



UNIVERSITÉ  
LAVAL



LABORATOIRE DE  
VISION ET SYSTÈMES  
NUMÉRIQUES

# État de l'art en matière de véhicules électriques et sur la technologie V2G

Rapport technique RT-LVSN-2011-01

Kevin C. Tanguy  
kevin.tanguy.1@ulaval.ca  
kevin.c.tanguy@gmail.com

Christian Gagné  
Maxime Dubois

Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques (LVSN),  
Département de Génie Electrique et de Génie Informatique,  
Université Laval, Québec (QC), Canada, G1K 7P4.

Octobre 2011

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Les différentes technologies de véhicules électriques</b>	<b>1</b>
1.1	Les véhicules hybrides	1
1.1.1	L'hybride parallèle	1
1.1.2	L'hybride série	2
1.1.3	L'hybride à dérivation de puissance	4
1.1.4	Véhicules hybrides branchables commerciaux	5
1.1.5	Véhicules hybrides branchables de recherche	6
1.2	Véhicules à pile à combustible	6
1.3	Les véhicules tout électrique	7
1.3.1	Véhicules électriques commerciaux	7
1.3.2	Véhicules électriques de recherche	12
<b>2</b>	<b>Le stockage de l'énergie</b>	<b>14</b>
2.1	Les différents types de batteries	14
2.1.1	Les batteries Plomb Acide	14
2.1.2	Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	16
2.1.3	Les batteries Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Metal hybride Ni-Mh)	16
2.1.4	Les batteries Lithium-ion (Li-ion)	17
2.1.5	Les batteries Lithium-ion Polymère (Li-po)	18
2.1.6	Comparaison des batteries existantes	18
2.1.7	Les batteries en développement	20
2.1.8	Les prévisions d'évolution des batteries	24
2.2	Les différents moyens de recharge	25
2.2.1	L'échange de batteries	25
2.2.2	La recharge par induction proposée par Renault/Nissan et al	25
2.2.3	Les chargeurs branchables	27
2.2.4	Quelques acteurs des infrastructures pour véhicules branchables	28
<b>3</b>	<b>La gestion de flottes de véhicules</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>V2G – SmartGrid</b>	<b>32</b>
4.1	Les recherches de Willet Kempton et al pour UC Davis	32
4.1.1	Les essais d'ACPropulsion	33

4.1.2	L'essai de W. Kempton en 2008 avec une eBox d'ACPropulsion . . .	36
4.2	Publications récentes à l'université du Missouri . . . . .	38
4.3	La fondation Rocky Mountain Institute et le Smart Garage . . . . .	38
4.4	D'autres recherches récentes . . . . .	40
4.5	Les prévisions de croissance du marché V2G . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>43</b>

# Table des figures

1.1	Modes de fonctionnement de l'hybride parallèle (Wikimedia Commons) Eng : moteur thermique - Mot : moteur/générateur électrique réversible - Batt : batterie - Tx : transmission - PE : électronique de puissance (convertisseur) - Clutch : embrayage (a) Mode électrique seulement - (b) Mode hybride avec assistance par le moteur électrique (c) Mode hybride : charge de la batterie - (d) Freinage régénérateur . . . . .	2
1.2	Moteur électrique très compact de la Honda Civic IMA. Il est placé entre le moteur thermique et la boîte de vitesse. Vue des bobinages du moteur électrique de seulement 65 mm d[Pleaseinsertintopreamble]épaisseur. Ce moteur développe 6 kW à 1000 tr/min, ce qui lui permet d[Pleaseinsertintopreamble]augmenter le couple moteur.[1] . . . . .	3
1.3	Système Synergy Drive® de Toyota adaptable aux véhicules hybrides, électriques ou à pile à combustible (hydrogène).[2] . . . . .	4
1.4	Schéma du bloc moteur AC-150 d'AC Propulsion avec connexion bidirectionnelle intégrée [3] . . . . .	10
2.1	L'accumulateur expérimental de Gaston Planté.[4] . . . . .	15
2.2	Composition d'une batterie plomb acide actuelle.[5] . . . . .	15
2.3	Batterie Ni-Mh d'une Toyota Prius . . . . .	16
2.4	Schémas représentant les différents design de batteries Li-ion actuelles a) cylindrique b) plate c) prismatique d) mince et plate [6] . . . . .	17
2.5	Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles . . . . .	18
2.6	Comparaison des batteries actuelles en terme de densité gravimétrique et volumétrique [6] . . . . .	19
2.7	Schéma comparatif de la technologie traditionnelle avec la technologie nanophosphate [7] . . . . .	20
2.8	Graphiques montrant les caractéristiques de capacité et de résistance des batteries Lithium-Nanophosphate [7] . . . . .	21
2.9	Temps de charge rapide de deux modèles de batteries Lithium-Nonophosphate . . . . .	21
2.10	Comparaison de la structure du graphite avec le Lithium-Titanate [8] . . . . .	22
2.11	Comparaison de la durée de décharge de plusieurs types de batteries [8] . . . . .	22
2.12	Prévisions d'évolution du coût des batteries [9] . . . . .	24
2.13	Prévisions d'évolution des batteries a) poids b) durée de vie [9] . . . . .	24

2.14	Schéma présentant le chargeur à induction de Renault/Nissan . . . . .	26
2.15	Les différents mode de recharge du connecteur IEC 62196 européen . . . . .	28
4.1	Schéma de l'architecture du système de contrôle V2G envisagé par AC Propulsion [3] . . . . .	33
4.2	Schéma de l'architecture du système de régulation envisagé par AC Propulsion [3] . . . . .	34
4.3	Schéma de l'architecture du système hybride série d'AC Propulsion [10] . . . . .	35
4.4	Schéma de la disposition des éléments du système hybride série d'AC Propulsion [10] (bloc électrique à l'avant, batteries sur le châssis, moteur à combustion dans le coffre) . . . . .	35
4.5	Photo du stand de démonstration de la eBox modifiée par Kempton et al [11]	36
4.6	Régulation pendant la nuit avec des demandes de régulation à la baisse dominantes (charge de la batterie) [11] . . . . .	37
4.7	Vision d'ensemble des acteurs et défis à relever pour faire du SmartGarage une réalité [12] . . . . .	39
4.8	Définitions et tableau récapitulant les propriétés de chaque type de technologie de raccordement des véhicules électriques envisagés lors de la charrette SmartGarage [12] . . . . .	40
4.9	Prévisions de croissances des ventes des véhicules V2G de 2015 à 2020 selon ZPrÿme [13] . . . . .	42
5.1	Une réalité demain ? [12] . . . . .	44

## Résumé

Ce rapport vise à synthétiser l'état actuel des technologies disponibles et à venir prochainement pour mettre en oeuvre la technologie V2G. La disponibilité de véhicules électriques et hybrides sur le marché étant une condition à la mise en place de cette technologie, nous faisons un tour d'horizon des modèles proposés par les industriels avec leurs caractéristiques. Le stockage de l'énergie et sa restitution est également analysé en s'intéressant aux différents types de batteries présentes et en développement ainsi que de l'équipement permettant leur recharge et leur décharge. Enfin des exemples de recherche et expérimentations dans le domaine V2G sont présentés. Ce rapport devrait fournir au lecteur une idée des différents acteurs et technologies concernées pour l'adoption d'une telle technologie ainsi que les références nécessaires à l'approfondissement de sa recherche sur le sujet.

# Chapitre 1

## Les différentes technologies de véhicules électriques

### 1.1 Les véhicules hybrides

Les voitures hybrides actuelles associent deux types de motorisation, un moteur thermique alimenté par un carburant (essence, diesel, biocarburants...) et un moteur électrique alimenté par une batterie rechargeable.

Il y a trois façons d'utiliser ces deux moteurs dans des voitures actuellement<sup>[1]</sup> : hybride parallèle, hybride série et hybride à dérivation de puissance.

#### 1.1.1 L'hybride parallèle

C'est le moteur thermique qui sert à déplacer le véhicule (transmission mécanique, embrayage, boîte de vitesse). On lui adjoint un moteur électrique qui utilise l'énergie des batteries électrochimiques rechargeables. Grâce à son couple élevé, disponible immédiatement, le moteur électrique aide le moteur thermique dans les phases où il est peu efficace (démarrages, reprises). Lors des phases de freinage ou de décélération, le moteur électrique se transforme en générateur, récupère une partie de l'énergie cinétique et recharge la batterie.

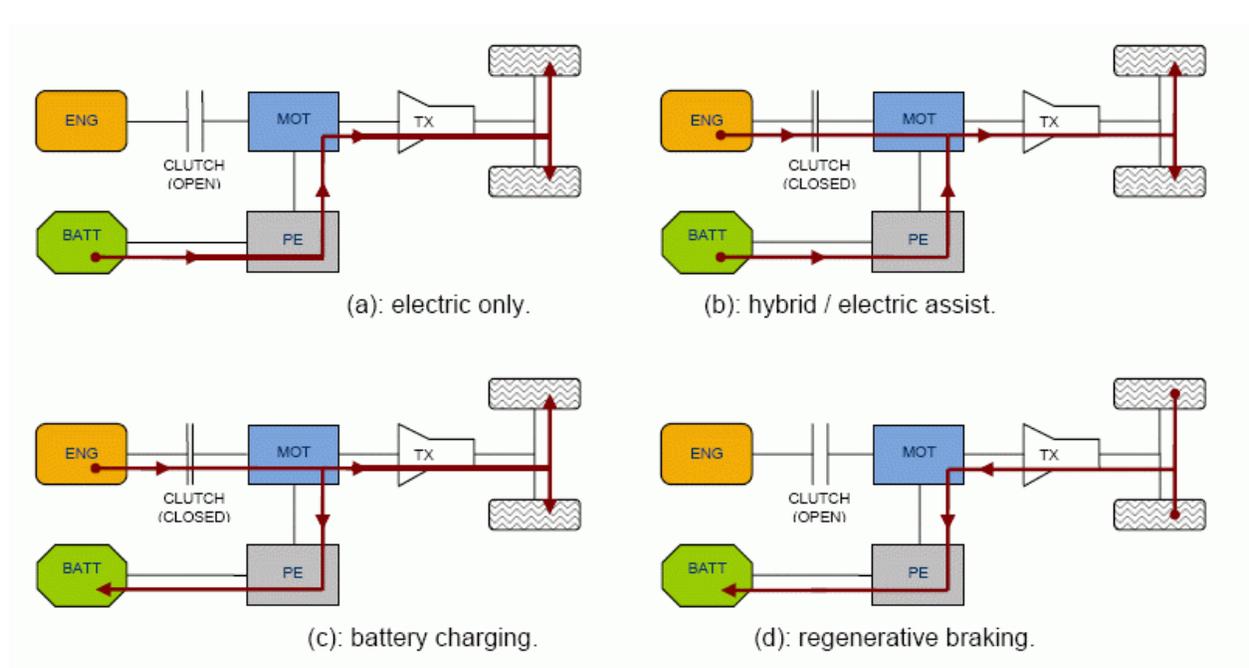


FIGURE 1.1 – Modes de fonctionnement de l'hybride parallèle (Wikimedia Commons) Eng : moteur thermique - Mot : moteur/générateur électrique réversible - Batt : batterie - Tx : transmission - PE : électronique de puissance (convertisseur) - Clutch : embrayage (a) Mode électrique seulement - (b) Mode hybride avec assistance par le moteur électrique (c) Mode hybride : charge de la batterie - (d) Freinage régénératif

### 1.1.2 L'hybride série

C'est le moteur électrique qui assure la propulsion de la voiture (application de son couple aux roues). Il est alimenté par une batterie électrochimique de forte capacité. Le moteur thermique, qui tourne à régime constant, et le générateur électrique forment un groupe électrogène qui recharge la batterie. La voiture est d'abord chargée sur le secteur au domicile. Lorsque l'autonomie "tout électrique" est épuisée le groupe électrogène se met en route pour étendre le rayon d'action en rechargeant la batterie.

Le moteur électrique de la Honda Civic IMA est placé entre le moteur thermique et la boîte de vitesses. Son encombrement en largeur n'est que de 65 mm.

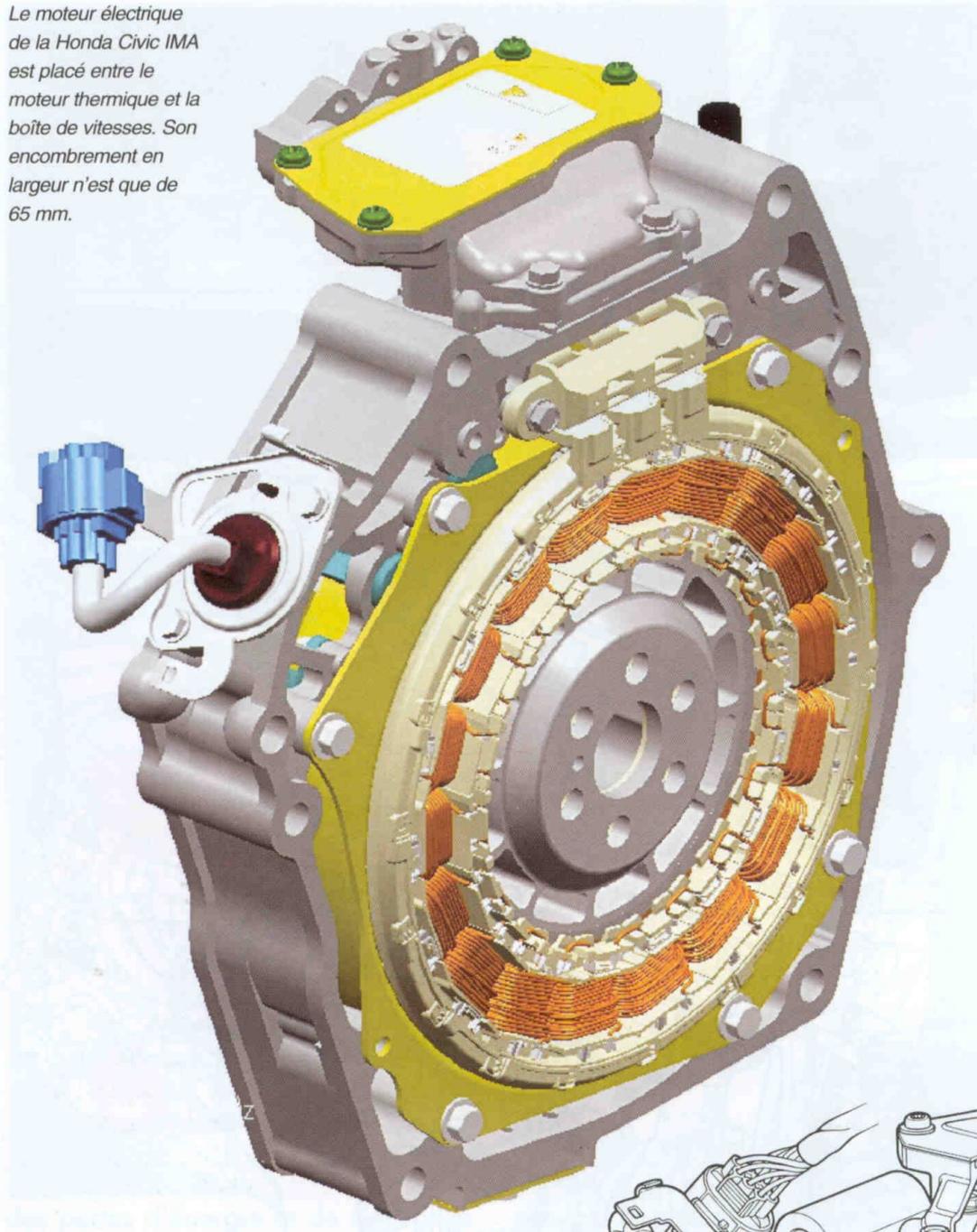


FIGURE 1.2 – Moteur électrique très compact de la Honda Civic IMA. Il est placé entre le moteur thermique et la boîte de vitesses. Vue des bobinages du moteur électrique de seulement 65 mm d'épaisseur. Ce moteur développe 6 kW à 1000 tr/min, ce qui lui permet d'augmenter le couple moteur.[1]

### 1.1.3 L'hybride à dérivation de puissance

Comme dans le fonctionnement parallèle, le moteur thermique déplace le véhicule par une transmission mécanique mais grâce à deux moteurs/générateurs électriques, la transmission mécanique est renforcée par une transmission électrique.

C'est le cas du système hybride de Toyota appelé Synergy Drive®.

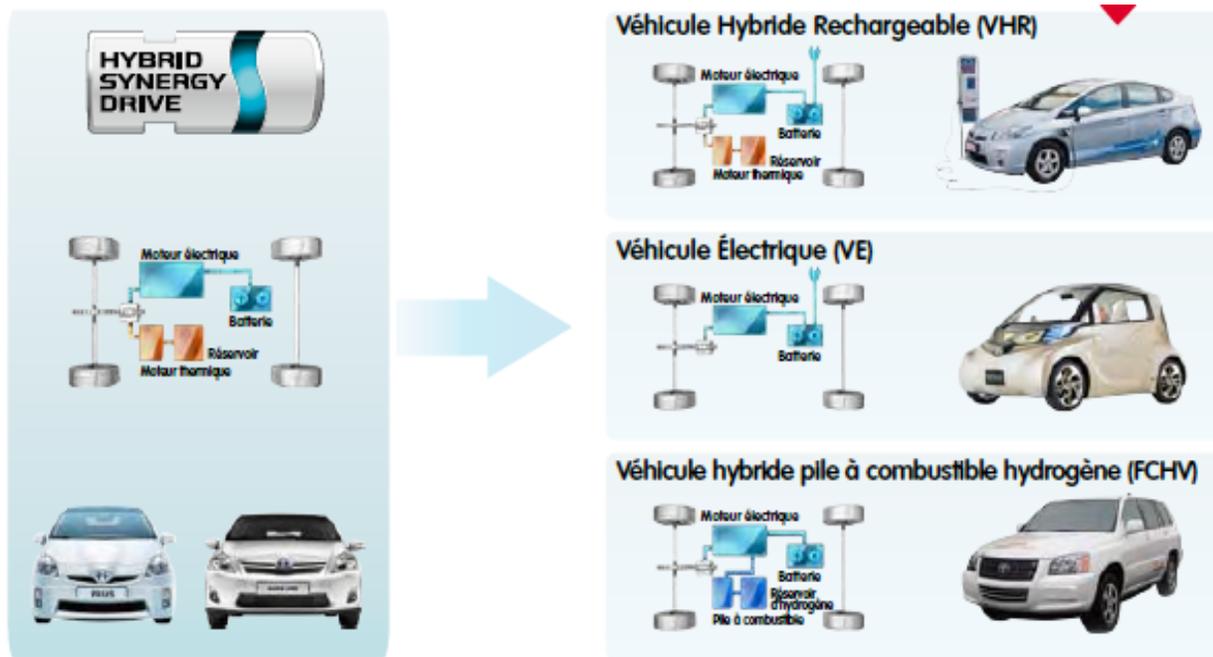


FIGURE 1.3 – Système Synergy Drive® de Toyota adaptable aux véhicules hybrides, électriques ou à pile à combustible (hydrogène). [2]

### 1.1.4 Véhicules hybrides branchables commerciaux

#### Toyota Prius



avec Panasonic qui lui permettent de rouler sur 21 km en mode tout électrique avec une vitesse maximale de 100 km/h.

La Toyota Prius VHER qui est actuellement en test à travers le monde et à l'Université Laval avant sa commercialisation future est une hybride à dérivation de puissance. Elle est basée sur une Toyota Prius modèle ZVW30 (troisième génération) avec l'adjonction de deux batteries Lithium-ion (totalisant 5.2 kWh) développées en collaboration

Il est intéressant de noter l'expérience que Toyota conduit en France en partenariat avec EDF dans la ville de Strasbourg avec le déploiement de 100 Prius VHER dans la ville et ses environs sur une durée de trois ans.<sup>1 2</sup>

#### Chevrolet Volt



55 kW (74 ch). La vitesse maximale est de 161 km/h, et les batteries autorisent, à elles seules, une autonomie de 64 kilomètres avant recharge.

La Chevrolet Volt (General Motors) est une voiture hybride série, la version définitive de cette berline cinq portes quatre places a été lancée fin 2010. Elle est dotée d'un moteur électrique de 111 kW (150 ch) alimenté par des batteries lithium-ion polymer rechargeables sur secteur en trois heures ou via le moteur essence faisant office de générateur

<sup>1</sup><http://innovation.edf.com/vhr-strasbourg/>

<sup>2</sup>[http://medias.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Presse/Dossiers/EDF/2010/dp\\_VHR-Strasbourg\\_100427\\_vf.pdf](http://medias.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Presse/Dossiers/EDF/2010/dp_VHR-Strasbourg_100427_vf.pdf)

### 1.1.5 Véhicules hybrides branchables de recherche

#### Le projet RechargeIT de Google

Google mène une expérimentation [14] depuis 2007 avec des Toyota Prius et des Ford Escape Hybrid converties en VHER avec le pack Hymotion/A123systems<sup>3</sup>. Peu de documentation est disponible sur l'expérimentation mais des résultats sont accessibles sur le site. Cette étude est d'ailleurs jointe à d'autres projets de Google sur les énergies renouvelables<sup>4</sup> comme la géothermie, l'énergie éolienne ou les cellules photo-voltaïques<sup>5</sup> et leur « Google PowerMeter »<sup>6</sup>.

On pourrait donc s'attendre à ce que Google se lance dans le véhicule électrique (ou hybride) après la téléphonie (voir la proposition de Google « Clean energy 2030 »<sup>7</sup>).

## 1.2 Véhicules à pile à combustible

La plupart des compagnies automobiles possèdent et testent des voitures concepts utilisant une pile à combustible. La technologie est maintenant assez bien maîtrisée mais les coûts et capacités de production de l'hydrogène tout comme l'infrastructure pour faciliter son utilisation empêchent une commercialisation à court terme. De plus, les piles à combustible ont une durée de vie moindre que les moteurs à combustion et sont chers par l'utilisation de métaux rares. Le seul déchet (outre la production de vapeur d'eau) lié à l'utilisation d'une pile à combustible à hydrogène est un résidu de borate de sodium<sup>8</sup> (dû au procédé de fabrication du dihydrogène) qui peut être recyclé pour la production de dihydrogène. Toutefois, la production d'hydrogène ainsi que de la pile à combustible et des batteries sont des activités polluantes avec les procédés actuels et ces véhicules sont donc non-polluants localement et non dans l'absolu.

Ce sujet dépasse les objectifs de ce présent rapport mais représente à moyen ou long terme l'avenir de l'automobile.

---

<sup>3</sup><http://www.a123systems.com/hymotion>

<sup>4</sup><http://www.google.org/rec.html>

<sup>5</sup><http://www.google.com/corporate/solarpanels/home>

<sup>6</sup><http://www.google.com/powermeter/about/index.html>

<sup>7</sup><http://knol.google.com/k/clean-energy-2030>

<sup>8</sup>D'après le laboratoire de recherche de PSA Peugeot Citroën [http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/psa\\_groupe/energies\\_b3.php](http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/psa_groupe/energies_b3.php)

## 1.3 Les véhicules tout électrique

Contrairement aux véhicules hybrides, les véhicules tout électriques ont un design plus simple puisqu'il n'y a plus de moteur thermique et toutes ses dépendances jusqu'à l'échappement.

### 1.3.1 Véhicules électriques commerciaux

De multiples voitures citadines électriques arriveront sur le marché entre 2010 et 2012. Sont présentées dans cette partie des véhicules électriques actuellement disponibles et à venir très prochainement.

#### Smart For Two ED



La Smart For Two ED (Electric Drive) dispose d'un moteur de 41 chevaux pour une vitesse de pointe de 112 km/h et une autonomie de 135 km. Elle se recharge complètement en 8 heures. Actuellement en phase de tests, elle est fabriquée en France et prévue pour la commercialisation au grand public en 2012.<sup>9</sup>

#### Mitsubishi I-miev



La mitsubishi I-miev dispose d'un moteur de 47 kW (180 Nm) et d'une batterie Lithium-ion de 16 kWh pour une autonomie de 160 km. Elle peut être chargée via deux prises, une pour une connexion domestique (100 à 200 Volts) avec un temps de charge d'environ 7 heures pour du 200 Volts et une prise recharge rapide avec un temps de charge d'environ 30 minutes.<sup>10</sup> HydroQuébec effectue des tests routiers de ce modèle à Boucherville<sup>11</sup>.

<sup>9</sup><http://www.voitureelectrique.net/tag/smart-fortwo-ed>

<sup>10</sup><http://www.mitsubishi-motors.com/special/ev/whatis/index.html>

<sup>11</sup><http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/essai-route.html>

## CHAPITRE 1. LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Entre 2011 et 2012, Renault sortira plusieurs modèles tout électriques<sup>12</sup> basés sur leur concept car Renault ZE Concept dont :

### Kangoo Z.E.



de recharger à 80% la batterie en 30 minutes environ.

Un véhicule utilitaire léger qui aura un moteur de 70 kW (95 ch) une autonomie de 160 km et une vitesse maximale de 130 km/h. Elle sera dotée de cellules photo-voltaïques sur le toit. Deux modes de recharge sont prévus, à l'aide d'une prise domestique 220 Volts pour une durée de recharge comprise entre 6 et 8 heures et à partir d'une prise 400 V triphasée, qui permet

### Twizy Z.E. Concept

Ce sera une voiture biplace urbaine avec une autonomie de 100 km et une puissance maximale de 15 kW (20 ch).<sup>13</sup>

### La BO de Bolloré/Pininfarina



et une partie du capot. Elle serait rechargeable en 4 heures et disponible fin 2010 à un prix

La *B<sup>O</sup>* est un véhicule tout électrique<sup>14</sup> utilisant des batteries lithium-ion polymer de 30 kWh produites en France à Quimper et à Montréal au Québec, dont la technologie a été rachetée à HydroQuébec et Adanarko par le groupe Bolloré<sup>15</sup>. La compagnie assure que l'autonomie de leur véhicule est de l'ordre de 250 km avec une durée de vie des batteries de 200 000 km. La voiture est bridée électroniquement à 130km/h et est couverte de cellules photo-voltaïques sur le toit

<sup>12</sup><http://www.renault.com/fr/capeco2/vehicule-electrique/pages/vehicule-electrique.aspx>

<sup>13</sup>sauf évolution importante par rapport au concept car

<sup>14</sup><http://www.pininfarina.it/webdav/Immagini/auto%20elettrica/B0%20pininfarina.pdf>

<sup>15</sup><http://www.bollore.com/>

attractif selon le constructeur (environ 15 000 €).

### Nissan Leaf



La Nissan Leaf est une voiture tout électrique avec un moteur de 80 kW (107 ch, 280 Nm) et une batterie Lithium-ion compacte d'une capacité de 24 kWh délivrant 90 kW. Elle a une autonomie d'environ 160 kilomètres peut rouler jusqu'à 140 km/h (et plus selon Nissan) et se recharge complètement en 7 à 8 heures sur une prise domestique (200 à 240 Volts) ou en 30 minutes à 80% de sa capacité avec un chargeur rapide. Elle est de plus moins cher que la Chevrolet Volt, ce qui en fait une citadine écologique avec une autonomie raisonnable abordable.

### Phoenix Motor Cars



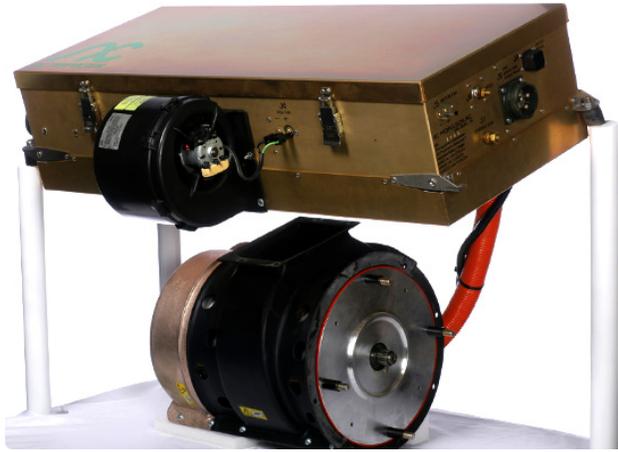
Phoenix Motor Cars<sup>16</sup> commercialise un véhicule utilitaire sportif à destination des entreprises et des flottes gouvernementales. Ce véhicule a un moteur de 60 kW (160 ch, 260 Nm), des batteries lithium-ion LFP<sup>17</sup> et une autonomie d'environ 120 km. Le véhicule peut se charger en 5 à 6 heures sur du 220 Volts ou en environ 1 heure avec un chargeur rapide.

---

<sup>16</sup><http://www.phoenixmotorcars.com>

<sup>17</sup>Lithium Fer Phosphate, voir 2.1.7 page 20

## AC Propulsion



tion de possibilités V2G<sup>19</sup>.

AC Propulsion [15] travaille depuis longtemps à la mise au point de véhicules qu'ils soient hybrides série ou tout électriques et en particulier pour que ces véhicules interagissent avec le réseau électrique de manière bidirectionnelle (voir 4.1.1 page 33).

Leurs expérimentations ont conduit à la technologie tzero<sup>TM</sup><sup>18</sup> qui inclue le système de propulsion électrique avec chargeur bidirectionnel intégré, la gestion des batteries et du véhicule dans son ensemble et l'intégration de possibilités V2G<sup>19</sup>.

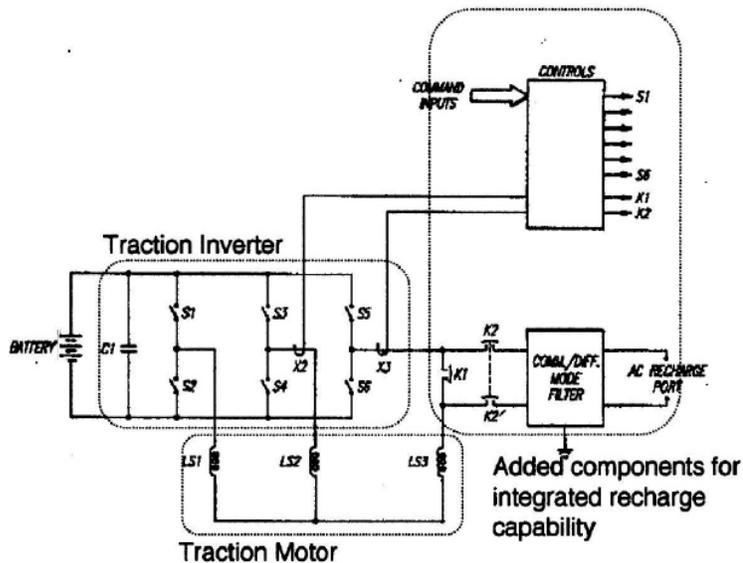


FIGURE 1.4 – Schéma du bloc moteur AC-150 d'AC Propulsion avec connexion bidirectionnelle intégrée [3]

Tesla Motors travaillait à ses débuts sous licence avec AC Propulsion pour la réalisation de leur voiture de sport électrique. De plus BMW travaille aussi avec AC Propulsion pour la

<sup>18</sup><http://acpropulsion.com/products-tzero.html>

<sup>19</sup>Vehicle to Grid

production de véhicules électriques<sup>20</sup> (la Mini E<sup>21</sup>) tout comme les services postaux américains<sup>22</sup>. Ils semblent être à ce jour les plus avancés en matière de motorisation et d'intégration pour les véhicules électriques à destination du grand public.

### Tesla Roadster



La Tesla Roadster dispose d'un moteur de 185 à 215 kW (248 à 288 ch, 270 Nm) et de batteries Lithium-ion d'une capacité de 53 kWh pour une autonomie de 340 km et des accélérations entre 0 et 100 km/h en seulement 3.7 secondes. Plusieurs moyens de recharge sont proposés par Tesla, la recharge

rapide dure 3 heures et demi avec un adaptateur 240 Volts (soit environ 100 km d'autonomie par heure de charge). S'il s'agit sans doute d'une prouesse technologique (et esthétique) son prix (\$116,500 US) est rédhibitoire et c'est un produit réservé à une clientèle de luxe.

### Tesla Model S



La Tesla Model S est une berline dont la commercialisation est prévue pour 2012. Sur la même base technologique que le Roadster mais avec une allure d'Aston Martin elle devrait avoir une autonomie de 480 km et se recharger en 3 à 5 heures avec l'adaptateur 240 Volts ou en 45 minutes avec un adapta-

teur rapide triphasé de 480 Volts. Son prix devrait être plus raisonnable que celui du Roadster (\$58,000 US soit environ le prix d'une BMW M3 coupé ou sedan) tout en s'adressant toujours à une clientèle haut de gamme.

---

<sup>20</sup><http://acpropulsion.com/pressreleases/11.20.2008%20BMW%20Press%20Release.pdf>

<sup>21</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/Mini\\_E](http://en.wikipedia.org/wiki/Mini_E)

<sup>22</sup><http://acpropulsion.com/pressreleases/01.20.2010%20USPS%20Announcement.pdf>

### 1.3.2 Véhicules électriques de recherche

#### eBox d'AC Propulsion



La eBox d'AC Propulsion<sup>23</sup> est une conversion d'une Toyota Scion xB à un véhicule tout électrique avec leur technologie tzero™. Elle est équipée d'un moteur électrique de 150 kW (200 ch) et de batteries lithium-ion totalisant 35 kWh pour une autonomie de 230 à 290 km. Elle réalise un 0 à 100 km/h en 7 secondes et peut atteindre 153 km/h en pointe. Elle peut être rechargée en 2 à 5 heures. Cette voiture est particulièrement intéressante puisqu'elle présente des capacités

V2G intégrées ainsi que la possibilité d'agir comme un UPS<sup>24</sup>.

La conversion de la Scion xB en eBox est estimée à \$55,000 US à petite échelle mais pourrait revenir à seulement \$10,000 US en production de masse.

#### Véhicules électriques du MIT



La Porsche 914 BEV<sup>25</sup> est une conversion d'une Porsche 914 en véhicule électrique par l'équipe EVT<sup>26</sup> du MIT. Elle dispose d'un moteur de 55 kW d'Azure Dynamics<sup>27</sup> et de batteries lithium-ion phosphate de Valence Technology<sup>28</sup> pour une autonomie de 160 km. Elle est rechargeable en 2 heures et demi à 8 heures dépendant de la puissance du chargeur.

<sup>23</sup>Pour voir des photos, vidéos et autres documents :

<http://www.stefanoparis.com/piaev/acpropulsion/eBox/ebox.html>

<sup>24</sup>Uninterruptible Power Supply

<sup>25</sup><http://web.mit.edu/evt/porsche914.html>

<sup>26</sup><http://web.mit.edu/evt/evteam.html>

<sup>27</sup><http://www.azuredynamics.com/>

<sup>28</sup><http://www.valence.com/>



La dernière née du MIT<sup>29</sup> et la plus prometteuse, la elEVEN<sup>30</sup> est une conversion d'une plateforme Ford CD3<sup>31</sup>. Elle est équipée d'un moteur électrique de 250 ch prévu pour des bus de 16,5 tonnes et de batteries Lithium-ion phosphate de A123systems (voir 2.1.7 page 20) totalisant plus de 60 kWh. Cette voiture devrait aller de 0 à 100 km/h en moins de 9 secondes, avoir une autonomie de 320 km et se recharger en 11 minutes (d'où son nom) avec un chargeur spécialement conçu pour délivrant 350 kW.

Bien d'autres véhicules sont prévus et il serait long et inutile de tous les présenter, Plug In America<sup>32</sup> recense et met à jour une liste de véhicules électriques sur leur site. De plus Project Get Ready<sup>33</sup> tient à jour une carte avec les villes où des initiatives en matière de véhicules électriques sont prises.

---

<sup>29</sup>On peut suivre l'activité et la progression de ce groupe sur <http://mit-evt.blogspot.com/>

<sup>30</sup><http://web.mit.edu/evt/nextvehicle.html>

<sup>31</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/Ford\\_CD3\\_platform](http://en.wikipedia.org/wiki/Ford_CD3_platform)

<sup>32</sup><http://www.pluginamerica.org/vehicles/>

<sup>33</sup><http://projectgetready.com/category/city>

# Chapitre 2

## Le stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est un obstacle majeur à une vaste adoption des véhicules électriques. La densité énergétique des batteries est inférieure à celle des produits pétroliers ce qui résulte en un poids supérieur pour une autonomie moindre. Le coût des batteries et leur rechargement bien plus long qu'un passage à la pompe à essence est encore un autre frein.

### 2.1 Les différents types de batteries

Il existe différents types de batteries disponibles à l'heure actuelle sur le marché mais aucune d'elles ne parvient à égaler ou surpasser la densité énergétique des carburants fossiles.

#### 2.1.1 Les batteries Plomb Acide

C'est la plus ancienne des technologies de batteries et la moins onéreuse actuellement. Inventée en 1859 par le français Gaston Planté, elle est améliorée et passe en production industrielle en 1881 grâce au luxembourgeois Henri Owen Tudor qui la rend plus robuste et efficace en remplaçant les feuilles de plomb baignant dans de l'acide sulfurique par des plaques de plomb enduites d'une pâte active.

Lors de sa charge une batterie au plomb dégage de l'oxygène et de l'hydrogène, la boîte n'étant pas fermée hermétiquement, la batterie doit être utilisée à plat et le niveau d'eau ajusté régulièrement. D'autre part les vapeurs et/ou projections d'acide sulfurique provoquent de la corrosion si l'emplacement de la batterie n'est pas entretenu (avec de l'eau et bicarbonate de soude).

Ce type de batterie supporte très mal la décharge complète et la surcharge, elles sont faites pour rester chargées en permanence.

Deux évolutions de ce type de batterie sont apparues :

La batterie plomb-gel qui supporte bien les décharges importantes mais a une courte durée



FIGURE 2.1 – L'accumulateur expérimental de Gaston Planté.[4]

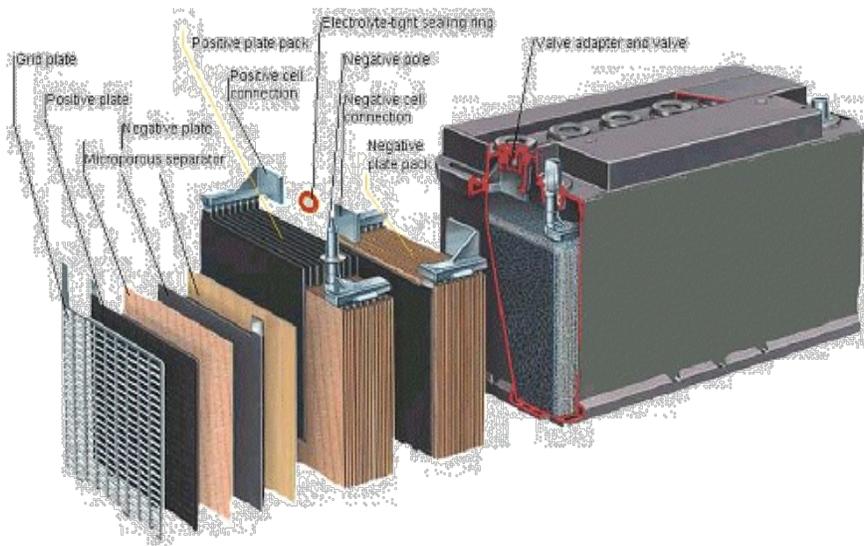


FIGURE 2.2 – Composition d'une batterie plomb acide actuelle.[5]

de vie car le gel se détériore et laisse des vides, ce qui diminue la surface d'échange. La batterie à recombinaison de gaz qui a une meilleure capacité, un faible taux d'auto-décharge et quasiment aucun dégazage. De ce fait elle peut être hermétiquement fermée et placée dans n'importe quelle position.

Ce type de batterie n'est pas adapté pour une utilisation dans les véhicules électrique de part leur poids et leur faible capacité, elles sont de plus nocives pour l'environnement.

Toutefois le projet CalCars<sup>1</sup> a commencé ses expérimentations avec ce type de batterie<sup>2</sup>!

### 2.1.2 Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

C'est une technologie très ancienne aussi, inventée par le suédois Waldemar Jungner en 1899. Elle était très répandue pour les appareils électriques nécessitant un courant électrique important comme les téléphones portables ou les appareils photos numériques. De part la nocivité du Cadmium pour l'environnement, ce type de batterie a été interdit en Europe pour le grand public en 2006.

Ce type de batterie a une longévité assez importante (environ 1000 cycles) mais insuffisante pour une utilisation dans les véhicules électriques et a de plus un effet mémoire.

### 2.1.3 Les batteries Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Metal hybride Ni-Mh)

C'est le successeur des batteries Ni-Cd, commercialisé en 1990 elles ont une architecture similaire aux batteries Ni-Cd pour une densité énergétique doublée. Mais une résistance supérieure qui impose une phase de rodage des éléments pour débiter de forts taux de courants. C'est une technologie assez fragile car ne supportant pas la surcharge.

Un avantage certain de cette technologie est qu'elle n'a pas d'effet mémoire mais a une capacité d'auto-décharge importante.

C'est le type de batterie utilisée dans les Toyota Prius actuelles (mais pas la Prius 4).



FIGURE 2.3 – Batterie Ni-Mh d'une Toyota Prius

<sup>1</sup><http://www.calcars.org/>

<sup>2</sup><http://www.calcars.org/photos.html>

Ce type de batterie est adapté pour une transition vers les voitures électriques mais sa durée de vie n'est pas satisfaisante.

### 2.1.4 Les batteries Lithium-ion (Li-ion)

Bien que le principe en soit connu depuis les années 80 les premiers éléments rechargeables au Lithium n'ont été commercialisés qu'en 1991. Cela à cause du caractère instable du Lithium métallique pendant la phase de charge. Le problème a été résolu en utilisant des ions de lithium. Le lithium ion (Li-ion) ne présente pas de danger si certaines précautions sont prises lors de la charge. En revanche il y a un risque d'explosion si chargé dans de mauvaises conditions, la plupart des fabricants équipent donc leur packs de batteries de circuits de protection.

Avec un faible taux de décharge dans le temps et sans effet mémoire, cette batterie offre une densité énergétique importante (le double du Ni-Mh) mais une durée de vie inférieure aux batteries Ni-Mh.

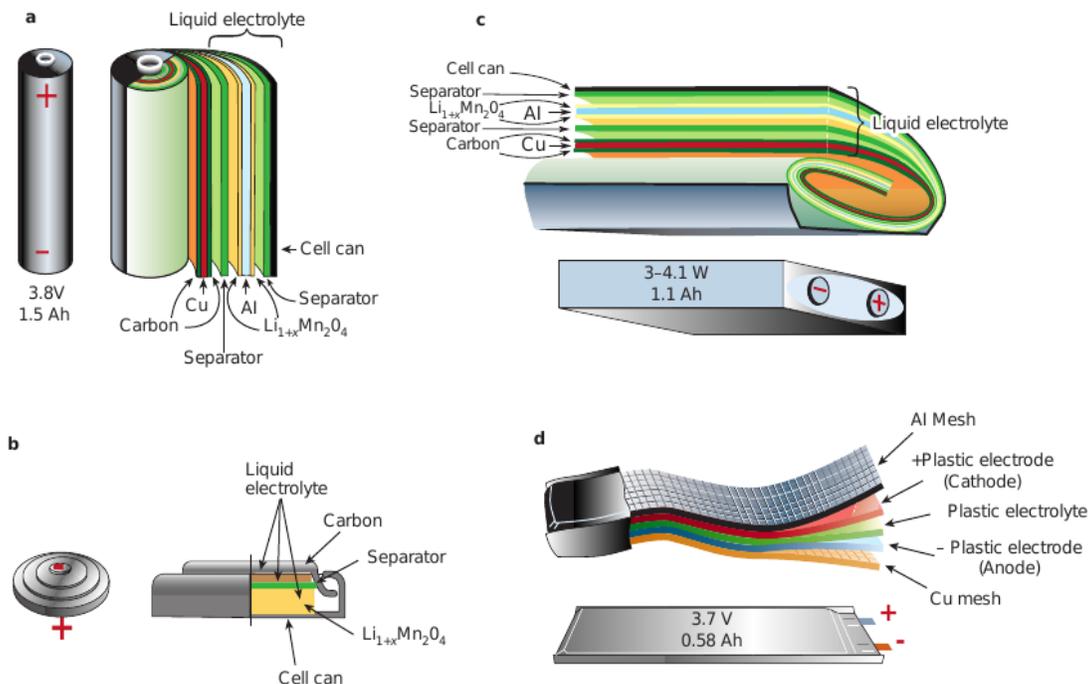


FIGURE 2.4 – Schémas représentant les différents design de batteries Li-ion actuelles a) cylindrique b) plate c) prismatique d) mince et plate [6]

### 2.1.5 Les batteries Lithium-ion Polymère (Li-po)

Depuis 1999 est apparue une nouvelle génération d'accumulateurs Li-ion : Le Lithium ion Polymère (Li-po). L'électrolyte est un polymère gélifié qui permet d'obtenir des éléments très fins et plats pouvant prendre toutes les formes possibles. Encore chère aujourd'hui cette nouvelle technologie est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins cher à la réalisation que le Li-ion classique.

La Chevrolet Volt utilise ce type de batteries produites par LG Chemical et la  $B^O$  par le groupe Bolloré.

### 2.1.6 Comparaison des batteries existantes

Technologies	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion	Li-ion polymer
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200	100-130
Nombre de cycles (Charge décharge)	400 à 1200	2000	1500	500 à 1000	200 à 500
Temps de charge	6 à 12h	1h à 2h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	0 à 60°C

FIGURE 2.5 – Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles

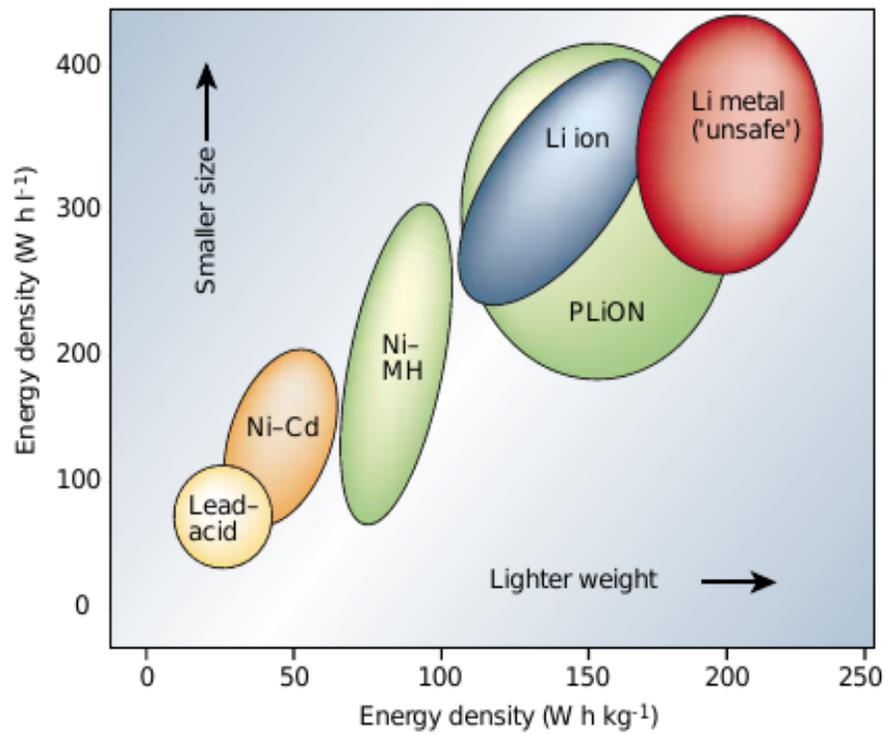


FIGURE 2.6 – Comparaison des batteries actuelles en terme de densité gravimétrique et volumétrique [6]

### 2.1.7 Les batteries en développement

#### La batterie Lithium-Nanophosphate de A123systems & Saphion de Valence Technologie

A123systems est née en 2001 des recherches sur les batteries conduites au MIT, ils utilisent une électrode positive nanophosphate ( $LiFePo_4$  pour a123systems,  $LiFeMgPo_4$  pour Valence).

Cette batterie s'appuie sur les nano-technologies pour obtenir une meilleure circulation des électrons avec une faible impédance et une plus longue durée de vie que les batteries Li-ion traditionnelles [16].

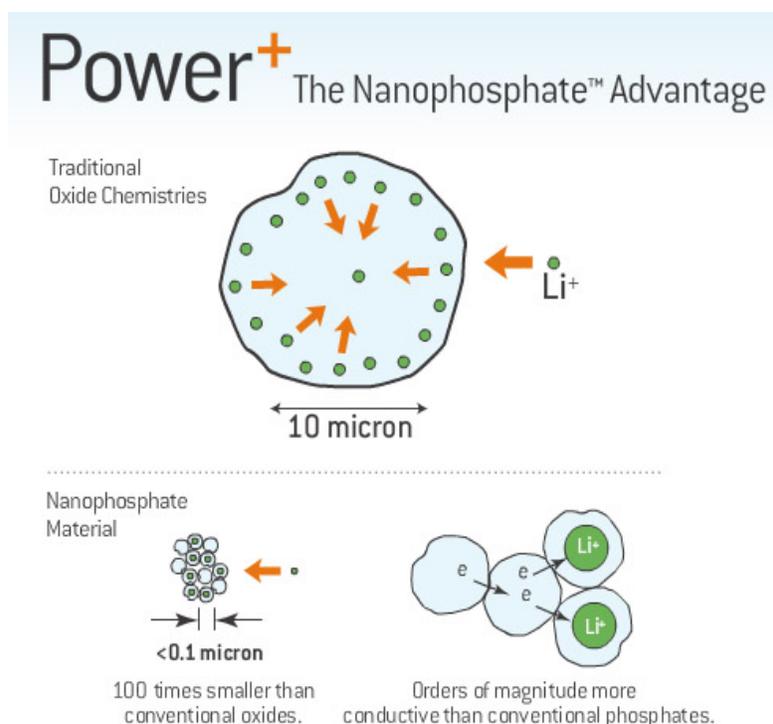


FIGURE 2.7 – Schéma comparatif de la technologie traditionnelle avec la technologie nanophosphate [7]

L'entreprise prétend que ce type de batterie s'auto-décharge très peu et garde sa capacité même sur de longues décharges.

D'autre part, ces batteries supportent la recharge rapide et les réactions chimiques donnent lieu à peu de déperdition de chaleur, ces batteries sont plus sûres que les batteries traditionnelles puisque les matériaux utilisés sont plus stables [7].<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Tests du MIT sur ce type de batteries :

<http://mit-evt.blogspot.com/2010/07/new-cell-cycler.html>

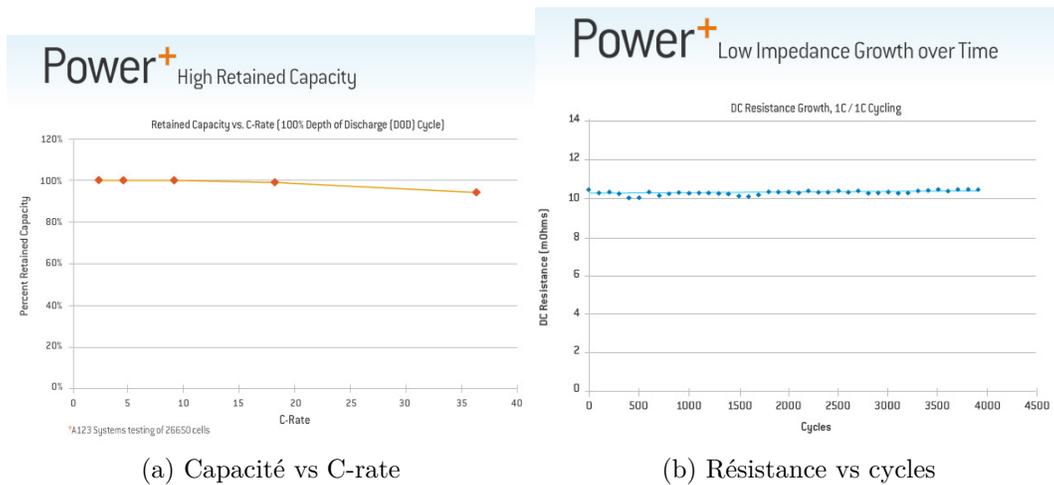


FIGURE 2.8 – Graphiques montrant les caractéristiques de capacité et de résistance des batteries Lithium-Nanophosphate [7]

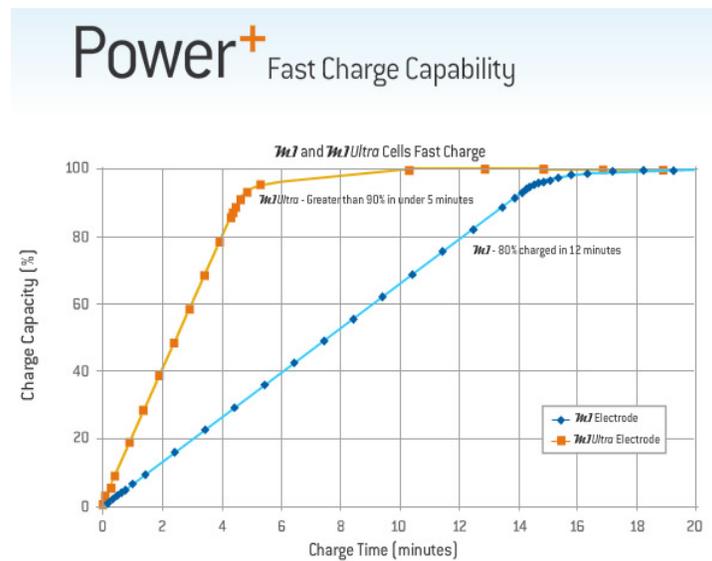


FIGURE 2.9 – Temps de charge rapide de deux modèles de batteries Lithium-Nonophosphate

A123Systems commercialise en Amérique du nord des packs de conversion pour Toyota Prius (2004-2009) pour les rendre branchables. Baptisé Hymotion, le pack s'appuie sur cette technologie de batteries. Il est utilisé par le projet RechargeIT de Google [14]. D'autre part la Chevrolet Volt aurait pu utiliser ce type de batteries mais A123systems a été pénalisé par son statut de « startup » et surtout pour ne pas produire de batteries prismatiques.

### La batterie Lithium-Titanate de AltairNano & Toshiba

Au lieu d'agir sur la cathode comme le fait A123Systems, AltairNano agit sur l'anode en remplaçant le graphite traditionnellement utilisé par une nano-structure sphérique plus régulière et offrant une plus grande surface de contact, le lithium titanate oxide ( $Li_4Ti_5O_{12}$ ).

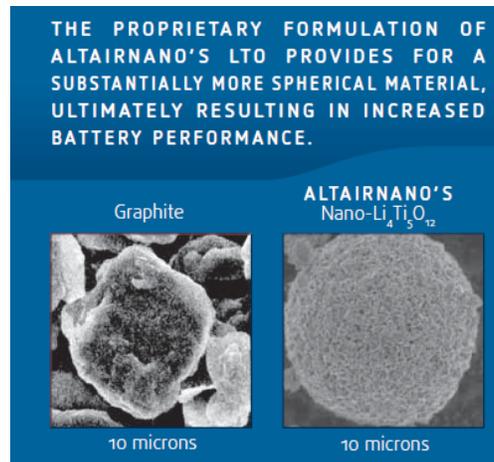


FIGURE 2.10 – Comparaison de la structure du graphite avec le Lithium-Titanate [8]

L'entreprise prétend que ses batteries sont trois fois plus puissantes que les batteries Lithium-ion traditionnelles avec une durée de vie de plus de 5000 cycles, une tolérance à des températures de  $-40$  à  $65^\circ\text{C}$  et des temps de charge/décharge de l'ordre de 10 minutes [17].

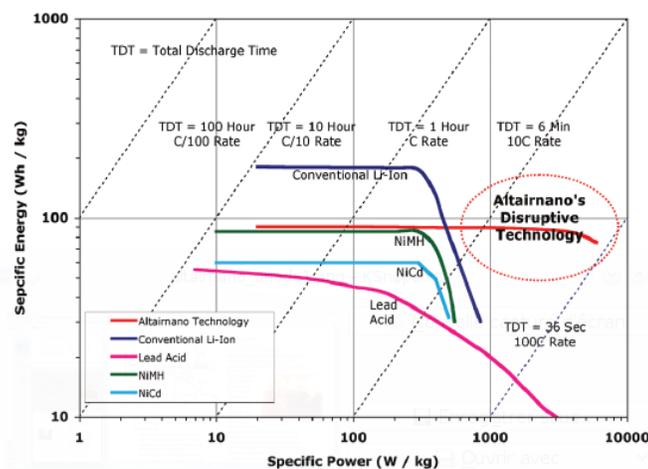


FIGURE 2.11 – Comparaison de la durée de décharge de plusieurs types de batteries [8]

D'après un document d'AltairNano datant de 2006 sur leur technologie NanoSafe [8], leurs recherches montreraient que leurs batteries pourraient avoir une durée de vie allant jusqu'à 20 ans, opérer entre -50°C et 75°C et se recharger en quelques minutes seulement. Ils auraient même testé leur batteries à 250°C en n'observant aucune explosion.

### Pistes de recherche

Plus de documents sur les nouvelles batteries utilisant les nano technologies et celles à venir sont dans la bibliographie [18, 19, 20, 21] ainsi qu'une étude comparative des batteries Lithium nouvelle génération pour véhicules électriques [22].

Une piste de recherche très prometteuse a été mise au point au MIT par l'équipe<sup>4</sup> du professeur Gerbrand Ceder et publiée en 2009. D'après le constat que les ions de lithium pouvaient se déplacer extrêmement rapidement mais que la structure des batteries actuelles les en empêchait, l'équipe a mis au point des sortes de "périphériques" pour ions, des tunnels leur permettant de circuler plus librement et donc la batterie peut être chargée et déchargée beaucoup plus rapidement en délivrant plus de puissance. Cette découverte permettrait une fois perfectionnée aux véhicules électriques de bénéficier d'une plus grande vitesse dans les accélérations et des temps de recharges extrêmement rapides de l'ordre de la dizaine de secondes.[23] A123Systems a déjà acquis la licence d'utilisation de cette nouvelle technologie et devrait très prochainement avoir un produit l'intégrant en test.

Plus récemment, deux types de batteries ont été mises au point au MIT. La première est une batterie semi-liquide appelée « Cambridge crude »<sup>5</sup> et décrite dans un article[24]. Sa particularité tient au fait que le liquide qui stock l'énergie est pompé dans le système qui le décharge, ainsi ce design permettrait de réaliser un système moins volumineux et onéreux que les batteries actuelles. Ce système aurait également l'avantage d'autoriser le remplacement dans une voiture de la batterie en pompant le liquide déchargé tout en déversant du liquide pleinement chargé, l'équivalent d'une recharge rapide. La voiture n'aurait alors pas nécessairement à avoir de chargeur intégré ou en option pour une recharge sur secteur éventuelle. La deuxième batterie est une amélioration du design de batteries « lithium-air » ou « lithium-oxygène »<sup>6</sup> en utilisant des nano-technologies pour minimiser la quantité de carbone utilisée. De ce fait ce type de batterie est quatre fois plus légère qu'une batterie au lithium traditionnelle pour une capacité identique.

Toutes ces recherches au MIT sont pertinentes pour les véhicules électriques ou hybrides branchables puisqu'elles répondent à une partie des obstacles à l'adoption de ces types de véhicules dont le coût des batteries, leur recharge rapide, leur capacité de stockage et leur poids.

---

<sup>4</sup><http://burgaz.mit.edu/> recense les publications sur les travaux de l'équipe.

<sup>5</sup><http://web.mit.edu/newsoffice/2011/flow-batteries-0606.html>

<sup>6</sup><http://web.mit.edu/newsoffice/2011/better-battery-storage-0725.html>

### 2.1.8 Les prévisions d'évolution des batteries

D'après un rapport récent du ministère des transports américain [9], le coût des batteries devrait diminuer par un facteur 10 entre les prix de 2009 et les prévisions pour 2030.

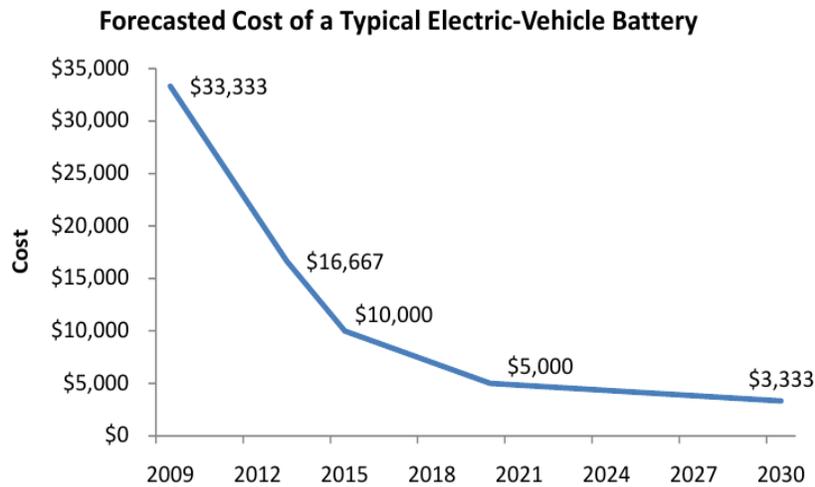


FIGURE 2.12 – Prévisions d'évolution du coût des batteries [9]

Ceci s'accompagnerait également par la réduction du poids de ces batteries et d'une augmentation de leur durée de vie.

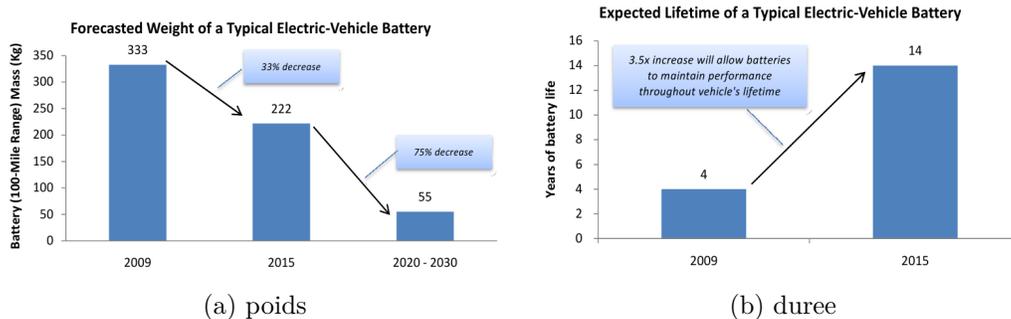


FIGURE 2.13 – Prévisions d'évolution des batteries a) poids b) durée de vie [9]

On peut signaler qu'A123Systems a reçu des subventions du gouvernement américain par le « recovery act » [9].

## 2.2 Les différents moyens de recharge

Une contrainte des véhicules électriques (ou hybrides branchables) est qu'il faut les recharger souvent de part leur autonomie limitée, ce qui pose des problèmes techniques d'électronique de puissance pour recharger rapidement et de standardisation des prises (ou autre moyen de recharge) pour un accès universel et sécurisé dans l'espace public.

### 2.2.1 L'échange de batteries

C'est une solution proposée pour pallier les temps de recharge des batteries très longs sans l'infrastructure (ou la technologie) adaptée pour une recharge rapide. Le principe serait d'avoir des stations services proposant d'échanger la batterie du véhicule vidée par une batterie équivalente complètement rechargée. Dans ce système économique, le client ne serait pas le propriétaire des batteries de son véhicule mais il les louerait. La compagnie BetterPlace<sup>7</sup> test déjà ce modèle économique est a un prototype de centre d'échange qui est prêt au japon à Yokohama<sup>8</sup>.

Évidemment cette solution demanderait une standardisation de l'emplacement et de la forme des batteries pour le secteur automobile.

### 2.2.2 La recharge par induction proposée par Renault/Nissan et al

Le constructeur automobile Nissan<sup>9</sup> a développé, en collaboration avec la société Showa Aircraft Industry<sup>10</sup>, un nouveau système pour recharger sans contact des batteries de voitures électriques lorsque celles-ci sont en stationnement dans des parkings spécialement aménagés. Le principe, relativement simple, utilise l'induction électromagnétique entre deux bobines.

La version proposée délivre 10 kW et est prévue pour l'espace public, une version moins puissante de 3 kW est envisagée pour les résidences.

La compagnie Evatran<sup>11</sup> basée en Californie test depuis 2009 un système similaire et s'apprête à commercialiser des bornes de recharge sans fil.

Ce système représenterait une avancée majeure si des villes et/ou des tronçons d'auto-route en étaient équipés, donnant aux véhicules électriques une plus grande autonomie que

---

<sup>7</sup><http://www.betterplace.com/>

<sup>8</sup>Voir la vidéo : <http://www.youtube.com/watch?v=KKA4GhVn0a4>

<sup>9</sup><http://www.nissan-global.com>

<sup>10</sup><http://www.showa-aircraft.co.jp/en/index.html>

<sup>11</sup><http://www.pluglesspower.com/>

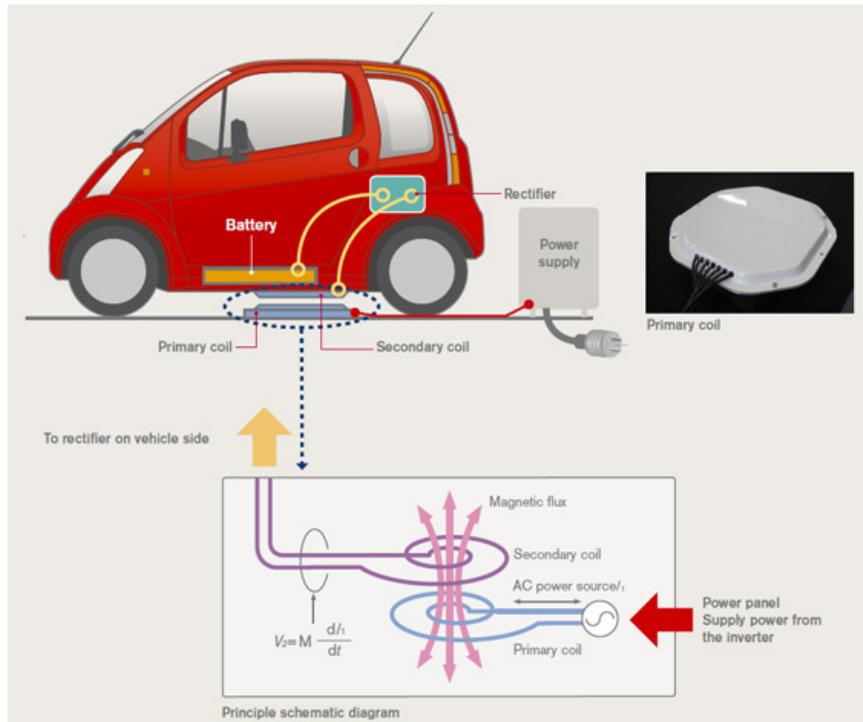


FIGURE 2.14 – Schéma présentant le chargeur à induction de Renault/Nissan

celle des véhicules à énergie fossiles.

### 2.2.3 Les chargeurs branchables

Plusieurs types de standards existent et émergent pour le rechargement de véhicules électriques. Au delà du connecteur physique utilisé, la puissance délivrée influe nettement sur les temps de recharge.

#### Connecteur SAE J1772 en Amérique du Nord



Mis au point par l'industriel japonais Yazaki<sup>12</sup>, le type de connecteur SAE J1772 a été adopté comme standard en 2010 par les compagnies GM, Chrysler, Ford, Toyota, Honda, Nissan et Tesla.<sup>13</sup>

Deux niveaux de charges sont définis tout deux en courant alternatif. Le premier avec une tension de 120 Volts et un courant de 16 ampères, le second avec une tension de 240 Volts et un courant inférieur ou égal à 80 ampères. Actuellement ce connecteur peut délivrer environ 17 kW.

Des travaux sont en cours pour standardiser d'autres niveaux de charge permettant la recharge rapide (niveau 3).<sup>14</sup>

#### Connecteur IEC 62196 en Europe



Mis au point par l'industriel allemand Mennekes<sup>15</sup>, le type de connecteur IEC 62196 (ou VDE-AR-E 2623-2-2) a été adopté par un grand nombre d'industriels européens comme standard.<sup>16</sup>

Cette proposition de standard supporte plus de modes que le connecteur SAE J1772 et peut délivrer jusqu'à 43,5 kW.<sup>17</sup>

<sup>12</sup><http://www.yazaki-na.com/>

<sup>13</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/SAE\\_J1772](http://en.wikipedia.org/wiki/SAE_J1772)

<sup>14</sup><http://www.sae.org/servlets/works/committeeHome.do?comtID=TEVHYB3>

<sup>15</sup><http://www.mennekes.de/web/application/?appid=fr>

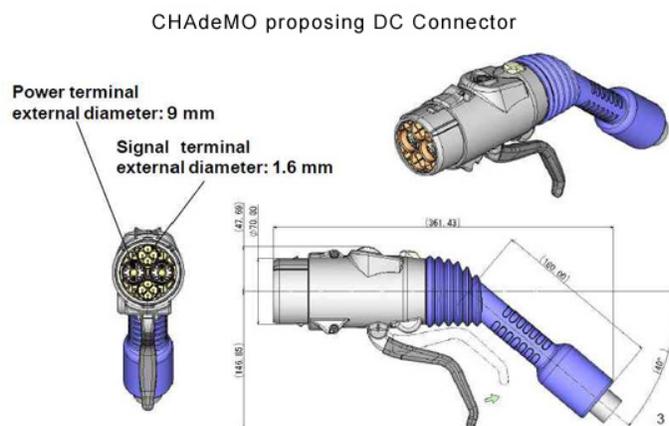
<sup>16</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/VDE-AR-E\\_2623-2-2](http://en.wikipedia.org/wiki/VDE-AR-E_2623-2-2)

<sup>17</sup>[http://www.rema-ev.com/assets/rema\\_ev\\_presentation\\_IEC.pdf](http://www.rema-ev.com/assets/rema_ev_presentation_IEC.pdf)

	230 V	400 V triphasé
16 A	3,7 kW	11,0 kW
32 A	7,4 kW	22,0 kW
63 A	14,5 kW	43,5 kW

FIGURE 2.15 – Les différents mode de recharge du connecteur IEC 62196 européen

### Connecteur CHAdeMO (niveau 3)



Le connecteur CHAdeMO a été mis au point par une association éponyme regroupant The Tokyo Electric Power Company, Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries (Subaru) et récemment Toyota. Ce connecteur peut délivrer jusqu'à 62.5 kW (500 Volts DC, 125 A).

La Nissan Leaf, la Mitsubishi i-MiEV et la Subaru R1e sont compatibles avec ce chargeur.

Hydro-Québec a rejoint l'association CHAdeMO en mai 2010<sup>18</sup>.

## 2.2.4 Quelques acteurs des infrastructures pour véhicules branchables

### AeroVironment

AeroVironment<sup>19</sup> propose une gamme étendue de bornes de recharge avec trois types de produit :

- Bornes unidirectionnelles lentes (7 kW) avec connecteur SAE J1772.
- Bornes unidirectionnelles rapides (30-60 kW) avec connecteur CHAdeMO.
- Bornes **bidirectionnelles** extrêmement rapides (125-250 kW) avec connecteur non spécifié.

Ces bornes disposent d'une connectivité multiple au réseau en option : Wifi, Zigbee, Ethernet, GSM et CPL.

<sup>18</sup>[http://www.chademo.com/en/05\\_Supporting\\_Members/05\\_Supporting\\_Members.html](http://www.chademo.com/en/05_Supporting_Members/05_Supporting_Members.html)

<sup>19</sup><http://evsolutions.avinc.com/>

### BetterPlace

BetterPlace<sup>20</sup> semble plutôt miser sur les bornes de recharge lentes à domicile et des stations de remplacement de batteries pour l'espace public. Leur borne de recharge fonctionne sur du 220 Volts et utilise au choix un connecteur SAE J1772 ou IEC 62196.

### Coulomb Technologies

Coulomb Technologies<sup>21</sup> propose des bornes de recharge lentes pour plusieurs types de configuration, prises domestiques (Amérique du nord et Europe) ou SAE J1772 ainsi qu'une borne de recharge rapide (50 kW) avec le connecteur CHAdeMO.

Leur réseau de bornes aux Etats Unis est de plus consultable en ligne<sup>22</sup>.

### DBT

DBT<sup>23</sup> offre des bornes de recharge lentes (4 kW) pour le marché européen avec connecteur résidentiels ou connecteur industriel Maréchal<sup>24</sup>. Leurs produits sont destinés à l'espace public avec système monétique intégré par carte à puce sans contact.

La ville de Paris a déployé ces bornes, la carte est disponible en ligne<sup>25</sup>.

### ecotality

ecotality<sup>26</sup> propose une station de recharge rapide (60 kW) appelée « blink »<sup>27</sup> utilisant le connecteur CHAdeMO. ecotality prévoit le déploiement imminent d'un grand nombre de ces bornes sur le territoire américain à travers son initiative « The EV project »<sup>28</sup>. Une carte est disponible pour consulter l'emplacement de ces bornes<sup>29</sup>.

---

<sup>20</sup><http://www.betterplace.com/the-solution>

<sup>21</sup><http://www.coulombtech.com/products-charging-stations.php>

<sup>22</sup><http://www.mychargepoint.net/find-stations.php>

<sup>23</sup><http://www.dbt.fr/spip.php?rubrique2>

<sup>24</sup><http://www.marechal.com/>

<sup>25</sup>[http://www.paris.fr/portail/pratique/Portal.lut?page\\_id=5775](http://www.paris.fr/portail/pratique/Portal.lut?page_id=5775)

<sup>26</sup><http://www.ecotality.com/>

<sup>27</sup><http://www.blinknetwork.com/>

<sup>28</sup><http://www.theevproject.com/>

<sup>29</sup><http://www.theevproject.com/charging-maps.php>

### General Electric

GE pour sa part a annoncé la sortie prochaine de sa borne « Wattstation »<sup>30</sup> qui s'intègre bien dans le « réseau électrique intelligent ». Si les promesses sont alléchantes, aucune information technique n'est disponible pour l'instant.

### Green Motion

Green Motion<sup>31</sup> propose une borne pour le marché européen utilisant au choix un connecteur résidentiel ou un connecteur IEC 60309 pour une puissance allant de 4 à 13 kW. L'emplacement de leurs bornes en Suisse est disponible sur leur site<sup>32</sup>.

### Hager et Technolia

Les bornes de recharge retenues pour le partenariat Toyota EDF en France à Strasbourg sont produites par Hager et Technolia<sup>33</sup>. Ces bornes n'ont qu'une puissance de 3 kW.

### Ideal Power Converters

Ideal Power Converters<sup>34</sup> possède une technologie novatrice utilisée sous licence par Lockheed Martin qui permet de construire des chargeurs bidirectionnels plus légers, moins onéreux et plus efficaces. La compagnie prétend que son futur modèle commercialisé atteindra une efficacité de 97% dans les deux sens<sup>35</sup>. Ce chargeur bidirectionnel utilisera leur technologie éprouvée dans le domaine photovoltaïque pour restituer l'énergie au réseau électrique. Sa puissance de charge sera de 30 kW et il devrait supporter le futur standard DC de SAE ainsi que CHAdeMO.

---

<sup>30</sup><http://www.ecomagination.com/technologies/wattstation>  
<http://www.geindustrial.com/products/static/WattStation/>

<sup>31</sup><http://www.greenmotion.ch/fr/>

<sup>32</sup><http://www.chargingstations.ch/poles/index.php>

<sup>33</sup>[http://www.technolia.fr/IMG/pdf/Borne\\_recharge\\_voirie.pdf](http://www.technolia.fr/IMG/pdf/Borne_recharge_voirie.pdf)

<sup>34</sup><http://www.idealpowerconverters.com>

<sup>35</sup>[http://www.idealpowerconverters.com/pdf/IPC\\_EV%20charger\\_whitepaper%20Oct2011.pdf](http://www.idealpowerconverters.com/pdf/IPC_EV%20charger_whitepaper%20Oct2011.pdf)

# Chapitre 3

## La gestion de flottes de véhicules

Enormément d'applications propriétaires existent pour faire de la gestion de flottes de véhicules. Toutes ont plus ou moins les mêmes fonctionnalités dépendant de l'application mais ces fonctionnalités peuvent inclure :

- Gestion technique du parc (assurances, pneumatiques, révisions ...)
- Suivi en temps réel du véhicule (position GPS, vitesse moyenne ou instantanée, information de divers capteurs ...)
- Rejouer les trajets d'un véhicule sur une carte
- Statistiques d'utilisation par véhicule ou par utilisateur
- Alarme par SMS sur utilisation anormale (vitesse excessive, localisation inappropriée, heure d'utilisation ...)

Le projet OpenDMTP/OpenGTS de la société GeoTelematic Solutions<sup>1</sup> est libre et semble très intéressant. Il est séparé en deux modules, OpenDMTP<sup>2</sup> est la partie serveur et OpenGTS<sup>3</sup> la partie client embarqué dans le véhicule. Tout deux sont écrits en Java.

Le point fort de cette solution semble être sa modularité. En effet les protocoles sont adaptés au matériel et on peut ainsi avoir une communication unidirectionnelle (transmission par satellite des données du véhicule) ou bidirectionnelle (GPRS). Les protocoles sont aussi faits pour utiliser peu de bande passante puisque cette ressource est onéreuse et le logiciel en lui-même côté client est léger pour pouvoir être déployé sur des téléphones portables ou des PDAs.

---

<sup>1</sup><http://www.geotelematic.com/>

<sup>2</sup><http://www.opendmtp.org/>

<sup>3</sup><http://www.opengts.org/>

# Chapitre 4

## V2G – SmartGrid

### 4.1 Les recherches de Willet Kempton et al pour UC Davis

Dès 2001, W. Kempton<sup>1</sup>, J. Tomić, S. Letendre, A. Brooks, T. Lipman publiaient un rapport [25] dans lequel ils détaillent les possibilités d'utiliser des flottes de véhicules en interaction avec le réseau électrique californien pour sa régulation.

L'équipe étudie trois paramètres des véhicules électriques :

- la ressource que représente les véhicules électriques
- la disponibilité de ces véhicules pour être connectés
- le potentiel économique de ces véhicules pour supporter le réseau pour la charge de base, les pics de puissance, comme réserve tournante ou comme service de régulation

Pour se faire l'étude se base sur les données des prix d'électricité de Californie pour les années 1998, 1999 et 2000 et compare trois types de véhicules :

- Véhicule électrique avec batterie (environ 10 kW)
- Véhicule hybride (environ 30 kW sur moteur)
- Pile à combustible (environ 40 kW)

Sur le principe que les véhicules sont immobilisés la plupart du temps et pourraient donc être branchés l'équipe a simulé leur potentiel économique. Ils ont montré que les véhicules pouvaient être très profitables pour leurs propriétaires si ils sont utilisés comme réserve tournante ou comme service de régulation et peuvent être profitables pour répondre aux pics de puissance mais dans une moindre mesure. Ce document qui est une base théorique incontournable sur la technologie V2G et les moyens de modélisation. Il est complété par diverses

---

<sup>1</sup><http://www.udel.edu/V2G/index.html>

études postérieures [26, 27, 28, 29].

Cette base théorique étant résumée dans la proposition de thèse de Karol Lina Lopez [30] en introduction et le long du texte, je laisse le soin au lecteur de s’y référer.

### 4.1.1 Les essais d’ACPropulsion

Alec N. Brooks, 2002

Ce projet [3], sponsorisé par le CARB<sup>2</sup> présente une analyse détaillée des rouages de systèmes de régulation du réseau électrique<sup>3</sup> et comment la technologie V2G peut les apporter et ce en plus d’un support local pour les résidences.

Un véhicule de test a été équipé d’un système électrique bidirectionnel (voir 1.3.1 page 10) pour prendre de l’énergie au réseau et la stocker dans des batteries et être capable de renvoyer cette énergie au réseau électrique. Le véhicule était aussi équipé d’une connexion Internet sans fil permettant le contrôle à distance de la gestion énergétique.

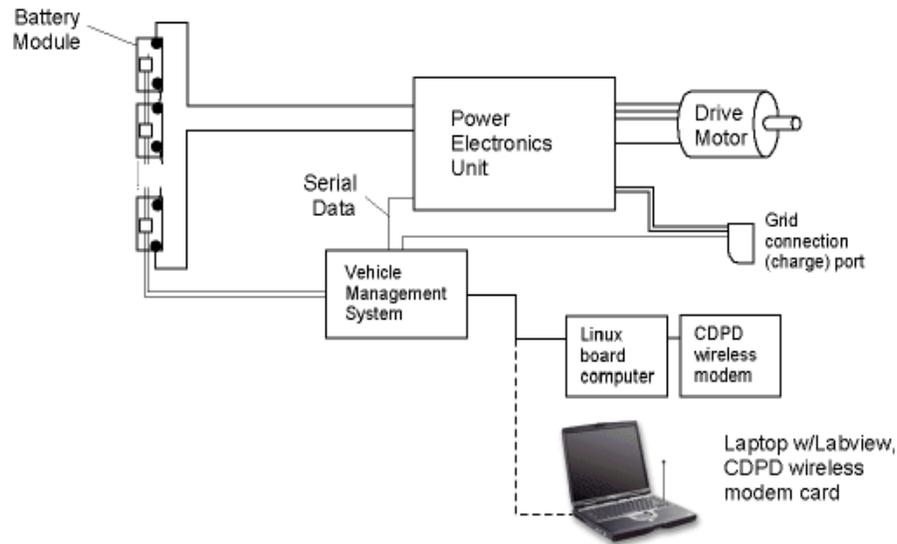


FIGURE 4.1 – Schéma de l’architecture du système de contrôle V2G envisagé par AC Propulsion [3]

Les commandes de contrôle étaient envoyées au véhicule à intervalles de 4 secondes<sup>4</sup> et la réponse du véhicule était surveillée et enregistrée.

<sup>2</sup>California Air Resources Board : <http://www.arb.ca.gov/>

<sup>3</sup>California Independent System Operator : <http://www.caiso.com>

<sup>4</sup>Un serveur local simulait un serveur Cal. ISO qui envoie des commandes toutes les 4 secondes.

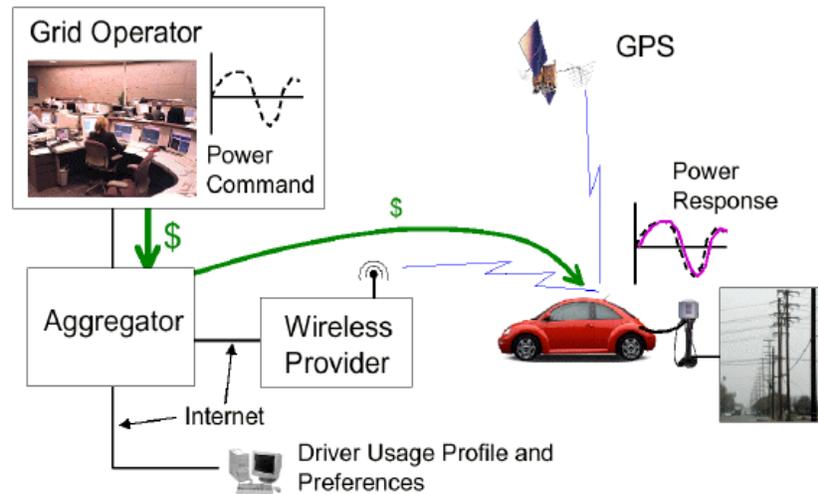


FIGURE 4.2 – Schéma de l'architecture du système de régulation envisagé par AC Propulsion [3]

Les résultats obtenus ont montré que les temps de transmission sans fil convenaient pour respecter les contraintes du système Cal. ISO et que la charge sur la batterie due à l'activité de régulation était sensiblement identique à la charge d'une journée d'utilisation normale de la voiture. De plus, les bénéfices pécuniaires de cette activité de régulation du réseau excèdent les coûts liés à la dégradation de la batterie dans la plupart des scénarios envisagés par cette étude.

En 2008, Alec N. Brooks a été engagé par Google [14] pour s'occuper de la recherche sur les énergies renouvelables et l'intégration des véhicules branchables dans le réseau électrique.

### Thomas B. Gage, 2003

Ce projet [10], sponsorisé par le CARB lui aussi décrit la conception d'un véhicule utilisant 3 sources d'énergies (électrique, essence, gaz naturel) avec une propulsion hybride série.

Le véhicule disposait d'une autonomie de 56 kilomètres sur batterie uniquement avec des performances suffisantes pour rouler sur autoroute, lorsque la batterie atteint un seuil critique de décharge le moteur à combustion prenait le relais pour fournir de l'électricité au moteur électrique et recharger la batterie<sup>5</sup>. De plus ce véhicule pouvait se recharger en 1

<sup>5</sup>Exactement le même principe que pour la Chevrolet Volt

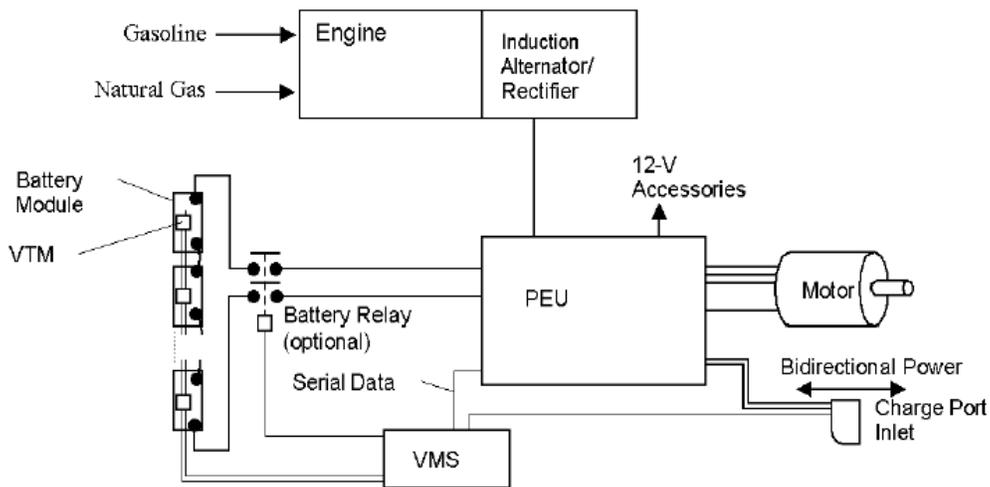


FIGURE 4.3 – Schéma de l'architecture du système hybride série d'AC Propulsion [10]

heure connecté au réseau électrique, générer de l'électricité soit à partir du moteur à combustion interne avec de l'essence soit avec du gaz naturel et ce pour recharger les batteries ou fournir de l'électricité au réseau électrique ou une autre destination (résidence par exemple lors d'une coupure de courant).

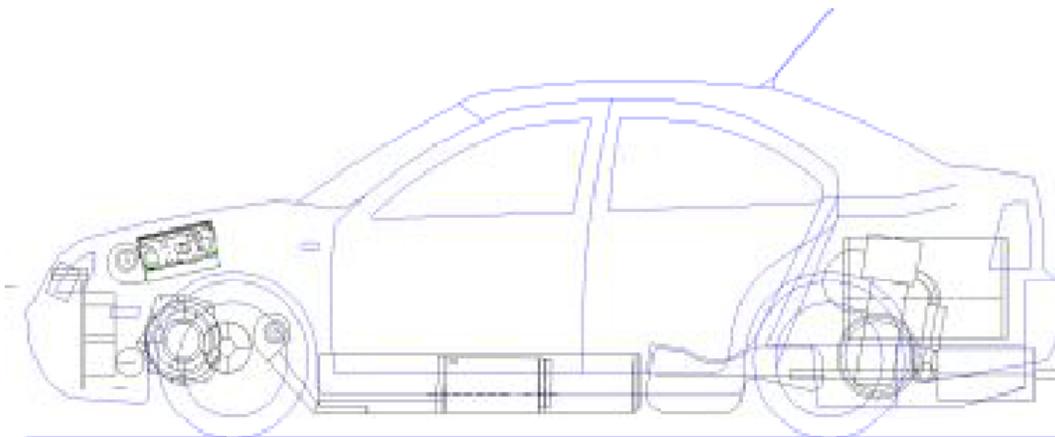


FIGURE 4.4 – Schéma de la disposition des éléments du système hybride série d'AC Propulsion [10] (bloc électrique à l'avant, batteries sur le châssis, moteur à combustion dans le coffre)

Tout comme dans le projet précédent d'AC Propulsion[3], le véhicule était équipé d'une liaison Internet sans fil qui assurait le contrôle de la gestion énergétique de l'engin. Ce véhicule a été testé sur près de 10 000 kilomètres en circulation et à l'arrêt. Le rapport

étudie l'efficacité des différents modes de fonctionnement d'un tel véhicule ainsi que son impact sur l'environnement.

#### 4.1.2 L'essai de W. Kempton en 2008 avec une eBox d'ACPropulsion

En 2008, W. Kempton et al ont publié [11] sur une expérimentation en conditions réelles d'un véhicule électrique pour le stockage de l'énergie et la régulation de fréquence du réseau PJM [31]. Ces travaux ont été réalisés en partenariat industrie-université.

L'essai a été réalisé avec une eBox (1.3.2 page 12) dont le système a été modifié pour gérer et réagir aux signaux de l'ISO<sup>6</sup> PJM pour participer à la régulation du réseau en temps réel.



FIGURE 4.5 – Photo du stand de démonstration de la eBox modifiée par Kempton et al [11]

A l'université du Delaware, une passerelle de communication commerciale Arcom Director<sup>7</sup> (matériel utilisé par les fournisseurs de services auxiliaires traditionnels) a été installée dans la voiture pour recevoir le signal de PJM et contrôler la charge et la décharge, la connexion est filaire avec un câble ethernet. Le véhicule répondant aux signaux de PJM est capable de délivrer 19 kW et de répondre en moins d'une seconde. L'université du Delaware

<sup>6</sup>Independent System Operator

<sup>7</sup><http://www.arcomcontrols.com/products/pcp/Gateways/DS/default.htm>

a imaginé un protocole de communication entre les systèmes et a coordonné les modifications logicielles nécessaires avec AC Propulsion, Arcom et PJM.

A fin de démonstration, un compteur électrique a été spécialement conçu par PHI [32].

Lorsqu'elle est branchée, la voiture envoie à un serveur de l'université les données sur l'état de charge de la batterie, la capacité de la prise de courant, le voltage de la batterie, le courant, le signal de régulation et d'autres variables, tout ceci est stocké sur le serveur.

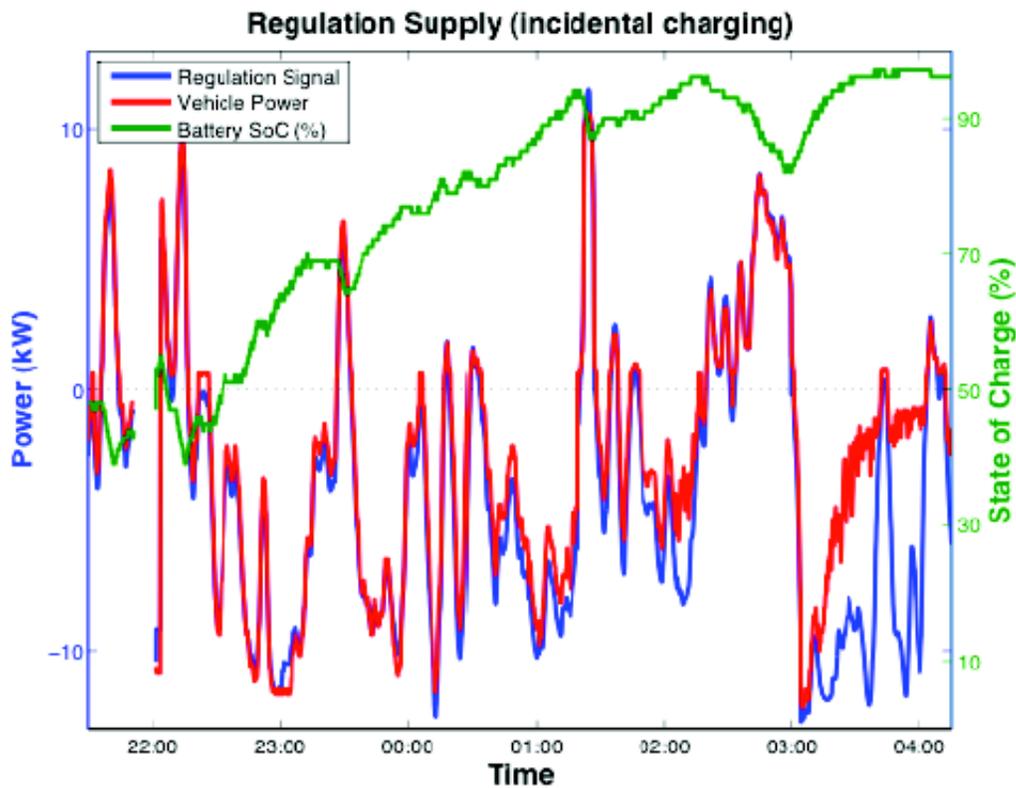


FIGURE 4.6 – Régulation pendant la nuit avec des demandes de régulation à la baisse dominantes (charge de la batterie) [11]

Encore une fois Kempton souligne que cette technologie serait particulièrement bien intégrée dans une économie où la production électrique serait plus dépendante des énergies renouvelables [29], les voitures stockant l'énergie quand les éoliennes, panneaux solaires, etc produisent un surplus d'énergie et redistribuant cette énergie au réseau lors de creux de production.

Satisfait par les résultats obtenus avec cette eBox qui était prêtée, l'université du Delaware l'a achetée et prévoit de constituer une flotte de véhicules d'1 MW pour prendre un

contrat d'A/S<sup>8</sup> et tester le modèle technique et économique présenté à plus grande échelle.

On peut signaler que Google.org a participé au financement de ce test.

## 4.2 Publications récentes à l'université du Missouri

Entre 2008 et 2009, des membres de l'Université de Sciences et de Technologies du Missouri ont publié trois articles[33, 34, 35] sur l'Optimisation par Essaim Particulaire<sup>9</sup> pour résoudre le problème V2G dans un contexte d'agglomération des véhicules dans un parking.

Pour se faire, ils se sont basés sur les recherches de Kempton et al et des spécifications techniques du système de chargeur bidirectionnel d'AC Propulsion ainsi que des prix de l'électricité fournis par Cal. ISO. Le problème qu'ils ont cherché à résoudre est de planifier au mieux les charges/décharges des véhicules pour que ceux-ci réalisent un profit tout en ayant une charge suffisante lors de leurs sorties (60% de la batterie). Dans ce système, les véhicules peuvent acheter et vendre de l'électricité au réseau électrique mais aussi entre eux. Cette situation a peu de chances d'arriver puisque comme les décisions achat/vente sont prises en fonction des prix de l'électricité, il serait coûteux pour un véhicule d'acheter lorsqu'il est bénéfique pour un autre de vendre, toutefois ceci peut arriver lorsqu'un véhicule est garé pour une courte période.

La modélisation réalisée avec des parkings de 50, 500 et 5000 véhicules montre que la technique BPSO trouve de façon consistante une bonne solution même si elle est à chaque fois différente avec un écart type de moins de \$1.00 US. Les auteurs prévoient donc de continuer leurs recherches et d'affiner l'algorithme pour aussi y intégrer d'autres marchés (régulation, réserve tournante, marche de pics).

## 4.3 La fondation Rocky Mountain Institute et le Smart Garage

La fondation Rocky Mountain Institute [36] a développé un groupe de travail appelé Smart Garage [12] co-financé par The Lemelson Foundation<sup>10</sup> et Google.org, ce groupe réuni des entreprises de premier plan pour travailler sur le future de l'automobile électrique et son intégration dans le réseau.

---

<sup>8</sup>*Ancillary Service* : service auxiliaire, appelé régulation le plus souvent

<sup>9</sup>Particle Swarm Optimization : PSO ; si binaire : BPSO

<sup>10</sup><http://www.lemelson.org/>

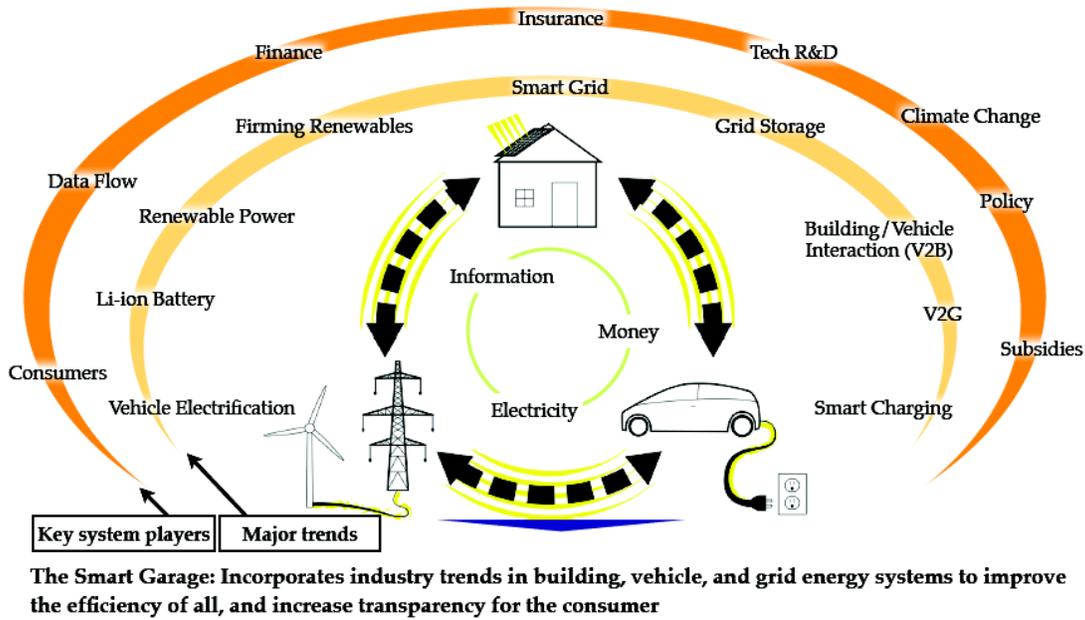


FIGURE 4.7 – Vision d’ensemble des acteurs et défis à relever pour faire du SmartGarage une réalité [12]

Le groupe de travail a organisé une « charrette »<sup>11</sup> en octobre 2008, parmi les participants on peut noter la présence d’IBM, A123Systems, Alec Brooks de Google (ancien d’AC Propulsion), Tesla, Nissan, GM, Ford et plusieurs compagnies électriques.

Durant les 3 jours qu’a duré la charrette, le groupe de 80 ingénieurs/spécialistes a travaillé sur tous les aspects du « problème V2G » : les véhicules (existant, attendu), l’infrastructure de recharge (public, privé, qui paye?), les connecteurs (standardisation), le réseau électrique (adaptation ou refonte complète) et enfin l’accueil du consommateur.

Les participants à cette charrette sont arrivés au consensus que la solution technique à court terme (2 à 5 ans envisagés) est le V1G (des systèmes bien intégrés dans le réseau qui font de la charge unidirectionnelle mais de manière intelligente), même si à plus long terme le V2B, V2G ou V2G NGU sont des solutions plus élégantes et intéressantes autant pour les distributeurs d’électricité que pour les consommateurs.

<sup>11</sup> Terme venant des étudiants en architecture français qui finissaient souvent leur travail dans la charrette qui les emmenait à l’université juste avant de rendre leur production.



(a) Définitions

(b) Propriétés

FIGURE 4.8 – Définitions et tableau récapitulant les propriétés de chaque type de technologie de raccordement des véhicules électriques envisagés lors de la charrette SmartGarage [12]

## 4.4 D'autres recherches récentes

Des simulations de l'effet de la technologie V2G sur différents réseaux électriques locaux sont rencontrées fréquemment. Ainsi, au Danemark où la production d'électricité à partir d'éoliennes prend une place de plus en plus importante et par conséquent fluctue au rythme du vent, Pillai[37] simule un déploiement V2G sur le réseau électrique local. L'étude montre un effet bénéfique de la régulation avec un nivellement des variations sur le réseau électrique.

D'autres travaux portent plus spécifiquement sur l'optimisation des algorithmes destinés à contrôler les agents participants. Q-Learning[38] a été utilisé pour contrôler en simulation un contrôleur responsable de coordonner la réponse des véhicules. Deux algorithmes décentralisés ont été mis au point en suivant une optimisation par programmation linéaire[39]. Les

deux objectifs sont de déplacer la charge sur le réseau en période creuse pour sa recharge et participer à la régulation du réseau. Des algorithmes évolutionnaires multi-objectifs ont également été expérimentés[40].

A l'université de Waterloo, un groupe propose un standard de communication pour les agents V2G basé sur IPv6[41].

Enfin, au Portugal, J. Ferreira et al[42] présentent un système de gestion de flotte de véhicules rechargeables qui rappelle des aspects des travaux entrepris par notre groupe à l'université Laval.

## 4.5 Les prévisions de croissance du marché V2G

Le cabinet de consultants ZPrÿme [13] a publié en 2010 une étude avec le soutien de Zigbee<sup>12</sup> sur le futur de la technologie V2G. Cette étude a reçu des contributions de l'université du Delaware notamment.

Selon cette étude, entre 2015 et 2020 les ventes globales de véhicules V2G pourraient progresser de 103 900 à 1.06 millions respectivement soit une augmentation annuelle de 59%, ce marché pourrait représenter de \$3,2 US milliards à \$26,6 US milliards rien que pour les véhicules.

L'étude souligne comme les participants à la charrette SmartGarage que cette technologie est à notre portée et que presque tous les éléments techniques sont réunis aujourd'hui pour son déploiement mais que le coût de ce déploiement est à la fois un obstacle mais aussi un marché très juteux.

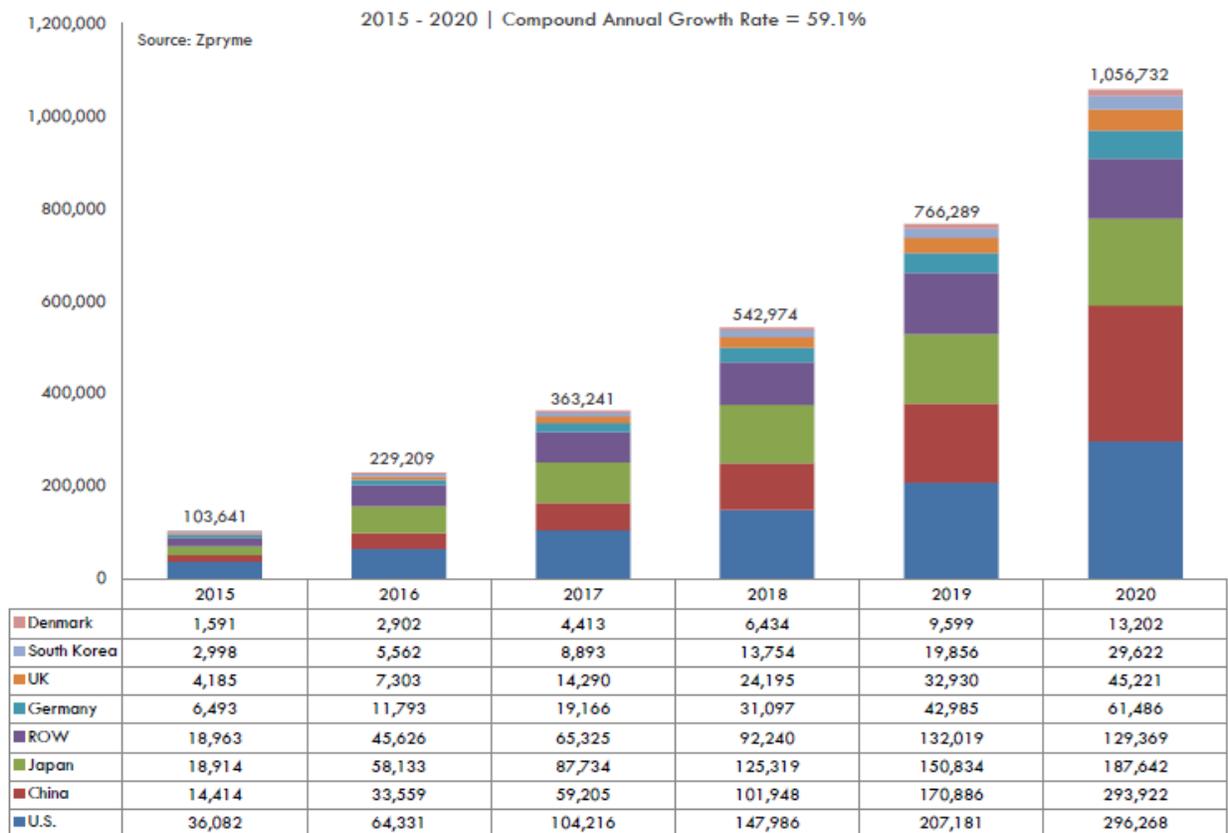


FIGURE 4.9 – Prévisions de croissances des ventes des véhicules V2G de 2015 à 2020 selon ZPrÿme [13]

# Chapitre 5

## Conclusion

L'industrie et la recherche académique progressent sans cesse pour apporter de nouvelles technologies qui seront utilisées pour façonner un réseau électrique plus intelligent.

De plus en plus d'articles universitaires paraissent laissant bien voir que ce domaine, sinon voué à une réussite certaine, intéresse un large éventail de chercheurs.

Les industriels quant à eux procèdent à des expérimentations et annoncent la disponibilité de futurs produits en se servant de « smart grid » comme argument marketing.

Toutefois, la standardisation des différents éléments qui interagiront dans ce réseau électrique intelligent n'en est qu'à ses balbutiements, le coût et la complexité de la mise à niveau des infrastructures actuelles pour être adaptées à ces nouvelles technologies sont un frein à son déploiement. De plus, le modèle économique que suivra le déploiement d'une telle technologie ne fait pas encore l'unanimité.



FIGURE 5.1 – Une réalité demain? [12]

# Bibliographie

- [1] Lyonel Baum. Les voitures électriques et leurs sources d'énergie. <http://knol.google.com/k/les-voitures-électriques-et-leurs-sources-d-énergie>.
- [2] EDF, Toyota, Ville de Strasbourg. Lancement de la démonstration du véhicule hybride rechargeable à strasbourg 26-28 avril 2010. [http://medias.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Presse/Dossiers/EDF/2010/dp\\_VHR-Strasbourg\\_100427\\_vf.pdf](http://medias.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Presse/Dossiers/EDF/2010/dp_VHR-Strasbourg_100427_vf.pdf).
- [3] A. N. Brooks. Vehicle-to-grid demonstration project : Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle. 2002.
- [4] Fabio Ferrari. Bref comparatif des technologies de batteries. [http://www.symbiocars.com/symbiocars/J0/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9:bref-comparatif-des-technologies-de-batteries&catid=3:batteries&Itemid=14](http://www.symbiocars.com/symbiocars/J0/index.php?option=com_content&view=article&id=9:bref-comparatif-des-technologies-de-batteries&catid=3:batteries&Itemid=14).
- [5] Lead-acid battery. [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/L/AE\\_lead-acid\\_battery.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/L/AE_lead-acid_battery.html).
- [6] M. Armand J.-M. Tarascon. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414, 2001.
- [7] A123systems. <http://www.a123systems.com/a123/technology>.
- [8] AltairNano. Nanosafe battery technology. <http://www.altairnano.com>; <http://konociteaa.org/news/articles/NanoSafeBackgrounder060920.pdf>, 2006.
- [9] USA Department Of Energy. The recovery act : Transforming america's transportation sector. batteries and electric vehicles. 2010.
- [10] T. B. Gage. Development and evaluation of a plug-in hev with vehicle-to-grid power flow. 2003.
- [11] K. Huber K. Komara S. Letendre S. Baker D. Brunner N. Pearre W. Kempton, V. Udo. A test of vehicle-to-grid (v2g) for energy storage and frequency regulation in the pjm system. [http://www.magicconsortium.org/\\_Media/test-v2g-in-pjm-jan09.pdf](http://www.magicconsortium.org/_Media/test-v2g-in-pjm-jan09.pdf), 2008-2009.

- [12] Rocky mountain institute, move's smart garage. <http://move.rmi.org/innovation-workshop-category/smart-garage.html>.
- [13] Zpryme. Smart grid insights. <http://www.zpryme.com/SmartGridInsights/>, 2010.
- [14] Rechargeit, un projet de google.org. <http://www.google.org/recharge/>.
- [15] Ac propulsion. <http://www.acpropulsion.com/>.
- [16] Ian Maxwell and Ian E. Maxwell. Nanotech innovation. In *Managing Sustainable Innovation*, pages 1–6. Springer US, 2009.
- [17] Altairnano. <http://www.altairnano.com>.
- [18] Burke Andy & Kurani Kenneth S. Axsen, Jonn. Batteries for plug-in hybrid electric vehicles (phevs) : Goals and the state of technology circa 2008. <http://www.escholarship.org/uc/item/1bp83874>, 2008.
- [19] P. G. Bruce, B. Scrosati, and J. M. Tarascon. Nanomaterials for rechargeable lithium batteries. *Angew Chem Int Ed Engl*, 47(16) :2930–2946, 2008. doi :10.1002/anie.200702505.
- [20] Bruno Scrosati and Jurgen Garche. Lithium batteries : Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9) :2419–2430, 2010. doi :10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
- [21] P. L. Taberna, S. Mitra, P. Poizot, P. Simon, and J. M. Tarascon. High rate capabilities fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub>-based cu nano-architected electrodes for lithium-ion battery applications. *Nat Mater*, 5(7) :567–573, 2006. doi :10.1038/nmat1672.
- [22] Andrew Burke. Performance, charging, and second-use considerations for lithium batteries for plug-in electric vehicles. [http://projectgetready.com/docs/2009\\_UCD-ITS-RR-09-17.pdf](http://projectgetready.com/docs/2009_UCD-ITS-RR-09-17.pdf), 2009.
- [23] B. Kang & G. Ceder. Battery materials for ultrafast charging and discharging. *Nature*, (458) :190–193, 2009. doi :10.1038/nature07853.
- [24] Mihai Duduta, Bryan Ho, Vanessa C. Wood, Pimpa Limthongkul, Victor E. Brunini, W. Craig Carter, and Yet-Ming Chiang. Semi-solid lithium rechargeable flow battery. *Advanced Energy Materials*, 1(4) :511–516, 2011.
- [25] S. Letendre A. Brooks T. Lipman W. Kempton, J. Tomić. Vehicle-to-grid power : Battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in california. 2001.
- [26] J. Tomić W. Kempton. Vehicle-to-grid power fundamentals : Calculating capacity and net revenue. *Journal of power sources*, 2004. doi :10.1016/j.jpowsour.2004.12.025.
- [27] W. Kempton J. Tomić. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of power sources*, 2007. doi :10.1016/j.jpowsour.2007.03.010.

- [28] J. Tomić W. Kempton. Vehicle-to-grid power implementation : From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of power sources*, 2004. doi :10.1016/j.jpowsour.2004.12.022.
- [29] W. Kempton H. Lund. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through v2g. *Energy Policy*, (36) :3578–3587, 2008. doi :10.1016/j.enpol.2008.06.007.
- [30] Karol Lina Lopez. Apprentissage de stratégies personnalisées pour flottes de véhicules hybrides électriques rechargeables, 2010. Rapport pour l'examen prédoctoral présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en génie électrique.
- [31] Pjm. <http://www.pjm.com/>.
- [32] Pepco holdings inc. <http://www.pepcoholdings.com/>.
- [33] K. A. Corzine C. Hutson, G. K. Venayagamoorthy. Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions. 2008.
- [34] K. Corzine C. Huston G. K. Venayagamoorthy, P. Mitra. Real-time modeling of distributed plug-in vehicles for v2g transactions. 2009.
- [35] G. K. Venayagamoorthy A. Y. Saber. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid —a cost-emission optimization. *Journal of Power Sources*, 2009. doi :10.1016/j.jpowsour.2009.08.035.
- [36] Rocky mountain institute. <http://www.rmi.org/>.
- [37] Jayakrishnan Radhakrishna Pillai and Birgitte Bak-Jensen. Integration of vehicle-to-grid in the western danish power system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(1) :12–19, 2010.
- [38] Matthias D.; Reckinger Yves; Andersson Goran; Chatzivasileiadis, Spyros; Galus. Q-learning for optimal deployment strategies of frequency controllers using the aggregated storage of phev fleets. *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, pages 1–8, 2011.
- [39] Changsun Ahn, Chiao-Ting Li, and Huei Peng. Optimal decentralized charging control algorithm for electrified vehicles connected to smart grid. *Journal of Power Sources*, July 2011.
- [40] Maryam Ramezani, Mario Graf, and Harald Vogt. A simulation environment for smart charging of electric vehicles using a multi-objective evolutionary algorithm. In Dieter Kranzlmüller and A Toja, editors, *Information and Communication on Technology for the Fight against Global Warming*, volume 6868 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 56–63. Springer Berlin / Heidelberg, 2011.

- [41] Sandra Céspedes and Xuemin (Sherman) Shen. A framework for ubiquitous ip communications in vehicle to grid networks. 2011.
- [42] V.; Afonso J.L.; Silva A.; Ferreira, J.C.; Monteiro. Smart electric vehicle charging system. *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, pages 758–763, 2011.
- [43] N. Lewinsky. Nanotechnology for waste minimization and pollution prevention, 2008.
- [44] R. Pratt M. Kintner-Meyer, K. Schneider. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional u.s. power grids part 1 : Technical analysis. 2007.
- [45] Google.org rechargeit blog. <http://rechargeit.blogspot.com/>.
- [46] Magic consortium. <http://www.magicconsortium.org/>.
- [47] University of delaware. <http://www.udel.edu/>.
- [48] Green mountain college. <http://greenmtn.edu/>.
- [49] Project get ready de the rocky mountain institute. <http://projectgetready.com/>.