1,92 %	3,38 %	3,81 %

Note : VEH = véhicule électrique hybride; VEHR = véhicule électrique hybride rechargeable; VE = véhicule (entièrement) électrique.

Source : Electric Drive Transportation Association, *Electric drive sales dashboard*, non daté. <<http://electricdrive.org/index.php?ht=d%2Fsp%2Fi%2F20952%2Fpid%2F20952>> (Consulté le 21 avril 2015)

Figure 8. Ventes mensuelles totales de VPE aux États-Unis de 2011 à 2013, et projections pour 2014



Note: VEB = véhicule électrique à batterie. Les VEB utilisent des batteries rechargeables uniquement pour alimenter leurs moteurs électriques, par exemple la Nissan LEAF et la Tesla S. VEHR = véhicule électrique hybride rechargeable. VEAE = véhicule électrique à autonomie étendue. Les VEAE sont pourvus d'une unité d'alimentation intégrée appelée prolongateur d'autonomie, par exemple la Chevrolet Volt.

Source : Electric Drive Transportation Association, *Electric drive sales dashboard*, non daté. <<http://electricdrive.org/index.php?ht=d%2Fsp%2F%2F2F0952%2Fpid%2F20952>> (Consulté le 21 avril 2015)

1.7 Projections des ventes de batteries de VPE en Amérique du Nord

Les projections du nombre de batteries de VPE vendues sont basées sur les ventes de VPE, qui contiennent une batterie neuve lors de la vente, et sur les ventes de batteries de rechange lorsque la batterie initiale du VPE arrive en fin de vie utile. Ces projections sont expliquées dans la présente section.

Les facteurs suivants vont influencer sur la croissance du marché nord-américain des VPE (ils ne sont pas présentés dans un ordre particulier) :

- **Tendances démographiques :** On s'attend à ce que la distance globale parcourue par les véhicules diminue aux États-Unis de 2018 à 2040, en raison du vieillissement de la population de conducteurs (et de la baisse du nombre de permis délivrés et de voyages effectués par les jeunes) ainsi que de facteurs liés à l'emploi et au revenu. C'est pourquoi l'*Annual Energy Outlook 2014* de l'*Energy Information Administration* (Administration de l'information sur l'énergie) prévoit une augmentation de seulement 30 % des kilomètres parcourus par les véhicules entre 2012 et 2040, alors que les projections de 2013 prévoyaient une augmentation de 41 %²⁹.

²⁹ US Energy Information Administration, *Annual energy outlook 2014 with projections to 2040*, 2014. <www.eia.gov/forecasts/AEO/pdf/0383%282014%29.pdf> (Consulté le 14 avril 2015)

- **Prix du gaz naturel** : Il va influencer sur le prix de l'électricité, qui aura à son tour un impact sur le coût d'utilisation d'un VPE rechargeable.
- **Prix du pétrole** : Il va influencer sur le coût d'utilisation d'une automobile à essence.
- **Politiques relatives au CO₂** : Elles détermineront le coût des émissions de CO₂ si elles visent le secteur des transports.
- **Normes d'énergie renouvelable (NER)** : Si l'on adopte des NER à l'échelle régionale ou nationale, elles influenceront sur le coût de l'électricité et pourraient imposer l'« achat vert » de VPE.
- **Coût des batteries et progrès technologiques** : Le rythme et l'ampleur des innovations en ce qui concerne les batteries vont déterminer en partie la rentabilité des VPE par rapport aux autres véhicules légers, car les nouvelles technologies vont sans doute alléger les batteries des VPE, et améliorer leur intensité énergétique et leur efficacité globale³⁰. Le coût des batteries a fortement baissé depuis la conception initiale des VEH – à l'époque, ces véhicules coûtaient 10 000 \$ US de plus que les autres. Cette différence a été ramenée à une fourchette de 1 500 à 3 000 \$ US³¹.

En 2013, on trouvait facilement des VPE au Canada et aux États-Unis, mais le choix était limité au Mexique.

Nous avons consulté deux sources de projection de la croissance de la part de marché des VPE (l'Energy Information Administration [EIA] et les chercheurs de l'University of Minnesota et de la North Carolina State University), afin d'établir les projections présentées ci-après.

- L'aperçu préliminaire publié le 15 avril 2014 dans le cadre de l'*Annual Energy Outlook 2014* (AEO) de l'EIA prévoit que le nombre total de véhicules aux États-Unis va passer de 129 millions en 2011 à 159 millions d'ici 2040³². Les VEH sont inclus dans les projections relatives aux véhicules à moteur à combustion interne. On ne prévoit pas que les VEHR et les VE vont gagner une importante part du marché des véhicules légers de 2012 à 2040, mais on prévoit que le nombre de véhicules à carburant de remplacement devrait passer de 4 à 9 millions d'ici 2040.
- On prévoit que les VEH vont représenter 5 % des ventes de véhicules neufs d'ici 2040, contre 3 % en 2012.
- On prévoit que les VEHR et le VE vont chacun représenter 1 % des ventes de véhicules légers neufs en 2040, alors que leur proportion était « négligeable » en 2012 — pour une part totale de marché de 7 %³³.
- L'EIA fonde ces projections sur des modèles très élaborés. Elle commence par les données sur les ventes actuelles, puis modélise les ventes prévues en utilisant le prix anticipé du carburant, les récentes offres de produits des fabricants, l'évolution des technologies et la perception des consommateurs. Cependant, les données récentes sur les ventes obtenues aux

³⁰ S. Babae, A.S. Nagpure et J.D. DeCarolis, « How much do electric drive vehicles matter to future US emissions? », *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(3), p. 1382 à 1390.
<www4.ncsu.edu/~jfdcaro/papers/Babae_etal_2014.pdf> (Consulté le 23 avril 2014.)

³¹ David Brooks. Communication personnelle avec l'auteur, avril 2014.

³² US Energy Information Administration, *Annual energy outlook 2014: Early release reference case*, 2013.
<[http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/AEO2014%20Early%20Release%20Presentation_CGEP\(12-18-13\).pdf](http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/AEO2014%20Early%20Release%20Presentation_CGEP(12-18-13).pdf)> (Consulté le 17 avril 2014.)

³³ US Energy Information Administration, *Annual energy outlook 2014 early release overview*, 2014.
<[www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/0383er\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/0383er(2014).pdf)> (Consulté le 17 avril 2014.)

fins de l'étude montrent déjà que les ventes de VEHR et de VE ont fortement progressé depuis l'introduction de ces véhicules sur le marché américain en décembre 2010. C'est pourquoi nous avons utilisé certaines des données de l'EIA, mais pas [certains] autres éléments [de leurs recherches] pour nos projections. Nous avons utilisé la prévision d'une augmentation de 30 millions du nombre de véhicules aux États-Unis pour supposer que les ventes progresseraient d'environ un million d'unités par année de 2014 à 2040, et calculé ces valeurs au prorata pour présenter (plus loin dans la section) les projections relatives au Canada et au Mexique.

- Les chercheurs de l'University of Minnesota et de la North Carolina State University ont étudié 108 scénarios différents élaborés à partir de cinq variables clés (prix du gaz naturel, prix du pétrole, politiques relatives au CO₂, adoption des NER et coût des batteries) susceptibles d'influer sur la quantité de VPE vendus en pourcentage du marché total des véhicules légers. Leur étude conclut que, d'ici 2050, la part du marché des véhicules légers qu'occuperont les VPE pourrait être comprise entre 0 et 42 %, avec une moyenne de 24 %³⁴. Nous avons choisi cette valeur (pour 2050) pour établir les projections de la présente étude, car elle est prudente, mais élevée pour ce qui est du nombre probable de batteries de VPE qui arriveront en FCV au terme de chaque année. Compte tenu du taux de pénétration du marché américain en 2013 (environ 3 %) et d'un taux prévu de 24 % d'ici 2050, nous avons prévu une augmentation annuelle d'environ 1,5 % du taux de pénétration de VPE aux États-Unis.

La grande disparité entre les estimations de la pénétration du marché à long terme (AEO de l'EIA) et les recherches des universités indique que ce marché demeure en perpétuelle évolution. Le nombre de variables influant sur la croissance du marché des VPE — et sur la génération suivante de batteries de VPE en FCV — est très élevé, ce qui témoigne d'une grande incertitude à l'heure actuelle. C'est pourquoi il est recommandé de mettre à jour ces projections périodiquement, afin de tenir compte de nouvelles études et de données plus sûres à propos de la façon dont les marchés se développent pour tous les VPE dans les trois pays nord-américains.

Le tableau 9 qui suit présente l'estimation du nombre de batteries de VPE qui entreront sur le marché nord-américain de 2010 à 2030. Il a été constitué à partir des hypothèses suivantes :

- Nous avons basé les projections de ventes de véhicules (à partir de 2014) sur la moyenne annuelle des ventes dans chaque pays de 2007 à 2013. Cette moyenne tenait compte de la récession économique de 2009-2010, qui a fait chuter les ventes de véhicules à un niveau bien inférieur aux années précédentes ou aux années ultérieures.
- Nous avons basé les projections de 2015 à 2030 pour chaque pays nord-américain sur un taux de croissance annuelle moyen de 2 %.
- Environ 80 % des VEH continueraient d'utiliser des batteries Ni-MH (le chiffre actuel est légèrement supérieur à 80 %).
- Environ 20 % des VEH et la totalité des VEHR et des VE utiliseraient des batteries au lithium.
- L'ensemble des VPE représentait 12 % des ventes totales de véhicules dans chacun des trois pays nord-américains d'ici 2030 (soit la moitié de l'objectif de 24 % visé pour 2050 dans le scénario américain de l'University of Minnesota et de la North Carolina State University, décrit précédemment). Nous avons choisi cette valeur pour faire nos projections dans le cadre

³⁴ S. Babae, A.S. Nagpure et J.D. DeCarolis, « How much do electric drive vehicles matter to future US emissions? », *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(3), p. 1382 à 1390.
<www4.ncsu.edu/~jfdcaro/papers/Babae_etal_2014.pdf> (Consulté le 23 avril 2014.)

de la présente étude, car elle est prudente, mais élevée pour ce qui est du nombre probable de batteries de VPE qui arriveront en FCV au terme de chaque année.

- Nous avons supposé que l'augmentation des ventes de VPE visant à atteindre ces objectifs dans chaque pays serait linéaire (mais ajustée les premières années par souci de réalisme).
- Le nombre de VEH et de VEHR/VE sur le marché serait le même d'ici 2030 dans chacun des trois pays, si l'on suppose que l'infrastructure nécessaire aux VE va se développer.
- Il faudrait remplacer 20 % des batteries des VPE 8, 9 ou 10 ans après l'achat de la batterie d'origine avec le véhicule neuf, à condition que celui-ci ait effectué suffisamment de cycles pour appauvrir cette batterie.

Tableau 9. Ventes passées et prévues de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) destinées aux véhicules à propulsion électrique (VPE) au Canada, au Mexique et aux États-Unis, de 2000 à 2030

Année	Batteries de VPE vendues au Canada (milliers d'unités)		Batteries de VPE vendues au Mexique (milliers d'unités)		Batteries de VPE vendues aux États-Unis (milliers d'unités)		Batteries de VPE vendues en Amérique du Nord (milliers d'unités)	
	Ni-MH	Lithium	Ni-MH	Lithium	Ni-MH	Lithium	Ni-MH	Lithium
2000	0	0	0	0	7	2	8	2
2001	1	0	0	0	16	4	17	4
2002	1	0	0	0	29	7	30	8
2003	2	0	0	0	38	10	40	10
2004	2	0	0	0	67	17	69	17
2005	4	1	0	0	168	42	172	43
2006	7	2	0	0	202	51	209	52
2007	12	3	0	0	282	70	294	73
2008	16	4	0	0	251	63	267	67
2009	14	4	0	0	234	58	248	62
2010	12	3	0	0	223	55	235	58
2011	10	3	0	0	187	63	197	66
2012	17	6	0	0	355	140	373	146
2013	19	7	1	0	410	196	430	203
2014	25	11	2	1	465	212	492	225
2015	31	17	3	4	507	222	542	242
2016	37	23	6	7	527	232	570	262
2017	42	29	9	12	550	288	601	329
2018	47	36	13	18	573	358	634	412
2019	52	43	17	24	592	421	661	488
2020	58	51	21	30	652	502	731	583
2021	64	59	25	36	688	582	776	677
2022	70	69	29	43	741	657	840	768
2023	76	79	33	49	774	734	883	862
2024	82	89	37	56	807	815	926	960
2025	89	101	42	63	839	909	970	1 073
2026	95	113	46	71	872	1 007	1 014	1 191
2027	101	125	51	79	905	1 110	1 057	1 314
2028	107	139	56	88	938	1 217	1 101	1 443
2029	113	156	60	95	971	1 329	1 144	1 580
2030	120	173	68	101	1 004	1 390	1 192	1 665

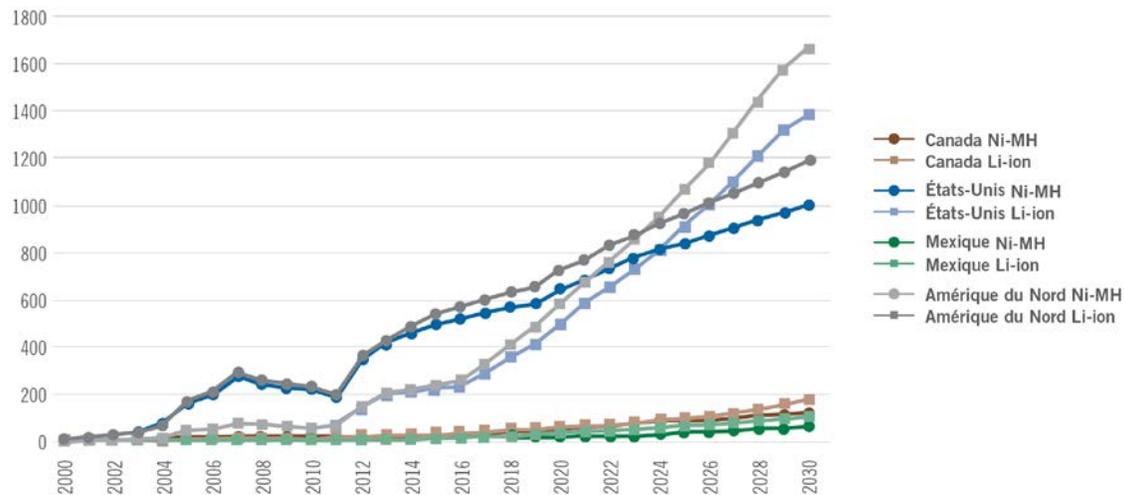
Source : Projections fondées sur les analyses présentées aux sections 1.7 et 1.8.

Le tableau 9 ainsi que la figure 9 montrent la forte augmentation du nombre de batteries Ni-MH et de batteries Li-ion qui devraient être vendues avec des VPE entre 2010 et 2030 dans les trois pays nord-américains, les États-Unis étant le plus gros vendeur dans un avenir rapproché. Le tableau montre aussi que plus de 630 000 batteries de VPE ont été vendues en Amérique du Nord en 2013, dont près de 430 000 étaient des batteries Ni-MH et 200 000, des batteries Li-ion.

Ces chiffres vont presque doubler d'ici 2020, année où l'on prévoit que plus de 730 000 batteries Ni-MH et 580 000 batteries Li-ion seront vendues pour des VPE en Amérique du Nord.

Il faut mettre à jour ces projections périodiquement pour tenir compte des changements à la fois importants et rapides survenant sur le marché des VPE, car la variété des produits offerts augmente rapidement et de plus en plus de consommateurs nord-américains achètent ces véhicules.

Figure 9. Ventés passées et prévues de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) destinées aux véhicules à propulsion électrique (VPE) au Canada, au Mexique et aux États-Unis, de 2000 à 2030 (en milliers d'unités)



Source: Projections fondées sur les analyses présentées aux sections 1.7 et 1.8.

1.8 Limites de l'analyse

Nous avons fait des recherches approfondies sur Internet et dans la documentation existante afin de trouver des sources fiables de données sur les ventes de VPE dans chaque pays nord-américain.

Il a été très difficile de trouver des données sur les ventes nationales totales de VEH au Canada, car personne ne fait encore de suivi systématique des statistiques dans un site centralisé et facilement accessible. Nous avons également eu du mal à déterminer les ventes de VEH au Mexique, mais les associations de l'industrie automobile indiquent qu'elles sont très peu élevées pour l'instant.

Il existait de nombreuses données sur les ventes de VEH aux États-Unis. Les données sur le nombre de VEHR et de VE vendus au Canada et aux États-Unis ont été fournies par l'*Electric Drive Transportation Association* (EDTA, Association du transport par véhicules à propulsion électrique)³⁵.

³⁵ Electric Drive Transportation Association, non daté, <www.electricdrive.org> (Consulté le 21 avril 2015)

Nous avons obtenu les données sur les ventes au Mexique de l'*Asociación Mexicana de Distribuidores de Autos* (AMDA, Association mexicaine des distributeurs d'automobiles)³⁶.

Nous avons examiné les prévisions de ventes de VPE de différents groupes, mais elles se basaient sur différentes hypothèses, selon l'organisation qui faisait les prévisions. Nous avons préparé les projections du présent rapport grâce aux données provenant des diverses sources que nous avons trouvées.

Elles sont approximatives et s'appuient sur diverses hypothèses documentées dans le rapport. Il faudra les mettre à jour périodiquement, à mesure que le marché des VPE se développera.

³⁶ Miguel Ángel Camarena Ramos. Communication personnelle avec l'auteur, 21 mars 2014.

2 Projections du nombre de batteries de véhicules à propulsion électrique en fin de cycle de vie en Amérique du Nord, d'ici 2030

La présente section contient les projections du nombre de batteries de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV) dans chaque pays nord-américain, ainsi que les hypothèses sur lesquelles se basent ces projections.

2.1 Exemple de méthode de détermination de la durée de vie permettant de déterminer la FCV

Nous avons évalué le nombre de batteries Ni-MH et de batteries au lithium provenant de VPE qui atteindraient leur FCV entre 2010 et 2030 dans les trois pays nord-américains en utilisant un modèle de durée de vie qui tient compte des divers facteurs suivants :

- nombre de batteries Ni-MH et Li-ion vendues avec les VPE (dans les véhicules neufs et comme batteries de rechange);
- durée de vie des batteries Ni-MH et Li-ion (voir la section 3.2);
- mesure dans laquelle les batteries Ni-MH et Li-ion sont réutilisées au terme de leur premier cycle de vie;
- période pendant laquelle les batteries Ni-MH et Li-ion sont stockées à la fin de leur premier cycle de vie, avant d'être détruites et d'arriver alors en fin de vie.

Nous avons utilisé ce modèle pour estimer la FCV de divers produits – produits électroniques, batteries grand public, batteries d'accumulateurs au plomb, gros électroménagers et lampes à fluorescence. Il est décrit plus en détail à l'annexe A.

2.2 Durée de vie des batteries des VPE

Les fabricants de VPE offrent une garantie de huit ans, ainsi qu'une garantie qui couvre entre 160 000 et 200 000 km (100 000 à 125 000 milles). On prévoit que la durée de vie des futures générations de batteries, lancées sur le marché d'ici 2030, sera de neuf à quinze ans. Une récente évaluation du cycle de vie des batteries lithium-ion a utilisé le chiffre de dix ans³⁷. Pour modéliser la durée de vie aux fins de la présente étude, nous avons utilisé une valeur comprise entre huit et dix ans. De nombreuses études sont en cours à propos de la possibilité d'utiliser des batteries de VPE en FCV comme dispositifs de stockage d'énergie (par exemple, d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne). Compte tenu de l'incertitude relative à ces possibilités, nous ne les avons pas envisagées pour établir notre modèle de durée de vie.

2.3 Batteries de rechange, reconditionnement des batteries et deuxième vie pour les batteries des VPE

Les entrevues menées dans le cadre de ce projet et les documents consultés indiquent que les gens n'achètent pas souvent de batteries de rechange pour leur VPE, à moins qu'ils le conservent très longtemps. La batterie Ni-MH qui équipe toutes les Toyota Prius hybrides (modèle le plus populaire) sont garanties pendant 160 000 km (100 000 milles) ou huit ans. Certains propriétaires ont indiqué

³⁷ Abt Associates, *Application of life cycle assessment for nanoscale technology: Lithium ion batteries for electrical vehicles*, 2013. <<http://seeds4green.net/sites/default/files/LCA%20for%20Lithium-Ion%20Batteries%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014.)

que les batteries durent en fait plus longtemps, parfois jusqu'à 240 000 km, avant de devoir être changées. En général, entre un et trois pour cent des batteries doivent être remplacées avant, à la suite d'accidents ou de défauts, lesquelles se produisent très rarement.

Pour prévoir les ventes, nous avons supposé que les batteries de 20 % des VPE seraient remplacées après leur premier cycle de vie de huit à dix ans et que, dans le cas des 80 % restants, les propriétaires achèteraient un véhicule équipé d'une batterie neuve. Le véhicule mis hors service doit être retiré de la circulation (auquel cas la batterie sera recyclée ou réutilisée). Si ce véhicule est acheté par une autre personne comme véhicule d'occasion, il lui faudra une batterie neuve.

Le reconditionnement des batteries Ni-MH est pratique, car on peut examiner les éléments ou les blocs afin de déterminer ceux qui sont usagés ou utilisables, et l'on peut créer une batterie neuve à partir des bons éléments d'une vieille batterie. Le reconditionnement des batteries lithium-ion n'est pas jugé pratique, car c'est un travail trop dangereux en raison de la nature inflammable et explosive du lithium (surtout quand il est au contact de l'eau)³⁸. C'est pourquoi nous n'avons fait aucune hypothèse à propos de la réutilisation des batteries de VPE au terme de leur premier cycle de vie. Si ces estimations sont mises à jour périodiquement comme le recommande le présent rapport, il faudra revoir cette hypothèse quand le marché du reconditionnement sera plus développé.

Aux États-Unis, le ministère de l'Énergie (DoE) fait de nombreuses recherches à propos de l'utilisation possible des batteries de VPE comme dispositifs de stockage d'énergie. Aucune conclusion n'a été tirée à propos de leur utilisation potentielle lors d'un deuxième cycle de vie, mais si c'était possible, cela prolongerait considérablement la durée de vie de ces grosses batteries, et cela retarderait le moment où il faut en recycler un grand nombre. La demande de systèmes de stockage d'énergie est forte (en particulier pour les énergies solaire et éolienne), mais les experts de l'industrie que nous avons interrogés disent que les compagnies de services publics étudient les possibilités de stockage, mais ne sont pas « attachés à un type de batterie en particulier ». Compte tenu de l'incertitude relative à l'utilisation potentielle des batteries de VPE en FCV (abordée plus en détail à la section 5), nous n'en avons pas tenu compte dans nos projections sur la FCV.

2.4 Projections à propos des batteries de VPE en FCV d'ici 2030

Pour faire nos projections en fonction du modèle de durée de vie, nous nous sommes basés sur les hypothèses suivantes :

- Le nombre de véhicules vendus annuellement, présenté à la section 2, a servi de base à nos projections relatives aux batteries en FCV.
- Les VEH continueraient d'utiliser à la fois des batteries Ni-MH (80 %) et des batteries Li-ion (20 %).
- Les VEHR et les VE utiliseraient des batteries Li-ion.
- Toutes les batteries de VPE ont une durée de vie de huit à dix ans (également répartie dans le cadre du modèle de durée de vie).
- Des batteries de rechange seraient achetées pour 20 % des VPE au terme de leur premier cycle de vie de huit à dix ans.
- Les estimations n'ont pas tenu compte d'une utilisation potentielle des batteries de VPE usagées comme dispositifs de stockage d'énergie (voir la section 5).

³⁸ Représentant de l'industrie du recyclage des batteries. Communication personnelle (confidentielle), avril 2014.

Les quantités de batteries en FCV calculées par le modèle de durée de vie sont présentées au tableau 10. Les chiffres portent sur les batteries de VPE à la fin de leur premier cycle de vie. Parce que diverses variables jouent encore un rôle sur le marché des VPE et du stockage de l'énergie, il est préférable de seulement s'intéresser aux batteries en FVC pour les discussions préliminaires sur la GER, et de ne pas tenir compte de la durée de vie prolongée qu'offrirait le stockage d'énergie, jusqu'à ce que cette option soit clarifiée. Nous pourrions en tenir compte lors de futures projections, recommandées de façon périodique.

Tableau 10. Estimation du nombre de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) provenant de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV) dans le véhicule d'origine au Canada, au Mexique et aux États-Unis, 2010–2030

Année	Batteries de VPE en FCV au Canada (milliers d'unités)		Batteries de VPE en FCV au Mexique (milliers d'unités)		Batteries de VPE en FCV aux États-Unis (milliers d'unités)		Nombre total de batteries de VPE en FCV en Amérique du Nord (milliers d'unités)	
	Ni-MH	Li-ion	Ni-MH	Li-ion	Ni-MH	Li-ion	Ni-MH	Li-ion
2010	1	0	0	0	18	2	18	2
2011	1	0	0	0	28	6	29	7
2012	2	0	0	0	45	10	46	10
2013	3	1	0	0	91	20	94	21
2014	4	1	0	0	146	33	150	34
2015	8	2	0	0	217	49	225	51
2016	12	3	0	0	245	61	257	64
2017	14	3	0	0	255	64	270	67
2018	14	4	0	0	236	59	250	62
2019	12	3	0	0	214	59	227	62
2020	13	4	0	0	255	86	268	90
2021	15	5	0	0	317	133	333	138
2022	21	8	1	1	410	183	431	191
2023	25	12	2	2	461	210	488	223
2024	31	17	4	4	500	222	535	243
2025	37	23	6	8	528	247	571	278
2026	42	29	9	13	550	293	602	334
2027	47	36	13	18	572	356	632	410
2028	52	43	17	24	606	427	675	494
2029	58	51	21	30	644	502	723	583
2030	64	60	25	36	693	580	782	676

Source : Projections fondées sur les analyses présentées aux sections 2.4 et 2.5.

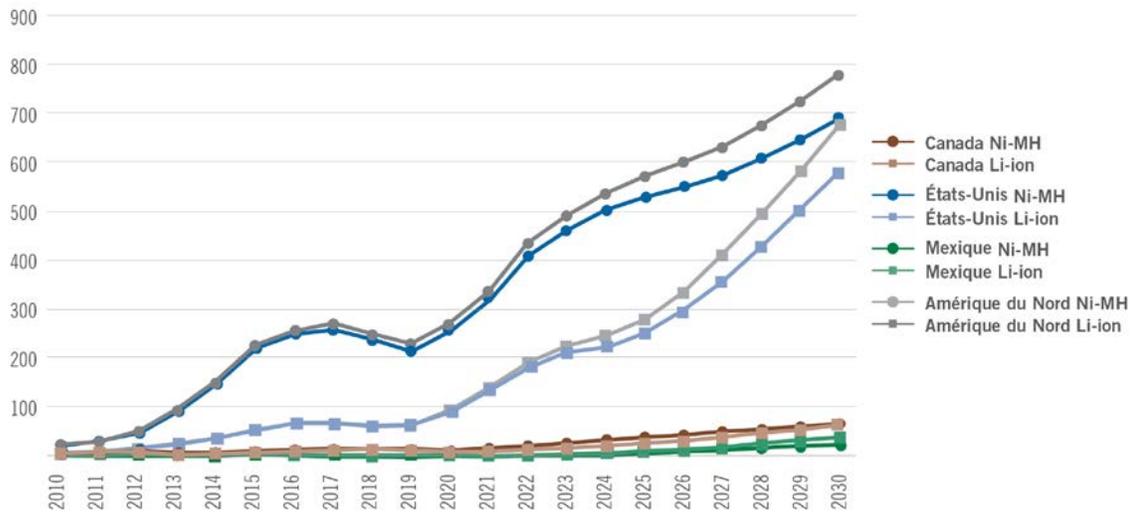
Le tableau 10 ainsi que la figure 10 (voir page suivante) montrent que la plupart des batteries de VPE en FCV seront produites aux États-Unis dans un proche avenir, et qu'un petit nombre le sera au Canada et un nombre minime au Mexique. C'est dû au fait que les batteries des VEH ont une durée de vie d'au moins huit ans; les VPE ne sont arrivés sur le marché mexicain qu'en 2006, et l'on en vend encore un nombre très peu élevé. Les chiffres sont également assez bas sur le marché canadien, où les ventes de VEH ont été très limitées jusqu'à maintenant.

Les VEHR et le VE n'ont été lancés sur le marché nord-américain qu'en décembre 2010, et n'ont commencé à se vendre en quantités importantes qu'en 2013; il faudra donc attendre au moins 2020 pour qu'un grand nombre de ces batteries arrivent à la fin de leur durée de vie utile.

Les batteries Ni-MH des premiers VEH vont atteindre leur FCV en grand nombre d'ici 2015; le modèle de durée de vie prévoit qu'il y en aura 10 000 au Canada, une quantité minime au Mexique et 266 000 aux États-Unis. On estime que d'ici 2020, 268 000 batteries Ni-MH atteindront leur FCV en Amérique du Nord (environ 13 000 au Canada, 600 au Mexique et 255 000 aux États-Unis). En 2020, 90 000 batteries Li-ion présentes dans les VPE devraient atteindre leur FCV (4 000 au Canada, une

quantité minimale au Mexique et 86 000 aux États-Unis). Ainsi, dans un avenir proche, la gestion des batteries Ni-MH et Li-ion provenant des VPE va principalement incomber aux États-Unis, car c'est là qu'on trouve un grand nombre de VEH (on estime qu'il y en avait deux millions sur les routes en 2013) et un nombre croissant de VEHR et de VE.

Figure 10. Estimation du nombre de batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) provenant de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV) dans le véhicule d'origine au Canada, au Mexique et aux États-Unis, 2010–2030 (en milliers d'unités)



Source: Projections fondées sur les analyses présentées aux sections 2.4 et 2.5.

2.5 Limites de l'analyse

L'analyse des batteries de VPE qui arrivent à la fin de leur premier cycle de vie est axée sur diverses hypothèses qui vont évoluer au fil des ans, avec les projections de ventes de véhicules neufs et à mesure que les progrès technologiques arriveront sur le marché nord-américain.

Cette analyse suppose que les VPE vont représenter jusqu'à 12 % des ventes totales de véhicules dans les trois pays nord-américains d'ici 2030. Nous avons choisi ce chiffre, qui représente la moitié des 24 % prévus pour 2050 dans l'analyse effectuée par l'University of Minnesota et la North Carolina State University, et prévoit des ventes de VEHR et de VE identiques aux plus récentes projections du DoE. Par ailleurs, cette analyse suppose que le marché des VEHR et des VE va connaître une forte croissance, et que ces véhicules occuperont la même part de marché que les VEH d'ici 2030. Cette théorie suppose le développement de l'infrastructure de recharge des véhicules électriques dans chacun des trois pays nord-américains.

Les Parties devront donc mettre à jour l'analyse de façon périodique.

3 Infrastructure actuelle de collecte, de gestion et de traitement des batteries de véhicules à propulsion électrique et législation connexe

Le recyclage des batteries nécessite généralement un certain nombre d'intervenants :

- entreprises chargées de la collecte des batteries;
- entreprises qui prétraitent les batteries et les envoient à de plus grandes installations spécialisées dans le traitement;
- installations spécialisées dans le traitement des batteries;
- grandes raffineries/fonderies qui utilisent les batteries comme une des matières premières pour leurs opérations.

De nombreux intervenants évaluent le marché du recyclage des batteries de VPE et se préparent en vue du moment où le nombre de ces batteries va augmenter. Quelques entreprises participent actuellement au recyclage des batteries de VPE. L'économie et la viabilité des entreprises de recyclage sont basées sur les produits qu'elles trouvent dans les batteries de VPE. Nous en parlons également dans la présente section.

3.1 Valeur des matières se trouvant dans les batteries de VPE et viabilité économique du recyclage de ces batteries

Comme pour d'autres produits, le marché du recyclage des batteries de VPE dépend de la valeur des matières que contiennent ces batteries (voir la section 2).

Cette valeur fluctue avec le temps en raison de la conjoncture normale du marché des produits de base. Le tableau 11 donne un aperçu de l'évolution récente des prix des composants des batteries de VPE.

Tableau 11. Valeur des produits se trouvant dans les batteries de VPE

Produit récupéré	Prix moyen courant (\$ US/tonne)	Batteries de VPE contenant des produits
Nickel	19 401 \$ ^a	Ni-MH (80 % des VEH)
Cobalt	30 400 \$ ^b	Li-ion (mais les concentrations diminuent rapidement)
Carbonate de lithium	6 000 \$ ^c	Li-ion (tous les VEHR et VE, 20 % des VEH)
Rebuts de métaux ferreux	390 \$ ^d	Boîtiers en acier autour des batteries de VPE

Sources :

a. Valeur à la London Metals Exchange, 31 mai 2014.

b. Valeur à la London Metals Exchange, 17 juin 2014.

c. Fox Davies Resource Specialists, *The Lithium Market*, septembre 2013.

d. Metals Exchange. Prix moyen pour 2013. <www.metalsexchange.com> (Consulté le 27 mai 2014)

On peut obtenir le prix du nickel et du cobalt sur le marché mexicain auprès du Service géologique du Mexique (SGM)³⁹. Ces prix sont basés sur les cours au comptant de la *London Metal Exchange* (LME, Bourse des métaux de Londres) ou sur des prix autres que ceux de la LME. Le 30 mai 2014, la

³⁹ Servicio Geológico Mexicano (SGM), <<http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/precio-metales/niquel.html>> (Consulté le 30 avril 2014.)

valeur du nickel, basée sur des prix autres que ceux de la LME, était de 19 240 \$ US la tonne⁴⁰, tandis que le cobalt valait 30 100 \$ US la tonne⁴¹.

Il est important de noter que ces prix correspondent à ceux des métaux ayant fait l'objet d'un raffinage primaire ou secondaire, qui doivent être traités dans des installations spécialisées qui n'existent pas au Mexique. C'est pourquoi le prix des métaux secondaires comme la ferraille de nickel va de 80 à 100 pesos par kilo⁴² (6,40 à 9,60 \$ US par kg, ou 6 400 à 9 600 \$ la tonne), ce qui est inférieur aux valeurs du tableau 11.

Le prix des déchets ferreux au Mexique vont de 3,40 à 3,70 pesos le kilo⁴³ (0,27 à 0,30 \$ US le kg, ou 270 à 300 \$ US la tonne), ce qui est similaire aux chiffres du tableau 11.

Les fabricants de batteries de VPE subissent de plus en plus de pressions afin de réduire le coût de leurs matériaux et le coût des composants des batteries, comme le cobalt et les métaux des terres rares. Par exemple, l'utilisation de cobalt est en train de baisser avec le temps.

Selon un cadre supérieur de l'industrie du recyclage des batteries de VPE, interviewé dans le cadre de l'étude, l'objectif ultime du recyclage des batteries de VPE sera de récupérer les matières et de les réutiliser pour la fabrication de batteries neuves. Ce type de recyclage « en circuit fermé » constitue le meilleur moyen pour que les batteries conservent le plus de valeur possible. Par exemple, on peut récupérer le phosphate ferreux (FePO₄) lors du recyclage des batteries de VPE, mais sa valeur tient à son potentiel énergétique quand il est utilisé dans ce type de batteries de VPE. Un recycleur peut récupérer du fer et du phosphate séparément, mais ils n'ont que peu de valeur (voire aucune valeur) s'ils sont vendus séparément. Bon nombre des recycleurs de batteries que nous avons interviewés se disent très inquiets à propos de l'adoption de ce type de batteries de VPE, car elles n'ont pratiquement aucune valeur pour eux. Ainsi, les parties intéressées par le développement et l'amélioration des infrastructures de récupération et de recyclage des batteries de VPE devraient axer leurs travaux sur les technologies de récupération/recyclage en circuit fermé.

3.2 Infrastructure de collecte et de gestion des batteries de VPE

Les VPE sont relativement nouveaux sur le marché automobile nord-américain, et les batteries de VPE ont un long cycle de vie; c'est pourquoi, à ce jour, un nombre relativement peu élevé de batteries ont atteint la fin de leur cycle de vie. En conséquence, peu de batteries de VPE en FCV se trouvent sur le marché du recyclage, ce qui limite l'actuelle infrastructure de recyclage. Étant donné que les VPE deviennent de plus en plus courants, le marché du recyclage des batteries va probablement prendre de l'expansion. L'infrastructure existante permet principalement de regrouper les batteries Ni-MH et Li-ion de VPE en FCV chez les concessionnaires qui offrent le service d'entretien des VPE (ce qui nécessite des compétences techniques spécialisées) et des batteries.

Quand un nombre suffisant de batteries de VPE a été regroupé dans un centre de service, elles sont envoyées à un recycleur de batteries de façon périodique. Le représentant d'une entreprise de gestion de déchets nous a dit qu'un client lui avait demandé de stocker des batteries Li-ion provenant de VPE dans les locaux de l'entreprise plutôt qu'à la concession automobile. Il hésitait à le faire, car quelques années auparavant, un chargement de batteries Li-ion usagées avait pris feu dans ses locaux, et

⁴⁰ SGM, *Prix des métaux*, <www.metalprices.com/metal/cobalt/lme-cobalt-cash-official> (Consulté le 30 avril 2014.)

⁴¹ SGM, *Kitco Metals*, <www.kitco.com/charts/nickel.html> (Consulté le 30 avril 2014.)

⁴² On trouvera des prix représentatifs des métaux secondaires sur le site de Chatarrera Metales Z.1. <http://metaleszi.com.mx/sistema/pdf/precios_compra.php> (Consulté le 30 avril 2014.)

⁴³ *Ibid.* Dans les deux cas, on évalue le dollar américain à 12,50 pesos.

l'incendie avait été difficile à maîtriser; il était donc un peu craintif à l'idée de manipuler des batteries Li-ion.

Quelques entreprises clés en Amérique du Nord possèdent les technologies et les capacités de traitement des batteries Ni-MH et Li-ion provenant de VPE :

- Retriev, créée par Kinsbursky Brothers et Toxco;
- Inmetco (pour les batteries au nickel);
- Glencore/Xstrata (pour les batteries au cobalt);
- Umicore (pour les batteries au lithium et au nickel);
- RMC (pour les batteries au nickel).

Retriev détient actuellement une part prédominante du marché. Umicore (société belge) a créé des centres de regroupement aux États-Unis et elle fait une partie du prétraitement des batteries de VPE avant de les expédier à Hoboken, en Belgique, aux fins de traitement (voir la description à la section 5). Retriev indique que moins de 1 % des batteries que l'entreprise traite dans ses deux usines américaines sont des batteries de VPE⁴⁴.

Le recyclage des batteries Ni-MH et Li-ion de VPE en FCV en est à ses tout premiers stades, et de nombreux intervenants essaient actuellement de se faire une place sur le marché. On prévoit que d'autres « acteurs » entreront sur ce marché au cours des deux à cinq prochaines années mais, pour l'instant, les personnes-ressources de l'industrie disent qu'ils sont très peu nombreux (et sont tous en affaires les uns avec les autres) à avoir pris des arrangements commerciaux pour expédier des batteries ayant une composition chimique particulière à l'établissement possédant l'expertise nécessaire pour les recycler.

La chaîne d'approvisionnement des batteries de VPE en FCV est contrôlée par des démonteurs et des constructeurs de véhicules – les ateliers de réparation et les mécaniciens automobiles fournissent de petites quantités de produits. Toyota (qui domine le marché des VEH) utilise une batterie Ni-MH dans ses VEH et s'efforce de garantir la chaîne d'approvisionnement inverse pour les batteries recyclées, afin de récupérer les métaux (nickel, etc.) et de les réutiliser pour la production de batteries de VPE neuves. Il existe déjà un programme complet de recyclage au Japon (voir la section 5), et Toyota Tsusoho America collabore avec Retriev en vue d'adopter une approche similaire en Amérique du Nord.

Les fabricants de batteries de VPE collaborent avec les fabricants de VPE afin d'élaborer un système plus officiel de collecte de ces batteries — inspiré du système de reprise des interrupteurs à mercure au Canada et aux États-Unis. Ils préfèrent établir un système de volontariat non soumis à la réglementation (qui irait au-delà de l'actuelle réglementation sur la gestion des déchets dangereux).

En général, les fabricants de batteries nord-américains laissent les constructeurs d'automobiles gérer l'infrastructure de collecte des batteries de VPE⁴⁵. Des problèmes complexes surviennent durant la phase de collecte des batteries de VPE usagées : il faut déterminer quelle partie est responsable et comment on attribue les risques de mauvaise gestion ou d'accident susceptibles de se concrétiser durant cette phase. Ces questions n'ont pas encore été résolues.

Les représentants d'entreprises que nous avons interviewés disent avoir vu très peu de batteries de VPE en FCV jusqu'à maintenant, mais ils s'attendent à ce que leur nombre augmente avec le temps. Voici certains des défis actuels relatifs aux batteries Li-ion :

⁴⁴ Todd Coy. Communication personnelle avec l'auteur, 11 mars 2014.

⁴⁵ Fabricant de batteries de VPE resté anonyme. Communication personnelle avec l'auteur, 12 mars 2014.

- difficulté à déterminer la composition chimique de la batterie (voir la section 5 à propos de l'étiquetage);
- incertitude à propos de la façon dont on peut les démonter en toute sécurité;
- manque de connaissances sur la façon dont fonctionnent les composants électroniques des éléments de batterie;
- incertitude à propos de la valeur après-vente des métaux récupérés, en particulier quand la composition chimique des batteries change (des craintes sérieuses ont été soulevées à propos des plus faibles concentrations de cobalt dans les batteries Li-ion).

3.3 Recycleurs et démonteurs d'automobiles

La plupart des batteries de VPE en FCV proviendront de la chaîne d'approvisionnement du démontage et du recyclage des automobiles dans les trois pays nord-américains. Certaines sont fournies par des mécaniciens automobiles, mais la plupart sont fournies par les concessionnaires Toyota, GM ou Ford ou d'autres concessionnaires, car la technologie des VPE en est encore à ses premiers stades et il faut former des techniciens pour qu'ils puissent assurer l'entretien de ces véhicules.

Les recycleurs et démonteurs d'automobiles sont représentés par les associations suivantes :

- L'*Automotive Recyclers Association* (ARA, Association des recycleurs d'automobiles) américaine représente 5 000 entreprises (2 000 membres directs et 3 000 membres affiliés). Aux États-Unis, cette industrie comprend 8 400 entreprises de recyclage automobile, dont les activités représentent environ 23 milliards de dollars chaque année.
- Automotive Recyclers of Canada, qui représente sept associations provinciales et 490 entreprises (environ 50 % du marché total).

On estime qu'en 2012, il y avait au Mexique environ 837 000 véhicules en fin de cycle de vie (VFCV)⁴⁶.

La plupart des VFCV sont envoyés :

- à de petites installations de démontage, qui récupèrent les pièces ayant de la valeur pour les vendre à des particuliers;
- à des ateliers de réparation de véhicules.

Dans les deux cas, les pièces démontées sont réutilisées (verre, radios, pneus, batteries, etc.). L'*Instituto Nacional de Estadística, Geografía* (Inegi, Institut national de statistique et de géographie du Mexique) estime à 7 346 le nombre de petites et moyennes entreprises⁴⁷ qui participent à la récupération et à la vente de pièces d'automobiles usagées.

⁴⁶ Semarnat. *Plan de manejo de vehículos al final de su vida útil*, Mexique, 2012. <www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/residuos/vehiculos/Documents/plan-manejo-vehiculos.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

⁴⁷ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, Institut national de la statistique et de la géographie), *Directorio estadístico de Unidades Económicas. Comercio al por menor de partes y refacciones usadas para automóviles, camionetas y camiones*, non daté. <www3.inegi.org.mx/sistemas/mapa/denue/default.aspx> (Consulté le 15 avril 2014.)

Le reste des déchets est récupéré par des ferrailleurs, qui classent et broient les métaux et les vendent aux aciéries afin qu'elles les recyclent. Au Mexique, il y a huit entreprises de recyclage de métal et dix entreprises autorisées à broyer et à compacter la ferraille provenant des VPE⁴⁸.

Deux projets importants menés au Mexique portent sur la gestion des VFCV :

- Le programme de rénovation de véhicules est une initiative du *Secretaría de Economía* (SE, Secrétariat de l'économie), qui a autorisé 14 entreprises certifiées gérant 25 centres autorisés à recevoir des VFCV. La plupart de ces centres recyclent des automobiles et de gros camions.
- Le *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Semarnat, ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles) a élaboré et publié un plan de gestion des VFCV mais, jusqu'à maintenant, aucune entreprise (démonteurs, déchiqueteurs et autres entités participant aux activités liées aux VFCV) n'ont pris d'engagements envers ce plan.

Aux fins de l'étude, nous avons dressé une liste de 25 recycleurs d'automobiles du Mexique. Nous avons contacté toutes ces entreprises dans le cadre de notre étude. Aucun des quatorze représentants interviewés n'a dit avoir reçu de VPE ou de batteries en FCV. Ce n'est pas surprenant, étant donné que les VPE sont nouveaux sur le marché mexicain (voir la section 2).

3.4 Reconditionnement des batteries de VPE

Il ne semble pas y avoir actuellement d'entreprise faisant officiellement du reconditionnement ou de la réutilisation de batteries de VPE, même si les bricoleurs et les petites entreprises envisagent souvent diverses utilisations. Les obstacles au reconditionnement des batteries de VPE arrivées à la fin de leur premier cycle de vie, en vue d'une deuxième utilisation, sont les suivants :

- sensibilité à des taux de dégradation incertains lors de la deuxième utilisation;
- coût élevé du reconditionnement et de l'intégration des batteries;
- faible coût des autres solutions de stockage d'énergie;
- absence de mécanismes sur le marché et de réglementation;
- perception à propos des batteries usagées⁴⁹.

De nombreux intervenants ont étudié la possibilité d'utiliser des batteries de VPE en FCV pour stocker de l'énergie. Cette possibilité est expliquée plus en détail à la section 5.

Les démonteurs d'automobiles qui se retrouvent en possession de batteries de VPE essaient généralement de les vendre à des concessionnaires automobiles ou à des ateliers de réparation.

Le reconditionnement des batteries de VPE peut être dangereux, car la batterie peut dégager 200 volts, ce qui est suffisant pour blesser grièvement ou tuer un travailleur qui ne connaît pas les procédures appropriées. C'est pourquoi Automotive Recyclers of America (ARA) et Automotive Recyclers of Canada (ARC) ont déployé des efforts considérables pour élaborer des documents

⁴⁸ Semarnat, *Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generada por los vehículos usados al final de su vida útil*, Mexique, 2009.

<<http://web2.semarnat.gob.mx/temas/residuos/vehiculos/Documents/estudio-elv-2009.pdf>> (Consulté le 30 avril 2014.)

⁴⁹ J. Neubauer et A. Pesaran, *PHEV/EV li-ion battery second-use project* (NREL/PR-540-48018), National Renewable Energy Laboratory, 2010. <www.nrel.gov/docs/fy10osti/48018.pdf> (Consulté le 18 mars 2014.)

comme le *Hybrid Vehicle Dismantling Guide*⁵⁰, afin de protéger la sécurité des travailleurs. Underwriters Lab (UL) a publié *Safety Issues for Lithium-Ion Batteries*⁵¹.

De nombreux groupes ont entrepris des travaux à propos de la gestion des batteries de VPE en FCV; ils visent à protéger la santé et la sécurité des travailleurs : ARA, le *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, Laboratoire national sur les énergies renouvelables), l'*Electric Power Research Institute* (Institute de recherche sur l'électricité), l'*US Advanced Battery Consortium* (USABC, Consortium sur les batteries de pointe), la *Fire Protection Research Foundation*, (Fondation pour la recherche sur la protection contre les incendies), la *Society for Automotive Engineers* (Société des ingénieurs automobiles) et d'autres. Certains de ces groupes cherchent à élaborer des pratiques exemplaires et à manipuler les batteries de façon sécuritaire, tandis que d'autres cherchent une autre utilisation pour les batteries de VPE ayant atteint la fin de leur premier cycle de vie, toujours liée à l'énergie.

Les personnes que nous avons interviewées dans le cadre du projet nous ont dit que certains petits exploitants évaluent les batteries usagées et créent des batteries neuves à partir des 30 % d'éléments encore viables. Ces batteries reconditionnées sont généralement vendues sur eBay et d'autres sites Web. On peut remplacer l'électrolyte des éléments de batteries de VPE et les utiliser dans des dispositifs fixes (pour stocker de l'énergie).

Voici une liste détaillant le PDSF d'une batterie neuve remplaçant une batterie usagée pour les trois générations de modèles Prius, ainsi que pour la berline Camry hybride et le VUS Highlander hybride :

- Toyota Prius 2001–2003 (1^{re} génération) — 3 649 \$ US, moins 1 350 \$ US de « crédit de base » (pour la vieille batterie rapportée);
- Toyota Prius 2004–2008 (2^e génération) — 3 649 \$ US, moins 1 350 \$ US de « crédit de base »;
- Toyota Prius 2009–aujourd'hui (3^e génération) — 3 939 \$ US, moins 1 350 \$ US de « crédit de base »;
- Toyota Camry hybride — 3 541 \$ US, incluant le crédit de base;
- Toyota Highlander hybride — 4 848 \$ US, incluant le crédit de base.

Toyota n'a pas précisé le coût de la main-d'œuvre pour la Camry ou le Highlander, mais il faut 1,7 heure pour replacer un bloc dans une Prius de deuxième génération, et 1,6 heure dans une Prius de troisième génération⁵².

De leur côté, les batteries de véhicules hybrides usagées et reconditionnées se vendent sur eBay de 300 \$ à 1 500 \$⁵³.

⁵⁰ E. MacDonald, *Hybrid vehicle dismantling—Recycling the future*, présentation lors de l'International Automobile Recycling Congress, Green Recycled Parts, mars 2013.

⁵¹ Underwriters Lab, *Safety issues for lithium-ion batteries*, 2012. <www.ul.com/global/documents/newscience/whitepapers/firesafety/FS_Safety%20Issues%20for%20Lithium-Ion%20Batteries_10-12.pdf> (Consulté le 18 mars 2014.)

⁵² A. Ingram, « Toyota hybrid battery replacement cost guide », *Green Car Reports*, 2012. <www.greencarreports.com/news/1078138_toyota-hybrid-battery-replacement-cost-guide> (Consulté le 7 mai 2014.)

⁵³ eBay. Recherche de batteries de véhicules hybrides. <www.ebay.com/bhp/hybrid-battery> (Consulté le 7 mai 2014.)

3.5 Système nord-américain de recyclage et de traitement des batteries de véhicules à propulsion électrique

Pour pratiquer une gestion écologiquement rationnelle (GER) des batteries de VPE en FCV, il faut les traiter en vue de le recycler dans des installations qui font de la GER. Comme on l'a indiqué ailleurs dans le rapport, il s'agit soit de batteries Ni-MH, soit de batteries Li-ion. Un petit nombre d'entreprises spécialisées au Canada et aux États-Unis (nous n'en avons trouvé aucune au Mexique durant l'étude) recycle ces deux types de batteries. Les entreprises en question sont indiquées au tableau 12, et décrites plus en détail dans la prochaine section. Les principales entreprises spécialisées dans le traitement des grosses batteries Ni-MH et Li-ion en Amérique du Nord sont étroitement liées et partagent leurs ressources.

Le traitement des batteries Ni-MH et Li-ion est motivé par la valeur du nickel (dans les batteries Ni-MH) et du cobalt (dans les batteries Li-ion). La valeur de ces produits a été évoquée précédemment. Si les batteries de VPE n'ont pas suffisamment de valeur en lien avec ces produits, leur recyclage génère des coûts.

Actuellement, on ne récupère pas le lithium pur des batteries, car il est peu coûteux et on peut en extraire facilement dans des mines de surface. Lorsque le lithium deviendra plus rare et que son prix augmentera, cela vaudra peut-être la peine de le récupérer dans les batteries au lithium en FCV⁵⁴.

La concentration de cobalt dans les batteries Li-ion est en baisse (en raison de son coût très élevé), et les constructeurs d'automobiles passent à d'autres compositions chimiques pour leurs batteries, qui contiennent alors très peu de matières précieuses en fin de cycle de vie. Avec le temps, cela va changer la dynamique du marché du recyclage des batteries de VPE, et générer un coût net pour le recyclage des batteries de VPS au lithium. Les nouvelles technologies élaborées en Europe et en Asie (décrites à la section 5) mettent davantage l'accent sur le recyclage de batteries pour la fabrication de batteries neuves et la récupération des métaux des terres rares, ainsi que du nickel et du cobalt.

Parfois, on démonte les batteries manuellement ou mécaniquement avant leur traitement. Les méthodes utilisées par les différentes entreprises sont décrites plus loin. En général, on utilise des procédés hydrométallurgiques (basés sur l'eau et l'électricité) ou divers procédés pyrométallurgiques (basés sur la chaleur) :

- L'hydrométallurgie désigne le traitement aqueux des métaux. Le traitement hydrométallurgique des batteries usagées comprend une étape mécanique et une étape chimique. Durant l'étape mécanique, on broie les batteries afin de séparer les métaux, le papier, le plastique et la masse noire. Cette masse noire subit ensuite un traitement chimique qui produit une solution, laquelle subit une électrolyse ou un autre traitement permettant de séparer les métaux dissous⁵⁵.
- La pyrométallurgie utilise des températures élevées pour transformer, séparer et purifier les métaux. Il n'existe aucune méthode générique pour recycler les batteries à l'aide de la pyrométallurgie, et chaque méthode est propre à l'entreprise qui l'utilise⁵⁶.

Le tableau 12 présente une liste d'établissements qui traitent les batteries de VPE en FCV au Canada et aux États-Unis. Les batteries de VPE en FCV provenant du Mexique peuvent être regroupées et envoyées à ces établissements aux fins de traitement final, car les fabricants de VPE créent des

⁵⁴ Personnel d'Umicore. Communication personnelle avec l'auteur, 5 mai 2014.

⁵⁵ K. Fisher, E. Wallen, P.P. Laenen et M. Collins, *Battery waste management life cycle assessment*, 2006. <www.epbaeurope.net/090607_2006_Oct.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

⁵⁶ *Ibid.*

chaînes d'approvisionnement inverses à l'échelle de l'Amérique du Nord afin de récupérer ces batteries.

Nos recherches préliminaires indiquent que très peu de VPE ont été vendus au Mexique jusqu'à maintenant; le nombre de batteries en FCV sera donc peu élevé dans un proche avenir. Il est probable que les constructeurs d'automobiles (Toyota, Honda et GM, entre autres) travailleront avec les démonteurs d'automobiles pour regrouper de nombreuses batteries de VPE récupérées grâce à l'infrastructure de recyclage/de démontage en vue d'être expédiées au Canada ou aux États-Unis aux fins de traitement, probablement dans une usine Retriev (voir tableau 12 page précédente). Les discussions avec le personnel de Honda au Mexique indiquent que, jusqu'à maintenant, ils n'ont reçu qu'environ 20 % de batteries hybrides qui ne fonctionnaient pas bien. Elles ont été envoyées aux États-Unis pour y être traitées.

Tableau 12. Établissements de recyclage qui transforment les batteries de VPE en fin de cycle de vie au Canada et aux États-Unis

Nom et adresse de l'entreprise, coordonnées, site Web	Types de batteries de VPE recyclées et traitées
RMC (Raw Materials Company, Inc.) 17 Invertose Drive Port Colborne (Ont.) Canada L3K 5V5	Batteries Ni-MH de VEH Batteries Li-ion de tous les VPE envoyées à Retriev (C.-B.)
Retriev Technologies (anciennement Toxco*) 9384 Highway 22A Trail (C.-B.) Canada V1R 4W6 <www.retrievtech.com/batteries/electric-and-hybrid-vehicles>	Batteries Li-ion de tous les VPE
Glencore Xstrata Sudbury (Ont.) Canada	Toutes les batteries contenant du nickel ou du cobalt, selon la teneur en métal Inclut les batteries Ni-MH des VEH et batteries Li-ion (qui contiennent du cobalt) de tous les VPE.
Inmetco One Inmetco Drive Ellwood City, PA, USA 16117 <www.inmetco.com/services_battery.htm>	Batteries au nickel — inclut les batteries Ni-MH des VE Batteries Li-ion (de tous les VPE) généralement envoyées à d'autres fonderies (p. ex., Glencore Xstrata)
Metal Conversion Technologies (MCT) 1 East Porter St, Cartersville, GA, USA 30120 678-721-0022 <www.metalconversion.com>	Batteries Ni-MH des VEH et batteries Li-ion de tous les VPE Transformées en alliage de nickel fondu et en alliages de cobalt sur place, dans un système breveté de récupération du métal à haute température.
Retriev Technologies <www.retriev.com>	Retriev va construire un deuxième établissement de récupération des batteries Li-ion (uniquement), au sud-est de Columbus (Ohio). On utilise des batteries Li-ion dans tous les VEHR et les VE, et dans certains VEH. Retriev peut travailler avec les produits électroniques et les batteries automobiles usagées, grâce à l'électronique. La société a un établissement de recherche-développement à Folcroft (Pennsylvanie).
Retriev Technologies 125 East Commercial St. A Anaheim, CA, USA 92801	Point de regroupement de toutes les batteries sur la côte ouest destinées à un établissement de recyclage de Retriev. Accepte les batteries Ni-MH et Li-ion en vue de les expédier vers d'autres établissements. Possède tous les permis requis (sous l'appellation « Kinsbursky Bros »). Autorisé à traiter des batteries d'accumulateurs au plomb (BAP) dans ce site.
Retriev Technologies 265 Quarry Rd SE Lancaster, OH, USA 43130	Ce site traite toutes les batteries de VPE et traitera les batteries Ni-MH grand public et industrielles, les BAP et les batteries nickel-cadmium. Il possède tous les permis requis. Une fois agrandi, il accueillera des chaînes de recyclage de grosses batteries très évoluées, qu'on est en train de construire à l'aide de 9,5 millions de dollars du fonds de contrepartie alloué par le ministère de l'Énergie pour promouvoir les batteries de VPE durables.
Retriev Technologies 8090 Lancaster-Newark Rd NE; Baltimore, OH 43105 USA	Établissement qui traite de grandes quantités de déchets de type universel — et se spécialise dans le tri, l'identification, l'emballage et l'expédition de batteries alcalines, Ni-Cd, Ni-MH, et Li-ion, de BAP et d'autres types de batteries moins courants.
Umicore 17182 Airport Road Maxton, NC, USA www.batteryrecycling.umicore.com	Umicore regroupe, prétraite et démonte des batteries Ni-MH en vue de les expédier vers l'usine de Hoboken, en Belgique, où elles seront traitées à ultra-haute température (capacité de 7 500 tonnes par an, soit 150 000 batteries de véhicule).

a. Rebaptisé Retriev en septembre 2013.

Chacune de ces entreprises est décrite ci-après dans des sections distinctes, pour chaque pays nord-américain.

3.6 Recycleurs de batteries de VPE au Canada

Il y a trois spécialistes du recyclage des batteries au Canada, capables de traiter des batteries Ni-MH et Li-ion provenant de VPE. Ils sont décrits dans la présente section.

3.6.1 Retriev (Toxco) — Trail (Colombie-Britannique), Canada

L'établissement de Retriev (anciennement Toxco) à Trail (C.-B.) fait le traitement complet des batteries au lithium. Ses clients sont l'armée américaine et des compagnies de services pétroliers du monde entier. L'équipement de forage directionnel des compagnies pétrolières utilise des batteries au lithium, que Retriev traite et recycle.

L'établissement de Trail existe depuis 20 ans. Il accepte toutes les batteries, puis les trie et envoie leurs composants chimiques qu'il ne traite pas sur place à d'autres partenaires. Les batteries au nickel sont envoyées à Retriev en Ohio.

L'entreprise a commencé à traiter uniquement des batteries principales au lithium, principalement fournies par l'armée de terre et la marine américaines. La majorité de ses activités initiales découlaient d'un contrat de recyclage de grosses batteries au lithium provenant de silos d'armes nucléaires aux États-Unis, où l'on utilisait ces batteries comme quatrième système d'alimentation de secours. L'établissement de Trail continue de se concentrer sur les batteries au lithium — l'ensemble de leurs composants chimiques, ce qui inclut les batteries principales (non rechargeables) et les batteries au lithium rechargeables.

Retriev gère des contrats avec des constructeurs de VPE depuis un certain nombre d'années, en prévision d'une augmentation du nombre de batteries au lithium dans les VPE avec le temps.

Retriev a créé une base de données pour tous les éléments, modules et blocs reçus jusqu'à maintenant, car de nombreux fabricants de batteries utilisent des blocs très différents, selon le véhicule pour lequel la batterie a été conçue. Jusqu'à maintenant, Retriev a démonté, analysé et traité plus de 90 blocs de batterie différents provenant de VPE. Certaines de ces batteries étaient le fruit d'expériences uniques qui n'ont pas été mises en production. Les entreprises qui conçoivent et fabriquent des batteries veulent s'assurer que leurs prototypes soient totalement détruits.

L'hydrométallurgie est le principal procédé utilisé pour recycler les batteries Li-ion de VPE. Voici les étapes qu'a utilisées l'établissement de Trail :

- Les batteries sont triées et transportées par un tapis roulant jusqu'à un broyeur et une solution de saumure contenant du lithium, composée d'électrolytes et de sels de lithium dissous.
- Le flux de traitement est ensuite séparé de la « poudre » de lithium-ion, mélange de plastique et d'un peu d'acier. Si la teneur en acier est suffisante, on procède à la récupération de l'acier; dans le cas contraire, on en dispose. La concentration d'acier peut atteindre 65 %, selon la matière première.
- Le flux de traitement passe ensuite par une table d'agitation, ce qui génère un produit qui est un mélange de cuivre (Cu), d'aluminium (Al) et de cobalt (Co), vendu par les producteurs de métal de première fusion.
- Le mélange semi-liquide est ensuite versé dans un réservoir de malaxage et/ou de stockage.
- On le passe dans filtre-pressé afin de produire un gâteau de cobalt, qui est un mélange de cobalt et de carbone (C). Ce produit est vendu aux producteurs de métal de première fusion.
- Le reste du mélange semi-liquide est envoyé à la chaîne de traitement primaire, où l'on récupère le lithium sous forme de carbonate de lithium.

Quatre éléments sont produits :

1. La « poudre » de Li-ion — mélange de plastique et d'un peu d'acier
2. Un produit contenant du cuivre, du cobalt et de l'aluminium
3. Un gâteau de cobalt (Co et C)

4. Un mélange semi-liquide de saumure contenant du lithium — électrolytes et sels de lithium dissous

Toutes ces matières ont un marché final. Le lithium de qualité supérieure pourrait être réutilisé par l'industrie pharmaceutique, mais l'établissement de Trail (C.-B.) n'en produit pas. Selon les membres de l'industrie que nous avons interviewés, il y a actuellement beaucoup de lithium sur Terre, et il est peu coûteux; ainsi, au prix actuel, cela ne vaut pas la peine de le récupérer sous une forme pure lors du recyclage. Le carbonate de lithium de qualité technique (pur à plus de 99 %) ⁵⁷ que produit l'établissement de Trail est généralement vendu à un fabricant d'acier.

On estime que le taux d'efficacité de l'ensemble du processus de recyclage va de 65 à 80 % du poids de la batterie initiale, selon les batteries qui sont traitées.

Retriev emploie 15 personnes dans son établissement de Trail.

Retriev reçoit généralement un bloc-batterie d'un fournisseur ou d'un fabricant et en fait une analyse initiale. La société publie un rapport complet sur les étapes et le temps nécessaires pour démonter le bloc afin d'en extraire les éléments. Ces éléments sont traités par le système de l'établissement de Trail. Retriev fait également une analyse détaillée de chaque élément afin de déterminer la valeur des métaux qu'il contient, qui seront utilisés pour le processus d'évaluation. Selon la teneur en métal et la valeur actuelle des métaux sur le marché, on détermine ensuite s'il faut facturer une redevance de déversement ou accorder un crédit. En général, Retriev facture à la livre pour le traitement. Pour la plupart des batteries au lithium, une redevance de déversement est appliquée. Parce que la valeur du nickel et du cobalt a baissé avec le temps, une telle redevance est maintenant exigée pour la plupart des batteries Li-ion, alors que, dans le passé, ces batteries étaient parfois traitées en échange d'un crédit – le producteur recevait la valeur du métal moins des frais de traitement.

3.6.2 Raw Materials Company, Inc. — Port Colborne (Ontario), Canada

Raw Materials Company, Inc. (RMC) est une société privée qui exploite un établissement de recyclage de batteries à Port Colborne (Ontario) et un autre à Buffalo (New York) (qui expédie et réceptionne les batteries pour les clients américains). Les batteries peuvent être listées dans un rapport destiné à Environnement Canada et regroupées à Buffalo, puis envoyées à Port Colborne en vue de leur traitement.

Les batteries ne sont pas considérées comme des déchets dangereux ou des produits recyclables dangereux en Ontario ou aux États-Unis. L'entreprise gère les batteries Ni-MH et Li-ion provenant des consommateurs, mais aussi des VPE. Jusqu'à maintenant, elle a reçu jusqu'à 100 batteries de VPE provenant de diverses sources.

Les batteries Ni-MH sont traitées sur place. RMC les broie et en extrait mécaniquement les matières contenant du nickel, qui sont vendues aux fabricants de revêtements. RMC utilise un procédé entièrement mécanique qui comprend le meulage, le triage, le séchage et l'agitation. Deux procédés permettent de séparer la poudre contenant du métal de la batterie. On produit sur place un concentré de nickel vendu à l'échelle de l'Amérique du Nord à l'industrie des revêtements et des produits chimiques, qui l'incorpore à des revêtements résistants et l'utilise à diverses autres fins.

De plus, RMC produit et récupère les composants en métal et en plastique.

RMC traite les batteries Li-ion sur place selon un procédé similaire à celui qui est utilisé pour les batteries Ni-MH. Un matériau contenant du cobalt est produit et vendu aux fins de récupération. Le

⁵⁷ Les prix ne sont pas directement accessibles au public, mais étaient de l'ordre de 1 500 \$ à 4 500 \$ la tonne dans le passé.

le cobalt de carbonate de lithium est une matière qui peut être vendue à divers types de secteurs. Il sert de matière première à des applications industrielles ou pour la récupération du cobalt. De nombreux fabricants de revêtements au Canada et aux États-Unis ont utilisé le cobalt pour sa couleur bleue, mais aussi pour ses propriétés intrinsèques. L'industrie des revêtements utilise aussi du lithium.

RMC a une forte capacité excédentaire. L'établissement de recyclage peut fonctionner avec trois quarts de travail par jour, tous les jours de la semaine, afin de produire 10 000 tonnes par an (20 millions de livres de mélange total). La valeur marchande est payée pour les batteries Ni-MH et le cobalt. Les batteries au lithium ne contenant pas de cobalt sont traitées moyennant certains frais.

3.6.3 Glencore/Xstrata — Sudbury (Ontario)

Glencore/Xstrata exploite une grande fonderie de cuivre et de nickel à Sudbury (anciennement Falconbridge), en Ontario, qui a une capacité de 550 000 tonnes par an. La fonderie compte 300 employés. Glencore/Xstrata exploite un créneau de traitement du cobalt. Les batteries représentent une très petite partie de tout ce qui est traité sur place, mais constituent un marché à créneaux pour Glencore/Xstrata (G/X), qui veut élargir ce marché. L'entreprise se spécialise dans les batteries contenant du cobalt. Il y a quelques années, elle a investi 30 millions de dollars canadiens (32,4 millions de dollars US) dans un incinérateur à four rotatif pour le site de Sudbury, afin de permettre le traitement d'une plus grande variété de batteries.

La fonderie récupère le nickel, le cobalt et le cuivre. Les batteries sont transformées d'une des deux façons suivantes : on les place directement dans un convertisseur ou dans un four rotatif. Les options de traitement des batteries entourées de plastique sont limitées par l'inflammabilité du plastique; ces batteries sont envoyées au four rotatif, où les plastiques sont brûlés, et tous les effluents gazeux sont traités dans la chambre de postcombustion afin qu'aucune dioxine ne soit rejetée.

Les boîtiers en acier, ainsi que le cobalt produit par le recyclage, sont placés dans le convertisseur en vue d'un traitement ultérieur. Lorsque la température du métal liquide atteint 1 300 degrés Celsius (2 372 degrés Fahrenheit), les composants de la batterie se fractionnent. Le lithium est capturé dans la scorie (et perdu), et le cobalt passe à la phase de la matte. La matte de cobalt est produite par un processus hydrométallurgique à base de chlore. Le cobalt métal produit est vendu sur le marché mondial des produits de base.

G/X applique des politiques de sécurité strictes pour l'évaluation des nouvelles matières. Les employés chargés du marketing déterminent où il faut vendre le nickel et le cobalt, et quelles stratégies l'entreprise peut utiliser pour renvoyer la matière au recyclage. Ils ont exercé des pressions sur les concepteurs et les fabricants de grosses batteries afin que ceux-ci tiennent compte de la fin de cycle de vie quand ils conçoivent les batteries et de nouvelles compositions chimiques pour leurs batteries.

G/X traite principalement de petites batteries portatives, mais a fait des recherches sur la façon de gérer de grosses batteries de VPE. L'entreprise considère que les batteries de VPE présentent beaucoup plus de risques en raison de la gamme de produits chimiques qu'elles contiennent. Par exemple, la composition chimique de la batterie au phosphate de fer lithié (fabriquée par A123) est très différente de celle des autres batteries lithium-ion, et cette batterie ne contient pas beaucoup de métaux intéressants pour G/X. L'entreprise ne traiterait pas ces batteries si elle ne touchait pas de redevance de déversement.

Les batteries de VPE ne représentent pas une forte proportion de ce que G/X traite. L'entreprise fait affaire avec des responsables de la collecte et leur demande de prétraiter les batteries afin de les désactiver, et de les démonter en petits composants (blocs-batteries de 6 ou 12 éléments, ou éléments individuels de batterie) en raison de la taille limitée de l'ouverture du four rotatif. On insère les

éléments ou les blocs (quand la taille est adaptée) dans le four/le calcinateur pour récupérer les métaux selon un procédé pyrométallurgique.

G/X continues de s'intéresser à la fois au nickel et au cobalt. Par exemple, la batterie du modèle standard de Tesla 18620 (qui est un bloc-batterie cylindrique à haute teneur en cobalt, fabriqué par Panasonic) est le genre de batterie que G/X souhaiterait traiter.

La matte qui est produite à Sudbury est envoyée en Norvège pour y subir d'autres traitements.

G/X impose des « frais de traitement ». L'entreprise offre un important crédit aux clients qui lui envoient des batteries. Quand une batterie arrive, les employés ont une idée approximative de la quantité de cobalt qu'elle devrait contenir, mais G/X paie en fonction d'un essai effectué dans son laboratoire sur place. Certaines batteries au lithium contenaient auparavant entre 18 et 22 % de cobalt, une fois le plastique enlevé mais, comme on l'a vu précédemment, ce pourcentage diminue rapidement. Si les batteries traitées sont dans leur emballage d'origine, il y a du papier et des matériaux d'emballage en excédent. G/X les pèse, mais elles contiennent moins de cobalt quand on soustrait le poids de ce papier et de ces matériaux.

3.7 Infrastructure de recyclage et de traitement des batteries de véhicules à propulsion électrique au Mexique

Il y a au Mexique un établissement de recyclage qui traite les batteries de VPE en fin de cycle de vie (FCV), et une deuxième entreprise spécialisée dans les déchets électroniques qui a la capacité de faire la collecte et l'exportation de batteries Li-ion.

3.7.1 Sitrasa — Irapuato (Guanajuato), Mexique

Sitrasa détient un permis officiel pour le traitement des déchets industriels dangereux⁵⁸. C'est la seule entreprise qui recycle et traite des batteries domestiques issues de programmes de recyclage par les consommateurs. Elle facture des redevances de déversement pour la réception de ces batteries. Sur son site Web, Sitrasa indique que la société reçoit et traite aussi différents types de batteries de VPE, et recycle les métaux à diverses fins. L'information fournie ne précise pas si l'entreprise exploite des raffineries et des fonderies au Mexique.

3.7.2 TES-AMM Latin America — Cuautitlán Izcalli, Mexique

TES-AMM recueille, trie et exporte des déchets électroniques à son usine de Singapour. Le tri porte sur les batteries Li-ion, qui sont exportées et recyclées à l'aide d'un procédé mécanique hydrométallurgique breveté. TES-AMM exploite une coentreprise avec Recupyl, utilisant un procédé innovateur pour recycler les batteries et récupérer les métaux précieux.

Il y a une autre option possible pour le recyclage des batteries de VPE au Mexique : Johnson Controls International (JCI) exploite deux établissements au Mexique qui recyclent les batteries d'accumulateurs au plomb usagées importées des États-Unis. JCI a annoncé des investissements aux États-Unis, afin de créer des produits, services et solutions de qualité en vue d'optimiser les BAP haut de gamme pour VPE (avec diverses compositions chimiques).

Les estimations que nous avons effectuées durant l'étude indiquent que sans doute très peu de batteries de VPE seront produites au Mexique avant 2022. Même par la suite, leur nombre demeurera

⁵⁸ Semarnat, *Empresas autorizadas para el manejo de residuos peligrosos*, 2014.

<www.semarnat.gob.mx/transparencia/transparencia-focalizada/residuos/empresas-autorizadas-para-el-manejo-de-residuos> (Consulté le 30 septembre 2014.)

peu élevé pendant plusieurs années, si l'on en croit les actuelles projections de ventes et à cause du long cycle de vie des batteries de VPE. Le développement de l'infrastructure et de la capacité de recyclage des batteries de VPE au Mexique pourrait évoluer de plusieurs façons :

- Création d'entreprises (dont les ferrailleurs) qui feront la collecte des batteries en FCV et les conserveront temporairement en vue de leur future revente ou exportation.
- Création d'entreprises qui font la collecte de batteries en vue de la prétraiter et de les envoyer à des établissements de traitement spécialisés et plus grands, soit au Canada, soit aux États-Unis, soit dans d'autres pays.
- Création au Mexique d'installations spécialisées dans le traitement des batteries, en vue de recycler celles qui sont produites dans le pays, et d'importer des batteries d'autres pays afin de les traiter au Mexique.

Si la gestion des batteries de VPE génère des déchets dangereux, il existe des établissements capables de gérer les déchets industriels dangereux dans les États de Nuevo León et de Coahuila.

Par ailleurs, il est probable que les constructeurs d'automobiles comme Toyota, Honda, GM et d'autres travailleront avec les démonteurs afin de regrouper les batteries de VPE en FCV recueillies grâce à l'infrastructure d'entretien, de recyclage et de démontage des automobiles, et de les expédier au Canada ou aux États-Unis aux fins de traitement.

3.8 Entreprises de recyclage de batteries de véhicules à propulsion électrique aux États-Unis

Nos recherches nous ont permis de trouver quatre entreprises aux États-Unis qui recyclent des batteries Ni-MH et Li-ion provenant de VPE. Elles sont décrites dans la présente section.

3.8.1 Inmetco (International Metal Company) — Elwood City (Pennsylvanie), États-Unis

Inmetco se trouve à Ellwood City (Pennsylvanie), à 55 km au nord-ouest de Pittsburgh. L'entreprise est une filiale de Vale Inco (qui s'appelait initialement Inco, et a été achetée en 2007 par Vale, société minière brésilienne), en activité depuis 1978. Elle gère un établissement de recyclage qui détient tous les permis requis, et est visé par la partie B de la *Resource Conservation and Recovery Act (RCRA, Loi de la conservation et du recouvrement des ressources)* des États-Unis pour le stockage des déchets dangereux. Il y a environ 110 employés sur place.

Même si Inmetco ne traite pas tous les types de batteries, elle les accepte tous dans son établissement pour rendre service à ses clients. Les batteries qui ne sont pas traitées sur place sont envoyées à un autre établissement de recyclage fiable possédant les permis appropriés. Dans le cadre de la gestion écologiquement rationnelle, on effectue une vérification environnementale de tous les sites tiers avant quelque expédition que ce soit.

Inmetco a toujours été la seule source de traitement de toutes les batteries dont la collecte est effectuée par la Rechargeable Battery Recycling Corporation, qui s'appelle aujourd'hui Call 2 Recycle (C2R). Grâce à C2R, Inmetco reçoit des batteries postconsommation de partout aux États-Unis, aussi bien de municipalités que de détaillants.

Inmetco traite divers flux de déchets riches en métaux :

- poussière de filtration KO61 (riche en nickel);
- écaille de laminoir;

- copeaux (produits par le broyage du métal);
- batteries.

Les lingots, qui sont vendus à l'industrie de l'acier inoxydable, sont le principal produit du processus de recyclage. Le nickel, le chrome et le fer provenant de batteries usagées sont recyclés par Inmetco, puis traités et récupérés sous la forme d'un alliage refondu d'acier inoxydable. Le produit est mélangé avec du fer blanc à étamage mince et transféré dans un four à deux temps (four à sole tournante). Il en sort une barre de métal de 25 livres (11 kilos) (qu'on appelle une gueuse), qui contient 13 % de nickel et 13 % de chrome, le reste étant du fer. Le nickel et le chrome sont coûteux et essentiels à la fabrication d'acier inoxydable. Toute batterie contenant du nickel est donc précieuse pour Inmetco.

Étant donné qu'Inmetco se spécialise dans la récupération de métaux (en particulier le nickel, le chrome, le fer et le cadmium), les autres matières ne sont pas traitées dans son établissement. Les plastiques et les autres éléments de l'emballage des batteries sont séparés et envoyés hors site à un établissement disposant des permis appropriés pour l'incinération, ou sont brûlés dans les fours faisant partie de la chaîne de traitement. Un broyeur et un dispositif d'oxydation thermique extraient le plastique et les contaminants avant la récupération du métal.

Tous les procédés qu'utilise Inmetco comprennent les systèmes antipollution appropriés, qui sont vérifiés et contrôlés régulièrement par des sous-traitants indépendants, et signalés au ministère de la Protection de l'environnement de la Pennsylvanie.

Inmetco trie les batteries lithium-ion et les envoie à Glencore/Xstrata, à Sudbury, qui récupère le cobalt et le recycle. Le vanadium présent dans les batteries au lithium est sans valeur pour le procédé d'Inmetco, et le cobalt, sans valeur pour son produit. Les batteries contenant de petites quantités de lithium, d'oxyde d'argent ou de carbonate de zinc, et tout autre type de batterie, peuvent être envoyés à Inmetco aux fins de recyclage. Ces batteries sont soit utilisées dans le cadre du processus de recyclage de l'acier inoxydable, soit, si elles sont nombreuses, envoyées hors site.

Inmetco accepte les batteries de VPE en vue de les recycler. Idéalement, la société aimerait que ces batteries soient réduites à l'état d'éléments ou de petits blocs (de six éléments). Elle a traité certaines batteries de VPE qui lui ont été livrées alors qu'elles étaient encore montées sur leur cadre ou dans leur boîtier en acier. Cela lui a causé des problèmes, car elle s'est retrouvée avec du cuivre indésirable — elle impose donc des frais en raison de l'intervention manuelle nécessaire au retrait des fils en cuivre des batteries de VPE avant leur fusion. Inmetco crée un alliage refondu pour l'industrie de l'acier, et le cuivre est un contaminant lors du procédé de fabrication de l'acier.

Inmetco gère de nombreuses batteries Li-ion; différents types sont regroupés et envoyés à la fonderie.

Les responsables de l'entreprise s'inquiètent à propos des batteries au phosphate de fer lithié qui entrent sur le marché. Ils ne souhaitent pas les traiter, car le métal qu'elles contiennent n'a aucune valeur.

Les prix facturés par Inmetco reflètent la valeur comparative ou le coût de manutention de l'entreprise pour différentes batteries. La société paie pour certaines batteries, selon leur teneur en nickel et leur valeur actuelle. Elle facture des frais pour d'autres batteries. La structure de coûts du recyclage et du traitement des batteries dépend des batteries et de la valeur du métal récupéré. Inmetco facture ou paie un montant pour les batteries selon leur composition chimique. Elle offre généralement un crédit pour les batteries contenant du nickel dont la valeur est suffisamment élevée.

3.8.2 Retriev (anciennement Kinsbursky Brothers /Toxco) — Ohio, États-Unis

Retriev exploite deux grands établissements de recyclage de batteries en Ohio :

- Un établissement de traitement des déchets de type universel à Baltimore (Ohio), qui regroupe les batteries de toutes compositions chimiques provenant de la côte est. Quand 40 000 livres (18 143 kilos) de batteries ont été accumulés, ils sont envoyés à l'établissement de Retrie (anciennement Toxco) à Trail (C.-B.), au Canada. Cet établissement fait aussi de la manutention; les employés examinent chaque baril de batteries afin de s'assurer qu'aucune batterie au lithium n'est envoyée dans le four.
- Retrie exploite un établissement autorisé de traitement, de stockage et d'élimination (TSE) visé par la partie B de la RCRA à Lancaster (Ohio), à 30 minutes de Columbus. Cet établissement de traitement des déchets de type universel traite actuellement des batteries Ni-MH afin de récupérer du nickel, ainsi que du lanthane et de l'yttrium (qu'on appelle des misch-métaux — métaux des terres rares). De plus, l'établissement regroupe les activités de recyclage pour les côtes est et sud des États-Unis et offre un soutien logistique. L'établissement de Lancaster construit actuellement une nouvelle chaîne de recyclage de batteries Li-ion, grâce à une subvention de 9,5 millions de dollars US du ministère de l'Énergie des États-Unis.

En Ohio, les aciéries s'occupent des matières ferreuses. Le ferronickel résiduel est d'une qualité très élevée. Le produit de l'établissement est vendu aux entreprises spécialisées dans les terres rares, l'acier inoxydable ou les alliages spéciaux, p. ex. dans le secteur de l'aérospatiale, où la résistance à la corrosion est essentielle. L'acier inoxydable contient 13 à 16 % de nickel (et 13 à 16 % de chrome).

L'entreprise s'est fixé comme objectif d'être le meilleur recycleur de batteries en Amérique du Nord, en faisant du recyclage des batteries son activité principale; elle y voit une possibilité de croissance.

3.8.3 Umicore — Maxton (Caroline du Nord), États-Unis

Umicore est une entreprise de recyclage de métaux complexes qui exploite 80 établissements de fabrication et de recyclage et emploie 14 000 personnes à l'échelle mondiale. Elle a été fondée dans les années 1880. Umicore gère un établissement qui regroupe les batteries de VPE à Maxton (Caroline du Nord) et accepte à la fois les batteries Ni-MH et les batteries Li-ion. Le démontage des batteries de VPE se fait manuellement; on extrait les métaux qui peuvent être facilement recyclés localement (boîtiers en acier et fils en cuivre). Après le prétraitement et le démontage, les blocs et/ou les éléments de batterie (selon la taille) sont regroupés en vue d'être expédiés à l'établissement d'Umicore à Hoboken, en Belgique, où ils sont traités dans le four de fusion d'Umicore (dont la conception brevetée est adaptée aux hautes températures). Voici ce que produit ce four :

- les scories, qui contiennent de l'aluminium, du manganèse, du lithium et des métaux des terres rares;
- des alliages qui contiennent du cobalt, du nickel, du cuivre et du métal ferreux.

Les scories sont utilisées dans des projets de construction, et les métaux des terres rares sont soumis à un raffinage ultérieur. Les alliages sont soumis à un raffinage à Olen, en Belgique, d'où ils sont vendus à des fabricants de batteries, qui les incorporent aux batteries neuves.

Le four de fusion utilise un procédé spécial de traitement au gaz (tenu secret par Umicore) pour garantir l'élimination de toute la poussière et l'absence de formation de composés organiques volatils (COV).

Actuellement, on ne récupère pas le lithium dans la scorie, et ce ne serait pas justifié de la faire d'un point de vue économique. Si le prix du lithium augmente à l'avenir, Umicore évaluera la possibilité d'utiliser d'autres procédés pour le récupérer sous une forme pure. En fin de compte, lorsque le nombre de batteries de VPE en FCV sera assez élevé, Umicore implantera trois usines dans le monde

(une en Europe, une en Amérique du Nord et une en Asie) pour regrouper les batteries de VPE en vue de leur expédition vers la Belgique.

Figure 11. Démontage de batteries de VPE à l'établissement d'Umicore en Caroline du Nord, aux États-Unis



Source : M. Pederson, *Umicore battery recycling dismantling (H)EV battery packs in Maxton, North Carolina, US*, présentation, 2013.

3.8.4 MCT — Région d'Atlanta (Géorgie), États-Unis

MCT Georgia traite à la fois des batteries Ni-MH et Li-ion issues de programmes de recyclage par les consommateurs, mais aussi des batteries industrielles. Jusqu'à maintenant, MCT a reçu peu de batteries de VPE en FCV. Les batteries sont arrivées intactes ou démontées. Lorsqu'elles étaient intactes, un procédé permettait de les démonter. L'entreprise facture une redevance de déversement pour les grosses batteries mais, selon leur composition chimique, elle peut accorder un crédit au client.

Voici les produits générés :

- alliage de nickel fondu provenant de batteries Ni-MH et
- alliages de cobalt provenant de batteries au lithium.

3.9 Législation actuelle visant les batteries de VPE

Les batteries usagées contenant du lithium qui sont expédiées aux fins de recyclage ou d'élimination sont considérées comme un déchet visé par la *Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination*, et devraient être gérées quand elles sont

expédiées au-delà des frontières conformément aux exigences de la Convention⁵⁹. En vertu de la Convention, les déchets dangereux contenant des éléments visés à l'annexe I et susceptibles de le rendre dangereux (c'est-à-dire de présenter les caractéristiques énoncées à l'annexe III) et les autres déchets listés à l'annexe II doivent respecter les procédures énoncées dans la Convention. Plus précisément, les batteries de VPE sont généralement exportées sous le code A1170 (« Accumulateurs électriques et piles usagés non triés [...] ») de la Convention et de l'OCDE. Ces procédures incluent la notification par l'exportateur de « l'autorité compétente » du pays importateur et, au moment de la réception d'une lettre de consentement de cette même autorité, l'expédition des batteries usagées conformément à la réglementation applicable. Par ailleurs, l'exportateur doit conserver tous les documents d'approbation. Le Canada et le Mexique sont tous deux Parties à la Convention de Bâle. Les États-Unis sont signataires, mais pas Partie à la Convention; ils considèrent cependant comme une pratique exemplaire en matière de GER le fait de tenir compte des exigences de la Convention lors de l'élaboration de politiques.

Les lois visant les batteries de VPE dans chaque pays sont décrites ci-dessous.

3.9.1 Canada

Diverses lois fédérales, provinciales et territoriales et divers règlements municipaux s'appliquent à la gestion des batteries de VPE en FCV au Canada. Cela comprend les lois et autres exigences légales (p ex., autorisations et permis) visant les déchets dangereux et les déchets standards, la protection de l'environnement et les activités de recyclage et d'élimination. Exemples de règlements fédéraux qui peuvent s'appliquer aux mouvements de batteries de VPE usagées : *Règlement sur l'exportation et l'importation de déchets dangereux et de matières recyclables dangereuses*, *Règlement sur les mouvements interprovinciaux des déchets dangereux* et *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses*.

3.9.2 Mexique

La Loi générale sur la prévention et la gestion intégrale des déchets (LGPGIR), qui est entrée en vigueur le 8 janvier 2004, vise tous les types de déchets dangereux et solides, incluant les batteries.

Le ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles a modifié cette loi le 19 mars 2014⁶⁰. À l'article 19, la LGPGIR fournit une liste de déchets nécessitant une gestion spéciale, qui inclut les [TRADUCTION] « batteries contenant du lithium, du nickel, du mercure, du cadmium, du manganèse, du plomb, du zinc ou tout autre élément permettant la production d'énergie, à un niveau qui n'en fait pas un déchet dangereux dans la norme mexicaine officielle correspondante. » Autres types de déchets inclus dans cette liste : déchets technologiques produits par l'industrie informatique; fabrication de produits électroniques ou de véhicules à moteur; autres produits qui, au terme de leur cycle de vie, nécessitent une méthode de gestion bien précise en raison de leurs caractéristiques.

Les déchets nécessitant une gestion spéciale sont définis comme les déchets générés par les procédés de production qui ne satisfont pas aux critères en faisant des déchets dangereux ou des déchets municipaux solides, ou sont produits par les importants générateurs de déchets municipaux solides.

⁵⁹ Secrétariat de la Convention de Bâle, *Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination*, 2014.
<www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-e.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

⁶⁰ Secretariado de Gobernación, « Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos », *Diario Oficial de la Federación*.
<www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5337505&fecha=19/03/2014>.

À l'article 27, la LGPGIR présente le concept de plans de gestion pour certains types de déchets et de générateurs. Ces plans visent à promouvoir : la minimisation des déchets; la récupération des déchets; une responsabilité partagée pour la gestion des déchets; les innovations technologiques permettant d'élaborer des méthodes de gestion des déchets économiquement viables. Ils visent aussi à répondre aux besoins précis des générateurs de déchets présentant des caractéristiques particulières.

La Loi générale comprend aussi un nouveau paragraphe à l'article 28, qui énumère les entités responsables de la formulation et de la mise en œuvre des plans de gestion des déchets nécessitant une gestion spéciale. Les importants générateurs, producteurs, importateurs, exportateurs et distributeurs de batteries électriques considérées comme des déchets nécessitant une gestion spéciale dans la norme officielle mexicaine correspondante devront élaborer des plans de reprise des batteries.

Le cadre de réglementation mexicain comprend des éléments adéquats visant la gestion des batteries Ni-MH et Li-ion de VPE en fin de cycle de vie (FCV), ainsi que des VPE eux-mêmes quand ils arrivent en fin de vie utile.

Les textes qui régissent les mouvements transfrontaliers de déchets au Mexique sont basés sur les lois nationales et les conventions internationales signées par le Mexique en ce qui concerne les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux. Il s'agit des textes suivants :

- *Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières des déchets dangereux et de leur élimination* (Convention de Bâle);
- Décision C(2002)107 (FINAL) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE);
- Annexe III de la Convention (Traité de La Paz) conclue entre le Mexique et les États-Unis, à propos de la coopération pour la protection et l'amélioration de l'environnement dans les régions frontalières — cette annexe constitue l'Accord de coopération entre le Mexique et les États-Unis à propos des mouvements transfrontaliers de déchets dangereux et de substances dangereuses;
- Loi générale pour la prévention et la gestion intégrale des déchets au Mexique, et autres outils de réglementation nationaux liés aux déchets⁶¹.

Le mouvement transfrontalier des batteries de VPE usagées (vers le Mexique ou à partir du Mexique) en vue du traitement ou du recyclage est viable, à condition que les pays importateurs et exportateurs respectent les lois et conventions régissant le mouvement transfrontalier des déchets, énoncées précédemment.

Ainsi, même si le Mexique n'a pas adopté de règlement précis relatif au recyclage et/ou à la gestion des batteries de véhicules hybrides ou électriques en FCV, ces batteries peuvent être gérées de façon appropriée en FCV en vertu des lois et règlements susmentionnés.

3.9.3 États-Unis

Aux États-Unis, la gestion des batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) et des petites batteries au plomb acide scellées (PBPAS) est visée par la *Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act* (Loi sur la gestion des batteries contenant du mercure rechargeables), qui établit des exigences

⁶¹ Semarnat, *Guía para la importación y exportación de residuos en México*, non daté.
<http://tramites.semarnat.gob.mx/Doctos/DGGIMAR/Guia/07-029AF/guia_Import_Export_RP.pdf>
(Consulté le 21 avril 2015)

d'étiquetage uniformes et facilite le recyclage de ces batteries⁶². En vertu de cette loi, les batteries Ni-Cd et les PBPAS doivent être gérées en vertu des *Universal Waste Rules*. Par contre, cette loi ne vise ni les batteries Li-ion ni les batteries Ni-MH.

Les batteries Li-ion ne seront pas considérées comme des déchets dangereux, à moins qu'elles ne demeurent réactives ou ne contiennent d'autres composants, comme des métaux lourds, qui les rendraient toxiques. Quand elles sont dangereuses, ces batteries peuvent être gérées en vertu de la réglementation visant les déchets de type universel, qui prévoit un système de gestion simplifié afin d'encourager la collecte appropriée des batteries pour garantir qu'elles ne seront pas intégrées aux déchets municipaux solides, et seront recyclées ou éliminées comme il se doit.

En général, en vertu des lois fédérales et étatiques américaines, les batteries Ni-MH qui ne fuient pas sont considérées comme des batteries de piles sèches, et donc comme des déchets non dangereux. Ces batteries sont assujetties au règlement 49 CFR 172.101 du ministère des Transport des États-Unis (DoT). Les batteries Ni-MH qui fuient sont réglementées comme des déchets dangereux en vertu des règlements fédéraux et étatiques, et comme une matière dangereuse par le DoT. Les batteries Ni-MH endommagées d'une autre façon peuvent également être assujetties aux lois sur les déchets dangereux. Les entreprises de recyclage peuvent les accepter, mais l'expéditeur doit prendre des mesures supplémentaires pour leur transport et leur élimination. En Californie, les batteries Ni-MH doivent être gérées en vertu des *California Universal Waste Rules* (règlement californien visant les déchets de type universel).

3.10 Coût du recyclage des batteries de VPE

Aucun des représentants d'entreprises de recyclage que nous avons interviewés ne nous a donné d'information sur le coût du recyclage. Selon eux, un crédit est offert pour le recyclage de certaines batteries pour lesquelles la valeur des métaux extraits est assez élevée pour couvrir les coûts de traitement. Dans d'autres cas, une redevance de déversement est facturée pour le recyclage de la batterie. Étant donné que la composition chimique des batteries Li-ion est en train de changer pour des matières de plus faible valeur (avec moins de cobalt), il est probable qu'à l'avenir, le recyclage des batteries de VPE va générer un coût net.

⁶² US EPA, *Implementation of the Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act*, 1997. <www.epa.gov/osw/hazard/recycling/battery.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

4 Gestion écologiquement rationnelle et pratiques exemplaires de gestion des batteries de véhicules à propulsion électrique en fin de cycle de vie

La présente section porte sur les divers aspects de la gestion écologiquement rationnelle (GER) des batteries de véhicules à propulsion électrique (VPE) en fin de cycle de vie (FCV).

4.1 Cheminement dans l'environnement des composants des batteries de VEH, de VEHR et de VE

Quand elles sont scellées, les batteries Li-ion et Ni-MH présentent un risque limité pour l'environnement et la santé humaine. Si le sceau se brise et que les divers composants de ces batteries sont rejetés dans l'environnement, cela peut avoir certains impacts.

La présente section explique les impacts potentiels des composants distincts des batteries de VPE en tant qu'éléments indépendants. Dans la plupart des cas, on les trouve dans les batteries de VPE sous forme de composés, et leurs impacts/leur cheminement potentiels sont différents.

4.1.1 Batteries Ni-MH

Les batteries à hydrure métallique de nickel (Ni-MH) sont composées de plusieurs matières, dont l'acier, le zinc, le manganèse, le nickel, le cobalt, d'autres métaux, l'alcali, l'eau et d'autres éléments non métalliques. Certaines de ces matières peuvent être néfastes pour la santé humaine si la personne est exposée à de fortes concentrations. Cela ne devrait pas se produire avec les batteries Ni-MH des PE, mais à titre d'information, les effets potentiels d'une exposition à de fortes concentrations des deux principales matières se trouvant dans les batteries Ni-MH (nickel et manganèse) sont présentés au tableau 13 qui suit.

Environ 80 % des VEH utilisent actuellement des batteries Ni-MH (Toyota Prius, Toyota Highlander, Ford Escape, Honda Insight, etc.). Le nickel représente entre 24 et 35 % du contenu des batteries Ni-MH, selon leur conception. On en trouve aussi dans certaines batteries Li-ion.

Le nickel et les composés de nickel métal, et le manganèse et les composés de manganèse sont utilisés dans les batteries Li-ion, par exemple : oxyde de lithium-manganèse; nickel-cobalt-manganèse (NCM); nickel-cobalt-aluminium (NCA); oxyde de manganèse à structure spinelle (MnO)⁶³.

⁶³ B. Berman, « The hybrid car battery: A definitive guide », *Hybrid Cars*, 2008. <www.hybridcars.com/hybrid-car-battery/> (Consulté le 21 avril 2015)

Tableau 13. Effets potentiels sur l'environnement des composants de batteries à hydrure métallique de nickel

Nickel et composés de nickel ^a		
Effets potentiels sur l'environnement	Effets potentiels sur la santé humaine	Effets potentiels sur la santé au travail
<p>Une grande quantité du nickel rejeté dans l'environnement se retrouve dans le sol ou les sédiments, où il se fixe solidement à des particules contenant du fer ou du manganèse. Dans des conditions acides, le nickel est plus mobile dans le sol, et pourrait s'infiltrer dans les eaux souterraines. Le nickel ne semble pas se concentrer dans le poisson. Des études ont montré que certaines plantes peuvent absorber et accumuler le nickel. Par contre, il a été prouvé que le nickel ne s'accumule pas dans les petits animaux vivant sur une terre qui a été traitée avec de la boue contenant du nickel.</p>	<p>Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a déterminé que le nickel métallique peut être cancérigène pour les humains (Groupe 2B).</p> <p>Le grand public peut être exposé au nickel par inhalation, et par des voies d'exposition orales et dermiques. Selon des études sur l'exposition professionnelle, les signalements de dermatite de contact allergique et les études sur l'exposition animale, les principales cibles de la toxicité semblent être : les voies respiratoires, après une exposition par inhalation; le système immunitaire, après une exposition par inhalation, orale ou dermique; potentiellement l'appareil génital et l'organisme en développement, après une exposition orale.</p>	<p>Les effets les plus graves pour la santé de l'exposition au nickel (comme la bronchite chronique, la fonction pulmonaire réduite et le cancer du poumon et du sinus nasal) ont été observés chez des gens qui avaient respiré de la poussière contenant certains composés de nickel en travaillant dans des raffineries de nickel ou des usines de transformation du nickel. La concentration de nickel dans ces lieux de travail était nettement supérieure à la normale (niveau naturel) dans l'environnement. On a observé des cancers du poumon et du sinus nasal chez les travailleurs qui avaient été exposés à plus de 10 mg de nickel par m³ sous la forme de composés de nickel qui se dissolvent difficilement (comme le sous-sulfate de nickel).</p>
Manganèse et composés de manganèse ^b		
Effets potentiels sur l'environnement	Effets potentiels sur la santé humaine	Effets potentiels sur la santé au travail
<p>Comme les autres éléments, le manganèse ne se fractionne pas dans l'environnement. Il peut seulement changer de forme, se fixer à des particules ou se séparer de particules. L'état chimique du manganèse et le type de sol détermine la vitesse à laquelle il se déplace dans le sol et sur la quantité qui est retenue par le sol. Dans l'eau, la majeure partie du manganèse a tendance à se fixer aux particules ou à s'intégrer aux sédiments.</p> <p>Même si certaines sources d'eau aux États-Unis sont contaminées par une quantité excessive de manganèse, il existe un risque limité d'exposition au manganèse par ingestion de poisson ou de crustacés provenant des eaux contaminées, à moins que la concentration de manganèse dans le poisson soit extrêmement élevée et/ou que le poisson soit consommé comme nourriture de subsistance.</p> <p>Dans l'eau, on peut observer une bioconcentration de manganèse à des niveaux trophiques inférieurs.</p> <p>Un facteur de bioconcentration établit un rapport entre la concentration d'une substance chimique dans une plante et dans des tissus animaux et la concentration de cette substance dans l'eau où ils vivent.</p>	<p>Même si les êtres humains ont besoin de faibles niveaux de manganèse pour être en santé, une exposition à une concentration élevée de manganèse est toxique. Les effets néfastes résultant de l'exposition des êtres humains au manganèse sont principalement imputables à l'inhalation en milieu de travail. Le manganèse inhalé se rend souvent directement au cerveau avant d'être métabolisé par le foie.</p> <p>Les symptômes d'une intoxication au manganèse peuvent apparaître lentement, au fil des mois et des années.</p> <p>Des études menées auprès des enfants ont révélé que l'exposition à une concentration extrêmement élevée de manganèse peut avoir des effets indésirables sur le développement du cerveau, ce qui inclut des changements de comportement et une capacité réduite à apprendre et à mémoriser. Dans certains cas, ces mêmes niveaux d'exposition ont pu causer de graves symptômes de manganisme (incluant la difficulté à parler et à marcher). On n'est pas certain que ces changements soient causés uniquement par le manganèse. On ne sait pas si ces changements sont temporaires ou permanents.</p>	<p>Les problèmes de santé les plus courants que connaissent les travailleurs exposés à de fortes concentrations de manganèse touchent le système nerveux. Cela comprend des changements de comportement et d'autres effets sur le système nerveux, comme des mouvements qui peuvent devenir lents et maladroits. Cette combinaison de symptômes, s'ils sont suffisamment graves, est qualifiée de « manganisme ». D'autres effets moins graves sur le système nerveux, comme le ralentissement des mouvements de la main, ont été observés chez certains travailleurs exposés à de plus faibles concentrations en milieu de travail. L'inhalation d'une grande quantité de poussière ou d'émanations contenant du manganèse peut causer une irritation des poumons, ce qui peut entraîner une pneumonie. On a aussi observé une perte d'appétit sexuel et des dommages causés aux spermatozoïdes chez les hommes exposés à de fortes concentrations de manganèse dans l'air en milieu de travail. Les concentrations de manganèse ayant des effets comme le ralentissement du mouvement des mains chez certains travailleurs sont environ 20 000 fois plus élevées que les concentrations normalement relevées dans l'environnement.</p>

Note : mg = milligramme(s); m³ = mètre(s) cube(s).

Sources:

- a. Source des données pour le nickel : ATSDR, *Toxicological profile for nickel*, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2005. <www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp15.pdf>.
- b. Source de données pour le manganèse : ATSDR, *Toxicological profile for manganese*, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012. <www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf>.

4.1.2 Batteries Li-ion

Les batteries lithium-ion (Li-ion) ont une structure à trois couches composée d'une anode, d'une cathode et d'un séparateur poreux (placé entre l'anode et la cathode). L'anode est généralement composée de graphite et d'autres additifs conducteurs, tandis que la cathode est habituellement

composée d'oxydes métalliques de transition en couches (p. ex., cobaltite de lithium [LiCoO₂] et phosphates de fer lithié [LiFePO₄])⁶⁴.

Une étude menée pour l'EPA⁶⁵ en 2012 par Abt Associates a permis d'évaluer la composition chimique de trois batteries Li-ion d'un véhicule électrique (VE) et deux compositions chimiques pour un véhicule électrique hybride rechargeable (VEHR) ayant une autonomie de 64 km en mode entièrement électrique. La composition chimique des batteries évaluées était la suivante :

- oxyde de lithium-manganèse (LiMnO₂);
- oxyde de lithium-nickel-cobalt-manganèse (LiNi_{0,4}Co_{0,2}Mn_{0,4}O₂);
- phosphate de fer lithié (LiFePO₄).

De plus, on a évalué une technologie basée sur une anode composée de nanotubes de carbone à paroi simple (NCPS) en vue d'une utilisation future dans ces batteries.

L'étude a notamment révélé que les batteries qui utilisent des cathodes contenant du nickel et du cobalt, ainsi qu'un traitement par électrode à base de solvant, sont les plus susceptibles d'avoir des effets néfastes sur l'environnement (p. ex., appauvrissement des ressources, réchauffement planétaire, toxicité écologique et effets sur la santé humaine)⁶⁶. Les processus qui ont le plus d'effets négatifs sont associés à la production, au traitement et à l'utilisation de composés de cobalt et de nickel, qui peuvent entraîner des problèmes respiratoires, pulmonaires et neurologiques chez les personnes exposées à des concentrations élevées. On peut réduire ces impacts par différents moyens, par exemple : substitution des matières composant la cathode, traitement par électrode sans solvant et recyclage des métaux provenant des batteries⁶⁷. Les impacts potentiels des deux principales matières trouvées dans les batteries Li-ion (lithium et cobalt) sont décrits au tableau 14 qui suit. Pour le nickel et le manganèse, reportez-vous au tableau 13.

⁶⁴ US EPA, *Lithium-ion batteries and nanotechnology for electric vehicles: A life cycle assessment*, Office of Pollution Prevention and Toxics et National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, 2012. <<http://nepis.epa.gov>> (Consulté le 21 avril 2015)

⁶⁵ *Ibid.*

⁶⁶ *Ibid.*

⁶⁷ *Ibid.*

Tableau 14. Effets potentiels sur l'environnement des composants des batteries lithium-ion

Lithium et composés de lithium ^a		
Effets potentiels sur l'environnement	Effets potentiels sur la santé humaine	Effets potentiels sur la santé au travail
<p>Les effets sur l'environnement de la production de lithium sont associés à la production d'énergie, au rejet d'autres minéraux (plus toxiques) et à l'intrusion naturelle sur le site de production^b.</p> <p>Le lithium élémentaire (métallique) s'oxyde facilement lors de réactions fortement exothermiques. Sa réaction avec l'eau est particulièrement dangereuse en raison de l'apparition simultanée de chaleur et d'hydrogène, qui peut causer une explosion ou un incendie^c.</p>	<p>Le lithium touche le système nerveux, et c'est un médicament très souvent prescrit pour le traitement des troubles affectifs bipolaires. Certains rapports faisant état de ses effets sur la motilité des spermatozoïdes et la fertilité masculine sont contradictoires. On a signalé un cas de grave intoxication au lithium-ion : le principal problème clinique était l'insuffisance respiratoire, causée par un œdème pulmonaire lui-même potentiellement imputable à une dépression myocardique associée à une stupeur profonde.</p>	<p>Le lithium élémentaire peut causer de graves brûlures aux yeux et à la peau. L'exposition industrielle au lithium peut se produire dans les situations suivantes : extraction du lithium de ses minerais, préparation de divers composés de lithium, soudage, brasage, émaillage et utilisation d'hybrides de lithium.</p> <p>Le lithium, qui appartient à la famille des métaux alcalins, est hautement réactif^d.</p>
Cobalt et composés de cobalt ^a		
Effets potentiels sur l'environnement	Effets potentiels sur la santé humaine	Effets potentiels sur la santé au travail
<p>On possède suffisamment de données attestant la cancérogénicité de l'oxyde de cobalt(II) chez des animaux de laboratoire.</p> <p>Les principaux modes d'exposition au cobalt qui sont préoccupants pour le grand public sont la nourriture et l'eau potable. En général, les composés de cobalt qui se dissolvent facilement dans l'eau sont plus néfastes que ceux qui sont difficiles à dissoudre.</p> <p>Souvent, le cobalt qui se dépose dans le sol se fixe solidement à des particules du sol, et ne se rend donc pas très loin dans le sol. Par contre, la forme du cobalt et la nature du sol dans un site donné vont influencer sur la profondeur de pénétration du cobalt. Que ce soit dans le sol ou les sédiments, la quantité de cobalt qui est mobile augmentera avec le niveau d'acidité.</p> <p>En fait, la majeure partie du cobalt finit par se retrouver dans le sol ou dans les sédiments.</p>	<p>On a constaté que le cobalt non radioactif ne causait pas le cancer chez les humains ou les animaux à la suite d'une exposition liée à la nourriture ou à l'eau. On sait par contre que le cancer touche des animaux qui ont inhalé du cobalt ou auxquels on a injecté du cobalt directement dans un muscle ou sous la peau. Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a déterminé que le cobalt pouvait être cancérogène pour les humains (groupe 2B).</p> <p>On sait que l'exposition à des composés de cobalt (métal, sels ou métal dur) produit des effets clastogènes (capables de causer une fragmentation des chromosomes) dans les cellules des mammifères, ce qui inclut les lymphocytes humains.</p>	<p>On observe les principaux effets du cobalt sur les tissus respiratoires après une exposition par inhalation : fonction pulmonaire réduite, toux plus fréquente, inflammation respiratoire et fibrose. Les niveaux signalés chez des personnes en milieu de travail étaient de l'ordre de 0,015 à 0,13 mg de Co/m³. On croit que l'exposition à de la poussière contenant du cobalt (que ce soit du cobalt métal ou du métal dur) entraîne une cardiomyopathie caractérisée par des effets fonctionnels touchant les ventricules et par une hypertrophie cardiaque, mais les niveaux d'exposition associés aux effets sur le cœur humain de l'inhalation de cobalt n'ont pas été établis. La dermatite est un résultat courant de l'exposition dermique au cobalt chez les humains.</p>

Note : mg = milligramme(s); m³ = mètre(s) cube(s).

Sources:

- a. National Library of Medicine HSDDB Database, Lithium compounds, 2007. <<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+6900>>
- b. L. Gaines et R. Cuenca, *Costs of lithium-ion batteries for vehicles*, United States Department of Energy, Center for Transportation Research: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 2000.
- c. V. Ekermo, *Recycling opportunities for batteries Li-ion from hybrid electric vehicles*, thèse de maîtrise en génie chimique, département de génie chimique et biologique, recyclage des matériaux industriels, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suède, 2009.
- d. *Ibid.*
- e. ATSDR, *Toxicological profile for cobalt*, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004. <www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp33.pdf>

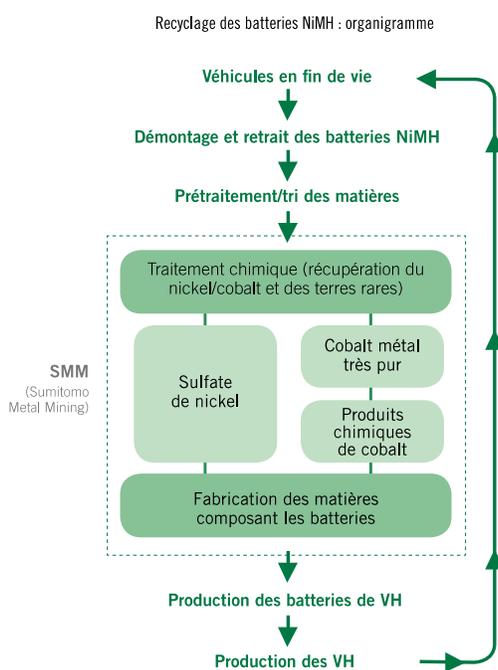
4.2 Pratiques techniques exemplaires pour le recyclage des batteries de VPE

Il existe divers établissements de recyclage de pointe pour les batteries de VPE en Europe et en Asie. Nous en présentons ici une sélection représentative.

4.2.1 Pratiques exemplaires de pointe pour le recyclage des batteries de VPE en Asie

La première entreprise qui a recyclé le nickel se trouvant dans les batteries Ni-MH usagées provenant de VEH afin de l'utiliser dans des batteries Ni-MH neuves était Sumitomo Metal Mining (SMM) Corp., au Japon. Cette initiative a été lancée en 2010. De concert avec Toyota Motor Corporation (TMC), SMM a élaboré une technologie de tri et d'extraction du nickel de haute précision, qui a permis d'intégrer directement les matières au procédé de raffinage du nickel, et de faire ainsi du recyclage de « batterie à batterie ». TMC envisage d'installer ce système de recyclage outre-mer. Il est illustré à la figure 12.

Figure 12. Organigramme fonctionnel du recyclage des batteries Ni-MH — Sumitomo Metal Mining Corporation, Japon



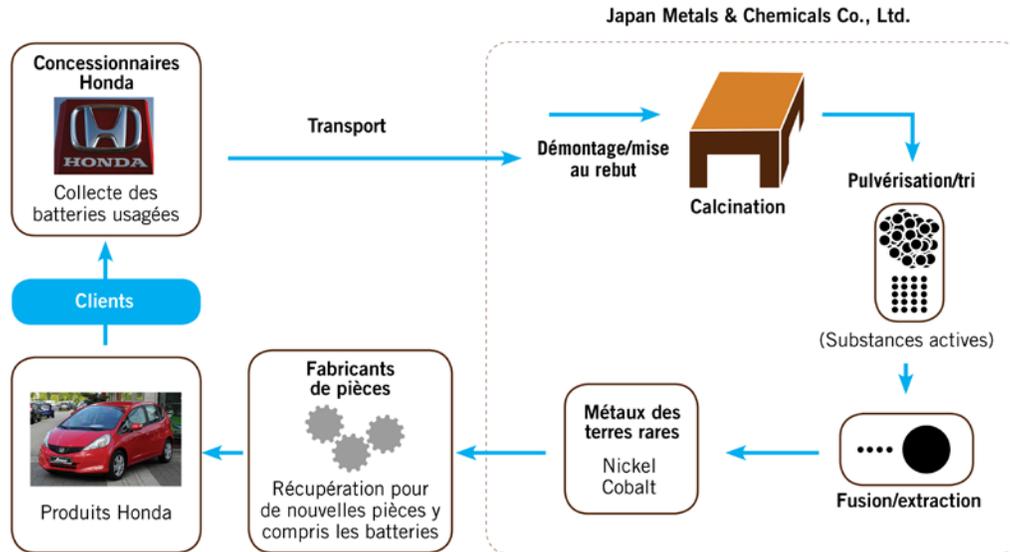
Source : Sumitomo Metal Mining Co. *CSR Report 2013*. <www.smm.co.jp/E/csr/report/pdf/csr2013_allpages.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014)

Avant ce progrès, les concessionnaires et les démonteurs d'automobiles récupéraient les batteries Ni-MH, qui subissaient un traitement de réduction, et la ferraille contenant du nickel était recyclée comme matière première pour la fabrication d'acier inoxydable.

En 2012, à la suite du tremblement de terre et du tsunami qui ont frappé le Japon en mars 2011, Honda a créé avec Japan Metals & Chemicals (JMC) un nouveau procédé d'extraction d'oxydes contenant des métaux des terres rares (misch-métaux) à partir des batteries Ni-MH usagées. Depuis mars 2013, les métaux des terres rares extraits sont fournis par JMC à un fabricant de batteries, qui les réutilisera comme matières pour électrode négative dans les batteries Ni-MH destinées aux VEH. Pour extraire les misch-métaux durant le processus de recyclage : une fois la batterie démontée, le mélange de misch-métaux est brûlé à haute température et pulvérisé. La partie composée de métaux des terres rares fond et peut ensuite être extraite. Contrairement à ce que fait l'actuelle méthode de recyclage, qui consiste à traiter les batteries Ni-MH à la chaleur et à utiliser le produit comme ferraille

destinée à l'acier inoxydable, cette technologie permet à Honda de récupérer l'acier inoxydable^{68,69}. Ce procédé est illustré à la figure 13⁷⁰.

Figure 13. Procédé utilisé par Honda pour recycler les batteries Ni-MH et récupérer les métaux des terres rares



Source : Metalpedia, « Asian Metal. Rare earths Recycling », Metalpedia, non daté. <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/recycling.shtml> (Consulté le 31 mars 2015)

4.2.2 Pratiques exemplaires de pointe pour le recyclage de batteries de VPE en Europe

De 2000 à 2003, Umicore (société située en Belgique, dont nous avons parlé à la section 3) a élaboré un nouveau procédé de recyclage baptisé Val'Eas. Ce procédé industriel en circuit fermé est le seul consacré aux batteries Ni-MH et Li-ion rechargeables, et il ne s'inspire pas de procédés déjà utilisés pour d'autres types de batteries. Il utilise une combinaison de procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques.

La technologie exclusive à Umicore supprime la nécessité de prétraiter les éléments dangereux des batteries Li-ion, Li-polymère et Ni-MH. Les batteries des VEH, des VEHR et des VE sont d'abord démontées sur une chaîne spécialement conçue à cet effet. L'augmentation de la température et la réduction (opposé de l'oxydation) sont étroitement surveillées et gérées, ce qui prévient toute explosion et garantit que l'intégralité du cobalt, du nickel et de l'acier sera récupérée dans la phase

⁶⁸ C. Michelsen, « Hybrid battery recycling works! according to Honda », *Clean Technica*, 2012. <<http://cleantechnica.com/2012/04/24/hybrid-battery-recycling-works-according-to-honda/>> (Consulté le 21 avril 2015)

⁶⁹ F. Els, « Honda's starts recycling program to extract 80% of rare earths from used hybrid batteries », *InfoMine*, 2013. <www.mining.com/hondas-starts-recycling-program-to-extract-80-of-rare-earths-from-used-hybrid-batteries-43719> (Consulté le 21 avril 2015)

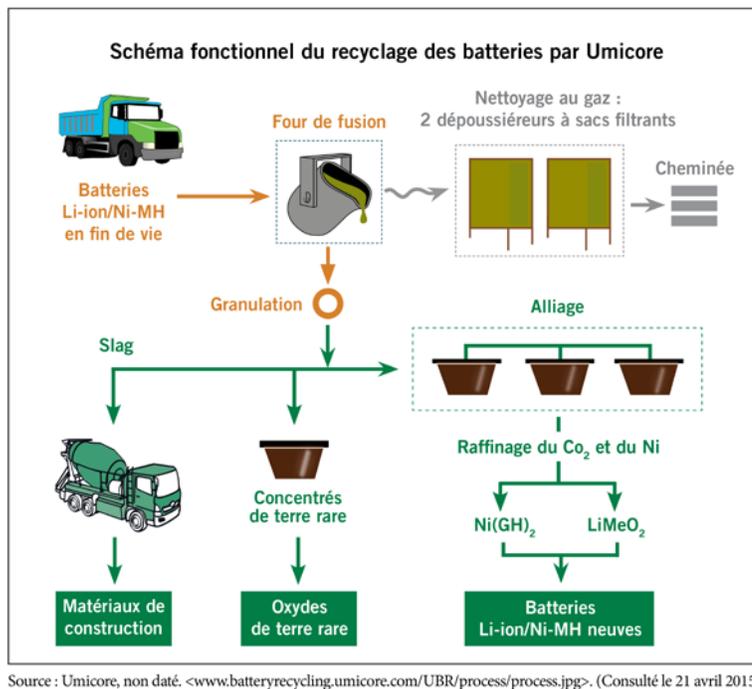
⁷⁰ Integrity Exports, « Honda introduces rare earth metal recovery tech for old hybrid car batteries », *Integrity Exports*, 2012. <<http://integrityexports.com/2012/04/18/honda-introduces-rare-earth-metal-recovery-tech-for-old-hybrid-car-batteries/>> (Consulté le 21 avril 2015).

métallique. Le processus de fusion produit des scories. La fraction métallique contient du nickel, du cobalt et d'autres métaux précieux. Ces métaux sont raffinés davantage et transformés en $\text{Ni}(\text{OH})_2$ et en LiMeO_2 . Ces produits sont utilisés comme matières composant la cathode active des batteries; le processus ferme donc la boucle d'une batterie à l'autre. On utilise le cobalt pour créer l'OLC (oxyde de lithium et de cobalt), qui peut être revendu aux fabricants de batteries.

Les émissions gazeuses sont contrôlées par l'installation de nettoyage des gaz, qui garantit qu'aucune dioxine ou aucun composé organique volatil (COV) ne sera produit. Le fluor provenant de l'électrolyte est recueilli dans cette installation et peut être récupéré.

Le procédé de recyclage d'Umicore vise à gérer toute batterie Li-ion et Ni-MH en FCV qui provient d'un véhicule hybride ou entièrement électrique, peu importe la composition chimique de ses éléments. Même si ce procédé est spécialement conçu pour générer un recyclage hautement efficace, on peut aussi l'utiliser pour recycler d'autres matières complexes. La figure 14 illustre la façon dont le procédé fonctionne.

Figure 14. Organigramme fonctionnel du recyclage des batteries de VPE pour Umicore en Belgique



Les opérations de fusion sont effectuées à Hoboken, en Belgique, dans l'établissement de recyclage industriel d'Umicore. À cet endroit, les batteries sont directement placées dans un four, sans prétraitement dangereux (p. ex., le broyage).

Une entreprise française de recyclage du métal, SNAM (*Société Nouvelle d'Affinage des Métaux*), peut traiter jusqu'à 300 tonnes de batteries Li-ion par an. Une fois que les batteries ont été triées, elles subissent une pyrolyse qui élimine le plastique et le papier. Le cobalt, l'aluminium, le cuivre et le fer sont recyclés, mais le lithium n'est pour l'instant pas récupéré. SNAM recycle les batteries de véhicules hybrides et de VE produits par Volkswagen, Audi, SEAT et Skoda. SNAM a également

signé une entente avec Honda pour le recyclage des batteries provenant de son parc de VEH en Europe⁷¹.

Une autre entreprise française, SAPRP Industries/Euro Dieuze, se spécialise dans le recyclage des batteries — incluant la récupération du lithium — grâce à un procédé hydrométallurgique. Cependant, comme il s'agit d'un nouveau procédé faisant encore l'objet de recherche-développement, les détails ne sont pas encore accessibles au public.

Également en France, Recupyl traite les batteries usagées provenant de VEH, de VEHR et de VE à l'aide de l'hydrométallurgie. Sa technologie brevetée de valorisation des matières à basse température est basée sur un système en circuit fermé qui permet de réutiliser les matières afin de produire des batteries neuves⁷².

En Europe, d'autres entreprises traitent les batteries de VPE usagées, notamment Batrec (en Suisse) et AkkuSer (en Finlande).

En Suisse, Batrec exploite une usine de traitement mécanique des éléments de batteries Li-ion. Ces batteries sont broyées dans une atmosphère contenant du CO₂, où l'électrolyte organique volatil s'évapore et est recueilli comme condensé non utilisable. L'opération de broyage est effectuée à température ambiante afin de prévenir toute réaction d'oxydation. L'étape suivante est la « neutralisation » du lithium métallique; pour ce faire, on ajoute une quantité contrôlée d'un réactif contenant de l'oxygène, comme l'air. Après la neutralisation du lithium, les batteries sont broyées davantage et font l'objet d'une séparation des matières. Les différentes fractions de matières sont vendues comme matières premières pour d'autres procédés⁷³.

En Finlande, AkkuSer recycle les batteries de véhicules hybrides et électriques sans utiliser de produits chimiques, de chaleur ou d'eau. L'entreprise possède sa propre usine et utilise une technologie à sec (broyage et traitement au gaz) pour recycler les matières⁷⁴. Cette méthode est présentée comme celle qui permet de récupérer le plus de matières dans les batteries, même à l'échelle mondiale. Avec ce procédé, les batteries rechargeables sont broyées, et les éléments qu'on peut réutiliser sont séparés, selon leurs propriétés physiques (p. ex., le poids, les qualités magnétiques, etc.)⁷⁵. Ce procédé, dont on sait qu'il s'agit d'une des meilleures techniques existantes (MTE),

⁷¹ C. Morris, « Volkswagen Group France arranges for recycling of hybrid and EV batteries », *Charged*, 2014. <<http://chargedevs.com/newswire/volkswagen-group-france-arranges-for-recycling-of-hybrid-and-ev-batteries/>> (Consulté le 21 avril 2015)

Friends of the Earth Europe, Friends of the Earth England Wales and Northern Ireland. *Lithium*, 2013. <www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

Toyota Motor Corporation, *Toyota announces sustainable battery recycling agreement in Europe*, communiqué de presse, non daté. <<http://toyota.eu/about/pages/newsdetails.aspx?prid=688&prs=Corporate&prtm=pressrelease>> (Consulté le 21 avril 2015)

⁷² On trouvera une description plus détaillée du procédé dans Vadenbo, Carl O. *Prospective environmental assessment of lithium recovery in battery recycling*, 2009. <www.uns.ethz.ch/pub/publications/pdf/1717.pdf> (Consulté le 7 mai 2014.)

⁷³ GlobalPSC, *Batrec—Return Batteries and Accumulators*, clip vidéo sur YouTube, 2011. <www.youtube.com/watch?v=e6qyLT_x53o> (Consulté le 7 mai 2014.)

⁷⁴ SYKLI Environmental School of Finland, *Batteries*, non daté. <www.sykli.fi/en/materials-and-tools/batteries-recycling/recycling> (Consulté le 21 avril 2015)

⁷⁵ CTC-N, *Development of a recycling process for Li-Ion batteries*, Climate Technology Centre & Network, 2012. <<http://ctc-n.org/content/development-recycling-process-li-ion-batteries>> (Consulté le 30 septembre 2014.)

consomme relativement peu d'énergie (0,3 kWh/kg), mais génère pourtant un taux de recyclage très élevé, de plus de 90 %⁷⁶.

4.3 Recherche sur l'utilisation des batteries de VPE usagées comme dispositifs de stockage d'énergie

Des entités comme le ministère de l'Énergie des États-Unis (DoE), les *US National Renewable Energy Laboratories* (laboratoires américains spécialistes des énergies renouvelables), l'*Electric Power Research Institute* (EPRI, Institut de recherche sur l'énergie électrique) et plusieurs universités (dont le Rochester Institute of Technology, UC Davis et UC Berkeley) étudient la possibilité d'utiliser les batteries de VPE usagées comme dispositifs de stockage d'énergie, de gestion de l'électricité et d'alimentation de secours. Ces travaux sont partiellement axés sur une utilisation plus systématique des grosses batteries comme dispositifs de stockage d'énergie.

Voici les divers types de « deuxième utilisation » définis à ce jour (certains sont déjà en place) :

- parallèlement aux technologies de production d'énergie éolienne et solaire connectée au réseau électrique, on a recours à la mise à disposition différée de l'énergie et à la consolidation des énergies renouvelables, pour assurer la fiabilité et la qualité du service;
- télécommunications, par exemple pour les tours de transmission cellulaire;
- utilisation fixe hors réseau électrique, notamment comme alimentation de secours et dans des installations éloignées;
- utilisation mobile pour des véhicules lourds : moteurs de véhicules commerciaux au ralenti (*commercial idle-off*), véhicules utilitaires et récréatifs et transport en commun (divers types de micro-hybridation)⁷⁷;
- sources d'alimentation pour des utilisations spécialisées, par exemple pour des grappes de serveurs ou dans le secteur agricole.

Par exemple, la batterie d'un VPE peut comprendre 200 éléments reliés à huit modules qui sont connectés électriquement dans le bloc. En fin de cycle de vie, certains ou la totalité de ces modules contiendront encore assez de charge pour des utilisations fixes (p. ex., pour alimenter la pompe d'une ferme). Un électricien ou un technicien spécialement formé peut démonter le bloc-batterie afin de créer des modules de « la bonne taille » qui serviront à des fins bien précises. Ce type de réutilisation est intéressant pour des organismes officiels comme ceux que nous avons mentionnés précédemment, et pour les bricoleurs et les petites exploitations familiales fonctionnant sur des marchés à créneaux. Toutefois, la *Portable Rechargeable Battery Association* (PRBA, Association des fabricants de batteries portatives rechargeables) a exprimé des préoccupations à propos du reconditionnement des batteries de VPE, en raison de problèmes de sécurité. Il existe des risques élevés de décharge électrique, et donc des risques pour la santé humaine, liés au reconditionnement de ces batteries, à moins que ce reconditionnement soit confié à une personne qui a été bien formée à cet effet⁷⁸.

Les autres recherches suivantes sont en cours :

⁷⁶ AkkuSer, *AkkuSer Ltd – Battery Recycling – Dry Technolog*, clip vidéo sur YouTube, 2011. <www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=HD1dB7zI7Ec> (Consulté le 7 mai 2014.)

⁷⁷ J. Neubauer et A. Pesaran, *PHEV/EV li-ion battery second-use project* (NREL/PR-540-48018). National Renewable Energy Laboratory. 2010. <www.nrel.gov/docs/fy10osti/48018.pdf> (Consulté le 18 mars 2014.)

⁷⁸ George A. Kerchner, Communication personnelle avec l'auteur, 13 mars 2014.

- La société Nissan s'est associée à Sumitomo pour mettre en œuvre un plan d'activités visant la récupération et la revente de batteries d'automobile usagées.
- Une entreprise du secteur énergétique collabore avec Itochu afin de concevoir des systèmes de stockage d'énergie pour les immeubles résidentiels, afin de faciliter le développement d'un marché secondaire pour les batteries usagées.

Il faudra peut-être établir les normes applicables au reconditionnement des batteries de VPE au terme de leur premier cycle de vie, pour que cette industrie optimise parallèlement leur valeur et la sécurité des êtres humains et de l'environnement. En outre, si les batteries de VPE sont modifiées en vue d'utilisations subséquentes non liées aux VPE, il reste des questions non résolues à propos de la responsabilité qui pourrait être imputée aux constructeurs de véhicules et/ou aux fabricants de batteries (ou aux propriétaires des véhicules) si les batteries ou leurs éléments faisaient défaut, causant de graves dommages à la santé humaine ou à l'environnement.

Un marché dynamique de la réutilisation des batteries de VPE au terme de leur premier cycle de vie prolongerait le nombre d'années précédant leur arrivée dans le circuit du recyclage. Nous n'avons pas tenu compte de cette possibilité lors de l'élaboration du modèle utilisé pour produire les estimations de FCV à la section 3, car on ne sait toujours pas avec certitude si ces options de « deuxième utilisation » vont fonctionner en Amérique du Nord. Selon les experts que nous avons interviewés, les ménages des régions urbaines des pays du tiers-monde (où les pannes d'électricité sont fréquentes et durent longtemps) pourraient constituer un marché intéressant pour l'utilisation des batteries de VPE en FCV comme dispositifs de stockage d'énergie. Par ailleurs, certains craignent que, parce que les batteries ont été initialement conçues pour des véhicules, elles ne soient pas idéales pour stocker de l'énergie.

4.4 Législation encadrant les pratiques exemplaires de GER des batteries de VPE

L'Europe est un chef de file de la législation relative au recyclage des batteries. La directive européenne adoptée en 1991 établit des objectifs clairs en ce qui concerne la collecte et le recyclage de tous les types de batteries. Même si elle ne contient pas de dispositions visant expressément le recyclage des batteries de VPE, ses exigences s'appliquent quand même. Cette directive a pour objectif premier de minimiser l'impact négatif sur l'environnement des batteries et des accumulateurs, et de ceux-ci à l'état de déchets, afin de contribuer à la protection, à la préservation et à l'amélioration de la qualité de l'environnement⁷⁹.

La directive énonce diverses exigences applicables au recyclage des batteries. Par exemple : toutes les batteries recueillies doivent être recyclées; il est interdit d'utiliser du mercure; les batteries ne peuvent pas être éliminées dans des décharges ou par incinération; il faut apposer sur les batteries une étiquette où figure une poubelle sur roues barrée d'une croix; les producteurs de batteries ou les tiers agissant en leur nom ne peuvent pas refuser de reprendre des batteries usagées; les procédés de recyclage doivent avoir un taux d'efficacité d'au moins 50 % pour les batteries Li-ion et Ni-MH. La directive stipule en outre que les batteries doivent pouvoir être retirées facilement de l'endroit où elles se trouvent, et que tous les éléments contenant des batteries (incluant les véhicules) doivent être accompagnés d'instructions indiquant comment on peut retirer la batterie en toute sécurité.

Les batteries de VPE sont considérées comme des batteries industrielles (pas automobiles) par la directive de l'UE sur les batteries, qui exige que le taux de collecte des batteries usagées atteigne 25 % d'ici septembre 2012 et 45 % d'ici septembre 2016. Les États membres de l'UE sont libres

⁷⁹ Toshiba of Europe Ltd, *Legal directives in Europe*, 2013. <www.toshiba.eu/eu/Environmental-Management/Legal-directives-in-Europe/> (Consulté le 21 avril 2015)

d'exiger un taux de collecte plus élevé sur leur territoire. L'Allemagne a établi ce taux à 35 % pour septembre 2012. Par ailleurs, l'UE a établi un taux d'efficacité du recyclage de 50 % pour les batteries dont la composition chimique est couramment utilisée⁸⁰.

La directive définit également diverses exigences relatives à la reprise obligatoire des batteries et aux cibles d'efficacité du recyclage. Voici certains extraits⁸¹ :

- **Systèmes de collecte :** « Les États membres veillent à ce que les producteurs de piles et d'accumulateurs industriels, ou des tiers agissant en leur nom, ne refusent pas de reprendre aux utilisateurs finals les déchets de piles et d'accumulateurs industriels, quelles que soient leur composition chimique et leur origine. Des tiers indépendants peuvent également collecter les piles et accumulateurs industriels. »
- **Extraction des déchets de piles et accumulateurs :** « Les États membres veillent à ce que les fabricants conçoivent les appareils de manière que les piles et accumulateurs usagés puissent être aisément enlevés. [...] Tous les appareils auxquels des piles ou accumulateurs sont incorporés sont accompagnés d'instructions indiquant comment l'utilisateur final ou les professionnels qualifiés indépendants peuvent enlever sans risque ces piles et accumulateurs. Le cas échéant, les instructions informent également l'utilisateur final des types de piles ou d'accumulateurs incorporés dans l'appareil. [...] Les dispositions énoncées au premier alinéa ne s'appliquent pas lorsque, pour des raisons de sécurité ou de fonctionnement, des raisons médicales ou d'intégrité des données, le fonctionnement continu est indispensable et requiert une connexion permanente entre l'appareil et la pile ou l'accumulateur. »

Le recyclage des batteries est également réglementé par la Directive du Parlement européen et du Conseil sur les véhicules hors d'usage (VHU) (2000/53/EC). Comme l'indique la directive sur les piles et accumulateurs, « [I]es piles et accumulateurs industriels et automobiles destinés aux véhicules devraient satisfaire aux exigences de la directive 2000/53/CE, notamment de son article 4. Par conséquent, l'utilisation de cadmium dans les batteries et accumulateurs industriels pour les véhicules électriques devrait être interdite, à moins que ces batteries et accumulateurs bénéficient d'une exemption en vertu de l'annexe II de ladite directive. » Au printemps 2014, la province de l'Ontario a publié une ébauche de lignes directrices visant les véhicules en fin de vie aux fins de consultation. Ce document exige le retrait approprié de toutes les batteries des véhicules avant qu'elles soient déchetées.

En plus des directives susmentionnées, en avril 2010, la Commission européenne a publié une communication portant sur une « stratégie européenne pour des véhicules propres et économes en énergie ». Cette stratégie, qui reconnaît le potentiel d'expansion du marché mondial des véhicules propres et écoénergétiques, contient diverses recommandations visant à « fournir un cadre politique approprié et neutre d'un point de vue technologique pour les véhicules propres et économes en énergie. » La stratégie propose notamment : d'examiner quels changements il faudra apporter à la législation existante applicable aux batteries afin de l'adapter aux nouvelles conditions du marché; de

⁸⁰ VARTA, *Environmentally-friendly substances and recycling*, non daté. <www.varta-consumer.com/en/Company/Environment/EU-battery-directive-and-Battery-recycling.aspx> (Consulté le 21 avril 2015)

⁸¹ Union européenne, Directive 2013/56/EU du Parlement européen et du Conseil du 20 novembre 2013 modifiant la directive 2006/66/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs en ce qui concerne la mise sur le marché de piles et d'accumulateurs portables contenant du cadmium destinés à être utilisés dans des outils électriques sans fil et de piles bouton à faible teneur en mercure, et abrogeant la décision 2009/603/CE de la Commission. *Journal officiel de l'Union européenne*, 2013. <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0056&from=EN>> (Consulté le 21 avril 2015)

promouvoir les programmes européens de recyclage et de réutilisation des batteries; d'étudier les changements qu'on pourrait apporter aux règles applicables au transport des batteries⁸².

La gestion de produits de conception complexe en FCV relève de plus en plus souvent des lois et règlements visant ce qu'on appelle « la gérance des produits » dans le monde. Il s'agit d'un modèle de politique qui permet de demander aux fabricants d'un produit d'assumer les coûts de la gestion responsable de ce produit à la fin de son cycle de vie. Actuellement, en Amérique du Nord, ces lois — qui sont davantage provinciales ou étatiques que fédérales au Canada et aux États-Unis, mais de portée nationale au Mexique — s'appliquent aux produits électroniques, peintures, pesticides, pneus, bouteilles de gaz, tapis, appareils radioactifs, éclairages fluorescents et dispositifs contenant du mercure (thermostats), et à d'autres catégories de produits. La législation relative à la gérance des produits est souvent adoptée lorsque les responsables des systèmes locaux de gestion des déchets réalisent qu'ils ont énormément à faire à cause des composants dangereux qu'on trouve dans ces produits complexes, et cherchent à faire assumer les coûts par les fabricants des produits (et, par extension, aux consommateurs de ces produits). Il est fort peu probable que les batteries de VPE se retrouvent dans les déchets municipaux, parce qu'elles sont grosses et lourdes, et donc très visibles et difficiles à éliminer discrètement.

Les cadres de l'industrie que nous avons interviewés sont généralement d'accord pour dire que les lois sur la gérance des produits ne constituent pas le bon modèle pour cette catégorie de produit. Ils espèrent voir apparaître un système efficace basé sur le volontariat, comme celui qu'a mis sur pied Call 2 Recycle (anciennement Rechargeable Battery Recycling Corporation — RBRC) pour les petites batteries rechargeables. Dans le cadre de ce système, les fabricants versent de l'argent à une tierce organisation à but non lucratif (Call 2 Recycle), en fonction de la quantité et du type de batteries mises en marché. Ces frais couvrent le coût de l'établissement de points de collecte dans tout le pays et le recyclage des batteries. Les intervenants préféreraient ne pas être assujettis à une législation applicable aux batteries de VPE.

4.5 Politiques relatives aux pratiques exemplaires

De nombreuses politiques encouragent l'achat de VPE, ce qui réduit les émissions de GES et l'empreinte écologique (à condition que le véhicule en FCV soit géré de façon écologiquement rationnelle). Elles encouragent généralement l'achat de VPE grâce à divers rabais incitatifs. Certaines politiques contiennent les dispositions suivantes :

1. Stationnement moins cher ou gratuit pour les véhicules hybrides — il a été instauré dans des villes comme Albuquerque (Nouveau-Mexique), Austin (Texas), Baltimore (Maryland), Ferndale (Michigan), Huntington (New York), Los Angeles (Californie), New Haven (Connecticut), Salt Lake City (Utah), San Antonio (Texas), San Jose (Californie), Santa Monica (Californie), Vail (Colorado) et Westchester (New York).
2. Obligation d'utiliser des véhicules hybrides pour les taxis — Vancouver (C.-B.), Canada et autres.
3. Diverses cibles d'achat de VPE écologiques.
4. Les VPE peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage; ils ne sont pas soumis aux tests d'émissions obligatoires; les propriétaires de VPE obtiennent des réductions sur le tarif de l'électricité ou des crédits d'impôt; autres incitatifs.

L'annexe B contient une liste détaillée des incitatifs.

⁸² Eurobat, Autre législation, 2010. <www.eurobat.org/other-legislation> (Consulté le 21 avril 2015)

Certains constructeurs d'automobiles offrent des rabais en espèces afin d'encourager les clients à rapporter les batteries de VPE en FCV. Toyota Motor Corporation Australia offre non seulement une remise en espèces de 100 \$ US quand es clients rapportent une batterie de VEH, mais aussi un rabais de 500 \$ US à l'achat d'une batterie neuve de rechange quand ils rapportent leur ancienne batterie. La remise ou le rabais peut être appliqué chez tous les concessionnaires Toyota d'Australie. De plus, pour garantir que chaque batterie sera restituée à la compagnie et pas simplement mise au rebut par le concessionnaire, Toyota offre une prime de 200 \$ US aux concessionnaires pour chaque batterie de Prius en FCV⁸³. Honda offre un « dépôt de base » remboursable d'un montant de 500 \$ US, qui est remis au client lorsqu'il expédie sa vieille batterie de VPE afin d'en recevoir une neuve⁸⁴.

4.6 Approche technique des pratiques exemplaires de GER

Il faut pratiquer la gestion écologiquement rationnelle (GER) des batteries de VPE à chaque étape du cycle de vie de la batterie, afin de garantir la protection de la santé humaine et de l'environnement lors de la FCV de ces batteries. Nous présentons ici les suggestions des personnes que nous avons interviewées aux fins de notre étude.

4.6.1 GER des batteries de VPE à l'étape de la conception

La première pratique exemplaire de GER des batteries de VPE consiste à concevoir des batteries multi-éléments dotées de systèmes de protection active qui atténuent ou préviennent les défauts et les risques pour la sécurité, et à faire en sorte que ces batteries soient plus faciles à démonter en FCV. Compte tenu de l'instabilité à haute température des matières actives contenues dans les batteries et de la possible occurrence de courts circuits internes susceptibles de présenter des risques, la conception des produits devrait comprendre une analyse détaillée des risques, effectuée à l'aide d'outils de conception industrielle éprouvés, comme l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets et l'analyse par arbre de défaillances. Les risques pour la sécurité associés aux batteries de VPE sont prévus par diverses normes et protocoles de mise à l'essai, qui peuvent aider les fabricants à produire des batteries Li-ion plus sécuritaires.

En Amérique du Nord, les normes de sécurité pertinentes sont généralement élaborées grâce à un processus approuvé, qui s'appuie sur la participation des représentants des organismes de réglementation, des fabricants, des groupes industriels, des organisations de défense des consommateurs, des compagnies d'assurance et d'autres intervenants clés du secteur de la sécurité. Underwriters Laboratories (UL) a récemment renforcé ses normes applicables aux batteries Li-ion⁸⁵. On utilise actuellement un certain nombre de normes et de protocoles de mise à l'essai pour évaluer certains des aspects des batteries Li-ion liés à la sécurité au stade de leur conception⁸⁶.

⁸³ Carbon Pig, « Electric cars don't use fossil fuel, but what's the environmental impact and life cycle of the batteries? », *Carbon Pig*, non daté. <<http://carbonpig.com/article/electric-cars-dont-use-fossil-fuel-whats-environmental-impact-and-life-cycle-batteries>> (Consulté le 21 avril 2015)

⁸⁴ Bumblebee Batteries LLC, *MAX-IMA replacement IMA battery for Honda Civic Hybrid*, non daté. <<http://bumblebeebatteries.com/hybrid-batteries/honda-civic-hybrid-battery>> (Consulté le 21 avril 2015)

⁸⁵ Reuters, « Standards are tightened for lithium-ion batteries », *The New York Times*, 2013. <www.nytimes.com/2013/06/13/business/lithium-ion-battery-standards-are-tightened.html?_r=0> (Consulté le 21 avril 2015)

⁸⁶ Underwriters Lab, *Safety issues for lithium-ion batteries*, 2012. <www.ul.com/global/documents/newscience/whitepapers/firesafety/FS_Safety%20Issues%20for%20Lithium-Ion%20Batteries_10-12.pdf> (Consulté le 11 mars 2014)

4.6.2 GER des batteries de VPE grâce à l'étiquetage

Divers recycleurs pensent qu'il serait utile que les batteries de VPE portent des étiquettes indiquant clairement leur composition chimique. La mention de la composition chimique, des risques et des bonnes méthodes de manutention sur l'étiquette devrait se faire à l'étape de la conception, car cela garantirait la sécurité, une utilisation appropriée et la récupération d'une valeur optimale à toutes les étapes subséquentes du cycle de vie. Il faudrait procéder de manière à protéger les formules exclusives des fabricants de batteries, mais donner assez d'information pour que les parties chargées de manipuler les batteries de VPE en FCV connaissent les dangers, ainsi que la valeur potentielle (p. ex., éléments ayant une concentration élevée de cobalt, qui a beaucoup de valeur pour les recycleurs).

Deux anecdotes qu'on nous a racontées dans le cadre de l'étude mettent en évidence le besoin d'un étiquetage approprié :

- Une grande chaîne nord-américaine spécialisée dans le déchetage d'automobiles indique qu'elle n'acceptera pas de batteries de VPE (pas plus qu'elle n'acceptera les VEH et les VE dont la batterie n'aura pas été retirée). Dans sa politique, elle précise ceci : [TRADUCTION] « En plus des problèmes environnementaux, ces batteries présentent des risques élevés pour la sécurité et des risques d'incendie. Nous avons frôlé l'électrocution et connu quelques incendies mineurs dans deux de nos établissements traitant ce type de batteries. » Cette entreprise a décidé de ne plus recevoir de batteries de VPE dans un proche avenir. Elle conseillera aux propriétaires de tels véhicules de s'adresser à leur mécanicien ou à leur concessionnaire pour qu'il retire la batterie, après quoi le décheteur acceptera le véhicule⁸⁷.
- Les fonderies de batteries d'accumulateurs au plomb (BAP) disent avoir eu des problèmes de sécurité avec les batteries lithium-ion — dont la forme est très similaire à celle des BAP —, qui se sont retrouvées mélangées avec les BAP, ce qui a causé des explosions ou d'autres problèmes⁸⁸.

La PRBA élabore des étiquettes destinées aux batteries de VPE et l'Automotive Battery Recyclers Association a récemment envoyé une lettre à la *Society for Automotive Engineers* (Société des ingénieurs automobiles) lui demandant d'élaborer une méthode et une norme qui permettront d'identifier de façon systématique les batteries Li-ion⁸⁹. Il faut que les étiquettes soient physiquement attachées à la batterie, car il n'est pas réaliste de croire que, dans les usines de recyclage très actives, on va vérifier chaque numéro de série afin de déterminer la composition chimique et les risques. Les batteries de VPE non étiquetées pourraient constituer un obstacle à la croissance de l'infrastructure permettant de récupérer les composants de valeur en FCV.

4.6.3 GER des batteries de VPE durant le transport

Les exigences relatives à la manutention appropriée des batteries de VPE durant le transport ne sont pas les mêmes selon que ces batteries sont neuves ou usagées. Il existe un certain nombre de règlements bien établis qui régissent le transport international des déchets dangereux, et visent tous les modes de transport. Les Nations Unies réunissent les Parties afin qu'elles établissent ces règlements.

⁸⁷ Grande chaîne nord-américaine de décheteurs d'automobiles dont le nom demeure confidentiel. Communication personnelle avec l'auteur, 17 mars 2014.

⁸⁸ Importante fonderie de plomb américaine dont le nom demeure confidentiel. Communication personnelle avec l'auteur, 10 mars 2014.

⁸⁹ Cadre de l'industrie du recyclage des batteries resté anonyme. Communication personnelle avec l'auteur, 11 mars 2014.

Le sous-comité d'experts de l'ONU sur le transport de marchandises dangereuses a créé un groupe de travail sur les batteries au lithium. Ce groupe s'est réuni au début du mois de février 2014 à Bruxelles afin d'examiner les changements qu'on propose d'apporter aux exigences visant les essais et aux définitions figurant dans le *Manuel d'épreuves et de critères* de l'ONU applicables aux grosses batteries au lithium. Les réunions sont co-organisées par la *Portable Rechargeable Battery Association* (PRBA, Association des fabricants de batteries portatives rechargeables), le *Council on Safe Transportation of Hazardous Articles* (COSTHA, Conseil sur le transport sécuritaire des articles dangereux) et l'*European Association for Advanced Rechargeable Batteries* (RECHARGE, association européenne pour des batteries rechargeables de pointe). Les participants étaient des représentants des États-Unis, du Royaume-Uni, de l'Allemagne, de la France et du Canada, ainsi que des experts de premier plan de l'industrie des batteries et de l'industrie automobile du Japon, d'Allemagne, de Chine, de Corée du Sud, de France et des États-Unis⁹⁰.

Les règlements de l'ONU seront intégrés au code des marchandises dangereuses de l'Organisation maritime internationale (OMI), qui régleme tous les types de marchandises dangereuses expédiées par la mer. Par exemple, si une entreprise comme Tesla expédie une batterie au Japon aux fins de recyclage, elle devra respecter ce code.

À l'heure actuelle, le Canada ne dispose d'aucun règlement sur le transport des batteries Li-ion en FCV. On lui a recommandé de mettre à jour ses règlements relatifs au transport en ce qui concerne les batteries Li-ion usagées⁹¹.

4.6.4 GER des batteries de VPE à l'étape de la fabrication et de l'installation

La prochaine étape du cycle de vie des batteries qui va influencer sur leur sécurité en FCV est celle de leur installation appropriée dans le VPE. Actuellement, des organisations chargées d'établir les normes internationales s'efforcent d'améliorer la compatibilité des véhicules fabriqués avec les batteries Li-ion, en incluant les tests de rendement appropriés aux normes applicables. On trouve un exemple de test dans la partie 1 de la norme IEC 60950-1 (UL 60950-1), qui porte sur la sécurité du matériel informatique⁹².

Mais plusieurs intervenants de l'industrie disent avoir une crainte : même si les normes et les règlements les plus efficaces au monde régissent la conception, le marquage et le transport des batteries de VPE, et si les fabricants de batteries de grandes marques (p. ex., Panasonic et Sanyo) respectent ces normes et ces exigences à la lettre, les fabricants du niveau supérieur qui ne sont pas des « grandes marques » — et ils existent déjà, souvent sur des marchés où la main-d'œuvre est moins coûteuse — vont ignorer ces pratiques exemplaires, et l'ensemble des membres de l'industrie des VPE commercialiseront des batteries de qualité inférieure, qui seront intégrées à des VPE. Cette situation de libre marché peut être très difficile à gérer, et nécessite la diligence de la part de toutes les parties composant la chaîne d'achat (constructeurs d'automobiles, concessionnaires et propriétaires, entre autres) afin de garantir qu'une qualité et des normes optimales ont été respectées.

⁹⁰ Rechargeable Battery Association, *Working group makes progress on updating UN testing requirements for large lithium batteries*, 2014. <www.prba.org/general/working-group-makes-progress-on-updating-un-testing-requirements-for-large-lithium-batteries-804/> (Consulté le 13 mars 2014)

⁹¹ George Kerchner, Communication personnelles avec l'auteur, 13 mars 2014.

⁹² Underwriters Lab, *Safety issues for lithium-ion batteries*, 2012. <www.ul.com/global/documents/newscience/whitepapers/firesafety/FS_Safety%20Issues%20for%20Lithium-Ion%20Batteries_10-12.pdf> (Consulté le 11 mars 2014)

4.6.5 GER des VPE à l'étape de l'utilisation

Il est essentiel que tous les intervenants susceptibles d'entrer en contact avec une batterie de VPE dans un autre contexte que lorsqu'elle fonctionne normalement soient formés pour leur gestion et leur manutention. Cela inclut les directives destinées à de nombreuses parties concernées (concessionnaires réparateurs d'automobiles, propriétaires de véhicules, premiers intervenants (en cas d'accident ou d'incendie), et les récupérateurs d'automobiles (lorsque les véhicules détruits lors d'un accident sont remorqués). Les batteries de VPE ont une charge de 200 volts, alors que les batteries d'accumulateurs au plomb ont une charge de 12 volts. Bon nombre de ces intervenants (dont les associations de chefs de services d'incendie et l'industrie des produits de rechange pour automobiles) ont élaboré de telles directives⁹³.

4.6.6 GER des batteries de VPE à l'étape de la fin du cycle de vie

Il existe diverses approches normalisées de l'hygiène industrielle garantissant une gestion écologiquement rationnelle des batteries de VPE en fin du cycle de vie (FCV), qui incluent la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs. Ces approches ont été éprouvées et mises à l'essai par d'actuels recycleurs de batteries d'accumulateurs au plomb en Amérique du Nord. Les contrôles suivants visent la sécurité et l'hygiène du milieu (SHM) :

- formation constante en matière de SHM offerte à tous les employés, surtout en ce qui concerne les dangers électriques;
- contrôles techniques garantissant le bon fonctionnement de tout l'équipement, afin de protéger l'hygiène du milieu et la santé et la sécurité des travailleurs;
- exigences visant l'équipement de protection individuelle, qui fait l'objet de tests appropriés en fonction de tous les dangers présents dans l'établissement.

Il faudrait appliquer ces contrôles non seulement dans les établissements de recyclage de batteries, mais aussi dans tous les établissements intermédiaires gérant des VPE en fin de vie : le concessionnaire automobile auquel on a rapporté un véhicule; un vendeur indépendant de véhicules d'occasion qui obtient un véhicule d'échange; une cour de récupération d'automobiles qui reçoit un VPE accidenté; tous les démonteurs. Si un VPE est détruit par un déchiqueteur/broyeur d'automobiles alors que sa batterie est encore à l'intérieur, cela peut causer un danger d'incendie et d'électrocution. Cependant, selon un spécialiste du marché des produits rechange pour automobiles, les intervenants qui broient les automobiles sont généralement aussi ceux qui retirent toutes les pièces commercialisables; à l'heure actuelle, il semble que le marché des batteries usagées soit assez dynamique pour que les démonteurs retirent les batteries de VPE et en tirent un avantage financier. Il existe déjà des annonces sur les sites Web des recycleurs offrant des batteries de VPE à vendre.

Dans le cadre de la planification d'une GER des batteries de VPE en FCV, un problème demeure non résolu : l'utilisation de matériaux nanométriques pour leur fabrication. On intègre des nanotubes de carbone à paroi simple (NCPS) à un nombre croissant de produits manufacturés, incluant les anodes de certaines batteries lithium-ion. Les matériaux nanométriques se comportent différemment des matériaux équivalents « de taille normale » quand ils subissent des forces thermiques, chimiques et mécaniques. Ils peuvent se retrouver en suspension dans l'air et présenter un risque respiratoire lorsque des produits contenant des NCPS sont déchiquetés (par exemple, lors du prétraitement des batteries Li-ion en FCV). La recherche sur les caractéristiques globales de toxicité des NCPS et

⁹³ Cars Direct, « How to properly recycle used hybrid car batteries », *Cars Direct*, 2013. <www.carsdirect.com/green-cars/how-to-properly-recycle-used-hybrid-car-batteries> (Consulté le 18 mars 2014)

d'autres matériaux nanométriques — tant pour la santé humaine que pour l'environnement — en est à ses débuts. À mesure qu'elle progressera et sera mieux comprise, elle pourrait compléter l'étiquetage et le marquage qui devraient figurer sur les batteries de VPE.

5 Conclusions et recommandations

5.1 Sommaire des observations

1. Les VEH ont été lancés sur les marchés canadien, mexicain et américain en 2000, 2006 et 2000, respectivement. On estime qu'en 2013, 23 000 VEH se sont vendus au Canada, 1 000 au Mexique et 495 500 aux États-Unis, ce qui totalisait environ 520 000 unités en Amérique du Nord. Ces chiffres devraient augmenter fortement au cours des années à venir.
2. On estime qu'il y avait 2 millions de VEH aux États-Unis à la fin de 2013.
3. Les VEHR et les VE sont apparus sur le marché nord-américain en décembre 2010. Les ventes sont actuellement peu nombreuses, mais augmentent rapidement. En 2013, les ventes combinées de VEHR et de VE ont représenté environ 2 200 unités au Canada, 12 au Mexique et 96 900 aux États-Unis, pour un total de près de 100 000 unités en Amérique du Nord.
4. Divers obstacles nuisent à l'adoption généralisée de la technologie des véhicules électriques; l'un de ces obstacles est le manque de bornes de recharge et d'une infrastructure connexe, qui limitent l'autonomie de ces véhicules. On surmonte ces obstacles en installant une infrastructure de recharge à de nombreux endroits, en versant des incitatifs à l'achat de véhicules électriques, et en élaborant des batteries qui font baisser le coût des véhicules électriques.
5. Les projections de ventes de VPE dépendent de divers facteurs : exigences d'achat des gestionnaires de parcs de véhicules, prix de l'essence, prix élevé des VEH à l'achat par rapport aux véhicules traditionnels, politiques des gouvernements relatives aux émissions de CO₂ et incitatifs offerts par divers paliers de gouvernement pour l'achat de VEH.
6. Toutes les batteries de VPE ont un long cycle de vie (huit ans ou plus) et la garantie des fabricants est longue (huit ans ou 160 000 à 240 000 km, selon la marque et le modèle de véhicule).
7. Le taux de défaillance des batteries de VPE est peu élevé (environ 1 %). Lorsqu'une défaillance survient pendant la période de garantie de la batterie, le constructeur d'automobiles remplace cette batterie.
8. À la fin de 2013, environ 80 % des VEH contenaient des batteries Ni-MH. Environ 20 % des VEH et l'intégralité des VEHR et des VE utilisent des batteries Li-ion, parce qu'elles ont des caractéristiques différentes, adaptées aux exigences de charge des véhicules entièrement électriques.
9. On estime qu'en 2013, le nombre de batteries de VPE en FCV en Amérique du Nord était de 115 000. Ce chiffre devrait atteindre environ 380 000 d'ici 2020, 849 000 d'ici 2025 et près de 1,5 million d'ici 2030.
10. Les composants des batteries de VPE (surtout le nickel des batteries Ni-MH et le cobalt des batteries Li-ion) constituent actuellement un incitatif économique au recyclage. La conception des batteries est en train de changer, de sorte qu'elles contiennent des matières moins précieuses; c'est préoccupant pour l'intérêt économique des futures activités de recyclage.
11. Les grands constructeurs d'automobiles comme Toyota et Honda établissent des chaînes d'approvisionnement inverses, afin de garantir que les batteries de VPE en FCV seront récupérées et correctement recyclées.
12. Les entreprises qui font déjà partie de l'industrie du recyclage (Retriev, RMC, Umicore, Glencore/Xstrata, etc.) peuvent traiter de grosses batteries Ni-MH et Li-ion, à condition qu'elles soient fragmentées en plus petits composants (éléments ou blocs). Les entreprises exploitant des fonderies (il s'agit parfois de multinationales comme Umicore ou Glencore/Xstrata, qui possèdent une chaîne d'approvisionnement mondiale) souhaitent recycler les batteries de VPE à cause des métaux qu'elles contiennent.

13. L'intérêt économique du recyclage des batteries de VPE dépend de la valeur des métaux et des autres matières qu'on peut récupérer. Dans certains cas, les entreprises paient un crédit contre des frais de traitement. Dans d'autres cas, des redevances de déversement sont facturées.
14. L'infrastructure de recyclage/traitement des batteries de VPE en est à ses débuts, mais les principaux acteurs sont déjà présents sur le marché et évaluent les possibilités d'expansion future. Il est probable qu'un plus grand nombre d'intervenants fassent leur apparition au fil du temps, à mesure que le stock de batteries de VPE en FCV augmentera.

5.2 Conclusions et recommandations

1. Le nombre de VPE en fin de vie va fortement augmenter en Amérique du Nord au cours des prochaines années, passant de 115 000 unités à la fin de 2013 à 380 000 d'ici 2020, puis à 849 000 d'ici 2025 et à près de 1,5 million d'ici 2030.
2. Jusqu'en 2022 et au-delà, la plupart des batteries de VPE en FCV seront produites aux États-Unis; leur nombre sera nettement inférieur au Canada et minime au Mexique.
3. Il existe déjà des possibilités de recyclage en Amérique du Nord pour les deux types de batteries actuellement utilisées dans les VPE (Ni-MH et Li-ion). Le secteur est actuellement stimulé par la valeur du nickel et du cobalt que contiennent ces batteries, mais l'intérêt économique va changer quand leurs concepteurs opteront pour l'utilisation de matières moins précieuses.
4. Il faut évaluer les impacts sur la dynamique du système de recyclage du changement de composition chimique qui est envisagé par les concepteurs de batteries, afin de garantir que la gestion écologiquement rationnelle des batteries de VPE en FCV se poursuivra.
5. Les gouvernements doivent s'assurer de disposer des lois appropriées pour garantir la GER des batteries de VPE en FCV.
6. Les hypothèses sur lesquelles s'appuient les projections relatives aux ventes et à la FCV présentées dans notre rapport vont sans doute changer avec le temps. Il faudra donc mettre à jour ces estimations périodiquement.

Annexe A – Description du modèle de cycle de vie utilisé pour estimer la FCV des batteries de VPE en Amérique du Nord

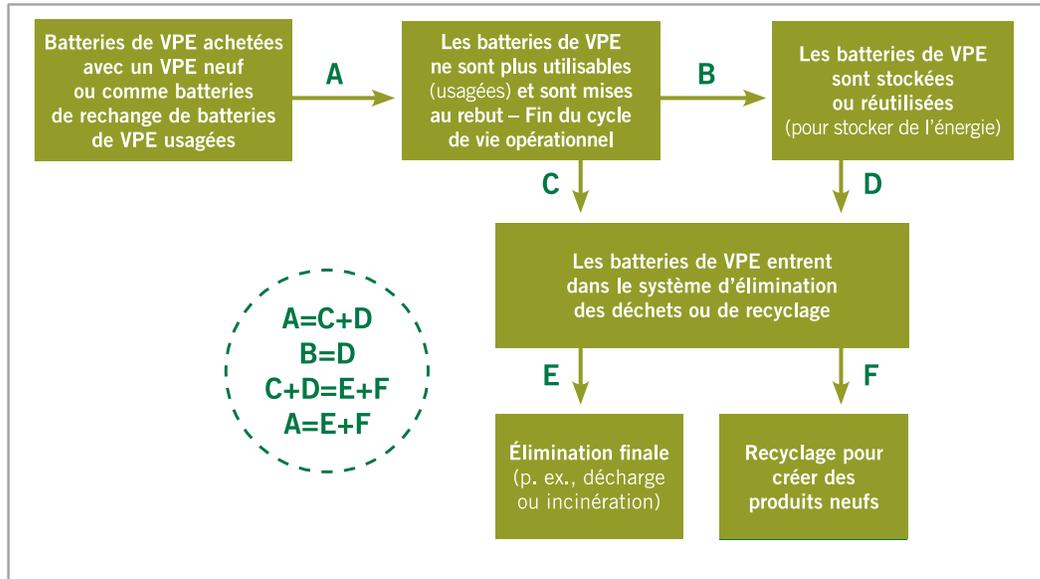
Kelleher Environmental utilise un modèle de cycle de vie (*Lifespan Model*) basé sur Excel Workbook comme outil d'analyse dans le cadre de nombreux projets, afin de faire une estimation de la fin du cycle de vie (FCV) des produits entrant dans le circuit des déchets et du recyclage. Très récemment, on a utilisé le Lifespan Model pour évaluer le flux de gros appareils électroménagers entrant dans le système de gestion des déchets de la Colombie-Britannique, au Canada (2014). L'*Alberta Recycling Management Authority* (ARMA, Autorité de gestion du recyclage de l'Alberta) utilise régulièrement ce même modèle pour évaluer le flux de produits électroniques désignés destiné au système de recyclage de l'Alberta, au Canada, et comparer le nombre réel de produits recyclés au nombre prévu de produits en FCV en vertu du Lifespan Model.

Le Lifespan Model s'appuie sur les éléments clés suivants :

- Nombre d'unités vendues par an, par type de produit (voir la section 2)
- Poids, par type de batterie (voir la section 2)
- Cycle de vie des différents types de batteries (voir la section 3)
- Période pendant laquelle chaque type de batterie est susceptible d'être stockée ou réutilisée avant son élimination (voir la section 3)

Le Lifespan Model vise à refléter le flux traditionnel de batteries Ni-MH et Li-ion entrant dans le système nord-américain de gestion des déchets, comme l'illustre la figure A1 qui suit, et tient compte des divers cheminements possibles.

Figure A1. Schéma du flux total de batteries de VPE alimentant le système nord-américain de recyclage et de gestion des déchets, utilisé par le Lifespan Model pour évaluer les quantités en fin de cycle de vie



Note :

- « A » désigne le nombre de tonnes de batteries de VPE achetées. À terme, toutes les unités « A » seront mises au rebut, usagées ou en fin de cycle de vie.
- « B » désigne les batteries de VPE qui sont stockées ou réutilisées pendant une certaine période, puis finissent par être elles aussi mises au rebut, mais pas immédiatement après avoir que leur premier propriétaire a cessé de les utiliser.
- « C » désigne les batteries de VPE qui sont envoyées immédiatement soit à un établissement de recyclage, soit à un site de gestion des déchets aux fins d'incinération ou d'enfouissement.

À ce stade, le mode de circulation est simple, car un petit nombre de grosses batteries ont atteint leur FCV pour l'instant. Une fois que les batteries sont achetées (généralement avec un VPE neuf), on les garde habituellement jusqu'à ce qu'elles soient usées. Quelques-unes arrivent en FCV à la suite de défaillances précoces (on estime que cela touche seulement 1 % des batteries de VPE) ou d'accidents. À l'heure actuelle, les batteries sont soit stockées, soit réutilisées (par voie de reconditionnement), soit mises au rebut. Dans ce dernier cas, elles sont soit recyclées, soit éliminées. Compte tenu de leur taille, il est probable que la plupart ou la totalité seront recyclées.

Annexe B – Sommaire des politiques canadiennes, mexicaines et américaines qui encouragent l'achat de VPE

Politiques faisant la promotion de l'achat de VPE au Canada

Le *Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des automobiles à passagers et des camions légers* va probablement favoriser une utilisation croissante de tous les types de véhicules électriques au cours des années à venir. Ces normes, qui sont les premières normes nationales d'émissions de gaz à effet de serre (GES) réglementées au Canada, ont été établies en vertu de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* et sont administrées par Environnement Canada⁹⁴. Elles sont entrées en vigueur au début de l'année modèle 2011, et devraient devenir plus strictes entre 2011 et 2016. On prévoit que, grâce à ce règlement, les émissions moyennes de GES des véhicules 2016 neufs seront inférieures de 25 % à celles des véhicules neufs vendus au Canada en 2008⁹⁵.

Il faut noter que, même si les véhicules neufs vendus au Canada doivent satisfaire aux normes nationales d'émissions et de sécurité administrées par le gouvernement fédéral, la plupart des règlements fédéraux visant les véhicules à moteur ne font pas la distinction entre les VPE et les véhicules conventionnels équipés de moteurs à combustion⁹⁶.

Au Canada, il n'existe actuellement aucun programme fédéral incitatif visant les VEHR et les VE.

Plusieurs provinces canadiennes ont lancé des initiatives appuyant l'utilisation de VPE (notamment des politiques qui encouragent l'achat, la location ou l'utilisation de VEH, de VEHR et de VE). Le tableau B1 qui suit résume ces incitatifs.

⁹⁴ Agence internationale de l'énergie (AIE), *Hybrid and electric vehicles: The electric drive captures the imagination*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, 2012. <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

⁹⁵ AIE, *Canada: Policies and legislation*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, non daté. <www.ieahev.org/by-country/canada-policy-and-legislation/> (Consulté le 21 avril 2015)

⁹⁶ AIE, *Hybrid and electric vehicles: The electric drive captures the imagination*. Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, 2012. <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

Tableau B1. Sommaire des incitatifs visant à favoriser l'achat de VEP au Canada

Province	Politique
Québec	<p>Programme de rabais à l'achat ou à la location^a</p> <ul style="list-style-type: none"> Le programme Roulez électrique offre un rabais à l'achat/à la location aux particuliers, aux entreprises, aux organismes à but non lucratif et aux municipalités du Québec qui souhaitent faire l'acquisition d'un VE, d'un VEHR, d'un VEH ou d'un véhicule électrique à basse vitesse. Le rabais accordé pour un véhicule entièrement électrique ou hybride rechargeable est de 500, 4 000 ou 8 000 dollars canadiens. (Note : le montant du rabais dépend de la capacité de la batterie électrique du véhicule et des conditions du bail, le cas échéant, et le véhicule doit faire partie de la liste des véhicules admissibles.) Le rabais accordé pour un véhicule hybride non rechargeable est de 500 \$ CAN. (Note : seuls les véhicules hybrides immatriculés depuis le 1^{er} novembre 2013 peuvent faire l'objet d'un rabais à l'achat. Ce volet du programme sera en vigueur jusqu'au 31 décembre 2016 ou jusqu'à ce que 15 000 rabais pour véhicules hybrides aient été attribués.) Le rabais pour véhicules électriques à basse vitesse est de 1 000 \$ CAN. Sont admissibles les véhicules autorisés à circuler sur les routes du Québec. Le programme Roulez électrique a été lancé le 1^{er} janvier 2012 et arrivera à expiration le 31 décembre 2016 ou quand les fonds disponibles seront épuisés. <p>Remboursement pour les bornes de recharge</p> <ul style="list-style-type: none"> Du 1^{er} janvier 2012 au 31 décembre 2016, les personnes qui ont acheté ou loué un véhicule entièrement électrique ou hybride rechargeable peuvent obtenir une subvention à l'achat et à l'installation d'une borne de recharge de 240 volts à leur domicile. Le montant de la subvention est le moins élevé des deux montants suivants : 50 % des dépenses admissibles ou 1 000 \$ CAN^b. Du 1^{er} novembre 2013 au 31 mars 2017, les subventions visant les bornes de recharge en milieu de travail correspondent au moins élevé des deux montants suivants : 75 % des dépenses admissibles ou 5 000 \$ CAN^c. <p>Plaque d'immatriculation avec lettrage vert^d</p> <ul style="list-style-type: none"> Cette plaque d'immatriculation comporte des lettres vertes et le pictogramme des véhicules électriques; on l'utilise pour identifier un VE et s'assurer que seuls les VE se stationnent dans les emplacements équipés de bornes de recharge. <p>Véhicules électriques au gouvernement^e</p> <ul style="list-style-type: none"> Une directive gouvernementale demande que chaque véhicule neuf ou remplacé soit un véhicule entièrement électrique ou hybride rechargeable. <p>Autre</p> <ul style="list-style-type: none"> Guide technique d'installation de bornes de recharge, publié en février 2012 à l'intention des électriciens, des entrepreneurs en construction, etc.^f Changements apportés au Code de construction du Québec pour les immeubles neufs : l'objectif consiste à exiger l'installation d'une infrastructure de recharge de base (240 V) dans les immeubles neufs^g. On autorise les VE à utiliser les voies réservées au transport en commun sur l'autoroute, dans le cadre d'un projet pilote mené à Québec^h. Le plan de développement de l'infrastructure de recharge — projet Circuit électrique — a été annoncé en janvier 2012 et mis en œuvre le 30 mars. Il a atteint son objectif, qui consistait à mettre en service 150 bornes de recharge d'ici 2013. On cherche à atteindre le chiffre de 785 bornes en décembre 2016, ce qui inclut 60 bornes de recharge rapideⁱ. Certaines sociétés de transport en commun doivent arrêter d'acheter des véhicules 100 % diesel et leur préférer des autobus hybrides et électriques à compter de 2025^j. Subventions visant à aider les sociétés de transport en commun à concevoir et à utiliser des autobus électriques^k; il y a aussi un projet d'autobus scolaires^l. Un nouveau plan d'action pour l'électrification des transports, comportant plus de mesures, sera rendu public à l'automne 2015 (il prévoit une aide à l'électrification des taxis et le financement de l'industrie et de la recherche, entre autres).

Note : mg = milligramme(s); m³ = mètre(s) cube(s).

Sources :

- a. Gouvernement du Québec, *Programme de rabais à l'achat ou à la location*, 2012. <<http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/english/particuliers/rabais.asp>> (Consulté le 21 avril 2015)
- b. Gouvernement du Québec, *Remboursement pour les bornes de recharge*, 2012. <<http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/particuliers/remboursement.asp>> (Consulté le 22 juillet 2015)
- c. Gouvernement du Québec, *Entreprises, municipalités, organismes*, 2012. <<http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/entreprises/entreprises.asp>> (Consulté le 22 juillet 2015)
- d. Gouvernement du Québec, *Plan d'action 2011–2020 sur les véhicules électriques*. Annexe 3 : Mesures pour les utilisateurs, 2011. <www.mern.gouv.qc.ca/presse/ve_annexe3.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- e. Gouvernement du Québec, Centre de gestion de l'équipement roulant. *Électrification des transports. Électrification du parc gouvernemental*, 2015. <www.cger.mtq.gouv.qc.ca/virage-ecologique/electrification-des-transports/electrification-parc-gouvernemental.aspx> (Consulté le 21 juillet 2015)
- f. *Ibid.*
- g. *Ibid.*
- h. Gouvernement du Québec. *Covoiturage sur les voies réservées de l'autoroute Robert-Bourassa. Pourquoi un projet pilote?*, 2015 <www.mtq.gouv.qc.ca/usagers/reseauroutier/covoiturage-aut-Robert-Bourassa/Pages/default.aspx> (Consulté le 23 juillet 2015)
- i. Le circuit électrique, 2015. <<http://lecircuitelectrique.com/index.en.html>> (Consulté le 23 juillet 2015)
- j. Société de Transport de Montréal, *Électrification du réseau de surface. La mobilité de demain complètement électrique*, 2015. <www.stm.info/fr/a-propos/grands-projets/electrification-du-reseau-de-surface> (Consulté le 23 juillet 2015)
- k. Le Huffington Post, *Québec lance un projet de 73 millions\$ pour développer un autobus électrique*, 2015. <http://quebec.huffingtonpost.ca/2012/03/07/quebec-subvention-autobus-lectrique_n_1326581.html> (Consulté le 23 juillet 2015)
- l. Gouvernement du Québec, Portail Québec, *Électrification des transports - Le gouvernement du Québec remet 2 M\$ pour la mise en service d'autobus scolaires québécois 100 % électriques*, 2015. <www.fil-information.gouv.qc.ca/Pages/Article.aspx?aiquillage=ajd&idArticle=2302276777> (Consulté le 23 juillet 2015)

Province	Politique
Ontario	<p>Programme d'encouragement pour les infrastructures de recharge des véhicules électriques^m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Depuis le 1^{er} juillet 2010, les consommateurs ontariens (particuliers, entreprises, municipalités, organismes non gouvernementaux (ONG) et groupes à but non lucratif) ont droit à un incitatif qui va de 5 000 à 8 000 dollars canadiens à l'achat ou à la location d'un véhicule hybride rechargeable ou d'un véhicule électrique à batterie neuf. • La valeur de l'incitatif dépend de la capacité de la batterie du véhicule : 5 000 \$ CAN pour une batterie de 4 kWh et 8 500 \$ pour une batterie de 17 kWh. • La valeur de l'incitatif visant les véhicules loués est liée aux conditions du bail. <p>Plaques d'immatriculation vertesⁿ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il existe des plaques vertes spéciales pour les véhicules hybrides rechargeables et les véhicules électriques à batterie. Les véhicules équipés de cette plaque ont un accès prioritaire aux voies réservées au covoiturage jusqu'au 30 juin 2015, même si une seule personne se trouve à bord. En temps normal, ces voies sont réservées aux véhicules transportant deux personnes ou plus. • Elle donnera accès aux futures bornes de recharge publiques et aux places dans certains stationnements GO Transit. <p>Ville de Toronto^o</p> <ul style="list-style-type: none"> • En février 2014, le conseil municipal de Toronto a voté à 31 voix contre 12 en faveur de l'instauration de permis de taxi de Toronto (TTL), qui devaient remplacer les permis existants (standard et Ambassador). En vertu du nouveau régime, tous les taxis devront être remplacés par des véhicules utilisant un carburant remplacement ou par des véhicules hybrides au terme du cycle de vie imposé de cinq ans. Le TTL est entré en vigueur le 1^{er} juillet 2014, et les chauffeurs ont jusqu'au 30 juin 2024 pour passer au nouveau permis.
Manitoba	<p>Electric Vehicle Roadmap^p</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lancée en avril 2011, l'<i>Electric Vehicle Road Map</i> vise à aider la province : à adopter les véhicules électriques et hybrides; à réduire sa dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles; à exploiter les possibilités économiques associées au transport électrique. • Cette initiative inclut des partenariats « rechargeables » (<i>Plug-in</i>) avec les constructeurs d'automobiles (comme Nissan Canada et Ventes de véhicules à moteur Mitsubishi du Canada), les fournisseurs de technologie électrique, Manitoba Hydro, des entreprises du Manitoba et des établissements d'enseignement. • Elle propose de créer un comité consultatif sur les véhicules électriques, qui recommandera au gouvernement les meilleurs moyens de se préparer pour les véhicules électriques et hybrides et de les adopter. • Elle propose de créer un centre d'apprentissage et de démonstration à propos des véhicules électriques, où divers véhicules électriques et rechargeables, ainsi que l'équipement de recharge connexe, peuvent être présentés. <p>Programmes de rabais à l'achat de véhicules électriques hybrides^q</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ce programme, qui a débuté le 15 novembre 2006 et pris fin le 31 octobre 2010, offrait un rabais de 2 000 \$CAN à l'achat d'un véhicule hybride.
Alberta	<p>Programme de rabais destiné aux chauffeurs de taxi et exploitants de sociétés de taxis^r</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les propriétaires et exploitants de taxis qui achètent un véhicule hybride (essence/électricité) sont admissibles à un rabais pouvant atteindre 3 000 \$ CAN (rétroactif au 1^{er} juillet 2008).

Note : mg = milligramme(s); m³ = mètre(s) cube(s).

Sources:

m. Ministère des Transports de l'Ontario, *Programme d'encouragement pour les véhicules électriques*, non daté. <<http://www.mto.gov.on.ca/french/vehicles/electric/electric-vehicle-incentive-program.shtml>> (Consulté le 21 avril 2015)

n. *Ibid.*

o. C. Chubb, « Council votes in favour of Toronto taxicab licence », *CityNews Toronto*, 2013. <www.citynews.ca/2014/02/19/council-votes-in-favour-of-toronto-taxicab-licence/#__federated=1> (Consulté le 21 avril 2015)

p. Gouvernement du Manitoba, *Manitoba's electric vehicle road map: Driving toward fossil fuel freedom*, 2011. <www.gov.mb.ca/ia/energy/transportation/images/elec_vehicle_road_map.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

q. The Winnipeg Free Press, « Province ending \$2,000 rebate on hybrid vehicles », *The Winnipeg Free Press*, 2010. <www.winnipegfreepress.com/breakingnews/Province--104163053.html> (Consulté le 21 avril 2015)

r. Gouvernement de l'Alberta, *Energy efficiency rebates: Part of Alberta's climate change plan*, non daté. <www.insulspan.com/newsletter/0509news/AlbertaEnvironmentEnergyRebateCard.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)

Province	Politique
Colombie-Britannique	<p>Renewable and Low-Carbon Fuel Requirement Regulation^s</p> <ul style="list-style-type: none"> Le règlement définissant les exigences relatives aux carburants renouvelables et à faible teneur en carbone exige une réduction de 10 % des carburants de transport d'ici 2020, faisant ainsi la promotion d'une augmentation des ventes d'électricité au secteur des transports. <p>Clean Energy Act^t</p> <ul style="list-style-type: none"> La loi sur les sources d'énergie propres permet au gouvernement d'approuver les initiatives des sociétés de services publics visant à réduire les émissions, ce qui inclut leurs investissements destinés à multiplier le nombre de VE, et à construire et exploiter l'infrastructure d'alimentation. <p>Lignes directrices sur la mise en place de l'infrastructure de recharge des véhicules électriques^u</p> <ul style="list-style-type: none"> Elles servent de guide de référence aux sociétés de services publics, créant un plan exhaustif pour le nouveau marché des véhicules électriques. <p>Ville de Vancouver^v</p> <ul style="list-style-type: none"> Elle exige que toutes les nouvelles maisons unifamiliales et les sites publics de stockage de bicyclettes soient équipés de prises pour véhicules rechargeables, et exige une infrastructure de recharge pour 20 % des places de stationnement dans les immeubles résidentiels neufs. Politique pour des taxis écologiques : elle exige que tous les nouveaux taxis soient hybrides. <p>Ville de Kelowna^w</p> <ul style="list-style-type: none"> Programme Eco-Pass : un Eco-Pass récompense toute personne qui conduit un véhicule hybride; elle obtient le droit de stationner gratuitement pendant un an sur n'importe quelle place avec parcomètre au centre-ville de Kelowna. <p>Clean Energy Vehicle Program</p> <p>Le 5 novembre 2011, le gouvernement de la Colombie-Britannique a annoncé un financement de 14,3 millions de dollars pour le nouveau <i>Clean Energy Vehicle (CEV) Program</i> (Programme des véhicules propres). Il s'agit d'un programme complet destiné à offrir aux résidents de la province divers choix propres et verts pour leurs modes de transport. Il comprend divers incitatifs^x :</p> <ul style="list-style-type: none"> Programme incitatif aux points de vente de véhicules propres du ministère provincial des Transports : il offre un rabais pouvant atteindre 5 000 \$ sur le prix annoncé de véhicules neufs admissibles équipés de batteries électriques ou de piles à combustible, de VEH rechargeables et de véhicules au gaz naturel comprimé. Programme de rabais pour les bornes de recharge de véhicules électriques à domicile : il offre des rabais pouvant atteindre 5 000 \$ par borne de recharge résidentielle admissible. Programme d'infrastructure pour les véhicules propres : il fournit 6,3 millions de dollars pour l'infrastructure de recharge et d'alimentation en carburant, ce qui inclut des investissements pour la modernisation de l'infrastructure d'alimentation en hydrogène et la mise en œuvre d'un projet d'infrastructure comprenant 1 000 points de recharge, mené avec les collectivités, le secteur privé, les ONG, les établissements d'enseignement et les sociétés de services publics. <p>Le programme incitatif aux points de ventes de véhicules propres a atteint la limite de son budget et n'avait plus de fonds en date du 14 février 2014. Les rabais résidentiels à l'achat d'équipement de recharge de véhicules électriques admissible étaient offerts jusqu'au 31 mars 2014. Le fonds affecté au programme visait l'installation, d'ici le 31 mars 2013, d'un nombre de bornes de chargement de VE de niveau 2 pouvant atteindre 570, à l'échelle de la Colombie-Britannique^y.</p>
Île-du-Prince-Édouard	<p>Remboursement de taxe aux taxis hybrides</p> <ul style="list-style-type: none"> On rembourse la TVP jusqu'à un maximum de 3 000 \$ à l'achat (ou à la location pour au moins douze mois) de VEH. Ce programme, qui était le plus généreux au Canada, a été annulé le 1^{er} avril 2013^z.
Saskatchewan	<p>Rabais vert</p> <ul style="list-style-type: none"> En 2012, dans le cadre de son programme d'assurance des véhicules, le gouvernement de la Saskatchewan a annulé le rabais « vert » accordé aux conducteurs de véhicules écologiques. En vertu de ce programme, les propriétaires de véhicules hybrides (essence/électriques), ainsi que de véhicules à très faible consommation d'essence figurant sur une liste établie par Transports Canada avaient droit à un rabais, qui correspondait à une réduction de 20 % de leur prime d'assurance et de leurs frais d'immatriculation. En moyenne, SGI a accordé en 2011 un rabais de 210 \$ à chacun des 14 000 conducteurs^{aa}.

Note : mg = milligramme(s); m³ = mètre(s) cube(s).

Sources:

- s. Agence internationale de l'énergie (AIE), *Hybrid and electric vehicles: The electric drive captures the imagination*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, 2012. <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- t. *Ibid.*
- u. Electric Transportation Engineering Corporation, *Electric vehicle charging infrastructure—Deployment guidelines: British Columbia*, Version 1.0, 2009. <www.ceati.com/files/ev/BC%20EV%20Charging%20Infrastructure%20Guidelines.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- v. AIE, *Hybrid and electric vehicles: The electric drive captures the imagination*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, 2012. <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- w. City of Kelowna, *Eco-pass*, 2009. <www.kelowna.ca/CM/page1649.aspx> (Consulté le 21 avril 2015)
- x. Gouvernement de la Colombie-Britannique, *Clean energy vehicle incentive program extended*, 2013. <www.newsroom.gov.bc.ca/2013/03/clean-energy-vehicle-incentive-program-extended.html> (Consulté le 21 avril 2015)
- y. AIE, *Hybrid and electric vehicles: The electric drive captures the imagination*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, 2012. <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- z. Gouvernement de la Colombie-Britannique, « Transportation rebates and incentives ». *Live Smart BC*, non daté. <www.livesmartbc.ca/incentives/transportation/> (Consulté le 21 avril 2015)
- aa. Ministère des Finances et de l'Énergie de l'Île-du-Prince-Édouard, *Revenue tax (PST) refund*, 2013. <www.taxandland.pe.ca/index.php?number=17274&lang=E> (Consulté le 21 avril 2015)
- bb. CBC, « SGI green rebate program ends ». *CBC News*, 2012. <www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/sgi-green-rebate-program-ends-1.1181246> (Consulté le 21 avril 2015)

Sources d'information à propos des politiques canadiennes

- <www.ieahev.org/by-country/canada-policy-and-legislation/>
- <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf>
- <http://negc.org/uploads/file/AFV_Conference/11-ADaneau_PAVE_MRNF_Eng.pdf>
- <www.mto.gov.on.ca/english/vehicles/electric/about-electric-vehicle.shtml>
- <<http://emc-mec.ca/files/CanadianFundingProgramforEVs-Updated-JBavril2011.pdf>>
- <www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/sgi-green-rebate-program-ends-1.1181246>
- <www.gov.mb.ca/ia/energy/transportation/images/elec_vehicle_road_map.pdf>
- <www.fleetcarma.com/canada-electric-vehicle-policies/>
- <www.insulspan.com/newsletter/0509news/AlbertaEnvironmentEnergyRebateCard.pdf>
- <www.livesmartbc.ca/incentives/transportation/ - cevinbc>
- <www.ptboard.bc.ca/documents/2013_Eco_Friendly_Taxi_Guide.pdf>
- <www.hybridcars.com/region-by-region/>
- <www.blogto.com/city/2014/02/5_things_to_know_about_the_new_toronto_taxi_rules/>
- <www.citynews.ca/2014/02/19/council-votes-in-favour-of-toronto-taxicab-licence/>

Politiques faisant la promotion de l'achat de véhicules à propulsion électrique au Mexique

La publication, en juin 2013, de la Norme officielle mexicaine (NOM) 163, consacrée aux émissions de dioxyde de carbone des tuyaux d'échappement des véhicules légers et à leur équivalence en économie de carburant (qui s'applique aux automobiles neuves dont le poids brut peut aller jusqu'à 3 857 kilos⁹⁷) va sans doute favoriser l'achat de VPE. Cette norme vise à harmoniser les normes d'économie de carburant des véhicules neufs au Mexique avec les normes applicables au Canada et aux États-Unis, établies à 14,9 kilomètres par litre (35 milles par gallon)⁹⁸. Cette norme serait conforme à la réglementation environnementale du Canada et des États-Unis, où se vend la majorité des véhicules produits au Mexique et exportés.

Même si cette norme ne fait aucune référence aux VEH et si elle vise à inciter les constructeurs d'automobiles à faire baisser la consommation des véhicules, à court terme, on prévoit que les constructeurs pourraient commencer à lancer leurs modèles de VEH au Mexique. La norme s'applique aux modèles 2014, et devrait devenir plus stricte pour les années modèles 2015 et 2016.

Certains VEH ne sont pas assujettis au programme d'inspection des véhicules de la ville de Mexico (qu'on a baptisé le programme « Ne circule pas aujourd'hui »), et peuvent circuler tous les jours de la semaine. L'accord relatif au programme prévoit des mesures qui limitent les déplacements de véhicules à moteur dans le District fédéral, afin de contrôler et de réduire la pollution atmosphérique et les effets sur l'environnement de la circulation automobile. Les véhicules exemptés des tests d'émissions obligatoires et les déplacements limités dans le cadre du programme « Ne circule pas aujourd'hui » sont listés dans le tableau B2 ci-après.

⁹⁷ Norma Oficial Mexicana (NOM), *Emisiones de bióxido de carbono (CO₂) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3 857 kilogramos (NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013)*, 21 juin 2013. <http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5303391&fecha=21/06/2013> (Consulté le 21 avril 2015)

⁹⁸ Mexican Automotive. Questions à propos de la NOM 163 et de sa suspension permanente, 2010. <<http://mexicanautomotive.com/en/home/84-october-2012/364--questions-on-official-mexican-standard-163-and-its-continued-suspension>> (Consulté le 30 avril 2014.)

Tableau B2. VPE exemptés du test d'émissions des véhicules et du programme « Ne circule pas aujourd'hui » au Mexique

Marque	Modèle
Hyundai	Blue City Híbrido (gaz naturel/électrique)
Hyundai	HD 120 (gaz naturel)
Hyundai	Super Aero City (gaz naturel)
Toyota	Prius (électrique-essence)
Vehizero	Ecco C (électrique-essence)
Nissan	Leaf (électrique)
BMW	ActiveHybrid 5 (électrique-essence)
BMW	X6 ActiveHybrid (électrique-essence)
BMW	Series 3, hybride actif
BMW	Mini E
Porsche	Cayenne hybride V6 3.0
Volkswagen	Touareg hybride V6 3.0

Source :

Tiré (avec modifications) de *Secretaría del medio ambiente* (Sedema, ministère de l'Environnement), *Hoy No Circula* (Ne circule pas aujourd'hui), non daté. <www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/component/content/article/80-verificacion-vehicular-hoy-no-circula/185-verificacion-vehicular> (Consulté le 30 avril 2014)

Notez que les modèles de VEH Honda ne figurent pas dans le tableau, et que certains des véhicules inclus ne sont pas encore commercialisés au Mexique. On prévoit que cette liste inclura de nouveaux modèles à l'avenir.

Les programmes d'inspection des véhicules et « Ne circule pas aujourd'hui » ont également été mis en œuvre dans 15 États mexicains : Aguascalientes, Chihuahua, Distrito Federal, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Nuevo León, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, Veracruz et Yucatán.

Les incitatifs économiques destinés à encourager les gens à acheter des VPE n'existent pas encore au Mexique. Des initiatives comme le crédit d'impôt fédéral à l'achat de VPE, la réduction de la taxe sur les véhicules neufs (*Impuesto sobre Automóviles Nuevos* — ISSAN), ou la réduction des taux de financement à l'achat de ces véhicules ne sont pas encore en place. Pour mettre en œuvre ces politiques économiques au Mexique, il faudrait un accord entre des secteurs clés, par exemple : constructeurs d'automobiles et concessionnaires, *Secretaría de Hacienda y Crédito Público* (ministères des Finances), *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Semarnat, ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles), *Secretaría de Salud* (ministère de la Santé) et d'autres autorités locales.

Politiques faisant la promotion de l'achat de VPE aux États-Unis

De nombreux États envisagent divers incitatifs afin de promouvoir les véhicules hybrides et les véhicules électriques rechargeables⁹⁹. En date du mois de novembre 2013, 39 États et le District de Columbia avaient créé des incitatifs accordant des exemptions dans les voies réservées au covoiturage, des incitatifs monétaires, l'exemption de l'inspection du véhicule ou des tests d'émissions, des incitatifs au stationnement ou une baisse des coûts des services publics. Les incitatifs monétaires, qui incluent les crédits d'impôt et la réduction des frais d'immatriculation, comptent parmi les moyens les plus populaires de promotion de l'utilisation de ces véhicules. Les rabais ou crédits d'impôt consentis par les États vont de 1 000 \$ au Maryland à 6 000 \$ au Colorado. Au moins 94 projets de lois étaient en attente d'adoption dans 20 États en 2013; ils visent à encourager l'achat et l'utilisation plus systématique de véhicules hybrides et de véhicules électriques personnels (VEP). Au New Jersey, au moins 38 projets de loi déposés en 2013 encourageaient le développement de l'infrastructure destinée aux véhicules écologiques, comme les bornes de recharge, grâce au versement d'incitatifs monétaires à l'achat de ces véhicules et à la création d'autres places de stationnement pour les hybrides et les VEP. En outre, les sociétés de services publics du Minnesota offrent des réductions sur le coût de l'électricité, mais aucun incitatif n'a été entériné par l'assemblée des représentants de l'État. Les incitatifs fédéraux aident à développer le marché des hybrides et des VEP.

Un crédit d'impôt fédéral de 7 500 \$ est offert en plus des incitatifs des États à l'achat de véhicules électriques. Ce crédit expirera une fois que 200 000 VEP admissibles auront été vendus par chaque constructeur. Les autres incitatifs comprennent des crédits d'impôt pour l'infrastructure de recharge, les subventions aux projets de recherche, les prêts pour élaboration de technologies appliquées aux carburants de remplacement et les exigences imposées aux parcs de véhicules fédéraux.

Note : L'information présentée ici provient des sources suivantes :

- K. Hartman, *National Conference of State Legislatures*, « State efforts promote hybrid and electric vehicles », 2015. <www.ncsl.org/research/energy/state-electric-vehicle-incentives-state-chart.aspx#hybrid> (Consulté le 21 avril 2015.)
- B. Berman, « Hybrid and plug-in incentives and rebates: Region by region », *Hybrid Cars*, 2010. <www.hybridcars.com/region-by-region/> (Consulté le 21 avril 2015.)

Incitatifs offerts aux États-Unis à l'achat de véhicules hybrides et rechargeables, par État^{100,101}

Alabama

Crédit d'impôt pour l'équipement : Maximum de 75 \$ offert aux particuliers pour l'installation de bornes de recharge de VE.

Tarif incitatif pour la charge des véhicules électriques rechargeables : Alabama Power offre des tarifs spéciaux pour l'électricité achetée en vue de charger des VEP à usage domestique ou non.

Arizona

Exemption des exigences du covoiturage : Les véhicules écologiques admissibles peuvent emprunter les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord.

⁹⁹ K. Hartman, *State efforts to promote hybrid and electric vehicles*, National Conference of State Legislatures, 2015. <www.ncsl.org/research/energy/state-electric-vehicle-incentives-state-chart.aspx> (Consulté le 21 avril 2015)

¹⁰⁰ *Ibid.*

¹⁰¹ B. Berman, « Hybrid and plug-in incentives and rebates: Region by region », *Hybrid Cars*, 2010. <www.hybridcars.com/region-by-region/> (Consulté le 21 avril 2015)

Crédit d'impôt pour l'équipement d'alimentation des véhicules électriques : Maximum de 75 \$ offert aux particuliers pour l'installation de bornes de recharge de VE.

Réduction de la taxe sur le permis pour les véhicules à carburant de remplacement : Réduction de la taxe sur le permis annuel pour un véhicule électrique – minimum de 5 \$ par an.

Tarif pour la charge des véhicules électriques rechargeables : Glendale Water and Power offre un rabais de 0,33 \$ par jour sur la facture d'électricité aux clients résidentiels et commerciaux possédant un VEP admissible. De plus, l'Arizona Public Service Company propose un tarif spécial sur l'électricité aux propriétaires d'un VEP admissible.

Californie

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent emprunter les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord. De plus, ils sont exemptés des frais de péage pour ces voies réservées.

Clean Vehicle Rebate Project (CVRP, Projet de rabais pour véhicules propres) : Offre des rabais à l'achat ou à la location de véhicules admissibles. Les rabais peuvent atteindre 2 500 \$ pour les véhicules légers à zéro émission et hybrides rechargeables que la *California Air Resources Board* (ARB, Commission des ressources atmosphériques) a approuvés et certifiés.

California Alternative Energy and Advanced Transportation Financing Authority (CAEATFA, Autorité de financement des énergies de remplacement et du transport évolué) : Offre un financement pour l'acquisition de biens utilisés pour élaborer et commercialiser des technologies de transport de pointe qui réduiront la pollution et la consommation d'énergie, et favoriseront le développement économique.

Programme de rabais Drive Clean! : Le *San Joaquin Valley Air Pollution Control District* (District de lutte contre la pollution atmosphérique dans la vallée de San Joaquin) administre le programme de rabais Drive Clean!, qui offre des rabais pouvant atteindre 3 000 \$ à l'achat ou à la location de véhicules neufs admissibles, incluant les véhicules au gaz naturel et les véhicules électriques hybrides.

Rabais sur l'assurance : Plusieurs compagnies d'assurance offrent un rabais pouvant atteindre 10 % sur certaines polices protégeant les propriétaires de VEH et de véhicules à carburant de remplacement.

Incitatifs pour les véhicules à carburant de remplacement : Grâce à l'*Alternative and Renewable Fuel Vehicle Technology Program* (Programme des technologies pour véhicules à carburant renouvelable/de remplacement), la *California Energy Commission* (Commission de l'énergie de la Californie) offre des incitatifs financiers aux entreprises, aux constructeurs de véhicules/concepteurs de technologies, aux responsables de la formation de la main-d'œuvre, aux propriétaires de parcs de véhicules, aux consommateurs et aux établissements d'enseignement, afin d'élaborer et de commercialiser des carburants de remplacement et renouvelables, et des technologies de transport évoluées.

Stationnement gratuit pour les VE : Sacramento offre le stationnement gratuit aux particuliers ou aux petites entreprises certifiées par l'*Office of Small Business Development* (Bureau du développement des petites entreprises) de la ville qui sont propriétaires ou locataires d'un VE, grâce à une vignette de stationnement pour VE leur donnant accès aux espaces désignés au centre-ville. Seuls les véhicules entièrement électriques sont admissibles.

Stationnement gratuit pour les VE : Parcomètres gratuits à San Jose, Hermosa Beach et Santa Monica pour les véhicules électriques ayant un autocollant *Clean Air*.

Stationnement pour les véhicules à carburant de remplacement : Le *California Department of General Services* (DGS, ministère des Services généraux) et le *California Department of Transportation* (DOT, ministère des Transports) sont tenus d'offrir au moins 50 espaces de stationnement et des stationnements incitatifs possédés et exploités par le DOT afin d'encourager l'utilisation de véhicules à carburant de remplacement.

Colorado

Crédit d'impôt pour véhicules à carburant de remplacement/évolués : Un crédit d'impôt pouvant atteindre 6 000 \$ est offert pour un véhicule à moteur qui utilise un carburant de remplacement ou s'y convertit, un véhicule électrique hybride ou un véhicule dont la source d'alimentation est remplacée par un système utilisant un carburant de remplacement.

Subventions à l'achat d'équipement pour véhicules rechargeables et véhicules électriques : Le *Colorado Energy Office* (CEO, Bureau de l'énergie du Colorado) et le *Regional Air Quality Council* (RAQC, Conseil régional sur la qualité de l'air) offrent des subventions appuyant l'intégration de VE aux parcs de véhicules. Les subventions du RAQC couvrent 80 % du coût marginal d'un VEP admissible, jusqu'à concurrence de 8 260 \$. Les subventions du CEO et du RAQC financent 80 % du coût de l'équipement pour l'entretien des véhicules électriques, jusqu'à concurrence de 6 260 \$.

Fonds pour véhicules électriques : Il fournit des subventions aux administrations locales, aux propriétaires d'immeubles résidentiels multifamiliaux et aux collectivités pour l'installation de bornes de recharge pour véhicules électriques.

Connecticut

Financement des véhicules à carburant de remplacement : Le *Connecticut Clean Fuel Program* (Programme de carburants propres) offre un financement aux municipalités et aux organismes publics qui achètent, exploitent et entretiennent des véhicules utilisant du carburant de remplacement et des technologies de pointe, ce qui inclut les véhicules au gaz naturel comprimé, au propane, à l'hydrogène et électriques.

Stationnement des véhicules à carburant de remplacement (VCR) et électriques hybrides : Stationnement gratuit dans toutes les rues pour les VCR et les VEH immatriculés à New Haven.

Delaware

Crédit énergétique pour véhicules électriques : Les clients du réseau électrique possédant au moins un véhicule branché sur ce réseau ont droit à des crédits de kilowatts-heure pour l'énergie envoyée dans le réseau par la batterie de leur VE, au même taux que ce que paie le client pour recharger cette batterie.

District de Columbia

Exemption de taxe sur le titre pour les véhicules à carburant de remplacement et écoénergétiques : Les véhicules à carburant de remplacement admissibles sont exemptés de la taxe d'accise imposée sur le certificat de titre initial.

Réduction des frais d'immatriculation : Le propriétaire d'un véhicule à moteur neuf dont la consommation moyenne en ville (estimée par l'*Environmental Protection Agency* (Agence de protection de l'environnement)) est d'au moins 40 milles au gallon a droit à un rabais de 36 \$ sur ses frais d'immatriculation pour les deux premières années.

Floride

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord. Le véhicule doit arborer un autocollant délivré par la *Florida Division of Motor Vehicles* (Division des véhicules à moteur), qui

est renouvelé annuellement. Les véhicules ayant cet autocollant peuvent aussi utiliser les voies réservées sans acquitter le péage.

Financement de l'équipement pour véhicules électriques : Les propriétaires peuvent demander à leur administration locale une aide financière pour l'installation d'équipement destiné aux véhicules électriques à leur domicile, ou signer une entente de financement avec cette administration aux mêmes fins.

***Electric Vehicle Insurance Regulation* :** Ce règlement protège les propriétaires d'un véhicule électrique contre les éventuelles surprimes des compagnies d'assurance.

Géorgie

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord.

Crédit d'impôt pour les véhicules à carburant de remplacement : Un crédit d'impôt est accordé aux personnes qui achètent ou louent un VCR neuf ou convertissent leur véhicule pour qu'il fonctionne uniquement avec du carburant de remplacement. Ce crédit représente 10 % du coût du véhicule, jusqu'à concurrence de 2 500 \$.

Crédit d'impôt pour véhicules à zéro émission : Un crédit d'impôt est accordé (20 % du coût ou jusqu'à 5 000 \$) aux personnes qui achètent ou louent un véhicule neuf à zéro émission.

Crédit d'impôt pour l'équipement d'alimentation des véhicules électriques : On offre un crédit d'impôt correspondant à 10 % du coût de l'équipement de recharge du véhicule électrique, jusqu'à concurrence de 2 500 \$.

Hawaï

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord.

Exemption des frais de stationnement : Les VE dotés d'une plaque d'immatriculation qui les identifie sont exemptés de certains frais de stationnement facturés par toute autorité du gouvernement de l'État.

Exigence liée au stationnement : Les stationnements publics comprenant au moins 100 places doivent inclure au moins un espace réservé aux VE et une borne de recharge.

Idaho

Exemption de l'inspection des véhicules : Les VEH et les VE sont exemptés des programmes étatiques d'inspection et d'entretien des véhicules à moteur.

Illinois

Rabais pour les véhicules à carburant de remplacement et pour ces carburants : L'*Illinois Alternate Fuels Rebate Program* (Programme de rabais pour les carburants de remplacement) offre un rabais pouvant atteindre 4 000 \$ sur le coût d'achat d'un véhicule à carburant de remplacement.

Rabais sur l'équipement d'alimentation des véhicules électriques : L'*Illinois Department of Commerce and Economic Opportunity* (ministère du Commerce et des Débouchés économiques) offre des rabais visant à compenser le coût de l'équipement d'alimentation des véhicules électriques de niveau 2. Le rabais maximal possible est de 49 000 \$ ou 50 % du coût total du projet pour un maximum de 15 équipements, selon le moins élevé des deux montants.

Réduction des frais d'immatriculation des véhicules électriques : Le propriétaire d'un VE peut s'inscrire pour obtenir une réduction de ses frais d'immatriculation; ce montant ne dépassera pas 35 \$ pour une période de deux ans ou 18 \$ pour une année.

Subventions pour les véhicules électriques rechargeables et leur infrastructure : Les organisations offrant le partage de véhicules dans l'État de l'Illinois peuvent avoir droit à des subventions représentant un maximum de 25 % du coût des projets admissibles, ce qui inclut le coût de l'achat d'un VEP neuf et la construction de l'infrastructure de recharge.

Indiana

Tarif incitatif pour la recharge des véhicules électriques : Indianapolis Power & Light Company (IPL) offre des tarifs spéciaux pour les VE rechargeables appartenant à des particuliers ou faisant partie d'un parc.

Crédit sur l'équipement d'alimentation des véhicules électriques et incitatif à la recharge : Le *IN-Charge Electric Vehicle Program* de NIPSCO offre un crédit pouvant atteindre 1 650 \$ pour l'achat et l'installation d'équipement d'alimentation des VE, ainsi que la gratuité de la recharge des véhicules électriques en dehors des heures de pointe.

Iowa

Subventions de démonstration de véhicules à carburant de remplacement : L'*Iowa Department of Natural Resources* (ministère des Ressources naturelles) mène des activités de promotion et de sensibilisation afin d'encourager l'utilisation de carburants de remplacement et, selon le financement disponible, accorde des subventions de démonstration aux personnes qui achètent des véhicules fonctionnant avec du carburant de remplacement, ce qui inclut les véhicules électriques.

Réduction des frais d'immatriculation : Les frais annuels d'immatriculation d'un VE sont de 25 \$, à moins que le véhicule ait plus de cinq ans, auquel cas ils sont réduits à 15 \$.

Louisiane

Crédit d'impôt pour les véhicules à carburant de remplacement et l'infrastructure d'alimentation : On offre un crédit d'impôt correspondant à 50 % du coût de la conversion ou de l'achat d'un véhicule à carburant de remplacement ou de la construction d'un poste d'alimentation en carburant de remplacement. Autre possibilité : un crédit d'impôt équivalant à 10 % du coût du véhicule à moteur, jusqu'à concurrence de 3 000 \$ pour les véhicules à carburant de remplacement immatriculés dans l'État.

Autorisation de prêts pour les véhicules à carburant de remplacement : Le *Louisiana Department of Natural Resources* (ministère des Ressources naturelles) administrera l'*AFV Revolving Loan Fund* afin d'offrir des prêts aux administrations locales (villes, paroisses, commissions scolaires et subdivisions municipales) pour couvrir le coût de la conversion de véhicules conventionnels en véhicules à carburant de remplacement (VCR), ou le coût marginal d'achat d'un VCR neuf.

Maine

Dispositions incitatives pour l'assurance des véhicules propres : Un assureur peut créditer ou rembourser toute portion d'une prime d'assurance visant un véhicule propre, afin d'encourager ses clients à utiliser ce type de véhicule.

Maryland

Crédit de taxe pour véhicules électriques rechargeables : Du 1^{er} juillet 2013 au 30 juin 2014, on offre un crédit pouvant atteindre 1 000 \$ sur la taxe d'accise imposée à l'achat d'un véhicule électrique rechargeable admissible.

Crédit d'impôt pour l'équipement d'alimentation des véhicules électriques (EAVE) : La *Maryland Energy Administration* (MEA, Autorité d'administration de l'énergie) offre un crédit d'impôt équivalant à 20 % du coût de l'EAVE admissible. Ce crédit ne peut pas dépasser le moins élevé des deux montants suivants : 400 \$ ou l'impôt sur le revenu de l'État pour cette année fiscale.

Michigan

Rabais sur l'EAVE : Indiana Michigan Power offre des rabais pouvant atteindre 2 500 \$ aux clients résidentiels qui achètent ou louent un véhicule électrique rechargeable neuf et installent un EAVE de niveau 2 avec compteur séparé. Les clients doivent aussi s'inscrire au barème tarifaire d'Indiana Michigan Power selon l'heure d'utilisation des VEP. Le rabais est offert aux 250 premiers clients admissibles qui soumettent leur demande dûment remplie. Consumers Energy offre à ses clients admissibles le remboursement d'un montant maximal de 2 500 \$ lors de l'achat, de l'installation et du câblage de l'EAVE de niveau 2 admissible. En outre, DTE Energy offrira jusqu'à 2 500 \$ à l'achat et à l'installation d'EAVE avec compteur séparé aux 2 500 premiers clients admissibles qui achèteront un VEP et s'inscriront au barème tarifaire de DET pour les VEP.

Réduction du tarif de recharge des véhicules électriques : Indiana Michigan Power et Consumers Energy offrent un tarif spécial selon l'heure d'utilisation aux clients résidentiels qui possèdent un VEP admissible. DTE Energy offre un tarif réduit sur l'électricité aux clients résidentiels admissibles qui rechargent leur VEP en dehors des heures de pointe.

Exemption de l'inspection des véhicules : Les véhicules à carburant de remplacement sont exemptés de l'inspection obligatoire des émissions.

Minnesota

Réduction du tarif de recharge des véhicules électriques : Dakota Electric offre un tarif réduit sur l'électricité utilisée pour recharger des véhicules électriques en dehors des heures de pointe.

Mississippi

Fonds de prêts renouvelables : Depuis le 3 juillet 2013, la *Mississippi Development Authority* (Autorité de développement du Mississippi) doit créer un programme de prêts renouvelables visant à offrir des prêts sans intérêt aux districts scolaires publics et aux municipalités pour l'achat d'autobus scolaires à carburant de remplacement et d'autres véhicules à moteur, la conversion d'autobus scolaires et d'autres véhicules à moteur pour l'utilisation de carburants de remplacement, l'achat d'équipement fonctionnant aux carburants de remplacement et l'installation de postes d'alimentation.

Missouri

Exemption de l'inspection des véhicules : Les véhicules à carburant de remplacement sont exemptés des tests d'émissions exigés par l'État.

Montana

Crédit d'impôt pour la conversion à un véhicule à carburant de remplacement : Les entreprises ou les particuliers ont droit à un crédit d'impôt correspondant à un maximum de 50 % des coûts de l'équipement et de la main-d'œuvre pour la conversion de véhicules afin qu'ils utilisent un carburant de remplacement.

Nebraska

Prêts pour l'achat de véhicules à carburant de remplacement et l'infrastructure d'alimentation : Le *Nebraska Energy Office* (Office de l'énergie) administre le *Dollar and Energy Saving Loan Program*, qui offre des prêts à faible taux d'intérêt pour divers projets liés aux carburants de remplacement, ce qui inclut le remplacement de véhicules conventionnels par des VCR,

l'achat de VCR neufs, la conversion de véhicules conventionnels afin qu'ils utilisent un carburant de remplacement et la construction ou l'achat d'une borne ou d'un équipement d'alimentation.

Nevada

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord.

Tarif incitatif pour la recharge des véhicules électriques : NV Energy offre des tarifs réduits sur l'électricité aux clients résidentiels qui chargent un véhicule électrique hybride rechargeable en dehors des heures de pointe.

Exemption pour les taxis hybrides : Les véhicules électriques admissibles utilisés comme taxis peuvent demeurer en activité pendant 24 mois de plus que les limites existantes. Ces limites obligent les taxis à rouler pendant un maximum de 67 mois quand ils sont neufs ou de 55 mois quand ils sont d'occasion, avec moins de 30 000 milles au compteur.

Exemption de l'inspection des véhicules : Les VCR sont exemptés des tests d'émissions obligatoires. Un VEH neuf est exempté de ces tests pendant les six premières années, après quoi il doit subir des tests d'émissions chaque année.

Exemption des frais de stationnement : Toutes les autorités locales qui administrent des zones de stationnement avec parcomètres doivent établir un programme pour permettre aux VCR de se stationner sans frais.

New Jersey

Exemption des exigences du covoiturage : Les véhicules admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage situées entre les échangeurs 11 et 14 de la New Jersey Turnpike.

Incitatif de péage pour les véhicules : La New Jersey Turnpike Authority offre un rabais de 10 % sur le péage en dehors des heures de pointe sur la New Jersey Turnpike et la Garden State Parkway, grâce au programme NJ EZ-Pass, aux conducteurs de véhicules qui peuvent parcourir 45 milles par gallon et satisfont à la norme californienne des véhicules à niveau d'émissions ultra-faible. Ce rabais expire le 30 novembre 2013.

Exemption de taxe pour les véhicules à zéro émission : Les VZO vendus ou loués au New Jersey sont exemptés des taxes de vente et d'utilisation de l'État.

New York

Exemption des exigences du covoiturage : Grâce au programme Clean Pass, les véhicules hybrides et les VE admissibles peuvent emprunter les voies réservées au covoiturage de la Long Island Expressway.

Crédit d'impôt pour la recharge des véhicules à carburant de remplacement : Les règlements S.B. 2609 et A.B. 3009, adoptés en 2013, offrent un crédit d'impôt correspondant à 50 % du coût d'achat et d'installation d'équipement d'alimentation des véhicules à carburant de remplacement et de recharge de véhicules électriques, jusqu'à concurrence de 5 000 \$. Ce crédit sera offert jusqu'au 31 décembre 2017.

Caroline du Nord

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord.

Financement des véhicules électriques : La *Local Government Federal Credit Union* (Coopérative de crédit fédérale des administrations locales) offre des prêts pour l'achat de véhicules

écoénergétiques neufs ou d'occasion. Le taux d'intérêt est inférieur de 0,5 % au taux habituellement pratiqué pour les véhicules traditionnels.

Exemption de l'inspection des véhicules : Les VEP admissibles sont exemptés des tests d'émissions exigés par l'État.

Caroline du Sud

Crédit d'impôt pour les VEH rechargeables : Pour les années d'imposition antérieures à 2017, l'État offre un crédit d'impôt à l'achat ou à la location d'un VEHR neuf. Ce crédit est de 667 \$, plus 111 \$ si la batterie du véhicule a une capacité d'au moins cinq kWh, et 111 \$ de plus par kWh additionnel, jusqu'à concurrence de 2 000 \$.

Crédit d'impôt pour les véhicules à pile à combustible : Les résidents qui possèdent un véhicule à pile à combustible ont droit à un crédit d'impôt d'État égal à 20 % du crédit fédéral.

Ohio

Incitatifs pour l'acquisition d'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement : L'*Alternative Fuel Transportation Grant Program* (Programme de subventions aux modes de transport à carburant de remplacement) offre des subventions et des prêts couvrant jusqu'à 80 % du coût d'achat et d'installation des équipements d'alimentation en carburant de remplacement.

Oklahoma

Crédit d'impôt pour l'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement : Pour les années fiscales antérieures au 1^{er} janvier 2015, un crédit d'impôt est offert; il correspond à un maximum de 75 % du coût de l'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement, ce qui inclut les bornes de recharge des véhicules électriques.

Crédit d'impôt pour véhicules à carburant de remplacement : Pour les années fiscales antérieures au 1^{er} janvier 2015, un crédit d'impôt unique est offert; il correspond à 50 % du coût marginal d'un VCR neuf ou de la conversion d'un véhicule pour qu'il utilise du carburant de remplacement. L'État offre aussi un crédit d'impôt correspondant à 10 % du coût total du véhicule, jusqu'à concurrence de 1 500 \$, si l'on ne peut pas déterminer le coût marginal d'un VCR neuf ou lorsqu'un VCR est revendu, à condition qu'on n'ait pas déjà accepté un crédit d'impôt pour ce véhicule.

Crédit d'impôt pour la fabrication de véhicules : Les constructeurs de véhicules sont admissibles à un crédit d'impôt pour les VE (incluant ceux qui circulent à basse ou à moyenne vitesse) fabriqués le ou après le 1^{er} juillet 2010. Les VE qu'on peut légalement conduire sur les autoroutes de l'État sont admissibles à un crédit de 2 000 \$ par véhicule.

Oregon

Crédit d'impôt pour l'infrastructure résidentielle d'alimentation en carburant de remplacement : Grâce au programme *Residential Energy Tax Credits* (Crédits d'impôt pour l'énergie résidentielle), les personnes admissibles peuvent recevoir un crédit d'impôt correspondant à 25 % des coûts de leur projet d'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement, jusqu'à concurrence de 750 \$.

Crédit d'impôt pour l'infrastructure commerciale d'alimentation en carburant de remplacement : Les propriétaires d'entreprise et d'autres intervenants peuvent être admissibles à un crédit d'impôt représentant 35 % des coûts admissibles des projets d'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement.

Exemption de l'équipement antipollution : Les constructeurs d'origine de véhicules au gaz naturel et électriques ne sont pas tenus de les équiper d'un système antipollution certifié.

Programme de prêts pour les véhicules à carburant de remplacement : Le règlement S.B. 583 établit l'*Alternative Fuel Vehicle Revolving Fund* (Fonds renouvelable pour les véhicules à carburant de remplacement), qui permet aux organismes publics d'emprunter de l'argent au fonds pour acheter des véhicules à carburant de remplacement.

Pennsylvanie

Financement des véhicules à carburant de remplacement : Le programme *Alternative Fuels Incentive Grant* (AFIG, Subvention d'encouragement des carburants de remplacement) offre une aide financière aux projets admissibles et des renseignements sur les carburants de remplacement, ce qui inclut les VEH rechargeables. Ce programme offre aussi des rabais sur les véhicules à carburant de remplacement afin d'aider les gens à assumer le coût marginal de VCR neufs. Il existe des rabais de 3 000 \$ sur les VE et les VEHR admissibles.

Rabais sur les véhicules électriques rechargeables : PECO offre des rabais de 50 \$ aux clients résidentiels qui achètent un VEP neuf admissible.

Rhode Island

Exemption de taxe pour les véhicules à carburant de remplacement : La ville de Warren accorde une exemption de la taxe d'accise pouvant atteindre 100 \$ pour certains VCR admissibles immatriculés à Warren.

Tennessee

Exemption des exigences du covoiturage : Les VE et VEHR admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord.

Texas

Subventions pour l'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement : La *Texas Commission on Environmental Quality* (Commission sur la qualité de l'environnement) administre le programme *Alternative Fueling Facilities* (Installations adaptées aux carburants de remplacement), qui fournit des subventions représentant 50 % des coûts admissibles, jusqu'à concurrence de 500 000 \$, pour construire, reconstruire ou acquérir une installation permettant de stocker, comprimer ou distribuer des carburants de remplacement, incluant l'électricité, dans les régions du Texas où les normes de qualité de l'air ne sont pas respectées.

Incitatif pour l'équipement d'alimentation des véhicules électriques : Les clients d'Austin Energy qui possèdent un véhicule électrique rechargeable ont droit à un rabais de 50 % ou d'un maximum de 1 500 \$ sur le coût d'achat et d'installation d'un EAVE admissible de niveau 2.

Stationnement gratuit pour les véhicules hybrides : Stationnement gratuit sur les places avec parcomètre du centre-ville de San Antonio. Les véhicules doivent arborer la plaque-étiquette des véhicules hybrides.

Utah

Exemption des exigences du covoiturage : Les véhicules admissibles peuvent utiliser les voies réservées au covoiturage peu importe le nombre d'occupants à bord. Ils doivent arborer un autocollant spécial pour les carburants propres délivré par le ministère des Transports de l'Utah.

Exemption de taxe pour les carburants de remplacement : Le propane, le gaz naturel comprimé, le gaz naturel liquéfié et l'électricité utilisés pour alimenter les véhicules à moteur sont exemptés des taxes d'État sur le carburant.

Crédit d'impôt pour véhicules à carburant de remplacement et véhicules écoénergétiques : Le règlement H.B. 96, entré en vigueur en 2013, stipule que les véhicules neufs à carburant propre et à

faible consommation de carburant peuvent être admissibles à un crédit de 605 \$; cela inclut certains VE et VEH. Par ailleurs, on offre un crédit d'impôt de 50 % ou d'un maximum de 2 500 \$ sur le coût de conversion d'un véhicule afin qu'il fonctionne au propane, au gaz naturel ou à l'électricité.

Stationnement gratuit pour les véhicules électriques : Stationnement gratuit sur les places avec parcomètre à Salt Lake City pour les véhicules électriques dotés d'une plaque d'immatriculation *Clean Air*.

Vermont

Crédit d'impôt pour la recherche-développement consacrée aux véhicules à carburant de remplacement et aux véhicules de pointe : Les entreprises du Vermont considérées comme appartenant au secteur des hautes technologies qui participent exclusivement à la conception, à l'élaboration et à la fabrication de VCR, de VEH, de véhicules entièrement électriques ou de technologies énergétiques utilisant des carburants autres que les combustibles fossiles ont droit à un maximum de trois crédits d'impôt parmi les suivants : 1) crédit sur l'impôt prélevé à la source; 2) crédit pour les activités admissibles de recherche-développement; 3) crédit à l'exportation; 4) crédit pour les investissements des petites entreprises; 5) crédit pour l'expansion du secteur de la haute technologie.

Virginie

Exemption des exigences du covoiturage : Dans le couloir I-95/I-395, seuls les véhicules dotés d'une plaque d'immatriculation *Clean Special Fuel* avant le 1^{er} juillet 2006 peuvent circuler dans les voies réservées au covoiturage. Dans le couloir de la I-66, seuls les véhicules dotés d'une plaque d'immatriculation *Clean Special Fuel* délivrée avant le 1^{er} juillet 2011 peuvent circuler dans les voies réservées au covoiturage.

Subventions et prêts pour les carburants de remplacement : On utilise l'*Alternative Fuels Revolving Fund* (Fond renouvelable pour les carburants de remplacement) pour accorder des prêts et des subventions aux organismes d'État et aux administrations locales pour appuyer les programmes de VCR, financer l'entretien, l'utilisation, l'évaluation ou la mise à l'essai des VCR, financer les conversions de véhicules ou améliorer l'infrastructure d'alimentation en carburant de remplacement.

Réduction de tarif pour la recharge de véhicules électriques : Dominion Virginia Power offre des tarifs réduits sur l'électricité aux clients résidentiels qui rechargent leur véhicule électrique en dehors des heures de pointe.

Fonds de conversion aux véhicules à carburant de remplacement : Ce fonds aide les organismes d'État à assumer le coût marginal de la conversion d'un véhicule existant appartenant à l'État en véhicule à carburant de remplacement, ou la différence de coût entre un véhicule traditionnel et un véhicule à carburant de remplacement.

Exemption de l'inspection des véhicules : Les VCR et les VEH sont exemptés des tests d'émissions.

Washington

Exemption de taxe pour les véhicules à carburant de remplacement : Les automobiles neuves, les camions légers et les véhicules à passagers de poids moyen qui utilisent uniquement du carburant de remplacement sont exemptés des taxes de vente et d'utilisation que l'État applique aux véhicules à moteur.

Subventions de démonstration de véhicules électriques rechargeables : Le *Washington Department of Commerce* (ministère du Commerce) administre le *Vehicle Electrification Demonstration Grant Program* (Programme de subventions aux projets de démonstration de l'électrification de véhicules), qui fait partie de l'*Energy Freedom Program*. Les demandeurs

admissibles sont les organismes d'État, les districts scolaires publics, les districts de services publics ou les subdivisions politiques de l'État. Les subventions peuvent être attribuées à des projets prévoyant l'achat de VEP ou la conversion de véhicules existants en VEP qui seront intégrés au parc de véhicules ou utilisés pour les activités du demandeur.

Exemption de taxes pour l'infrastructure de recharge et les batteries des véhicules électriques : Les terrains publics utilisés pour installer, entretenir et utiliser l'infrastructure nécessaire aux VE sont exemptés des droits d'accise sur la location à bail jusqu'au 1^{er} janvier 2020. En outre, les taxes de vente et d'utilisation imposées par l'État ne s'appliquent pas : aux batteries de VE; à la main-d'œuvre et aux services d'installation, de réparation, de modification ou d'amélioration de ces batteries et de l'infrastructure nécessaire aux VE; à la vente de biens utilisés pour l'infrastructure nécessaire aux VE.

Exemption de l'inspection des véhicules : Les VCR et les VEH sont exemptés des tests d'émissions.

Bibliographie

- Abt Associates. *Application of life cycle assessment for nanoscale technology: Lithium ion batteries for electrical vehicles*, 2013. <<http://seeds4green.net/sites/default/files/LCA%20for%20Lithium-Ion%20Batteries%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Agence internationale de l'énergie (AIE). *Hybrid and electric vehicles: The electric drive captures the imagination*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, 2012. <www.ieahev.org/assets/1/7/IA-HEV_2011_annual_report_web.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Agence internationale de l'énergie (AIE). *Canada: On the road and deployments*, Hybrid and Electric Vehicle Implementing Agreement (IA-HEV), non daté. <www.ieahev.org/by-country/canada-on-the-road-and-deployments/> (Consulté le 4 mai 2014.)
- Agence internationale de l'énergie (AIE). *Canada: Policies and legislation*, Hybrid & Electric Vehicle Implementing Agreement, non daté. <www.ieahev.org/by-country/canada-policy-and-legislation/> (Consulté le 21 avril 2015.)
- AkkuSer. *AkkuSer Ltd – Battery Recycling – Dry Technology*, clip vidéo sur YouTube, 2011. <www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=HD1dB7zI7Ec> (Consulté le 7 mai 2014.)
- ASEAN Environment. Non daté. <www.aseanenvironment.info/Abstract/41016797.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Asociación Mexicana de Distribuidores de Autos (AMDA). Miguel Ángel Camarena Ramos, communication personnelle avec l'auteur, 21 mars 2014
- ATSDR. *Toxicological profile for nickel*, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2005. <www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp15.pdf>
- ATSDR. *Toxicological profile for manganese*, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012. <www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp151.pdf>.
- ATSDR. *Toxicological profile for cobalt*, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004. <www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp33.pdf>.
- Austin, M. « 2011 Hyundai Sonata Hybrid », *Car and Driver*, 2010. <www.caranddriver.com/reviews/2011-hyundai-sonata-hybrid-prototype-drive-review> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Autos México. « Via Motors inaugura planta de autos híbridos en Mexico », *Autos México*, 2013. <<http://autosmexico.mx/mundo-verde/via-motors-inaugura-planta-de-autos-hibridos-en-mexico>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Babae, S., A.S. Nagpure et J.D. DeCarolis. « How much do electric drive vehicles matter to future US emissions? », *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(3), p. 1382 à 1390. <www4.ncsu.edu/~jfdcaro/papers/Babae_etal_2014.pdf> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Battery University. « BU-205: Types of lithium-ion » *Battery University*, non daté. <http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Beresteau, A. et S. Li. *Gasoline prices, government support, and the demand for hybrid vehicles in the U.S.*, 2008. <<http://public.econ.duke.edu/Papers/PDF/hybrid.pdf>> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Berg, P. « 8 potential EV and hybrid battery breakthroughs: Why wild new battery technology could soon mean EVs with a 500 mile range », *Popular Mechanics*, non daté. <www.popularmechanics.com/cars/g785/8-potential-ev-and-hybrid-battery-breakthroughs/> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Berman, B. « The hybrid car battery: A definitive guide », *Hybrid Cars*, 2008. <www.hybridcars.com/hybrid-car-battery/> (Consulté le 21 avril 2014.)

- Berman, B. « Hybrid and plug-in incentives and rebates: Region by region », *Hybrid Cars*, 2010. <www.hybridcars.com/region-by-region/> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Berman, B. « Toyota: Nickel batteries for hybrids, lithium for electric cars », *Hybrid Cars*, 2010. <www.hybridcars.com/toyota-nickel-batteries-hybrids-lithium-electric-cars-29073/> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Brooks, David. Communication personnelle avec l'auteur, avril 2014.
- Bumblebee Batteries LLC. *MAX-IMA replacement IMA battery for Honda Civic Hybrid*, non daté. <<http://bumblebeebatteries.com/hybrid-batteries/honda-civic-hybrid-battery>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Camarena Ramos, Miguel Ángel. Communication personnelle avec l'auteur, 21 mars 2014.
- Car Buying Strategies. « Ford Fusion Hybrid review: Buying guide », *Car Buying Strategies*, 2013. <www.car-buying-strategies.com/Ford/2013-fusion-hybrid.html> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Carbon Pig. « Electric cars don't use fossil fuel, but what's the environmental impact and life cycle of the batteries? », *Carbon Pig*, non daté. <<http://carbonpig.com/article/electric-cars-dont-use-fossil-fuel-whats-environmental-impact-and-life-cycle-batteries>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Cars Direct. 2013. How to properly recycle used hybrid car batteries. *Cars Direct*. <www.carsdirect.com/green-cars/how-to-properly-recycle-used-hybrid-car-batteries> (Consulté le 18 mars 2014.)
- CBC. 2012. SGI green rebate program ends. *CBC News*. <www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/sgi-green-rebate-program-ends-1.1181246> (Consulté le 21 avril 2015)
- Chatarrera Metales Z.1. <http://metaleszi.com.mx/sistema/pdf/precios_compra.php> (Consulté le 30 avril 2014.)
- Chris Hillseth Enterprises. *Lithium battery*, 2014. <<http://chrishillsethenterprises.com/battery/wp-content/uploads/2014/01/lithiumbattery.jpg>> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Chubb, C. « Council votes in favour of Toronto taxicab licence », *CityNews Toronto*, 2013. <www.citynews.ca/2014/02/19/council-votes-in-favour-of-toronto-taxicab-licence/#__federated=1> (Consulté le 21 avril 2015.)
- City of Kelowna. *Eco-pass*, 2009. <www.kelowna.ca/CM/page1649.aspx> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Commission de coopération environnementale. *Manuels de formation de la CCE sur la gestion écologiquement rationnelle*, non daté. <www.cec.org/Page.asp?PageID=1226&SiteNodeID=1282> (Consulté le 26 mars 2015.)
- Cadre de l'industrie du recyclage des batteries resté anonyme. Communication personnelle avec l'auteur, 11 mars 2014.
- Fabricant de batteries de VPE resté anonyme. Communication personnelle avec l'auteur, 12 mars 2014.
- Grande chaîne nord-américaine de déchiqueteurs d'automobiles dont le nom demeure confidentiel. Communication personnelle avec l'auteur, 17 mars 2014.
- Grande fonderie de plomb américaine dont le nom demeure confidentiel. Communication personnelle avec l'auteur, 10 mars 2014.
- Coy, Todd. Communication personnelle avec l'auteur, 11 mars 2014.
- CTC-N. *Development of a recycling process for Li-Ion batteries*, Climate Technology Centre & Network, 2012. <<http://ctc-n.org/content/development-recycling-process-li-ion-batteries>> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Duran Ortiz, M.R. *U.S. top selling HEVs by market share*, 2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_electric_vehicles_in_the_United_States#mediaviewer/File:U.S_top_selling_HEVs_by_market_share.png> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- eBay. Recherche de batteries hybrides. <www.ebay.com/bhp/hybrid-battery> (Consulté le 7 mai 2014.)

- Ekermo, V. *Recycling opportunities for batteries Li-ion from hybrid electric vehicles*, thèse de maîtrise en génie chimique, département de génie chimique et biologique, recyclage des matériaux industriels, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suède, 2009.
<www.yumpu.com/en/document/view/3270204/recycling-opportunities-for-li-ion-batteries-from-hybrid-electric-vehicles> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Electric Drive Transportation Association. <<http://electricdrive.org/>> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Electric Drive Transportation Association. *Electric drive sales dashboard*, non daté.
<<http://electricdrive.org/index.php?ht=d%2Fsp%2Fi%2F20952%2Fpid%2F20952>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Electric Transportation Engineering Corporation. *Electric vehicle charging infrastructure—Deployment guidelines: British Columbia*. Version 1.0, 2009.
<www.ceati.com/files/ev/BC%20EV%20Charging%20Infrastructure%20Guidelines.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Els, F. « Honda's starts recycling program to extract 80% of rare earths from used hybrid batteries », *InfoMine*, 2013. <www.mining.com/hondas-starts-recycling-program-to-extract-80-of-rare-earths-from-used-hybrid-batteries-43719> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Energizer. *Nickel Metal Hydride (Ni-MH) Handbook and Application Manual*, 2010.
<http://data.energizer.com/PDFs/nickelmetalhydride_appman.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Eurobat. Autre législation, 2010. <www.eurobat.org/other-legislation> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Fisher, K., E. Wallen, P.P. Laenen et M. Collins. *Battery waste management life cycle assessment*, 2006.
<www.epbaeurope.net/090607_2006_Oct.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- Fox Davies Resource Specialists. *The Lithium Market*, septembre 2013.
- Friends of the Earth Europe, Friends of the Earth England Wales and Northern Ireland. *Lithium*, 2013.
<www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheet-lithium-gb.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- Gaines, L. et R. Cuenca. *Costs of lithium-ion batteries for vehicles*, United States Department of Energy, Center for Transportation Research: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 2000.
- GlobalPSC. *Batrec—Return Batteries and Accumulators*, clip vidéo sur YouTube, 2011.
<www.youtube.com/watch?v=e6qyLT_x53o> (Consulté le 7 mai 2014.)
- Good Car Bad Car. *Overall Canada auto industry sales figures—Monthly and yearly*, 2012.
<www.goodcarbadcar.net/2012/10/canada-overall-auto-industry-sales-figures.html?m=1> (Consulté le 4 mai 2015.)
- Gouvernement du Québec. *Plan d'action 2011–2020 sur les véhicules électriques*. Annexe 3 : Mesures pour les utilisateurs, 2011. <www.mern.gouv.qc.ca/english/press/ev_annexe3.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Gouvernement du Québec. Programme de rabais à l'achat ou à la location, 2012.
<<http://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/english/particuliers/rabais.asp>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Gouvernement du Québec. Running on green power! Electric vehicles: 2011–2020. Québec Action Plan. PowerPoint presentation, Alternative Fuel Vehicles Conference (Montreal, 2012) <www.cap-cpma.ca/images/ECP%20Documents/AFV%20Conference/ADaneau.PAVE.MRNF_Eng.pdf> (Consulté le 21 avril 2015)
- Gouvernement de l'Alberta. *Energy efficiency rebates: Part of Alberta's climate change plan*, non daté.
<www.insulspan.com/newsletter/0509news/AlbertaEnvironmentEnergyRebateCard.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Gouvernement de la Colombie-Britannique. *Clean energy vehicle incentive program extended*, 2013.
<www.newsroom.gov.bc.ca/2013/03/clean-energy-vehicle-incentive-program-extended.html> (Consulté le 21 avril 2015.)

- Gouvernement de la Colombie-Britannique. « Transportation rebates and incentives », *Live Smart BC*, non daté. <www.livesmartbc.ca/incentives/transportation/> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Gouvernement du Manitoba. *Manitoba's electric vehicle road map: Driving toward fossil fuel freedom*, 2011. <www.gov.mb.ca/ia/energy/transportation/images/elec_vehicle_road_map.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Grayson Hyundai. *Hyundai Sonata Hybrid*, non daté. <www.graysonhyundai.com/sonata-hybrid.htm> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Hartman, K. *State efforts to promote hybrid and electric vehicles*, National Conference of State Legislatures, 2015. <www.ncsl.org/research/energy/state-electric-vehicle-incentives-state-chart.aspx> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Hiler, K. « What's next in electric-car-battery tech », *Popular Mechanics*, 2013. <www.popularmechanics.com/cars/alternative-fuel/electric/whats-next-in-electric-car-battery-tech-16280750> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Huffman, J.P. « 2013 Ford Fusion Hybrid », *Car and Driver*, 2012. <www.caranddriver.com/reviews/2013-ford-fusion-hybrid-first-drive-review> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Hybrid Cars. « DOE Alternative Fuels Data Center », *Hybrid cars*. <www.hybridcars.com> (Consulté le 21 avril 2014.)
- Infinity. *Infinity Q50*, non daté. <www.infiniti.mx/Q50/modelos> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Ingram, A. « Toyota hybrid battery replacement cost guide », *Green Car Reports*, 2012. <www.greencarreports.com/news/1078138_toyota-hybrid-battery-replacement-cost-guide> (Consulté le 7 mai 2014.)
- Integrity Exports. « Honda introduces rare earth metal recovery tech for old hybrid car batteries », *Integrity Exports*, 2012. <<http://integrityexports.com/2012/04/18/honda-introduces-rare-earth-metal-recovery-tech-for-old-hybrid-car-batteries/>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Directorio estadístico de Unidades Económicas. Comercio al por menor de partes y refacciones usadas para automóviles, camionetas y camiones*, non daté. <www3.inegi.org.mx/sistemas/mapa/denue/default.aspx> (Consulté le 15 avril 2014.)
- Kerchner, George A. Communication personnelle avec l'auteur, 13 mars 2014.
- London Metals Exchange. 2014.
- MacDonald, E. *Hybrid vehicle dismantling—Recycling the future*, présentation lors de l'International Automobile Recycling Congress, Green Recycled Parts, mars 2013.
- Mathur, A. « Insight—How Ni-MH cell works », *Engineers Garage*, 2012. <www.engineersgarage.com/insight/how-Ni-MH-cell-works> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Mayer, E.H. « Fusion híbrido rompe récord », *El Universal*, 2009. <www.eluniversal.com.mx/articulos/53870.html> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Metals Exchange. Prix moyen pour 2013. <www.metalsexchange.com> (Consulté le 27 mai 2014.)
- Metalpedia. « Asian Metal. Rare earths: Recycling », *Metalpedia*, non daté. <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/recycling.shtml> (Consulté le 31 mars 2015.)
- Mexican Automotive. Questions à propos de la NOM 163 et de sa suspension permanente. <<http://mexicanautomotive.com/en/home/84-october-2012/364--questions-on-official-mexican-standard-163-and-its-continued-suspension>> (Consulté le 30 avril 2014.)
- MIA Electric México. 2015. <www.mia-electric.mx/> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Michelsen, C. « Hybrid battery recycling works! according to Honda », *Clean Technica*, 2012. <<http://cleantechnica.com/2012/04/24/hybrid-battery-recycling-works-according-to-honda/>> (Consulté le 21 avril 2015.)

- Morris, C. « Volkswagen Group France arranges for recycling of hybrid and EV batteries », *Charged*, 2014. <<http://chargedevs.com/newswire/volkswagen-group-france-arranges-for-recycling-of-hybrid-and-ev-batteries/>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- National Library of Medicine HSDB Database. *Lithium compounds*, 2007. <<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+6900>>.
- Neubauer, J. et A. Pesaran. *PHEV/EV li-ion battery second-use project* (NREL/PR-540-48018), National Renewable Energy Laboratory, 2010. <www.nrel.gov/docs/fy10osti/48018.pdf> (Consulté le 18 mars 2014.)
- Nissan Newsroom. *Growing the grid: EV taxis drive infrastructure transformation in Mexico, Latin America*, 2 mai 2013, clip vidéo, You Tube. <<http://nissannews.com/en-US/nissan/usa/releases/video-report-growing-the-grid-ev-taxis-drive-infrastructure-transformation-in-mexico-latin-america>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Norma Oficial Mexicana. *Emisiones de bióxido de carbono (CO₂) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3 857 kilogramos (NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013)*, 21 juin 2013. <http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5303391&fecha=21/06/2013> (Consulté le 21 avril 2015)
- O'Dell, J. « What happens to EV and hybrid batteries? Going green with battery recycling », *Edmunds*, 2014. <www.edmunds.com/fuel-economy/what-happens-to-ev-and-hybrid-batteries.html> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Ministère des Finances et de l'Énergie de l'Île-du-Prince-Édouard. *Revenue tax (PST) refund*, 2013. <www.taxandland.pe.ca/index.php3?number=17274&lang=E> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Ministère des Transports de l'Ontario. *Electric vehicle incentive program*, non daté. <www.mto.gov.on.ca/english/vehicles/electric/electric-vehicle-incentive-program.shtml> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Pacific Northwest National Laboratory. « Battery development may extend range of electric cars », *Science Daily*, 2014. <www.sciencedaily.com/releases/2014/01/140109175504.htm> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Pederson, M. *Umicore battery recycling dismantling (H)EV battery packs in Maxton, NC*, 2013.
- Perdiguerro, J. et J. Jimenez. *Policy options for the promotion of electric vehicles: A review*, Institut de Recerca en Economia Aplicada Regional i Publica (IREA, Institut de recherche en économie appliquée), 2012. <www.ub.edu/irea/working_papers/2012/201208.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Personnel d'Umicore. Communication personnelle avec l'auteur, 5 mai 2014.
- Raia, J. « 2013 Toyota Avalon Hybrid: Redesign adds further appeal to surprising sedan », *The Weekly Driver*, 2012. <<http://theweeklydriver.com/2013-toyota-avalon-hybrid-redesign-adds-further-appeal-surprising-sedan/>> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Rechargeable Battery Association. *Working group makes progress on updating UN testing requirements for large lithium batteries*, 2014. <www.prba.org/general/working-group-makes-progress-on-updating-un-testing-requirements-for-large-lithium-batteries-804/> (Consulté le 13 mars 2014.)
- Représentant de l'industrie du recyclage des batteries. Communication personnelle (confidentielle), avril 2014.
- Reuters. « Standards are tightened for lithium-ion batteries », *The New York Times*, 2013. <www.nytimes.com/2013/06/13/business/lithium-ion-battery-standards-are-tightened.html?_r=0> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Robinson, A. « 2013 Ford C-Max Hybrid », *Car and Driver*, 2012. <www.caranddriver.com/reviews/2013-ford-c-max-hybrid-first-drive-review> (Consulté le 23 avril 2014.)
- SAE International. *NAIAS 2012: Toyota shows smaller, lighter Prius and plug-in concept targeted for 2015*, 2012. <<http://articles.sae.org/10558/>> (Consulté le 23 avril 2014.)

- SAE International. *NAIAS 2012: Toyota shows smaller, lighter Prius and plug-in concept targeted for 2015*, 2012. <<http://articles.sae.org/10558/>> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Salado, D. « Autos eléctricos: ¿son sustentables? », *El Economista*, 2013. <<http://eleconomista.com.mx/industrias/2013/09/02/autos-electricos-son-sustentables>> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Secretariado de Gobernación. « Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos », *Diario Oficial de la Federación*. <www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5337505&fecha=19/03/2014>.
- Secrétariat de la Convention de Bâle. *Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières des déchets dangereux et de leur élimination*, 2014. <www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-e.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). *Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generada por los vehículos usados al final de su vida útil*, México, 2009. <<http://web2.semarnat.gob.mx/temas/residuos/vehiculos/Documents/estudio-elv-2009.pdf>> (Consulté le 30 avril 2014.)
- Semarnat. *Plan de manejo de vehículos al final de su vida útil*, México, 2012. <www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/residuos/vehiculos/Documents/plan-manejo-vehiculos.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Semarnat. *Empresas autorizadas para el manejo de residuos peligrosos*, 2014. <www.semarnat.gob.mx/transparencia/transparencia-focalizada/residuos/empresas-autorizadas-para-el-manejo-de-residuos> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Semarnat. *Guía para la importación y exportación de residuos en México*, non daté. <http://tramites.semarnat.gob.mx/Doctos/DGGIMAR/Guia/07-029AF/guia_Import_Export_RP.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). Kitco Metals. <www.kitcometals.com/charts/nickel.html> (Consulté le 30 avril 2014.)
- SGM. Metal Prices. <www.metalprices.com/metal/cobalt/lme-cobalt-cash-official> (Consulté le 30 avril 2014.)
- SGM. Nickel. <<http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/precio-metales/niquel.html>> (Consulté le 30 avril 2014.)
- Smilovitz, E. « México venderá su primer coche 100% eléctrico en 2013 », *Altonivel*, 2012. <www.altonivel.com.mx/22410-mexico-vendera-su-primero-coche-electrico-en-2013.html> (Consulté le 21 avril 2015)
- Sullivan, L. et L. Gaines. *A review of battery life-cycle analysis: State of knowledge and critical needs*, Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, 2010. <https://greet.es.anl.gov/files/batteries_lca> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Sumitomo Metal Mining Co. *CSR Report 2013*. <www.smm.co.jp/E/csr/report/pdf/csr2013_allpages.pdf> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- Sustainable Waterloo. *Calculating GHG emissions from personal vehicle travel*, 2010. <www.sustainablewaterlooregion.ca/files/downloads/RCIM/CalculatingGHGEmissionsfromPersonalVehicleTravel.pdf> (Consulté le 26 juin 2014.)
- SYKLI Environmental School of Finland. *Batteries*, non daté. <www.sykli.fi/en/materials-and-tools/batteries-recycling/recycling> (Consulté le 21 avril 2015.)
- The Winnipeg Free Press. « Province ending \$2,000 rebate on hybrid vehicles », *The Winnipeg Free Press*, 2010. <www.winnipegfreepress.com/breakingnews/Province--104163053.html> (Consulté le 21 avril 2015.)

- Toshiba of Europe Ltd. *Legal directives in Europe*, 2013. <www.toshiba.eu/Environmental-Management/Legal-directives-in-Europe/> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Toyota Motor Corporation. *Lexus CT200h Hybrid 2011 Model: Emergency response guide*, 2010. <<http://afvsafetytraining.com/erg/Lexus-CT200h-2011.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Toyota Motor Corporation. *Toyota Prius V gasoline-electric hybrid synergy drive: Hybrid vehicle dismantling manual*, 2011. <<https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/priusvdisman.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Toyota Motor Corporation. *Lexus ES300h Hybrid 2013 Model: Emergency response guide*, 2012. <<http://afvsafetytraining.com/erg/Lexus-ES300-2013.pdf>> (Consulté le 23 avril 2014.)
- Toyota Motor Corporation. *Toyota announces sustainable battery recycling agreement in Europe*, communiqué de presse, non daté. <<http://toyota.eu/about/pages/newsdetails.aspx?prid=688&prs=Corporate&prrm=pressrelease>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Umicore. *Battery recycling*, non daté <www.batteryrecycling.umicore.com/UBR/process/process.jpg> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Underwriters Lab. *Safety issues for lithium-ion batteries*, 2012. <www.ul.com/global/documents/newscience/whitepapers/firesafety/FS_Safety%20Issues%20for%20Lithium-Ion%20Batteries_10-12.pdf> (Consulté le 18 mars 2014.)
- Union européenne. Directive 2013/56/EU du Parlement européen et du Conseil du 20 novembre 2013 modifiant la directive 2006/66/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs en ce qui concerne la mise sur le marché de piles et d'accumulateurs portables contenant du cadmium destinés à être utilisés dans des outils électriques sans fil et de piles bouton à faible teneur en mercure, et abrogeant la décision 2009/603/CE de la Commission. *Journal officiel de l'Union européenne*, 2013. <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0056&from=EN>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- US Department of Energy. *Batteries for hybrid and plug-in electric vehicles*, non daté. <www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html> (Consulté le 30 septembre 2014.)
- US Energy Information Administration. *Annual energy outlook 2014: Early release reference case*, 2013. <[http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/AEO2014%20Early%20Release%20Presentation__CGEP\(12-18-13\).pdf](http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/AEO2014%20Early%20Release%20Presentation__CGEP(12-18-13).pdf)> (Consulté le 17 avril 2014.)
- US Energy Information Administration. *Annual energy outlook 2014 with projections to 2040*, 2014. <www.eia.gov/forecasts/AEO/pdf/0383%282014%29.pdf> (Consulté le 14 avril 2015.)
- US EPA. *Implementation of the Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act*, 1997. <www.epa.gov/osw/hazard/recycling/battery.pdf> (Consulté le 21 avril 2015.)
- US EPA. *Lithium-ion batteries and nanotechnology for electric vehicles: A life cycle assessment*, Office of Pollution Prevention and Toxics, and National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, 2012. <<http://nepis.epa.gov>> (Consulté le 21 avril 2015.)
- Vadenbo, C.O. *Prospective environmental assessment of lithium recovery in battery recycling*, 2009. <www.uns.ethz.ch/pub/publications/pdf/1717.pdf> (Consulté le 7 mai 2014.)