

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