



Lundi 11 juin 2018

**LE STOCKAGE
ÉLECTROCHIMIQUE
DU FUTUR :**
QUELLES SOLUTIONS ?



**Un essai de synthèse du Colloque du 11 Juin 2018
dans le cadre des « Défis de la Chimie »**

Édouard FREUND - Directeur de Projet
Fondation internationale de la Maison de la Chimie



Lundi 11 juin 2018
**LE STOCKAGE
ÉLECTROCHIMIQUE
DU FUTUR :**
QUELLES SOLUTIONS ?



Le stockage sur batteries est resté longtemps cantonné à des créneaux restreints : alimentation de dispositif isolé (phares), poste de secours transitoire (avant démarrage du poste principal), voitures électriques et chariots élévateurs, du fait des performances limitées des batteries au plomb.

De nouvelles batteries Ni-Cd et NiMH ont permis l'alimentation autonome de l'électronique grand public, une mise sur le marché limitée de voitures électriques et le développement à une véritable échelle commerciale de véhicules hybrides.

Le développement de **batteries au lithium** (Li-ion et Li-métal polymère) dotées de **performances** inédites, notamment en terme de capacité massique, a déclenché une véritable révolution, en rendant crédible un **véhicule électrique** d'autonomie raisonnable, tout en apportant une amélioration dans le domaine de l'électronique grand public. Les progrès réalisés en liaison avec une **production industrielle** massive sont tels qu'un nouveau créneau d'application apparaît : la gestion (partielle) des **énergies renouvelables intermittentes**.

Le colloque a permis de faire le point sur les **améliorations** que l'on peut attendre des batteries pour 2 domaines d'application :

- Les véhicules électriques,
- La gestion des énergies renouvelables intermittentes.

Quelles solutions pour le futur ?

Quelles sont les limitations intrinsèques auxquelles la solution batterie se heurtera nécessairement ?

Conférences

Problématique de l'électrification des véhicules.

François BADIN - Responsable de Projet Filières Industrielles Carnot, IFP Énergies Nouvelles

Session 1 : Application aux véhicules électriques.

Comment le véhicule électrique peut rebondir sur les limites connues de sa batterie.

Bertrand LARGY - Pilote du Comité d'Experts Véhicules Électriques et Écosystème Énergétique de la SIA

Les batteries lithium (sodium-ion). Évolutions prévues.

Prof. Jean-Marie TARASCON - Professeur au collège de France, Directeur du RS2E, Collège de France

De nouvelles batteries au-delà des matériaux d'intercalation.

Prof. Philippe BARBOUX - Chimie-Paristech, Université Paris Sciences et Lettres



Session 2 : Application au stockage des ENR intermittentes.

Caractéristiques de production des ENR intermittentes et besoins de stockage. Caractéristiques des batteries.
Philippe STEVENS - Ingénieur Senior R&D, EDF

Le stockage électrochimique pour l'intégration des ENR.
Franck BOURRY - Responsable du Laboratoire Smart Grid, CEA-LITEN

Stockages massifs en Li-ion : exemples de réalisations et perspectives.
Michael Lippert - Marketing & Business Development Manager, SAFT Batteries



Conclusion : Potentiel et limites des batteries pour la traction électrique et le stockage des ENR intermittentes.

La présidence et l'animation des débats était assurées par le Dr. Marc J. LEDOUX, Directeur de Recherche CE Em du CNRS, Fondation de la Maison de la Chimie, Université de Strasbourg



Plan général

- > Introduction
- > Caractéristiques générales des batteries
- > Application aux véhicules électriques
- > Application au stockage des ENR intermittentes
- > Conclusion

Introduction

La présente synthèse se propose de mettre en lumière les principales conclusions que l'on peut tirer des exposés présentés lors du colloque du 11 Juin 2018 « **Le stockage électrochimique du futur : quelles solutions ?** », dans les deux domaines abordés : les véhicules électriques (de manière plus précise les véhicules légers électriques), et le stockage des ENR intermittentes.

Pour certains points particulièrement importants, nous faisons explicitement référence à l'un ou l'autre des exposés, auxquels le lecteur pourra se reporter sur le site de la Fondation de la Maison de la Chimie (<https://actions.maisondelachimie.com/colloque/le-stockage-electrochimique-du-futur-quelles-solutions>).

Caractéristiques générales des batteries

Loi générale reliant la composition et la capacité en Ah/kg

Sachant qu'un électron-gramme e- correspond à 96500 Coulomb, soit en Ah (1 Ah = 3600 C) : $96500/3600 = 26,8$ Ah, si M est la masse molaire en kg correspondant à 1 électron-gramme, la capacité est donnée par :

$$\text{Capacité} = 26,8 / M \text{ (Ah/kg)}$$

Prenons le cas d'une batterie lithium-ion de composition globale schématisée par la formule LiCoO₂ avec anode graphite (Li)C₆. Il vient :

$$M = 6C + \text{LiCoO}_2, \text{ soit } 6 \times 12 + 7 + 59 + 2 \times 16 = 170, 0,17 \text{ kg}$$

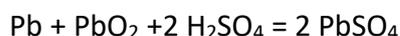
$$\text{Capacité} = 26,8 / 0,17 = 158 \text{ Ah/kg}$$

Connaissant la tension nominale à vide, soit 3,7 V, on en déduit la capacité théorique maximale (en Wh/kg) :

$$158 \times 3,7 = 585 \text{ Wh/kg}$$

valeur qui ne tient compte ni de l'électrolyte, ni de « l'emballage », ni de l'impossibilité de faire intervenir la totalité du lithium engagé dans la composition globale. Cette valeur -très élevée- est du même ordre de grandeur (facteur de l'ordre de 3) que les valeurs effectivement obtenues (c'est le « miracle » des batteries au lithium, fruit de 30 ans de développement).

Un calcul analogue dans le cas de l'accumulateur au plomb, selon la formule théorique de fonctionnement :



conduit à une valeur théorique de 97 Wh/kg, éloignée (facteur 3) des valeurs effectivement réalisées, en dépit d'une longue mise en œuvre.

On doit en déduire qu'il y a loin, en général, de la capacité théorique à la capacité pratique.

Revenant au cas du lithium, une manière d'augmenter la capacité massique est de « simplifier » les électrodes (anode Li-métal, et/ou électrode à air à la place des oxydes lamellaires).

De manière générale, des valeurs théoriques élevées de capacité massique (en Wh/kg) ne pourront être obtenues qu'avec des formulations ne mettant pas en œuvre des éléments lourds en proportion importante (mais cette condition n'est évidemment pas suffisante).

Architecture générale des batteries

Pour la majorité des applications visées, et quelle que soit la technologie de la batterie (solide avec électrolyte liquide, tout solide, ou au contraire à circulation liquide aux 2 électrodes), la cellule élémentaire constitutive de la batterie ne pourra fournir qu'une tension limitée à quelques volts (en pratique moins de 4 volts), avec une densité de courant de l'ordre de quelques dizaines de mA/cm², ce qui conduit à la fois à des puissances et des capacités limitées. Les batteries sont de ce fait constituées -sauf application particulière- d'un assemblage de cellules élémentaires à la fois en montage série (pour atteindre la tension

requise : par exemple quelques centaines de volt pour les applications traction automobile) et parallèle (pour atteindre des puissances élevées : puissance = tension x intensité). Par exemple, si l'on souhaite disposer d'une tension de 400 Volt et d'une puissance de 40 kW, il faut mettre en série un peu plus d'une centaine de modules (de tension nominale 3,7 Volt), et de même plusieurs en parallèle pour limiter l'intensité au niveau de chaque module, ce qui peut conduire à des ensembles de plusieurs milliers de modules élémentaires par batterie pour les applications nécessitant à la fois puissance et capacité de stockage.

Relation capacité-puissance

Retenons : fortes puissances = très grande surface active, faibles distances entre électrodes ; grande énergie (ou capacité) = grande quantité de matière active.

Il y a en fait, comme l'illustre la figure 1, une relation inverse pour la plupart des technologies de batteries disponibles -à l'exception des batteries à circulation- entre puissance et capacité, comme l'illustre la figure 1 :

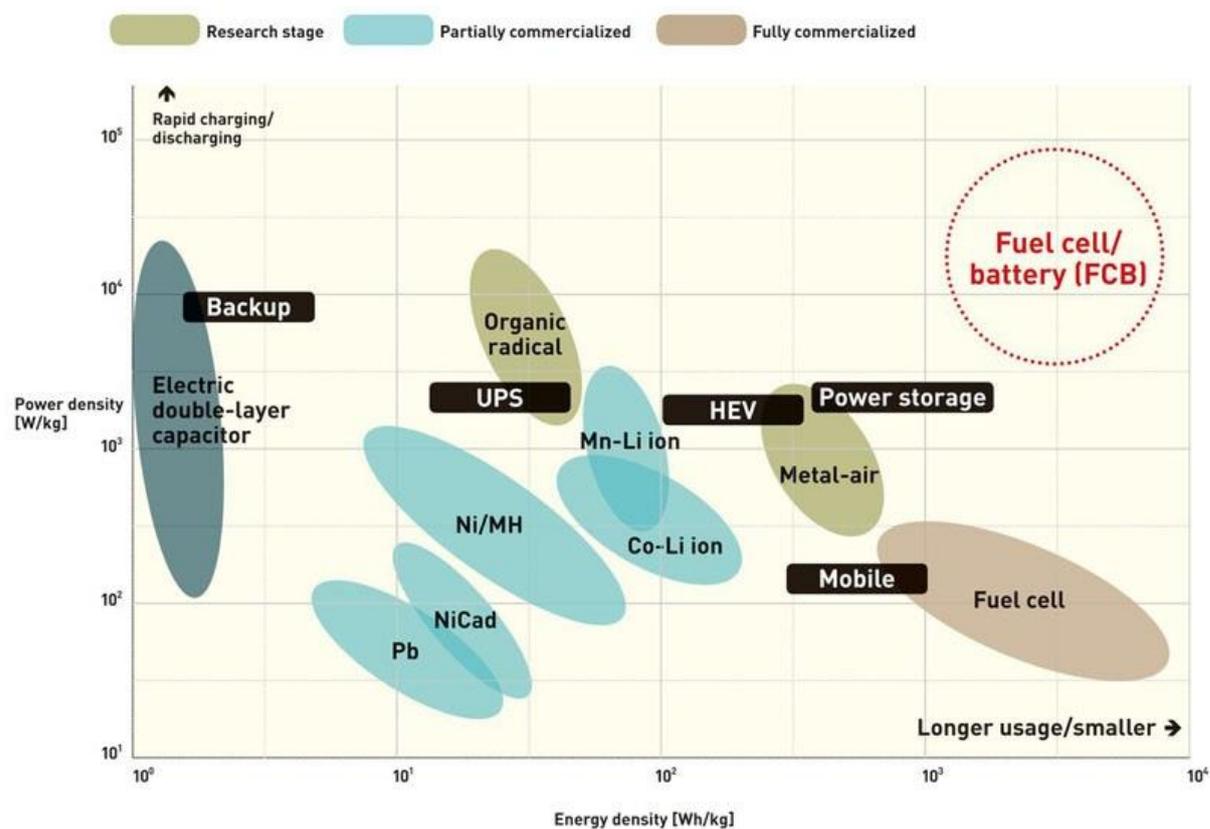


Figure 1 : Relation puissance- énergie pour différents types de batteries
(Philippe Barboux, Chimie-Paristech, Université Paris Sciences et Lettres)

Il faut remarquer sur cette figure en coordonnées logarithmiques que les technologies de batterie représentées sont toutes capables de fournir une puissance (en kW/kg) d'au moins 3 fois leur capacité (en kWh/kg) ce qui est bien connu pour la vieille batterie au plomb. Il faut également retenir de ces données que certaines technologies peuvent conduire à des batteries capables de fournir de fortes puissances, en dépit de leur capacité limitée (cas de NiMH).

Régimes de charge

La « chargeabilité », et, de manière pratique, la vitesse de charge compatible avec une bonne durée de vie de la batterie, sont une caractéristique très importante pour la plupart des applications. À noter qu'une charge rapide implique une source de courant disposant de la puissance requise, ce qui peut poser problème en dehors de sites dédiés (par ailleurs coûteux à installer et alimenter).

Traditionnellement, et notamment pour les batteries au plomb, on recommande une charge lente à $C/10$, ce qui est rédhitoire pour beaucoup d'applications.

De manière générale, la vitesse de charge pour des batteries de forte capacité (plusieurs dizaines de kWh) est limitée par la puissance admissible par la batterie, elle-même du même ordre de grandeur que la puissance que peut produire cette batterie, soit comme vu précédemment au maximum de l'ordre de $2C$.

Par ailleurs, la vitesse de charge doit être adaptée en fonction de l'état de charge de la batterie : élevée au départ, et diminuant progressivement jusqu'à charge complète.

La figure 2 ci-dessous extraite de la conférence de Bertrand Largy en donne un exemple dans le cas d'une batterie Li-ion pour automobile.

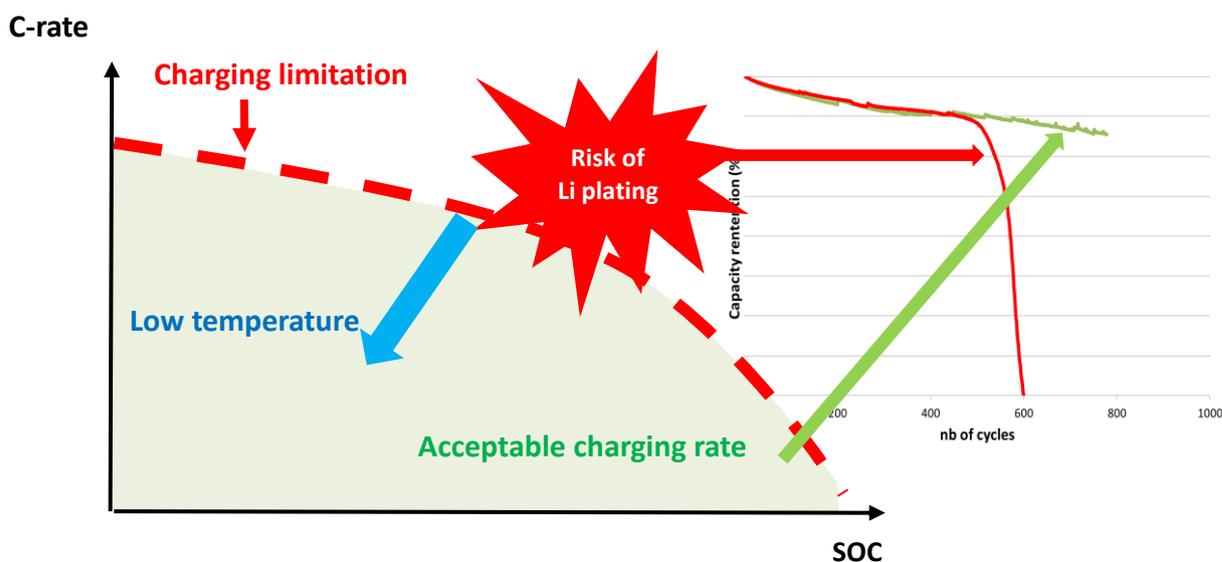


Figure 2 : Forme de la courbe de charge d'une batterie Li-ion
(Bertrand Largy, Comité d'Experts Véhicules Électriques et Écosystème Énergétique de la SIA)

Ce problème sera examiné plus en détail dans la partie Application aux véhicules électriques.

Durée de vie

La durée de vie d'une batterie dépend assez largement de son utilisation, mais aucune batterie n'est éternelle, même en l'absence d'utilisation.

La durée de vie est souvent exprimée en nombre de cycles de charge-décharge pour une décroissance donnée (par exemple 10%) de la capacité initiale.

Un nombre de cycles supérieur à 1000 (voire quelques milliers) est généralement requis pour la majorité des applications.

Pour des applications particulières (examinées dans la partie Applications), le nombre de cycles requis est beaucoup plus élevé. Ceci peut être obtenu en grande partie en limitant le domaine de fonctionnement de la batterie autour d'un niveau de charge déterminé, ce qui a évidemment pour conséquence de limiter de manière drastique la capacité utile de la batterie.

La mise au point de nouvelles batteries se heurte nécessairement à ce problème de durée de vie, lui-même lié à des phénomènes parasites rencontrés dans d'autres domaines de la chimie (réactions catalysées, notamment sur catalyseurs solides) :

- réactions parasites par rapport à la réaction principale recherchée, se produisant au niveau des électrodes, et/ou au sein de l'électrolyte. On peut chercher à inhiber ces réactions par des additifs appropriés ;
- contraintes mécaniques lors des changements de phase de certains matériaux constitutifs de la cellule élémentaire, entraînant progressivement la ruine de la structure initiale.
- La structure des batteries modernes, constituées d'un nombre élevé d'éléments de faibles dimensions, ainsi que la possibilité de diagnostic de fonctionnement cellule par cellule via des interfaces complexes sont des éléments favorables.

Principaux types de batteries

La batterie au plomb

Il est intéressant d'examiner les caractéristiques et performances de la batterie au plomb à titre de référence, sachant que :

- 1) les batteries au plomb restent largement utilisées sur certains créneaux particuliers, pour lesquels leurs limitations ne sont pas rédhibitoires ;
- 2) les problèmes rencontrés sont pour une large part génériques.

Leur faible capacité en poids : 20-40 Wh/kg est partiellement compensée par leur capacité en volume : 40-100 Wh/l, plus proche de celle d'autres types de batterie.

Le problème de la capacité massique les rend impropres pour l'application véhicules électriques, hors cas particuliers (voiturettes, mais aussi jusqu'à une date récente chariots élévateurs, créneau sur lequel elles sont en passe d'être concurrencées par la pile à combustible à hydrogène).

D'autres défauts : auto-décharge (2-5% / mois), nombre de cycles limité à 500-1000, rendement de charge-décharge 70-75%, nécessité de charge lente (C/10) pour assurer une durée de vie acceptable sont compensés par un rapport puissance/capacité de l'ordre de 3, et surtout par une filière de recyclage efficace, ceci pour un coût faible, inférieur à 100 euros par kWh.

Il est donc probable que ce type de batterie conservera une partie de ses domaines d'application actuels.

La batterie NiMH

Ce type de batterie, resté longtemps marginal, a été largement utilisé dans les véhicules hybrides Toyota, même après l'apparition de batteries lithium-ion performantes.

La capacité est moyenne (60-80 Wh/kg), ainsi que le nombre de cycles de charge-décharge. Par contre, la durée de vie est élevée, et l'auto-décharge limitée (de l'ordre de 10-15% / mois). Surtout, des réalisations appropriées permettent des puissances de charge-décharge très élevées ($P(\text{kW}) > 10 C(\text{kWh})$), comme le montre la figure 1.

Ce sont ces caractéristiques particulières qui ont permis le développement et le succès commercial des véhicules hybrides (non rechargeables) de Toyota (voir paragraphe dédié aux véhicules hybrides ci-dessous). Cette « expérience » commerciale sur plus de 2 décennies illustre la possibilité d'utiliser des batteries « convenablement choisies » pour alimenter des installations à titre temporaire (durées courtes) selon des cycles de charge-décharge partielle, qui peuvent être en nombre très élevé par rapport au nombre très limité de cycles de charge-décharge profonde, donc avec une durée de vie importante, bien entendu au détriment de la capacité (mais pas de la puissance).

La famille des batteries au lithium

Cette famille comprend : les batteries désormais largement commercialisées Li-ion, la batterie Li métal polymère, et des batteries en développement ou au stade recherche-développement : batteries Li-ion « tout solide », batterie Li-air, et batterie Li-soufre.

Batteries lithium-ion commerciales

Ce sont celles qui sont utilisées à la fois pour les voitures électriques et la petite électronique. Leur composition comprend une cathode constituée d'un oxyde lamellaire de composition complexe comprenant divers métaux, dont le cobalt, incontournable, le manganèse et le nickel, une anode graphite éventuellement partiellement substituée par le silicium, et un électrolyte organique complexe avec additifs.

Une description de la répartition actuelle des diverses formules est disponible sur la figure 3 ci-après :

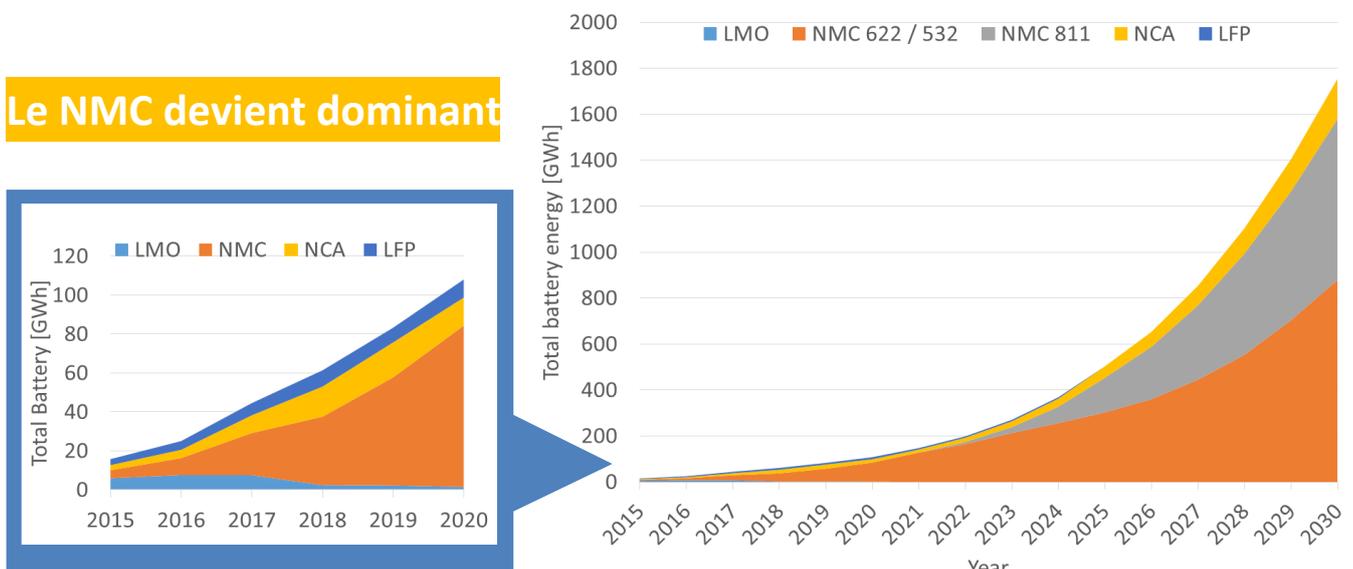


Figure 3 : Répartition des divers types de batterie Li-ion commerciales
(Bertrand Largy, Comité d'Experts Véhicules Électriques et Écosystème Énergétique de la SIA)

La principale caractéristique qui a promu ce type de batterie pour les applications précitées est la capacité massique qui atteint aujourd'hui 240 Wh/kg (un peu plus de 4 kg/kWh, soit malgré tout 200 kg pour 50 kWh).

Comme le montrent les diagrammes paramètres ciblés/valeurs atteintes (figure 4), des compromis sont nécessaires entre : capacité (en Wh/kg), coût, durabilité, sécurité (résistance au feu) et puissance (acceptable pour la recharge rapide). On peut ajouter le caractère recyclable et la faible teneur en éléments « critiques » (tel que le cobalt).

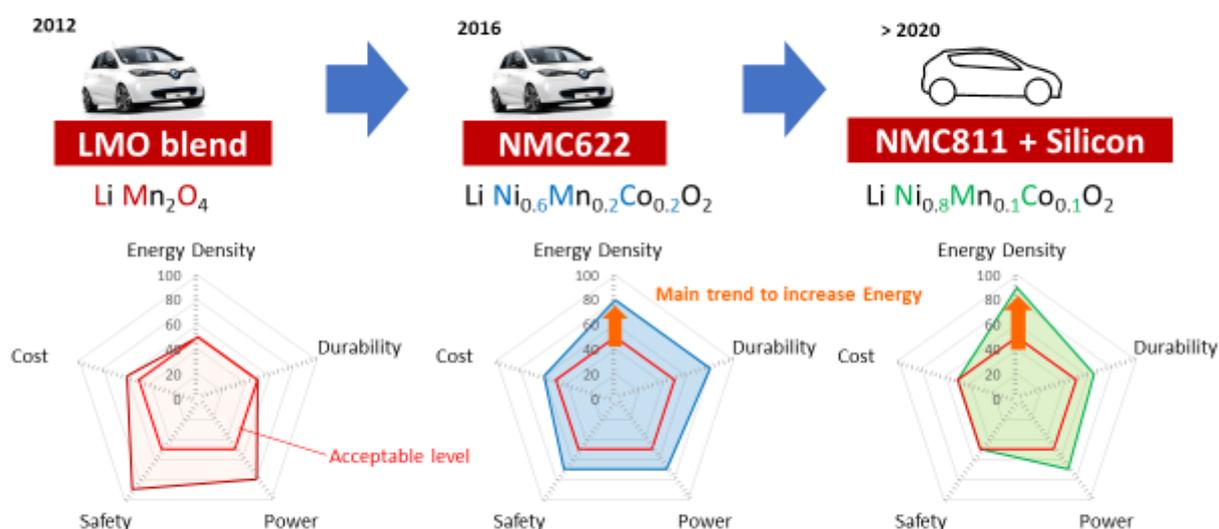


Figure 4 : Évolution des caractéristiques des batteries Li-ion commerciales
(Bertrand Largy, Comité d'Experts Véhicules Électriques et Écosystème Énergétique de la SIA)

Qu'en est-il de ces divers paramètres ?

La durabilité est liée au nombre de cycles de charge-décharge profonde, pour une dégradation donnée des performances.

Une bonne estimation peut être tirée du comportement de ces batteries dans les smart phones.

Il faut cependant noter qu'une batterie « usée » n'est pas « morte ».

La puissance maximum délivrée ou acceptable pour la charge rapide est de l'ordre de $P(\text{kW}) = 2C(\text{kWh})$, ce qui d'une part est compatible avec les applications, d'autre part conduit à une recharge rapide complète d'une durée de 30-40 minutes (ou une recharge partielle significative en 15 minutes).

On peut rappeler, comme discuté au paragraphe caractéristiques générales des batteries, qu'une augmentation de la puissance se ferait au détriment de la capacité, toutes choses égales par ailleurs.

Le coût de la batterie, aujourd'hui de l'ordre de 150 euros le kWh (soit 10 000 euros pour 50 kWh...) pourrait descendre en dessous de 100 euros le kWh, ce qui contribuerait évidemment à rendre plus accessible les petites voitures électriques.

La sécurité, apparemment suffisamment maîtrisée en l'état, serait renforcée par l'élimination de l'électrolyte liquide (batterie tout solide).

Que peut-on attendre de la technologie Li-ion actuelle ?

Au mieux, comme l'indique la figure 5, en 2025 : +50% de capacité à iso coût iso-volume (ou poids), ce qui améliorerait leur utilisation sans résoudre totalement les problèmes associés.

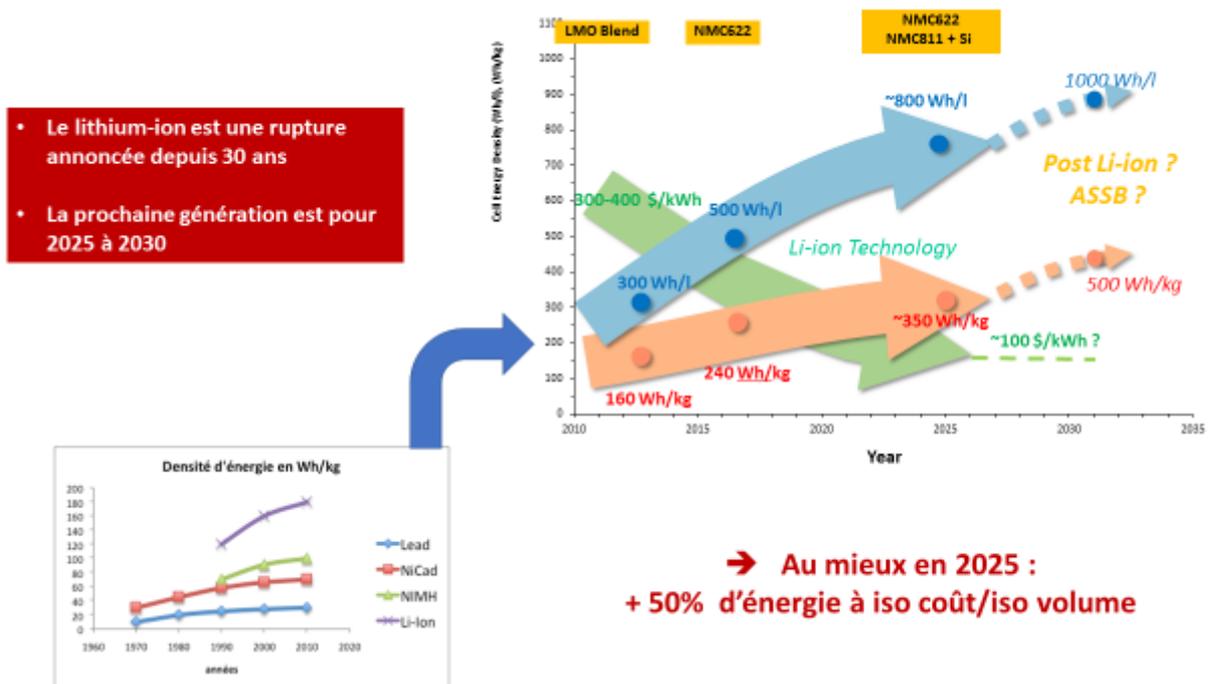


Figure 5 : Évolution attendue des batteries Batterie

(Bertrand Largy, Comité d'Experts Véhicules Électriques et Écosystème Énergétique de la SIA)

La batterie Li-métal polymère

C'est la batterie produite par le Groupe Bolloré qui équipait les voitures Autolib. Cette batterie « tout solide » présentait des caractéristiques intéressantes :

- capacité 100 Wh/kg, puissance / charge de l'ordre de 1,5,
- une bonne sécurité et recyclabilité, sans mise en œuvre d'éléments tels que Ni,Co,
- mais, en regard, un défaut rédhibitoire : nécessité de maintien en température (60-80°C), y compris à l'arrêt, ce qui excluait un usage générique.

Cette technologie est donc limitée à des usages particuliers (notamment le stockage stationnaire).

La batterie Li-ion « tout solide »

Il s'agit avant tout de remplacer l'électrolyte liquide par un conducteur ionique complexe, ce qui permettrait d'améliorer la sécurité (en regard de certaines compositions de l'électrolyte), d'augmenter la capacité, notamment en Wh/l (compacité), et d'augmenter la puissance, donc la vitesse de charge (charge ultra rapide).

De nombreux obstacles restent apparemment à franchir, même si des annonces récurrentes de constructeurs apparaissent régulièrement sans confirmation pratique.

Les batteries Li-air

La simplification apportée par l'électrode à air conduirait à un gain en énergie en principe très important, de l'ordre de 2 à 3 au minimum par rapport aux réalisations actuelles de Li-ion. L'atteinte de ce Graal ne semble pas pour un avenir proche.

La batterie Lithium-soufre

Cette batterie fonctionne avec une anode Li métal et une cathode soufre.

La densité d'énergie potentielle est très élevée (2600 Wh/kg), la batterie ne mettant en œuvre en principe que des matières premières non critiques.

Il s'agit pour l'instant de projets de recherche développement, avec de nombreuses difficultés à résoudre (notamment les réactions parasites Li-S), avant d'aboutir à l'objectif fixé : une énergie d'au moins 500 Wh/kg.

Les batteries Na-ion

L'un des problèmes mis en avant par rapport à un usage étendu des batteries Li-ion est l'approvisionnement en lithium et la difficulté du recyclage du lithium (et d'autres éléments constitutifs, notamment le cobalt).

La substitution du lithium par le sodium, élément « commun », résoudrait au moins partiellement ces problèmes, avec une perte a priori limitée de l'énergie de la batterie toutes choses égales par ailleurs.

En réalité, il ne s'agit pas d'une simple substitution. Il s'avère nécessaire de repenser entièrement la composition de la batterie, tant au niveau des électrodes que de l'électrolyte.

Des premiers prototypes ont pu être mis au point (CEA + RS2E), le principal problème rencontré (autodécharge importante à 50°C) a pu être corrigé via une nouvelle formulation de l'électrolyte, aboutissant à une batterie de capacité 105 Wh/kg, stable (3000 cycles), capable de fournir 80% de cette capacité sous 10C, ce qui est particulièrement favorable pour certains créneaux d'application.

Les batteries développées en France seront produites industriellement par la société TAMAT.

Les batteries zinc-air

Bien connues sous la forme de piles bouton (non rechargeables), les batteries zinc-air rechargeables sont basées sur la réaction du zinc métal avec l'oxygène de l'air, avec un électrolyte alcalin.

De nombreuses difficultés concernent à la fois l'anode (formation de dendrites de zinc), la cathode (électrode à air : nécessité de catalyseurs, dégradation par oxydation de certains composants), et l'électrolyte (carbonatation par le CO₂, autres impuretés de l'air).

Diverses sociétés proposent des prototypes, et la société ZnR batteries, filiale technologique d'EdF, est en cours de commercialisation des batteries ZINIUM pour le stockage résidentiel de l'électricité ex photovoltaïque.

Les performances seraient de l'ordre de 2 fois celles de la batterie au plomb en termes de capacité (65 à 80 Wh/kg), puissance et durée de vie.

Les batteries redox-flow

Il s'agit de batteries constituées de 2 demi modules, eux-mêmes constitués d'une solution d'électrolyte reliée à un réservoir par l'intermédiaire d'une pompe, la séparation étant réalisée par une membrane sélective pour les ions.

La plus étudiée est basée sur des sels de vanadium, l'une des électrodes utilisant le couple V(IV) / V(V) (VO_2^+ / VO_2^{2+}), l'autre le couple V^{3+} / V^{2+} , avec pour électrolyte H_2SO_4 1,5-2 M (+ sel de vanadium).

L'intérêt de ce type de batterie est d'une part sa bonne réversibilité, d'autre part son rendement élevé, et la possibilité de compenser les inévitables réactions parasites par addition d'électrolyte neuf.

Par contre, l'énergie est limitée (pour le couple vanadium : 15-25 Wh/kg) et les quantités de vanadium mises en œuvre, importantes peuvent être limitantes, même si le recyclage est a priori facilité. Ces batteries sont clairement destinées au stockage (massif) de l'électricité issu des ENR intermittentes.

Application aux véhicules électriques

Cas particulier : les véhicules hybrides et hybrides rechargeables

Avant d'analyser le cas des véhicules électriques actuels et futurs, il est intéressant de s'arrêter au passage sur les véhicules hybrides et hybrides rechargeables, véhicules dont les caractéristiques et les performances sont désormais bien documentées, notamment en ce qui concerne les batteries mises en œuvre (figure 6) :

Véhicule à motorisation hybride rechargeable

- Décharge progressive de la batterie (*Charge Depleting - CD*)
- Maintien de la charge à son minimum autorisé (*Charge Sustaining - CS*)

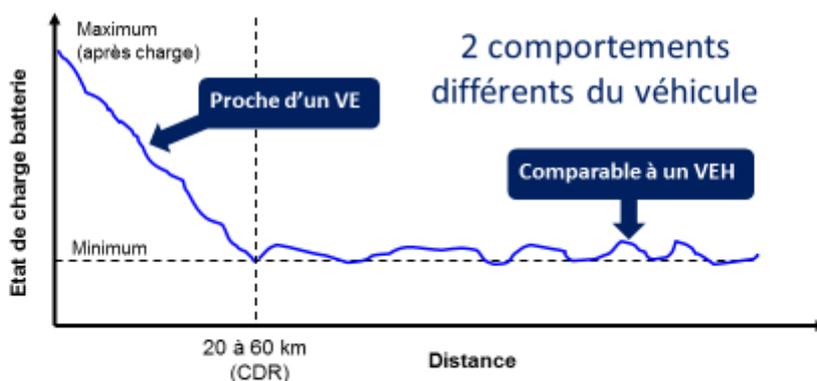


Figure 6 : Fonctionnement d'un véhicule hybride rechargeable
(Francois Badin, IFPEN)

Si l'on considère le cas de la Prius Toyota hybride, on peut retenir les points importants suivants :

- batterie NiMH (et non Li-ion). Nous avons vu que cette batterie se caractérise par un rapport puissance (charge / décharge) particulièrement élevé ;
- capacité très limitée (un peu supérieure à 1 kWh) ;
- puissance disponible en mode électrique élevée (supérieure à 10 kW), rapport puissance (kW)/capacité (kWh) > 10 ;
- autonomie en mode électrique réduite (1-2 km) correspondant à l'usage d'une fraction de la capacité de la batterie (pour la Prius1, +/- 6% autour d'un niveau de charge de 50%) ;
- récupération efficace en décélération, le freinage étant assuré majoritairement par le moteur électrique fonctionnant en générateur ;
- durée de vie globale élevée (8 ans et plus), notamment pour des véhicules circulant majoritairement en milieu urbain, alors que dans ce cas de très nombreux cycles de charge-décharge interviennent dans une journée.

De cette longue expérience (plus de 20 ans), on peut tirer un certain nombre de conclusions concernant ce type de voiture électrifiée et la batterie associée.

En premier lieu, une durée de vie importante peut être obtenue en limitant la profondeur de décharge, et en utilisant la voiture pour des trajets courts, avec recharge partielle. Ceci n'est évidemment pas compatible avec la recherche d'une forte autonomie, notamment journalière, en mode électrique.

En second lieu, les gains apparemment importants en consommation en usage urbain (taxis) résultent d'une part de la réduction de la plage d'utilisation du moteur thermique (autour du rendement maximum), d'autre part, et surtout, de la récupération d'énergie au freinage (ou ralentissement). Ce deuxième point diminue de manière importante l'effet négatif sur la consommation du surpoids lié à l'équipement électrique (batterie, machine(s) électrique(s), couplage mécanique).

L'hybride simple avait pour unique objectif la baisse de consommation de véhicules thermiques essence. Si l'on recherche, au-delà de la consommation, un véhicule capable de rouler en mode électrique (donc « propre » : circulation en zone faible émission) pour des déplacements journaliers limités (50-70 km), il faut munir le véhicule d'une batterie de capacité plus importante (10-15 kWh), qui devra être rechargée majoritairement via une borne de recharge.

En pratique, le schéma retenu par la plupart des constructeurs est un mode électrique jusqu'à un niveau de décharge donné (avant décharge profonde) suivi d'un mode de fonctionnement type véhicule hybride simple. La consommation de carburant dépend du parcours retenu (urbain, extra urbain (courte ou longue distance), mixte).

On peut noter que l'entreprise Toyota est passée à la batterie Li-ion pour ses véhicules hybrides rechargeables.

Performances des véhicules électriques actuels

Les chiffres de consommation annoncés sont compris entre 15 et 25 kWh/100 km, selon les conditions d'usage comme le montre la figure 7.

● Influence du type de circulation

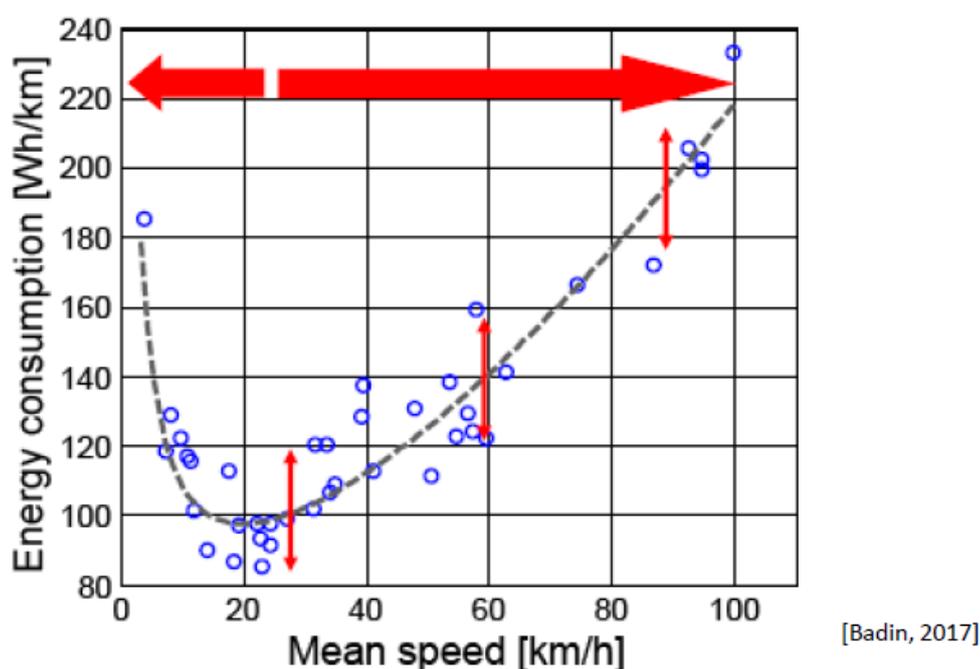


Figure 7 : Influence du type de circulation sur la consommation
(François Badin, IFPEN)

L'influence de la consommation des auxiliaires peut être très pénalisante, notamment à faible vitesse. C'est le cas en particulier du chauffage, « gratuit » sur un véhicule thermique, et au contraire très pénalisant sur un véhicule électrique (même si une partie de la chaleur peut être fournie par les pertes de la batterie).

À noter que ces consommations (mesurées et annoncées par les constructeurs) correspondent à ce que l'on pouvait attendre à partir des consommations des meilleurs véhicules Diesel : un peu plus de 5 l de gazole/100 km, soit environ 55 kWh/100 km, et avec un rendement effectif de 35%, une consommation énergétique de 18 kWh/100 km.

Ces chiffres conduisent à qualifier le véhicule électrique comme un véhicule 2 l (en équivalent gazole/100 km), ce qui montre que le véhicule thermique 2 l/100 km restera à tout jamais du domaine du vœu pieux.

Néanmoins, les progrès potentiels proposés pour ce véhicule virtuel, appliqués au véhicule électrique, permettront probablement de descendre à 15 kWh/100 km. En tout état de cause, la consommation ainsi estimée et mesurée est indépendante en première approximation de la nature de la batterie, mise à part l'influence du poids de la batterie, influence limitée du fait de la récupération au freinage.

Il en résulte que l'autonomie ne dépend en première approximation que de la capacité de la batterie (en kWh), et peu de ses caractéristiques effectives (bien que des valeurs élevées de capacité en Wh/kg soient évidemment favorables, et bien entendu rédhibitoires pour des valeurs trop faibles). Pour obtenir une autonomie de 300 km, avec une consommation de 18 kWh/100 km, il faut donc une batterie d'un peu plus de 50 kWh, et pour 500 km et 20 kWh/100 km (voiture plus grosse et plus lourde) 100 kWh.

La technologie universellement adoptée à ce jour est la batterie Li-ion. Ses performances actuelles sont de l'ordre de 250 Wh/kg, soit pour une batterie de 50 kWh : 200 kg, et pour 100 kWh : 400 kg. Il faut noter que si la caractéristique capacité spécifique pose problème, il n'en est pas de même pour la capacité volumique, qui du fait de la densité de l'ordre de 2 de ce type de batterie, peut être considérée comme d'ores et déjà satisfaisante (400 Wh/l). Ce d'autant plus que la réalisation des packs conduit à des ensembles plats faciles à intégrer dans un véhicule (sous forme de plateforme à la place d'un châssis conventionnel).

Le critère autonomie étant d'importance capitale pour l'acceptabilité du véhicule électrique, à côté de la capacité batterie intervient la facilité de recharge, et plus précisément la charge rapide, par opposition à la charge lente « traditionnelle » à C/10 (charge 10 h), sans intérêt en cas de « panne sèche » (batterie « à plat »). À noter au passage que cette charge « lente » nécessite néanmoins une station de recharge capable de délivrer au minimum 10 kW pour une batterie de 100 kWh.

Nous avons vu dans la première partie que les batteries Li-ion acceptent une charge 2C, ce qui requiert pour cette batterie 100 kWh, une station de capacité 200 kW (station Tesla : 250 kW), ne donnant une autonomie supplémentaire que de 200 km qu'au bout de 15 minutes.

Qu'apporterait une batterie de capacité nettement supérieure aux batteries actuelles (par exemple une batterie lithium-soufre de capacité 500 Wh/kg) ? Il en résulterait un gain de poids (200 kg au lieu de 400 kg) pour une capacité de 100 kWh, sans gain en termes d'autonomie.

Pour des déplacements journaliers restreints, une prise dédiée 7kW s'avère suffisante pour la technologie actuelle et les technologies améliorées.

Les autres facteurs qui doivent être pris en compte sont d'une part la durée de vie (actuellement au moins 3-4 ans, si possible 8-10 ans comme dans le cas des hybrides), d'autre part la recyclabilité des éléments dont la disponibilité pourrait poser problème (par exemple le cobalt et éventuellement le lithium), lorsque la pénétration des véhicules électriques deviendra importante au niveau mondial comme le montre la figure 8.

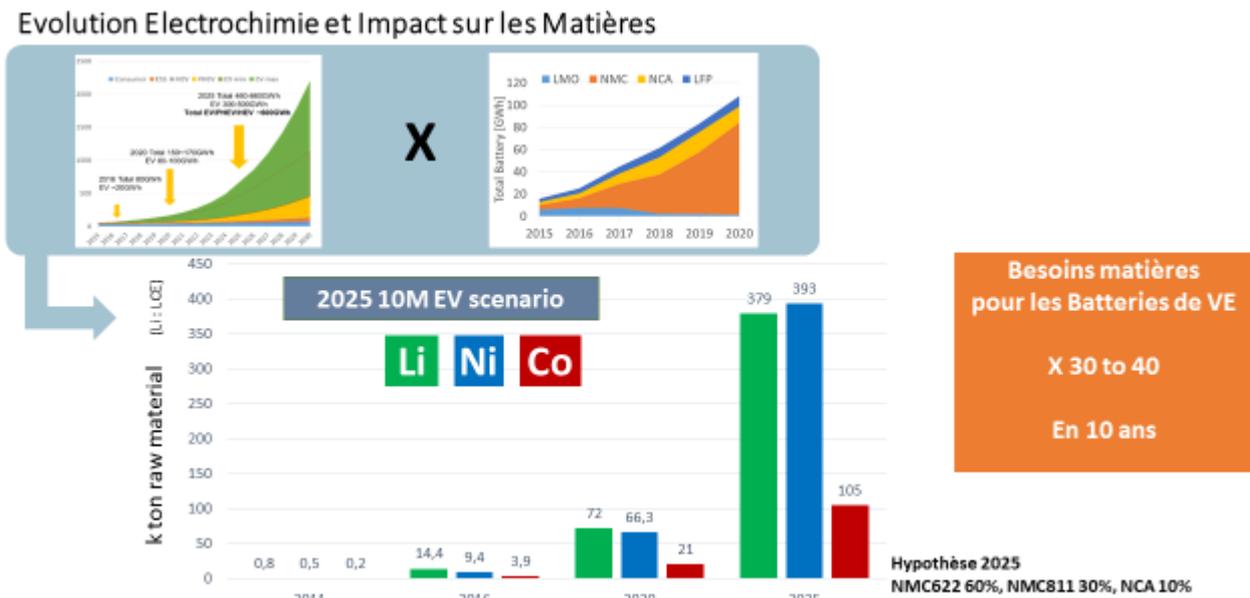


Figure 8 : Besoins en matières premières liés au développement des batteries Li-ion
(Bertrand Largy, Comité d'Experts Véhicules Électriques et Écosystème Énergétique de la SIA)

Toutes ces évolutions doivent se faire à coût par kWh décroissant, l'objectif fixé étant de descendre aux alentours de 100 euros/kWh, soit pour une « petite » batterie de 40 kWh : 4 000 €, et pour une « grosse » batterie (100 kWh) : 10 000 €.

100 € par kWh implique, au niveau de la performance actuel de la batterie Li-ion (250 Wh/kg, 4 kg/kWh) que le prix moyen pondéré des éléments intervenant dans la formulation de la batterie soit nettement inférieur à 25 euros/kg. À titre de référence, on peut citer le prix du cobalt, de plusieurs dizaines d'euros/kg (variable largement en fonction de la spéculation).

En définitive, et en l'état actuel de la technologie, la substitution des voitures à moteur thermique par des véhicules électriques a une solution pour des véhicules des segments B et C, qui seront dotés de batteries de moyenne capacité ((50-70kWh), sous réserve de la disponibilité des bornes de recharge rapide notamment sur les grands axes routiers. Pour les véhicules des classes supérieures, les batteries ultra-haute énergie sont d'un poids élevé, ce qui conduit à des véhicules coûteux en recul par rapport aux modèles thermiques.

En dehors de véhicules haut de gamme particuliers, cela pose la question des éventuelles évolutions requises quant au concept de mobilité automobile, même si l'on peut attendre des progrès suffisants quant aux performances des batteries (de la famille Li-ion ou de nouvelles batteries) permettant de résoudre partiellement les limitations actuelles.

Application au stockage des ENR intermittentes

Position du problème

Contrairement à l'application aux véhicules électriques, pour laquelle le besoin de batteries performantes existait dès l'origine de l'essor de l'automobile -les premières voitures étaient d'ailleurs pour une part électriques- l'application au stockage, et plus généralement à la gestion des ENR intermittentes (photovoltaïque et éolienne) est récente, lié au développement rapide de ces énergies, et à leur rôle croissant dans le mix énergétique pour la production d'électricité.

L'intermittence de ces 2 sources d'électricité se traduit par une production schématiquement en tout ou rien, avec des périodes de production nulle compensées par des périodes de production à puissance nominale. En d'autres termes, la production de ces ENR n'est pas directement pilotable, donc nécessite soit d'être incluse dans un réseau supposé capable tour à tour d'absorber la production à puissance nominale et de compenser l'absence de production, soit de faire appel à des moyens de stockage appropriés possédant ces 2 fonctions.

Les périodes liées à l'intermittence de ces sources couvrent un large spectre de quelques secondes (nuages de beau temps dans le cas du photovoltaïque) à plusieurs jours (période de mauvais temps), et plusieurs mois (saisons) et passant par l'alternance jour nuit pour le photovoltaïque, et de quelques heures à plusieurs jours pour l'éolien, sans qu'il n'y ait généralement compensation entre les 2 sources au niveau d'une localisation même étendue.

Or, au niveau de la demande sur un réseau donné, il existe bien entendu des possibilités d'effacement et plus généralement d'adaptation, mais dans certaines limites notamment de fréquence de mise en œuvre. La qualité du courant doit être respectée à tout instant dans tout le réseau, qu'il s'agisse d'un réseau local isolé, ou d'un grand réseau, notamment en ce qui concerne la fréquence (du courant), faute de quoi il peut en résulter un effondrement global en cascade, comme déjà observé (pour des raisons non liées aux ENR) dans le passé.

Les besoins de stockage liés aux ENR intermittentes, que ce soit pour les réseaux isolés, ou pour des réseaux étendus (réseaux nationaux interconnectés), sont en fait de 2 types :

- le stockage court terme, limité à une intégration optimisée de l'électricité fournie par les ENR intermittentes ;
- le stockage moyen-long terme (jusqu'au stockage inter-saisonnier) visant à ne pas perdre la production des ENR intermittentes, alors qu'elle dépasse (largement) le pic de demande, en vue de son utilisation lors des périodes de production nulle ou très faible.

Stockage court terme

Il s'agit en fait d'un stockage permettant d'assurer divers services dans le cadre d'un réseau local, notamment isolé. Sont cités :

- le réglage de fréquence ;
- le report de charge, la mise en route de générateurs remplaçant l'énergie renouvelable défaillante, en respectant les constantes de temps propres à ces générateurs (ceci est classique pour les groupes (diesel) de secours d'installations nécessitant la continuité de besoins prioritaires) ;

- le lissage de la production intermittente ;
- l'arbitrage entre divers modes de production, notamment la minimisation du recours aux générateurs faisant appel à des énergies fossiles.

Un cas important est celui d'habitations munies de capacité de production photovoltaïque.

Une autoconsommation importante n'est possible qu'avec un stockage journalier convenable. Pour ce genre de service, les batteries apparaissent particulièrement adaptées pour les raisons suivantes :

- la puissance du pack batterie doit être de l'ordre de grandeur de la puissance crête des ENR intermittentes à réguler. Avec un rapport $P(\text{kW}) / C(\text{kWh})$ de l'ordre de 2 (batterie « ordinaire » de forte capacité), on dispose de la puissance nécessaire pour plusieurs minutes, ce qui est suffisant pour les besoins de régulation ;
- la batterie intervient par une suite de cycles limités de décharge-charge autour d'un point de charge « bien choisi », ce qui est comme nous l'avons vu très favorable en terme de durée de vie (cas des véhicules hybrides dont les constructeurs garantissent leur batterie pour 8 ans...) ;
- Les critères concernant les caractéristiques techniques des batteries pour le stockage stationnaire court terme sont moins sévères que pour les batteries pour véhicules électriques.

Ce dernier point mérite développement. En premier lieu, la recherche de capacités massiques ou volumiques élevées perd en importance au profit d'autres critères : la durée de vie (idéalement supérieure à 10 ans), la sécurité, que l'on considère des installations industrielles (grandes capacités) ou privées (habitations), l'usage d'éléments « communs », la recyclabilité, et bien entendu le coût, qui vient grever de manière importante celui des ENR intermittentes auquel le stockage est associé. De ce fait, le choix n'est pas limité aux batteries Li-ion, bien que le développement industriel massif dont celles-ci sont l'objet en favorise l'implantation. Une partie des critères technologiques dont il a été question dans la seconde partie pourront trouver leur place dans un avenir proche (exemple la batterie zinc-air que cherche à développer l'EdF pour un usage résidentiel).

Stockage long terme

Ce stockage se caractérise à la fois par la durée du stockage (de quelques jours à plusieurs mois) et la puissance admise, qui doit être au minimum du même ordre de grandeur que la puissance crête des générateurs ENR intermittents dont on veut stocker la production.

Il est facile de voir que cette deuxième caractéristique n'est en fait jamais limitante. En effet, pour des batteries de stockage pour lesquelles c'est la capacité qui est recherchée, nous avons vu que $P(\text{kW})_{\text{admissible}} = 2C(\text{kWh})$, ce qui signifie en fait qu'une puissance $P(\text{kW})$ pourra être stockée au maximum une demi-heure, ce qui renvoie au stockage court terme de régulation.

Pour stocker (et récupérer) une puissance $P(\text{kW})$ pendant une durée $t(\text{h})$, il faudra une capacité $C = P(\text{kW}) \times t(\text{h})$. La charge comme la décharge se fera à $C(\text{kWh}) / t(\text{h})$, correspondant à une charge (ou décharge) lente.

Il est facile de se rendre compte que les capacités actuellement accessibles sont faibles par rapport aux futurs besoins de réseaux étendus alimentés par des ENR intermittentes.

À titre d'exemple, la très grosse batterie mise en place en Australie par Tesla ne stocke que 120 MWh (pour une puissance admissible de 100MW). Au passage, il faut noter le coût élevé de cet ensemble : 56 M euros, soit plus de 400 euros le kWh.

Un deuxième exemple correspond à la capacité théoriquement disponible pour une flotte de 10M de véhicules électriques munis de batteries de capacité 50 kWh, soit une capacité totale de 500GWh. Une telle capacité serait capable de se substituer à une fraction de l'ensemble des moyens de production (cas français) pendant une dizaine d'heure au maximum, et ceci en prenant en compte toute la capacité de tous les véhicules. En ne disposant que de 10% de cette capacité, la puissance restituée ne sera qu'une fraction de la puissance totale éventuellement requise pour la même durée (1/2 journée).

Même en admettant une baisse progressive du coût de tels ensembles (prix du kWh s'abaissant vers 100kWh), le prix à payer pour des capacités de l'ordre du GWh restera considérable (100M euros), pour la fourniture à un niveau de puissance de quelques dizaines de MW pendant quelques jours.

Le stockage long ou même moyen terme se heurte à une autre limitation générique des batteries : la tendance à l'autodécharge, qui bien que limité sur le court terme pour les « bonnes » batteries, ne permet pas d'envisager des stockages au long cours (notamment inter-saisonniers).

Par ailleurs, le stockage au long cours dans des batteries comportant dans leur formulation des éléments rares correspond à une immobilisation difficilement acceptable par rapport au service rendu.

La conclusion s'impose donc : même s'il est envisageable de construire des méga, voire des giga batteries, celles-ci ne seront pas adaptées au stockage long terme, notamment intersaison des ENR intermittentes renouvelables.

Conclusion

À partir des informations présentées lors de ce colloque, nous arrivons aux conclusions suivantes.

Le développement d'une famille de batteries Li-ion et sa large commercialisation permettent le démarrage de la transition d'une partie des véhicules à moteur thermique vers des véhicules électriques.

Des progrès sont à attendre pour cette famille sur plusieurs plans : capacité, composition élémentaire (diminution de la teneur en éléments rares), durée de vie, et ceci à des coûts décroissants.

La disponibilité de bornes de recharge rapide permettrait en l'état de la technologie de répondre à la majeure partie des besoins de mobilité.

L'apparition de technologies alternatives de performances améliorées (Li-air, Li-soufre) n'est pas évidente dans le moyen terme, ce qui obère le rêve de très grandes autonomies.

Le stockage stationnaire est largement ouvert à d'autres technologies que le Li-ion, même si cette technologie tire avantage de son développement dans le domaine automobile.

En tout état de cause, le stockage électrochimique ne pourra satisfaire aux besoins de stockage saisonniers d'électricité liés à la part croissant que devraient prendre les ENR intermittentes dans la production d'électricité. Il restera cantonné pour l'essentiel à des services de régulation des réseaux électriques futurs.