

RAPPORT D'ÉTUDE

16/06/2010

DRA-10-111085-07180A

**Approche de la maîtrise des risques spécifiques
de la filière véhicules électriques :
Données de base sur les différentes
technologies de stockage d'énergie**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

DONNEES DE BASE SUR LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ENERGIE

INERIS

Client : MEEDdM

Liste des personnes ayant participé à l'étude : G. MARLAIR - L. DUPONT - J. LEJOSNE

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

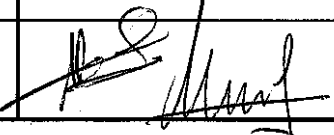
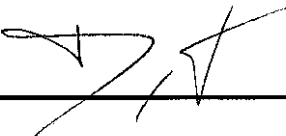
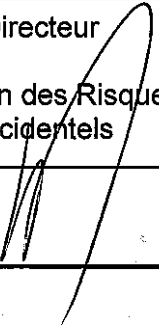
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	J. LEJOSNE / G.MARLAIR	L.DUPONT	M. DEMISSY
Qualité	Ingénieur Unité Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Direction des Risques Accidentels	Directeur Direction des Risques Accidentels
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	5
2. HISTORIQUE.....	6
3. LES TECHNOLOGIES DES VEHICULES DE LA FILIERE ELECTRIQUE	8
3.1 Introduction.....	8
3.2 Nomenclature et fonctionnalités	9
3.3 Des nouvelles fonctionnalités dans le véhicule	10
3.4 les challenges d'aujourd'hui.....	13
4. LES TECHNOLOGIES DES VELOS ELECTRIQUES (VAE)	17
4.1 Introduction.....	17
4.2 Technologie des batteries	18
4.3 Positionnement de la batterie.....	19
5. ETAT DE L'ART DES TECHNOLOGIES BATTERIES ET DES SUPERCONDENSATEURS	20
5.1 Introduction.....	20
5.2 La technologie batterie lithium- et lithium métal polymere	21
5.2.1 Principe de fonctionnement d'une batterie.....	21
5.2.2 La batterie lithium ion et Lithium Métal Polymère (LMP).....	22
5.2.3 Description des constituants internes des batteries Li-ion	26
5.3 La technologie des batteries ZEBRA.....	28
5.4 La technologie supercondensateur	30
5.4.1 Principe.....	30
5.4.2 Les différents types de supercondensateurs	31

5.4.3 Les différences entre les caractéristiques des batteries et des supercondensateurs	33
6. CONCLUSION : PREMIERS ELEMENTS DE REFLEXION SUR LA SECURITE ET PERSPECTIVES	34
7. REFERENCES.....	36

1. INTRODUCTION

Les nouveaux systèmes de stockage et de gestion de l'énergie électrique (batteries au Lithium, supercapacités...) et leurs interfaces avec le train propulseur du côté véhicule et les bornes de charge du côté réseau constituent les technologies clés, en pleine mutation dont la maturité conditionne le déploiement de la filière électrique. Les enjeux de sécurité déjà mis en évidence lors de la commercialisation des premières piles au lithium et batteries au lithium rechargeables destinés aux équipements de grande consommation (ordinateurs portables, téléphonie mobile, lecteurs de DVD -voir le rapport sur le REX-) n'ont fait que se renforcer avec l'augmentation des densités énergétiques massiques et volumiques des batteries.

Ainsi, il nous a paru utile dans le cadre de cette étude de prévoir un document autoporteur regroupant quelques données de base sur ces technologies, comprenant un bref aperçu historique du développement, ainsi que quelques éléments contextuels sur le développement en cours. C'est l'objet du présent rapport.

2. HISTORIQUE

Le premier véhicule électrique a fait son apparition aux alentours de 1830. D'autres prototypes de véhicules ont probablement été construits pendant cette période mais il faudra attendre 1859 avec l'invention de la batterie rechargeable au plomb acide par le français Gaston Planté. Elle sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1891, l'américain William Morrison construit la première vraie voiture électrique. En 1899 en Belgique, une société construit la célèbre « Jamais Contente » première automobile à dépasser les 100 km/h.

Dès **1900**, la voiture électrique connaît ses premiers beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, les autres étant des véhicules à essence et à vapeur. Cependant, l'introduction des moteurs à combustion (par exemple, la Ford Model T à essence en 1908), mènera au **déclin** du premier déploiement de la voiture électrique. Les arguments en leur défaveur à l'époque sont leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les modèles à essence, argument toujours invoqués aujourd'hui, compensés par une réelle volonté d'aller vers une éco-mobilité durable, volonté accompagnée par les politiques publiques nationales et européennes.

En 1966, le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. L'opinion publique américaine y est largement favorable et avec l'augmentation du prix de l'essence en 1973 (premier choc pétrolier ayant conduit à un embargo des pays membres de l'OPEP envers les Etats-Unis), la situation est très favorable. Pourtant rien ne décollera vraiment. En 1976, le congrès adopte la législation dénommée « Electric and Hybrid Vehicle Research, Development, and Demonstration Act » qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.

En 1990, l'Etat de la Californie vote le Zero Emission Vehicle (ZEV), un plan qui prévoit que 2% des véhicules devront avoir zéro émission polluante en 1998 (puis 10% d'entre eux en 2003). Les constructeurs développaient la technologie Ni/cd. Cependant, en raison d'une faible densité énergétique, d'une rapide autodécharge (20% / mois) et d'une sensibilité à l'effet mémoire, cette technologie n'a pas eu le succès escompté.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires seront vendus au Japon la première année. De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides. Cependant à partir de 2000 la voiture électrique va à nouveau connaître un déclin. En 2003 en France, Renault fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride Kangoo Elect'road mais abandonnera la production après environ 500 véhicules. En 2007, il y avait encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.

En mars 2009, Vincent Bolloré annonce la sortie pour 2010-2011 en location mensuelle à 330 euros, sa propre voiture électrique baptisé BlueCar. Parallèlement ou presque, tous les grands constructeurs mondiaux font des annonces en matière de stratégie de développement du véhicule électrique et de ses différents variantes (BEV, ER-EV, HEV, PHEV...), les grands constructeurs français ne sont pas en reste et annoncent la commercialisation de leurs propres véhicules pour 2011.

En parallèle, SAFT constructeur national de batteries à haute technologie crée de son côté une joint venture avec Johnson control (grand équipementier américain) pour pénétrer ce nouveau marché qui n'est pas à l'origine son cœur de métier. Des véhicules de marque étrangère roulant en Europe sont déjà équipés de batteries SAFT (Mercedes, BMW...)

3. LES TECHNOLOGIES DES VEHICULES DE LA FILIERE ELECTRIQUE

3.1 INTRODUCTION

Deux types de véhicules «électriques» sont actuellement en cours de développement. Sous ce vocable générique, on entend différents degrés d'électrification du véhicule : le véhicule hybride et la voiture tout électrique. Rappelons également qu'en dehors du véhicule automobile électrique, il existe également des vélos à assistance électriques, des scooters à moteur électriques et même des charriots (de transport) électrique.

- Le véhicule hybride

Deux moteurs sont présents : l'un roule à l'essence (moteur thermique), l'autre est électrique. Les batteries sont capables d'alimenter en énergie le moteur électrique et ainsi de suppléer le moteur à essence pendant des périodes plus ou moins longues en fonction de la technologie.

Suivant les phases de conduite, le « lien » entre les deux moteurs varie (figure 1) :

- **En série** : seul le moteur électrique est en marche alimenté par les batteries. Ce système est requis pour de faibles vitesses, le freinage et l'arrêt. Pendant les phases de décélération, l'énergie cinétique résultant du mouvement du véhicule est directement envoyée vers les batteries. Le moteur à essence est totalement inactif. Ainsi aucun dioxyde de carbone n'est émis.

- **En parallèle** : dans ce cas de figure, le moteur électrique est à l'arrêt. Seul le moteur thermique fait avancer le véhicule. C'est ce qui se passe lorsque le véhicule est à vitesse constante. Simultanément, une partie de l'énergie motrice fournie par le carburant sert à recharger les batteries via un générateur qui n'est autre que le moteur électrique.

- **En série et en parallèle** : les deux moteurs sont sollicités pour apporter une énergie motrice conjointe lors de fortes accélérations ou de la montée d'une côte. Les batteries continuent d'emmagasiner de l'énergie pour alimenter le moteur électrique.

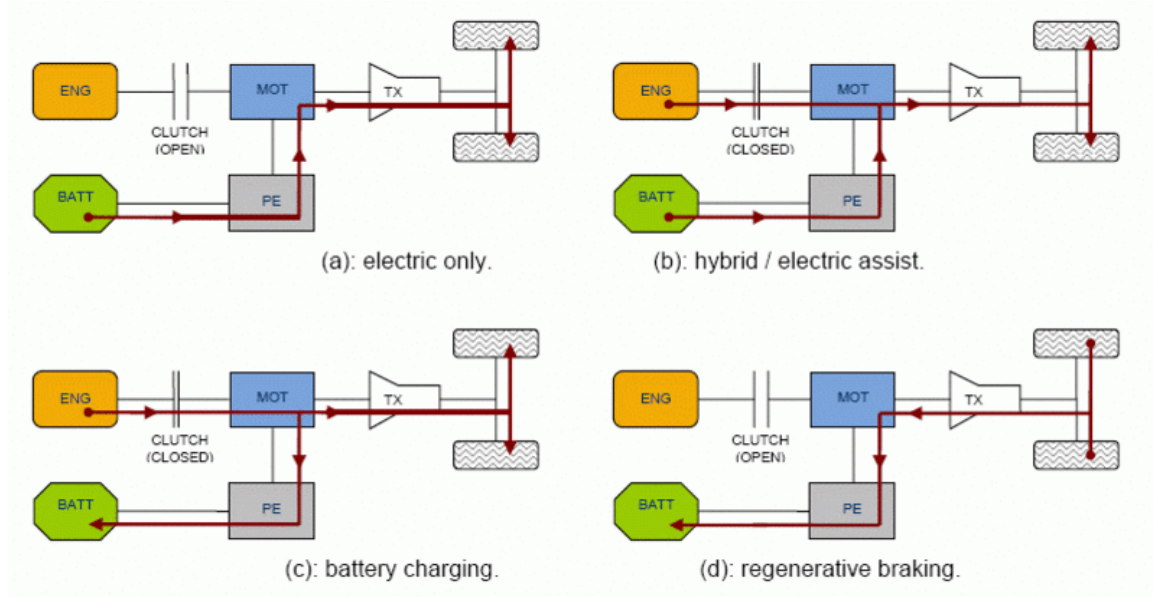


Figure 1 : les différents modes du fonctionnement d'un véhicule hybride¹

- Le véhicule électrique

Dans un tel véhicule, il n'y a pas de moteur thermique et la traction du véhicule se fait uniquement par le biais du moteur électrique. On signalera cependant (cas des générations cd/Ni) que la fonction chauffage / climatisation peut encore nécessiter le recours à des systèmes thermiques impliquant l'utilisation (stockage et combustion) d'une autre source d'énergie primaire, en général de l'essence.

3.2 NOMENCLATURE ET FONCTIONNALITES

La segmentation du marché des véhicules de la filière électrique comporte :

- les véhicules tout électriques (un seul groupe propulseur, fonctionnant à l'électricité emmagasinée dans des batteries) (EV, BEV)
- et des véhicules dits hybrides, (HEV) et « plugin hybrid » (PHEV) ou véhicule électrique rechargeable. Parmi les véhicules hybrides, les taux d'électrification associés aux fonctions remplies par l'électricité varient et donnent lieu à la sous-catégorisation des véhicules hybrides en Micro, Mild, Medium et Full Hybrid (figures 2 et 3).

Le cas particulier des véhicules électriques rechargeables correspond à un mode d'hybridation particulier (PHEV). Les batteries de ce type de véhicules peuvent être rechargées indifféremment en cours d'utilisation du véhicule via le moteur thermique (sous dimensionné mais toujours présent) ou, à l'arrêt, sur le réseau via une borne de chargement voire une prise de courant adaptée chez le particulier.

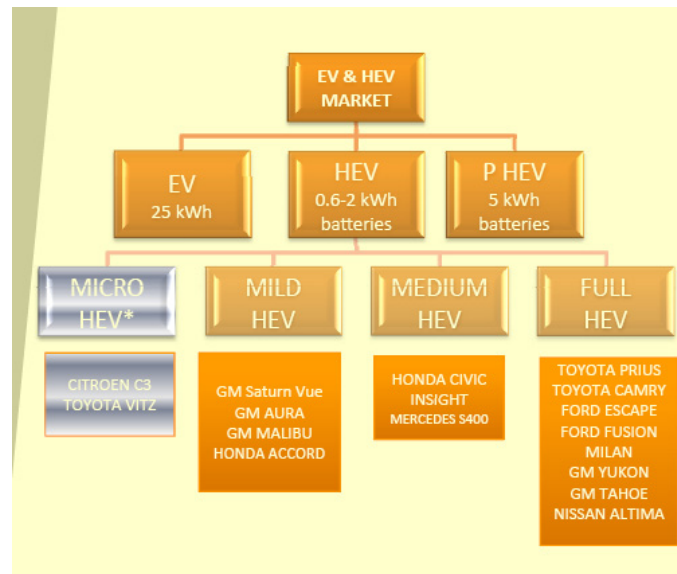


Figure 2 : nomenclature des voitures électriques et hybrides

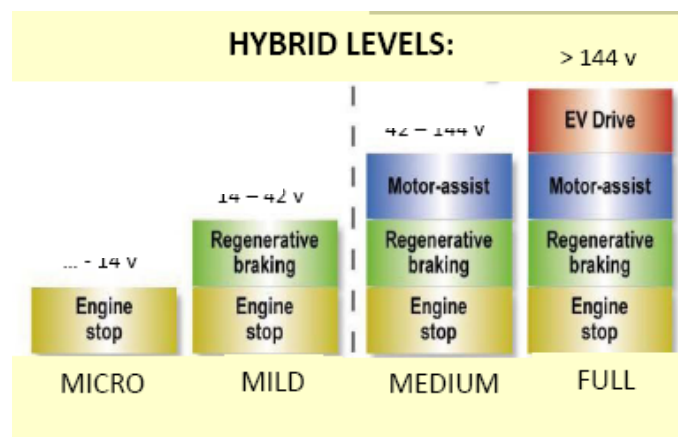


Figure 3 : fonctionnalités en fonction du niveau d'hybridation

Citons enfin les véhicules ER-EV. Le sigle EREV, qui signifie « Extended Range Electric Vehicle » en anglais, représente des véhicules hybrides avec un petit moteur à combustion interne ou une autre source secondaire reliée à un générateur afin de réapprovisionner les batteries, permettant donc d'augmenter significativement l'autonomie de la voiture.

3.3 DES NOUVELLES FONCTIONNALITES DANS LE VEHICULE

Les véhicules HEV ont un certain nombre de fonctionnalités supplémentaires par rapport aux véhicules traditionnels :

- Optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques
- Stop & Start (« Engine stop » : arrêt du moteur à l'arrêt et démarrage automatique)

- Récupération d'énergie au freinage (« regenerative braking »)
- Assistance électrique à la traction ou booster (« Motor assist »)
- Mode tout électrique ou \Zéro Emission Véhicule (EV drive)
- Autonomie en tout électrique
- Recharge batterie sur le réseau (uniquement PHEV et ER-EV)

Optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques (régulation de tension) : Dans le cas de véhicules munis d'accessoires (autoradio par exemple) la batterie est utilisée comme un tampon d'énergie. Par un système de gestion adéquat, les temps de recharge sont choisis pour que le moteur thermique atteigne les points de fonctionnement à hauts rendements. Ces points de fonctionnement correspondent à des faibles régimes et forts couples ; la recharge de la batterie sera donc privilégiée lors des phases d'accélération et sera évitée lorsque le moteur thermique tourne au régime de ralenti au moment où le couple demandé au moteur thermique est faible. Ce principe de fonctionnement peut limiter les performances du véhicule mais le gain en consommation peut être très intéressant selon la puissance demandée par les accessoires.

Stop & Start : Le principe du Stop & Start consiste à gérer de manière automatique la mise en route ou l'arrêt du moteur thermique. Cette fonctionnalité trouve tout son intérêt en milieu urbain dense où le véhicule est souvent à l'arrêt (feu tricolore, embouteillage). Il a été démontré que le pourcentage de temps où la voiture est à l'arrêt dans un milieu urbain représente 20 à 25 % de la durée du trajet. L'économie de l'ordre de 5 à 10 % intervient donc lors des phases d'arrêt et de démarrage du moteur pendant lesquelles le moteur thermique est assisté jusqu'à ce qu'il atteigne un régime de l'ordre de 800 tr/min.

Récupération d'énergie au freinage : La fonctionnalité primordiale du véhicule hybride est la récupération au freinage. Elle consiste à transformer l'énergie cinétique normalement dissipée par les freins mécaniques lors des phases de décélération en énergie électrique via un moteur électrique ou générateur. Cette énergie électrique est récupérée par un stockage d'énergie réversible (batteries, supercondensateurs, volant d'inertie).

Assistance électrique à la traction (Booster) : Un moteur électrique est couplé au moteur thermique afin de diminuer ses demandes de puissances transitoires (montées en régime). Le moteur thermique est alors assisté lorsqu'il n'est pas en mesure d'assurer le couple nécessaire à un régime donné. De plus, dans le cas d'un régime donné où la demande de couple écarte le rendement du moteur de son optimum, le moteur électrique intervient et permet au moteur thermique de rester dans sa zone de meilleurs rendements. Une utilisation trop importante de cette fonction aurait pour conséquence une décharge trop rapide de la batterie.

Mode tout électrique (Zéro Emission Véhicule) : Le mode tout électrique est utilisé dans les phases de démarrage du véhicule, le moteur électrique fournissant la totalité de la puissance nécessaire à la traction. Cependant, ce mode n'est valide que pour des vitesses inférieures à une valeur limite, 30 km/h pour la Toyota Prius par exemple, sur de très courtes distances et lorsque la consigne de puissance n'est pas trop élevée.

Autonomie en mode tout électrique : Cette fonctionnalité est similaire à celle des véhicules électriques. Le véhicule est capable d'être tracté uniquement par le moteur électrique sans aide du moteur thermique. L'autonomie du véhicule est variable selon la capacité de stockage de la batterie.

Recharge batterie sur le réseau : Comme les véhicules électriques, certains véhicules hybrides peuvent recharger leurs batteries par un apport d'électricité extérieur au véhicule en se branchant sur le réseau électrique ou sur un stockage d'énergie décentralisé. On parle alors de véhicules hybrides plug-in (PHEV). L'autonomie peut être prolongée lorsque la batterie est complètement déchargée donc inutilisable : le chargeur du véhicule peut se trouver à bord du véhicule ou sur un système extérieur (notamment en cas de charge rapide). Concernant la recharge de la batterie, il est important de distinguer la charge normale (les constructeurs annonçant des charges complètes comprises entre 6 à 8 heures), a priori sur des prises 220 V 16A et la charge rapide, afin d'utiliser le véhicule sur une courte distance.

Quelques constructeurs évoquent la possibilité de changer entièrement le pack batterie lorsque celui-ci est vide (système quick drop, lancé par Better Place). Au moyen d'une rampe, d'un mécanisme automatisé et en un temps très court, les batteries déchargées du véhicule sont remplacées par des batteries chargées. Cependant, ce système est loin de faire l'unanimité pour cause de problèmes de sécurité notamment, des difficultés liées au stockage des batteries chargées et des phases de maintenance avec des batteries de plusieurs centaines de Kg. De plus, le gain de temps serait en fait minime par rapport à une recharge rapide. Des opérations de démonstration sont prévues (Israël, Japon, Danemark...).

Il est important d'avoir en tête qu'une batterie lithium ion (ou d'autre technologie) se trouve, au cours de son cycle de vie normal, toujours à un état au moins partiellement chargé. Ainsi, les risques électriques sont toujours présents (y compris pendant les phases de transport). Les véhicules hybrides ont ainsi une large palette de fonctionnalités envisageables, ce qui se traduit par des taux d'électrification très variés. Le tableau 1 regroupe les gammes de dimensionnement en tension du pack de batteries, nécessaires à la réalisation des différentes fonctionnalités.

	Micro Hybrid	Mild hybrid	Medium hybrid	Full hybrid	VE
FONCTIONS	- Stop Start - Régulation de tension	- Stop Start - Boost	- Stop Start - Boost	- Stop Start - Boost - Mode tout électrique	100% ZEV
Tension	5 à 40V	40 à 140V	140V à 600V	140V à 600V	300 à 600V

Tableau 1 : les différentes technologies des véhicules « écologiques » (source Batscap)

Ce tableau révèle des tensions d'utilisation pouvant atteindre 600V. Il est important d'évoquer le danger potentiel du risque électrique par rapport aux véhicules conventionnels (fonctionnant avec des batteries 12V/24V). Ce danger est à prendre en compte dans diverses situations (utilisation de routine, intervention sur accident, opérations d'entretien ou de maintenance...).

3.4 LES CHALLENGES D'AUJOURD'HUI...

La batterie est l'organe clé des voitures électriques (BEV) et des véhicules électriques rechargeables (PHEV). Elle influe directement sur les performances et surtout l'autonomie des voitures électriques. Aujourd'hui, les batteries lithium permettent d'améliorer considérablement les caractéristiques techniques des véhicules électriques par rapports aux premières expérimentations de flottes captives avec des batteries au plomb ou Ni/Cd (CUB, La Poste...) et représente un saut technologique rendant l'utilisation des voitures électriques envisageables de nos jours.

Le lithium possède en effet de nombreuse qualité : il permet notamment de stocker énormément de charges électriques sous forme d'ions sur les électrodes et de manière très compacte (répondant au moins pour partie aux contraintes de gain de poids et de place dans le véhicule). Le principe de fonctionnement réside sur la circulation des électrons pour générer un courant électrique, comme pour toute autre batterie : les ions lithium, agglutinés sur l'électrode négative (par exemple en graphite), traversent l'électrolyte (paroi centrale de la batterie), pour se fixer sur l'électrode positive (par exemple en dioxyde de cobalt). La maturité actuelle de la technologie dite « supercondensateur », autre système de stockage d'énergie électrique, ouvre également des applications industrielles dans le domaine de la voiture électrique, pour certaines fonctions d'hybridation essentiellement, ou en association avec des batteries.

Pour réaliser des batteries capables de rendre une offre de voiture électrique compétitive sur le marché, les chercheurs travaillent à relever les différents défis suivants :

Augmenter la capacité de stockage d'énergie des batteries des voitures électriques : embarquer un maximum d'énergie pour un encombrement minimal, c'est le défi de tout type de transport et la voiture électrique n'échappe pas à cette contrainte. Les énergies fossiles sont à la fois une source et un contenant d'énergie. En brûlant 1 kg d'essence, il est possible de générer 1000 Wh d'énergie. La densité énergétique est définie par ce rapport poids/puissance. Les batteries lithium-ion ont une densité énergétique de 150 Wh/kg à 200 Wh/kg, soit quatre fois plus que la technologie nickel-cadmium et six fois plus que le plomb. Mais cela reste 5 fois moins que les hydrocarbures liquides. Les chercheurs travaillent ainsi sur de nouveaux types d'électrodes capables de stocker plus d'ions, comme l'oxyde de manganèse (LiMnO_2) ou l'oxyde de nickel (LiNiO_2).

Diminuer les temps de charge des batteries des voitures électriques : le temps de charge d'une batterie est d'environ 8 h avec une prise domestique de 16A sous 220V. Il passe à 5 h avec la prise 32A destinée aux équipements de cuisine (prise four). Plus l'intensité de charge est élevée (plus le nombre d'électrons qui transitent est important), moins la charge est longue. Avec une prise 200A, il serait ainsi possible de charger la batterie en moins d'une heure, et de la charger à 50% de sa puissance nominale en vingt minutes. Cependant, une charge trop rapide peut endommager la batterie de la voiture électrique. Lorsque la puissance est trop importante, les ions lithium n'ont pas le temps de reprendre la forme originale sur l'électrode de graphite, à la surface de laquelle se forme une couche de lithium métallique (phénomène de lithium plating). Il existe donc une intensité à ne pas dépasser dans la batterie. L'alternative peut être de changer cette électrode de graphite en la remplaçant par une technologie plus performante, (feuille d'oxyde de titane par exemple), qui autorise une intégration des ions lithium plus rapide. La charge complète de la batterie deviendrait alors possible en 5 minutes !

Améliorer la sécurité des batteries des voitures électriques : le vieillissement des batteries et d'une manière générale la maîtrise des risques d'emballement thermique en situation normale ou abusive constitue un axe de progrès bien identifié générant une activité de R&D soutenue. Le développement de référentiel de certification volontaire (UL, USABC, INERIS, alliance SCHNEIDER- LEGRAND pour les connecteurs...) vise à garantir des exigences définies en termes de sécurité.

Contrairement aux batteries Cd/Ni ou aux batteries au plomb, les batteries au lithium ne sont pas liées à un système électrochimique unique. Elles peuvent présenter de nombreuses variantes en termes de cathodes, anodes et électrolytes. Les caractéristiques fonctionnelles et le niveau de « sécurité intrinsèque » de ces batteries sont clairement modulées par ces choix technologiques « secondaires » mais essentiels.

Diminuer les coûts des batteries des voitures électriques : les réductions de coût peuvent par exemple passer par la diminution du coût de l'électrode. Les chercheurs travaillent notamment sur une électrode en phosphate de fer, plus stable et moins chère que le cobalt, mais avec une densité d'énergie moindre. Le coût important des batteries des voitures électriques s'explique surtout par leur faible volume de production parce qu'il n'y a pas encore de demande, et par le fait que les outils de production sont calibrés pour des petites séries de prototypes. Le lancement d'un véhicule électrique populaire et les volumes qui en découlent devrait grandement contribuer à limiter les coûts de la batterie.

Renforcer l'approvisionnement et le recyclage du lithium (et d'autres éléments constitutifs des systèmes d'électrodes) des batteries de voiture électrique : les batteries comptent environ 3 kg^l de lithium. Ainsi, pour un marché mondial de 10 millions de véhicules électriques en 2020, il faudrait 35 000 tonnes de lithium pour les batteries. Ce chiffre est réaliste par rapport à la production mondiale : 27 000 tonnes par an. Les réserves mondiales sont localisées principalement dans des gisements inexploités, au Canada, en Afrique, en Australie, en Bolivie. Toute la filière d'approvisionnement est à créer, principalement dans des régions peu stables politiquement. Le développement de la voiture électrique présente un risque, à terme d'avoir certains impacts géopolitiques qui rappellent ceux associés à l'exploitation des gisements d'énergies fossiles.

Vers des batteries sans lithium ? : si le lithium venait vraiment à manquer (ce qui n'est pas la thèse la plus communément admise, au moins sur le moyen terme), la voiture électrique ne serait pas remise en cause pour autant. D'autres perspectives restent envisageables. Des batteries fonctionnant au magnésium sont par exemple en cours de développement, bien qu'elles présentent aujourd'hui des performances très limitées. Des équipes de chercheurs travaillent également à utiliser des enzymes de la biomasse afin de produire des molécules chargées électro chimiquement.

Une autre alternative à la batterie pourrait venir des avancées sur les super condensateurs. Ces composants utilisent le principe de l'électricité statique pour accumuler des charges d'électrons entre deux plaques de métal. Ils présentent l'avantage d'avoir une durée de vie quasiment illimitée, d'utiliser des matériaux plus simples et d'être bon marchés. En revanche, leur densité énergétique est aujourd'hui trop faible pour qu'ils soient appliqués seuls aux véhicules électriques. Des systèmes de stockage hybrides (marquant les principes de fonctionnement des batteries et ceux des supercondensateurs) sont également en développement.

En conclusion, la recherche actuelle est orientée essentiellement vers les batteries lithium-ion et les supercondensateurs. Il est donc intéressant de faire un point scientifique sur ces deux technologies.

De plus, il est intéressant d'évoquer les batteries ZEBRA. Avec une température interne de fonctionnement allant de 270 à 350 °C, la batterie Zebra est une batterie chaude sans effet mémoire et offre une densité énergétique de 120Wh/kgⁱⁱⁱ. Actuellement, EDF apporte son appui à la société GRUAU pour le développement et l'expérimentation d'un MICROBUS électrique équipé de batteries de nouvelle génération de marque ZEBRA produite par la société MES-DEA. La capacité d'énergie embarquée est suffisante pour assurer une journée d'exploitation en zone urbaine (autonomie d'environ 120 km) sans avoir recours à une recharge intermédiaire. Le taux d'autodécharge, à l'arrêt, reste le principal inconvénient de l'électrochimie associée à cette batterie dite Zebra.

4. LES TECHNOLOGIES DES VELOS ELECTRIQUES (VAE)

4.1 INTRODUCTION

Le vélo à assistance électrique est considéré légalement comme une bicyclette classique. Le décret n°95-937 d'août 1995 relatif à la prévention des risques résultant de l'usage des bicyclettes précise la nature d'un vélo : « *On entend par bicyclette tout produit comportant deux roues et une selle, et propulsé principalement par l'énergie musculaire de la personne montée sur ce véhicule, en particulier au moyen de pédales* ».

Par ailleurs, la Directive européenne 92/61/EEC indique qu'un VAE doit notamment respecter les caractéristiques suivantes :

- Assistance uniquement au pédalage ;
- L'assistance se coupe au-dessus de 25 km/h ;
- Moteur inférieur à 250 watts (puissance nominale continue).

Le VAE est un vélo qui comporte une assistance électrique. Cette assistance a pour objectif de fournir un complément au pédalage. Elle est constituée d'un moteur, de batteries, d'un contrôleur et de capteurs.

- **Le moteur** : selon les constructeurs et en fonction de l'utilisation, celui-ci se situe au niveau du pédalier, dans l'axe de la roue avant ou de la roue arrière ou déporté avec une transmission secondaire sur le pédalier ou l'axe de roue arrière.
- **Les batteries** : voir détails au paragraphe suivant.
- **Le contrôleur** : intègre les paramètres qui qualifient le comportement du vélo en fonction du profil utilisateur choisi par le constructeur. Il régule la consommation de courant et pilote le moteur dans ses différentes phases de fonctionnement : démarrage, régime continu, accélération... à partir des informations transmises par les capteurs.
- **Les capteurs** : suivant les modèles, des capteurs détectent la présence de pédalage, sa fréquence, l'effort exercé sur les pédales, la position d'un éventuel accélérateur, le freinage.

L'utilisateur dispose suivant les modèles de la possibilité de couper ou de doser le niveau d'assistance en roulant, par l'intermédiaire d'un sélecteur ou d'un "accélérateur".

4.2 TECHNOLOGIE DES BATTERIES

Différents types de batteries sont utilisées pour les VAE :

- les batteries au plomb (Pb)
- les batteries au nickel comprenant les Nickel Metal Hydrure (Ni-Mh) et historiquement les Nickel Cadmium (Ni-Cd)
- les batteries au lithium comprenant les Lithium-Polymères (Lipo) et les Lithium-ion (Li-ion)

Les constructeurs de VAE ont fait le choix entre les 2 types de batterie qui, jusqu'à fin des années 90, constituaient les 2 principales technologies :

- Des batteries au plomb (utilisées généralement en automobile).
- Des batteries Nickel-Cadmium (utilisées principalement pour les appareils électroportatifs).

Aujourd'hui, des technologies au lithium ou des couples Nickel-Métal Hydrure ont été développés offrant des performances supérieures à volume ou poids égal.

Type de batterie	Nickel-Cadmium	Nickel-Métal hydrure	Lipo
Tension (V)	24	24	36
Capacité de charge (Ah)	5	7	10
Autonomie (km)	35 à 40	60	60
Poids batterie (kg)	4	4	3
Nbre cycle charge	> 1000	> 1000	>1300
Prix batterie (€)	220	nc	nc
Prix vélos (€ en 2006)	>1000	>1500	>1500

Figure 4 : caractéristiques des batteries utilisées dans les VAE

La percée des vélos à assistance électrique est considérable en Chine, elle devient intéressante en Europe.

4.3 POSITIONNEMENT DE LA BATTERIE

La principale contrainte d'une batterie est son poids, en particulier en ce qui concerne les batteries au plomb. Afin de préserver un bon comportement routier et une bonne stabilité des VAE, les batteries sont placées de façon à avoir :

- Un centre de gravité bas (des batteries en position basse) ;
- Une répartition des masses sans cycliste équilibrée sur les deux roues ou plus importante sur la roue arrière (des batteries sur le cadre avant ou sous la selle).

5. ETAT DE L'ART DES TECHNOLOGIES BATTERIES ET DES SUPERCONDENSATEURS

5.1 INTRODUCTION

On distingue deux familles de systèmes électrochimiques capables de stocker de l'énergie : les accumulateurs qui stockent l'énergie par transformation d'énergie chimique, et les supercondensateurs qui stockent les charges selon un principe purement physique

- Les accumulateurs, constitués de deux couples électrochimiques composés de deux électrodes, immergées dans un électrolyte. Dès qu'interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui échangent des électrons, les ions générés circulent dans l'électrolyte. Pour disposer d'une grande énergie stockée, il faut d'une part un nombre important d'électrons échangés ainsi qu'une réaction associant un élément très oxydant et un élément très réducteur et d'autre part, il faut une parfaite réversibilité des processus électrochimiques ainsi que des matériaux de faible masse ou volume molaire. Les grandes familles d'accumulateurs (NiCd, NiMH, lithium-ion, lithium métal-polymère) sont caractérisées par une énergie spécifique et une puissance spécifique comprises respectivement entre 30 et 280 Wh/kg et entre 0,2 et 5 kW/kg à 10 secondes.
- Les supercondensateurs, dont le principe général de fonctionnement repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif entraîne le stockage ionique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte qui se comportent comme deux condensateurs en série. Les supercondensateurs sont caractérisés par une énergie spécifique 10 à 20 fois plus faible que celle des accumulateurs mais leur puissance spécifique peut être jusqu'à 10 fois plus élevée que celle des batteries au plomb. En revanche, elle est du même ordre de grandeur que les batteries lithium-ion à 20 secondes (figure 5).

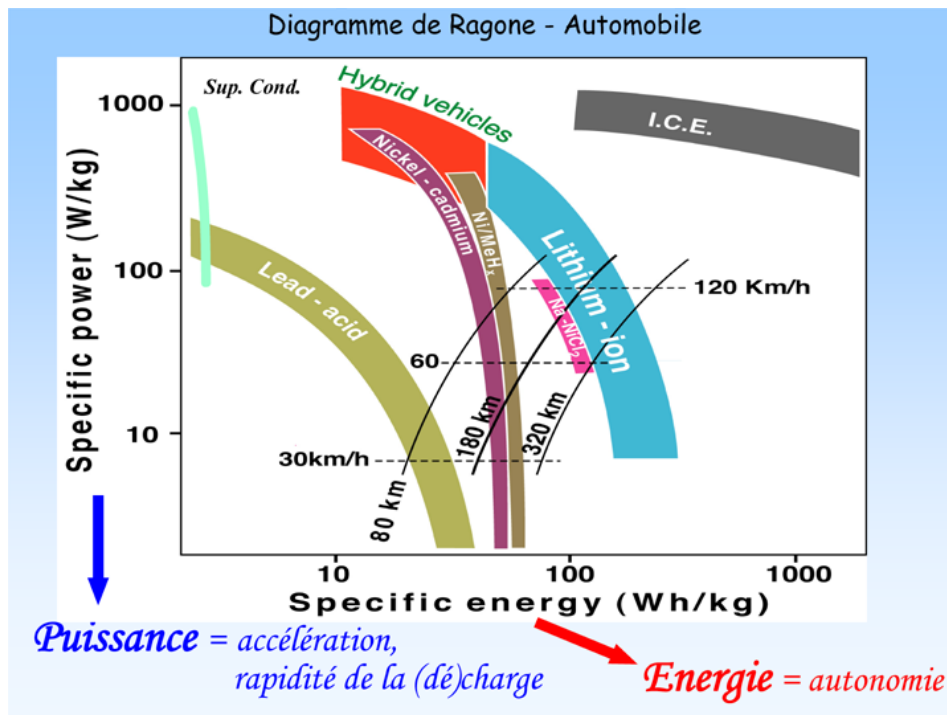


Figure 5 : Diagramme de Ragone des différents systèmes de stockage électrochimique

Signalons l'existence de premières applications (comme la compétition automobile par exemple) de système de stockage d'énergie cinétique, comme les volants d'inertie. Leur principe de base est que toute masse en mouvement acquiert de l'énergie cinétique. Dans un environnement particulier, cette énergie peut être conservée et restituée en fonction de la demande.

5.2 LA TECHNOLOGIE BATTERIE LITHIUM- ET LITHIUM METAL POLYMERE

5.2.1 Principe de fonctionnement d'une batterie

Le principe d'un élément de stockage d'énergie électrochimique repose sur l'exploitation de deux couples oxydo-réducteur, $Ox_1=Red_1$ et $Ox_2=Red_2$, se déroulant à deux électrodes différentes. Les potentiels d'équilibre des deux couples sont tels que $E_{eq2} > E_{eq1}$. Lorsqu'on relie les électrodes par un conducteur métallique, des électrons circulent de l'électrode négative vers l'électrode positive. En partant de l'électrode négative, le manque d'électrons crée une réaction d'oxydation. De même, en arrivant sur l'électrode positive, les électrons vont produire une réduction à l'interface électrochimique. L'ensemble de ce cycle a pour conséquence un dégagement d'énergie sur le circuit externe. La figure 6 représente le principe de fonctionnement d'une batterie en décharge.

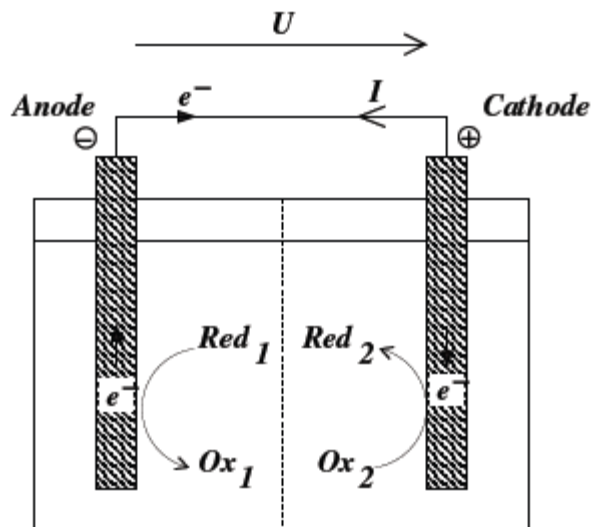
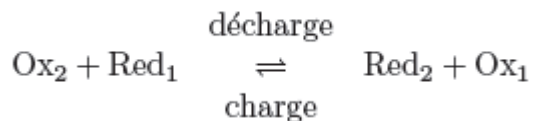


Figure 6 : principe de fonctionnement d'une batterie

Les générateurs électrochimiques rechargeables, communément appelés batteries ou accumulateurs sont des dispositifs dont les systèmes redox sont réversibles. Deux cas sont donc à dissocier selon que le système électrochimique fournit ou récupère de l'électricité. La réaction globale du système est donc :



Il existe de nombreuses technologies de batteries : Plomb à électrolyte acide, Nickel à électrolytes alcalins (NiCd, NiMH, NiFe), Lithium à électrolyte polymère solide et anode de lithium métallique en films minces ou à électrolyte organique liquide et électrode négative à insertion (Li-ion), alcalins (Ni/Zn, Mn/Zn). Cependant, comme mentionné en introduction, nous allons nous intéresser dans cette partie, uniquement à la batterie lithium ion et lithium métal polymère.

5.2.2 La batterie lithium ion et Lithium Métal Polymère (LMP)

La figure 7 présente les mécanismes se déroulant lors du fonctionnement d'une batterie Li-ION.

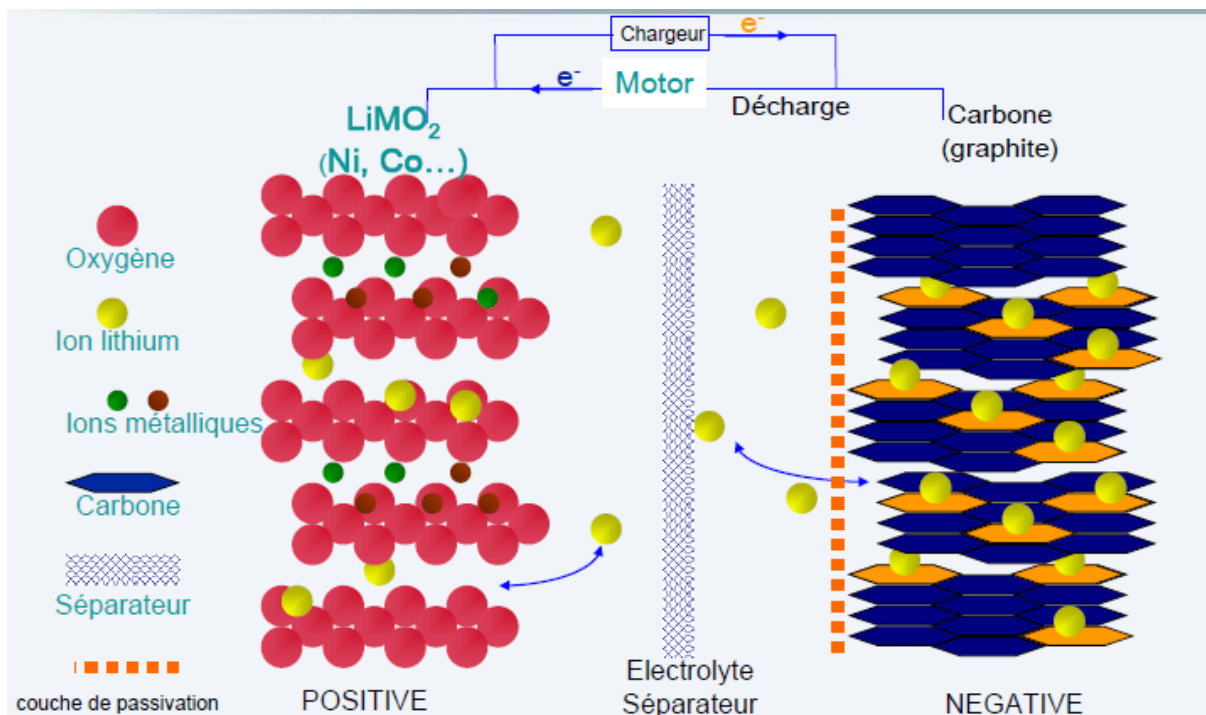


Figure 7 : principe de fonctionnement d'une batterie lithium-ion^{iv}

Il est important de comprendre que la batterie de puissance pour l'application automobile est en cours d'industrialisation et est une stratégie scientifique récente. Cependant, le saut technologique pour la commercialisation est actuellement en cours. Les avancées dans le domaine des batteries à base de lithium ont été nombreuses dans les vingt dernières années. L'intérêt majeur de cette technologie est de proposer des densités d'énergie plus élevées que les autres technologies. Cette grande densité énergétique vient du fait que le potentiel de l'électrode positive est de l'ordre de 2 à 5 V vs Li/Li⁺. Les batteries au lithium peuvent être composées d'une large gamme de matériaux ; la figure suivante regroupe les potentiels électriques des différentes électrodes susceptibles d'être utilisées dans ces batteries : de nombreuses configurations sont possibles. Cependant, la différence de potentiel entre les deux électrodes ne doit pas être trop élevée pour que l'électrolyte soit suffisamment stable.

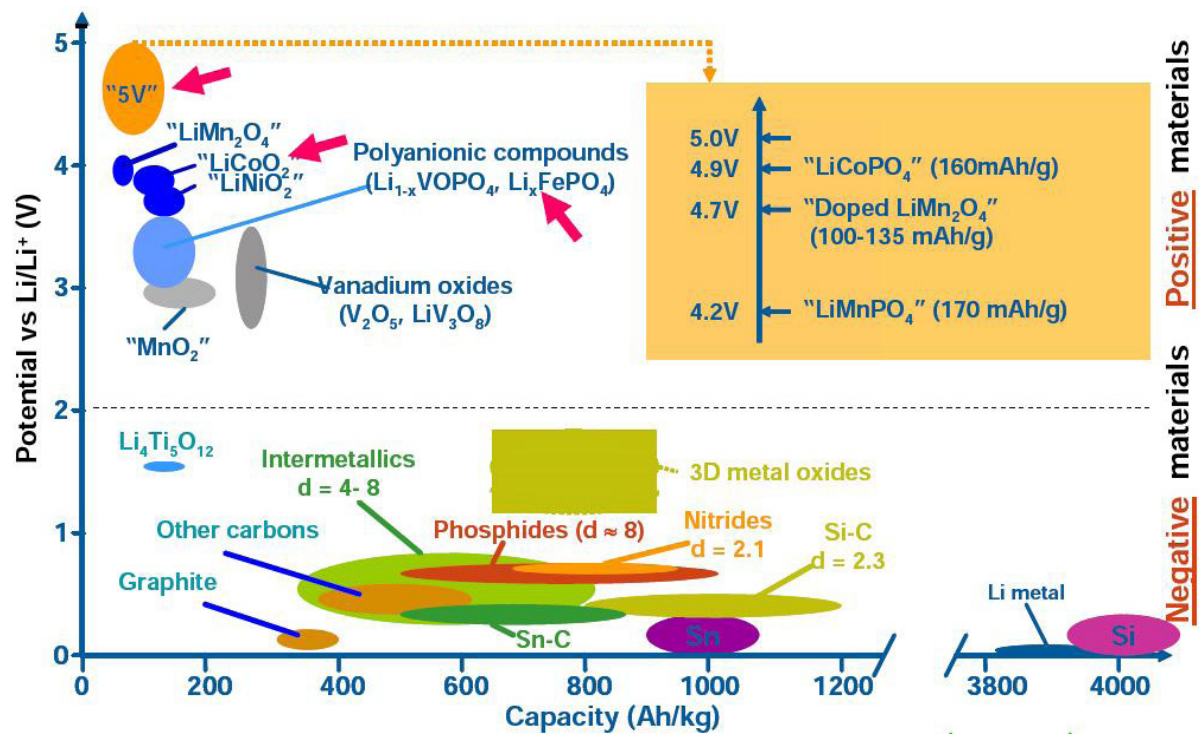


Figure 8 : présentation des électrodes positives et négatives des batteries Li-ion selon leur potentiel électrique vs Li/Li+ et leur capacité de stockage par unité de masse^v

Les technologies Li-ion sont généralement désignées par la composition de leur électrode positive (cathode), bien que la composition de l'électrode négative (anode) puisse aussi être un facteur de distinction. Le principal composé utilisé comme matériau de cathode est le lithium cobalt (LCo) ; il est en général associé à une anode en graphite. Cependant, pour des raisons de coût et de sécurité dues à l'utilisation de ce matériau, plusieurs autres composés sont proposés comme le composé lithium, nickel, cobalt et l'aluminium (NCA), le composé lithium fer phosphate (LiFePO₄), le composé lithium nickel cobalt manganèse (LiMn₂O₄/Ni,Co), le lithium manganèse (LMS ou LiMn₂O₄) et le manganèse nickel (LiMn₂O₄/Ni). Ces technologies ne sont pas au même stade de développement et ont des performances très variées (figure 9 et 10).

Name	Description	Electrodes: Positive (Negative)	Companies	Automotive Status	Power	Energy	Safety	Life	Cost
LCO	Lithium cobalt oxide	LiCoO ₂ (Graphite)	Various consumer applications (not automotive)	Limited auto applications (due to safety)	Good	Good	Low Mod.	Low	Poor
NCA	Lithium nickel, cobalt and aluminum	Li(Ni _{0.85} Co _{0.1} Al _{0.05})O ₂ (Graphite)	JCI-Saft ³ GAIA ³ Matsuhita ³ Toyota ⁶	Pilot ¹	Good	Good	Mod.	Good	Mod.
LFP	Lithium iron phosphate	LiFePO ₄ (Graphite)	A123 ³ Valence ⁵ GAIA	Pilot ¹	Good	Mod.	Mod.	Good	Mod Good
NCM	Lithium nickel, cobalt and manganese	Li(Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3})O ₂ (Graphite)	LiTcel (Mitsubishi) ³ Kokam ³ NEC Lamillion ³	Pilot ²	Mod.	Mod. Good'	Mod.	Poor	Mod.
LMS	Lithium manganese spinel	LiMnO ₂ or LiMn ₂ O ₄ (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	GS Yuasa ³ LiTcel (Mitsubishi) ³ NEC Lamillion ³ EnerDel	Devel	Mod.	Poor	Excel. Good	Excel. Mod.	Mod.
LTO	Lithium titanium	LiMnO ₂ (LiTiO ₂)	Altairnano ³ EnerDel	Devel.	Poor Mod.	Poor	Good	Good	Poor
MNS	Manganese titanium	LiMn _{1.5} Ni _{0.5} O ₄ (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)		Research ¹	Good	Mod.	Excel.	Unkwn.	Mod.
MN	Manganese titanium	Li _{1.2} Mn _{0.6} Ni _{0.2} O ₂ (Graphite)		Research ¹	Excel.	Excel.	Excel.	Unkwn.	Mod.

Figure 9 : comparaison multicritères des différentes technologies lithium en voie d'industrialisation^{vi, vii, viii, ix, x, xi, xii}

Chimie	Energie (matériaux seulement)	Vie calendaire	Sécurité	Management batterie	Coût
Li(NiCoAl)O ₂	329 Wh/kg	10 yr at -40°C 90% SOC	Réactivité cathode	Contrôle par tension vs. SOC	Référence
Li(NiMnCo)O ₂	478 Wh/kg	Lower than NCA Opportunity to improve	Réactivité cathode	Contrôle par tension vs. SOC	Close to reference
LiMn ₂ O ₄	419 Wh/kg	Lower than NCA Mn dissolution	Réactivité cathode	Contrôle par tension vs. SOC	Lower cathode material cost Balance of system same
LiFePO ₄	424 Wh/kg	Lower than NCA To be demonstrated	Limitée par réactivité solvant	Stratégie à développer	Lower cathode material cost Systems cost same

15%Co
33%Co
0%Co
0%Co

Figure 10 : caractéristiques des batteries suivant la nature de l'électrode positiveⁱⁱ

Les batteries lithium-métal associent une électrode de lithium (0 V vs Li/Li⁺) à une électrode d'oxyde de Vanadium (3-3.5 V vs Li/Li⁺). Elles sont aussi appelées lithium polymère car, pour limiter les risques de court-circuit par contact entre les deux électrodes dus à la croissance dendritique sur l'électrode de lithium, l'électrolyte liquide a été remplacée par un électrolyte polymère solide. Cette appellation peut amener à des confusions car des batteries Li-ion utilisent des électrolytes similaires et sont parfois désignées aussi comme lithium polymère. Le remplacement de l'électrolyte liquide par un électrolyte polymère améliore la sécurité des éléments et contribue à la réduction de la taille et du poids de l'élément.

		characteristics						
energy storage technology	energy		power [W/kg]	number of cycles @ 80% DoD	efficiency [%]	temperature range [°C]	cost [€/kWh]	
	[Wh/kg]	[Wh/l]						
PbAC	flooded	25 - 40	60 - 100	140 - 350	200 - 1500	70 - 75	20 - 40	100 - 190
	VRLA	30 - 40	80 - 100	140 - 300	300 - 1000	80 - 85	20 - 40	100 - 190
	compressed	40 - 50	100	140 - 250	800 - 1500	70 - 85	20 - 40	35 - 50
alkaline	NiCd							
	power	25 - 40	130	500	800 - 1500	70 - 75	-40 - 50	400 - 1000
	energy	40 - 50	130	120 - 350	800 - 1500	70 - 75	-40 - 50	400 - 1000
	NiZn	60 - 80	200 - 300	500 - 1000	200 - 1000	60 - 65	0 - 40	500 - 800
NiMH	power	40 - 55	80 - 200	500 - 1400	500 - 2000	70 - 80	0 - 45	700 - 1500
	energy	60 - 80	200 - 350	200 - 600	500 - 2000	70 - 80	0 - 45	700 - 1500
lithium based	Lilon							
	power	70 - 130	150 - 450	600 - 3000	800 - 1500	85 - 90	-20 - 60	500 - 1500
	energy	110 - 220	150 - 450	200 - 600	800 - 1500	85 - 90	-20 - 60	500 - 1500
LiPolymer	100 - 180	100	300 - 500	300 - 1000	90 - 95	-110	300 - 500	

Figure 11 : Comparatif des principales caractéristiques techniques des systèmes de stockages d'énergie embarqués^{xiii}

5.2.3 Description des constituants internes des batteries Li-ion

5.2.3.1 Electrode négative

Les matériaux d'électrode négative des batteries lithium-ion fonctionnent à bas potentiel (proche de 0 V vs Li/Li⁺). Ce sont des composés d'insertion à base de carbone sous forme graphite ou dopés par de l'étain ou du silicium, ou à base d'oxydes de métaux. La figure 12 représente les tensions à vide des différents types de carbone utilisables pour l'électrode négative.

O.C.V. of different carbon materials as a function of capacity

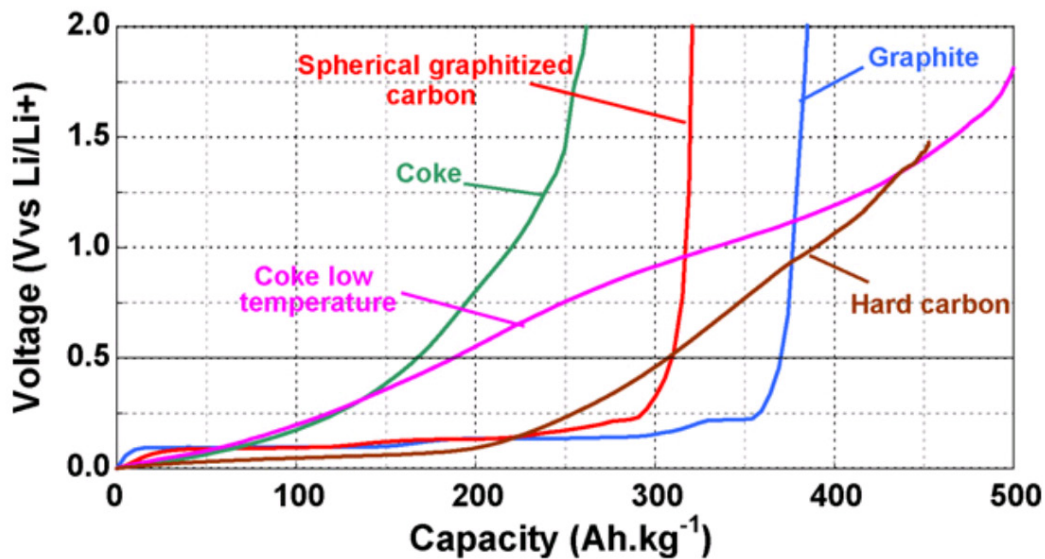


Figure 12 : Tension à vide des différentes électrodes négatives existantes^{xiv}

Les électrodes les plus répandues sont les électrodes de carbone sous forme de graphite. Grâce à sa structure lamellaire, le graphite possède des propriétés de conductivité électronique intéressante notamment lorsque l'on dope celui-ci par des accepteurs d'électron. De plus, il se prête à l'insertion de différents atomes, ions et mêmes molécules. Dans le cas du lithium, au maximum un atome de lithium pour six atomes de carbone peut être intercalé à pression atmosphérique, ce qui donne la composition Li_xC_6 avec $x=1$.

Lors de l'intercalation du lithium dans le graphite, un motif régulier de couches remplies et faiblement remplies de lithium est obtenu. Ce mode d'insertion est un processus thermodynamique qui consiste à remplir peu d'espaces interplans, mais de les remplir entièrement.

5.2.3.2 Electrode positive

L'électrode positive des batteries au lithium est composée généralement d'un matériau d'insertion. Pour les générateurs lithium-ion utilisant un électrolyte liquide ou polymère, les oxydes de métaux de structure hexagonale LiMO_2 avec M pouvant être du cobalt ou du nickel, ou de structure cubique (spinnelle) tel que LiMn_2O_4 , pour lesquels l'insertion et la désinsertion du lithium se produit autour de 4 V vs Li/Li+. Le cobalt tend à être remplacé partiellement ou complètement pour des raisons d'approvisionnement et de coût^{xv}. En effet, la production annuelle de cobalt est de 60000 tonnes. Son prix élevé est expliqué pour des raisons géopolitiques. C'est un matériau historique utilisé notamment dans les applications portables.

Pour les batteries utilisant des électrolytes polymères à fenêtre de stabilité électrochimique plus réduite, les composés utilisés sont des composés d'insertion dits à basse tension qui intercalent de façon réversible le lithium autour de 2 ou 3 V vs Li^+/Li , tels que l'oxyde de vanadium (V_6O_{13}), ou de manganèse (MnO_2). A moyen ou long terme, le matériau LiFePO_4 peut être amené à remplacer l'oxyde de lithium cobalt. Ce matériau à l'avantage d'être moins cher mais aussi d'améliorer la sécurité du fait de son potentiel plus faible. Malheureusement, il présente une conductivité médiocre.

5.2.3.3 L'électrolyte

L'électrolyte est composé d'un solvant dans lequel on ajoute un sel (milieu ionisé). Plusieurs combinaisons sel-solvant sont possibles et des maxima de conductivités ont été observés pour des solutions de sels de lithium (le plus souvent fluoré) dans l'acétonitrile (AN), la butyrolactone (γBL), le carbonate de diméthyle (DMC), le carbonate d'éthylène (EC), le carbonate de propylène (PC). Souvent ces solvants sont utilisés en combinaison, car un seul solvant présente rarement toutes les propriétés requises...

Les sels les plus utilisés dans les électrolytes pour les batteries au lithium sont le lithium hexafluorophosphate (LiPF_6) et le lithium tétrafluoroborate (LiPF_4). Il existe d'autres sels tels que le perchlorate de lithium (LiClO_4), (LiAsF_6), le tétrafluoroborate de lithium (LiBF_4) ou encore (LiCF_3SO_3), mais ces sels présentent des inconvénients de stabilité ainsi que des risques d'explosivité et de conductivité. La présence de fluor (ou de chlore) induit la nécessité d'envisager un risque d'émission d'halogénure d'hydrogène (HF principalement) en cas de décomposition thermique.

5.3 LA TECHNOLOGIE DES BATTERIES ZEBRA

Les batteries ZEBRA (Zero Emission Batteries Research Activity), à base de chlorure de nickel pour l'électrode positive et de sodium pour l'électrode négative, ont une énergie spécifique de l'ordre de 120 Wh/kg et une puissance spécifique égale à 180 W/kg (figure 9). Cette technologie a été spécifiquement mise au point pour les applications véhicules électriques, transport lourd et transport public. La température interne de fonctionnement est comprise entre 270°C et 350°C. C'est donc une contrainte de fonctionnement assez forte. Les éléments sont enfermés dans un caisson isolé dont les parois externes ont une température de l'ordre de 30°C.

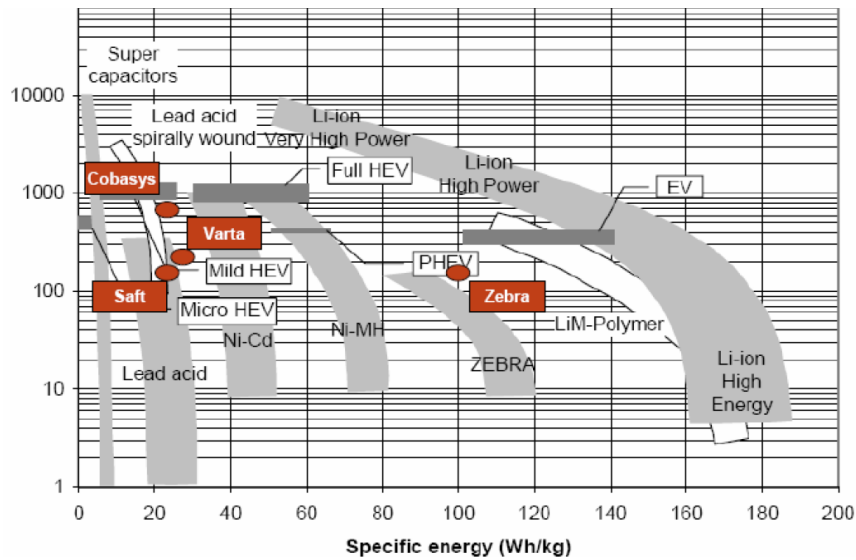


Figure 13 : diagramme de Ragone de différents systèmes de stockage de l'énergie et situation des batteries Zebra dans ce diagramme

Cette technologie semble réservée à des marchés de niches et est considérée par certains promoteurs de la filière comme une technologie de transition.

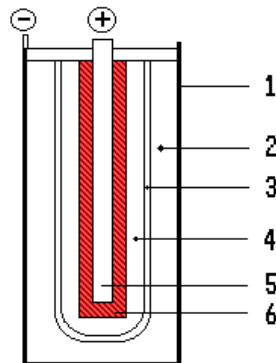


Figure 14 : constitution d'une cellule de batterie ZEBRA avec 1 : boîtier en acier, 2 : électrode négative en sodium, 3 : électrolyte solide $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, 4 : électrolyte liquide NaAlCl_4 , 5 : conducteur en nickel, 6 : électrode positive

5.4 LA TECHNOLOGIE SUPERCONDENSATEUR

5.4.1 Principe^{xvi}

Au même titre que tout condensateur, le supercondensateur (aussi couramment appelé supercapacité ou ultracapacité) stocke les charges selon un principe purement physique (et non par transformation d'énergie chimique).

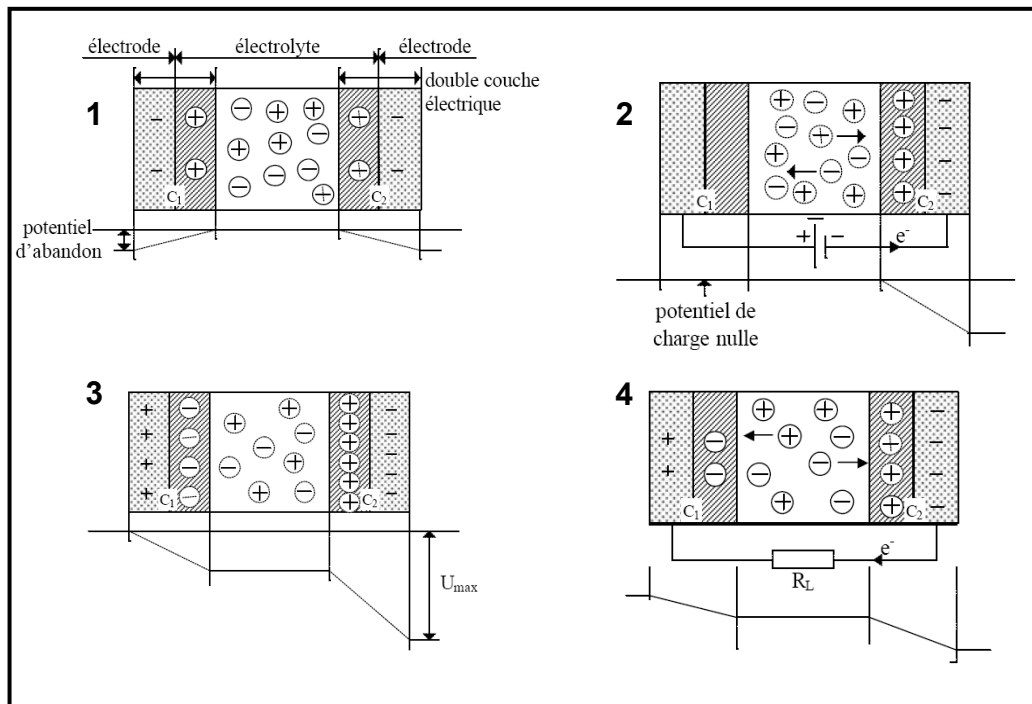


Figure 15 : les différents états de fonctionnement d'un supercondensateur : 1 : état déchargé, 2 : double couche électrochimique, 3 : état lors de la charge, 4 : état lors de la décharge

La figure 15 montre les différents états de fonctionnement d'un supercondensateur. A l'état déchargé (1), une accumulation de charges se crée spontanément à l'interface électrode/électrolyte, aussi bien du côté de l'électrode (q_{el}) que du côté de l'électrolyte (q_{ion}), q_{el} et q_{ion} étant respectivement les charges de nature électronique et ionique par unité de surface. La condition d'électro neutralité impose $q_{el} = -q_{ion}$. Un potentiel, dit potentiel d'abandon, apparaît alors à chaque interface, le signe et l'amplitude de ce potentiel étant spécifiques à chaque couple électrode/électrolyte. Cette accumulation de charges correspond à la double couche électrochimique (2). Lors de l'application d'une différence de potentiel aux bornes du supercondensateur, la distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée.

Si le potentiel atteint sa valeur maximale U_{max} du potentiel applicable (3), les deux doubles couches électrochimiques se comportent comme deux condensateurs et voient donc leur charge augmenter selon une loi du type $Q_{supercondensateur} = C_{électrode} \cdot U_{électrode}$.

A l'état chargé, la capacité totale du dispositif résulte des capacités (C_1 et C_2) des deux interfaces en série et est donc donnée par :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Lors de la décharge **(4)**, les ions et les électrons suivent le processus inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur. Pour utiliser au maximum la couche double électrochimique, les matériaux utilisés pour les électrodes doivent posséder à la fois de grandes facultés à conduire les charges électroniques et en même temps avoir une porosité adaptée au déplacement des ions.

5.4.2 Les différents types de supercondensateurs

Les supercondensateurs sont classés en trois catégories selon le mode de stockage de l'énergie dans la matière active : les processus de stockage faradiques réversibles, non faradiques et une combinaison des deux. Les pseudocondensateurs résultent d'une combinaison des principes des accumulateurs et des condensateurs à double couche électrochimique. Les électrodes sont en effet susceptibles de subir des réactions redox réversibles et donc de mettre en œuvre des processus faradiques. Les matériaux utilisés sont les polymères conducteurs ou les oxydes métalliques. A l'inverse, les condensateurs à double couche électrochimique (EDLC : Electric Double Layer Capacitor) stockent l'énergie par un simple déplacement de charges ioniques. Les matériaux utilisés sont à base de carbone (carbone activé, nanotubes de carbone, aérogels, ...). Enfin, notons l'existence de supercondensateurs hybrides composés soit de deux matières actives différentes au sein d'une même électrode, soit constitués de deux électrodes différentes.

	SUPERCAPACITES						
	EDLC ACN	EDLC PC	EDLC KOH	Polymères conducteurs	C/MnO2	Pb/C	NiOOH/C
Plage de tension de fonctionnement	[0 ; 2.8V]	[0 ; 2.8V]	[0 ; 0.9V]	[0 ; 3.0V]	[0 ; 2.0V]	[1.2 ; 2.0V]	[0.9 ; 1.5V]
E (Wh/kg)	4 - 6	4 - 6	<0.5	< 5	3 – 4	>10	3
E (Wh/L)	5 - 10	5 - 10	<1	< 5	3 – 5		5
P (kW/kg) (10s)	1 – 2	0.5 – 1.5	<1	< 2	0.5 – 0.8	1.2	0.5 – 1

Figure 16 : caractéristiques des différentes technologies de supercondensateurs existantes (source Batscap)

5.4.3 Les différences entre les caractéristiques des batteries et des supercondensateurs

La figure 17 résume les différences majeures entre les batteries (Pb-AGM, NiMH et Li-ion) et les supercondensateurs.

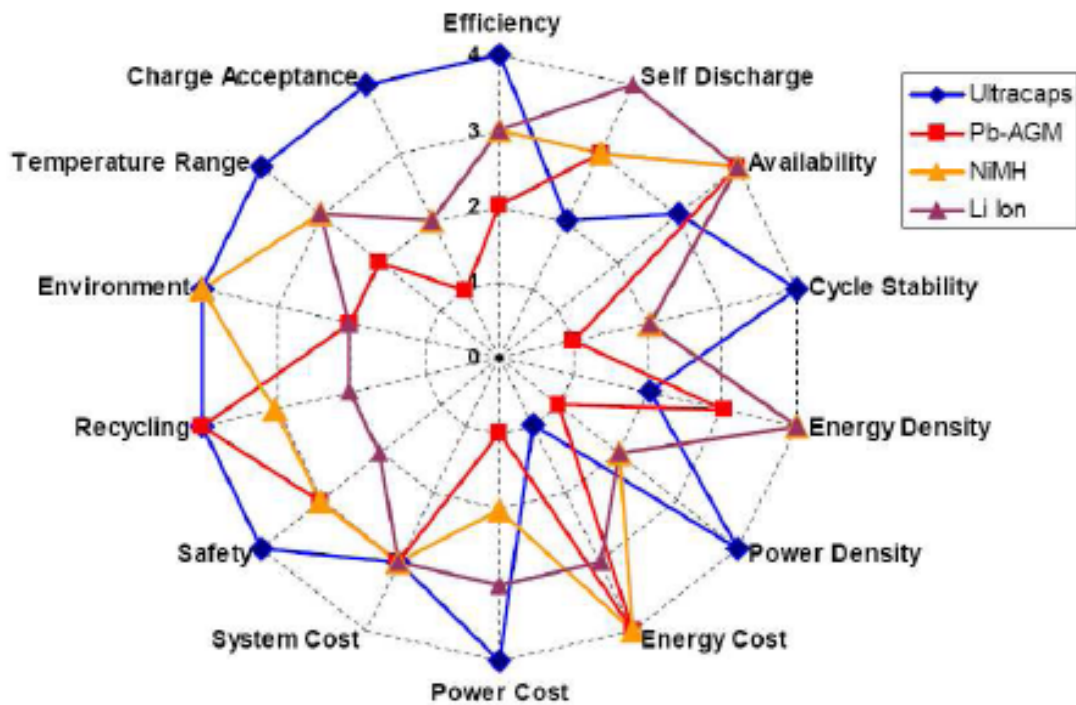


Figure 17 : Comparaison des performances des supercondensateurs par rapport à d'autres systèmes de stockage d'énergie (source Maxwell)

D'après ce graphique, il ressort que la sécurité intrinsèque des supercondensateurs est plus élevée que celle des batteries lithium-ion. Par exemple, contrairement aux batteries, lorsque la supercapacité est déchargée (et un état zéro charge n'est nullement préjudiciable à cet équipement), il n'y a plus de risque électrique.

Dans un second temps, ce graphique montre que la puissance des supercondensateurs est plus élevée que celle des batteries mais que l'énergie spécifique est plus faible. On confirme ainsi les données exploitées précédemment.

Enfin, une donnée essentielle est la cyclabilité. Un supercondensateur peut se charger/décharger un million de fois alors que la durée de vie des accumulateurs est plus faible.

6. CONCLUSION : PREMIERS ELEMENTS DE REFLEXION SUR LA SECURITE ET PERSPECTIVES

La sécurité des différents systèmes de stockage électrochimique susceptibles d'être utilisés dans le cadre de la filière du véhicule électrique résulte d'un compromis entre la sécurité, les performances intrinsèques de ces systèmes et les réductions des coûts de production.

Il n'y a pas de système idéal résolvant de manière intrinsèque les problèmes de sécurité.

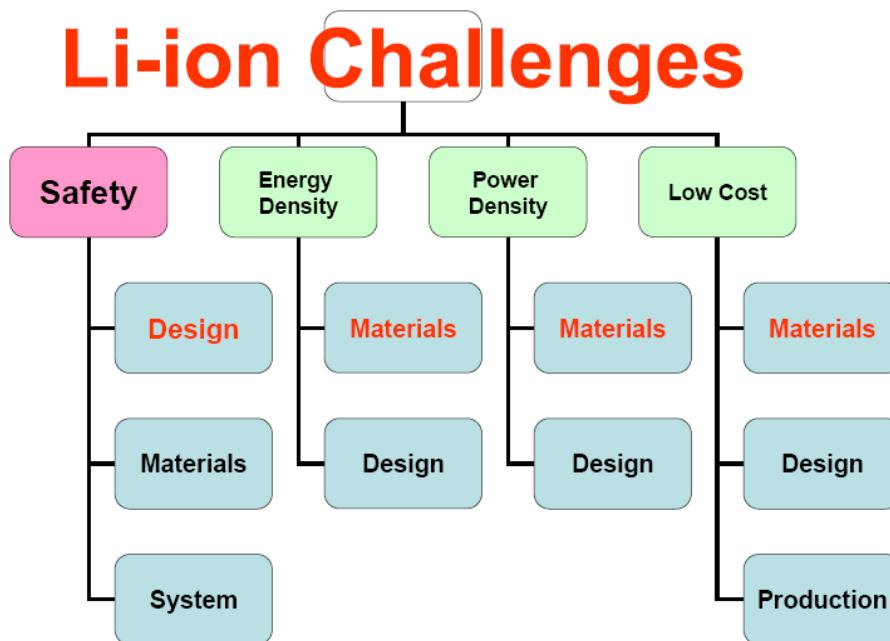


Figure 18 : positionnement en termes de challenge pour les systèmes lithium ion^{xvii}

Il est important de déterminer un profil de risque spécifique des véhicules électriques par rapport aux véhicules conventionnels.

Signalons aussi que les risques liés aux batteries sont supérieurs à ceux des supercondensateurs. Cependant, rappelons que le marché des batteries, notamment celui des accumulateurs LI-ION va vraisemblablement dominer le marché du véhicule électrique dans les prochaines années.

Cette étude ne traite pas de l'insertion des nanomatériaux dans les électrodes de batteries Li-ion. Parmi les alternatives intéressantes aux réactions d'insertion classiques du Li, l'introduction de matériaux nanométriques comme matériaux actifs constituant les électrodes est étudiée de manière intensive.

Par ce biais, de nouveaux mécanismes réactionnels ont pu être mis à jour, si bien que des matériaux peu coûteux et abondants tels que Fe_3O_4 ou LiFePO_4 deviennent aujourd'hui des candidats potentiels pour la fabrication des accumulateurs à ions Li du futur à la taille nanométrique. Il est donc important de réfléchir et d'axer la recherche sur la sécurité de tels dispositifs contenant des "nano". La sécurité des futurs dispositifs contenant des nanomatériaux et les impacts environnementaux devront donc être examinés attentivement dans le futur avant la mise sur le marché.

Enfin, les batteries Li-ion occupent aujourd'hui une place prépondérante dans les technologies actuelles de stockage d'énergie pour l'électromobilité et deviennent une alternative au pétrole pour le transport. Cependant ces applications sont actuellement limitées par la densité d'énergie des batteries au lithium, qui atteignent 200Wh/kg au mieux. Une rupture technologique sera nécessaire pour aboutir à une augmentation sensible de l'autonomie d'un véhicule électrique, comparable à celle d'un véhicule conventionnel. Ainsi, la technologie Lithium-air, qui utilise l'oxygène de l'air et qui est en cours de développement dans les laboratoires, pourrait contribuer à une telle rupture. En effet sa densité d'énergie peut potentiellement atteindre 2000Wh/kg soit 10 fois plus que les batteries lithium-ion^{xviii}.

7. REFERENCES

i http://fr.wikipedia.org/wiki/Automobile_hybride

ii Anne de Guibert, Colloque IFP PANORAMA 2010

iii METZGER M, BATTERY 2009, Canne, octobre 2009

iv Anne de Guibert, Colloque IFP PANORAMA 2010

v TARASCON J.-M. , ARMAND M. Issues and challenges facing rechargeable Li batteries. Nature, vol. 414, p. 359-367.

vi NELSON P., AMINE K., ROUSSEAU A. et YOMOTO H. 23rd International Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS 23), Anaheim, California, 2-5 Décembre, 2007.

vii KROMER, M. et HEYWOOD J. Electric Powertrains : Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. Rapport LFEE 2007-03, 2007, Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA

viii KALHAMMER F.R., KOPF B.M., SWAN D., ROAN V.P. et WALSH M.P. Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology. Rapport du ARB Independent Expert Panel 2007, prepare pour State of California Air Resources Board, Sacramento, California, 13 Avril 2007.

ix CHU, A. Nanophosphate Lithium-Ion Technology for Transportation Applications. 23rd International Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS 23), Anaheim, California, 2-5 Decembre, 2007.

x KOHLER, M. Lithium Phosphate Batteries used Successfully in PHEV Applications. Advanced Automotive Batteries Conference 2007, Long Beach, California, 14-18 Mai 2007.

xi ANDERMAN, M. Gap Analysis for Li-Ion Batteries in Automotive Applications. Advanced Automotive Batteries Conference 2007, Long Beach, California, 14-18 Mai 2007.

xii AXSEN J., BURKE A., KURANI K. Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) : Goals and the State of Technology circa. Institute of Transportation Studies. University of California. Davis, CA. UCD-ITS-RR-08-14. Mai 2008.

xiii SMETS S. Energy storage for HEV. Paris : IEA, 2002, 30 p

xiv COUSSEAU J.F., SIRET C., BIENSAN P., BROUSSELY M. Recent developments in Li-ion prismatic cells. J. Power Sources, 2006, vol.162, p.790-796

xv Anne de Guibert, Colloque IFP PANORAMA 2010

xvi Jean-Claude Lassègues, Techniques de l'Ingénieur : Supercondensateurs (2001) – Ref : D 3 334

xvii Z. Zhang (Chairman Cell group IEEE (P1625)

xviii Source CEA

REF. : DRA-10-111085-07180A