

MWH (MÉGAWATTHEURE)

Unité d'énergie. Un Français consomme en moyenne 7,5 MWh d'électricité par an (7500 kWh).

KW (KILOWATT) Unité de puissance.

Une installation de 1 kW fournit 24 kWh par jour. La majorité des logements français ont un raccordement électrique d'une puissance de 6 kW.

ÉLECTROLYTE Substance

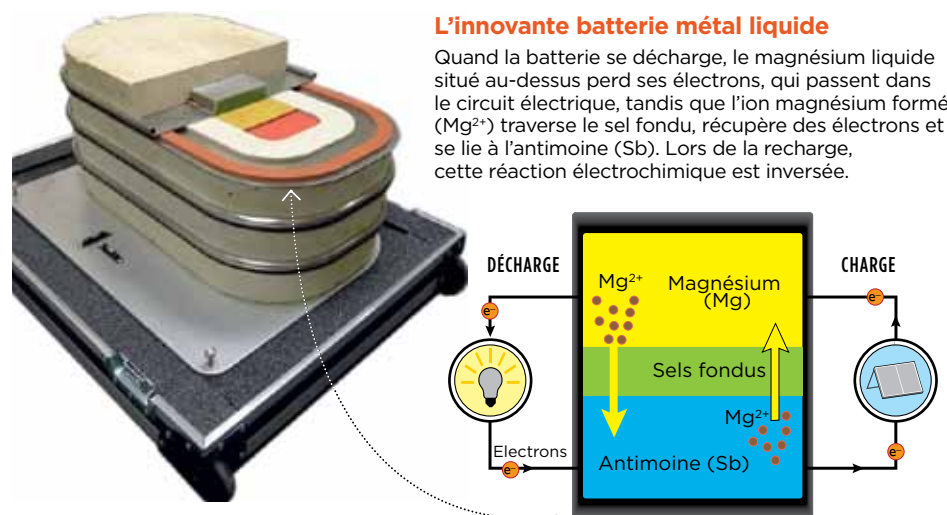
conductrice dans laquelle circulent les ions échangés par les électrodes.

Énergies renouvelables recherchent mégabatteries

Le développement du solaire ou de l'éolien, dont la production est intermittente, nécessite de pouvoir stocker l'électricité à grande échelle. Les chercheurs se mobilisent pour augmenter les performances des batteries tout en abaissant leur coût.

LES ÉNERGIES ÉOLIENNE ET PHOTOVOLTAÏQUE ont un défaut, véritable casse-tête pour les ingénieurs : elles sont intermittentes. Qu'un nuage passe ou que le vent faiblisse, et la production d'électricité chute. D'où la nécessité de stocker l'énergie générée lors des pics de production pour l'injecter dans le réseau lors des creux. La solution ? Mettre au point des batteries puissantes, durables et à faible coût.

L'une d'elles est particulièrement attendue d'ici à mi-2014 : la batterie dite métal liquide que Donald Sadoway envisage de construire dans une unité pilote de 12 mètres de long, stockant 2 mégawattheures d'énergie pour une puissance de 500 kW. De quoi alimenter 80 foyers pendant une trentaine d'heures. Ce professeur du Massachusetts Institute of Technology (MIT), à Cambridge (États-Unis), a créé en 2010, avec son étudiant David Bradwell et le chimiste Luis Ortiz, une start-up, Liquid Metal Battery Corporation (LMBC, rebaptisée Ambri en 2012), financée notamment par le groupe pétrolier français Total et par la fondation Bill Gates. « Cette batterie permettra d'atteindre de grandes capacités

**L'innovante batterie métal liquide**

Quand la batterie se décharge, le magnésium liquide situé au-dessus perd ses électrons, qui passent dans le circuit électrique, tandis que l'ion magnésium formé (Mg^{2+}) traverse le sel fondu, récupère des électrons et se lie à l'antimoine (Sb). Lors de la recharge, cette réaction électrochimique est inversée.

énergétiques et se veut très compétitive grâce au recours à des matériaux à bas coût », assure Sophie de Richecour, chef du département Prospective énergies nouvelles de Total. Pour imaginer sa batterie, Donald Sadoway n'est pas allé chercher son inspiration du côté des techniques existantes de stockage mais, paradoxalement, chez une industrie gloutonne en électricité : celle de la production d'aluminium. Le procédé de fabrication, inventé en 1886 par l'Américain Charles Martin Hall et le Français Paul Héroult, fonc-

tionne à haute température avec du métal liquide et un électrolyte de sel fondu capables d'envoyer des courants extrêmement élevés à travers ces cellules. Atteindre de telles densités de courant dans les batteries permettrait des économies d'échelle gigantesques. Le concept de batterie métal liquide était né ! Les électrodes sont deux couches de métal fondu, de l'antimoine et du magnésium. Ces deux éléments ont été choisis pour leur potentiel électrochimique — la manière dont ils sont capables de capter ou de relar-

guer des électrons —, leur densité et leur faible température de fusion. Entre eux, un sel fondu laisse passer les ions. L'ensemble fonctionne vers 500 °C, afin que les métaux et le sel fondu soient liquides, et que les réactions électrochimiques soient rapides (voir l'infographie).

Les avantages de cette batterie sont nombreux : elle n'a pas besoin de membrane de séparation coûteuse et fragile, puisque les métaux liquides sont naturellement séparés par leur différence de densité. En outre, la technologie est modulable : les cellules s'assemblent en unités, elles-mêmes réunies en modules puis en packs. Sa durée de vie pourrait atteindre dix ans. Enfin, le magnésium est un élément abondant sur Terre. Reste des difficultés à vaincre. Le rendement n'est que de 70 % contre 95 % pour les meilleures batteries, notamment parce qu'il faut maintenir une température élevée. Par ailleurs, les métaux se dissolvent peu à peu dans le sel fondu, si bien qu'une décharge se produit au fil du temps.

Deux grandes concurrentes sont en lice

En attendant, deux autres technologies, plus avancées, font figure de favorites : la batterie sodium-soufre et la lithium-ion. La première, fabriquée par NGK au Japon, est conçue pour le stockage massif. Il existe déjà près de 200 installations au Japon, la plus grande de 34 MW et 245 MWh (17 fois plus que le conteneur de Donald Sadoway), située à côté d'une ferme éolienne de 51 MW. La durée de vie de ces batteries est estimée à quinze ans, elles fonctionnent à haute température (plus de 300 °C), ce qui, là aussi, restreint leur rendement à environ 75 %. Principal problème : la présence de sodium, un métal qui s'enflamme spontanément au contact de l'eau. En septembre

LES AUTRES APPROCHES**Des lacs, réservoirs à électricité**

Les stations de pompage-turbinage, équipées d'un groupe hydroélectrique réversible, assurent l'immense majorité du stockage d'électricité dans le monde.



Les bassins, situés à des altitudes différentes, de la station de Nant de Drance près de Chamonix.

Aujourd'hui, 98 % du stockage de l'électricité sont assurés par les stations de transfert d'énergie par pompage (Step), aussi nommées stations de pompage-turbinage, sorte de centrales hydroélectriques réversibles. Lorsqu'on produit davantage d'électricité qu'on en consomme, l'excédent sert à pomper de l'eau vers le haut des barrages. Inversement, pour déstocker cette énergie, il suffit de faire fonctionner les barrages en sens « normal », en laissant l'eau s'écouler dans les turbines. Ces stations peuvent garder beaucoup d'énergie sur une période longue, offrant des puissances élevées et affichant des rendements de 70 à 85 %. Peu coûteuses en fonctionnement, leur durée de vie est de plusieurs décennies. Une dizaine de Step

sont en service en France, dont la plus grande, celle de Grand'Maison, en Isère, affiche une puissance de 1790 MW. Les autres moyens de stockage cumulent, eux, les inconvénients : l'utilisation d'hydrogène (l'électricité en surplus sert à produire de l'hydrogène, qui est ensuite reconverti en électricité par une pile à combustible) affiche de mauvais rendements. C'est aussi le cas du stockage par air comprimé, dans lequel de l'air comprimé par l'électricité excédentaire est envoyé dans des réservoirs. On récupère l'énergie en le détendant dans une turbine. Autre technologie : le volant d'inertie, sorte de grosse toupie, qui emmagasine de l'énergie dans son mouvement. Il suffit de ralentir la toupie pour récupérer l'énergie.

2011, une batterie sodium-soufre a ainsi pris feu à Tsukuba (Japon), conduisant le constructeur à stopper sa production et à demander à ses clients de mettre leurs installations à l'arrêt, le temps d'améliorer la sécurité. L'île de La Réunion, qui testait une telle batterie de 1 MW (lire S. et A. hors série n° 171, juillet-août 2012), a ainsi dû interrompre l'expérimentation. « Pourtant, elle

a donné satisfaction durant les deux ans d'exploitation, sans aucun incident », témoigne Stéphane Lascoud, chef de projet chez EDF, qui espère une remise en service pour cet été. Sa grande concurrente est la technologie lithium-ion, qui équipe la plupart des véhicules électriques. Les constructeurs de batteries de ce type qui se retrouvent en



Une batterie à circulation mise au point à Oberhausen, en Allemagne.

FRAUNHOFER/IMSICHT

► surcapacité, les voitures électriques ne s'étant pas vendues aussi bien que prévu, aimeraient investir le créneau du stockage d'énergies renouvelables.

Dotée d'une durée de vie de quinze à vingt ans, recyclable, la batterie lithium-ion présente un rendement jusqu'à 95 %. En outre, elle est flexible : on peut obtenir des batteries très puissantes, capables d'injecter de grandes quantités d'énergie en moins d'une seconde, pour répondre instantanément aux besoins du réseau électrique, ou bien des batteries avec une grande capacité énergétique, susceptibles de stocker l'énergie pendant plusieurs heures, voire jours. Elles sont certes plus coûteuses que les batteries sodium-soufre, « mais nous prévoyons une baisse de 5 à 10 % par an, soit un prix divisé par deux d'ici à dix ans », indique Michaël Lippert, en charge du marketing pour le stockage d'énergie chez le fabricant français Saft. Ce dernier vient de fournir à l'italien Enel un système de stockage de 2 MW de puissance et 1 MWh d'énergie pour un poste électrique desservant la région des Pouilles. D'autres technologies tentent d'émerger. C'est le cas des batteries zinc-air, qui pourraient afficher des coûts très bas, car elles fonctionnent à température ambiante, avec des matériaux peu chers.

Mais elles souffrent de défauts, notamment la formation de dendrites de zinc, la mauvaise stabilité de l'électrode à air pendant la recharge et le coût des catalyseurs. Pourtant, « j'y crois à fond », affirme Marion Perrin, chef du laboratoire de stockage de l'électricité de l'Institut national de l'énergie solaire (Ines) à Chambéry, qui les voit arriver sur le marché d'ici à une dizaine d'années.

L'électricité est stockée en quantité et à faible coût

Tout aussi prometteuses, les batteries à circulation, ou *redox-flow*, dans lesquelles les espèces chimiques (par exemple les ions métalliques) qui composent les électrodes peuvent être entreposées à l'extérieur. Du coup, la quantité d'énergie conservée ne dépend pas de la taille de la batterie, mais de celle des réservoirs. On pourrait donc stocker beaucoup d'électricité à faible coût. Cependant, le seul modèle à circulation sur le marché utilise du vanadium, un métal rare. « D'autres prototypes existent, et on peut espérer une technologie mature d'ici à cinq ans », estime Marion Perrin.

La course à la meilleure batterie pour le stockage d'énergies renouvelables est lancée. Et il y aura probablement plus d'un gagnant. ■ **Cécile Michaut**



Julian Assange,
Robert Laffont,
247 p., 19 €

Menaces sur nos libertés

Nos SMS, nos recherches sur Google, la moindre photo postée et commentée sur Facebook..., tous ces petits éléments qui en disent tant sur nos vies intimes sont en train de nous échapper. Ce sont les données personnelles. Et elles valent de l'or. Elles intéressent les agences gouvernementales — comme l'a prouvé le scandale Prism — et les entreprises qui les stockent et les exploitent. Ce livre d'entretiens avec Julian Assange, concepteur de Wikileaks, dresse un panorama inquiétant de la situation et ouvre quelques pistes pour un Internet libre. ■ **Olivier Hertel**



Frédéric Lelièvre,
François Pilet,
Calmann-Lévy,
232 p., 17 €

Krach Machine

Ceux qui font trembler la Bourse sont désormais des machines froides et rationnelles. Plus exactement des algorithmes, parés à prendre la décision d'acheter ou de vendre en quelques millièmes de seconde et pour des milliards de dollars ou d'euros et ce, sans la moindre intervention humaine (*lire S. et A. n° 565, novembre 2010*). Ce trading haute fréquence représente déjà 60 % des transactions boursières aux États-Unis et 40 % en Europe. Et depuis quelque temps, il « bugge » de façon inquiétante. Les journalistes Frédéric Lelièvre et François Pilet, spécialistes de la finance, nous font découvrir ce monde d'initiés à travers une enquête digne d'un roman à suspense. En jeu, l'économie mondiale, rien de moins ! ■ **O. H.**



Mike Mignola,
Jason Armstrong,
Delcourt, 160 p., 15,50 €

Lobster Johnson

Nous sommes en pleine Seconde Guerre mondiale. Alors que les États-Unis se préparent à plonger dans le conflit, Lobster Johnson a fort à faire. Aux prises avec des cannibales, des cobras géants, un émule de Fu Manchu et un yéti, le fameux justicier devra déployer tous ses talents pour sauver sa peau et éventuellement le monde. Un parfum de *pulp* (ces publications bon marché d'avant-guerre) flotte sur les aventures d'un personnage à mi-chemin entre Doc Savage et Indiana Jones. ■ **Hervé Ratel**