



électromagnétique doivent être bien ajustées pour que les pertes soient minimales. Peut-on appliquer le couplage inductif aux voitures électriques pour des recharges rapides? La question est à l'étude, mais cela implique de résoudre des problèmes de dimensionnement ainsi que d'échauffement des batteries.

VERS PLUS DE COMPATIBILITÉ ÉCOLOGIQUE

Outre l'autonomie et la vitesse de charge des batteries, leur compatibilité avec les préoccupations écologiques actuelles est une question capitale. Leur empreinte environnementale dépend de l'abondance des éléments chimiques dont elles sont constituées, du coût énergétique de leur fabrication, mais aussi des possibilités de les recycler. Les analyses de cycle de vie les plus récentes montrent que pour fabriquer ou pour recycler une batterie Li-ion stockant 1 kWh par cycle, une énergie de 400 kWh, associée à l'émission de 75 kilogrammes de CO₂, est nécessaire.

Ce constat incite à innover au niveau des matériaux et de leurs procédés d'élaboration. Il a aussi incité à revisiter certaines technologies telles que le Li-air, le Li-S (lithium-soufre), le Na-ion (sodium-ion)... De toutes ces options, la dernière, qui s'inspire fortement du Li-ion, est la plus avancée. Des batteries Na-ion seront bientôt commercialisées par plusieurs compagnies comme Faradion (Royaume-Uni), Tiamat (France) ou Hina (Chine), qui a démarré une production de masse (60000 cellules par mois).

En termes de densité d'énergie, la technologie Na-ion (140 Wh/kg) ne pourra pas concurrencer le Li-ion (240 Wh/kg). Elle présente en revanche des puissances intéressantes, pouvant dépasser 40 kilowatts par kilogramme, contre 1,5 kW/kg pour les batteries Li-ion. Elle bénéficie aussi de possibilités de charge rapide. Qui plus est, on peut transporter et stocker les batteries Na-ion même lorsqu'elles sont complètement déchargées (contrairement aux

batteries Li-ion, pour des raisons liées aux réactions avec le métal utilisé à l'interface anode-circuit électrique externe), ce qui facilite les manipulations. Et l'élément clé de ces accumulateurs, à savoir le sodium, est mille fois plus abondant que le lithium, donc moins cher, tout en étant uniformément réparti sur le globe terrestre, alors que le lithium est très localisé. Les batteries Na-ion pourraient donc bien remplacer avantageusement, dans un avenir proche, les batteries Li-ion pour nombre d'applications ne nécessitant pas une très grande autonomie, comme les vélos à assistance électrique, les trottinettes, les scooters, les véhicules hybrides ou les appareils de bricolage, sans oublier bien sûr les applications liées aux réseaux de distribution d'électricité pour lesquelles une faible densité volumique d'énergie n'est pas un handicap.

Pour en revenir à l'empreinte écologique des batteries Li-ion, une voie possible pour la diminuer est d'augmenter la durée de vie de ces dispositifs. Les batteries Li-ion actuelles sont déjà fortement optimisées: elles fonctionnent pendant des mois, voire des années, et certaines devraient fonctionner pendant des décennies.

Ainsi, Jeff Dahn et son équipe ont récemment conduit des tests accélérés sur une période de trois ans sur des cellules Li-ion dont la cathode est en NMC 532 et l'anode en graphite. Ces tests ont montré qu'une batterie Li-ion pourrait alimenter un véhicule électrique sur 3 millions de kilomètres parcourus à 20 °C, soit une durée de vie d'environ 25 ans en supposant une décharge de 100% par jour. Cependant, la durée de vie de ces accumulateurs se réduit à 10 ans quand la température d'opération est de 40 °C.

METTRE AU POINT DES BATTERIES « INTELLIGENTES »

Peut-on étendre la durée de vie des batteries tout en recueillant des informations fiables sur leur état de fonctionnement et d'usure? Tel est le défi que l'on tente de relever avec les batteries dites « intelligentes ». L'idée est de mettre au point des outils de diagnostic dont serait équipée la batterie et qui détecteraient ce qui se passe en son sein, afin de gérer de façon optimale son fonctionnement et les cycles de charge quelles que soient les applications visées.

Au cours du cycle de charge-décharge, les électrodes, en se rétractant ou en se dilatant, peuvent être le siège de craquelures et émettre ainsi des ultrasons. Depuis plusieurs années, on considère la détection de ces émissions acoustiques comme la méthode idéale pour suivre *in situ* les évolutions de la batterie. Cependant, cette méthode reste pour l'instant une curiosité de laboratoire en raison de la lourdeur de son utilisation.



En termes de densité d'énergie, la technologie sodium-ion ne pourra pas concurrencer celle du lithium-ion



> 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.