

qui peut produire jusqu'à 5 milliards de cellules par an.

Grâce aux économies d'échelle réalisées, le prix du kilowattheure (kWh) stocké a été divisé par dix durant la dernière décennie. L'objectif est de passer sous la barre des 100 euros le kWh stocké d'ici à 2025 et, à plus long terme, au-dessous de 60 euros. Pour ce faire, Tesla mise notamment sur une augmentation de la capacité de ses cellules *via* une augmentation du taux de nickel à la cathode et l'intégration de composites C/Si à l'anode, ou encore sur le développement d'un nouveau procédé industriel de fabrication des électrodes.

Le dynamisme d'Elon Musk a bousculé l'industrie automobile et a permis l'essor actuel des véhicules électriques – à ce jour, plus de 450 modèles et une flotte de plus de 8 millions de véhicules qui dépassera les 150 millions, voire beaucoup plus, en 2040. Des entreprises concurrentes comme CATL, Panasonic ou Volkswagen prévoient la construction de *giga-factories* pour satisfaire la demande mondiale sans cesse croissante.

Pour le « stockage stationnaire » d'énergie (par exemple le stockage massif de l'électricité produite par des fermes d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques), la capacité installée dans le monde devrait passer de 3-4 gigawattheures (GWh) à 1 300 GWh dans les années à venir, ce qui laisse présager une expansion spectaculaire de la production annuelle de batteries.

VERS DES BATTERIES PLUS ÉNERGÉTIQUES ET PLUS PUISSANTES

Il reste cependant à améliorer la technologie Li-ion tant sur le plan de la densité d'énergie que sur ceux de la durée de vie, de la sécurité et de l'empreinte environnementale. Quelles sont les pistes explorées?

Afin d'augmenter la densité d'énergie d'une batterie, donc son autonomie, on peut

PILE OU BATTERIE ?

Les piles et les batteries sont des assemblages en série ou en parallèle de plusieurs éléments : des accumulateurs, ou cellules, électrochimiques. Mais les piles ne sont pas rechargeables, contrairement aux batteries. Il est à noter que l'anglais ne fait pas la distinction, le mot *battery* pouvant désigner soit une batterie, soit une pile, soit même un simple accumulateur électrochimique.

soit augmenter la tension de la cellule, c'est-à-dire la différence de potentiel de travail entre les matériaux actifs de la cathode et de l'anode, soit augmenter la capacité spécifique des deux électrodes.

En dehors des phases lamellaires riches en nickel présentées plus haut, la découverte en 2002 par l'équipe de Jeff Dahn, de l'université Dalhousie, au Canada, et en 2007 par celle de Michael Thackeray, du laboratoire américain d'Argonne, de composés riches en lithium, dont l'archétype est la phase $\text{Li}_{1,2}\text{Ni}_{0,13}\text{Co}_{0,13}\text{Mn}_{0,54}\text{O}_2$, suscite de grands espoirs : ils ont une capacité exacerbée, due au cumul d'activités liées à la fois aux cations (ions positifs) et aux anions (ions négatifs). Mon groupe au Collège de France a prédit ce phénomène en 1999 et l'a démontré expérimentalement pour la première fois en 2013. Ces matériaux remettent ainsi en cause une idée vieille de trente ans qui postulait que l'activité d'un matériau d'électrode était seulement liée aux cations. On peut ainsi obtenir des densités d'énergie très intéressantes, d'environ 350 Wh/kg ou 750 Wh/L.

Malheureusement, l'activité liée aux anions s'accompagne de divers phénomènes qui limitent l'efficacité énergétique et font décroître le potentiel moyen des cellules avec le nombre de cycles de charge. De plus, bien qu'impressionnantes, les densités d'énergie atteintes ne satisfont pas encore les constructeurs automobiles, qui souhaiteraient des densités supérieures à 800 Wh/L pour équiper des véhicules à forte autonomie.

L'ambition d'atteindre cette performance est-elle réaliste ? Il y a de cela une dizaine d'années, on a parié sur la technologie Li-air (où le lithium réagit avec de l'oxygène provenant de l'air), certains spécialistes ayant estimé qu'elle pourrait fournir 5 à 10 fois la densité d'énergie du Li-ion. Même Toyota prévoyait de concurrencer dès 2022 les voitures Tesla avec des batteries de ce type à charge rapide. Mais l'espoir a été de courte durée et on n'en parle plus aujourd'hui.

Actuellement, c'est au tour des batteries au lithium « tout solide », batteries dont l'électrolyte est solide et non liquide, de susciter l'engouement des spécialistes. Cette technologie a été développée initialement en 1986 par James Akridge, de la société américaine Eveready, dans une version à couches minces ; mais le passage à des électrodes massives n'avait jamais pu être réalisé. La mise au point d'un prototype fonctionnel pourrait cependant aboutir grâce à la découverte en 2011, par Ryoji Kanno, de l'institut de technologie de Tokyo, et ses collègues, d'un thiophosphate ($\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$) qui présente une conductivité ionique exceptionnellement élevée, comparable voire supérieure à celle d'un électrolyte liquide.

C'est aujourd'hui au tour des batteries au lithium dont l'électrolyte est solide, et non liquide, de susciter l'engouement des spécialistes

> Cette avancée a poussé les différents acteurs à mobiliser des moyens colossaux pour faire des batteries tout solide une réalité. Leur électrolyte n'étant pas liquide, ces batteries seraient potentiellement plus sûres que celles commercialisées aujourd'hui, mais aussi plus attractives en termes de densité volumique d'énergie (supérieure de 60% à celle du Li-ion classique), notamment parce qu'elles autorisent l'utilisation d'anodes en lithium métallique, au lieu du graphite.

Cependant, de nombreux obstacles demeurent (instabilité des interfaces électrolyte-électrode, croissance de dendrites de lithium à l'anode, etc.). Des progrès considérables ont été réalisés pour lever ces difficultés. Le résultat le plus spectaculaire est à mettre au crédit de Samsung, qui a présenté en 2020 un prototype de cellule tout solide (avec une densité d'énergie d'environ 900 Wh/L) dépourvue de lithium à l'anode au moment de l'assemblage et qui est capable de dépasser 1 000 cycles de recharge sans perte notable de capacité.

Bien que le défi des interfaces au sein des batteries tout solide soit loin d'être maîtrisé, des jeunes entreprises telles que QuantumScape et Solid Power n'hésitent plus à annoncer la production dès 2024 de batteries tout solide. Elles rejoignent ainsi Toyota qui, dès 2017, avait affirmé que des batteries tout solide alimenteraient en 2022 ses véhicules électriques. Si cela se réalise, le développement si rapide d'une technologie nouvelle serait une première dans l'histoire des batteries.

COMMENT OBTENIR UNE RECHARGE RAPIDE ?

Outre la capacité, donc l'autonomie, des batteries Li-ion, une demande pressante des utilisateurs est une vitesse élevée de charge. Sur ce plan, la technologie tout solide offre en théorie un avantage (car l'électrolyte solide permet de transporter un plus grand nombre d'ions Li^+), mais qui reste à démontrer en pratique.

La vitesse de charge dépend entre autres de la distance que les ions ont à parcourir au sein des électrodes. Cette distance est d'autant plus courte que les particules dont est constitué le matériau d'électrode sont petites et les électrodes minces, mais cette configuration a l'inconvénient d'augmenter le nombre de réactions parasites et de réduire la densité d'énergie.

À cela s'ajoutent bien d'autres difficultés. L'une d'elles est le risque de formation de dendrites de lithium lors de la charge, comme on l'a évoqué plus haut, et donc d'un emballement thermique. Un réglage fin de la température lors de la charge se révèle essentiel, car une température basse augmente le risque d'emballement, tandis qu'une température élevée



favorise des réactions parasites qui nuisent à la durée de vie de la batterie.

À ces considérations qui montrent la complexité de la charge rapide s'ajoute la problématique du dimensionnement des bornes de recharge en termes de connectique : des fils de cuivre de diamètre supérieur à 2 centimètres sont nécessaires pour transférer une énergie de quelques centaines de kWh en moins de 10 minutes. En bref, une batterie conférant à un véhicule électrique une autonomie de 800 kilomètres et rechargeable en 10 minutes paraît fortement inconcevable.

Cependant, de nombreux travaux sont en cours pour améliorer la charge rapide. Au niveau de la chimie, les chercheurs tentent d'identifier de nouveaux matériaux d'électrodes à conductivités ioniques et électriques plus élevées et d'en optimiser la morphologie ou la structure, en s'aidant des techniques de tomographie à rayons X ou à neutrons. En attendant que ces recherches aboutissent, une solution alternative est de recourir à des recharges partielles (jusqu'à 80%) de la batterie selon des protocoles bien précis, ce qui permet d'atteindre des temps de recharge approchant 25 minutes. C'est ce que font les superchargeurs actuels de Tesla.

Évoquons un autre aspect de la charge des batteries, celle concernant les appareils portables (téléphones, ordinateurs, tablettes, rasoirs électriques, etc.) de nouvelles générations : pour des raisons de commodité, il y a un engouement pour la charge sans fil, par induction électromagnétique. Ce procédé repose sur le transfert sans contact de l'énergie entre deux bobines, l'une émettrice et l'autre réceptrice, dont les fréquences de résonance

Les batteries Li-ion servent aussi à stocker de l'électricité produite à partir de sources intermittentes comme l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Des batteries au sodium (Na-ion) pourraient bientôt les concurrencer dans ces applications.



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 (60 000 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 qu'elle soit 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