



Sommaire

Les batteries Lithium-ion : Etat de l'art et perspectives technologiques

Notre prochaine conférence

jeudi 16 janvier

DÉCARBONATION DU TRANSPORT
MARITIME – OÙ EN SOMMES-
NOUS ?

Nos dernières conférences :

- [« Les technologies adaptées ou low-tech pour la transition bas carbone »](#)
- [Agir en faveur du climat et de l'environnement dans son entreprise](#)
- [Quel futur pour l'emploi dans un monde qui se décarbone ?](#)
- [Mobilité électrique et énergies renouvelables : destins croisés pour un avenir durable](#)
- *Vous avez l'idée d'un sujet pour une prochaine conférence Centrale-Energies, idéalement avec des intervenants à proposer ?
Vous avez envie de proposer un article pour un prochain flash ?
Contactez-nous !*
- rcontact@centrale-energie.fr

Les batteries Lithium-ion : Etat de l'art et perspectives technologiques

François Barsacq (ECP 1984)

Directeur général d'easyLi Batteries et Président de Centrale Energies

Les technologies Lithium-ion : la solution de référence pour le stockage d'énergie électrique

Si les batteries Plomb-Acide, technologie historique apparue au milieu du XIXe siècle sont encore largement utilisées, notamment pour assurer le démarrage des moteurs thermiques, on constate depuis une quinzaine d'années le développement très rapide des technologies Lithium-ion utilisées dans tous les domaines : électronique grand-public (c'est là qu'elles sont apparues dans les années 1990) mais aussi dans la plupart des nouvelles applications de stockage d'énergie électrique : automobile bien sûr, avec l'arrêt programmé en Europe de la vente des véhicules thermiques en 2035, que beaucoup de constructeurs automobiles ont déjà anticipé, mais aussi pour la gestion des énergies renouvelables ou des smart grids.

Les technologies Lithium-ion offrent aujourd'hui des capacités de stockage d'énergie relativement élevées dans des volumes et des poids limités (près de 300 Wh/kg, 10 fois plus que les technologies Pb-acide) pour un nombre de cycles de charge-décharge élevé (généralement au-delà de 1 500 cycles) satisfaisant la plupart des applications, le tout à des prix relativement compétitifs et clairement en forte baisse par rapport au passé récent (voir figure 2).

La figure 1 présente le diagramme de Ragone (du nom de son inventeur le scientifique américain David Ragone) des différentes technologies de batteries commercialisées à ce jour. Ce mode de représentation, largement utilisé dans l'industrie des batteries, présente en abscisses les performances en énergie (en Wh/kg) et en ordonnées les performances en puissance (en W/kg). Ce diagramme montre que les technologies Lithium-ion peuvent délivrer, pour les versions « haute énergie », les densités d'énergie les plus élevées et, pour les versions typées « haute puissance », des performances qui se rapprochent de celles des supercondensateurs.

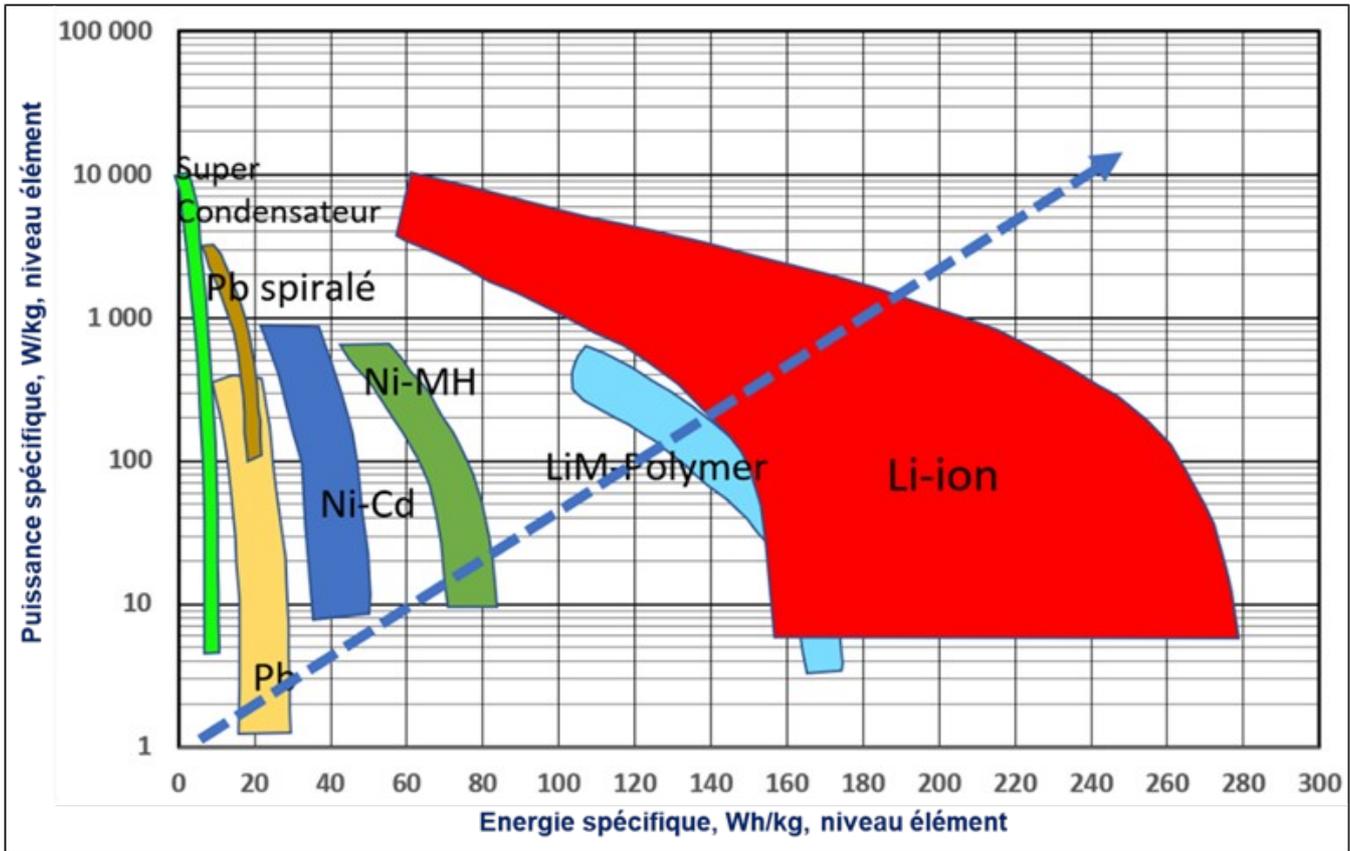
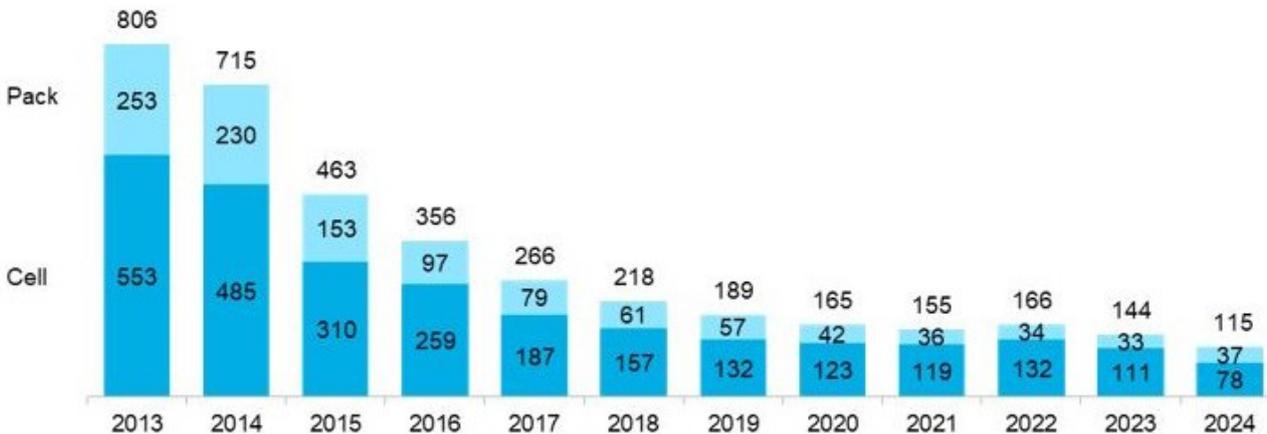


Figure 1: Diagramme de Ragone – Performances en énergie et en puissance des différentes technologies de batterie

Real 2024 \$/kWh



Source: BloombergNEF. Note: Historical prices have been updated to reflect real 2024 dollars. Weight average survey value includes 343 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles and stationary storage.

Figure 2 : Evolution du prix des éléments et batteries Li-ion 2013-2024 -

Malgré les progrès réalisés, de nombreuses attentes demeurent insatisfaites, notamment pour les applications automobiles, et justifie les énormes investissements pour le développement et l'industrialisation de nouvelles

technologies de batteries afin d'atteindre les grands objectifs suivants :

- Augmentation des densités d'énergie et de puissance et meilleures performances à froid qui permettraient :

1. d'augmenter l'autonomie ou de réduire les coûts de batterie à autonomie constante ;
2. d'alléger les véhicules électriques et d'améliorer leur efficacité énergétique ;
3. de réduire les temps de charge afin d'optimiser l'utilisation des infrastructures de recharge et de se rapprocher du temps nécessaire pour un plein de carburant.

- Augmentation de la valeur résiduelle des batteries en fin de vie automobile en :

- améliorant la réparabilité et la démontabilité afin de faciliter la fabrication en vue d'une deuxième vie moins exigeante dans des applications de stockage stationnaire ;
- permettant un recyclage moins coûteux voire créateur de valeur.

- Améliorer la maîtrise de la chaîne de valeur et favoriser un développement durable et responsable de la filière par :

1. la réduction de l'utilisation de matières premières stratégiques ;
2. l'utilisation de nouvelles matières premières plus accessibles et largement disponibles ;
3. la réduction de l'empreinte carbone lors de la fabrication des batteries.

Tous ces développements doivent se faire en garantissant les pré-requis de sécurité, de durée de vie et de ré-utilisation des lourds investissements de production déjà en place (autant que faire se peut).

De l'élément Lithium-ion au système batterie : technologies et modes de construction

Afin de mieux comprendre les développements technologiques en cours, il est nécessaire de revenir sur les principaux composants d'une batterie Lithium-ion.

Le cœur de la batterie est constitué d'éléments d'accumulateurs (ou plus simplement éléments), également appelés cellules en référence à l'anglais « battery cells ».

Les éléments sont des objets de quelques dizaines de grammes à quelques kg. Ils peuvent être de format cylindrique, prismatique ou plat sous forme de poche (pouch cell) ainsi que l'illustre la figure 3.

Les 4 grands constituant d'un élément sont :

- l'électrode positive ou cathode, constituée d'un feuillard d'Aluminium enduit de matières actives, soit des oxydes métalliques lithiés (Nickel, Manganèse, Cobalt, Aluminium – NMC, NCA) soit des composés à base de phosphate de Fer (LFP ou LiFePO_4) ;
- l'électrode négative ou anode, constituée d'un feuillard de Cuivre enduit le plus souvent de graphite (de graphène dans certains cas) auquel peut être ajouté du Silicium en faible proportion afin d'en améliorer la capacité de stockage ;
- l'électrolyte, liquide le plus souvent, gélifié parfois, conducteur ionique mais isolant électrique permettant la circulation des ions Lithium Li^+ de la cathode vers l'anode durant la charge puis vice-versa durant la décharge, processus permettant les réactions d'oxydo-réduction décrites dans la figure 4 ;

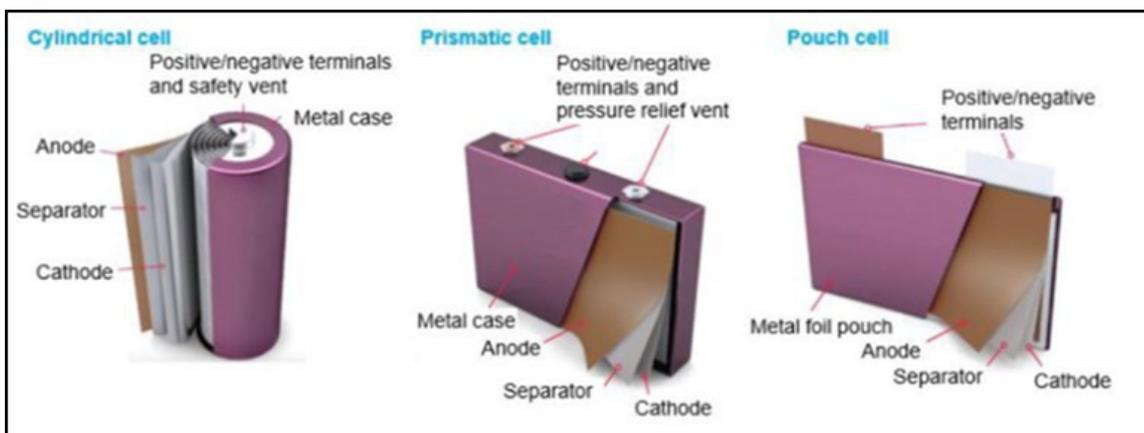


Figure 3 : Les trois formats d'élément Lithium-ion

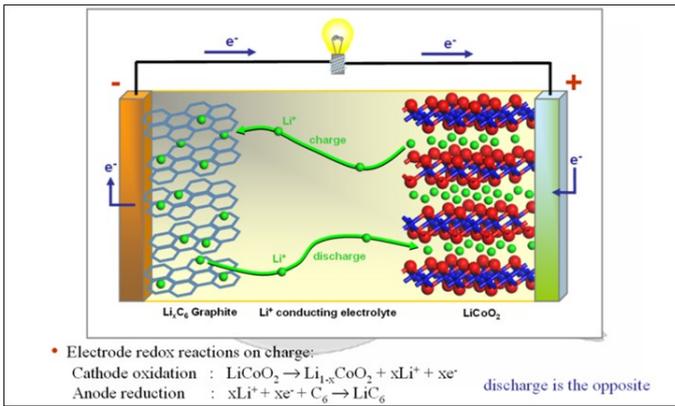


Figure 4 : Principe de fonctionnement électrochimique d'un élément Lithium-ion

- le séparateur, membrane microporeuse imprégnée d'électrolyte qui empêche le contact électrique entre les deux électrodes tout en permettant le passage des ions Lithium.

Selon la nature des matériaux électro-chimiques utilisés, la tension moyenne aux bornes d'un élément est de 3.2 V (technologie LFP/Graphite) ou de 3.6 V (technologie NMC/Graphite).

Les technologies NMC et LFP se partagent aujourd'hui le marché, la première étant très utilisée dans les applications exigeant de fortes densités d'énergie, notamment l'automobile, mais souffrant d'un coût relativement élevé compte tenu des métaux utilisés.

La technologie LFP présente une densité d'énergie environ 30% plus faible que le NMC, ce qui conduit à des batteries plus lourdes et plus volumineuses ou, à poids et volume constants, à des autonomies plus limitées. Mais elle présente l'avantage de ne pas utiliser de métaux coûteux (Cobalt, Nickel) ce qui conduit à l'heure actuelle à un coût de 20 à 30% inférieur au NMC (niveau élément), soit entre 10 et 15% pour un système batterie complet.

Très répandue dans les véhicules lourds (bus, engins industriels) et les systèmes de stockage stationnaire qui apprécient son endurance en cyclage (typiquement 3 000 à 4 000 cycles contre 1 500 à 2 500 en NMC), des constructeurs automobiles utilisent la technologie LFP pour leurs entrées de gamme (Tesla Model 3 ou Citroën e-C3 par exemple) voire pour l'ensemble de leur gamme comme le chinois BYD qui maîtrise depuis longtemps la fabrication de ses propres batteries LFP.

Afin d'augmenter la tension et d'être en mesure de délivrer des puissances suffisantes, les éléments sont assemblés en série jusqu'à atteindre plusieurs centaines de volts (800V pour la Porsche Taycan). De même, afin d'augmenter la capacité de stockage, un montage en parallèle est généralement réalisé.

On obtient ainsi un assemblage série-parallèle de quelques dizaines à plusieurs milliers d'éléments unitaires. Par exemple, une batterie de vélo électrique sera constituée d'une cinquantaine d'éléments alors qu'une batterie de voiture électrique en comprendra quelques centaines à plusieurs milliers (chez Tesla). Les éléments peuvent être assemblés en modules, eux-mêmes assemblés en packs batteries (architecture cell-to-module-to-pack – Figure 5.) ou directement en packs (architecture cell-to-pack – Figure 6.).

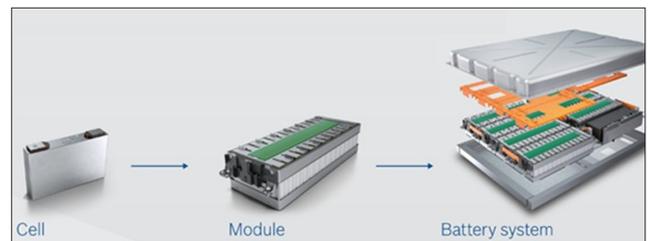


Figure 5 : Architecture cell-to-module-to-pack



Figure 6 : Architecture cell-pack – Source Henkel

Des systèmes électroniques embarqués temps réel dédiés à la gestion et à la communication (Battery Management Systems ou BMS), des dispositifs de gestion thermique permettant le fonctionnement en toutes saisons et lors des charges rapides ainsi qu'une structure mécanique de protection viennent compléter les systèmes batteries (voir figure 7.)

Les évolutions technologiques récentes

Historiquement, la technologie NMC utilisait en proportion égale Nickel, Manganèse et Cobalt (formulation dite 111). Pour moins dépendre des approvisionnements en Cobalt, métal coûteux dont les deux-tiers de la production mondiale proviennent de la République

Démocratique du Congo dans des conditions éthiques d'extraction difficiles à contrôler, les fabricants d'éléments ont progressivement migré au cours de ces dernières années vers des formulations substituant le Nickel au Cobalt, dans des proportions 622 puis 811 (80% Nickel, 10% Manganèse, 10% Cobalt) qui constitue une limite technologique. Le NMC 811 est désormais largement commercialisé.

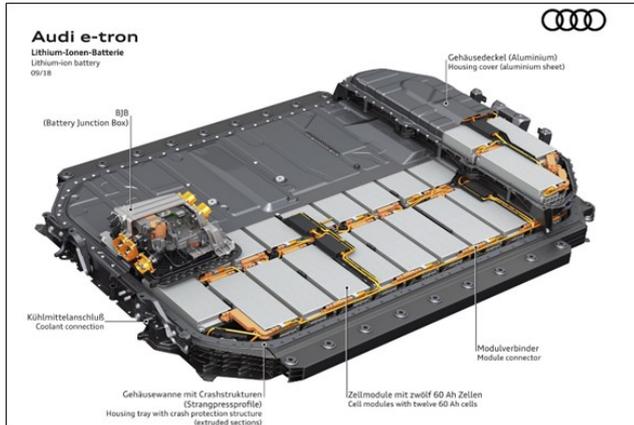


Figure 7 : Architecture typique d'un système batterie de véhicule électrique – Source Audi

En ce qui concerne le LFP, et afin d'en améliorer la densité d'énergie, commencent à être proposées des formulations LMFP à base de cathodes LFP dopées au Manganèse. La densité d'énergie s'en trouve augmentée de 15 à 20%, les performances à froid améliorées tout en maintenant les performances en cyclage et une bonne sécurité intrinsèque. Le principe de fonctionnement reste identique au LFP (voir figure 8.).

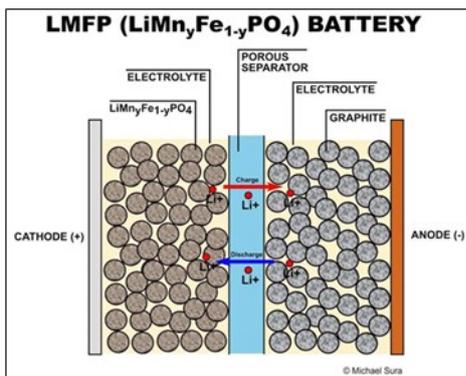


Figure 8 : Constituants d'un élément LMFP

S'appuyant sur leur expertise du LFP, les grands producteurs chinois investissent dans cette nouvelle technologie et les premiers contrats commerciaux sont en phase d'établissement, notamment avec Tesla.

Les avancées technologiques envisagées à 3 – 5 ans

Chaque année, les investissements de R&D dans le domaine des nouvelles technologies de batteries s'élèvent à plusieurs milliards d'euros au niveau mondial. Pourtant, il reste difficile de prévoir la concrétisation industrielle de ces travaux et le délai qui leur sera nécessaire pour atteindre des volumes de production suffisants pour concurrencer les technologies Lithium-ion. Une chose est sûre, les technologies actuelles resteront la référence pour les 8 à 10 prochaines années tant leur niveau de maturité industrielle est important.

Quatre familles de technologies ressortent comme les plus avancées et proches d'une industrialisation de masse dans les prochaines années : anode Silicium, batterie tout-solide, Sodium-ion et Lithium-Soufre.

Batterie à anode Silicium

Cette technologie consiste à substituer le graphite de l'anode par une formulation composée à plus de 70% de Silicium (voir la figure 9 ci-dessous), la cathode restant traditionnelle.

Cette technologie permettrait d'augmenter la densité d'énergie de 20% par rapport aux meilleures technologies NMC actuelles (350 Wh/kg, 800 Wh/l) tout en offrant des capacités de charge ultra-rapide (de 10% à 80% en moins de 10 minutes).

Le verrou à lever est la durée de vie en cyclage, l'anode tout Silicium subissant un gonflement très important durant la charge (jusqu'à 300%) qui crée des contraintes mécaniques conduisant à une perte rapide des performances. De nombreuses solutions sont en cours de développement, laissant penser à une commercialisation possible à court-terme.

Batterie tout-solide

Cette technologie consiste à remplacer l'électrolyte liquide actuel par un électrolyte solide ou semi-solide en l'associant à une cathode traditionnelle et à une anode Silicium (1^{ère} génération) puis Lithium métal (2^e génération). Cette technologie permettrait d'augmenter la densité d'énergie de 35% à 40% par rapport aux meilleurs NMC actuels

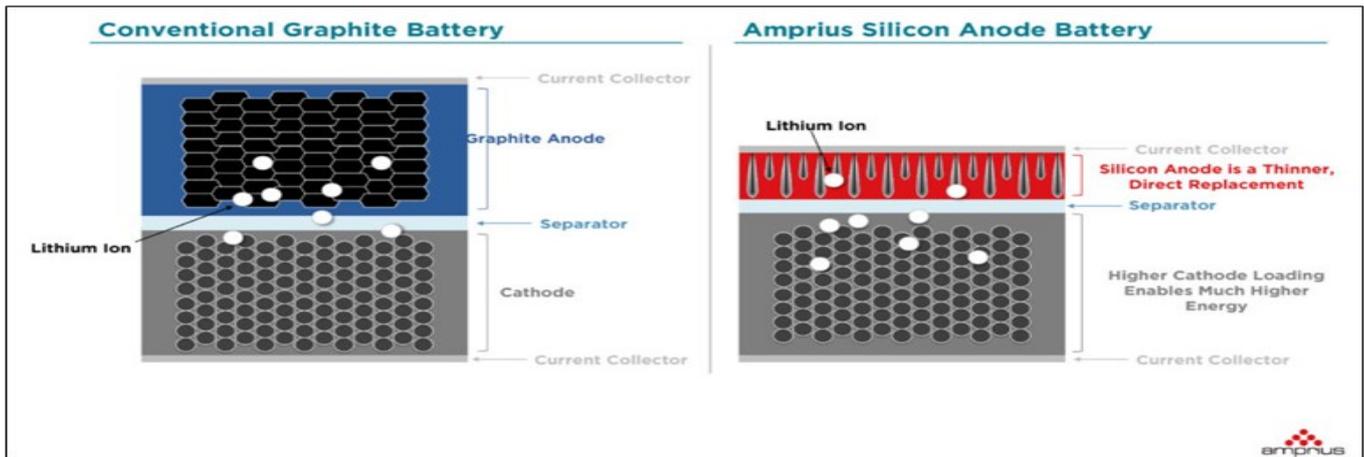


Figure 9 : Constituants d'un élément à anode Silicium – Source Amplus

(400Wh/kg, 1 000 Wh/l) avec une meilleure sécurité intrinsèque en l'absence d'électrolyte liquide inflammable. Voir figures 10 et 11.

Ces batteries ont connu un fort développement commercial au début des années 2010 avec le déploiement des flottes de Blue Cars telles que Autolib' à Paris.

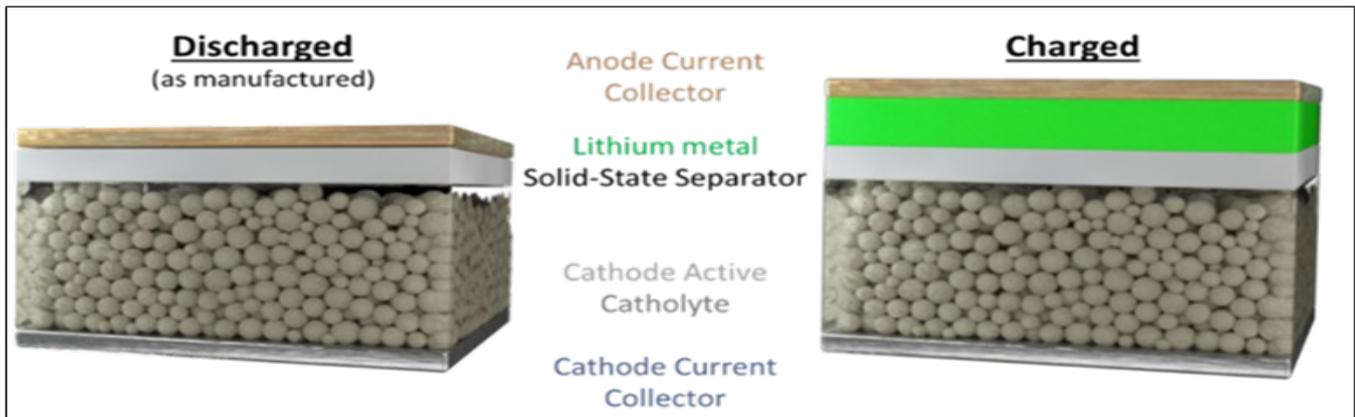


Figure 10 : Constituants d'un élément tout-solide – Source QuantumScape

Néanmoins, les verrous de cette technologie restent nombreux, notamment du fait de la conductivité limitée des électrolytes solides, conduisant à des performances dégradées en puissance, en particulier à froid et en charge rapide. La durée de vie en cyclage reste également à confirmer

La technologie LMP est dite chaude du fait de son fonctionnement entre 60 et 80°C, ce qui limite dans les faits ses applications à des flottes captives (bus parisiens par exemple, mais aussi allemands avec Daimler Bus). Des programmes de recherche sont en cours pour abaisser sa

Batterie LMP de Blue Solutions – Groupe Bolloré : un précurseur de la batterie tout-solide

L'entreprise française Blue Solutions fabrique depuis plus de 15 ans en Bretagne et au Canada des batteries utilisant un électrolyte semi-solide à base de sels de Lithium fondus dans un polymère d'oxyde de polyéthylène, associé à une anode Lithium métal, technologie dite LMP (Lithium Métal Polymère). Voir figures 11 et 12 ci-dessous.

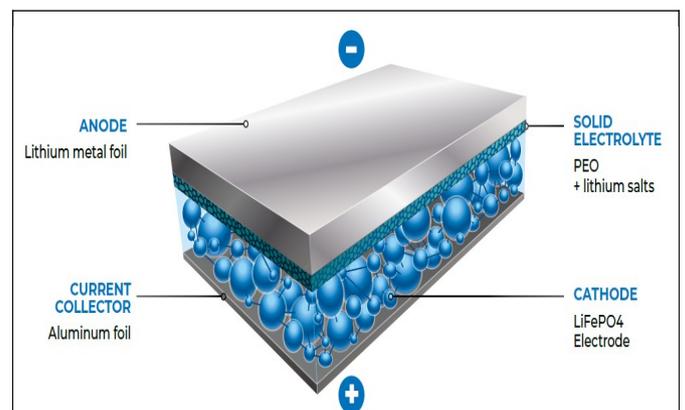


Figure 11 : Constituants d'un élément LMP – Source Blue Solutions

température de fonctionnement et permettre ainsi d'adresser de nouveaux marchés.

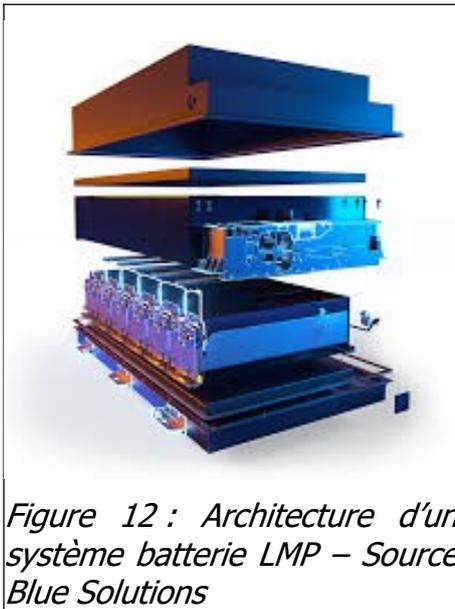


Figure 12 : Architecture d'un système batterie LMP – Source Blue Solutions

Batterie Sodium-ion ou Na-ion

La technologie Na-ion vise à substituer les ions Li^+ par des ions Na^+ , le principe de fonctionnement électrochimique étant similaire. Elle connaît un engouement renforcé depuis le pic des cours du Lithium en 2022 (voir figure 13) et des cours mondiaux qui demeurent très volatils en fonction de l'équilibre offre-demande. Les composés à base de Sodium sont très répandus sur l'ensemble de la planète (à commencer par le sel de mer ou chlorure de Sodium NaCl) et peu coûteux, ce qui permettrait à l'industrie de la batterie de diversifier ses sources d'approvisionnement et, à terme, de réduire le coût des batteries.

Figure 13 : Evolution du cours des métaux utilisés dans les batteries Lithium-ion – Source Agence Internationale de l'énergie, 2022



Comme pour les technologies Li-ion, il existe plusieurs familles de technologies Na-ion dont les principales sont, par nature de cathode :

- oxydes de métaux de transition à structure lamellaire, offrant des densités d'énergie similaires au LFP (jusqu'à 170 Wh/kg), de meilleures performances à froid mais à la cyclabilité limitée. Cette technologie est expérimentée dans les véhicules électriques ;
- Composés polyanioniques, offrant fortes cyclabilité, puissance et sécurité intrinsèque mais avec des densités d'énergie plus limitées. Cette technologie peut répondre aux besoins de puissance d'applications stationnaires (secours d'énergie par exemple), aux chaînes de traction hybride, à l'outillage portatif...
- Analogues du Bleu de prusse (PBA) offrant d'excellentes performances de cyclabilité, de puissance et de sécurité intrinsèque mais avec de faibles densités d'énergie.

La figure 14 ci-dessous détaille les principaux constituants des technologies Na-ion.

Parmi les acteurs reconnus au niveau mondial figure la start-up française Tiamat, issue des travaux de recherche du CNRS et qui se prépare à lancer une production de masse dans sa gigafactory d'Amiens.

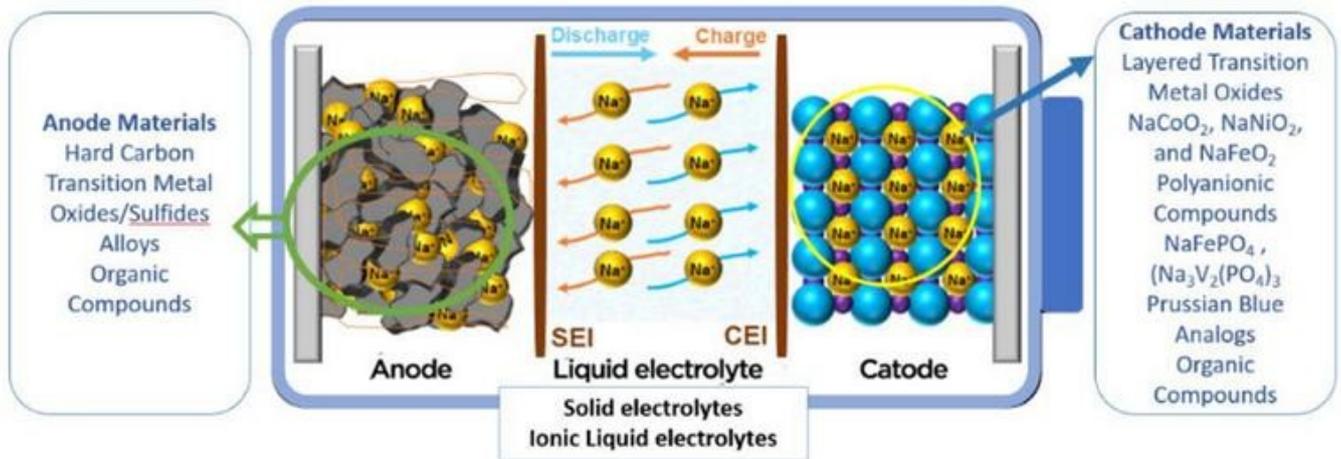


Figure 14 : Constituants d'un élément Na-ion – Source : Journal of materials nanoscience, 2024

Batterie Lithium-Soufre ou Li-S

Cette technologie utilise une anode Lithium métal et une cathode à base de composés Carbone-Soufre (voir figure 15) qui permettraient d'atteindre les plus hautes densités d'énergie envisagées dans un avenir proche (+50% par rapport aux meilleurs NMC, jusqu'à 450 Wh/kg et 1 000 Wh/l).

N'utilisant ni Cobalt ni Nickel, dotée d'une forte stabilité thermique, elle est actuellement en phase d'évaluation par plusieurs constructeurs automobiles, même si sa durée de vie en cyclage et ses performances en puissance demeurent des verrous à lever. Elle suscite également un grand intérêt de la part des acteurs de la filière aéronautique et spatial.

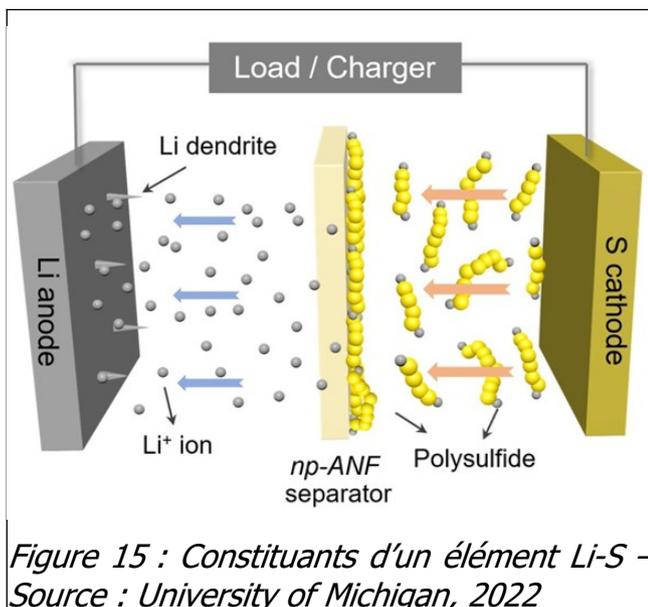


Figure 15 : Constituants d'un élément Li-S – Source : University of Michigan, 2022