

Contenir plus d'énergie dans moins d'espace : le défi du développement des batteries tout-solide

Ce nouveau type de batterie pourrait doubler, voire tripler, la densité énergétique du lithium-ion, aujourd'hui utilisé dans l'écrasante majorité des voitures et appareils connectés. Mais en laboratoire, la recherche se heurte depuis plus de dix ans à des obstacles chimiques.

• Par Théo ASSOUS et Paul EDON

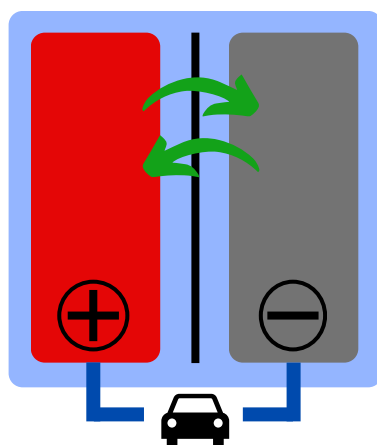
Imaginez une voiture électrique capable d'avalier les 1 000 kilomètres qui séparent Lille de Marseille sans s'arrêter à une borne de recharge. Vous comprendrez aussitôt pourquoi le développement des batteries électriques crée autant d'attente dans le monde scientifique et chez les industriels. La recherche est ainsi portée depuis plusieurs années par les constructeurs automobiles, qui devraient investir plus de mille milliards d'euros dans l'électrification d'ici 2030, selon une analyse de l'agence de presse Reuters. C'est l'équivalent d'un tiers du Produit intérieur brut (PIB) annuel de la France.

Figure de proue de cet emballage : la batterie tout-solide. « Si elles fonctionnent un jour — et on en est encore loin —, on pourra avoir des densités d'énergie deux à trois fois supérieures à maintenant », observe Christian Masquelier, directeur du Laboratoire de réactivité et de chimie des solides (LRCS) d'Amiens et coordinateur du projet LIMASSE, chargé de développer les batteries tout-solide. Des études plus anciennes pointent, elles, des gains de 70 % de densité énergétique.¹

Pour saisir ces enjeux, ces espoirs et la révolution que pourrait devenir le stockage tout-solide, il faut en revenir aux fondamentaux. Aujourd'hui, les batteries lithium-ion sont les reines incontestées du stockage d'énergie de nos voitures, ordinateurs portables, smartphones... Aucun autre type de batterie n'égale leur densité, plafonnée à 800 Wh/kg pour les plus puissantes. Si bien que des méga-usines continuent de pousser comme des champignons de l'Asie jusqu'au nord de la France.

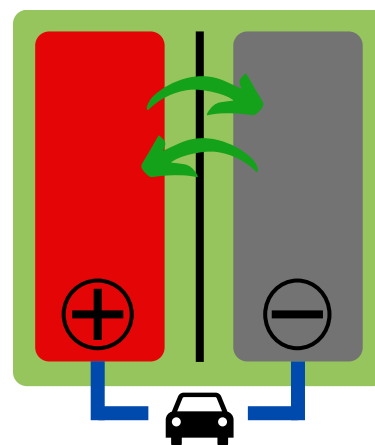
Ces batteries lithium-ion se composent de quatre parties : une électrode négative (appelée anode), généralement constituée de graphite ; une électrode positive (appelée cathode), constituée d'un mélange de matériaux ; de l'électrolyte liquide ; et un séparateur placé entre les deux électrodes. Lorsqu'une batterie décharge, les électrons quittent l'anode et créent un courant électrique. Pour équilibrer ce transfert, les ions lithium contenus dans l'électrolyte vont, eux aussi, migrer vers la cathode, en passant par le séparateur. Lors de la recharge de la batterie, le mouvement s'inverse.

Batterie lithium-ion



- Cathode de nickel, cobalt, manganèse...
- Anode en graphite
- Électrolyte liquide
- Séparateur
- Transfert des ions lithium

Batterie tout-solide



- Cathode composite
- Anode lithium métal
- Électrolyte solide
- Séparateur
- Transfert des ions lithium

Transfert des électrons (courant électrique)

Transfert des électrons (courant électrique)

Le tout-solide tire son épingle du jeu en remplaçant le graphite de l'anode par du lithium métal, matériau capable de stocker nettement plus d'énergie. « *Ce serait le Graal, parce que le lithium serait abondant* », note Christian Masquelier. « *Sur le principe, il n'y a rien de compliqué* », admet Gwenaëlle Rousse, enseignante-chercheuse à Sorbonne Université, spécialisée dans la cristallographie. Aussi simple que de remplacer un réservoir de carburant par un autre contenant bien plus gros.

Le casse-tête des dendrites

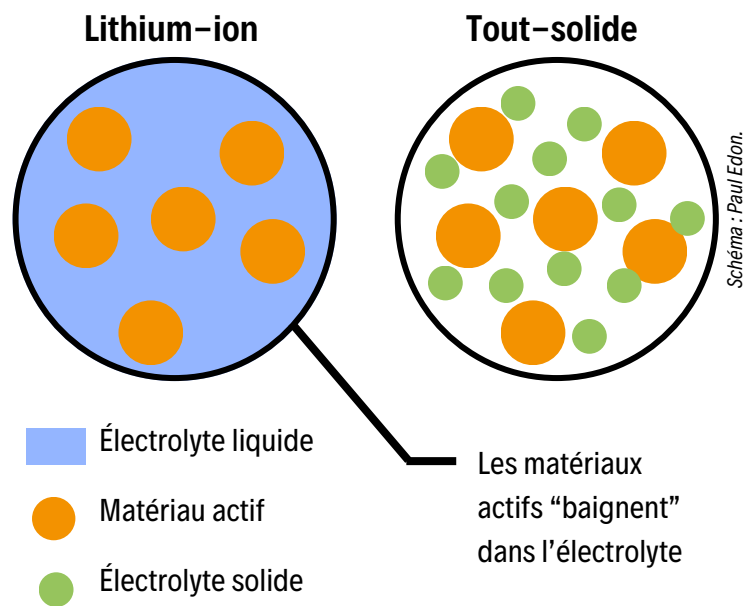
Du moins en théorie. Car en pratique, ce changement de réservoir amène un gros problème : les dendrites. Au microscope, ces objets ressemblent à de petits pics en forme d'arbres. « *Elles se forment lorsque le lithium ne se dépose pas de manière uniforme sur la surface de l'anode. Lorsque l'on charge avec de trop forts courants, les atomes vont préférer se ranger tout le temps à la même place* », indique Christian Masquelier. Ces atomes s'empilent les uns sur les autres et forment alors une dendrite, capable de traverser le séparateur qui relie l'anode à la cathode. Un court-circuit est créé.

La batterie peut alors s'enflammer, voire exploser. C'est parfois le cas aujourd'hui, même avec le lithium-ion, mais cela se produisait déjà dans les années 1980-1990 avec le lithium métal utilisé dans le tout-solide. À l'époque, l'entreprise Moli Energy constate des accidents et des emballages thermiques sur ses batteries, et est contrainte de rappeler ses produits. La dangerosité des appareils était renforcée par l'utilisation d'électrolyte liquide, un composant inflammable.

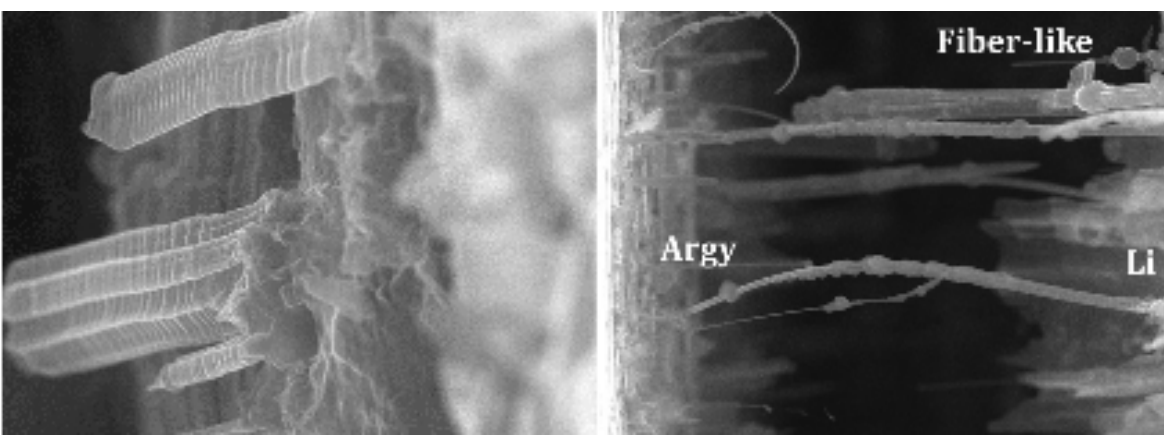
Pour empêcher la formation de ces dendrites, le principe du tout-solide est de remplacer l'électrolyte liquide par des matériaux solides.

Mais selon l'article « Fundamentals of Inorganic Solid-State Electrolytes for Batteries » (2019)², des dendrites pourraient quand même proliférer.

« *Avoir uniquement des matériaux solides, ça pose également des problèmes d'interface entre les différents composants. Quand vous mettez deux métaux l'un contre l'autre et que chacun d'eux augmente ou diminue en volume au cours des cycles de charge et de décharge, le contact se fait moins bien* », éclaire Jean-Marie Tarascon, titulaire de la chaire « Chimie du solide et énergie » au Collège de France et pionnier de la recherche sur les batteries tout-solide.



Pour illustrer, un électrolyte liquide peut être comparé à l'eau dans une éponge : il se diffuse partout et offre un contact optimal à tous les niveaux. Le concept des batteries solides revient à remplacer l'eau par de la brique en espérant qu'elle irrigue l'éponge aussi bien que l'eau. Pas simple. L'avantage, c'est qu'en cas d'échauffement, ce solide est beaucoup moins dangereux que le liquide.



Différents types de dendrites au microscope.

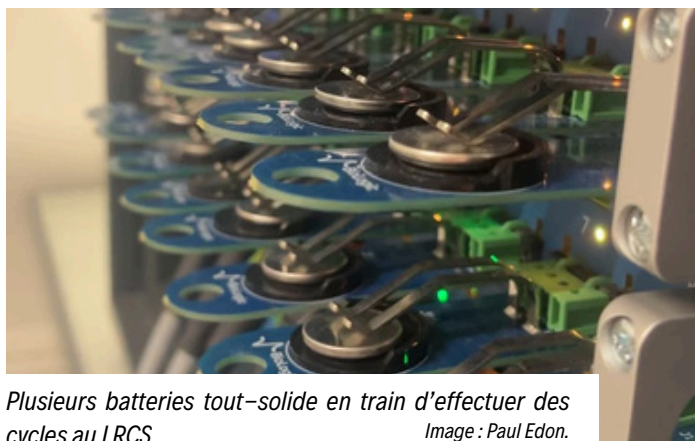
Crédits : Carine Devoisne/Journal of Materials Chemistry/ LRCS.

Où pourrait-on trouver des batteries solides ?

En raison de leur densité énergétique potentiellement élevée, l'objectif majeur des batteries tout-solide est d'équiper les véhicules électriques de demain. L'intérêt de la technologie s'applique aussi au stockage stationnaire, près des lieux de production d'énergie solaire et éolienne, des centres de données et des habitations. « *Sous votre maison, la masse d'une batterie importe peu, estime Christian Masquelier. En revanche, il faut qu'elle soit totalement sans danger, et l'absence de liquide dans les composants est un point fort.* » Selon le chercheur, les gains du tout-solide seraient trop minimes sur les batteries de smartphones pour pouvoir remplacer le lithium-ion.

Ce problème d'interface était posé dès 2016 comme le « *talon d'Achille* » des batteries tout-solide dans l'étude de référence « *A Solid Future for Battery Development* ». Or dans ce même article, les chercheurs alertaient aussi au sujet du développement du lithium-ion : cette technologie tutoyera dans une poignée d'années sa capacité de densité énergétique maximale. Pour les industriels, il faudra donc trouver un remplaçant.

C'est pourquoi dans les laboratoires du Collège de France, à Paris, ou à tous les étages du LRCS d'Amiens, des batteries tout-solide poursuivent des tests. Charge, décharge, puis recharge... À l'autre bout du fil, des courbes de performances sont dessinées à l'infini sur des écrans d'ordinateur. « *Mais il y a énormément de perte de densité d'énergie entre des tests en laboratoire et en conditions réelles* », affirme Gwenaëlle Rousse. Les batteries sont par exemple mises sous pression. « *Quand on regarde les données, on se dit que c'est incroyable : on a une densité de 1 000 Wh/kg. Mais le dispositif n'est pas du tout applicable à un produit final, parce que le système de compression serait plus lourd qu'une voiture entière* », précise Ronan Chometon, ingénieur de recherche chez Blue Solutions, entreprise française leader des batteries tout-solide.



Plusieurs batteries tout-solide en train d'effectuer des cycles au LRCS.
Image : Paul Edon.

“ **Je pense que cette batterie finira par voir le jour [...] Les résultats en laboratoire sont là.** ”

Jean-Marie Tarascon, titulaire de la chaire « **Chimie du solide et énergie** » au Collège de France

Autant de facteurs qui enrayent l'idée d'une industrialisation, malgré les effets d'annonce de grands constructeurs tels que Toyota ou le groupe chinois CATL depuis plusieurs années. « *Je pense quand même que c'est sérieux et que cette batterie finira par voir le jour, soutient Jean-Marie Tarascon. Parce que contrairement à d'autres projets passés, les résultats en laboratoire sont là.* » Comme pour illustrer l'enjeu qui entoure le développement du tout-solide, les trois inventeurs des batteries lithium-ion ont reçu le prix Nobel de chimie en 2019. Le sous-titre du prix, selon Christian Masquelier ? « *Ils ont révolutionné l'énergie et notre mode de vie.* »

Études scientifiques utilisées :

1. Janek, J., & Zeier, W. G. (2016). A solid future for battery development. *Nature Energy*, 1(9). <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.141>
 2. Famprikis, T., Canepa, P., Dawson, J.A. et al. Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes for batteries. *Nat. Mater.* 18, 1278–1291 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0431-3>
- Janek, J., Zeier, W.G. Challenges in speeding up solid-state battery development. *Nat Energy* 8, 230–240 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01208-9>
 - Tarascon, J. (2010). Is lithium the new gold ? *Nature Chemistry*, 2(6), 510. <https://doi.org/10.1038/nchem.680>