



Le déploiement des infrastructures de charge de véhicules électriques et hybrides rechargeables : une approche économique

Projet de recherche pour le PREDIT, GO6, financé par l'ADEME

Rapport final

Décembre 2011

Durée : 12 mois

Partenaire principal : Armines – CERNA, MINES ParisTech

Equipe scientifique : Matthieu Glachant (responsable), Marie Laure Thibault, Laurent Fauchaux

Mots clés : véhicules électriques et hybrides rechargeables, infrastructure de charges, économie, régulation publique

Table des matières

<i>Résumé.....</i>	<i>5</i>
<i>1 Introduction.....</i>	<i>9</i>
<i>2 La technologie</i>	<i>11</i>
2.1 Les véhicules électriques rechargeables.....	11
2.1 Les technologies d'infrastructures de recharge	13
2.2 Les batteries.....	17
2.4 Les logiciels	23
<i>3 La politique française de déploiement de l'infrastructure de recharge.....</i>	<i>25</i>
3.1 Objectifs.....	25
3.2 Instruments pour inciter à l'achat de VEx	25
3.3 Instruments pour déployer l'infrastructure de recharge.....	26
<i>3 Le coût de la recharge</i>	<i>28</i>
3.1 Le coût unitaire d'installation des points de charge	28
3.2 Le calibrage de l'infrastructure de recharge	31
3.3 Le coût de la recharge normale publique	33
3.4 Quelles conséquences pour le calibrage de l'infrastructure de transport ?.....	35
3.5 Que retenir ?	40
<i>4. Les bornes publiques de recharge : investissement, gestion et tarification</i>	<i>41</i>
4.1 La recharge partagée est un monopole naturel.....	41
4.2 La régulation du monopole naturel de l'infrastructure	42
4.3 Que retenir ?	44
<i>5 La standardisation</i>	<i>46</i>
5.1 Qu'est-ce qu'un standard ?	46

5.2	L'économie des réseaux.....	47
5.3	Les besoins de compatibilité dans le domaine de l'électromobilité.....	52
5.2	Deux guerres des standards aujourd'hui en cours.....	53
5.3	Que retenir ?	57
<i>Conclusion</i>		<i>59</i>
<i>Bibliographie</i>		<i>62</i>
<i>ANNEXE.....</i>		<i>64</i>
<i>Le secteur des fabricants de batterie</i>		<i>64</i>

Résumé

Ce document est le rapport final d'une recherche du CERNA, le laboratoire d'économie de MINES ParisTech, sur l'économie du déploiement des infrastructures de recharge réalisée dans le cadre du PREDIT et financée par l'ADEME. L'objectif de cette étude économique est d'analyser les politiques publiques et privées (dans le domaine de la standardisation notamment) qui permettraient de déployer rapidement les infrastructures de charge à un coût minimal pour la société. Notre analyse a permis de produire des résultats sur trois points que nous allons maintenant résumer: le calibrage de l'infrastructure de recharge, l'organisation de la recharge publique et la standardisation.

Le calibrage de l'infrastructure de recharge

L'examen des données technico-économiques sur le coût des différents types de recharge montre qu'il n'est pas économiquement rationnel de déployer des bornes de recharge normale (lente) sur la voie publique ou sur les parkings. Elles sont en effet dix fois plus chères que la recharge à domicile ou sur le lieu de travail. Cela conduira ceux ne disposant pas de stationnement privé à ne pas acheter de VEx. Mais d'après les simulations du Livre Vert sur une agglomération fictive de 500 000 habitants, cette population ne représente que 20% des adopteurs potentiels.

La recharge publique doit donc être semi-rapide ou rapide. Comme le coût des bornes de recharge semi-rapide et rapide est élevé (de 7 000 à 56 000 € par borne), il convient de limiter leur densité autant que faire se peut. Dans ce but, nous suggérons l'utilisation d'une analyse coût-bénéfice traditionnelle comparant le coût complet de la recharge avec l'utilité qu'en retirent les usagers. Cette utilité se mesure par leur consentement à payer pour l'accès aux bornes de recharge semi-rapide et rapide. Ne doivent alors être installées que les bornes dont le coût est inférieur à cette utilité. Dans son esprit, cette démarche est très différente de celle proposée par le Livre Vert sur les infrastructures de recharge.

A notre connaissance, il n'existe pas de données sur les consentements à payer des usagers pour la recharge semi-rapide et rapide et sur l'élasticité prix de la demande. Il est prioritaire de générer ces données dans le cadre des expérimentations prévues. Celles-ci doivent donc faire varier la densité des bornes et les niveaux de tarification. En leur absence, une démarche rationnelle économiquement n'est pas possible.

L'organisation de la recharge publique

La recharge publique présente les caractéristiques d'un monopole naturel : au moins dans un premier temps, la diffusion de l'électro-mobilité sera trop limitée pour justifier une densité de points de recharge semi-rapide et rapide à même de susciter de la concurrence (deux bornes ne sont en concurrence que si elles ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre). En outre, la demande de recharge est extrêmement incertaine puisqu'elle dépendra de ce que sera le niveau effectif de la diffusion. Ce niveau est particulièrement difficile à prévoir du fait d'effets de réseau suscitant une logique du tout ou rien et du fait que la demande est induite par des subventions publiques dont le niveau est difficile à anticiper au-delà de quelques années.

Ces deux caractéristiques empêchent dans un premier temps l'instauration d'un véritable « marché » de la recharge publique. Le déploiement de la recharge reposera d'abord sur l'action des collectivités publiques (qui pourront s'appuyer sur des opérateurs privés dans une logique de délégation de service public).

Mais, compte tenu des différences de coûts très importantes entre les différents types de recharge, une tarification de la recharge au coût complet nous semble indispensable (soit environ 2 euros pour une recharge lente, 24 euros pour une recharge semi-rapide et 36 euros pour une recharge rapide). Cette tarification est la seule solution envoyant les signaux aux usagers leur permettant des choix de recharge conformes à l'intérêt général. Si l'on craint que cette tarification ne diminue trop les incitations à l'adoption de l'électro mobilité, il est parfaitement possible d'ajuster la subvention à l'achat pour la compenser.

La standardisation

L'électro-mobilité est un bien système exigeant de la standardisation pour interfacer efficacement ses différents composants (véhicule, connecteur, borne, logiciel de communication, etc.) et pour exploiter des effets de réseau favorisant l'adoption.

L'économie des réseaux contraste deux processus de standardisation :

- Une standardisation « de jure » qui intervient à un stade précoce du processus de diffusion.
- Une standardisation « de facto » dans laquelle un standard s'impose à l'issue d'un processus concurrentiel. Elle est donc précédée d'une phase de concurrence entre standards concurrents (une guerre des standards selon la terminologie de l'économie des réseaux).

Contrairement à ce que pourrait suggérer l'intuition, la standardisation précoce « de jure » n'est pas toujours la meilleure option. Certes, elle permet d'exploiter rapidement les effets de réseau ; elle

favorise une concurrence sur le marché, la standardisation assurant la substituabilité des biens produits par différentes entreprises. Mais elle requiert un consensus qui est lent à émerger. Elle nécessite de sélectionner la technologie à un stade où elle est moins mature que le stade de la standardisation de facto. Le standard choisi n'est donc pas forcément le meilleur d'autant que le standard de facto est sélectionné par le marché. Mais surtout, elle peut limiter l'innovation en diminuant la diversité des technologies et en réduisant les incitations à la R&D.

Au niveau européen, il existe aujourd'hui une concurrence entre la prise de type 3 de l'EV Plug Alliance soutenue par Schneider Electric, Legrand et l'italien SCAME et la prise de type 2 « Mennekes » soutenue initialement par Daimler et RWE, rejoint en septembre 2011 par l'ACEA, l'association représentant les constructeurs européens d'automobiles. Cette situation ne nous semble pas poser de problème majeur pour la diffusion du VEx en France dans la mesure où la standardisation semble déjà acquise au niveau national (le Livre Vert recommande la prise de l'EV Plug Alliance). Or c'est à ce niveau que s'exprime l'essentiel des besoins de compatibilité dans la mesure où les VEx passeront rarement les frontières. La standardisation européenne devient alors un enjeu de second ordre.

Dans le domaine de la recharge semi-rapide, la concurrence entre les bornes en courant alternatif promues par Renault et les bornes en courant continu promues par les autres constructeurs est d'une autre nature car les concepts techniques et les caractéristiques économiques sont très contrastés : par rapport au courant continu, la recharge en courant alternatif exige des bornes moins chères mais des véhicules équipés d'un redresseur, et donc plus chers. Il s'agit d'un sujet qui n'est pas national (les véhicules ne peuvent être spécifiquement équipés d'un redresseur pour un marché national) et dont l'évaluation économique est difficile au stade actuel de développement technologique. Dans ce contexte, l'économie des réseaux suggère de laisser la guerre de standards se dérouler pour que le marché tranche la question.

1 Introduction

Ce document est le rapport final d'une recherche sur l'économie du déploiement des infrastructures de recharge réalisée dans le cadre du PREDIT et financée par l'ADEME. Que la diffusion des véhicules électriques et hybrides rechargeables (VEx dans la suite du rapport) dépende du déploiement d'une infrastructure de recharge dense et pratique est une évidence. En outre, compte tenu des paramètres économiques actuels de la solution VEx, ce déploiement ne peut se faire que sous l'impulsion d'autorités publiques volontaristes offrant des financements et édictant des normes et des prescriptions.

Le plan gouvernemental pour le développement des véhicules propres¹ lancé en octobre 2009 a ainsi un volet « infrastructures de charges » incluant le lancement de démonstrateurs d'infrastructures de charges financés par l'ADEME, la création d'une nouvelle filiale d'ERDF pour accompagner les communes dans le déploiement des bornes, un « droit à la prise » dans les copropriétés, la standardisation des prises, des prises obligatoires dans les nouveaux immeubles avec parking, etc. En 2010, la loi dite du Grenelle 2 a explicitement confié aux communes la compétence du déploiement des infrastructures de recharge ouvertes au public. Plus récemment, le livre vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules décarbonés publié en avril 2011 constitue un véritable mode d'emploi à destination des communes pour l'exercice de cette compétence.

L'objectif de cette étude économique est d'analyser les politiques publiques et privées (dans le domaine de la standardisation notamment) qui permettraient de déployer rapidement les infrastructures de charge à un coût minimal pour la société et en suscitant de la concurrence. Plus précisément, nous traitons les questions suivantes :

- Quel est le coût de l'infrastructure de recharge ?
- Comment dimensionner l'infrastructure ?
- Comment doit être organisée la recharge publique ?
- Quel rôle doit jouer la standardisation dans le déploiement de l'infrastructure ?

Ces questions sont souvent proches de celles explorées dans le Livre Vert mentionné plus haut. Le traitement est toutefois différent car il repose essentiellement sur les concepts de l'analyse

¹ Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/_article_print.php3?id_article=6001

économique (analyse coût-bénéfice, théorie du monopole naturel, économie des réseaux) alors que le Livre Vert donne une place importante, et justifiée, à des considérations très opérationnelles négligées dans ce rapport. Cela nous conduit toutefois à être fréquemment en interlocution avec ce document.

Le rapport est organisé en cinq parties. La première décrit les technologies de l'électro-mobilité puis nous résumons rapidement la politique française dans une seconde partie. Nous rassemblons et analysons les données technico-économiques sur le coût de la recharge dans la partie suivante. Cela nous permet de formuler des points de vue sur le calibrage de l'infrastructure de recharge. La quatrième partie discute les modes d'organisation de la recharge publique et sa tarification. Une cinquième partie explore le rôle de la standardisation. Enfin, la conclusion rassemble les résultats. Une annexe étoffée présente l'industrie de la batterie pour véhicule électrique.

2 La technologie

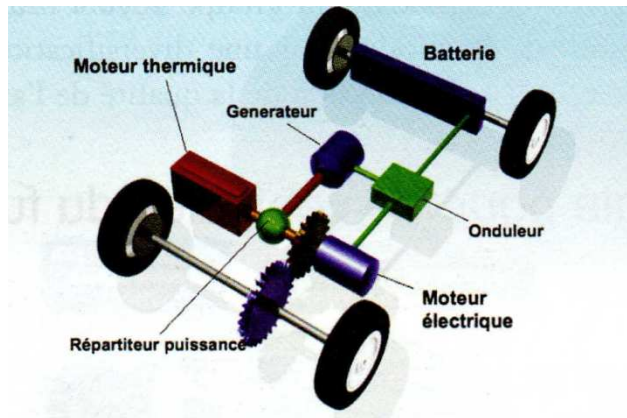
Cette partie est une synthèse présentant les technologies mis en œuvre dans l'électromobilité, à la fois au niveau des véhicules, des infrastructures de charge, des batteries et des technologies logicielles. Sa lecture n'est pas indispensable aux lecteurs familiers avec l'électromobilité.

2.1 Les véhicules électriques rechargeables

Véhicule hybride rechargeable

Le véhicule hybride fait appel à une source d'énergie électrique et à un moteur à combustion interne pour permettre la gestion optimale de ces deux énergies. Le moteur à combustion interne peut fonctionner avec différents carburants : essence, diesel, biocarburant, gaz, etc. L'objectif est d'assurer une gestion et un pilotage optimal des composants afin de minimiser les consommations d'énergie du véhicule tout en préservant ses performances. Tous les véhicules hybrides VEH ou VEHR présentent les composants de base ci-dessous (Figure 1) et diffèrent par la capacité de la batterie, la puissance du moteur électrique et la cylindrée² du moteur thermique.

Figure 1: les composants de base du VEH ou VEHR (Gambardella, 2010)



On peut distinguer 5 fonctionnalités qui caractérisent un véhicule hybride. L'hybride rechargeable est le seul à posséder les 5 fonctionnalités:

1. **Système stop-start** : arrêt du moteur thermique lorsque celui ne produit pas de force motrice pour le véhicule (phase de ralentissement essentiellement). La machine électrique a une puissance supérieure à celle d'un démarreur conventionnel (2 à 4kW).

² Volume balayé par le piston au cours d'un cycle thermodynamique

2. **Système stop and start avec récupération d'énergie au freinage** : ces systèmes sont dérivés du précédent mais utilisent une machine plus puissante et un stockage associant une batterie de plus grande capacité
3. **Assistance au moteur thermique** : Une machine électrique plus puissante (10 à 20 kW) va permettre en plus des fonctions précédentes d'assister le moteur thermique dans les phases motrices ce qui permet de conserver des bonnes performances dans les faibles régimes tout en utilisant un moteur associé à une forte réduction cylindrée.
4. **Mode tout électrique** : Cette fonctionnalité correspond à un usage possible du véhicule hybride à partir de sa motorisation électrique seule, c'est à dire que le moteur thermique pourra être isolé de la transmission et stoppé durant ces phases. Une grande part des situations défavorables pourra être réalisée en mode tout électrique ce qui permet d'obtenir un gain en consommation qui va jusqu'à 40% en conduite urbaine mais se réduisent à quelques % sur l'autoroute.
5. **Mode tout électrique avec autonomie** : ce mode est complémentaire du mode électrique. Il s'en distingue par le fait que l'arrêt du moteur thermique pourra être décidé par le conducteur et maintenu sur une distance significative (*all electric range* : 5 à 20km en Europe, jusqu'à 60 km envisagés aux Etats Unis). Les performances dynamiques du véhicule seront donc liées à la puissance disponible sur la machine et la batterie (20 à 50kW) et l'autonomie à l'énergie contenue dans la batterie (5 à 20kWh au total)

Véhicule tout électrique

Le véhicule électrique ne présente pas de réservoir à carburant et de moteur thermique. Il est uniquement équipé d'un moteur électrique alimenté par une batterie qui doit être rechargée.

Cette partie est une synthèse présentant les technologies mis en œuvre dans l'électro mobilité pour recharger les véhicules. Sont décrits successivement les technologies mobilisées dans les infrastructures de charge, les batteries et les technologies logicielles permettant de gérer la recharge.

La Figure 2 croise les caractéristiques des véhicules et leur appellation.

Figure 2 : Les différents types de véhicules électriques

Ce véhicule est un....

S'il possède...	Hybride conventionnel	Mild hybrid	Full hybrid	Hybride rechargeable
Système stop-start	●	●	●	●
Système stop-start avec récupération d'énergie au freinage		●	●	●
Assistance au moteur thermique		●	●	●
Mode tout électrique			●	●
Mode tout électrique avec autonomie				●

2.1 Les technologies d'infrastructures de recharge

Il n'existe pas encore de standards en matière d'infrastructure de charge pour véhicules électriques. Les spécifications des types de points de charges (voltage, forme des prises et connecteurs...) varient d'un pays et d'un constructeur à l'autre. Nous donnons ici une classification qui s'appuie sur les travaux du groupe de travail interministériel de Jean Louis Legrand (Groupe de Travail sur la mise en place d'infrastructures pour véhicules électriques ou hybrides rechargeables- sous groupe modèle économique, 2009). Le Tableau 1 résume les différents types de recharge possibles.

La charge normale

On l'appelle ainsi car elle est réalisée à partir de la tension normalisée du réseau basse tension en France.

Puissance (kW) : 3

Temps de charge pour une batterie de 25kWh : 8 à 10h

Usages : ce type de charge est prévu pour toutes les recharges à domicile et pour la très grande majorité des points de charge sur les lieux de travail et parkings privés. La charge lente peut aussi être utilisée pour la charge sur voirie.

Courant : Monophasé tension nominal de 230 V entre phase et neutre et courant de 16A. Courant alternatif.

Avantage : Pas d'incidence sur le dimensionnement du réseau d'alimentation. De plus ce type de charge fait appel à un matériel de grande diffusion, est peu coûteux et n'a pas d'impact négatif sur la durée de vie de la batterie lithium ion.

Inconvénient : Lenteur de la charge

Charge semi rapide et rapide

Puissance (kW) : de 20 à 50. On distingue la charge semi-rapide (24kW) de la charge rapide (42kW).

Temps de charge pour une batterie de 25kWh : A 42 kW on charge la batterie à 80% en 25 min, en environ une heure en charge semi-rapide.

Usages : A la différence de la charge normale, cette technologie n'est utilisable qu'en parkings collectifs, sur la voirie ou en stations dédiées.

Courant : Le courant est triphasé pour bénéficier de la tension de 400V entre phases. L'intensité est de 32 à 63A au niveau du réseau et 100A au niveau du câblage. Un chargeur redresseur est intégré directement dans la borne pour fournir du courant continu au véhicule³.

Avantage : Rapidité de la charge

Inconvénient : EDF précise que ce type de charge n'est pas adapté aux VEHR. Les prises et les connecteurs pour ce type de charge ne sont pas encore industrialisés à grande échelle. En avril 2009, la seule station de recharge rapide publique en activité était le Dutch NRGspot (City of Westminster, 2009). Le coût d'une borne de recharge rapide est évidemment un inconvénient majeur.

³ Renault envisage un système où le redresseur est embarqué (c'est-à-dire un élément de la chaîne de traction du véhicule), ce qui permet une division des coûts de la borne par deux. La borne délivre alors du courant alternatif.

Charge très rapide

Cette technologie est en cours de développement. Elle alimente le véhicule directement en courant triphasé alternatif grâce au redresseur⁴ de la chaîne de traction du véhicule. Ce système injecte une puissance de 50 à 250 kW dans le véhicule et permet une charge de 50% de la batterie en 10 à 15 min. ce système n'a jamais été déployé lors de projets pilotes. Il est actuellement développé par quelques constructeurs de station de recharge : eTec qui utilise un standard développé par un laboratoire japonais et Coulomb Technologies. Ce système de charge est conçu pour des stations dédiées.

Echange de batterie

Il s'agit d'un échange automatisé de batteries dans des stations-services dédiées. Elles pourraient être localisées sur autoroute, voirie ou parking. Le coût d'une station d'échange est estimé à 800 k€. Il faut y ajouter un stock de batterie à échanger. Ces stations sont conçues pour des usages lors de parcours de grandes distances. Cette technologie est développée par la firme « Better Place » en partenariat avec Renault qui conçoit des véhicules compatibles avec ces stations d'échange (le prototype Fluence ZE).

⁴ Le redresseur assure la conversion courant alternatif/ courant continu

Tableau 1: Résumé des différentes techniques de recharge et usages associés (source auteur)

Recharge normale	Semi rapide	Rapide	Station d'échange
• 16A, monophasé, 3 kW • Charge de 6 à 8 h	• 32 A, triphasé, 22 kW • 1h de charge • 10 km en 5min	• 43 kW, 400V, 63 A • Charge en 30 min	• Echange en 5 min • Stock de 20 batteries
90% des usages	Solution d'appoint	Solution grand rouleur	Solution grand rouleur
<u>Domicile, lieu de travail</u>			
<u>Points de charge publics :</u> Domaine public (voirie, places de parkings) Domaines concédés (gare, port, parkings publics) Domaine privé relevant du public (commerces) Stations services Parking publics			
			Stations services Parking publics

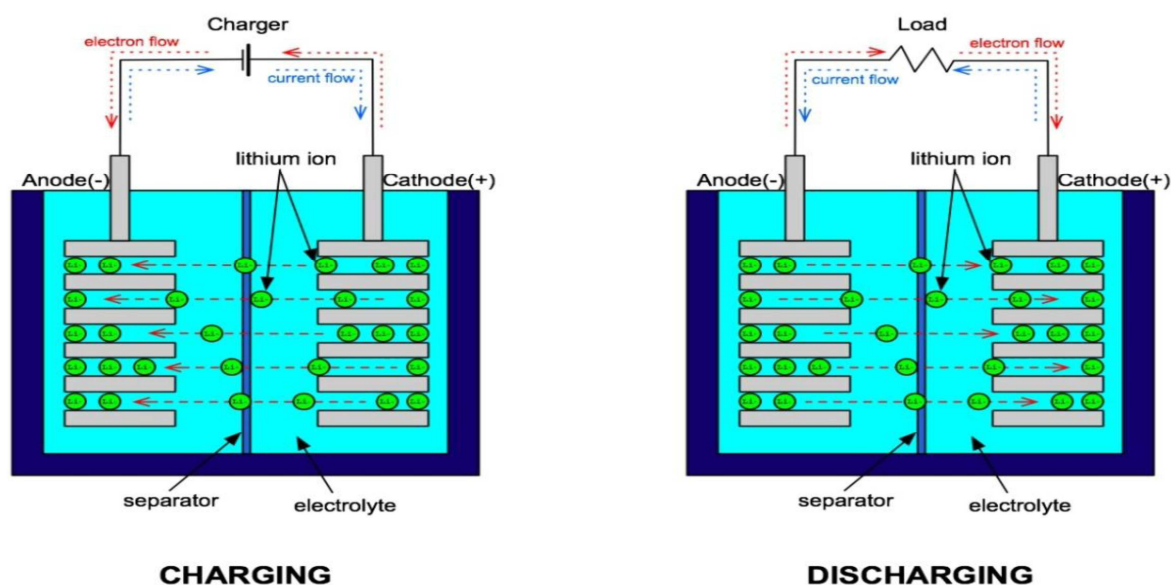
2.2 Les batteries

La motorisation électrique constitue l'énergie motrice des véhicules électriques et hybrides rechargeables et des véhicules électriques-hybrides. La batterie est l'organe qui doit répondre aux nécessités de stockage, de continuité et de fiabilité d'approvisionnement du véhicule en énergie électrique.

Principe de fonctionnement et architecture

La cellule est l'unité élémentaire de la batterie. C'est une pile électrochimique. La cellule restitue sous forme d'énergie électrique l'énergie produite par une réaction chimique d'oxydoréduction. Elle est constituée de deux électrodes (Figure 3) : l'anode (électrode positive) et la cathode (électrode négative) qui sont séparées par un électrolyte permettant la circulation des ions libérés par la réaction électrochimique.

Figure 3 : fonctionnement d'une pile électrochimique



Le module est l'assemblage de plusieurs cellules reliées par un circuit électrique. Un circuit de sécurité et de contrôle est inséré sur chaque module.

Les modules sont enfin assemblés et reliés par un circuit électrique. Une batterie automobile standard contient 25 à 150 cellules selon la densité énergétique de la batterie et le type de cellule

(McKinsey, 2009). Un système de contrôle et de sécurité de la batterie ; le « battery management system » ; y est ajouté. Ce composant n'est pas présent dans les batteries pour téléphones portables ou ordinateurs portables pour lesquels le risque de surchauffe est moins grand car une quantité d'énergie plus faible y est stockée.

Figure 4: de la cellule au pack batterie (Torcheux, 2010)



Six caractéristiques techniques permettent de juger des performances d'une batterie :

- **Energie spécifique** : énergie stockable par unité de masse. Ce critère détermine l'autonomie de la voiture.
- **Densité de puissance** : puissance délivrée par unité de masse. Elle détermine l'accélération du véhicule.
- Sa « **cyclabilité** » : correspond aux nombres de cycles de charge et décharge pour lequel le niveau d'énergie restitué reste constant. Elle décrit la durée de vie de l'accumulateur.
- **Performance** : capacité de la batterie à fonctionner en régime optimal par température extrême.

- Sécurité : certaines réactions chimiques dégagent plus de chaleur que d'autres et peuvent résulter en une surchauffe entraînant des courts-circuits ou une surcharge.

Pour le véhicule tout électrique, le but est de maximiser l'énergie spécifique de la cellule pour avoir le plus d'énergie possible tout en minimisant la masse de la batterie. Pour le VEH et le VEHR, la source principale d'énergie est l'énergie fossile, le moteur électrique n'étant utilisé qu'en dehors du point de fonctionnement optimal du moteur thermique (typiquement lors d'une conduite urbaine) ; le critère à optimiser est la densité de puissance. Cette différence explique pourquoi les cellules de VEH et VEHR sont de plus petites tailles que les cellules pour VEH ce qui a des conséquences sur le coût respectif des deux technologies.

La révolution lithium ?

Les batteries Nickel-métal Hydrure (NiMH) ont équipé les premiers véhicules hybrides comme la Toyota Prius (vendu à 1 million d'exemplaires soit 80% des ventes d'hybrides dans le monde). Ces batteries sont sûres et ont une longue durée de vie. Elles sont cependant chères et ont une énergie spécifique relativement faible qui ne permet pas d'équiper les véhicules tout électriques. De plus, cette technologie est mature et a atteint une asymptote de performance et de coût.

Presque tous les constructeurs automobiles envisagent aujourd'hui d'opter pour des batteries au lithium. Elles présentent de nombreux avantages. Le lithium est un matériau léger qui lui confère une haute énergie spécifique. Les perspectives de baisse de coût et d'amélioration des performances technologiques sont importantes. C'est de plus la seule technologie qui permette aujourd'hui d'atteindre une autonomie de 150 km pour un poids acceptable pour un véhicule tout électrique.

Ces batteries sont de deux types : les batteries **lithium ion** et les batteries **lithium polymères**. Les premières sont constituées d'une anode en carbone et d'une cathode constituée d'une structure cristalline renfermant du lithium (on appelle par la suite matériaux actifs ceux qui constituent la cathode). Le Tableau 2 présente les cinq grandes technologies lithium-ions. Aucune technologie ne satisfait l'ensemble des exigences requises et aujourd'hui les batteries les plus performantes sont souvent les moins sûres (Torcheux, 2010). Les constructeurs combinent donc souvent ces technologies pour obtenir les caractéristiques voulues.

Tableau 2 : les grandes familles de matériaux actuelles Li ion⁵ (source auteur)

Nom	cathode	abréviation
Lithium-nickel-cobalt-Aluminium	$\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.05}$	NCA
Lithium-iron-Phosphate	LiFePO_4	LFP
Lithium-Manganèse-spinel (LMS)	LiMn_2O_4	LMO
Nickel-Manganèse Cobalt	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$	NMC

Les batteries lithium polymères sont constituées d’une anode en lithium métallique et une cathode similaire aux piles lithium ion. Le matériel choisi à la cathode résulte d’un compromis entre coûts, performances recherchées et sécurité. Les batteries lithium polymères sont développées par un nombre plus faible de producteurs (Bolloré et ElectroVayaya).

L’industrie des batteries lithium pour l’automobile n’est pas encore à maturité industrielle

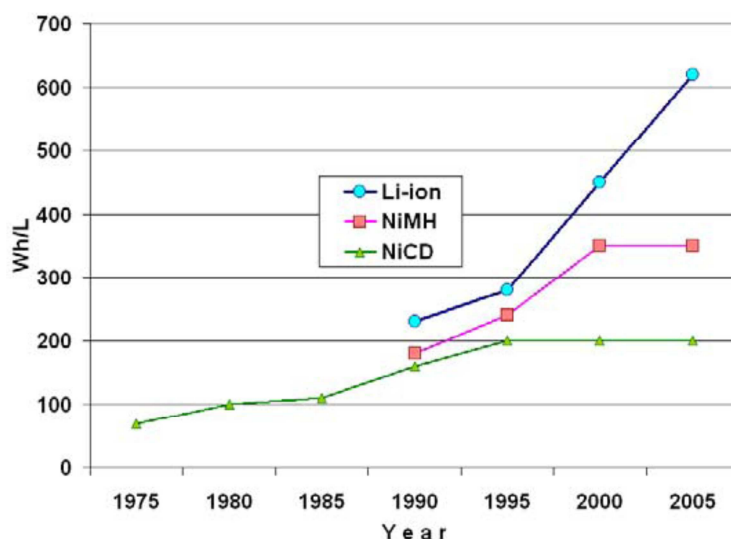
Si la volonté de développer les batteries au lithium est incontestable, il existe encore un décalage entre les annonces de production et la réalité industrielle. Aujourd’hui, les formes et la géométrie des cellules ne sont pas encore figées ; les préséries industrielles de cellules présentent un taux élevé de déchet sachant que les cellules pour batteries automobiles doivent répondre à des critères de sécurité bien supérieurs à ceux des cellules pour l’électronique portatifs dont le processus d’industrialisation est mature. Autre signe de cette immaturité, il n’existe pas encore de certification de leur performance et même de leur niveau de sécurité.

En conséquence, nous sommes donc encore à un stade précoce de la courbe d’apprentissage même si les performances des batteries lithium ne cessent d’être améliorées (

⁵ Les batteries LiCo (lithium cobalt) font partie de la famille lithium ion mais sont très instables dans l’état surchargé. Bien qu’elles équipent 99% de nos ordinateurs portables il est donc hors de question d’en équiper des véhicules car cela serait trop dangereux. On ne les fait délibérément pas figurer dans le tableau.

Figure 5).

Figure 5: Evolution de la densité énergétique (Wh/litre) des batteries lithium ion, comparé aux technologies NiMH et NiCD (Nickel Cadmium)(Agence Internationale de l'Energie, 2007)



Tous les industriels travaillent sur les batteries lithium en présérie pour en réduire le coût du kWh via une utilisation optimisée des matériaux actifs et une optimisation de la production permettant de diminuer les taux de déchets. Ils travaillent également sur la possibilité d’offrir une deuxième vie à la batterie.⁶ Par ailleurs, une commercialisation massive permettrait d’exploiter des économies d’échelle. Au final, la Deutsche Bank estime que le prix des batteries pourrait être divisé par deux en 10 ans. Les batteries automobiles suivraient ainsi la même évolution que celle des batteries équipant les téléphones mobiles et les ordinateurs portables dont le coût a été divisé par 3 en 10 ans. Une division par deux des coûts actuels, c'est-à-dire un coût de 300 €/kWh selon Torcheux (2010) ou de 250€ selon l’United States Advanced Battery Consortium rendrait le modèle électrique économiquement compétitif en terme de coût total de possession par rapport au véhicule thermique.

Pour résumer, la batterie pour véhicules électrifiés sera demain au lithium sans pouvoir déterminer quelle technologie précise s’imposera même si de nombreux constructeurs favorisent les batteries lithium ion. Cette dernière technologie n’est pas encore mature ; les productions de batteries pour automobile sont au stade de pré séries industrielles ou de développement. Le coût des batteries lithium ion pourrait être divisé par deux, soit environ 300€/kWh, si des effets volume importants

⁶ Un modèle d’affaire qui permettrait de rendre la batterie plus lucrative : 1ere vie=équipement d’un véhicule neuf, 2^{ème} vie= équipement voiture d’occasion, 3ème vie=marché du stationnaire (batterie utilisée pour stocker de l’énergie dans les usines de productions par exemple), 4è vie= recyclage

interviennent. Par ailleurs, la sécurité des batteries doit encore être améliorée. Enfin, l'autonomie des batteries restera durablement plafonnée à 200 km.

2.4 Les logiciels

La diffusion des véhicules électriques et hybrides nécessite également des technologies logicielles pour faire communiquer les différents éléments que sont le véhicule électrique, les bornes de recharge et plus généralement l'infrastructure produisant et distribuant l'électricité. Le Tableau 3 décrit les informations à produire et à transférer aux différents acteurs impliqués dans la fourniture du service.

Le besoin logiciel varie selon les usages. Une recharge à domicile simple peut s'effectuer sans logiciel spécifique. En effet le propriétaire du véhicule est le propriétaire du point de charge et l'énergéticien peut donc facilement identifier l'utilisateur pour la facturation. Des logiciels deviennent nécessaires si l'on veut effectuer une gestion intelligente de la charge (qu'il s'agisse simplement de compteurs intelligents ou des possibilités offertes par le V2G dans un futur plus lointain).

Pour les infrastructures de recharge partagées, l'identification de l'utilisateur n'est pas immédiate et un logiciel gérant la communication véhicule-borne-gestionnaire de l'infrastructure de recharge est indispensable.

Il existe deux technologies permettant d'assurer la facturation client, la localisation de point de charge, la communication avec l'énergéticien et qui sont compatibles avec un usage « smart meter » ou V2G : le car-customer system et la networked infrastructure.

Car-customer system

Ce système a été implémenté par un ingénieur EDF (Cyriacus Bleijs de la DTVE (Bleijs, 2009)). Le software est inclus dans l'ordinateur de la voiture. Il suffit d'y intégrer une simple « puce ». L'information sur la recharge s'établit alors entre la puce et la borne via la technologie CPL⁷. La puce permet ensuite d'établir une connexion Bluetooth avec un téléphone portable ou avec le WIFI à domicile. Ce type de réseau ne nécessite donc pas d'interface homme machine sur la borne puisque celle-ci est assurée par le téléphone ou l'ordinateur dans la voiture.

Le grand avantage de ce système est le faible coût de mise en place du software puisqu'il ne requiert que l'installation d'une puce dans l'ordinateur pré-existant de la voiture, mais les constructeurs

⁷ Technologie courant porteur de ligne : cette technologie permet de transmettre l'information via le réseau électrique existant et ne nécessite donc pas la création d'un réseau Ethernet pour communiquer l'information.

automobiles doivent prévoir en amont de mettre au point un ordinateur qui peut la recevoir. Le débit d'information est moins important que dans le cas du « networked infrastructure ».

Networked infrastructure

Dans ce réseau, tous les points de charge sont connectés via un réseau ethernet à un serveur central lui même connecté à internet. Ce système présente l'avantage de centraliser l'information et de la rendre accessible à tous les acteurs (énergéticien, opérateur de mobilité, gestionnaire du point de charge, usager, propriétaire du point de charge). L'interface homme machine est réalisée via l'écran dont les points de charge sont pourvus.

Son inconvénient est le coût. Il nécessite l'installation et la maintenance d'un réseau Ethernet et les écrans sont chers.

Tableau 3 : Information à fournir aux différents acteurs

Utilisateur du véhicule	• L'état de la batterie et l'avancée de la charge • La localisation des points de charge du réseau de recharge (application de géolocalisation prévue par les opérateurs Better Place ou PSA, application de localisation des bornes voirie sur iphone lors du projet pilote « Kleber » à Strasbourg) • L'identification du véhicule et l'autorisation de la charge (badge d'identification fourni par EDF dans le cadre du projet pilote Kléber) • Un interface de facturation client et un système monétique.
Gestionnaire de l'infrastructure de recharge	• Etat des bornes (localisation des bornes défectueuses) • Facturation client
Producteur de l'électricité	• Information instantanée sur l'impact de la recharge sur la courbe de recharge • Possibilité ultérieure d'une gestion intelligente de la charge (smart meters et possibilité de V2G et V2H ultérieures)

3 La politique française de déploiement de l'infrastructure de recharge

Avec le Grenelle de l'environnement, puis la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 dite Grenelle 2 portant engagement national pour l'environnement, l'Etat français a fait du développement des véhicules décarbonés un objectif clé de sa politique de lutte contre l'effet de serre. Un plan gouvernemental a été lancé en octobre 2009 avec un volet « infrastructures de charges ». En avril 2011, un Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public a été publié. Il constitue le document de référence décrivant la stratégie française pour déployer les bornes de recharge des VEx.

3.1 Objectifs

Le gouvernement vise 2 millions de VEx dans le pays en 2020 et 4,5 millions en 2025. En supposant que le nombre de véhicules légers sur les routes demeure au niveau de 2007, soit près de 30,4 millions, les VEx en représenteraient alors 6,6 % du parc en 2020 et 15 % en 2025. Pour une agglomération de 500 000 habitants, cela correspond à environ 15 000 véhicules en 2020.

Pour cela, le Livre Vert prévoit 2,2 millions de bornes de recharge (soit 1,1 borne par véhicule), dont une très grande majorité de bornes privées au domicile ou sur le lieu de travail. Pour les 25 plus grandes agglomérations de France 7 000 points de charge seraient ouverts au public en 2011 et 44 000 en 2014, dont 50 % sont destinés à la charge normale en espace public (Livre Vert, 2011). Globalement, l'infrastructure ouverte au public nécessiterait 30 milliards d'euros d'investissement cumulé sur 2010 – 2020.

3.2 Instruments pour inciter à l'achat de VEx

En matière d'incitation à l'achat par les particuliers, la politique repose sur le versement d'un bonus de 5000 € jusqu'en 2012 pour les VE et de 2000 € pour les VEH. Cette subvention est cumulable avec les subventions versées par certaines collectivités, comme celle de 1 000 € au Pays d'Aix-en-Provence.

Pour les entreprises, l'ADEME apporte une aide de 10 000 € à l'acquisition de bus électriques de moins de 30 places et 15 000 € pour un bus de plus de 30 places.

En outre, l'Etat a signé un accord avec une dizaine d'entreprises privées et publiques (ADP, EDF, La Poste, SPIE, Air France, Eiffage, Bouygues, Veolia, Areva, France Telecom, RATP, Vinci, Darty, GDF

Suez, SNCF). Il prévoit l'achat de 30 450 VEx. Parmi ces 30 450 VEx, 5 000 seront ou ont été achetés par l'Etat, et entre 11 150 et 14 600 par les collectivités territoriales.

3.3 Instruments pour déployer l'infrastructure de recharge

Il convient de distinguer la recharge privée (au domicile ou sur le lieu de travail) de la recharge publique.

En matière de recharge privée, la loi Grenelle 2 de 2010 a entériné les propositions du plan gouvernemental de 2009 :

Un droit objectif à la recharge domestique : il ajoute au droit existant à être raccordé au réseau de distribution public, celui d'ajouter à l'installation une prise dédiée à l'usage qui n'est pas liée à l'habitation, mais reliée au tableau électrique principal. En pratique cela autorise un fournisseur pour la recharge distinct du fournisseur pour les autres usages.

Construction neuves : A partir de 2012 les constructions d'immeubles (bureaux et habitations) avec parking intégreront obligatoirement des prises de recharge . Remarquons que le renouvellement du parc de bâtiments existants n'est que de 1% par an, ce qui limite la portée de cette mesure.

Constructions existantes : Installation obligatoire dans les parkings des immeubles de bureaux d'ici 2015 dès lors qu'ils sont équipés de places de stationnement destinées aux salariés

Droit à la connexion pour installation de recharge du VEx dans les copropriétés : c'est une disposition assouplissant la procédure actuelle de raccordement individuel pour le copropriétaire (jusqu'à présent il fallait l'accord préalable de l'Assemblée Générale). Aménagement sur simple demande du locataire ou co-propiétaire et à ses frais d'un dispositif de connexion.

Concernant la recharge publique, la compétence a été confiée aux collectivités locales. Le déploiement de l'infrastructure va donc reposer sur l'initiative locale, et donc sur les budgets des collectivités locales et des fonds d'opérateurs privés acceptant le risque. L'affirmation par la loi du caractère d'intérêt général de la mobilité électrique vise à encourager l'action des collectivités. Le rôle du gouvernement est d'autoriser sans l'imposer l'initiative des communes pour équiper l'espace public.

Publié en avril 2011, le Livre Vert est un véritable mode d'emploi à l'usage des communes décrivant les modalités pratiques de déploiement des bornes de recharge publiques. Il répond à des questions comme : quels bornes choisir ? Comment calibrer l'infrastructure ? Comment financer l'investissement ? Etc.

Il annonce également des subventions des coûts d'investissement de recharge dans le cadre des « Investissements d'Avenir » pour des agglomérations pilotes: 50% pour bornes dans les espaces publics de stationnement non concédés ; 30% pour les bornes de recharge rapide (43 kVA) dans les stations-service pour un montant plafonné à 50 millions €. Au nombre de douze, ces agglomérations ont décidé d'être pilotes dans le cadre de la charte pour le déploiement d'infrastructures publiques de recharge de véhicules électriques signée le 13 avril 2010 avec l'Etat, Renault et PSA : Bordeaux, Grenoble, Rennes, Nice, Angoulême, Aix-en-Provence, Orléans, Paris, Rouen, Strasbourg, le Havre et le Grand Nancy. Dans la charte, les collectivités s'engagent à mettre en œuvre le déploiement d'infrastructures de charge publiques d'ici 2010 et à communiquer sur le déploiement et l'exploitation des infrastructures et les constructeurs automobile s'engagent à commercialiser 60 000 VE d'ici 2012

Enfin Le plan gouvernemental de 2009 prévoit la création d'une nouvelle filiale d'ERDF pour accompagner les communes dans le déploiement des bornes,

3 Le coût de la recharge

Quel est le coût de l'infrastructure de charge ? Dans cette partie, nous résumons les éléments d'évaluation du coût économique de l'électromobilité et de la part qui correspond à la mise en place de l'infrastructure permettant la recharge des véhicules. Nous nous appuyons essentiellement sur l'analyse coût avantage récemment publié par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD, 2011)⁸ qui compare le véhicule électrique avec le véhicule à motorisation classique.

3.1 Le coût unitaire d'installation des points de charge

Le

⁸ CGDD (2011) « Les véhicules électriques en perspective : analyse coûts avantages et demande potentielle », Etudes et documents, n°41, mai, 62 pages.

Tableau 4

Tableau 4 : Les coûts unitaires de différents points de charge fournissent les éléments pour les différents types de points de recharge. Il montre une très grande hétérogénéité des coûts :

- La charge normale à domicile ou sur le lieu de travail est de 8 à 10 fois moins coûteuse qu'une charge normale sur une borne ouverte au public (voierie ou parking)
- Elle est même 100 fois moins coûteuse que la solution la plus coûteuse, la charge rapide dans un lieu dédié. Remarquons d'ailleurs que ce tableau ignore la solution la plus coûteuse : les stations d'échange instantané de batteries, tel le « Quick Drop » développé par Better Place dont le coût serait d'environ 350 000 euros.
- En accès public, le coût d'une borne de charge semi rapide est environ deux fois plus élevé qu'une charge lente.

Tableau 4 : Les coûts unitaires de différents points de charge

Coût unitaire (€)	Investissement	Raccordement	Maintenance	Total
Prise domicile ou travail (3 kVA)	500	0	15	515
Voierie charge normale (3 kVA)	4200	300	126	4626
Voierie charge semi rapide (23 kVA)	6500	1300	195	7995
Parking charge normale (3 kVA)	3400	300	102	3802
Parking charge semi rapide (23 kVA)	5700	1300	171	7171
Lieu dédié charge rapide (43 kVA)	55000	inclus	1650	56650

Source : EDF Groupe Travail Livre Vert, repris par CGDD, 2011

3.2 Le calibrage de l'infrastructure de recharge

Le coût total va bien sûr d'abord dépendre du nombre de bornes. Mais, compte tenu de l'hétérogénéité du coût unitaire des différents types de recharge, il sera également très influencé par la répartition des points entre charge normale, charge semi rapide et rapide et de la part des bornes en accès public.

Dans l'étude de 2011, le CGDD analyse un scénario de déploiement avec un ratio de 1,1 points de charge par véhicule dont 0,8 point privé à charge lente (0,6 chez les particuliers et 0,2 dans les entreprises), 0,14 de point sur la voirie et 0,14 sur les parkings publics et 0,003 lieu dédié pour la charge rapide. Ces hypothèses sont très différentes de celles de l'étude menée par EDF en 2009 dans le cadre du Groupe de travail de Jean-Louis Legrand. EDF teste deux scénarios de déploiement des points de charge (Tableau 5). Le scénario 1 comporte une très grande majorité de points de charge lente et quelques points de charge rapide et ne comporte pas de stations d'échange de batteries. Ce scénario est adapté à un parc automobile constitué essentiellement de VEHR pour lesquels la charge rapide n'est pas adaptée. Le scénario 2 généralise la charge à 24kW et 42kW sur voirie, dans les parkings publics et dans les entreprises. Il comprend des stations d'échange de batteries. Il est

adapté à un scénario « véhicule électrique pur ». Dans son esprit, le scénario 1 est le plus proche de celui de l'évaluation récente du CGDD sauf qu'il prévoit deux fois plus de point de charge par véhicule et une proportion de points de recharge partagés dont le coût unitaire est nettement plus élevé.

Tableau 5 : Comparaison du nombre de points par véhicule dans les scénarios 2011 du CGDD et des deux scénarios EDF de 2009

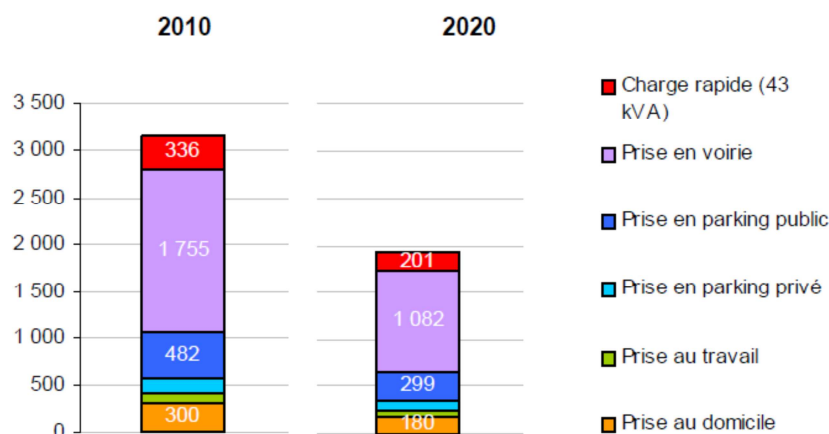
	Scénario CGDD *	Scénario 1 EDF,	Scénario 2 EDF,
Nb prises par véhicule	1,1	1,7	2
Prise domicile ou travail (3 kVA)	0,6	0,8	0,9
Voierie charge normale (3 kVA)	0,14	0.2	0
Voierie charge semi rapide (23 kVA)		0	0,1
Parking charge normale (3 kVA)	0,365	0.56	0
Parking charge semi rapide (23 kVA)		0.14	0,83
Lieu dédié charge rapide (43 kVA)	0,003	0	0,17
Stations d'échange (ex: Quick Drop)	0	0	650 stations
Coût en % du coût total possession	5%	18%	40%

*Le scénario prévoit 93% de recharge normale et 7% de recharge semi-rapide. Source : CGDD, 2011

Ces trois scénarios conduisent à des coûts de la recharge très différents : de 5% pour le scénario le moins ambitieux du CGDD de 2011 jusqu'à 40% pour le scénario maximaliste d'EDF.

La Figure 66 présente le coût de l'infrastructure du scénario CGDD 2011 et sa composition. Il est de l'ordre de 3000 € par véhicule en 2010 et il devrait baisser à 2000 € en 2020. Cela correspond à un investissement cumulé sur la période 2010 – 2020 d'environ 30 milliards d'euros.

Figure 6: le coût de l'infrastructure de recharge pour un véhicule électrique dans le scénario CGDD 2011 (en €, sur 8 ans de possession)



Dans ce total, le coût de la borne à domicile pèse peu : 300 € par véhicule en 2010 et 180 en 2020. Le coût de raccordement, qui seraient à la charge d'ERDF dans le schéma prévu dans le plan gouvernemental, serait de 45€. L'essentiel des coûts concernent donc les bornes publiques de recharge rapide ou normale : environ 2500 € en 2010 et 1580 € en 2020.⁹

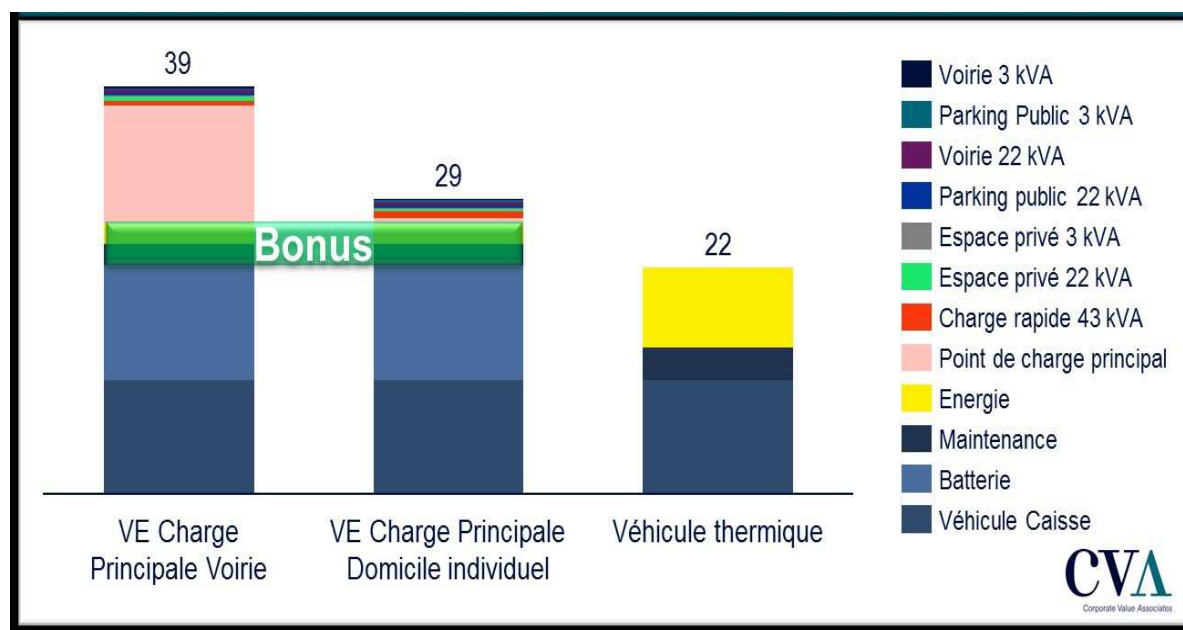
3.3 Le coût de la recharge normale publique

Nous avons vu que le coût de la recharge normale sur les bornes en accès partagé était 8 à 10 fois plus cher que la recharge normale privée. Cela conduit des usagers n'ayant pas de parking privé (au domicile ou au travail) à générer des coûts d'infrastructure nettement plus important d'autant que la recharge normale correspondrait à 90% de la recharge totale. La

⁹ Dans le cadre de politique française, ces coûts seraient supportés par les collectivités locales pour les prises en voirie et les concessionnaires gérant les parkings publics.

Figure 7 extraite du Livre Vert compare les coûts de possession d'un VE dont la recharge principale s'effectue sur la voirie, un VE dont la recharge s'effectue à domicile et un véhicule thermique. Elle permet de constater que la recharge principale sur la voirie augmente le coût total de possession d'environ 35%.

Figure 7 : Comparaison des coûts cumulés sur 8 ans de possession pour un projet lancé en 2011 (€)



Source : Livre Vert (2011)

3.4 Quelles conséquences pour le calibrage de l'infrastructure de transport ?

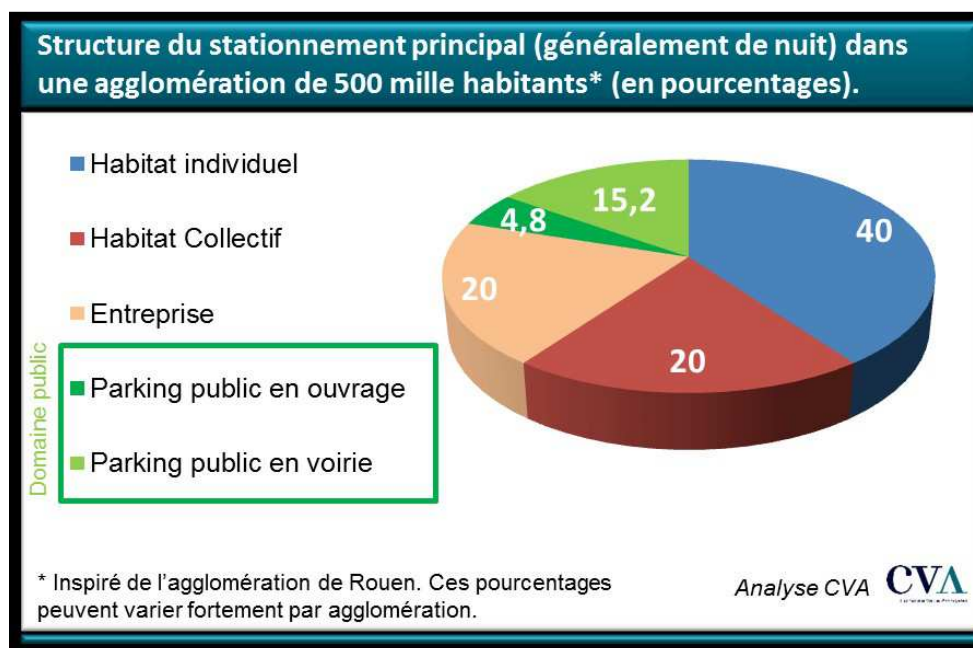
Ces données technico-économiques ont deux implications pour l'efficacité des politiques publiques en matière d'infrastructure de recharge :

- 1) Il ne faut pas déployer de bornes de recharge normale sur la voirie ou dans les parkings publics.

Elle est en effet dix fois plus chère que la recharge à domicile ou sur le lieu de travail. Cette préconisation peut susciter des réticences car ne pas déployer de recharge lente partagée conduira de facto les usagers ne disposant pas de parking individuel à ne pas adopter le VE. Mais c'est précisément l'effet recherché. Le bénéfice est potentiellement important car la recharge principale assurerait plus de 90 % du besoin total de recharge.

En outre, l'effet négatif sur le niveau de diffusion des VEx nous semble limité compte tenu du réservoir d'adopteurs potentiels disposant d'un parking privé (plus de 80% d'après le Livre Vert dans une agglomération de 500 000 habitants inspiré de Rouen, voir Figure 8).

Figure 8 : Structure du stationnement principal (généralement de nuit) dans une agglomération de 500 000 habitants (en pourcentage)



1) Il faut limiter au maximum la part de la recharge semi-rapide et rapide en accès public.

Le Livre Vert annonce que la recharge semi-rapide ou rapide concernerait 5% de l'usage sans avancer plus d'éléments pour justifier ce chiffre. Le point clé est que ce pourcentage n'est pas une donnée exogène du problème. Notre message sur ce point est que c'est un paramètre central à définir dans une politique publique rationnelle de déploiement de l'infrastructure puisqu'il déterminera le coût global de l'infrastructure.

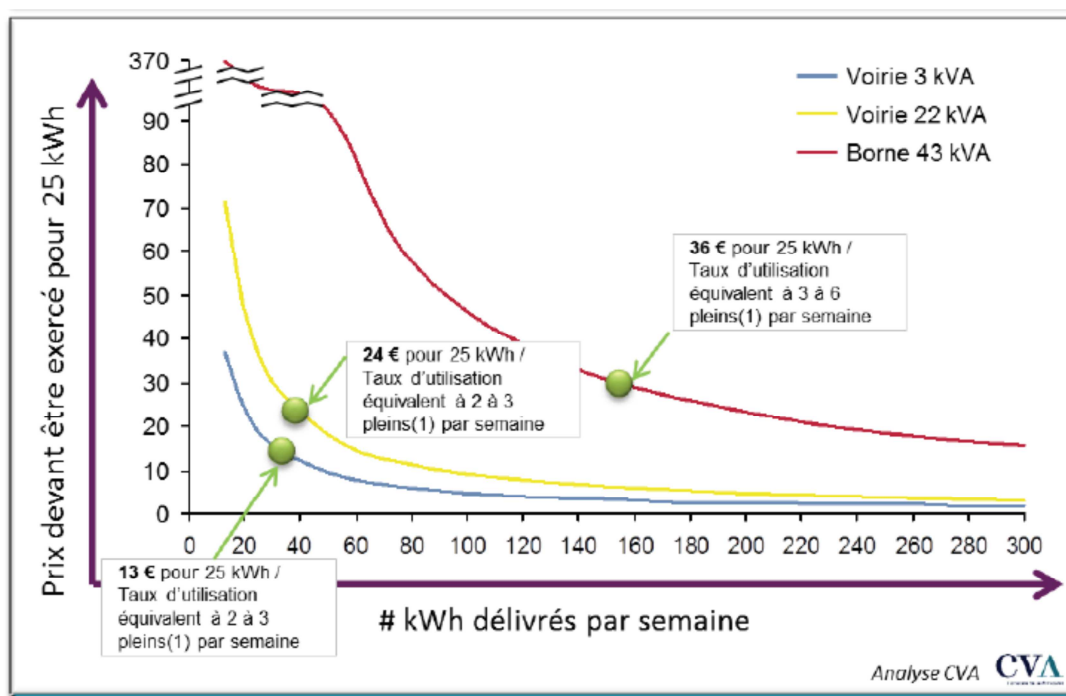
La démarche économique à adopter est la suivante :

1. Evaluer le coût complet d'une borne en accès public
2. Evaluer les besoins des utilisateurs potentiels
3. Evaluer l'utilité qu'ils retirent de la recharge en accès public. En théorie économique, cette utilité s'identifie au consentement à payer de l'utilisateur pour l'accès à une borne.

Il convient alors de ne déployer que les bornes dont le coût complet est inférieur à l'utilité retirée par ses utilisateurs. Nous allons considérer successivement ces différentes étapes.

Le coût complet. Nous avons déjà largement évoqué le coût des bornes de recharge. Mais la connaissance de ce coût ne permet pas de déduire directement le coût d'une recharge (c'est-à-dire le coût d'un « plein »). Ce coût de la recharge va notamment dépendre de la fréquence d'utilisation des bornes. La Figure 9 l'illustre en présentant le coût du plein en fonction de la quantité de kWh délivrés par semaine. Pour une recharge semi-rapide, le Livre Vert l'évalue à 24 € en faisant l'hypothèse d'une fréquence d'utilisation de 2 à 3 pleins par semaine, et 36 € pour une recharge rapide (avec une fréquence de 3 à 6 utilisations par semaine). Sans pouvoir aller plus loin, remarquons que ces fréquences estimées dans le Livre Vert à partir de la simulation de déploiement du VEx dans l'agglomération hypothétique de 500 000 habitants paraissent extrêmement faibles.

Figure 9 : Coût complet d'un « plein » de 25 kWh en fonction de la quantité de kWh délivrés par la borne par semaine (Source : Livre Vert)



Les besoins de recharge semi-rapide et rapide des adopteurs potentiels. Le Livre Vert en évoque trois :

- Elle permet les déplacements non prévus.
- Elle est nécessaire à ceux qui effectuent un kilométrage journalier important (taxis, livreurs, etc.)

- Elle permet de « rassurer » les adopteurs potentiels. L'idée est que les particuliers n'achèteront un VEx que s'ils ont l'assurance d'un réseau suffisamment dense de bornes publiques.

Par ailleurs, la recharge semi rapide ou rapide n'est nécessaire que pour les véhicules électriques (par opposition aux véhicules hybrides rechargeables).

Le dernier argument nous semble discutable : il s'agit d'augmenter la densité des bornes publiques comme mesure d'incitation à l'adoption. En caricaturant, des bornes très coûteuses sont installées, non pas pour être utilisées mais pour rassurer. Or il existe déjà un instrument conçu directement dans ce but : le bonus à l'achat de 5000 euros. Ce bonus n'est peut-être pas suffisant. Mais l'augmenter paraît être une solution plus rationnelle que d'installer des bornes publiques supplémentaires. Pour illustrer ce point, il est possible de se livrer à un calcul rapide. Le rapport du CGDD prévoit en matière de recharge semi-rapide 0,04 prise par véhicule dans les parkings publics, 0,04 sur la voirie et 0,025 sur les parkings d'hypermarchés, de centres commerciaux et d'hôtels. Il prévoit en outre 0,003 bornes de recharge rapide. En combinant ces données avec celles du

Tableau 4, cela correspond à un coût de 1000 euros par véhicule. Il est peut être préférable d'allouer une partie de ce budget à une augmentation du bonus. Si l'on considère qu'augmenter le bonus n'est pas possible, d'autres mesures sont à envisager et à comparer avec la densification de l'infrastructure publique. On peut par exemple proposer aux utilisateurs un système d'assistance gratuite en cas de panne électrique.

L'utilité des consommateurs. Nous venons de discuter les besoins. Leur existence est à l'origine d'un consentement à payer des usagers de la recharge qui en mesure l'intensité. A notre connaissance, il n'existe pas d'études mesurant ce que tel ou tel usager serait prêt à payer pour une recharge publique. De notre point de vue, cela doit être un point essentiel d'enquête, notamment dans les expérimentations prévues dans le cadre des projets « Investissements d'Avenir ». Cela nécessite de faire varier dans les expérimentations les densités de bornes et les tarifs à l'accès.

Sans l'information sur le consentement à payer des utilisateurs pour l'accès à la recharge rapide ou semi-rapide, il n'est pas possible de sélectionner la densité de bornes économiquement rationnelle.

La démarche économique que nous suggérons n'est pas celle du Livre Vert qui conseille aux collectivités de procéder en quatre étapes :

- La quantification du nombre de véhicules électriques qui vont circuler et la prévision des besoins de tirage en électricité nécessaires pour les faire rouler.
- L'identification de la structure de stationnement principal pour en déduire le nombre de bornes publiques de recharge normale.
- La répartition de la recharge électrique dans le temps et l'espace pour en déduire une courbe de charge type au cours de la journée.
- La définition du nombre de points de recharge nécessaires pour les différents types (normale, rapide et semi rapide) en s'appuyant sur un scénario d'utilisation des bornes par les usagers prévoyant 90% de recharge normale (privée ou publique) et 10% de recharge semi rapide ou rapide.

Cette séquence met l'accent sur la problématique de la courbe de charge que nous avons ignoré plus haut à des fins didactiques. En revanche, elle ignore complètement la comparaison des coûts de la borne avec ses bénéfices. Cela conduit à considérer que les usagers ne disposant pas d'un lieu privé de recharge normale doivent bénéficier d'un nombre de bornes équivalent à celui des usagers disposant d'un lieu de recharge privé. Cela conduit également à considérer comme une donnée du

problème à résoudre la répartition entre recharge normale et recharge semi rapide et rapide alors que le calcul de cette répartition doit être un résultat de cette analyse.

3.5 Que retenir ?

L'examen des données technico-économiques sur le coût des différents types de recharge montre qu'il n'est pas économiquement rationnel de déployer des bornes de recharge normale (lente) sur la voie publique ou sur les parkings. Elles sont en effet dix fois plus chères que la recharge à domicile ou sur le lieu de travail. Cela conduira ceux ne disposant pas de stationnement privé à ne pas acheter de VEx. Mais d'après les simulations du Livre Vert sur une agglomération fictive de 500 000 habitants, cette population ne représente que 20% des adopteurs potentiels.

La recharge publique doit donc être semi-rapide ou rapide. Comme le coût des bornes de recharge semi-rapide et rapide est élevé (de 7 000 à 56 000 € par borne), il convient de limiter leur densité autant que faire se peut. Dans ce but, nous suggérons l'utilisation d'une analyse coût-bénéfice traditionnelle comparant le coût complet de la recharge avec l'utilité qu'en retirent les usagers. Cette utilité se mesure par leur consentement à payer pour l'accès aux bornes de recharge semi-rapide et rapide. Ne doivent alors être installées que les bornes dont le coût est inférieur à cette utilité. Dans son esprit, cette démarche est très différente de celle proposée par le Livre Vert sur les infrastructures de recharge.

A notre connaissance, il n'existe pas de données sur les consentements à payer des usagers pour la recharge semi-rapide et rapide et sur l'élasticité prix de la demande. Il est prioritaire de générer ces données dans le cadre des expérimentations prévues. Celles-ci doivent donc faire varier la densité des bornes et les niveaux de tarification. En leur absence, une démarche rationnelle économiquement n'est pas possible.

4. Les bornes publiques de recharge : investissement, gestion et tarification

Nous venons de voir que le coût de la recharge en accès partagé – et donc la répartition entre recharge partagée et recharge privée - constituait l'enjeu économique principal. Dans cette partie, nous explorons comment cette activité doit être gérée. Nous allons montrer que c'est une activité présentant des caractéristiques de monopole naturel ce qui implique la nécessité d'une intervention publique pour l'organiser (et pas seulement pour la subventionner).

4.1 La recharge partagée est un monopole naturel

Rappel sur la théorie économique du monopole naturel

En économie, la notion de monopole naturel fait référence à des situations dans lesquelles l'existence d'une entreprise unique permet de minimiser le coût de production total. Le transport d'électricité est un exemple classique. Il serait inefficace de bâtir en parallèle deux réseaux de transport d'électricité étant donné la hauteur des coûts fixes nécessaires au déploiement de chaque réseau.

Plus précisément, un secteur est en situation de monopole naturel s'il est moins coûteux qu'une seule entreprise réalise toute la production plutôt que le marché soit partagé entre plusieurs entreprises. Formellement un monopole naturel existe si la fonction de coût de production C pour produire en quantité q est telle que $C(q) < \sum_{i=1}^N C(q_i)$ avec $\sum_{i=1}^N q_i = q$ jusqu'à saturation du marché.

En pratique, cette situation apparaît quand :

- La part des coûts fixes dans le coût de production est élevée. En effet, les coûts fixes génèrent des économies d'échelle (càd. un coût moyen décroissant) et donc un avantage à la grande taille.
- La demande est suffisamment faible pour ne pas saturer un réseau. Quand le réseau est saturé, un second réseau est nécessaire et la situation de monopole naturel disparaît puisque deux réseaux sont en concurrence.

Cette situation pose des problèmes d'efficacité économique car, une fois le monopole installé, il pratique un prix trop élevé ce qui induit une trop faible consommation du bien ou du service. La science économique préconise en conséquence une intervention publique pour réguler le prix.

Quand les investissements sont très réversibles – en ce sens qu'ils peuvent être récupérés sans décote importante en cas de sortie du marché – cette situation ne suscite pas d'inefficacité économique. En effet, l'entrée sur le marché est peu risquée puisqu'en cas d'échec, l'entrant sort sans coût. La menace d'entrée de concurrents incite alors la firme en place à ne pas pratiquer un prix de monopole pour l'éviter.

Application à la recharge publique

La recharge publique nous semble présenter les caractéristiques d'un monopole naturel. En effet :

- Comme le montre le Tableau 4, les coûts sont d'abord fixes. La maintenance et l'électricité constituent une part très minoritaire du coût total
- Les coûts d'investissements sont difficilement récupérables (sauf le coût du foncier)
- Le marché est de petite taille, au moins sur la première période 2010 – 2020, ce qui ne permet pas de dupliquer l'infrastructure d'autant que l'objectif de réduction des coûts impose de ne pas multiplier les bornes.

Le dernier point mérite quelques explications. Dans le cas d'une recharge en accès public, le marché pour une borne correspond à une zone géographique limitée à quelques km² : Du fait des coûts de transport, des bornes installées à plus d'une dizaine de kilomètres de distance ne sont en effet pas en concurrence. Or le nombre limité d'utilisateurs de VE ne justifiera pas de multiplier les bornes dans une même zone de chalandise. C'est la différence essentielle avec la distribution de carburants : compte tenu du nombre de véhicules thermiques, la densité de stations-service est suffisamment importante pour susciter de la concurrence entre plusieurs stations.

4.2 La régulation du monopole naturel de l'infrastructure

A partir du moment où il s'agit d'un monopole naturel, l'activité doit être régulée par la puissance publique. Les questions à traiter sont les suivantes :

1. Comment doit-on tarifier l'accès à l'infrastructure ? Si le tarif d'accès à l'infrastructure proposé à l'utilisateur est inférieur au coût complet, qui doit financer le solde ?
2. Qui doit réaliser l'investissement ?
3. Qui doit gérer l'infrastructure ?

La tarification de l'accès

A quel prix doit être facturé le plein ? Nous avons vu que le Livre Vert estimait son coût complet à 24 € pour un plein de 25 kWh sur une borne semi-rapide de 22 kVA et 36 € sur une borne rapide de de

43 kVA. Remarquons que, compte tenu de l'autonomie d'un VE (150 km), ce coût complet est comparable au prix d'un plein traditionnel d'essence.

Il est nécessaire de distinguer deux échelles de temps pour analyser l'effet de la tarification sur le comportement de l'utilisateur :

- Le choix de court terme d'approvisionnement. Il consiste à choisir entre recharge normale (privé) et recharge rapide. En la matière, l'efficacité économique exige un différentiel de prix entre les deux types de recharge égal à la différence entre leurs coûts complets. Cela limitera le recours à la recharge rapide aux situations dans lesquelles elle génère une utilité relative supérieure à la différence de coût complet, ce qui est conforme à l'intérêt général.
- Le choix de long terme d'adoption de l'électromobilité. On peut a priori supposer que les usagers potentiels vont notamment fonder leur décision d'adoption sur leurs anticipations en matière de prix de la recharge. En la matière, l'efficacité économique exige un tarif égal au coût complet pour induire une autosélection efficace des adopteurs ayant les besoins de recharge rapide les plus faibles.

La tarification au coût complet permet donc de créer les signaux appropriés laissant aux utilisateurs le soin d'arbitrer en fonction de leurs préférences personnelles entre les différentes options. Cette solution est pourtant explicitement rejetée par le livre vert avec l'argument qu'elle limiterait les incitations à opter pour le véhicule électrique.

Ce point de vue nous semble contestable pour deux raisons. D'une part, la charge semi rapide ne concerne que moins de 10% de la recharge d'après les expérimentations. Par rapport à un scénario où la recharge serait totalement lente (2 euros la recharge), une recharge rapide tous les 10 « pleins » conduit à un prix moyen de chaque recharge de 4,2 euros ce qui reste faible par rapport à un plein d'essence. D'autre part, il existe d'autres outils visant plus directement à encourager la diffusion de l'électromobilité, la subvention à l'achat en particulier, que l'on peut ajuster pour compenser une tarification au coût complet.

Investissement et gestion des bornes publiques

L'activité de déploiement et de gestion des bornes publiques se caractérisent par :

- une part écrasante de l'investissement dans le coût total (voir le Tableau 4),
- une demande très incertaine. En effet, elle dépend de l'ampleur de l'adoption des VEx par les particuliers et les entreprises. L'existence d'effets de réseau conduit en la matière à une logique du tout ou rien, selon que l'effet « boule de neige » s'amorce ou pas. En outre cette

demande est induite par un cadre réglementaire et des subventions publiques qui peuvent évoluer, comme le montre l'expérience.

Dans le cas d'une délégation de service public à un opérateur privé, ces deux caractéristiques induisent l'impossibilité de fonder la rémunération du délégataire sur les recettes commerciales. De ce point de vue, les solutions proposées par le Livre vert nous semblent pertinentes :

- Augmenter la durée de concession des parcs de stationnement déjà concédés. Le délégataire se rémunère alors sur les recettes de stationnement générées lors de la période de concession ajoutée au contrat.
- Avoir recours à un PPP dans lequel l'entreprise qui investit et gère les bornes est rémunéré par les collectivités avec un loyer.

Une autre solution est que la collectivité se charge directement du dossier via une régie. Il est difficile de trancher entre les différentes options.

4.3 Que retenir ?

La recharge publique présente les caractéristiques d'un monopole naturel : au moins dans un premier temps, la diffusion de l'électro-mobilité sera trop limitée pour justifier une densité de points de recharge semi-rapide et rapide à même de susciter de la concurrence (deux bornes ne sont en concurrence que si elles ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre). En outre, la demande de recharge est extrêmement incertaine puisqu'elle dépendra de ce que sera le niveau effectif de la diffusion. Ce niveau est particulièrement difficile à prévoir du fait d'effets de réseau suscitant une logique du tout ou rien et du fait que la demande est induite par des subventions publiques dont le niveau est difficile à anticiper au-delà de quelques années.

Ces deux caractéristiques empêchent dans un premier temps l'instauration d'un véritable « marché » de la recharge publique. Le déploiement de la recharge reposera d'abord sur l'action des collectivités publiques (qui pourront s'appuyer sur des opérateurs privés dans une logique de délégation de service public). En la matière, les modèles économiques proposés par le Livre Vert nous semblent pertinents.

Mais, compte tenu des différences de coûts très importantes entre les différents types de recharge, une tarification de la recharge au coût complet nous semble indispensable (soit environ 2 euros pour une recharge lente, 24 euros pour une recharge semi-rapide et 36 euros pour une recharge rapide). Cette tarification est la seule solution envoyant les signaux aux usagers leur permettant des choix de recharge conformes à l'intérêt général. Si l'on craint que cette tarification ne diminue trop les

incitations à l'adoption de l'électro mobilité, il est parfaitement possible d'ajuster la subvention à l'achat pour la compenser.

5 La standardisation

L'électromobilité nécessite de combiner plusieurs biens et services : un véhicule, de l'électricité, un service de recharge, des services financiers ou de monétique pour payer sa recharge, voire une batterie (dans l'hypothèse où elle n'est pas achetée avec le véhicule). Cette complémentarité induit la nécessité d'une standardisation pour interfacer efficacement ces différents composants. Or cette standardisation ne va pas de soi car son résultat influence très directement la concurrence entre les entreprises fournissant les différents éléments du système.

Cette partie se propose de décrypter les enjeux de la standardisation. Pour cela, nous nous appuyerons sur la théorie de l'économie des réseaux qui a été développée avec l'essor des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) lors de la révolution numérique dans les années 1980 et 1990. Cette branche de l'économie décrit et analyse les spécificités de l'offre et de la demande en bien-réseau dans le but de comprendre les équilibres de marché qui s'instaurent.

5.1 Qu'est-ce qu'un standard ?

Un standard crée une compatibilité. Il est l'interface qui permet à plusieurs biens complémentaires de fonctionner ensemble. On distingue différents types de standards selon la façon dont ils sont élaborés.

Le standard de jure

Le standard de jure repose sur un document à valeur juridique établi par des organismes de standardisation gouvernementaux ou internationaux du type ISO. Le standard de jure peut être susceptible d'avoir un caractère obligatoire s'il est adopté par la juridiction nationale mais ce n'est pas toujours le cas. C'est par exemple le cas du standard GSM qui imposa la bande de fréquence de fonctionnement des téléphones portables en Europe. Le standard de jure est transparent dans le sens où toutes les étapes de son élaboration sont publiques et il est adopté suite à une procédure de vote ouverte à tous.

Le standard de facto

Les standards de facto sont quant à eux des produits, services ou pratiques très largement adoptées à l'issue d'un processus concurrentiel. Il s'agit par exemple du format PDF. Les standards de facto sont souvent la propriété d'un seul acteur. Il arrive souvent que les standards de facto deviennent par la suite des standards de jure (cas du format PDF d'Adobe certifié par une norme ISO).

Le standard par consortium est un hybride entre le standard de facto et le standard de jure. Les standards par consortium sont établis à l'initiative de plusieurs industriels qui développent le standard en commun. Ce standard représente donc uniquement les intérêts des firmes du consortium contrairement au standard de jure où les intérêts de tous doivent être représentés. Le « Telecommunications Industry Association » (TIA) est par exemple un consortium industriel de standardisation dans le domaine des TIC. Ce standard s'appuie lui aussi sur un document écrit. Ce type de standard partage donc avec le standard de jure un caractère transparent tout en étant beaucoup plus rapide à mettre en place ce qui prime dans un contexte de rapides progrès technologiques. Le « Blu-ray » est par exemple un standard issu du consortium industriel « Blu-ray disc association » constitué initialement de 9 firmes : Sony, Panasonic, Pioneer, Philips, Thomson, LG (Lucky GoldStar) Electronics, Hitachi, Sharp, et Samsung.

La forme de standard adoptée détermine la structure du marché dans lequel opèrent les producteurs. Le standard de jure peut augmenter la concurrence. En effet les règles de propriété intellectuelle plus strictes et la transparence introduite par le standard de jure rendent beaucoup plus difficile l'exclusion d'un producteur du marché. D'un autre côté, le standard de jure élimine d'emblée la concurrence potentielle entre deux technologies rivales (un organisme de standardisation formelle ne crée jamais deux standards concurrents et deux organismes de standardisation formelle ne se font jamais concurrence). Pour comprendre la façon dont la standardisation s'articule au processus concurrentiel, nous allons rapidement présenter les concepts fondamentaux de l'économie des réseaux.

5.2 L'économie des réseaux

Qu'est-ce qu'un réseau ?

Un réseau est le support d'interconnexions d'équipements ou de dispositifs immatériels (par exemple, des logiciels) complémentaires coopérant entre eux afin de transporter des flux de personnes, d'énergie ou d'information et d'acheminer ces flux de leur point d'origine à leur destination. L'économiste considère le réseau comme un lieu technique de concrétisation d'une intermédiation économique. Le réseau est donc une plateforme transactionnelle permettant une confrontation entre l'offre et la demande ; il est un instrument d'échange entre producteurs et consommateurs. Réseau et marché sont associés d'emblée.

Cette définition s'applique au réseau de recharge pour véhicules électrifiés. Le réseau de recharge réalise la connexion entre les biens complémentaires que sont le véhicule électrique et le point de charge et éventuellement la batterie dans le cas d'un modèle d'affaire avec location de batteries. Le

service rendu par le réseau est le kW acheminé vers le véhicule. La demande en bien réseau « recharge » est constituée par l'ensemble des usagers de véhicules électriques. L'offre est constituée par les entreprises proposant un service de mobilité.

On peut schématiquement représenter le réseau en une structure stratifiée à trois couches qui reflète une segmentation des activités (Curien, 2005) :

Infrastructure : Il s'agit de la couche basse du réseau. Elle est le support physique qui permet la réalisation du service rendu par le réseau. Pour une recharge à domicile, l'infrastructure est constituée de la prise dédiée. Sur voirie ou dans les parkings publics ou sur les lieux de travail, elle est constituée des bornes spécifiques de recharge (rapides ou lentes) ou encore de station d'échange de batteries.

Info-structure : Il s'agit de la couche médiane du réseau. On y trouve les services de contrôle commande dont la fonction est d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure et de piloter celle-ci en vue de réaliser le service promis par le réseau. Il s'agit d'une activité intermédiaire nécessaire à réalisation du service final.

Service final : La couche haute est constituée des services finaux rendus par le réseau, dont la vocation est de fournir des prestations différenciées en nature en qualité et en prix en fonction du segment client. Dans notre cas, Le service final rendu est la recharge du véhicule. Il faut distinguer la recharge d'une simple transmission d'énergie. En effet le service de recharge est défini par un nombre de kWh transmis au véhicule, sous une certaine durée, et dans certaines conditions de confort d'utilisation. C'est cette combinaison de caractéristiques qui distingue le « service de mobilité » rendu d'une simple fourniture d'électricité.

Les effets de réseau

Un bien ou un service (par exemple de recharge d'un VEx) présente des effets de réseaux si l'utilité de chaque usager augmente avec le nombre d'usagers de ce bien (Belleflamme & Peitz, 2010). En pratique cela signifie que, toutes choses égales par ailleurs, il est préférable d'être connecté au réseau le plus large possible.

On distingue les effets de réseaux directs et les effets de réseaux indirects. **Les effets de réseau directs** traduisent l'augmentation de l'utilité avec la taille du réseau dans les « marchés de la communication ». Pour ce type de marché, la capacité de chacun à consommer le service est directement accrue par une augmentation de la taille du réseau : l'arrivée d'un nouvel usager représente un nouvel interlocuteur potentiel. Le supplément d'utilité est directement lié à

l'interaction entre les usagers du réseau. Ce type d'effet de réseau n'intervient pas pour le réseau d'infrastructure de recharge pour véhicules électrifiés.

Les effets de réseaux indirects peuvent être présents dans les marchés de la communication, mais ils interviennent dans beaucoup d'autres types de réseaux (le transport par exemple). Le supplément d'utilité n'est pas directement lié à l'établissement d'une nouvelle connexion entre les usagers mais transite par le supplément de qualité qu'une infrastructure accessible à une population étendue est en mesure d'apporter. On peut distinguer les effets de réseaux indirects suivants:

- Effet indirect d'offre : Lorsque le bien-réseau est constitué de deux produits complémentaires par exemple un équipement et les logiciels associés, plus il existe d'applications associées à une infrastructure, plus l'utilité du consommateur s'en trouve augmentée, et donc l'incitation à rejoindre le réseau devient plus forte. L'effet de réseau indirect provient du fait que les firmes produisant les applications associées sont incitées à multiplier les applications compatibles avec l'infrastructure. Considérons l'exemple d'un lecteur de DVD et son format de DVD associé. Plus le nombre de films proposés dans ce format de DVD est grand plus les bénéfices retirés du lecteur de DVD sont grands et plus le nombre d'utilisateurs sera élevé. A leur tour, les studios de production seront alors plus incités à produire leurs films dans ce format de DVD.
- Plus le nombre d'utilisateurs est grand, plus il sera facile pour un utilisateur de quitter le réseau en revendant son bien réseau sur le marché d'occasion.
- Effet indirect d'apprentissage au niveau de l'offre via le « learning by doing ». Plus il y a d'utilisateurs sur le réseau, plus la qualité du service s'améliore et plus le coût diminue par effet d'apprentissage des producteurs.

Le réseau d'infrastructure de charge pour véhicule électrifié bénéficie a priori de ces trois types d'effets de réseaux indirects :

- Plus le nombre d'utilisateurs de véhicule électrique est élevé plus les points de charge sont nombreux. Le bénéfice retiré du véhicule électrique en sera plus élevé ce qui incitera de nouveaux utilisateurs à rejoindre le réseau. Les opérateurs de mobilité sont alors à leur tour incités à améliorer le réseau de recharge en multipliant les bornes.
- Plus les utilisateurs de véhicules électrifiés sont nombreux, plus il est facile pour un propriétaire de véhicule électrique de revendre son véhicule électrifié sur le marché de l'occasion. Du côté de l'opérateur de mobilité qui louerait les batteries (dans le cadre d'un modèle d'affaire avec location de batterie), plus le système de location de batteries est

utilisé, plus les « usages deuxième vie » de batteries seront répandus et plus il est facile pour l'opérateur de mobilité de revendre sa batterie sur le marché de l'usage stationnaire. Compte tenu de la durée de vie des équipements de l'électromobilité (plus longue que pour de la téléphonie mobile), cet effet est potentiellement important.

- Il est évident que l'effet d'apprentissage est bénéfique pour les futurs utilisateurs. Le but des expérimentations pilotes menées en ce moment est justement de concevoir l'offre la mieux adaptée possible. Plus il y aura de véhicules électriques testant les différents systèmes de recharge (charge rapide, lente...), plus on aura de connaissances sur l'effet de la recharge sur la durée de vie de la batterie et plus le service de recharge proposé sera optimal et peu coûteux.

Le premier effet de réseau indirect décrit concerne avant tout les usagers d'infrastructures partagées. Le deuxième et le troisième effet de réseau indirects bénéficient quant à eux à tous les usagers.

La demande en bien-réseau

Dans les réseaux, le fait que l'utilité du consommateur augmente avec la taille du réseau anticipée par le consommateur induit une logique « du tout ou rien ». Soit la demande ne décolle pas car les premiers adopteurs sont trop peu nombreux pour susciter des effets de réseau. Soit la demande initiale parvient à dépasser une taille critique de réseau ; le succès est alors assuré et même accéléré par les effets de réseaux selon un effet boule de neige.

Les stratégies de standardisation des offreurs

Pour bénéficier des effets positifs de réseau, il est dans l'intérêt des producteurs de rassembler le plus d'usagers autour d'un même réseau : le producteur bénéficie alors d'une demande qui s'auto alimente.

Or il existe de nombreux cas dans lesquelles coexistent plusieurs technologies. Si deux firmes développent en parallèle deux biens réseaux incompatibles et que chacune a une préférence pour sa technologie (parce qu'elle l'a protégée avec un brevet par exemple), il n'est pas évident que les firmes souhaitent coopérer ex-ante pour définir un standard.

Les choix de compatibilité effectués par les firmes vont déterminer la structure du marché : elles peuvent faire le choix de la compatibilité en se mettant d'accord sur le standard à adopter et sont alors en concurrence au sein d'un même marché ou au contraire décider de se battre pour le marché à travers une guerre des standards. Le choix de standardisation des firmes résulte donc d'un

compromis : bénéficier d'un réseau élargi ou se réserver l'exclusivité d'un réseau plus maigre mais sur lequel la firme dispose d'un pouvoir de marché, voire d'une position de monopole.

Du point de vue de l'intérêt général, faut-il privilégier l'émergence d'un standard ex ante ou laisser se dérouler une guerre des standards ?

A première vue, de nombreux arguments militent en faveur d'une standardisation précoce :

- Elle facilite la coordination des acteurs et accélère le développement du réseau en exploitant les effets de réseau.
- Elle favorise la concurrence sur le marché puisque le chaque producteur fournit un bien standardisé parfaitement substituabilité.
- Elle réduit l'incertitude auprès des consommateurs. Si les consommateurs ont une vision trop floue de la version du « bien-réseau » qui deviendra le modèle dominant, il se peut qu'ils adoptent une attitude attentiste limitant le développement du réseau.
- Elle réduit l'incertitude auprès des producteurs. Lorsqu'une technologie est définie par un standard, elle bénéficie d'emblée de la confiance des producteurs car elle est un gage de l'interopérabilité des différents biens constituant le bien-réseau. De plus, le producteur bénéficie d'emblée d'une vision transparente des technologies qu'il doit acquérir.

A l'opposé, la non standardisation présente des avantages :

- Elle crée une concurrence pour le marché pour obtenir des positions de monopole (si le standard l'emporte sur les autres et que la technologie est protégée par des brevets). Cela crée des incitations a priori plus puissantes à l'innovation que la concurrence sur le marché.
- Le processus de standardisation formel est parfois très lent ce qui ralentit le processus de diffusion de la technologie. C'est un peu ce qu'on observe aujourd'hui dans le domaine de l'électromobilité.
- La non-standardisation laisse la concurrence sélectionner la technologie. La standardisation précoce implique, elle, de la sélectionner à un stade de plus faible maturité ce qui la rend plus difficile à évaluer.

Ces arguments permettent de déduire les caractéristiques propices à l'un ou l'autre des scénarios. En l'occurrence, la standardisation précoce est intéressante quand :

- Plus que sa performance, le prix constitue l'obstacle clé de la diffusion de la technologie, (car elle favorise la concurrence sur le marché).
- La technologie est déjà mature

- Les effets de réseau sont importants.

Nous mobiliserons plus loin ces éléments pour discuter de la standardisation dans le domaine de l'électromobilité.

5.3 Les besoins de compatibilité dans le domaine de l'électromobilité

Le bien composite « recharge intelligente de véhicule électrique » résulte de l'association du véhicule, de la borne et du software associé. Dans le cas d'un modèle d'affaire avec leasing de batterie on doit aussi y associer la batterie. L'association de ces différents éléments suppose qu'ils soient compatibles et résulte donc de la coopération des acteurs impliqués (Brown et al., 2009). Quel degré de compatibilité requièrent-ils ?

Le véhicule. Le connecteur du côté du véhicule détermine le type de câble qui pourra y être connecté. Le constructeur automobile doit aussi faire en sorte que l'ordinateur de la voiture puisse intégrer la puce prévue par le « car-customer system » si ce système de software est retenu pour le réseau. Le constructeur automobile doit également faire le choix de concevoir un véhicule compatible avec une borne l'alimentant en courant continu ou en courant alternatif (dans ce cas il faut prévoir un alternateur au sein du véhicule). Dans le cas du modèle d'affaire avec location de batterie par l'opérateur, le constructeur automobile doit aussi préconcevoir l'emplacement de la batterie.¹⁰

La batterie. Le voltage maximal que peut supporter une batterie détermine le type de recharge qu'elle peut supporter. Il n'est pas évident que toutes les batteries puissent supporter la charge rapide. La batterie doit pouvoir restituer de l'électricité dans le sens batterie-réseau (V2G)

La borne. La prise sur la borne doit évidemment être compatible avec le connecteur. La borne doit prévoir l'intégration du logiciel ; dans le cas du « car-customer system », il s'agit d'un système électronique assez simple à connecter pourvu qu'il y ait assez d'espace pour l'intégrer. Dans le cas d'une « networked infrastructure », il faut prévoir une liaison Ethernet vers la borne. La borne délivre soit du courant alternatif soit du courant continu, or il existe deux types de véhicules électriques : ceux qui se chargent en courant alternatif (une technologie utilisée par Renault) et ceux qui se charge en courant continu (la majorité des constructeurs automobiles).

¹⁰ Dans le cas de la technologie Quickdrop mise au point par Better Place et Renault, il est nécessaire de localiser la batterie sous les sièges arrière de manière à être compatible avec le système d'échange de batterie. La plupart des véhicules électriques possèdent pourtant leur batterie dans le coffre arrière à la fois pour des questions de place et d'équilibrage. Ce cas est très particulier. Nous ne l'évoquerons pas dans le corps du texte.

A moyen terme la borne doit pouvoir offrir les possibilités « vehicle to grid » (V2G) et « vehicle to home » (V2H). Le fait que l'électricité puisse être transmise du véhicule vers le réseau nécessite l'installation d'un protocole de communication pour que le distributeur puisse avoir accès à la batterie et l'existence d'un compteur qui comptabilise les flux d'énergie dans le sens batterie-réseau.

Le câble connecteur. Il doit être compatible à la fois avec le connecteur coté véhicule et la prise coté « mur » ou borne. Le câble doit être conçu pour pouvoir transporter de l'énergie bilatéralement dans la cadre d'un système V2G ou V2H.

Le point de livraison. Cet élément constitue le point frontière d'accès au marché des fournisseurs d'électricité. Il est à la frontière du réseau de distribution public d'électricité et des fournisseurs en concurrence. Ce point est équipé d'un compteur qui permet à l'opérateur du réseau de distribution public de communiquer les données de consommations au fournisseur qui établit la facture client. Ce point de livraison doit pouvoir comptabiliser les flux dans les deux sens si l'on veut intégrer les possibilités de V2G¹¹.

Le réseau de distribution d'électricité. Il doit pouvoir supporter la transmission de l'électricité dans les deux sens ce qui nécessitent de nouveaux standards. Le réseau doit être en mesure d'accepter de l'électricité de moins bonne qualité (V2G). Il existe en effet des standards de qualité de courant mis au point par IEEE et IEC¹² évitant que des harmoniques indésirables puissent être introduites sur le réseau.

Les logiciels. Comme nous l'avons vu plus haut, l'intégration d'un logiciel au réseau implique une coordination lors de la conception du véhicule et de la conception de la borne. Elle doit également associée l'énergéticien (notamment pour les futurs possibilités de V2G et V2H et dans un futur plus proche pour permettre une gestion intelligente de la charge avec abonnement type heures creuses/ heures pleines).

Cette longue liste montre que les besoins de compatibilité et de standardisation sont très importants dans le domaine de l'électromobilité.

5.2 Deux guerres des standards aujourd'hui en cours

Nous allons maintenant décrire et analyser deux exemples dans lesquels coexistent aujourd'hui plusieurs standards concurrents : la prise de recharge et l'alternative entre une recharge semi rapide en courant alternatif et en courant continu.

¹¹ Le compteur « Linky » est le projet de compteur futur bilatéral de ERDF.

¹² Standard development organizations : International Electronic Commission & Insititute of Electrical and Electronics Engineer.

La prise

Aujourd'hui, la situation en Europe est caractérisée par la présence de deux standards majeurs en concurrence : la prise de Type 2 dite « Mennekes » et la prise de Type 3 promue par l'EV Plug Alliance :

- La prise « Mennekes », du nom d'une entreprise allemande d'équipements électriques, lancée en 2009 a initialement été promue par Daimler et RWE (Figure 10). Elle autorise la recharge lente et rapide et permet, dans une version améliorée, la communication d'information entre le véhicule et le réseau.
- La prise de type 3 est promue par l'EV Plug Alliance depuis 2010, un consortium d'entreprises d'équipements électriques, dont les leaders sont les français Schneider Electric et Legrand et l'italien SCAME. Outre une géométrie des broches différente, la différence majeure tient à l'existence d'obturateurs qui rendent plus sûre sa manipulation. Elle est en outre plus avancée dans les capacités à communiquer avec le réseau.

Figure 10 : Connecteur de l'EV Plug Alliance (à gauche) et Mennekes (à droite)



Où en est la standardisation en janvier 2012 ? Tout d'abord, elle se discute au niveau européen (European Commission, 2010). La commission européenne a chargé le 29 juin 2010 les organismes européens de standardisation suivants de mettre au point un standard de recharge pour VE,

notamment les prises : European Telecommunications Standards Institute (ETSI); European Committee for Standardization (CEN); European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). Mais le processus traîne en longueur : la normalisation devait être effective en 2011. A ce jour, elle n'est pas réalisée.

Dans l'intervalle, l'Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) a pris position le 14 septembre 2011 pour une utilisation uniforme en Europe de la prise « Mennekes » du côté de l'infrastructure. C'est une décision très importante puisque l'association représente la quasi-totalité des constructeurs automobiles (dont PSA et Renault).

Pour la France, le Livre Vert conseille inversement la prise de l'EV Plug Alliance. L'argument explicite majeur est la non-conformité de la prise Mennekes du fait de l'absence d'obturateurs. Ce problème concerne d'ailleurs d'autres pays. Le fait que deux grandes entreprises françaises comptent parmi les leaders de cette alliance n'est sans doute pas étranger non plus à cette position.

Que faut-il en penser ? L'observateur extérieur est surpris par ce débat. Rappelons qu'il s'agit de standardiser la prise côté infrastructure, la prise côté véhicule restant spécifique à chaque modèle. Quel est alors le besoin d'avoir un standard européen dans la mesure où une standardisation nationale semble suffire à exploiter l'essentiel des effets de réseau ? Les déplacements transnationaux de VEx seront en effet extrêmement limités. Des adaptateurs pourraient gérer les difficultés dans quelques zones frontalières¹³.

Dans la partie précédente, la nécessité d'une diminution du prix par la concurrence constituait une justification de la standardisation. Ce facteur n'apparaît pas décisif dans la mesure où le prix de la prise ne représente qu'une part faible du coût de possession d'un VEx (Rappel = le coût d'une prise à domicile qui inclut le prix de la prise, son installation et l'adaptation du réseau domestique à la recharge ne coûte que 500 €).

La recharge semi rapide

En matière de recharge, la standardisation avance. Mais demeure une concurrence sur le mode de recharge semi rapide. Deux options sont en présence :

- Renault promeut aujourd'hui une recharge en « courant alternatif ». Cette technique conduit à réduire le coût des bornes puisque le redresseur qui assure la conversion AC/DC est intégré

¹³ Il n'est d'ailleurs pas inutile de rappeler que la prise électrique classique est très loin d'être standardisée à l'international.

dans les véhicules. Aujourd'hui, seules les modèles Zoé et Kangoo sont compatibles avec cette recharge. Evidemment, l'équipement avec un redresseur augmente le coût du véhicule.

- Le reste des constructeurs (PSA, les japonais dont NISSAN, les allemands, etc.) privilégie une recharge en courant continu. Nissan, pourtant partenaire de Renault, est particulièrement proactif puisque, dans le but de diminuer le coût des bornes DC, l'entreprise a conçu une borne qu'elle va faire produire sous licence par 5 fabricants en Europe (ENDESA, SIEMENS, Efacec, Circutor, DBT).

Les voitures de Renault ne seront pas rechargeables en rapide sur les bornes AC et vice versa. En conséquence, le Livre Vert préconise l'installation des bornes mixtes (AC et DC) et donc plus chères. Dans le communiqué de septembre 2011 prenant partie pour la prise Mennekes, l'ACEA n'a pas tranché entre les deux types de recharge.

Que penser de cette guerre des standards ? A première vue, la position de Renault paraît difficile, même si elle est soutenue par les pouvoirs publics à travers la Livre Vert et son choix pour les bornes mixtes. Mais, à la différence des prises pour lesquelles les différences semblent finalement assez limitées, nous sommes là dans une alternative entre deux solutions techniquement très contrastées. Elles le sont également en termes de répartition des coûts : du côté de Renault, des bornes de recharge moins chères et des véhicules plus chers et l'inverse pour la recharge en courant continu.

D'un point de vue économique, il est difficile de trancher si une approche domine l'autre. Renault avance un coût de 2 000 € pour la borne (Thomas Orsini cité dans Observatoire des Véhicules d'Entreprise, 2011, p 22) alors que le coût de la borne DC vaut trois ou quatre fois plus (

Tableau 4). L'économie de coût d'investissement de la recharge en alternatif est donc de l'ordre de 6 000 € par borne. En s'appuyant sur les hypothèses du rapport du CGDD de 2011 – en matière de recharge semi rapide, il prévoit 0,04 prise par véhicule dans les parkings publics, 0,04 sur la voirie et 0,025 sur les parkings d'hypermarchés, de centres commerciaux et d'hôtels, soit un total de 0,105 borne par véhicule – ce gain ramené au véhicule est donc de l'ordre de 600 €¹⁴. Comment ce chiffre se compare-t-il au coût d'installation d'un redresseur dans le véhicule ? Nous ne disposons pas des données permettant de répondre ce point.

Mais, même une technologie supérieure peut ne pas vaincre une guerre des standards comme nous l'enseigne l'économie des réseaux et l'expérience. Le pari de Renault est particulièrement risqué car le standard concerne la borne et le véhicule. Une standardisation nationale ne suffit donc pas puisque le marché des VEx est au moins continental : On imagine mal les autres constructeurs installer des redresseurs dans leur modèle si seule la France déploie les bornes nécessaires pour les charger.

Au-delà du bilan d'ensemble, les coûts ne sont pas supportés pas les mêmes acteurs: l'acheteur de VEx dans le modèle de Renault, celui qui finance l'infrastructure dans le cas de l'autre option, et donc les collectivités dans le dispositif français.¹⁵

5.3 Que retenir ?

L'électro-mobilité est un bien système exigeant de la standardisation pour interfacer efficacement ses différents composants (véhicule, connecteur, borne, logiciel de communication, etc.) et pour exploiter des effets de réseau favorisant l'adoption.

L'économie des réseaux contraste deux processus de standardisation :

- Une standardisation « de jure » qui intervient à un stade précoce du processus de diffusion.
- Une standardisation « de facto » dans laquelle un standard s'impose à l'issue d'un processus concurrentiel. Elle est donc précédée d'une phase de concurrence entre standards concurrents (une guerre des standards selon la terminologie de l'économie des réseaux).

¹⁴ Ces éléments de calcul sont très fragiles, notamment parce nous n'avons pas pu valider par une source indépendante le coût de 2 000 € pour la borne AC.

¹⁵ Ou l'utilisateur du VEx si la tarification de l'infrastructure est au coût complet (ce que nous préconisons plus haut).

Contrairement à ce que pourrait suggérer l'intuition, la standardisation précoce « de jure » n'est pas toujours la meilleure option. Certes, elle permet d'exploiter rapidement les effets de réseau ; elle favorise une concurrence sur le marché, la standardisation assurant la substituabilité des biens produits par différentes entreprises. Mais elle requiert un consensus qui est lent à émerger. Elle nécessite de sélectionner la technologie à un stade où elle est moins mature que le stade de la standardisation de facto. Le standard choisi n'est donc pas forcément le meilleur d'autant que le standard de facto est sélectionné par le marché. Mais surtout, elle peut limiter l'innovation en diminuant la diversité des technologies et en réduisant les incitations à la R&D.

Au niveau européen, il existe aujourd'hui une concurrence entre la prise de type 3 de l'EV Plug Alliance soutenue par Schneider Electric, Legrand et l'italien SCAME et la prise de type 2 « Mennekes » soutenue initialement par Daimler et RWE, rejoint en septembre 2011 par l'ACEA, l'association représentant les constructeurs européens d'automobiles. Cette situation ne nous semble pas poser de problème majeur pour la diffusion du VEx en France dans la mesure où la standardisation semble déjà acquise au niveau national (le Livre Vert recommande la prise de l'EV Plug Alliance). Or c'est à ce niveau que s'exprime l'essentiel des besoins de compatibilité dans la mesure où les VEx passeront rarement les frontières. La standardisation européenne devient alors un enjeu de second ordre.

Dans le domaine de la recharge semi-rapide, la concurrence entre les bornes en courant alternatif promues par Renault et les bornes en courant continu promues par les autres constructeurs est d'une autre nature car les concepts techniques et les caractéristiques économiques sont très contrastés : par rapport au courant continu, la recharge en courant alternatif exige des bornes moins chères mais des véhicules équipés d'un redresseur, et donc plus chers. Il s'agit d'un sujet qui n'est pas national (les véhicules ne peuvent être spécifiquement équipés d'un redresseur pour un marché national) et dont l'évaluation économique est difficile au stade actuel de développement technologique. Dans ce contexte, l'économie des réseaux suggère de laisser la guerre de standards se dérouler pour que le marché tranche la question.

Conclusion

Notre analyse a permis de produire des résultats sur trois points que nous allons maintenant résumer: le calibrage de l'infrastructure de recharge, l'organisation de la recharge publique et la standardisation.

Le calibrage de l'infrastructure de recharge

L'examen des données technico-économiques sur le coût des différents types de recharge montre qu'il n'est pas économiquement rationnel de déployer des bornes de recharge normale (lente) sur la voie publique ou sur les parkings. Elles sont en effet dix fois plus chères que la recharge à domicile ou sur le lieu de travail. Cela conduira ceux ne disposant pas de stationnement privé à ne pas acheter de VEx. Mais d'après les simulations du Livre Vert sur une agglomération fictive de 500 000 habitants, cette population ne représente que 20% des adopteurs potentiels.

La recharge publique doit donc être semi-rapide ou rapide. Comme le coût des bornes de recharge semi-rapide et rapide est élevé (de 7 000 à 56 000 € par borne), il convient de limiter leur densité autant que faire se peut. Dans ce but, nous suggérons l'utilisation d'une analyse coût-bénéfice traditionnelle comparant le coût complet de la recharge avec l'utilité qu'en retirent les usagers. Cette utilité se mesure par leur consentement à payer pour l'accès aux bornes de recharge semi-rapide et rapide. Ne doivent alors être installées que les bornes dont le coût est inférieur à cette utilité. Dans son esprit, cette démarche est très différente de celle proposée par le Livre Vert sur les infrastructures de recharge.

A notre connaissance, il n'existe pas de données sur les consentements à payer des usagers pour la recharge semi-rapide et rapide et sur l'élasticité prix de la demande. Il est prioritaire de générer ces données dans le cadre des expérimentations prévues. Celles-ci doivent donc faire varier la densité des bornes et les niveaux de tarification. En leur absence, une démarche rationnelle économiquement n'est pas possible.

L'organisation de la recharge publique

La recharge publique présente les caractéristiques d'un monopole naturel : au moins dans un premier temps, la diffusion de l'électro-mobilité sera trop limitée pour justifier une densité de points de recharge semi-rapide et rapide à même de susciter de la concurrence (deux bornes ne sont en concurrence que si elles ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre). En outre, la demande de recharge est extrêmement incertaine puisqu'elle dépendra de ce que sera le niveau effectif de la diffusion. Ce niveau est particulièrement difficile à prévoir du fait d'effets de réseau suscitant une

logique du tout ou rien et du fait que la demande est induite par des subventions publiques dont le niveau est difficile à anticiper au-delà de quelques années.

Ces deux caractéristiques empêchent dans un premier temps l'instauration d'un véritable « marché » de la recharge publique. Le déploiement de la recharge reposera d'abord sur l'action des collectivités publiques (qui pourront s'appuyer sur des opérateurs privés dans une logique de délégation de service public). En la matière, les modèles économiques proposés par le Livre Vert nous semblent pertinents.

Mais, compte tenu des différences de coûts très importantes entre les différents types de recharge, une tarification de la recharge au coût complet nous semble indispensable (soit environ 2 euros pour une recharge lente, 24 euros pour une recharge semi-rapide et 36 euros pour une recharge rapide). Cette tarification est la seule solution envoyant les signaux aux usagers leur permettant des choix de recharge conformes à l'intérêt général. Si l'on craint que cette tarification ne diminue trop les incitations à l'adoption de l'électro mobilité, il est parfaitement possible d'ajuster la subvention à l'achat pour la compenser.

La standardisation

L'électro-mobilité est un bien système exigeant de la standardisation pour interfacer efficacement ses différents composants (véhicule, connecteur, borne, logiciel de communication, etc.) et pour exploiter des effets de réseau favorisant l'adoption.

L'économie des réseaux contraste deux processus de standardisation :

- Une standardisation « de jure » qui intervient à un stade précoce du processus de diffusion.
- Une standardisation « de facto » dans laquelle un standard s'impose à l'issue d'un processus concurrentiel. Elle est donc précédée d'une phase de concurrence entre standards concurrents (une guerre des standards selon la terminologie de l'économie des réseaux).

Contrairement à ce que pourrait suggérer l'intuition, la standardisation précoce « de jure » n'est pas toujours la meilleure option. Certes, elle permet d'exploiter rapidement les effets de réseau ; elle favorise une concurrence sur le marché, la standardisation assurant la substituabilité des biens produits par différentes entreprises. Mais elle requiert un consensus qui est lent à émerger. Elle nécessite de sélectionner la technologie à un stade où elle est moins mature que le stade de la standardisation de facto. Le standard choisi n'est donc pas forcément le meilleur d'autant que le standard de facto est sélectionné par le marché. Mais surtout, elle peut limiter l'innovation en diminuant la diversité des technologies et en réduisant les incitations à la R&D.

Au niveau européen, il existe aujourd'hui une concurrence entre la prise de type 3 de l'EV Plug Alliance soutenue par Schneider Electric, Legrand et l'italien SCAME et la prise de type 2 « Mennekes » soutenue initialement par Daimler et RWE, rejoint en septembre 2011 par l'ACEA, l'association représentant les constructeurs européens d'automobiles. Cette situation ne nous semble pas poser de problème majeur pour la diffusion du VEx en France dans la mesure où la standardisation semble déjà acquise au niveau national (le Livre Vert recommande la prise de l'EV Plug Alliance). Or c'est à ce niveau que s'exprime l'essentiel des besoins de compatibilité dans la mesure où les VEx passeront rarement les frontières. La standardisation européenne devient alors un enjeu de second ordre.

Dans le domaine de la recharge semi-rapide, la concurrence entre les bornes en courant alternatif promues par Renault et les bornes en courant continu promues par les autres constructeurs est d'une autre nature car les concepts techniques et les caractéristiques économiques sont très contrastés : par rapport au courant continu, la recharge en courant alternatif exige des bornes moins chères mais des véhicules équipés d'un redresseur, et donc plus chers. Il s'agit d'un sujet qui n'est pas national (les véhicules ne peuvent être spécifiquement équipés d'un redresseur pour un marché national) et dont l'évaluation économique est difficile au stade actuel de développement technologique. Dans ce contexte, l'économie des réseaux suggère de laisser la guerre de standards se dérouler pour que le marché tranche la question.

Bibliographie

Abell, L., & Oppenheimer, P. 2008. World lithium resource impact on electric vehicle.

Agence Internationale de l'Energie. 2007. Status Overview of Hybrid and Electric Vehicle technology, final report, Phase III, Annex VII, IA-HEV.

Ahman, M. 2004. Government policy and the development of electric vehicles in Japan. Energy Policy, 34 (433-443).

Argonne national laboratory. (2009). Lithium ion batteries: possible material demand issues.

Belleflamme, P., & Peitz, M. (2010). Industrial organization Markets and Strategies. Cambridge University Press.

Bleijns, C. 2009. Low-cost charging systems with full communication capability.

Borloo, J.-L., & Estrosi, C. 2010. Dossier de presse du 13 avril 2010: les avancées du plan de développement des véhicules électriques et hybrides.

Boston Consulting Group. 2010. Batteries for electric car Challenges, opportunities and the outlook to 2020.

Brown, S., Pyke, D., & Steenhoff, P. (2009). Electric vehicle: the role and importance of standards in an emerging market. Energy policy , 3797-3806.

Charte pour le déploiement d'infrastructures publiques de recharge pour le véhicule électrique. (13 avril 2010).

City of Westminster. 2009. Understanding existing electric vehicle recharging infrastructure, vehicles available on the market and user behaviour and profile.

Commissariat Général au Développement Durable. 2011. Les véhicules électriques en perspective : Analyse coûts-avantages et demande potentielle.

Curien, N. 2005. Economie des réseaux. La Découverte.

Deutsche Bank. 2008. Electric Cars: Plugged In.

European commission. (2010, avril 26). Roadmap on regulations and standards for the electrification of cars. Bruxelles.

Gambardella, P. 2010. Transport durable: contribution des moteurs hybrides. Mines Revue des Ingénieurs. Hors-série : les déplacements du futur.

Gandal, N., Salant, D., & Waverman, L. (2003). Standards in wireless telephone networks. Telecommunications Policy .

IEA. 2009. Technology Roadmap-Electric and plug-in hybrid electric vehicles.

Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public. 2011. Avril

McKinsey. 2009. Electrifying cars: how three industries will evolve?

MEEDDM. 2010. Une filière française de batteries. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Une-filiere-francaise-de-batteries.html>

Observatoire du véhicule d'entreprise (2011). Véhicules électriques et infrastructures de recharge : comprendre et prendre les bonnes décisions pour votre entreprise. Les Cahiers de l'OVE. Mars.

Office Européen des Brevets. (s.d.). Base de données PATSTAT.

Pélata, P. (2010). le véhicule électrique va-t-il enfin démarrer? (conférence). L'école de Paris du

Torcheux, L. (2010). Technologies batteries lithiu pour VE (slides). printemps de la recherche EDF R&D, conférence du 18 juin.

ANNEXE

Le secteur des fabricants de batterie

Les fabricants de batteries et les constructeurs automobiles sont en train de mettre en place les capacités de production de batteries pour répondre à un développement du marché du véhicule électrique (VE), véhicule électrique hybride rechargeable (VEHR) et véhicule électrique hybride (VEH). Rappelons que le coût de la batterie correspond à la moitié du coût du véhicule électrique aujourd'hui. On ne peut certes pas prévoir aujourd'hui quelle sera la pénétration de ces véhicules ; mais si les véhicules électrifiés représentaient une proportion importante du parc automobile, cela modifierait profondément l'organisation industrielle du secteur automobile en mettant au cœur du secteur la filière de production des batteries. Si les ventes de véhicules électrifiés atteignaient 6 à 8 millions d'unité par an, les ventes annuelles de batteries représenteraient un chiffre d'affaire de 60 milliards de \$ (McKinsey, 2009)¹⁶.

Dans cette annexe, nous décrivons les caractéristiques techniques et économiques de la fabrication des batteries et examinons la capacité des fabricants actuels de batteries à restructurer leur organisation pour assurer une production à grande échelle des batteries automobiles. Nous nous sommes appuyés sur des rapports techniques et des études de marché que nous avons complété par les informations disponibles sur les sites des compagnies et un entretien avec un spécialiste (EDF R&D) de la filière batterie.

5.1 Le processus de production

Le Tableau A1 décrit la chaîne de production des batteries qui va de la chimie des matériaux à la mécanique d'assemblage, au traitement électrique des accumulateurs et à l'électronique de contrôle associée. Les étapes sont les suivantes :

¹⁶ Dans l'hypothèse d'une batterie à 350\$/kWh. Aujourd'hui le prix se situe entre 700 et 1200\$/kWh

- 1) L'extraction des matières premières dont les transformations aboutiront aux matériaux pour les électrodes par exemple.
- 2) La production de matériaux précurseurs qui constituent la cellule : le carbonate de lithium produit à partir de minerai ou saumure, des oxydes métalliques à partir desquels on fabrique les matériaux actifs des électrodes, etc.
- 3) La production des matériaux dits « procédés » via des transformations chimiques des matériaux précurseurs. Ces matériaux constituent par exemple les supports d'électrodes, les matières électro-chimiquement actives, les liants, les matériaux pour séparateurs, les agents de scellement et d'étanchéité, l'enveloppe multicouche d'accumulateur... C'est à ce niveau de la chaîne de production que les industriels réalisent la plus grosse marge (Torcheux, 2010).
- 4) La fabrication des rouleaux, des électrodes, du séparateur et de l'électrolyte. Les rouleaux sont des films de plusieurs mètres obtenus à partir des matériaux procédés de l'étape précédente. On élabore un mélange liquide que l'on dépose sur couche d'aluminium ou de cuivre. On sèche et uniformise ensuite l'épaisseur des couches. Cette étape comporte également le traitement de surface des électrodes.
- 5) La découpe des rouleaux et l'assemblage en milieu anhydre des films d'anode, de cathode et de séparateur. Est ajouté l'électrolyte. On établit les connections électroniques et on scelle le tout dans un pack cellule souvent en aluminium. Sont également réalisés des tests de sécurité et de performances. Cette étape nécessite de lourds investissements en génération-régulation de puissance électrique et acquisition de données.
- 6) Assemblage des cellules en modules par la constitution d'un circuit reliant les cellules entre elles.
- 7) Assemblage des modules en une batterie définitive dans un boîtier rigide. La batterie possède sa connexion, son électronique de surveillance et d'équilibrage le « battery management system », ainsi que divers organes de sécurité. La partie électronique complexe provient de chez un fournisseur et est élaborée à partir du cahier des charges du concepteur de batteries.

La production des cellules (les étapes 1 à 5) représente le coût le plus important et plus précisément les « matériaux procédés » qui constituent la cellule (étapes 1 à 3). D'après une étude du BCG de 2010, la production des cellules constitue 65% du coût total de la batterie. Plus précisément 30% à 50 % du coût de production de la batterie proviennent des matériaux qui constituent la cellule (McKinsey, 2009).

Tableau A1 : chaine de production batterie (source auteur; inspiré d'un constructeur automobile)

Matière première	Matériaux précurseurs	Matériaux processés	Composants cellules	Assemblage cellule	Assemblage module	Assemblage pack	Intégration véhicule
spodumène	Li ₂ CO ₃ minéral	LiMn ₂ O ₄	Rouleau cathode	cathode	cellules	Modules	
	Li ₂ CO ₃ saumur	séparateur	Rouleau anode	anode	électronique	Battery management system	
Mn	LiOH	LiFePO ₄	Rouleau séparateur	séparateur			
Cobalt	CO ₃ O ₄	graphite	électrolyte	électrolyte			
Nickel	MnO ₂	Li(Ni,Co,Al)O ₂		électronique			
graphite	Al(OH) ₃	LiPF ₆					
	NiCo(OH) ₂						
	Li ₂ CO ₃						
	FeC ₂ O ₄						

Au sein de cette chaîne de production, les firmes se positionnent de la manière suivante :

- Les firmes minières qui extraient la matière première et la transforment parfois en matériaux précurseurs. Le groupe Chemetall extrait par exemple du lithium au Chili et au Nevada et produit du carbonate de lithium.
- Les producteurs de matériaux précurseurs sont des groupes de la chimie (souvent chinois ou coréens).
- Les producteurs de matériaux procédés sont des industriels de la chimie et de la métallurgie. C'est le cas d'Umicore¹⁷ qui produit à la fois les matériaux procédés (lithium cobaltite LiCoO₂) et les matériaux précurseurs (oxyde de cobalt Co₃O₄ par exemple).
- Il existe des industriels spécialisés dans la fabrication des composants cellules : NEC –Tokin produit et traite les électrodes. Les fabricants de batteries sont traditionnellement positionnés sur les étapes 5 à 7 (le Blog énergie, 2009).

Cependant cette division traditionnelle est loin d'être respectée systématiquement et les industriels sont en train de construire des alliances ou des intégrations verticales au sein d'un secteur exigeant de nouveaux savoir-faires.

5.2 Les acteurs de la filière et leurs stratégies

Le marché des véhicules équipés de batteries lithium ion n'existe pas encore (les quelques modèles électriques vendus aujourd'hui le sont à très petite échelle) et il n'y a donc pas de production de batteries lithium ion pour véhicules électrifiés en grande série, mais seulement du développement et la production de séries pré-industrielles. Cependant il est possible d'identifier les entreprises susceptibles de devenir les leaders de ce marché à travers les annonces de production prévue, notamment dans les contrats les liant avec les constructeurs automobiles. La description qui suit des principaux constructeurs de batteries est réalisée à partir d'une étude de la Deutsche Bank (2008) et des sites des fabricants de batteries.

Un secteur émergent qui s'organise en Asie, aux Etats Unis et en Europe

Les producteurs de batteries à haut potentiel sont localisés dans trois zones : l'Asie (Japon Corée et Chine), les Etats-Unis et l'Europe.

¹⁷ <http://www.umicore.com/en/>

Le Japon et la Corée dominent sur le plan technologique (Torcheux, 2010) et bénéficient d'un savoir-faire technologique construit dans l'industrie des batteries rechargeables pour l'électronique portable ou industriel. En 2000, 95% des batteries lithium-ions (principalement pour les téléphones et ordinateurs portables) étaient produites dans ces deux pays (source : battery university.com). La joint-venture japonaise AESC est le producteur ayant le plus de potentiel aujourd'hui (Torcheux, 2010) grâce notamment à ces partenariats étroits avec les constructeurs automobiles. Les industries coréennes ont de plus acquis un savoir-faire en matière de dépôt de films constituant les rouleaux grâce à la production de bande magnétique pour cassettes vidéo qui utilise le même procédé.

La Chine s'est dotée d'une industrie et d'une recherche publique puissante. Le constructeur automobile et de batteries BYD a produit le premier véhicule commercial électrique équipé de batteries lithium ion, même si le nombre de vente depuis 2009 est dérisoire : 80 (IEA, 2009).

Confrontés la domination historique des firmes asiatiques dans la production de batteries pour l'électronique portable, les Etats Unis et l'Europe font preuve de volontarisme politique.

Les Etats-Unis avaient par le passé renoncé à investir dans la production de batteries, mais ils veulent désormais reconstituer leur potentiel industriel grâce notamment à 2,4 milliards de dollars du plan Obama. Les Etats-Unis disposent d'atouts : depuis 10 ans, quelques laboratoires américains comme l'Argonne Laboratory ou le CET Berkeley ont développé des compétences spécifiques en partenariat avec les industriels. De plus les gros producteurs de batteries américains se coordonnent pour répondre à des demandes de technologies batteries distinctes grâce à des alliances avec les constructeurs. Les trois plus gros producteurs de batteries américains se positionnent chacun sur une technologie différente : A123 Systems maîtrise la production de batteries LFP, JCS celle de la technologie NCA et Ener1 la technologie LMO/ LTO.

L'Europe avance en ordre dispersée et ne possède pas à elle seule de gros industriel pour batteries automobiles. En France, SAFT fut le premier à équiper un véhicule hybride avec une batterie lithium : la Mercedes classe E en 2003. Mais, trop petit, SAFT a depuis fusionné avec l'américain Johnson Control. La filière industrielle allemande est la plus ambitieuse.

L'examen des statistiques de brevets par pays montrent bien le leadership technologique asiatique (Figure A1 et A2).

Figure A1 : brevets batteries véhicules électrifiés par pays d'invention (source auteur)

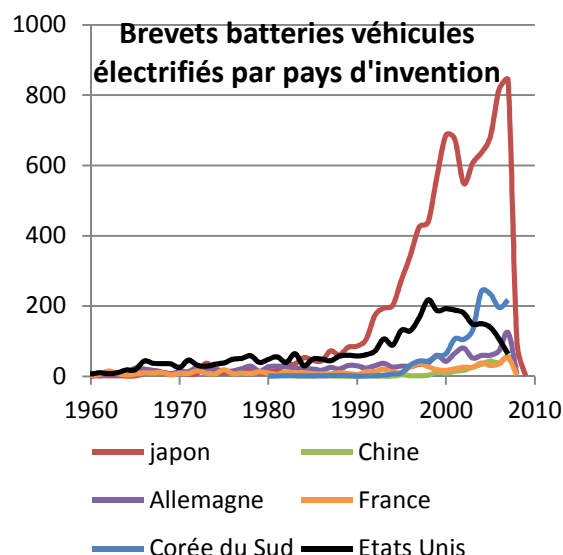
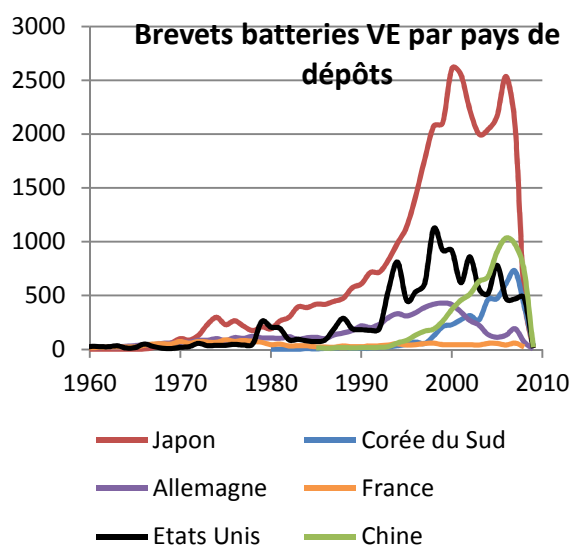


Figure A2 : brevets batteries Ve par pays de dépôt (source auteur)



Méthodologie : Seul le brevet déposé en premier est comptabilisé : on ne compte l'invention qu'une seule fois. Les brevets déposés dans un seul pays ne sont pas recensés (gage de mauvaise qualité du brevet). Les brevets déposés au Japon sont pondérés par un coefficient corrigeant la législation japonaise qui induit une multiplication des brevets pour une invention). Les données brevets sont issues de (Office européen des brevets).

On applique le coefficient multiplicateur au Japon, les brevets de mauvaise qualité de sont pas comptabilisé (Office européen des brevets).

Un secteur qui se construit autour d'alliance entre l'industrie de la batterie pour électronique et l'industrie automobile

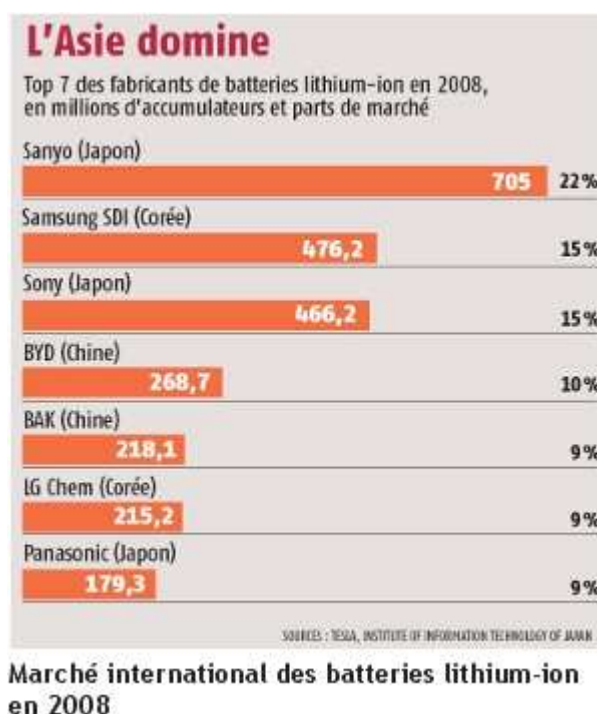
Les constructeurs de batteries identifiés comme les plus prometteurs (Deutsche Bank, 2008) sont parfois des filiales issues de grands groupes d'électronique (LG Chem et sa filiale, ou Sanyo racheté par Panasonic) mais le plus souvent ce sont des alliances entre des grandes multinationales dont l'une est un constructeur ou équipementier automobile et l'autre un producteur de batteries rechargeables lithium ion pour électronique portable (c'est le cas des alliances JCS, AESC, HVE, PEV, SB

Limotive). La Figure A3 recense les plus grands fabricants de batteries lithium ion pour l'électronique en 2008 : ils sont tous aujourd'hui impliqués dans la production de batteries automobiles (sauf peut-être BAK).

Les alliances présentent un double avantage : elles combinent la savoir-faire batterie avec les partenariats préexistants entre les équipementiers et les constructeurs automobiles. Remarquons que les firmes européennes ne sont engagées que dans des alliances avec des entreprises américaines ou asiatiques : Bosch avec Samsung, SAFT avec Johnson Controls, le constructeur automobile français SVE (Dassault) avec Dow Kokam (Corée)

Des entreprises plus petites et indépendantes émergent également tel Batscap, Bolloré, l'indien Electroveya, l'américain Valence Technologies... Mais ces constructeurs n'opèreront au départ que sur des marchés de niche.

Figure A3 : part de marché des fabricants de batteries lithium ion toutes applications, on retrouve les principaux fabricants de batteries automobiles.



Les différentes formes de partenariat

Les constructeurs automobiles passent souvent des contrats de long terme auprès des fabricants de batteries pour équiper spécifiquement leur modèle automobile. Le

Tableau détaille les contrats liants les plus grands industriels. Pour les constructeurs automobiles ce type de partenariat ne permet pas de contrôler ou d'acquérir le savoir faire en technologies batteries mais diminue les coûts d'investissements ou les coûts potentiels d'investissement dans une nouvelle technologie batterie.

La création de joint-ventures entre un fabricant de batteries et un constructeur automobile est également un mode classique de coopération. Les exemples abondent : Toyota a sécurisé ses approvisionnements en batterie en créant en 1996 « PEVE » une JV avec Panasonic (la JV fut initialement créée pour équiper la Toyota Prius en batteries NiMH). Nissan a fait de même en créant en 2007 la firme AESC, JV 51/49 entre Nissan et NEC. En pratique, AESC réalise les étapes 5 à 7 de la chaîne de production. Les étapes 4 et 3 qui concernent la production et le traitement de surface des électrodes sont réalisées chez NEC-Tokin qui a mis au point la technologie (le Blog énergie, 2009). Cette entreprise du groupe NEC est maintenant spécialisée dans la production d'électrodes et vient de revoir à la hausse ses objectifs (mise en place d'une capacité de production pour 100 000 batteries d'ici fin mars 2011). Le groupe Renault en signant un accord avec sa filiale indirecte AESC n'a pu obtenir le savoir faire que sur les étapes 5 à 7 : il va recevoir les rouleaux AESC dans son usine d'assemblage à Flins en France. Pour maîtriser la totalité du procédé en France il faudrait que NEC-Tokin installe un atelier de production en France. La tendance est donc à une maîtrise le plus en amont possible de la chaîne de production.

Par rapport au partenariat, l'intégration verticale est beaucoup plus rare. L'exemple emblématique est le fabricant chinois de batteries BYD qui s'est lancé en 2003 dans la production automobile (électrique et thermique¹⁸). Certains détracteurs accusent BYD de produire ses voitures par rétro-ingénierie et de violer la propriété intellectuelle¹⁹. Si BYD vise initialement le marché chinois il compte vendre à terme ses véhicules en Europe et aux Etats-Unis. En mars 2010 Daimler et BYD ont annoncé la création d'une JV 50/50 pour produire une nouvelle sous marque de voiture électrique destinée au marché chinois. Bien que les deux firmes produisent déjà toutes les deux leurs modèles électriques, cela permettra à Daimler de bénéficier du savoir faire en matière de traction électrique de BYD et à BYD de bénéficier du savoir faire de Daimler en production de véhicules de moyenne et haute gamme (secteur dont BYD n'est historiquement pas familier).

Un autre exemple d'intégration verticale est le groupe Bolloré (France) allié à Pininfarina (Italie) pour fabriquer sa Blue car. Il a sa propre filière batterie lithium polymère (Batscap dont l'usine de production est en France) et dispose de l'ensemble des brevets de cette filière technologique.

¹⁸ BYD est le 4^{ème} constructeur automobile chinois. En 2009, BYD a vendu 450 000 automobiles, voitures électriques y compris.

¹⁹ Une autre explication à ces faibles coûts et la main d'œuvre peu chère employée par BYD.

L'amont de la filière : comment sécuriser l'approvisionnement en matières premières

On observe également une volonté des constructeurs automobiles ou des fabricants de batteries d'intégrer encore plus en amont la filière à la fois pour augmenter leur marge et sécuriser leurs approvisionnements. Ainsi Bolloré et Eramet (groupe minier et métallurgique français) se sont alliés pour signer en février 2010 un contrat d'exploitation assorti d'une option d'achat de gisements de lithium avec la société argentine Minera Santa Rita. Cela permettra au groupe de lancer les études pour un projet d'unité de production de carbonate de lithium, matière première à partir de laquelle sont produits les sels de lithium et le lithium métal utilisés dans les batteries lithium polymères. Toyota Tsuho s'est lui associé à la compagnie minière australienne Orocobre. Toyota va cofinancer l'exploitation d'un gisement de lithium en Argentine à hauteur de 15 millions € mais Orocobre restera le propriétaire du gisement.

Tableau A2 : partenariats entre constructeurs automobiles et fabricants de batteries(IEA, 2009 et source auteur)

Constructeur automobile	Fabricant batteries	Type de partenariat	Source	Production ciblée (véhicules/an)
BYD Auto	BYD group	Intégration verticale		?
Fiat Chrysler	A123 Systems, Altairnano	Contrats	http://www.greencarcongress.com/2009/04/chrysler-llc-forms-strategic-alliance-with-a123systems-for-first-generation-of-envi-electric-vehicle.html	500 000 véhicules d'ici 2013(City of westminster, 2009)
	Magna international	?	(City of westminster, 2009)	
	Johnson Controls- Saft	Contrat	http://nuclear.energy-business-review.com/news/johnson_controls_saft_receives_contract_from_ford_to_supply_battery_system_090203/	5000 VEHR de 2012 à 2017
GEM ²⁰	Sanyo			
	Panasonic			
GM	LG Chem	Contrat ²¹	http://www.designnews.com/article/162063-GM_Selects_LG_Chem_to_Build_Volt_Batteries.php	
Hyundai	LG Chem	Joint venture : HL Green Power Co.	http://www.hyundai-blog.com/index.php/2010/02/10/hyundai-and-lg-chem-form-a-car-battery-joint-venture/ http://www.reuters.com/article/idUSTRE57U13720090831	200 000 pack batteries par an
	SK energy	contrat		?

²⁰ Global Electric Motocar, créée en 1998, est depuis 2000 une filiale de Chrysler spécialisée dans la production de véhicules électrifiés.

²¹ LG chem fournit les cellules et l'assemblage est fait dans une usine GM

	SB LIMotive	?		
Mercedes Benz	Johnson Control Saft	contrat	http://www.mlive.com/business/west-michigan/index.ssf/2010/05/johnson_controls_working_to_st.html	?
BMW	Johnson Control Saft	contrat	http://www.mlive.com/business/west-michigan/index.ssf/2010/05/johnson_controls_working_to_st.html	?
Mitsubishi	Lithium energy Japan (JV)	JV entre GS Yuasa & mitsubishi	(Deutsche Bank, 2008)	5000 en 2010 ; 15 000 en 2011(IEA, 2009)
Nissan	AESC	JV Nissan NEC		50 000 en 2010 au japon; 100 000 en 2012 aux US (IEA, 2009)
Renault	AESC	Filiale indirecte		200 000 VE/an 2015- 2016
Subaru	AESC	contrat	http://e2af.com/review/091026.shtml	?
Tata	Electrovaya	JV Tata Electrovaya & Miljøbil Grenland	http://www.electrovaya.com/pdf/PR/2009/PR20091029.pdf	?
	Energy innovation group	contrat	http://www.greencarcongress.com/2009/10/tata-motors-selects-eig-lithiumion-polymer-batteries-for-indica-vista-electric-vehicle-program.html	?
Think	EnerDel ²²	Ener1	http://earth2tech.com/2010/01/26/think-hands-enerdel-	?

²² Filiale de ener1

			actionnaire à hauteur de 31% de Think ²³	exclusive-u-s-battery-deal-heads-for-faster-charging/	
Toyota	Primearth Energy company	EV	PEV energy co=JV Toyota-Panasonic		1 million d'hybrides/an d'ici 2020
Volkswagen	Sanyo Co	electric	Contrat (batteries pour VEHR Audi)	http://www.ekopolitan.com/tech/batteries-and-electric-cars-joint-ventures-and-alliances	?
	Toshiba Co	battery	Contrat	http://www.ekopolitan.com/tech/batteries-and-electric-cars-joint-ventures-and-alliances	?
Tesla motors ²⁴	Tesla Group	Energy	filiale	http://www.ekopolitan.com/tech/batteries-and-electric-cars-joint-ventures-and-alliances	Production actuelle de 700 VE/an ²⁵

²³ <http://www.greencarcongress.com/2009/08/ener1-think-20090827.html>

²⁴ Tesla motors est une compagnie américaine qui développe et produit des véhicules électrifiés

²⁵ Wikipédia ; page tesla motors

Le rôle des subventions publiques

L'Europe, Les Etats-Unis et le Japon ont des politiques incitatives pour stimuler la production nationale de batteries. En Allemagne, un plan gouvernemental de 500 millions € adopté le 24 août 2009 alloue 170 millions € à la filière batteries et est complété du lithium ion Battery Research programme (60 millions€ (The European Topic Centre on Air and Climate Change, 2009) et un consortium d'industriels y participe à hauteur de 360 millions €. En France le gouvernement subventionne à hauteur de 125 millions € la construction de l'usine d'assemblage batteries Renault à Flins, 70 millions€ de prêts de l'Etat sont prévus pour développer la filière batterie (MEEDDM, 2010) et l'Etat soutient le développement d'un centre de recherche à Grenoble (7,5 millions € (CEA, 2010)) via le Fonds stratégique d'investissement.

Le Japon a fortement investi dans le soutien public à la R&D sur les batteries lithium ion pour véhicules. Dès les années 1970, le gouvernement japonais fit le choix du véhicule tout électrique (Ahman, 2004). Le MITI²⁶ identifia la batterie comme l'élément critique de succès de pénétration du VE et amorça le « lithium battery project » (LIBES) en 1992 qui permit par exemple le développement d'une batterie li-ion par Shin-Kobe équipant la Nissan Hypermini dès 2001. Même si les objectifs étaient initialement de favoriser le tout électrique, les aides gouvernementales ont permis d'acquérir une expérience et un savoir-faire dans la traction électrique qui explique en partie la percée des véhicules hybrides au Japon

Le gouvernement Obama a engagé 2 milliard\$ pour aider les constructeurs de batteries et subventionne la construction d'usines (usine JCS subventionnée à hauteur de 299 millions \$, Saft a reçu 99 millions \$ pour développer une usine en Floride, et A123 Systems est aidé pour construire son usine dans le Michigan) dans la région des grands lacs. Un autre programme de développement de la filière batterie de 2 milliards \$ a été voté par le congrès.

Le succès commercial de l'industrie des batteries automobiles n'est garanti que parce qu'il y a une demande en véhicule électrifié, elle-même stimulée par d'autres aides gouvernementales (déductions fiscales ou bonus). Ces dispositifs sont décrits dans la partie consacrée à la comparaison

5.3 En amont, la disponibilité des matières premières peut-elle entraver le développement de la filière ?

Aluminium, cuivre, cobalt, nickel, lithium autant de matériaux constituant les batteries lithium et dont le prix est volatile que ce soit pour des raisons de crise structurelle (décalage entre l'offre et la

²⁶ Ministry of international Trade and industry renommé METI en 2001 (ministry of economy trade and industry

demande), provoquée (interruption volontaire de l'offre) ou conjoncturelle (interruption accidentelle de l'offre). Les difficultés d'approvisionnement en matières premières peuvent-elles gêner l'émergence de la filière.

Compte tenu des réserves et des coûts de production prévisibles, le lithium ne constitue pas un facteur limitant pour le développement du véhicule électrique. Il ne représente que 3% du poids d'une batterie lithium ion de 20 kWh soit 3 kg (Torcheux, 2010) et contribue en moyenne à 7\$/kg de batterie ce qui ne représente que 3% du coût total de la batterie (Abell & Oppenheimer, 2008). Certes sa contribution atteint les 12kg pour la batterie lithium polymère car la cathode est en lithium métallique mais il est difficile d'envisager qu'il puisse influencer fortement le coût de la batterie.

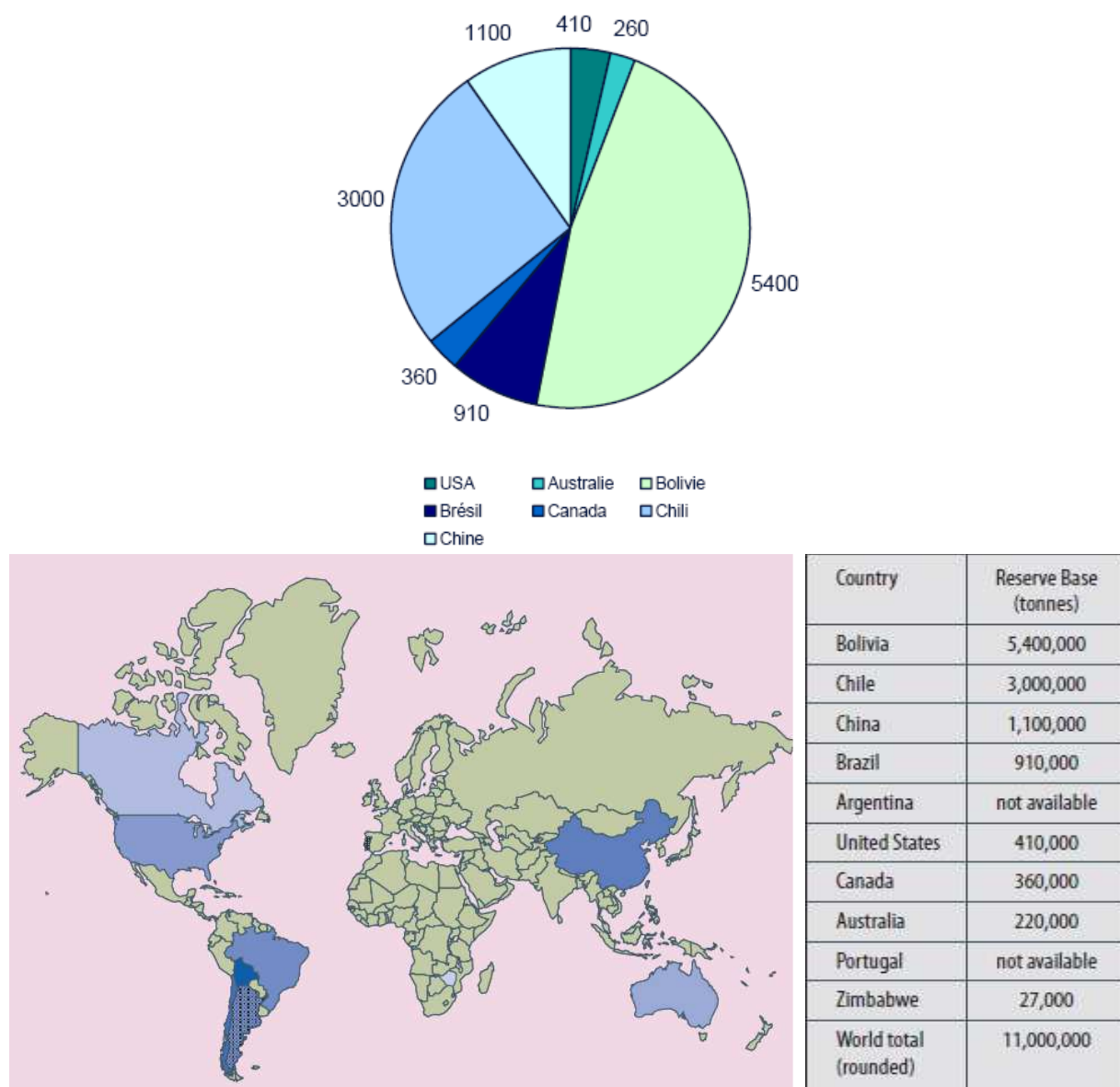
Alors pourquoi est-il l'objet de tant d'attention ? Il inquiète pour deux raisons. Premièrement extraire le lithium coûte cher que ce soit à partir des lacs salés ou de minerais appelés spodumène (la première méthode est moins coûteuse mais aboutit tout de même à un prix du lithium de 6\$/kg en 2007). Deuxièmement les ressources en lithium sont très inégalement réparties : la grande majorité du lithium est aujourd'hui extraite des lacs salés du Chili (55%), d'Argentine (16%) et du Nevada (12%). Le reste provient du spodumène chinois (17%) (Deutsche Bank, 2008).

Pourtant l'examen des chiffres sur les réserves de lithium rassurent. EDF et l'Argonne Laboratory²⁷ estime que les réserves bases²⁸ de lithium sont de 14 000 kT ce qui, avec une hypothèse de 3 à 12 kg de lithium par batteries, permettrait d'équiper 1 à 5 milliards de VE. Ces chiffres sont plutôt dans le bas des fourchettes des études effectués par d'autres experts (Evans estime les réserves base à 30000kT).

²⁷ L'Argonne laboratory est l'un des plus grands laboratoires de recherche du « United States department of energy » (DOE)

²⁸ Les réserves bases sont les ressources (le lithium existant dans la nature) de lithium qui sont récupérables dans les conditions technico-économique actuelle + les ressources de lithium ayant une haute probabilité d'être produites.

FigureA4 : réserves de base de lithium en kT (Torcheux, 2010) et (Argonne national laboratory, 2009)



La question n'est donc pas celle de la quantité de lithium disponible en elle-même mais celle de la mise en place anticipée des capacités industrielle d'extraction du lithium et de la gestion de conflits géopolitiques. En effet les producteurs de carbonate de lithium sont en situation quasi oligopolistique (ils sont 5 selon la Deutsche Bank) et deux d'entre eux SQM au Chili et FMC en Argentine ont extrait respectivement 34 % (en 2007) et 16% (en 2006) de la production mondiale. De plus, les ressources sont souvent détenues par les états (en Bolivie par exemple) qui peuvent pour des raisons politiques stopper les exportations. Le président bolivien a ainsi déclaré qu'il pourrait

devenir « un cauchemar permanent pour les Etats-Unis. Des conflits géopolitiques pourraient également émerger entre la Chine et les Etats Unis (Torcheux, 2010).

Même si l'accès aux ressources est garanti, il convient avant tout d'anticiper la demande pour éviter une hausse des prix du lithium par manque de capacité industrielle, comme cela fut le cas par exemple pour le prix du nickel dont la hausse fut provoquée par une forte demande non anticipée et liée aux constructions d'infrastructure pour les Jeux olympique en Chine.

La disponibilité des autres matériaux des batteries Li ion est plutôt bonne dans la forme actuelle de la technologie à condition de privilégier des technologies à faible teneur en cobalt, ce qui est maintenant bien pris en compte par les fabricants (Torcheux, 2010). En effet le cobalt est un matériau critique étant donné son coût élevé (110\$/kg en 2008 (Abell & Oppenheimer, 2008)).

5.4 Conclusion

L'industrie de la batterie lithium ion pour les véhicules n'est qu'émergente aujourd'hui car le marché du véhicule électrifié est un marché de niche, exception faite de celui des véhicules hybrides au Japon et aux EU dans les années 2000 et la technologie des batteries pour automobiles diffère largement de celle largement commercialisée des batteries à usages électroportatifs (téléphone portables, ordinateurs portables...). Elle nécessite en effet un circuit de surveillance et de contrôle bien plus élaboré (le battery management system).

Mais les acteurs anticipent bien sûr la croissance à venir et les leaders de demain commencent à être identifiables. Notre analyse reste cependant essentiellement prospective. Elle montre que :

- La batterie est un enjeu économique essentiel puisqu'elle peut représenter plus de la moitié du prix d'un véhicule électrique. Les coûts les plus importantes et les plus fortes marges sont générés au cours des étapes amont du processus de fabrication de la batterie (fabrication des cellules).
- Presque tous les grands producteurs de batteries lithium ion traditionnelles pour l'électronique portable souhaitent devenir des acteurs majeurs de la filière automobile.
- Le leadership est asiatique avec des entreprises comme AESC, NEC, PANASONIC, Toshiba, Sanyo au Japon et LG Chem en Corée. Aux Etats Unis, Johnson Control peut également devenir un acteur majeur. L'Europe est quelque peu à la traîne.
- Le mode d'organisation aujourd'hui privilégié par les acteurs de la filière repose sur des coopérations verticales entre des acteurs historiques de la batterie lithium ion d'une part et des équipementiers ou constructeurs automobiles d'autre part. Cela prend le plus souvent la forme de contrats de collaboration de long terme, plus rarement la création de joint-

ventures communes. Seule l'entreprise chinoise BYD, initialement présente dans le secteur des batteries, et Toyota ont choisi de s'intégrer verticalement en produisant en interne batteries et véhicules électriques.