

après minuit. Alors que les fichiers se téléchargeaient sur mon disque dur, je ne tenais plus en place. Puis j'ai ouvert l'image. Lorsqu'on est la première personne à poser les yeux sur une partie de l'Univers que personne n'a encore jamais vue, on ressent une émotion indescriptible. J'ai d'abord pris un moment pour apprécier la présence de chaque étoile et galaxie sur l'image. Puis je me suis mise au travail.

Le coin de l'image qui m'intéressait est une région riche en activité. Au moins la moitié des galaxies ont une forme irrégulière car elles ont subi, ou subissent encore, des collisions avec des galaxies voisines. Mes collègues et moi avons estimé la population d'étoiles de ces galaxies – avec des résultats spectaculaires, voire problématiques.

En effet, dès cette époque, certaines des galaxies du DRC avaient formé en un temps record trois fois plus d'étoiles que la Voie lactée n'en compte aujourd'hui. Les simulations numériques fondées sur notre compréhension des processus physiques en jeu n'arrivent pas à produire de telles galaxies si tôt dans l'histoire de l'Univers. Modéliser le rythme effréné de la formation d'étoiles dans ces galaxies est difficile, car la physique prévoit que les galaxies devraient se disloquer ou chauffer à tel point qu'elles expulseraient tout le gaz qu'elles contiennent, ce qui ne leur permettrait pas de croître jusqu'aux tailles constatées aujourd'hui.

Le protoamas dans son ensemble est la source d'un second problème: il est lui-même particulièrement massif. Quand j'ai estimé sa masse la première fois, j'ai trouvé le résultat très suspect. J'ai consulté mes collègues pour vérifier mes calculs. Deux semaines plus tard, j'ai présenté mes données à mes collaborateurs. L'un pensait qu'il y avait une erreur dans le code; un autre m'a demandé si je n'avais pas compté deux fois une composante. (Il y avait bien un petit bug dans mon programme, mais pas assez grave pour expliquer la masse gigantesque de l'amas.) Après maintes vérifications, le résultat semblait solide: le Distant Red Core frôle les limites autorisées dans notre Univers.

La masse d'un amas ne se résume pas à celle des galaxies et du gaz qu'il contient. Il faut ajouter la matière noire, la forme de matière la plus abondante dans l'Univers. Chaque galaxie, et chaque amas, est entourée d'un «nuage» (ou halo) de cette composante de nature inconnue. Et bien que la matière noire soit invisible et mal comprise, elle laisse un signal gravitationnel assez clair pour estimer son abondance (en utilisant diverses techniques astrophysiques).

Nous avons donc estimé la masse de la matière noire du Distant Red Core, et, selon nos simulations, ce protoamas contiendrait presque la quantité maximale possible pour

une telle structure présente aussi précocement dans l'histoire cosmique. Si nous simulons son évolution jusqu'à aujourd'hui, soit pendant 12 milliards d'années, il serait plus large que le plus grand amas de galaxies actuel, El Gordo («le gros» en espagnol). Même si l'estimation de la quantité de matière noire dans l'amas souffre d'incertitudes importantes, la situation pourrait devenir problématique: nous ne sommes pas certains d'avoir repéré toutes les galaxies qui appartiennent à cet amas. Nous pourrions encore en trouver en dehors du champ de vue de nos observations du DRC. La masse totale pourrait alors être encore plus grande et nous aurions alors des difficultés pour expliquer l'existence d'un tel objet.

REPENSER L'HISTOIRE DES GALAXIES

Notre étude du DRC et la découverte d'autres protoamas du même genre nous obligent à repenser notre compréhension de la formation des amas de galaxies. Nous devons comprendre comment des objets très massifs se sont formés très tôt dans l'Univers. Il nous faut mieux cerner les processus physiques et la chimie de la naissance des étoiles dans les galaxies (*voir l'encadré page ci-contre*). Mais il faut aussi identifier les conditions de formation des halos de matière noire qui ont servi à amorcer la constitution de galaxies. Ces dernières sont-elles apparues plus tôt qu'on ne le pensait? Quelles seraient les conséquences sur la formation des éléments? Ces galaxies auraient-elles produit les ingrédients indispensables à l'émergence de planètes habitables, voire hébergé des formes de vie?

Certaines de ces questions sont encore largement hors de notre portée, mais les astrophysiciens travaillent dur pour répondre aux autres. Nous poursuivons nos observations sur ces protoamas à travers tout le spectre électromagnétique. Nous développons des méthodes innovantes pour découvrir d'autres protoamas. Avec plus d'exemples, nous pourrions voir si des amas ayant des caractéristiques semblables à celles du DRC sont exceptionnels ou fréquents. Les astronomes et les théoriciens constituent de nouvelles collaborations pour percer le mystère de la naissance des protoamas très denses présentant des taux de formation d'étoiles extraordinaires.

La meilleure façon d'éprouver les modèles est de les faire trembler en portant notre regard sur les situations les plus extrêmes. Serons-nous d'ici à quelques années à même d'expliquer les caractéristiques de ces protoamas? En mettant au défi notre compréhension de la naissance des étoiles et des galaxies dans l'Univers primordial, nous ne pouvons qu'affiner notre vision du cosmos et de son histoire. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. S. Long et al., **Emergence of an ultrared, ultramassive galaxy cluster core at $z = 4$** , *The Astrophysical Journal*, vol. 898(2), article 133, 2020.

D. Coe, **Pleins feux sur les premières galaxies**, *Pour la Science*, n° 496, pp. 60-68, février 2019.

Quel futur pour les batteries?

Depuis plusieurs années, les batteries au lithium équipent véhicules électriques, téléphones portables et une multitude d'autres dispositifs électroniques. Mais leurs performances restent en deçà des besoins. Comment les améliorer? Tour d'horizon.

De plus en plus présentes dans notre quotidien, en particulier dans nos appareils électroniques mobiles, les batteries intéressent aussi un large éventail de domaines industriels (automobile, réseaux de distribution d'électricité, aérospatial, etc.) et équipent nombre de dispositifs médicaux et robotiques. Depuis plusieurs années, on les considère comme l'un des moyens les plus performants et les plus flexibles pour stocker de l'énergie. Ces dispositifs électrochimiques accumulateurs d'électricité et rechargeables, dont le premier (la batterie au plomb-acide) a été mis au point en 1859 par le physicien français Gaston Planté, joueront sans doute un rôle clé dans la transition énergétique de nos sociétés vers un modèle de développement à faibles émissions de dioxyde de carbone.

Parmi les technologies de batteries existantes, celle dite «lithium-ion» (Li-ion) s'est imposée et est commercialisée depuis 1991. Sa force principale réside dans sa haute densité d'énergie – l'énergie stockée par unité de volume ou de masse –, deux à six fois supérieure à celles des batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd), qui ont vu le jour en 1899, au nickel-hydrure métallique (Ni-MH), commercialisées pour la première fois en 1989, ou au plomb-acide.

Les batteries Li-ion équipent par exemple les voitures électriques, dont le marché est en forte progression, et leur procurent à ce jour une autonomie de quelque 300 à 400 kilomètres. Pour que les véhicules électriques séduisent la majorité des automobilistes, cependant, une

autonomie deux fois plus grande sera nécessaire. Dans ce domaine comme dans bien d'autres, on attend donc des batteries aux performances améliorées. Aura-t-on bientôt, dans chacun des domaines concernés, des batteries satisfaisantes en termes d'autonomie, de vitesse de recharge et de fiabilité, et ce sans sacrifier les ambitions écologiques?

DES ASSEMBLAGES DE CELLULES ÉLECTROCHIMIQUES

Avant de poursuivre et donner des éléments de réponse, rappelons brièvement le principe de fonctionnement des batteries.

Une batterie est un assemblage de plusieurs accumulateurs ou «cellules» identiques fournissant chacun une tension électrique qui dépend des propriétés électrochimiques des matériaux utilisés. Chaque cellule est constituée d'une électrode positive, la cathode, et d'une électrode négative, l'anode, les deux électrodes étant séparées par un milieu liquide ou solide, l'électrolyte, où des ions peuvent se déplacer. Lorsque les deux électrodes sont connectées à un circuit électrique externe où des électrons sont libres de circuler, les réactions électrochimiques (réversibles) au niveau des électrodes conduisent à un stockage ou à une libération de charges électriques (processus de charge ou décharge), selon le sens de circulation des électrons.

Prenons l'exemple d'une cellule Li-ion (voir la figure pages 46 et 47). Ses deux électrodes agissent comme des éponges à lithium. La cathode est généralement constituée d'un oxyde métallique, et l'anode de graphite >

L'AUTEUR



JEAN-MARIE TARASCON
professeur au Collège
de France, où il dirige
le laboratoire Chimie du solide
et énergie, directeur
du Réseau sur le stockage
électrochimique de l'énergie
(RS2E) et membre
de l'Académie des sciences

L'ESSENTIEL

> Les batteries sont des systèmes qui convertissent de l'énergie chimique en énergie électrique et qui sont rechargeables.

> Les batteries « lithium-ion », apparues dans les années 1990 après de longues recherches, offrent une densité d'énergie élevée. Elles sont utilisées aujourd'hui dans un grand nombre d'applications.

> Les scientifiques explorent plusieurs voies afin d'améliorer les performances de ces batteries ou d'autres et de diminuer leur empreinte écologique.



Depuis les années 1990, les batteries au lithium-ion, ou Li-ion, (ici des batteries de type « bouton ») se sont beaucoup répandues, grâce à leur capacité relativement élevée par rapport aux batteries plus anciennes. Elles alimentent notamment les véhicules électriques et des appareils portables tels que téléphones, ordinateurs, casques et écouteurs sans fil, rasoirs, outils de bricolage, etc.

> (feuillets de carbone). En décharge, c'est-à-dire quand la cellule fournit de l'électricité à un appareil, les atomes de lithium liés au carbone de l'anode se dissocient en ions positifs, Li^+ , et en électrons (selon la réaction $\text{Li}_x\text{C}_6 \rightarrow x\text{Li}^+ + xe^- + \text{C}_6$) ; les électrons partent dans le circuit externe, tandis que les ions Li^+ se déplacent en sens inverse à travers l'électrolyte jusqu'à la cathode ; ces ions s'insèrent dans le matériau de l'électrode et se recombinaient avec les électrons provenant du circuit électrique externe (selon la réaction $\text{MO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^- \rightarrow \text{Li}_x\text{MO}_2$, où MO_2 désigne l'oxyde métallique). En situation de charge, c'est l'inverse.

La différence entre les potentiels électrochimiques des matériaux des deux électrodes détermine la tension électrique fournie par la cellule. L'étendue des réactions (traduite par le facteur x dans les réactions indiquées ci-dessus) détermine quant à elle la capacité de stockage de charge, c'est-à-dire la charge électrique maximale accumulée. L'énergie stockée est le produit de la tension par la capacité ; elle s'exprime en wattheures par litre (Wh/L) ou en wattheures par kilogramme (Wh/kg), la puissance fournie s'exprimant en watts (W).

Vers le milieu du xx^{e} siècle, afin de mettre au point de meilleures batteries en termes de puissance (énergie fournie par unité de temps), d'autonomie ou de capacité (charge électrique stockée), de durée de vie, etc., les scientifiques ont commencé à s'intéresser au lithium, métal qui a l'avantage d'être très léger. Dans les années 1970, des chercheurs ont remarqué la faculté de certains matériaux à intégrer, de façon réversible, des ions Li^+ dans leur structure sans que celle-ci se déstabilise. Cette propriété, associée au fort pouvoir réducteur du lithium, c'est-à-dire la propension des atomes de lithium à céder un électron, promettait des densités d'énergie deux à trois fois supérieures à celles des batteries de l'époque.

Ainsi, en 1976, l'Américain Stanley Whittingham (Prix Nobel de chimie en 2019), travaillant chez Exxon, fit la démonstration d'une batterie lithium-métal, avec une anode métallique en lithium et une cathode constituée d'un matériau dit « d'insertion » ou « d'intercalation » à structure lamellaire, le disulfure de titane (TiS_2), où les ions Li^+ s'insèrent aisément ; l'eau étant incompatible avec le lithium, on a remplacé l'électrolyte aqueux des anciennes techniques par un électrolyte organique (du sel de lithium, LiPF_6 , dissous dans du carbonate de propylène).

Malheureusement, cette configuration de batterie présentait des problèmes de sécurité persistants. En effet, lors de la charge et décharge des accumulateurs, des dendrites de lithium (amas de cristaux de forme

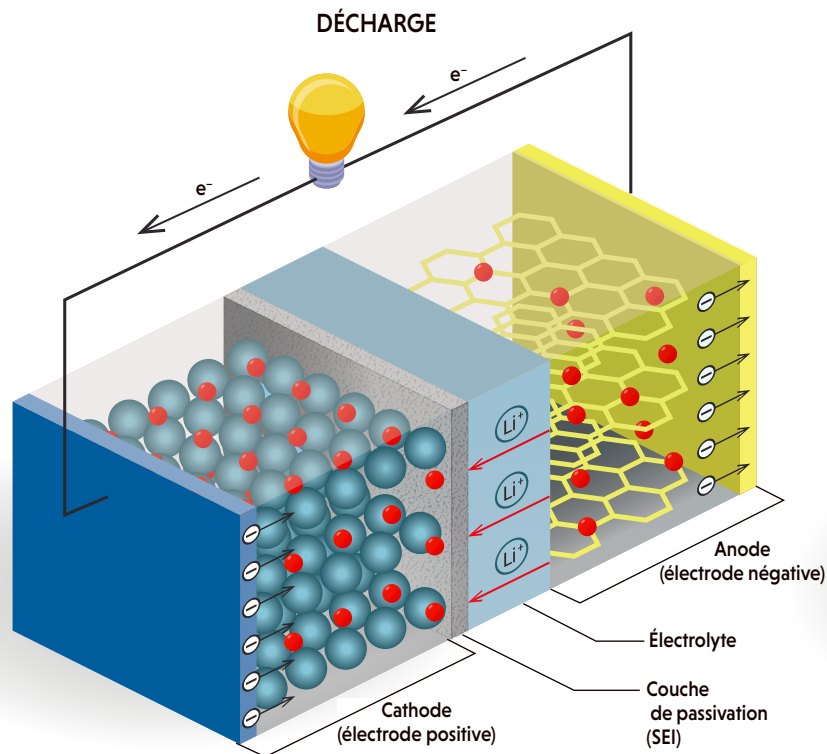
arborescente) se formaient sur l'anode et pouvaient croître suffisamment pour atteindre la cathode et ainsi provoquer un court-circuit. Les batteries pouvaient alors prendre feu, voire exploser, lors de leur utilisation.

Face à ce défi, les scientifiques ont adopté deux stratégies. L'une est d'interposer entre l'anode de lithium métallique et la cathode une barrière matérielle ; c'est le principe des batteries lithium-métal-polymère de Blue Solutions, filiale du groupe Bolloré. L'autre stratégie consiste à diminuer l'activité du lithium métallique de l'anode en le remplaçant par un matériau d'intercalation pour les ions Li^+ , généralement du graphite, forme lamellaire du carbone. C'est ce qui a donné naissance au concept des batteries Li-ion dans les années 1980 et qui a rendu possible la commercialisation par Sony, en 1991, des premières batteries de ce type.

Depuis, les performances des batteries Li-ion ont beaucoup progressé. Leur densité d'énergie produite a ainsi plus que doublé : elle est passée de 100 Wh/kg à 240 Wh/kg aujourd'hui (à comparer par exemple avec les 40-50 Wh/kg des batteries au plomb-acide). Un rythme de progression inédit, la densité d'énergie des batteries n'ayant jusque-là que doublé en un siècle.

LE FRUIT D'UN TRAVAIL DE LONGUE HALEINE

Le succès des batteries Li-ion est le fruit d'un travail de longue haleine mené par de nombreux scientifiques et ingénieurs, qui ont dû lever plusieurs verrous techniques et scientifiques tant au niveau des matériaux d'électrodes, des électrolytes et de leurs interfaces que des configurations de cellules.



Une batterie est un assemblage de cellules électrochimiques, chacune comportant une cathode, un électrolyte et une anode. Quand la batterie alimente un appareil électrique (décharge), l'anode fournit des électrons (e^-) au circuit externe, tandis que la cathode en reçoit ; simultanément, l'anode fournit des ions positifs au circuit interne, ions qui vont de l'anode à la cathode via l'électrolyte. Ainsi, lors de la décharge d'une batterie Li-ion, l'oxyde lamellaire de la cathode est le siège de réactions de « réduction » avec insertion d'un certain nombre x d'ions de lithium Li^+ et d'autant d'électrons, tandis que l'anode est le siège de réactions d'« oxydation » libérant x ions Li^+ et x électrons. En situation de charge, les réactions sont inversées.

PRIX BALZAN 2020

Jean-Marie Tarascon a été récompensé en 2020 par le prix Balzan (www.balzan.org) pour ses travaux « sur la science des matériaux pour les énergies renouvelables ».