

# BATTERIES, L'ÉNERGIE DU FUTUR

Omniprésentes dans notre quotidien high-tech, cruciales pour la transition énergétique (des véhicules électriques au stockage des énergies renouvelables), les batteries lithium-ion sont au cœur d'une révolution. **Jean-Marie Tarascon** en explique les rebondissements... et les défis.

**D**urant des siècles, l'humanité a eu pour seule source d'énergie la biomasse, au faible impact environnemental. La révolution industrielle, au XVIII<sup>e</sup> siècle, a remis en cause cet équilibre. L'introduction dans nos sociétés des moteurs thermiques et de l'électricité a conduit à notre dépendance croissante aux énergies fossiles, fortement émettrices de CO<sub>2</sub>. Aujourd'hui, la part de ces énergies dans notre mix énergétique reste encore trop prépondérante, avec les conséquences que nous connaissons. La transition vers les énergies renouvelables semble inévitable. À condition de pouvoir les stocker efficacement

## TRIBUNE

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciens nous montrent comment des théories, des résultats ou des applications peuvent dépasser ce qui avait été imaginé par les chercheurs... ouvrant ainsi de nouvelles et insoupçonnables perspectives.

et donc de développer des systèmes de stockage performants. Pour cela, les batteries lithium-ion (Li-ion) sont notre plus grand espoir.

Une batterie est un dispositif électrochimique qui permet de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique. Depuis la commercialisation de la première batterie au plomb, Pb-acide (en 1859), et avec l'émergence d'autres technologies de batteries au fil des années – nickel : Ni-H<sub>2</sub>, Ni-Cd, Ni-MH, puis lithium (métal alcalin réactif et léger) : Li-ion –, la densité d'énergie des accumulateurs (mesurée en Wh/kg) a quintuplé en cent cinquante ans. Progrès notable mais qui reste modeste si on compare cette évolution à celle de nos processeurs informatiques, dont la capacité de

traitement double tous les dix-huit mois selon la célèbre loi de Moore. Le stockage électrochimique de l'énergie étant lié à la conversion d'énergie chimique en énergie électrique, les limites de la chimie ont souvent été pointées du doigt.

Notre communauté ne peut que se réjouir du fait que la technologie lithium-ion (Li-ion) ait été primée par le Nobel 2019 de chimie en récompensant trois pionniers du domaine : John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham et Akira Yoshino. Ces chercheurs en ont posé les bases fondamentales à la fin des années 1970, pour aboutir à la commercialisation des premières batteries Li-ion par Sony en 1991.

## STOCKER LE SOLAIRE ET L'ÉOLIEN

Quarante ans plus tard, la technologie Li-ion, qui a vu sa capacité doubler (de 110 Wh/kg à 220 Wh/kg) et son coût passer sous la barre des 150 dollars du kilowattheure stocké, envahit notre vie quotidienne avec les téléphones et ordinateurs portables et constitue actuellement l'un des nerfs de la guerre pour le développement rapide des véhicules électriques. Elle permet également le stockage et la régulation des énergies renouvelables intermittentes (soleil, vent), ce qui favorise leur déploiement et la diminution de l'impact carbone de notre consommation électrique.

En raison de cet impact sociétal et planétaire, la technologie à Li-ion est à ce jour une découverte du XX<sup>e</sup> siècle aussi importante que le transistor, la fibre optique ou l'horloge quantique à l'origine du GPS. Quel a été le déclic ? Qu'ont fait les chimistes pour provoquer une telle révolution ? Ce qui suit tente de



## PROFIL

Professeur au Collège de France, membre de l'Académie des sciences, **Jean-Marie Tarascon** est spécialiste de la chimie du solide, mondialement reconnu pour ses travaux sur le stockage de l'énergie. Pionnier des batteries lithium-ion, ses recherches actuelles portent sur des technologies avancées utiles pour les batteries de demain, celles de l'« après-Li-ion ».

répondre à ces questions et raconte une histoire riche en rebondissements.

Le début des recherches sur les batteries au lithium coïncide avec la crise pétrolière de 1973. Ce n'est pas un simple hasard. Ce problème de société a en effet conduit les chimistes du solide à se pencher avec succès sur le coût énergétique des matériaux et à développer de nouvelles stratégies de synthèse. Une chimie basse température connue aujourd'hui sous le nom de « chimie douce » a vu à cette occasion le jour. Elle est à l'origine des premières batteries Li-métal/TiS<sub>2</sub> (dit lithium-disulfure de titane) et d'autres systèmes Li-MoS<sub>2</sub> (dit lithium-disulfure de molybdène) commercialisés dès la fin des années 1980. Mais, à la suite de cas d'explosion associés, cette technologie a dû être rapidement retirée du marché.

C'est pour surmonter ce problème de sécurité qu'a été imaginé le remplacement de l'électrode de Li (lithium) par la technologie à ions Li (= Li-ion). Elle réunit un matériau d'intercalation LiCoO<sub>2</sub> identifié par John

B. Goodenough en 1980 et une électrode de carbone dont la capacité à insérer des ions Li avait été mentionnée par Rachid Yazami et ses collègues en 1974. En intégrant ces matériaux à ses propres recherches sur le type adéquat de carbone et d'électrolytes fluorés, Akira Yoshino démontra en 1984 la viabilité du premier prototype de batteries Li-ion. Sept ans plus tard, en 1991, l'entreprise Sony fut la première à les intégrer dans ses appareils électroniques portables et à les commercialiser.

Cependant, avec une densité d'énergie de seulement 110 Wh/kg, la batterie Li-ion restait très perfectible en termes d'autonomie, de durabilité, de vitesse de charge, de sécurité, d'écoconception et de coût. Au prix d'une recherche mondiale pluridisciplinaire intense et compétitive conduisant à des avancées incrémentales, l'autonomie de ces batteries a aujourd'hui plus que doublé (240 Wh/kg).

## APPROCHE VÉGÉTALE

Pour l'avoir personnellement vécue, cette recherche est passionnante et a le mérite de permettre aux chercheurs de s'attaquer à des problèmes fondamentaux pour lever des verrous technologiques concrets freinant notre industrie. Nos recherches se penchent également sur les grands enjeux environnementaux et de mobilité de notre société. Pour en témoigner, soulignons les travaux visant à diminuer le taux de cobalt (Co), voire à le remplacer dans les électrodes positives pour des raisons éthiques associées à son extraction.

Ces efforts pour développer des batteries plus vertes s'intensifièrent dans les années 2000, et conduisirent les chercheurs à explorer de nouveaux concepts. L'approche végétale, reposant sur l'élaboration de matériaux d'électrodes issus de la biomasse, fut ainsi proposée comme alternative à l'approche minérale. De nombreux espoirs se portent aujourd'hui sur des chimies alternatives au Li-ion, notamment les chimies métal-air ou Na-ion (le sodium [Na] étant beaucoup plus abondant que le lithium et sa production ayant une moindre empreinte environnementale). Aucune d'elles n'a pourtant aujourd'hui atteint un état de maturation suffisant pour être commercialisée, à l'exception du Na-ion, dont les premiers prototypes apparaissent.

Des efforts ont aussi été faits dans l'assemblage des batteries, comme l'illustre l'activité de la Gigafactory, une usine à batterie Li-ion construite par Elon Musk (PDG de Tesla), tirant majoritairement parti de l'énergie solaire. De telles structures voient le jour partout dans le monde, y compris en Europe. La quantité totale d'énergie stockée par des batteries Li-ion devrait atteindre 720 GWh en 2025, soit la production d'un réacteur nucléaire (900 MW) pendant un mois »

**En quarante ans, la technologie Li-ion a vu sa capacité doubler. (...) En raison de son impact sociétal et planétaire, elle est à ce jour une découverte du XX<sup>e</sup> siècle aussi importante que le transistor, la fibre optique ou l'horloge quantique à l'origine du GPS.**

## Des espoirs se portent sur des chimies alternatives au Li-ion, notamment des chimies à base de sodium, beaucoup plus abondant que le lithium et dont la production a une moindre empreinte environnementale.

» (33 jours). Sur la base de cette production et les perspectives de réutilisation des batteries, le kilowatt-heure stocké pourrait coûter moins de 100 dollars dès 2025. Enfin, une étude récente indique que la durée de vie des batteries des véhicules électriques pourrait leur permettre d'atteindre 3 millions de kilomètres. Tout ceci explique le boom actuel de l'industrie des véhicules électriques – avec plus de 100 millions de voitures électriques prévues dans le monde en 2030 – et pour laquelle la batterie est la pierre angulaire.

### INTELLIGENCE, DIAGNOSTIC ET AUTOGUÉRISON

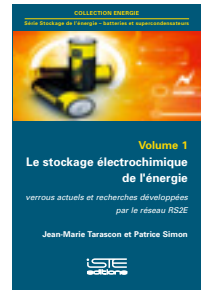
Ces progrès spectaculaires ne devraient cependant pas freiner la recherche sur le Li-ion. La demande actuelle des utilisateurs impose une course à la performance qui place aujourd'hui le Li-ion en tête de la compétition des technologies de batteries avec d'importants défis en termes de vitesse de charge, d'autonomie, d'écoconception-recyclage et enfin de fiabilité. Il est notamment impératif d'accéder à l'état de santé en temps réel des batteries. Il faudra

pour cela passer en « mode » diagnostic, en introduisant de l'intelligence dans les batteries via l'injection de capteurs, dont le rôle sera de pénétrer la vie intime de la batterie et de détecter avec une résolution fine l'évolution des paramètres clés régissant les réactions parasites. Les batteries du futur auront, en plus des pôles positif et négatif classiques, une sortie analytique. Mais ce diagnostic devra être suivi d'une étape de guérison. Des approches innovantes d'autoréparation devront être développées. Comme dans le domaine médical, qui fait largement appel à la vectorisation de médicaments, elles pourraient permettre d'administrer à la demande, via des stimuli physiques, des molécules capables de réparer des fissures d'électrodes ou le « tissu » constituant l'interface électrode/électrolyte. Ces approches diagnostic/autoguérison pour les batteries intelligentes de demain font à ce jour l'objet d'appels d'offres européens (Battery 2030 +).

Quelles leçons tirer de cette longue aventure que fut le développement de la technologie Li-ion ? Ce succès, en dehors des lauréats du prix Nobel, est celui d'une importante communauté de scientifiques ouverte à la discussion et capable d'innover et de promouvoir de nouveaux concepts. Il ne faut pas oublier les ingénieurs talentueux qui ont fait des prouesses dans l'assemblage des batteries pour aboutir à des améliorations tout aussi importantes que celles de la chimie. Ce résultat est le fruit d'un travail de longue haleine qui a bénéficié d'approches multidisciplinaires mais également d'une synergie profonde entre recherches fondamentale et appliquée sans tomber dans la paranoïa contre-productive de la confidentialité. L'union des connaissances scientifiques et technologiques a été essentielle. Les acteurs industriels et académiques doivent continuer de travailler de concert, faute de quoi l'Europe et la France devront de nouveau admettre dans quelques années la suprématie asiatique dans le domaine des batteries intelligentes.

La technologie à ions Li nous réserve encore d'agréables surprises. Il faudra juste s'armer d'un peu de patience, tout comme John B. Goodenough, qui a obtenu le prix Nobel à... 97 ans, pour les vivre et savoir les apprécier. ★

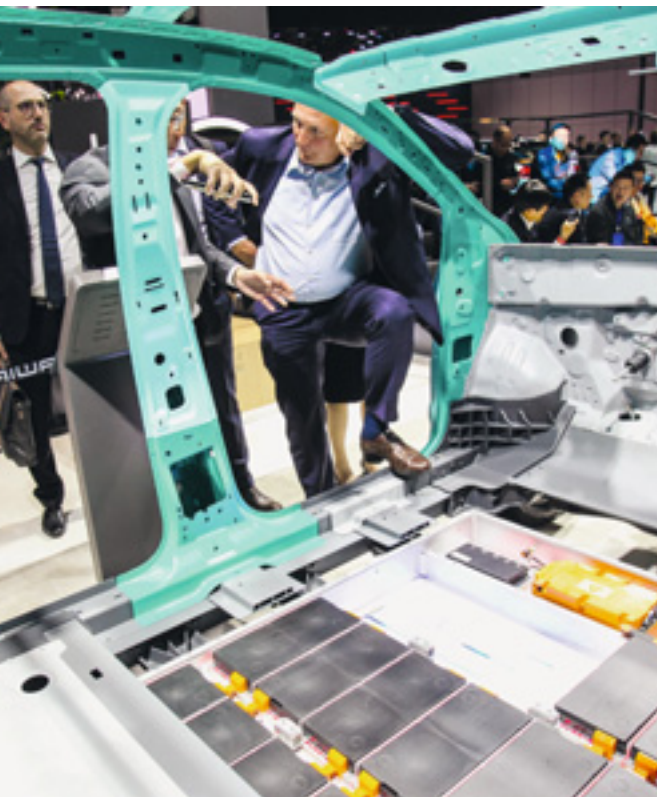
LE SITE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES : [www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)



« Le Stockage électrochimique de l'énergie. Verrous actuels et recherches développées par le réseau RS2E », de J.-M. Tarascon et P. Simon, éditions Iste, 2015.

Émission « La Une de la science » : « À quoi ressembleront les batteries du futur ? » avec J.-M. Tarascon, 2017, France Inter : <https://www.franceinter.fr/emissions/la-une-de-la-science/la-une-de-la-science-02-janvier-2017>

TV5 Monde, émission « Batteries : pourquoi le lithium-ion est-il révolutionnaire ? » avec J.-M. Tarascon, 2019 : [https://www.youtube.com/watch?v=rLpW0wjhX-8&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=rLpW0wjhX-8&feature=emb_logo)



GAO YUWEN - IMAGINECHINA

**La quantité d'énergie stockée par des batteries Li-ion devrait atteindre 720 GWh en 2025, soit la production d'un réacteur nucléaire pendant un mois ! Et la durée de vie des batteries des véhicules électriques pourrait leur permettre d'atteindre... 3 millions de kilomètres !**