



**Ambassade de France à Washington
Mission pour la Science et la Technologie**

4101 Reservoir Road, NW - Washington, DC 20007

Tél. : +1 202 944 6249

Fax : +1 202 944 6219

Mail : publications.mst@ambafrance-us.org

URL : <http://www.ambafrance-us.org>

Domaine	Ecosystème californien
Document	Rapport d'Ambassade / Consulat Général de France à San Francisco, Californie
Titre	Batteries du futur pour véhicules électriques
Auteur(s)	Tom BOEKEN, Thomas DESCHAMPS
Date	Octobre 2010
Contact SST	science@consulfrance-sanfrancisco.org
Numéro	

<p>Mots-clefs</p> <p>Résumé</p>	<p>énergie, stockage énergétique, voiture électrique, nanotechnologie, entrepreneuriat, lithium-ion, recherche, anode, cathode, électrolyte, californie, startup, financement, innovation.</p> <p>L'objet de ce rapport est l'étude de la batterie Lithium-Ion qui équipera bientôt un grand nombre de véhicule. Cette appellation recouvre un grand nombre de technologies que l'on étudiera en rappelant d'abord les principes généraux d'une batterie. On s'attachera ensuite à recenser les différentes pistes technologiques poursuivies par les laboratoires de recherche et les entreprises du secteur qui se trouvent en Californie. Dans l'examen de l'optimisation de chacun des composants de la batterie - que ce soit l'anode, la cathode ou bien l'électrolyte - nous avons pu rencontrer un grand nombre de chercheurs et de startups et nous sommes livrés à une analyse des différentes approches. Enfin nous avons étudié le financement de ces startups, pour comprendre où commence et s'arrête l'interventionnisme de l'administration en poste dans ce domaine. Cela nous amène sur des considérations finales quant à l'origine de l'électricité utilisée pour charger ces batteries et des composants pour les fabriquer. L'ensemble constitue un panorama de l'industrie naissante que représentent les batteries pour véhicules électriques dans un endroit où ces véhicules seront rapidement déployés: la Californie.</p>
---	--

NB : Retrouvez toutes nos publications sur bulletins-electroniques.com

L'accès est libre et gratuit : <http://www.bulletins-electroniques.com>

Batteries du futur pour véhicules électriques

Écosystème californien en 2010

Tom Boeken, Thomas Deschamps



MISSION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE

CONSULAT DE FRANCE DE SAN FRANCISCO

540 BUSH STREET, SAN FRANCISCO CA 94108

Table of Contents

INTRODUCTION	5
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE BATTERIE	6
PRINCIPE DE BASE, HISTORIQUE	6
MESURES ET EVALUATION	7
GRANDES FAMILLES DE PILES ELECTRIQUES RECHARGEABLES	8
BATTERIES UTILISEES ACTUELLEMENT DANS LES VEHICULES	9
RECHERCHES ACTUELLES	10
BATTERIES LITHIUM-ION : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	10
RECHERCHES ACADEMIQUES: LE PROGRAMME BATT	12
L'ANODE	13
LA CATHODE	13
L'ELECTROLYTE	14
LA MODELISATION	14
L'ANALYSE DES CELLULES	14
LE DIAGNOSTIC	14
LE DR. SRINIVASAN: UN POINT DE VUE	15
LES STARTUPS	17
SEEO	18
NANOEXA	19
LEYDEN ENERGY	20
POLYPLUS	21
SION POWER	23
ACTACELL	23
ALTAIRNANO	23
LES FINANCEMENTS DE LA R&D	25
DOE ADVANCED TECHNOLOGY VEHICLES MANUFACTURING PROGRAM	25
DOE ELECTRIC DRIVE VEHICLE BATTERY AND COMPONENT MANUFACTURING INITIATIVE	25
DOE LOAN GUARANTEE PROGRAM	26
ARPA-E FUNDING	26
L'INVESTISSEMENT DE TYPE CAPITAL RISQUE	27
LA BATTERIE ELECTRIQUE: INTERET ET DURABILITE	28
LA PROVENANCE DE L'ELECTRICITE EN QUESTION	28
LA PROVENANCE DU LITHIUM EN QUESTION	29
LA PUISSANCE DISPONIBLE EN QUESTION	29

Introduction

Les mois qui viennent vont voir le déploiement en Californie de flottes de voitures électriques de Nissan et Chevrolet, qui vont venir grossir les rangs des roadsters de Tesla. Le point commun entre ces voitures est de partager la même technologie de batteries, basée sur le fameux lithium-ion.

La Californie est donc un laboratoire à grande échelle de ce que sera le monde du véhicule électrique de demain, avec ses stations et autres infrastructures de recharge, et son réseau électrique pour supporter ce déploiement. Et c'est notamment dans des laboratoires de cette région que des chercheurs travaillent à créer des nouvelles batteries dont la densité énergétique, la sûreté, la puissance et le coût permettront à terme au moteur électrique de supplanter le moteur thermique dans nos voitures. Émergeant de ces laboratoires, un certain nombre de startups tentent de transformer des avancées technologiques en produits qui changent la donne sur un marché contrôlé par de grands groupes asiatiques. Elles bénéficient du soutien du département de l'énergie américain qui, à grand renfort de prêts et de dons, fabrique les champions des batteries pour les véhicules électriques de demain. L'objectif de l'administration Obama sur ce sujet est clair : fabriquer à terme 40% des batteries pour ces véhicules d'ici 5 ans.

Principe de fonctionnement d'une batterie

Principe de base, historique

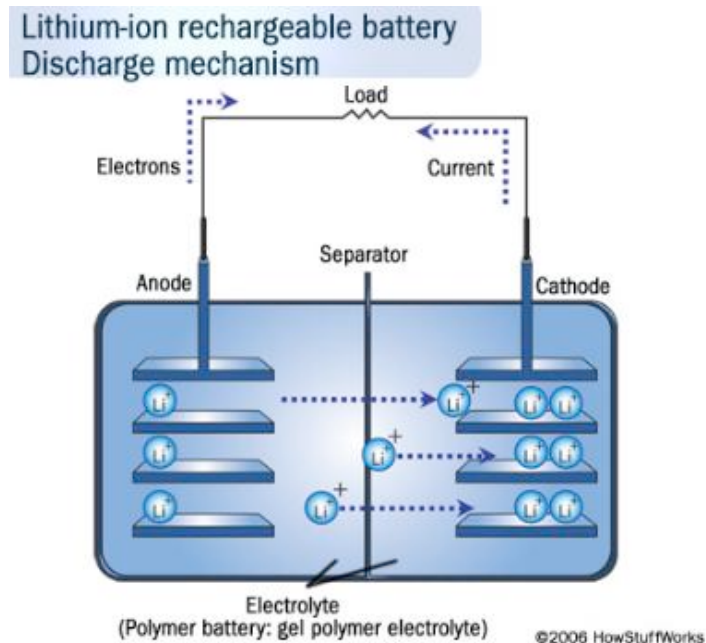
Avant de présenter tous ces aspects brièvement sur le principe de fonctionnement d'une batterie.

La première pile électrique remonte à la pile d'Alessandro Volta, en 1800, et son fonctionnement est le même quelle que soit la batterie étudiée.

Une pile électrique utilise l'énergie d'une réaction chimique pour créer un déplacement d'électrons, et donc un courant électrique. Elle peut théoriquement être utilisée dans deux sens, de la charge et de la décharge, selon qu'elle alimente un circuit électrique ou lui impose une tension à ses bornes.

On peut distinguer trois parties de la pile électrique possédant deux électrodes:

- Une anode, où s'effectue la réaction chimique d'oxydation. Celle-ci libère des électrons. Lors de la décharge, l'anode est la borne - de la pile.
- Une cathode, où s'effectue la réaction chimique de réduction. Celle-ci capte des électrons. Lors de la décharge, la cathode est la borne + de la pile.
- L'électrolyte, une substance conductrice, qui contient des ions et qui relie les deux électrodes.



Le bilan global d'une pile électrique est donc une réaction d'oxydoréduction, avec à chaque borne un couple oxydant/réducteur.

Ainsi, ses paramètres dépendent entièrement des couples mis en jeu, de l'efficacité des différentes réactions, de la rapidité des déplacements des différents acteurs (diffusion d'ions, électrons), du contrôle de la stabilité des éléments, et du contrôle des réactions parallèles.

Une batterie est constituée d'un assemblage de cellules (*cells*), chaque cellule étant une paire d'électrodes. Il existe principalement deux types de cellules, les cellules sèches (*dry cells*) et les cellules aqueuses (*wet cells*).

Les cellules aqueuses sont caractérisées par un électrolyte liquide. Elles sont encore utilisées dans les batteries Pb-acide et Ni-Cd (cf. plus loin).

Les cellules sèches sont plus récentes et permettent une utilisation plus flexible (et dans toute direction) de la batterie. L'électrolyte est assimilable à une pâte conductrice, et est donc sans liquide. Il existe plusieurs formes de pâtes : des polymères, des gels, ou sous forme de verre.

Mesures et évaluation

Dans l'optique de trouver la meilleure batterie possible, il s'agit en un premier temps de comprendre les objectifs à atteindre. Plusieurs mesures permettent l'évaluation d'une batterie. Toutes les données de ce rapport sont massiques (par kilogramme).

Les principales mesures (massiques) à optimiser, sont :

- La tension nominale, en Volts (V).
- La densité énergétique (*gravimetric energy density*) est mesurée en Watt-heure (Wh/kg). Elle correspond à la quantité d'énergie stockable dans la pile, par unité de masse. On parle parfois de spécificité énergétique (*energy specificity*), lorsque la mesure est volumique. On a $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Joules}$.
- La résistance interne, en Homs (mW).
- La capacité (*battery capacity*) est souvent utilisée comme mesure, en Ampère-heure (Ah/kg). Elle correspond à la charge de la batterie, et donc aussi à l'énergie stockée la multiplie par la tension nominale ($\text{Ah} \times \text{V} = \text{Wh}$). On a $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ Coulombs}$. La tension nominale varie peu sur les batteries étudiées (et est toujours de l'ordre du Volt), ce qui permet de parler sans distinction de la capacité ou de la densité énergétique des batteries.
- L'autodécharge (*self discharge*) est la charge perdue, liée à la durée de vie de la batterie. On la mesure généralement en pourcentage de la charge initiale, perdue par mois.

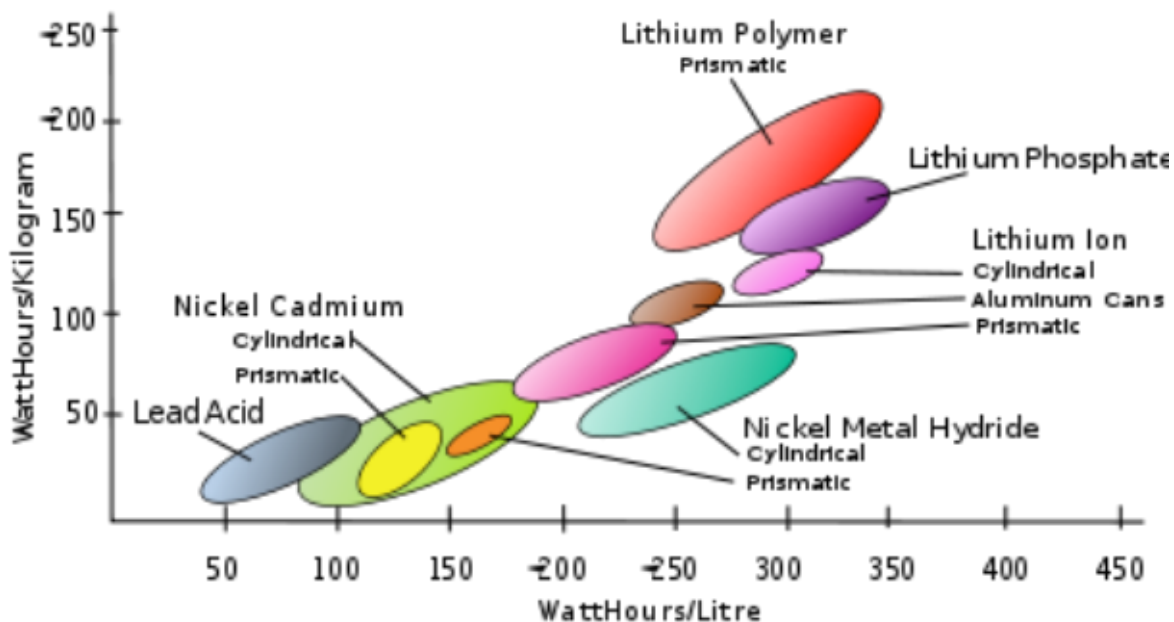
- La température d'utilisation, intervalle en dehors duquel la batterie perd ses caractéristiques nominales.
- La tolérance à la surcharge mesure les dégâts causés en cas de surcharge.
- La densité de puissance (*power density*).
- Le temps de charge.
- La durée de vie, en nombre de cycles charge/décharge.
- Le coût, la toxicité, et les différentes mesures de sécurité.

Grandes familles de piles électriques rechargeables

Construire une pile électrique consiste donc à choisir un couple redox pour l'anode, un couple redox pour la cathode et un électrolyte reliant les deux. Trois familles coexistent :

1. Les piles de type plomb - acide (*lead - acid*)
2. Les piles à base de nickel
3. Les piles à base de lithium

Il existe d'autres piles, à l'état de recherche, que l'on étudiera plus loin. De plus, une alternative – pas encore mise en place – consisterait à utiliser de puissants accumulateurs (*ultracapacitors*).



Batteries utilisées actuellement dans les véhicules

Véhicule	Capacité/temps de charge	Distance en ville	Batterie	Fast Charge	Prix K\$ (*)
BMW Mini E	35 kWh/ 24h(110V,12A)	100-110 miles	5000 cells (AC Propulsion)	4.5h	50
Chevrolet Volt (hybride)	16 kWh/ 10h (120V) + moteur 1.4L	40 miles (**)	Mn spinel 220 cells (LG chem)	4h	40
Coda Sedan ⁱ	34 kWh/ 6h (220V)	90-120	Li-Fe-P 730 cells (Lischen)	2h (40 miles)	40
Fisker Karma	22.6 kWh + moteur 2.0L	50 miles (**)	Nanophosphate (A123)	N/A	88
Ford Focus EV	23 kWh/ 6-8h (230V)	75 miles	(Compact Power Inc., LG chem)	N/A	30
Mitsubishi iMiEV	16 kWh/ 12-13h(110V)	80 miles	N/A	N/A	50
Nissan Leaf	24 kWh/ 8h (220V)	100 miles	Mn-C (propre usine)	N/A	33
Smart Fortwo ED	16.5 kWh/ 8h (110V)	85 miles	Na-Ni-Cl, zebra	N/A	44
Tesla Model S	42 kWh/ 5h (220V, 70A)	160 miles	5000 cells (Panasonic)	45 min	57
Tesla Roadster	56 kWh/ 5h (High power)	220 miles	6000 cells (Panasonic)	N/A	110
Think City	24.5 kWh 8h (110V)	100 miles	(Ener1, Enerdel)	N/A	20
Toyota Plug-in Prius ⁱⁱ	3h (110V)	13 miles (**)	(Panasonic)	100 min	<35
Volvo Electric C30	24 kWh/ 8h (230V, 16A)	90 miles	(Ener1, Enerdel)	N/A	25
Aptera 2e	20 kWh/ 11h	100 miles	Nanophosphate (A123)	6h	25

(*) Prix brut indiqué, ne comptabilisant pas les remises de \$7500 du gouvernement fédéral pour les véhicules propres, et de \$5000 de l'état de Californie pour les véhicules électriques.

(**) Indiqué pour le moteur électrique

Recherches actuelles

L'essentiel des entreprises se concentre sur la technologie lithium-ion, et tente d'optimiser son efficacité et coût de production. La batterie NiMH ne présente pas de résultats aussi favorables, et n'alimente plus que la Toyota Prius sur le marché des véhicules électriques.

Cependant, certains groupes de recherche envisagent des technologies alternatives pour alimenter les voitures électriques, telles que les batteries métal-air.

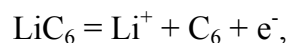
Batteries lithium-ion : principes de fonctionnement

Cette technologie a fait son apparition dans les années 70, lors de sa mise au point par M.S. Whittinghal de la Binghamton University, Exxon.

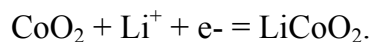
Les batteries au lithium-ion utilisent le déplacement de l'ion Li^+ d'une électrode vers l'autre, à travers l'électrolyte. A chaque électrode se produit une réaction, caractérisée par une demi-équation de bilan.

Les batteries classiques ont une anode à base de Carbone, LiC_6 souvent sous forme de graphite. La cathode est par exemple LiCoO_2 .

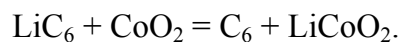
Lors de la décharge, l'oxydation se produit à la borne +,

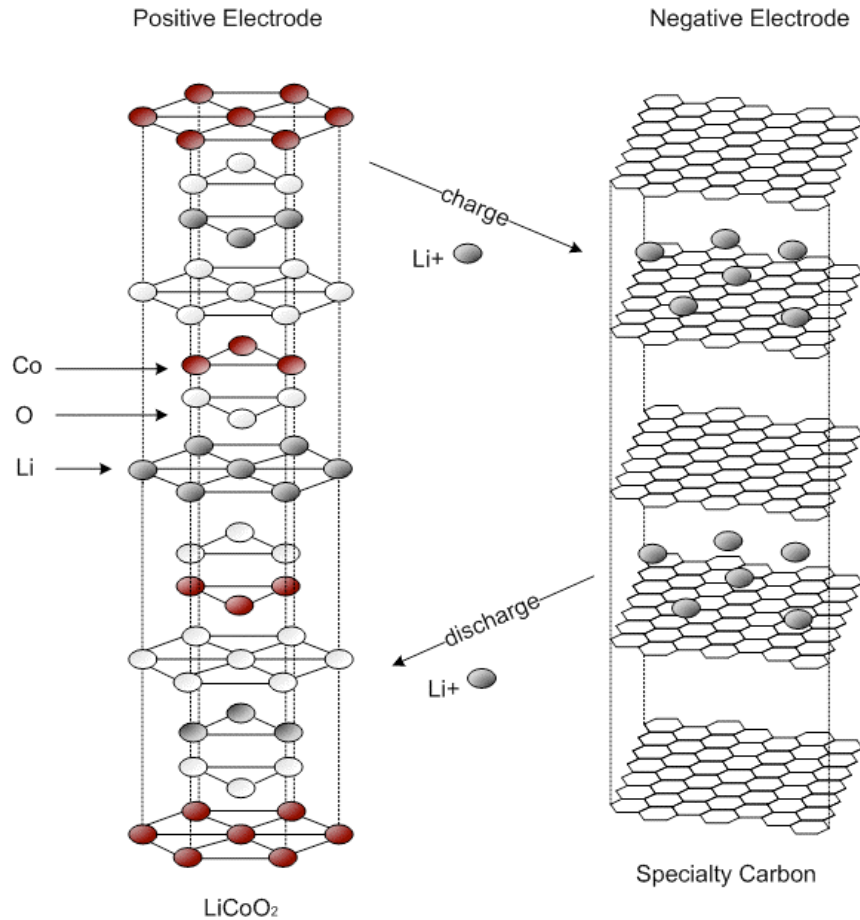


qui libère donc un électron et un ion Li^+ . L'électron entre dans le circuit extérieur et son déplacement crée le courant nécessaire au fonctionnement du moteur, tandis que l'ion Li^+ traverse l'électrolyte, classiquement du sel de lithium dissous dans un solvant. L'ion Li^+ et l'électron sont alors captés par l'électrode négative à travers la demi-réaction de réduction



La réaction totale est donc





Les lois de Faraday (ou équations de Nernst) permettent de calculer la tension aux bornes de la batterie (4V ici) en fonction des différents éléments. Cette réaction est spontanée (elle a une enthalpie libre standard négative): il faut donc fournir de l'énergie à la batterie pour l'inverser, et c'est le principe de la recharge.

Chaque cycle déforme les électrodes à travers ces différentes réactions. La réversibilité de la réaction doit aussi prendre en compte ces changements de configuration, et en particulier la formation de complexes stables. Ainsi, l'ion Li⁺ doit pouvoir s'insérer et se libérer des deux structures sans en changer les propriétés à long terme.

Le travail des chercheurs et des entreprises spécialisées se concentre sur l'optimisation de ces déplacements, et sur la stabilité des différents constituants. En particulier, de nombreux groupes de recherche s'intéressent aux réactions secondaires qui se produisent.

Les choix pour ces trois composants sont nombreux, et permettent une diversification des solutions apportées aujourd'hui. On peut regrouper par familles:

Anode	Electrolyte	Cathode
Graphite: LiC_6	Sels de Lithium : LiPF_6 , LiBF_4 , LiClO_4 + solvant: éthylène carbonate $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$	Layer-to-Layer/ oxide/NMC: $\text{Li-Ni,Mn,Co-O}_{2/4}$
Sillicon/Aluminum alloy: Li-Si, Li-Al	Liquide ionique	Olivines: LiFePO_2 , LiFePO_4 LiMnPO_4 (+ fluorine)
LT (titanate): $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	Gel	Spinel Mn
Li Metal	Polymères	
Ceramique/Metal (cermet): LiMg	Céramiques	

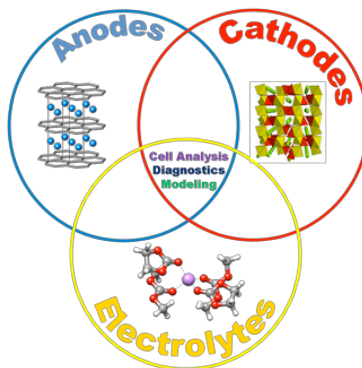
Les recherches se concentrent généralement sur un point particulier de la batterie:

- Sur l'anode: doit résister à de forts taux d'oxydation/réduction pour la charge et décharge; doit avoir un potentiel électrochimique faible pour résister aux fortes tensions; doit avoir une efficacité coulombienne lente (pour éviter les réactions annexes); doit avoir une grande surface apparente pour accélérer les réactions; doit être efficacement en contact avec l'électrolyte pour y échanger des ions, à travers un 'current collector' (*copper sheet*). Afin d'augmenter la conduction électronique, on y ajoute souvent une couche de carbone.
- Sur la cathode: à la différence de l'anode, la cathode doit avoir un potentiel électrochimique élevé. Les céramiques utilisés, oxydes de métaux, sont sujets à des déformations lors de l'insertion/ extraction d'ions Li^+ . Ces déformations peuvent casser l'électrode.
- Sur l'électrolyte: elle doit avoir une très grande conductivité ionique, et doit être stable au contact de forts potentiels et de faibles potentiels. De plus, elle est pourvue d'un séparateur poreux (un polymère) qui empêche le contact entre l'anode et la cathode. Cependant, il faut que l'électrolyte submerge l'ensemble.

Recherches académiques: le programme BATTⁱⁱⁱ

Le groupe de recherche BATT (*Batteries for Advanced Transportation Technologies*) est implanté dans le *Lawrence Berkeley National Lab^{iv}* (LBNL) et est financé par le *U.S. Department of Energy* (DoE). Il compte 30 chercheurs. Le groupe se focalise sur les

batteries, et en particulier sur six domaines : l'anode, la cathode, l'électrolyte, la modélisation, l'analyse des cellules et les diagnostics.



L'anode

Le carbone utilisé communément dans les batteries Li-ion pose des problèmes de sécurité et de durabilité. C'est pourquoi le Kumta Lab^v travaille sur un processus de production à bas coûts d'anodes. Celles-ci sont à base de composites silicone/ carbone nano technologiques. Le silicone nanocristallin amorphe permet d'atteindre de fortes capacités tandis que le carbone fournit une structure mécaniquement efficace de conduction. Ils ont par ailleurs développé deux techniques de production du matériau, le « *chemical vapor déposition* » (CVD) et le « *high-energy mechanical milling (HEMM)* ».

Le Goodenough Lab^{vi} a développé une anode en spinel lithium titanate $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, dopée au TiNb_2O_7 (TNO), et qui empêche la formation d'une interface solide avec l'électrolyte (visible sur des anodes conventionnelles et affectant leur stabilité, *solid electrolyte interphase* SEI). La capacité observée est spectaculaire, de plus de 280 mAh/g ; de plus, cette technologie permet des cycles rapides de charge/ décharge, grâce à la stabilité haute tension de l'interface anode/ électrolyte.

La cathode

Le groupe associé se focalise sur les cathodes à base de manganèse (*spinel*). Cet élément, bon marché, a tendance à perdre en capacité et efficacité dans les batteries qui l'utilisent, et c'est pourquoi cette section de BATT étudie des méthodes pour le stabiliser ou l'améliorer.

Le Manthiram Lab^{vii} a notamment travaillé sur des cathodes enrichies en fer, avec des performances améliorées (en particulier en facilitant la diffusion 3D des ions Li^+). Le fer permet de stabiliser le contact cathode/ électrolyte de la batterie à haute tension.

La cathode produite, une $\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.42}\text{Fe}_{0.08}\text{O}_4$, permet de conserver toute sa capacité (136 mAh/g) après 100 cycles, contrairement à la même cathode non enrichie (en Fe) qui perd plus de 10% de sa capacité en 50 cycles.

Le dopage en fer met en évidence une forte présence de celui-ci à la surface de la cathode, et empêche ainsi la formation d'une interface solide entre électrolyte et cathode. Le groupe de recherche s'intéresse à la migration naturelle du fer dans ce procédé, et à ses applications possibles.

L'électrolyte

L'électrolyte pose des problèmes de stabilité aux interfaces avec les électrodes. Le Smith Group effectue des simulations de la formation de la couche solide à l'interface, en particulier en présence d'un électrolyte polymère. Ces simulations permettent d'optimiser l'interface, et de modéliser a priori les comportements des différents éléments du matériau.

La modélisation

La modélisation se retrouve dans chacun des domaines de recherche cités plus haut. Les cycles de vie, la formation de la couche solide à l'interface, la diffusion des ions Li^+ sont des propriétés importantes des batteries faisant appel à cette mathématique. Venkat Srinivasan, qui dirige le programme BATT, est aussi responsable de cette section.

L'analyse des cellules

Le Richardson Lab étudie les problèmes de la charge initiale des batteries lithium ion. En effet, la première réaction lors de la charge crée une perte significative de capacité. Afin de compenser ces pertes, l'équipe a mis au point une technique de pré-lithiumisation de l'anode. Ce lithium est ensuite consommé pour former la couche solide SEI, lithium qui est fourni par la cathode dans les batteries conventionnelles. La cathode ne perd donc plus sa capacité au cours de la première charge. Pour cela, le Richardson Lab utilise des nitrures, tels le Mg_3N_2 , l' AlN ou juste du N_2 gazeux pour le Si ou Sn. Ce procédé peut augmenter de près de 10% la capacité des anodes, sans en changer la composition ou les processus de fabrication.

Le diagnostic

Le Ceder group^{viii} utilise des méthodes analytiques pour étudier la dégradation des électrodes et leur durée de vie. La sécurité est un enjeu pour ces composants à haute densité énergétique, et est très souvent liée à la vitesse de dégradations des différents constituants. En particulier, cette équipe a montré, en accord avec les expériences des autres groupes de recherche de BATT, que le LiMnPO_4 se décomposait à plus basse température que le LiFePO_4 . Pour cela, ils ont étudié les configurations géométriques des

deux types de cathode, en électrolyte ou au contact de l'air. Ils ont mis en évidence l'importance des ligands dans ces configurations. Ils en ont ensuite déduit que la cathode en LiMnPO_4 , qui présentait de meilleurs résultats en densité énergétique, était moins sûre que la cathode en LiFePO_4 .

Le Dr. Srinivasan: un point de vue

Le Dr. Venkat Srinivasan dirige le projet BATT, qui selon lui regroupe les meilleurs chercheurs des Etats-Unis sur le sujet ("*a great team of people that can change the world*"). Il étudie en particulier la modélisation des différentes configurations des batteries. Il compare régulièrement les résultats annoncés par les groupes de recherche et compagnies à ses calculs et expériences. Il tient par ailleurs un blog^{ix}, et se tient informé de toute actualité sur le sujet. Lors de notre entretien au LBNL, il nous a donné sa vision des recherches actuelles et de l'avenir plus ou moins proche de la batterie électrique.



- Sur les financements. Toutes les startups rencontrées ici se financent grâce aux aides gouvernementales et aux Venture Capitalists (*VC's*) locaux. Ce système est relativement fermé: les *VC's* observent de près les décisions fédérales, et ont tendance à les suivre. Ceci semblerait avoir un double impact; d'une part les entreprises qui ne sont pas sélectionnées par l'Etat pour construire la batterie de demain ne parviennent pas à se financer auprès des investisseurs privés, et courent à leur perte. Un exemple connu ici est celui d'Imara qui a fermé ses portes dès l'annonce de l'arrêt des financements gouvernementaux. D'autre part, les sommes sont tellement grandes qu'il est pratiquement impossible aujourd'hui de concurrencer les entreprises favorites telles A123^x, ou LG chem. De plus, cet argent doit nécessairement être dépensé dans de très courts délais (afin d'avoir un maximum de résultats sur l'économie), poussant les compagnies bénéficiaires à de gros investissements.

ARPA-E, l'agence gouvernementale pour la recherche avancée, finance les laboratoires nationaux, dans l'optique d'avoir des résultats concrets en très peu de temps. Ainsi un certain nombre de projets ont été sélectionnés avec des ambitions très précises d'application industrielle dans les deux ans à venir. Les différents laboratoires doivent souvent établir des partenariats industriels afin d'obtenir ces bourses, ce qui montre une fois de plus les délais attendus par l'Etat pour le retour sur investissement dans le domaine de la recherche.

- Sur les spin-offs. Une spin-off d'un laboratoire est une startup créée à partir d'une équipe de recherche (publique). Plusieurs modèles sont possibles: les licences de propriété intellectuelle (IP) peuvent être rachetées; il peut éventuellement y avoir une clause d'exclusivité; le laboratoire peut financer le début de la startup et y prendre part; etc.
Typiquement un certain nombre de chercheurs du projet BATT a décidé de monter (ou de s'affilier avec) des startups telles Polyplus, Seeo, Sion Power, Leyden et Applied Materials. Les liens exacts entre le LBNL et ces compagnies sont très souvent confidentiels, et les contrats portent pour la plupart sur une vente de licence d'IP, directe, avec plus ou moins d'exclusivité selon les cas. (Seeo a pour sa part acheté officiellement les brevets avec une exclusivité absolue d'utilisation)
- Sur l'avenir à court terme. La batterie lithium metal (cf. Seeo, Polyplus) est très prometteuse, et les premiers prototypes (uniquement fabriqués par Seeo pour les dernières générations) de cette batterie très dense énergétiquement viennent de faire leur apparition. Les résultats sont très bons, et la technologie est récente: jusqu'à présent les anodes en 'pur lithium', très denses, étaient incompatibles avec les électrolytes liquides/ gels utilisés. Depuis l'équipe de Seeo, et les recherches de BATT, un polymère (solide) permet d'utiliser ces anodes, et de résoudre les problèmes typiques associés (i.e. la formation de dendrites, cf. Seeo).
- Sur l'avenir à long terme. La question du lithium air est très à la mode, car les densités énergétiques théoriques sont impressionnantes. Cette technologie n'est pas du tout maîtrisée, et date (plus de vingt ans pour certains groupes de recherche). En remplaçant les électrodes par un système ouvert, l'air environnant jouerait un rôle clé pour cette batterie qui repose sur les fortes énergies présentes dans les atomes du dioxygène. Et à long terme, il est très difficile de répondre aux interrogations sur les autres acteurs clés de l'industrie, tels les constructeurs de voitures électriques, les producteurs (et leurs moyens de production) de lithium, les pays détenteurs de mines, les producteurs d'électricité (et le prix de l'électricité), etc.

Les Startups

Compagnie	Technologie	Propriétés	Gov't M\$	Partenariats universitaires
Envia (2007) Newark, CA	(-) Si-C (+) Mn	Batterie: 400 Wh/kg	4 (A/e) + 1 (Californie)	Argonne
Leyden (2007) Fremont, CA	(0) imide salt (acid free) (-) graphite	>300° >1000 cycles 225 Wh/kg	Confidentiel	N/A
Seeo (2007) Berkeley, CA	(0) solid polymer (+) Li-phosphate	250 Wh/kg	N/A	LBNL
Nanoexa () Mountain View, CA	(+) NMC 121	250 mAh/g	N/A	N/A
A123 (2001) Watertown, MA	(+) nanoP LiFePO4	High charge/discharge power, fast charge, 125Wh/kg?	400 grant (DOE)	MIT
Ampricus ^{xi} (2008) Menlo Park, CA	(-) Si nanowires	En recherche	N/A	Stanford, Caltech, Berkeley, MIT
Valence ^{xii} (1989) Austin, TX	(+) LiFeMgPO4 (nanoP)	170 mAh/g	N/A	N/A
Altair Nano Reno, NV	(-) LiTiO		N/A	N/A
Actacell (2007) Austin, TX	(+)Mn	durabilité	N/A	University of Texas Austin, LBNL
Polyplus (1990) Berkeley, CA	Li-air, eau, sulfur (0) solid electrolyte, membranes	1300 Wh/kg, non rechargeable	5 (A/e)	LBNL
Sion Power (2002) Tucson, AZ	(-) Li-S	500 Wh/kg	5 (A/e)	LBNL, Brookhaven national lab
Revolt (2004) Portland, OR	Zn- Air	400 Wh/kg	5 (A/e)	SINTEF, Norvège

Au vu du grand nombre de startups qui ont été créées, dont une partie en provenance du programme BATT, il nous a semblé judicieux d'aller à leur rencontre pour comprendre plus en détail leurs technologies et motivations.

Seeo^{xiii}



Seeo a été fondée en 2007 et a acheté l'IP du LBNL, en particulier concernant l'électrolyte. Ils ont signé un contrat d'exclusivité sur la technologie, et de nombreux fondateurs proviennent du programme BATT. Nous avons pu rencontrer Ilan Gur, Mohit Singh et Neilesh Mutyala qui siègent au bureau exécutif de la société (Berkeley, Californie). Elle compte une vingtaine de salariés, dont plus de 90% travaillent sur la R&D.

Seeo a reçu des fonds de l'état, par le DoE, et a fait plusieurs levées de fonds privés, en particulier avec Khosla Ventures.

L'idée de base était de trouver un système viable pour utiliser une anode lithium-métal. Ceci consiste à avoir une électrode uniquement composée de lithium (lithium foil), et qui réagit directement avec l'électrolyte/ cathode (sans séparateurs par exemple).

La difficulté avec cette anode est au niveau du contact avec l'électrolyte. Contrairement au graphite, les ions Li^+ ne s'insèrent pas dans l'anode mais s'accumulent en surface (déposition) et se dissolvent selon la charge et la décharge. Pour des raisons électrochimiques, cette accumulation ne peut pas être uniforme, et fait alors apparaître des dendrites (à partir de 'pics' d'ions Li^+), ou fissures dans l'anode.

La solution apportée par Seeo réside dans l'électrolyte/ cathode. Ils ont réussi à remplacer le liquide de l'électrolyte par un polymère solide, appelé block co-polymer (développé par l'équipe du Pr. Balsara à l'université de Berkeley), qui est mélangé à la cathode, réduisant considérablement la quantité de matériau nécessaire à la batterie. Ce polymère est conçu pour découpler les propriétés mécaniques et électrochimiques. Mécaniquement, la partie 'block', très solide, bloque la formation de dendrites au niveau de l'anode. Chimiquement, le polymère présente les bonnes propriétés de conductivité: les ions Li^+ parviennent à passer d'une électrode à l'autre.

Le produit final est une cellule, très stable à hautes températures, et donc très sûre. De plus, les émissions de gaz sont très limitées.

Cette cellule rectangulaire possède une densité énergétique de 250 Wh/kg (le double de celles d'A123), et les modules (60 cellules) ont des capacités de 1.6 kWh. Plusieurs modules seront à l'avenir regroupés dans une boîte noire, avec un système de chauffage (la batterie doit opérer à une température supérieure à 80°C) et un système électronique intégré. La densité sera donc en pratique réduite pour le pack de 25 kWh.

Seo explique que leur système permet d'économiser sur l'achat des matières premières, sur le système de refroidissement, et sur les changements de batteries en fin de vie. La cathode utilisée est un lithium-phosphate (moins réactif, moins exothermique), étant le plus compatible avec le polymère solide, et est fabriquée dans les laboratoires de la société. Celle-ci possède plus de 35 brevets en cours de validation, notamment sur les systèmes de chauffage et refroidissement, et de mélange phosphate/ lithium/ polymère.

Nanoexa^{xiv}



Nanoexa est une startup basée à Mountain View, Californie, spécialisée dans le design de matériaux pour batteries électriques innovantes. Une dizaine de personnes travaillent à plein temps ici en Californie, et la production se fait au Japon et à Taiwan.

Constatant le très grand nombre de possibilités (plus de 2000) dans le choix de matériaux pour une batterie électrique, Nanoexa eut l'idée de créer une base de données afin d'optimiser la production de batteries lithium ion. Pour cela, un travail de plus de trois ans et l'utilisation de puissants supercalculateurs ont permis la création de leur *Software Engine*.

M. Dominique Rodriguez, Vice Président, a pu nous montrer son fonctionnement : typiquement l'utilisateur, qui souhaite produire une batterie Lithium Ion, décide d'un certain nombre de paramètres. Il choisit par exemple d'étudier la cathode, détermine les proportions souhaitées (en Nickel, Cobalt et Manganèse) et sa structure. Il a de plus la possibilité d'introduire des imperfections réalistes dans le modèle. On lance le *Software Engine* qui sort en résultat toutes les propriétés cruciales de l'électrode, telles que sa capacité ou sa durée de vie.

La corrélation entre résultats expérimentaux et prédictions du *Software*, allant jusqu'au pourcentage près pour certaines données, est impressionnante. Ainsi les constructeurs de batteries (leurs clients) peuvent-ils optimiser – ou faire du *fine tuning* – leur produit sans avoir à tester individuellement les possibilités.

Nanoexa a décidé d'utiliser son propre produit pour fabriquer une cathode d'une très bonne efficacité (160 mAh/g pour leur modèle L370 W) et travaille en ce moment sur une

cathode qui atteindrait les 300 mAh/g, et qui les rendrait très compétitif sur le marché de la voiture électrique ou hybride.

Leyden Energy^{xv}



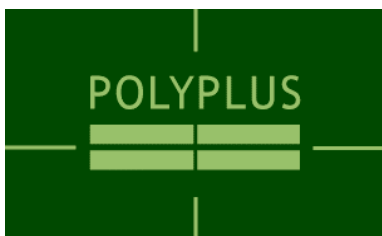
Leyden energy, fondée en 2007, est basée à Fremont, Californie. Cette start-up travaille sur un sel imide pour l'électrolyte, qui permet une meilleure distribution de la chaleur au sein de la batterie.

Ayant parlé avec Marie Kerlau, chercheuse chez Leyden, et ayant travaillé au BATT, il semblerait que les problèmes de la diffusion thermique et de l'émission de gaz (surtout pour les oxydes de nickel, qui libèrent beaucoup de dioxygène) soient cruciaux pour la sûreté de la batterie. C'est pourquoi Leyden energy, qui achète des électrodes de l'extérieur, se focalise sur l'électrolyte et sa stabilité. Leyden propose deux types de cellules, des cylindriques et des rectangulaires (pouch cells).

Les brevets de cette compagnie portent également sur le 'current collector', matériau nécessaire pour effectuer le lien entre électrodes et circuit extérieur. Ils annoncent détenir une technologie qui permettrait de faire fonctionner ces batteries jusqu'à 200°C, sans en activer les systèmes de refroidissement (ce qui réduirait considérablement les coûts énergétiques). Joint à une cathode NMC (avec du manganèse par exemple), cet électrolyte est extrêmement stable, et prévient des émissions de gaz, et donc de l'explosion interne de la batterie.

L'intérêt réside (cf. Ceder Group, BATT) alors dans la densité énergétique: à la place d'utiliser des électrodes à base de phosphate (Fe-P), connues pour leur durée de vie et pour leur stabilité, Leyden Energy donne la possibilité de travailler avec des électrodes NMC à haute densité.

Polyplus^{xvi}



Polyplus est une *spin-off* du LBNL, basée à Berkeley. Elle a été créée en 1991, et détient plus de 80 brevets. Plus de vingt personnes travaillent à plein temps, dont une grande partie dans la R&D. Jusqu'à présent, Polyplus a tous ses produits dans ses propres laboratoires.

Steven J. Visco, que nous avons rencontré, est le *Chief Technical Officer, V.P.* et co-fondateur de la structure. Il a récemment arrêté de travailler au BATT, après près de vingt ans au LBNL (où il travaillait à mi-temps), et a pu suivre l'évolution de la recherche dans ce domaine de façon unique. A l'époque, en 1984, les piles au sodium soufre faisaient beaucoup de bruit, étant bon marché, et affichant une très bonne durée de vie. Cette technologie est cependant mieux adaptée au stockage stationnaire (pour le réseau électrique par exemple), car elle opère à plus de 350°C.

Son groupe au LBNL travaillait en particulier sur ces hautes températures, et tentait de les abaisser; pour cela ils ont inventé un sel de sodium organique - invention qui aboutit en une *spin-off*, Polyplus, avec l'idée de remplacer le sodium par le lithium.

Le lithium métal présente un certain nombre de problèmes qui ne permettent pas encore son utilisation. Cette technologie, mise de côté à l'époque par l'apparition du lithium-ion (Sony), a pourtant continué d'intéresser les fondateurs de Polyplus, qui levèrent avec succès des fonds de capital-risque (et achetèrent des licences d'exclusivité au LBNL).

Le lithium métallique a une densité théorique de 12 000 Wh/kg (à comparer avec les 400 Wh/kg théoriques du lithium-ion). La difficulté principale posée par son utilisation est sa très forte réactivité avec l'eau. Ayant fait des recherches intensives pendant plus de dix ans sur ce point particulier, l'équipe de Polyplus découvrit en 2004 un polymère céramique permettant de protéger l'électrode de lithium, et en particulier permettant son utilisation nouvelle dans des batteries lithium-air ou lithium-eau.

Cette découverte permit à Polyplus de recharger les batteries lithium-soufre et d'empêcher les réactions annexes. Leur cellule Li/S théorique aurait alors une densité de 410 Wh/kg, et une densité prévue de 600 Wh/kg d'ici deux ans.

Mais l'équipe est bien plus ambitieuse, et a relativement laissé tomber le soufre pour l'air et l'eau. Avec leur électrode protégée (par un céramique stable à l'eau, conduisant les ions Li^+ , et stable au lithium métal), la compagnie a déjà produit ses cellules lithium-eau non rechargeables de 1300 Wh/kg. Ce sont les cellules les plus denses produites à ce jour. L'électrode est si bien protégée que Steven J. Visco n'hésite pas à la faire fonctionner sous l'eau, sous nos yeux. Le céramique est par ailleurs suffisamment flexible pour suivre les déformations de l'électrode dues à sa consommation. En utilisant l'eau (ou l'air), ces cellules sont en plus beaucoup plus sûres car l'énergie n'est pas stockée à proprement parler dans la cellule (le système est dit ouvert).



Ces produits sont prêts à la production de masse, et Polyplus recherche actuellement des fonds pour son usine. Le marché-cible est pour l'instant le marché des batteries non rechargeables, pour les submersibles par exemple.

La prochaine étape pour M. Visco est de rendre cette cellule rechargeable. Et c'est précisément dans ce but qu'ARPA-E vient de leur donner une bourse de 5 millions de dollars. Le produit devrait être prêt, d'après leur cahier des charges, dans deux ans. Si c'est le cas, on sera face à une batterie dix fois plus dense que tout ce qui se fait aujourd'hui, et approchant la densité énergétique de combustibles tels l'essence ou le diesel. Et surtout la seule qui n'utilise pas le principe lithium-ion.

Le lien avec le laboratoire national est une fois de plus intéressant. Depuis le début des années 90, les laboratoires fonctionnent selon un 'business model'. Le gouvernement a souhaité voir des résultats quantitatifs (l'impact sur l'économie du pays); ainsi les chercheurs ont-ils fait breveter une grande partie de leur travail, les royalties associées étant versées à la fois au laboratoire (à 50%) et aux chercheurs mêmes. Ces financements

représentent parfois plusieurs dizaines de millions de dollars (comme à Stanford par exemple). De plus, les laboratoires incitent leurs chercheurs à monter des structures, ce qui leur permet d'exiger des financements de l'Etat, et aussi de vendre des licences sur l'IP. Ce qui permet évidemment aussi de mieux rémunérer les chercheurs.

Sion power^{xvii}



La technologie utilisée par cette entreprise provient des recherches sur les batteries Li-S. Il semblerait que l'utilisation du soufre dans ces cellules soit similaire à la technologie initiale de Polyplus ; c'est la raison pour laquelle Polyplus a porté plainte, et a gagné la reconnaissance de l'IP. Depuis, un accord concernant ces batteries rechargeables Li-S a été trouvé entre les deux acteurs^{xviii}.

Actacell^{xix}



Actacell est une spin-off de la University of Texas Austin. Elle est spécialisée dans les batteries lithium-ion à base de manganèse, et s'appuie sur les travaux du professeur Arumugam Manthiram (BATT).

Actacell explique avoir réussi à résoudre le problème de durabilité dans ces batteries réputées très denses énergétiquement. Cette startup texane, fondée en 2007, a une cellule disponible sur le marché.

Altairnano^{xx}



Altairnano est une startup de Reno, Nevada. La technologie clé de ce constructeur de batteries est le nano-Li₄Ti₅O₁₂. Ses cellules font preuve

d'une longue durée de vie (plus de 12000 cycles), et ciblent le transport de masse (les bus, cars, etc.). Ils sont aussi intéressés par des applications hybrides. Ces dernières nécessitent une symétrie dans la charge et la décharge, tout particulièrement pour le système de freinage régénérant. Altairnano semble avoir mis en place ces propriétés particulières, que les autres batteries plus classiques n'ont pas. Andrew Strolin, le marketing program manager, nous a expliqué qu'Altairnano prenait en charge la totalité du dispositif, y compris le chargeur et l'électronique (pour une compagnie de bus par exemple).

Les financements de la R&D

L'administration Obama a mis en place un certain nombre de mécanismes de financements supplémentaires des programmes de R&D académiques et industriels dont le but est de rapidement faire émerger des nouvelles technologies propres et des champions de ces technologies. Les financements sont divers et la recherche sur les batteries a pu grandement en profiter directement et indirectement avec les véhicules électriques. L'originalité de certains financements, menant à des partenariats uniques entre les universités, les startups et les industriels nous amène à y consacrer une rubrique.

DoE Advanced Technology Vehicles Manufacturing Program^{xxi}

Ce programme autorise \$25 milliards de prêts directs (par opposition à des garanties de prêts consenties). Pour postuler il faut être un fabricant de véhicules de haute technologie, ou de composants pour ces véhicules, financièrement viable et non dépendant de l'octroi du prêt, et avoir un projet de développement/mise à jour d'une capacité de production de véhicule propre aux USA.

Depuis son lancement ce programme a reçu plus de 70 demandes de financements, dont A123 Systems, Tesla, EnerDel. A l'heure actuelle \$8 milliards ont été alloués sous forme d'accords de principe (Conditional Commitment Offer), dont

- \$530 millions pour Fisker Automotives, pour construire le modèle Karma, en rouvrant une usine General Motors du Delaware. Ce projet devrait permettre de créer 2000 emplois^{xxii} \$1.6 milliards à Nissan USA pour mettre à jour son usine de fabrication de la Leaf et de ses batteries^{xxiii} Ce projet devrait soutenir 1300 emplois. C'est le plus gros prêt consenti à un constructeur étranger à ce jour aux USA.
- \$465 millions à Tesla Motors pour fabriquer la Tesla Sedan, sans doute dans l'usine NUMMI de Fremont rachetée à Toyota.

Il est intéressant de noter que CODA Automotives a déposé un dossier de financement de \$500 millions pour une usine en Ohio. Cette entreprise Californienne a la particularité d'utiliser dans ses voitures les batteries du géant chinois Lishen et d'avoir formé *Joint-Venture* avec cette société sous le nom de Lio Energy Systems. Il sera intéressant de voir la position du département de l'énergie sur ce dossier qui a déjà refusé une première demande de prêt de CODA^{xxiv}.

DoE Electric Drive Vehicle Battery and Component Manufacturing Initiative

Ce programme de prêt crédité de \$2.4 milliards dont \$1.2 milliards pour les usines de fabrication de batteries pour avait sélectionné 48 dossiers il y a un an. En dehors des

grands noms Américains de la voiture tels que Ford, Chrysler et GM se trouvait A123 Systems qui avait à lui tout seul empoché \$249 millions.

DoE Loan guarantee program

Le Département de l'Energie a lancé ce programme pour les développements de projets liés aux technologies propres. Le principe est de garantir des prêts d'un certain montant en se portant caution, et en remboursant si la société venait à faire défaut.

Un des prêts les plus impressionnants est celui de \$17 millions qui a été fait à AES Systems pour construire une capacité de stockage énergétique de 20MW en utilisant les batteries de A123 Systems.

ARPA-E Funding

L'agence *Advanced Research Project Agency– Energy*^{xxv} a été créée par le DoE en 2007. Elle doit son nom au *Defense Advanced Research Project Agency/DARPA* à l'origine d'Arpanet, le réseau précurseur d'internet. Elle n'avait pas été initialement dotée par l'administration. Elle a pu bénéficier d'un budget de 400 millions de dollars grâce *American Recovery and Reinvestment Act [ARRA]* plus connu sous le nom de *Stimulus Package* (787 milliards de dollars dont un tiers pour des contrats, bourses et prêts)^{xxvi}. L'objectif d'ARPA-E est de financer des travaux complexes avec fort retour sur investissement (*high risk/high reward*) qui ne seraient pas engagés au vu de leur forte probabilité d'échec. Les projets soumis doivent être ambitieux et impliquer des laboratoires gouvernementaux, des industriels et des startups.

\$349 millions en provenance de l'ARRA ont déjà été alloués en trois sessions de sélection à 117 projets dont une partie pour le programme *Battery for Electrical Energy Storage in Transportation* (BEEST), dont un certain nombre d'acteurs de Californie :

- \$5 millions à Polyplus en partenariat avec Corning pour travailler sur l'aspect rechargement des batteries lithium-air;
- \$5 millions à Sion Power en partenariat avec BASF, LBNL et PNNL, pour développer une batterie lithium- avec une très forte densité énergétique de 500Wh/kg pour donner une autonomie supérieure à 300 miles à un *EV*;
- \$5 millions à Revolt Technology^{xxvii}, une entreprise européenne qui développe une technologie à base de zinc-air.
- \$4 millions à Applied Materials (AM) pour travailler avec A123 Systems et LBNL pour les de production d'une batterie lithium-ion de manière très significative grâce à des procédés de fabrication nouveaux, ce qui est le cœur de métier d'AM.
- \$5 millions à A123 Systems et le MIT pour développer un système hybride fuel-cells/batterie lithium-ion.

- \$1 million à Stanford et Applied Materials, pour une batterie révolutionnaire «tout électron» qui stocke l'énergie en déplaçant des électrons plutôt que des ions.
- \$4 millions à Envia Systems pour développer des batteries 3 fois plus denses grâce à des nano-composants.

Au final il est intéressant de noter qu'A123 Systems a à elle seule pu récolter des montants astronomiques de prêts et de bourses que ce soit directement ou indirectement à travers AES et Fisker qui sont des partenaires. Elle continue de bénéficier du soutien gouvernemental alors que son cours de bourse est au plus bas.

Tout comme Solyndra est le grand gagnant sur le solaire, il semblerait que ce soit le gouvernement qui influence et choisisse quel sera le champion des batteries, même si le marché boude sociétés à l'heure actuelle. On peut se demander si ces sociétés seront à même de continuer leur développement lorsque la manne financière s'arrêtera.

L'investissement de type capital risque

Les startups qui ont pu bénéficier des financements et/ou des prêts de l'état sont aussi celles qui bénéficient de l'attention des acteurs du Capital Risque. Et celles qui n'ont pas pu en bénéficier peuvent se retrouver en panne de financements et être obligées à mettre la clef sous la porte. On citera l'exemple d'Imara^{xxviii}. Pour certains investisseurs comme le fameux Vinod Khosla, de Khosla Ventures qui investit notamment dans Seo et Sakti3^{xxix}, ces placements ne rapporteront que lorsque le cout des batteries sera suffisamment bas pour rendre la technologie compétitive vis-à-vis des voitures à moteur thermique.

La batterie électrique: intérêt et durabilité

Les bienfaits pour l'environnement sont souvent mentionnés par les différents constructeurs de voitures électriques. On s'intéresse particulièrement à l'émission de gaz tels que le CO₂ pour comparer les différentes technologies, et beaucoup annoncent des véhicules 'zero-emissions'.

La provenance de l'électricité en question

La question de l'intérêt écologique des véhicules électriques est souvent posée lorsqu'une approche par cycle de vie est adoptée. L'exemple suivant démontre que le bilan demeure positif dans la situation américaine en général, et dans le contexte californien en particulier

Emissions de CO₂ :

Pour la Nissan Leaf par exemple, on obtient 4 miles par kWh, soit 6.4 km par kWh.

Pour la voiture à essence la plus sobre proposée sur le marché actuellement, soit une voiture hybride ou une voiture de type Smart, l'émission est de l'ordre de 100g/km de CO₂ produit, soit, en analyse de cycle de vie, 110 gCO₂/km et donc 705g de CO₂ pour 6.4 km, à comparer à 1 kWh en Nissan Leaf.

Ce calcul permet de comprendre que la voiture électrique est efficace, au niveau d'émissions de CO₂, si l'électricité nécessaire à sa recharge est suffisamment propre. Dans cet exemple, le seuil est de 705g/kWh.

La production d'électricité des Etats-Unis, qui émet 2.5 Gtonnes de CO₂ pour 4000 GWh), a une moyenne de 600g/kWh; cette valeur élevée provient en partie des usines à charbon, qui constituent 44% de la production totale du pays.

Ainsi la voiture à essence la plus efficace sur le marché actuellement ne parvient pas à atteindre le niveau d'émission de la Nissan Leaf, à l'échelle nationale.

De plus; certains états, comme la Californie, sont beaucoup plus propres que la moyenne des Etats-Unis (moins de 1% de l'électricité produite à base de charbon). La démocratisation de la voiture électrique doit néanmoins nécessairement s'accompagner de l'amélioration des taux d'émission des centrales électriques.

Autres émissions

Un autre avantage des véhicules électriques est l'absence des autres émissions, et notamment des émissions de particules, COV, NO_x et CO liés au fonctionnement d'un

moteur à combustion interne. Même si les centrales thermiques à charbon, au gaz ou à pétrole émettent de tels polluants, leur positionnement géographique en dehors des zones habitées limitent l'exposition de la population, quand les populations sont au contraire directement exposées aux émissions des véhicules.

La provenance du lithium en question

La provenance du lithium est un sujet qui fait débat. En effet, les ressources en lithium sont limitées, et peuvent poser problème à grande échelle. Sans entrer dans les considérations sur le prix du lithium, qui pourra fortement changer dans de telles circonstances, la production même de cet élément divise le monde scientifique.

Par ailleurs on peut s'interroger sur les quantités de batteries que l'on peut produire dans un temps donné: la production en capacité pour 2015 est estimée à 36 millions de kWh. Etant donné les quantités nécessaires pour produire une batterie pour véhicule hybride par rapport à une batterie pour véhicule électrique, faut-il en priorité fabriquer des voitures hybrides ou électriques ? C'est le calcul fait par John Petersen^{xxx}, avocat spécialiste de l'industrie de la batterie. Selon lui, compte tenu de la capacité de fabrication actuelle, on peut équiper à peu près 15 fois plus de véhicules hybrides que de véhicules électriques. En allouant l'ensemble de la production de batteries à la construction de véhicules hybrides, on réduirait 10 fois plus les émissions de dioxyde de carbone en se basant sur l'origine de l'électricité en moyenne aux USA. Le mix énergétique américain est voué à augmenter la part d'énergie renouvelable dans le futur, mais dans une hypothèse à court terme on pourrait s'interroger sur les bénéfices de faire la promotion des véhicules électriques par rapport aux hybrides.

La puissance disponible en question

Il y a plus de 33 millions de véhicules enregistrés en Californie. Si chaque véhicule, de 15kWh en moyenne, est chargé de nuit (10h), cela nécessiterait une puissance de 50GW. La plus grande centrale nucléaire a une puissance de 8GW; il en faudrait donc plus de six nouvelles.

La capacité de produire l'électricité nécessaire n'existe pas à l'heure actuelle et le discours est orienté sur les moyens de la produire à partir de sources d'énergies renouvelables, non pas sur l'augmentation de cette capacité.

Les objectifs en Californie de produire de l'énergie propre sont cadrés par *l'Assembly Bill AB 32*, aussi connue sous le nom de "*Global Warming Solutions Act of 2006*", qui fixe des objectifs précis en terme de réduction de gaz à effet de serre pour 2020 (33% d'énergie renouvelable en 2020^{xxxii}). Cette loi fut signée par le Gouverneur Schwarzenegger en 2006 et est assez emblématique de son mandat, très orienté vers les aides au secteur des technologies vertes.

Avec le déploiement des premiers véhicules électriques, les problèmes des infrastructures de recharge vont rapidement donner la mesure de la suite lorsque la demande en *EV* augmentera fortement.

Notes

- i Coda website : http://www.codaautomotive.com/tech_specs.html
- ii Toyota Prius Specifications :
http://www.toyota.com/esq/articles/2010/Toyotas_First_Production_Lithium_Ion_Drive_Battery.html
- iii BATT program website : <http://batt.lbl.gov/>
- iv Lawrence Berkeley National Lab : <http://www.lbl.gov/>
- v Kumta Lab in BATT program : <http://batt.lbl.gov/2010/06/07/kumta-group-highlights/>
- vi Goodenough Lab in BATT program : <http://batt.lbl.gov/2010/05/07/goodenough-lab-highlights/>
- vii Manthiram Lab in BATT program : <http://batt.lbl.gov/2010/05/07/manthiram-lab-highlights/>
- viii Ceder Lab in BATT program : <http://batt.lbl.gov/2010/05/24/ceder-group-highlights/>
- ix Venkat Srinivasan Blog : <http://thisweekinbatteries.blogspot.com/>
- x A123 website : <http://www.a123systems.com/>
- xi Amprius website : <http://www.amprius.com/>
- xii Valence website : <http://www.valence.com/>
- xiii Seeo website : <http://www.seeo.com/>
- xiv Nanoexa website : <http://www.nanoexa.com/>
- xv Leyden Energy website : <http://www.leydenenergy.com/>
- xvi Polyplus website : <http://www.polyplus.com/>
- xvii Sion Power website : <http://www.sionpower.com/>
- xviii Sion Power/Polyplus agreement : [http://sionpower.com/pdf/articles/SION Power and Polyplus Conclude an Agreement V4.pdf](http://sionpower.com/pdf/articles/SION_Power_and_Polyplus_Conclude_an_Agreement_V4.pdf)
- xix Actacell website : <http://www.actacell.com/>
- xx AltairNano website : <http://www.altairnano.com/>
- xxi Advanced Technology Vehicles Manufacturing Loan Program :
<http://www.atvmloan.energy.gov/>
- xxii DOE finalizes Fisker's \$528.7 million loan : <http://green.autoblog.com/2010/04/25/doe-finalizes-fiskers-528-7-million-loan/>
- xxiii Plant for Nissan's Leaf Gets a \$1.4 Billion DOE Loan, NY Times January 29, 2010
- xxiv Coda Automotive Lines Up for DOE Loans for Ohio Factory :
<http://earth2tech.com/2010/05/25/coda-automotive-lines-up-for-doe-loans-for-ohio-factory/>
- xxv ARPA-E website <http://arpa-e.energy.gov/>
- xxvi ARRA website <http://energy.gov/recovery/>
- xxvii Revolt Technology website : <http://www.revolttechnology.com/>
- xxviii Battery Startup Imara Shuts Down After Funding Troubles :
<http://gigaom.com/cleantech/battery-startup-imara-shuts-down-after-funding-troubles/>
- xxix Sakti3 website : <http://www.sakti3.com/>
- xxx The first great fraud of the new millennium : http://batteriesinternational.com/cover_story.pdf
- xxxi DOE website <http://www.energy.ca.gov/renewables/index.html>

Sources

<http://eetd.lbl.gov/>

<http://www.electronics-lab.com/articles/>

<http://berc.lbl.gov/venkat/dev-concepts/>

<http://www.sciencedaily.com/>

<http://www.transportation.anl.gov/>

<http://www.greencarcongress.com/>

<http://priuschat.com/>

<http://www.world-nuclear.org/education/comparativeco2.html>

<http://www.sciencedirect.com/>

<http://green.autoblog.com/>

<http://earth2tech.com/>

<http://en.wikipedia.org/>

<http://www.wired.com/>