

> Les approches actuelles s'inspirent du secteur médical, où l'on utilise des fibres optiques pour transmettre et recevoir des informations lors d'une intervention chirurgicale. Par analogie, on envisage d'intégrer au sein des batteries des fibres et des capteurs optiques afin de cartographier les variations de leur température interne, mais aussi de suivre lors des cycles de charge la formation et l'évolution de la SEI, la couche de passivation à l'interface électrode-électrolyte. Enfin, on peut suivre les flux de chaleur générés par la cellule selon les vitesses de charge, ce qui est un atout pour des batteries plus sûres. Un autre objectif est l'identification des espèces chimiques. Les chercheurs tentent d'obtenir ces informations en concevant des fibres optiques adaptées.

Les techniques optiques ou acoustiques de diagnostic permettent d'identifier les phénomènes à l'origine de la dégradation prématurée des batteries actuelles : fractures mécaniques des électrodes, phénomènes de dissolution des dépôts ou changements de morphologie, etc. Mais pour des batteries intelligentes, cette approche du diagnostic est indissociable d'une étape de réparation.

INTÉGRER DES MATÉRIAUX AUTORÉPARANTS

Doter les batteries de systèmes autoréparants constitue ainsi un champ d'expérimentation de plus en plus actif. Inspirées de processus biologiques comme la cicatrisation ou la reconnaissance spécifique anticorps-antigène, de telles fonctions suggèrent le recours à la chimie supramoléculaire.

Dans cet esprit, on peut souligner les travaux pionniers d'Akira Harada, de l'université d'Osaka, au Japon, et ses collègues. Depuis les années 1990, ces chercheurs ont mis à profit l'interaction d'une cyclodextrine, une molécule circulaire, avec une chaîne polymère. L'enfilement de cyclodextrines autour de la chaîne polymère produit des architectures supramoléculaires à maillons glissants, dont les propriétés élastiques sont remarquables et qui, incorporées à un matériau, peuvent « lier » celui-ci et dissiper les contraintes mécaniques qui s'y exercent.

En 2017, avec de tels liants, Sunghun Choi et ses collègues, de l'Institut coréen avancé de science et technologie (Kaist), ont ainsi amélioré considérablement les performances des anodes en silicium, qui subissent des fluctuations de volume de plus de 300% lors de l'insertion et la désinsertion du lithium. Les batteries dotées de telles anodes supportent ainsi plus de 400 cycles de charge.

L'approche couplant diagnostic et autoréparation, que l'Europe a intégrée au cœur de son programme de recherche *Battery 2030+* démarré en 2019, pourrait ainsi aboutir à des



batteries dotées d'une sortie permettant de communiquer avec un système de gestion qui, en fonction du diagnostic reçu, commanderait le traitement adéquat au sein de la batterie. Cette double fonctionnalité diagnostic-autoréparation sera cruciale pour augmenter la durabilité et la fiabilité des batteries, et par ricochet diminuer leur empreinte écologique.

Cette empreinte écologique des batteries dépend par ailleurs étroitement de leur recyclage, une problématique qui devient de plus en plus importante du fait des millions de batteries Li-ion produites annuellement.

AMÉLIORER LE RECYCLAGE

Le recyclage reposait jusqu'à maintenant sur des procédés métallurgiques classiques, mais complexes. Ils font intervenir de nombreuses étapes (pyrolyses, fusions, extractions de composés solubles...) coûteuses en solvants et en énergie. Surtout, ils sont responsables de nombreuses émissions de CO₂, parfois plus importantes que celles liées à la fabrication de la batterie. Les recherches actuelles visent ainsi à mettre au point des procédés innovants, simples et peu coûteux pour permettre le réemploi ou la récupération directe des électrodes ou des matières actives sans aller jusqu'à leur décomposition chimique, voire à repenser la configuration des batteries afin que chaque électrode puisse être recyclée séparément.

Au cours des trente années qui ont suivi sa mise sur le marché, la technologie Li-ion a peu à peu atteint des performances proches de la

Le marché des voitures électriques est en plein essor, mais les performances des batteries existantes restent insuffisantes pour séduire une majorité d'automobilistes. Le développement de batteries se chargeant en quelques minutes semble aujourd'hui illusoire. En revanche, l'augmentation de l'autonomie, c'est-à-dire de l'énergie stockée en une recharge, est un objectif réaliste.



À long terme, les défis les plus importants sont l'augmentation de la durée de vie des batteries, de leur fiabilité et de leur compatibilité écologique

limite théorique que sa chimie pouvait laisser attendre. Devenue sûre, elle est aussi économiquement compétitive. Elle est désormais un élément clé pour réussir la transition énergétique vers un monde plus durable.

UN ÉLÉMENT CLÉ POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

D'après le Forum économique mondial, les batteries ont déjà entraîné une baisse colossale de 0,4 gigatonne des émissions mondiales de CO₂ dues aux transports; et elles pourraient réduire les émissions de CO₂ de 2,2 gigatonnes supplémentaires d'ici à 2030, soit 30% de la diminution mondiale requise pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat conclu en 2015.

Que réserve l'avenir? La suprématie de la technologie Li-ion devrait encore perdurer pendant plusieurs décennies et ce d'autant plus qu'elle continue de s'améliorer. Il reste néanmoins des défis à relever, qui sont de deux ordres.

À court terme, la charge rapide des batteries Li-ion est l'objectif le plus pressant. Mais une recharge complète en moins de 10 minutes est intrinsèquement impossible. Il y a en revanche beaucoup d'espoir du côté de l'augmentation de l'autonomie, soit *via* l'amélioration des matériaux, soit *via* les batteries tout solide si les verrous technologiques associés sont levés.

À long terme, les défis les plus importants sont l'augmentation de la durée de vie, de la

fiabilité et de l'écocompatibilité des batteries. Cela impliquera vraisemblablement un déplacement de l'attention que nous portons aujourd'hui aux matériaux vers l'électrochimie des interfaces électrode-électrolyte, dont dépendent les performances en puissance, en sécurité, en fiabilité et en longévité. L'aspect dynamique de ces interfaces exigera des techniques d'analyse et de caractérisation *in situ* innovantes.

Ce défi est aussi l'occasion de développer des batteries intelligentes, intégrant à la fois des techniques de diagnostic interne et des matériaux autoréparants. Les diagnostics ainsi réalisés fourniront d'importantes masses de données, que les outils de l'intelligence artificielle pourront utiliser afin de développer de meilleurs systèmes de gestion de la batterie.

La question de l'apport de l'intelligence artificielle au domaine des batteries reste d'ailleurs ouverte. L'IA sera peut-être utile pour accélérer le développement de nouveaux matériaux, mieux maîtriser les interfaces, prédire la durée de vie de la batterie, voire faciliter l'émergence de nouvelles chimies.

Tous ces aspects quelque peu futuristes sont les piliers du programme européen *Battery 2030+*. Mais pour que l'ambition de cette entreprise devienne une réalité, il faudra une vaste collaboration entre chercheurs de spécialités différentes. Dans ce cas, l'Europe pourrait bien rattraper son retard sur les géants asiatiques qui règnent aujourd'hui sur le monde des batteries et reprendre la main sur un marché financièrement lucratif. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Tarascon, **Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?**, *Comptes Rendus Géoscience*, vol. 352(4-5), pp. 401-414, 2020.

J.-M. Tarascon, **Na-ion versus Li-ion batteries : Complementarity rather than competitiveness**, *Joule*, vol. 4, pp. 1616-1620, 2020.

J. Huang et al., **Operando decoding of chemical and thermal events in commercial Na(Li)-ion cells via optical sensors**, *Nature Energy*, vol. 5, pp. 674-683, 2020.

P. Allemand, **Batteries à charge rapide : les limites de la physique**, *Contrepoints*, 14 août 2020.

S. Randau et al., **Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries**, *Nature Energy*, vol. 5, pp. 259-270, 2020.

Un dilophosaure est attiré par la proie abattue par un autre, qui compte défendre sa prise. La paire de crêtes que ces dinosaures avaient sur la tête leur permettait peut-être de s'identifier entre eux.

De nouvelles découvertes montrent que l'un des dinosaures les plus spectaculaires du film « Jurassic Park » était en réalité très différent de l'animal représenté à l'écran.

Le dilophosaure post-Hollywood