

IDÉES DE PHYSIQUE

Charges en stock

Les supercondensateurs permettent d'emmagasiner ou de libérer rapidement de l'énergie électrique. Ils constituent des alternatives intéressantes aux batteries.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Recharger un véhicule électrique en seulement quelques minutes ? Si l'énergie est stockée dans des batteries, cela reste irréaliste. Mais de nouveaux types d'accumulateurs électriques, les supercondensateurs, le rendent possible. Ces dispositifs, dont la capacité est un millier de fois supérieure à celle des condensateurs classiques, deviennent incontournables dès qu'une application requiert une puissance instantanée très élevée ou répétée, de l'ouverture d'urgence des portes de l'Airbus A380 à l'alimentation d'une perceuse électrique. À quoi tiennent leur capacité décuplée et leur rapidité d'action ?

Une bouteille difficile à remplir

Un condensateur est un dispositif permettant de stocker des charges électriques. Son ancêtre, la bouteille de Leyde, inventée en 1745, va nous permettre d'en saisir le principe. Dans sa forme initiale, il s'agit d'une bouteille de verre emplies de feuilles d'étain chiffonnées et recouverte d'une feuille métallique à l'intérieur et à l'extérieur

1. LA BOUTEILLE DE LEYDE est l'ancêtre du condensateur électrique. Ses deux pôles sont constitués par ses surfaces métalliques interne et externe, isolées l'une de l'autre par la paroi de verre. En les reliant avec un conducteur électrique, le manipulateur crée un court-circuit et décharge le condensateur.

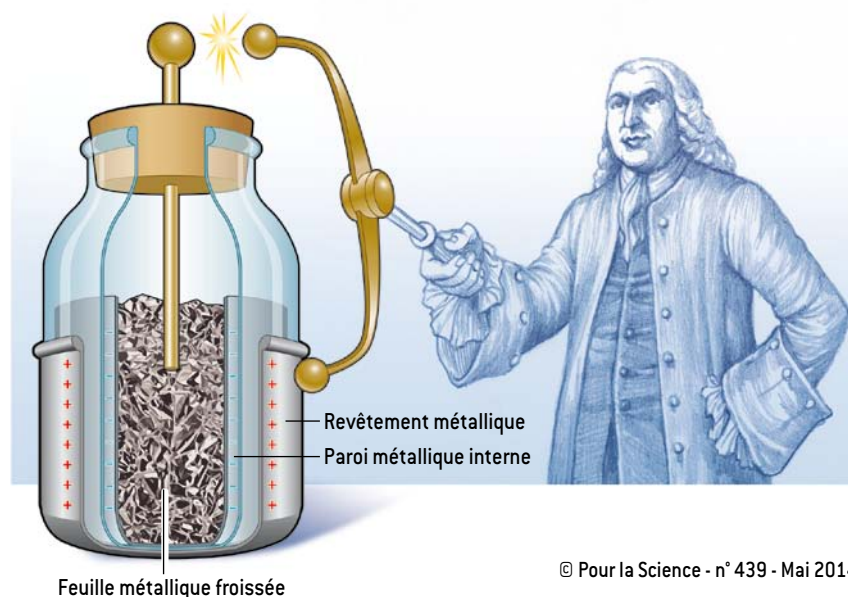
(voir la figure 1). Comment fonctionne-t-elle ? Imaginons qu'à l'aide d'un générateur, nous recueillons à l'intérieur de la bouteille le « fluide électrique », des électrons par exemple. Ces charges négatives, qui circulent au sein de l'étain, un très bon conducteur, se repoussent mutuellement jusqu'à atteindre la paroi métallique interne.

Quelle charge électrique totale la bouteille peut-elle contenir ? Elle est proportionnelle au potentiel électrique du générateur, et le coefficient de proportionnalité est la « capacité » du condensateur. En l'absence de feuille métallique extérieure, on constate que la capacité ne dépend essentiellement que du diamètre de la bouteille, et non de son volume. Avec une capacité de l'ordre d'un centième de nanofarad pour une dimension de dix centimètres, on ne stocke que 10^{-11} coulomb sous une tension de un

volt, c'est-à-dire 60 millions d'électrons ! Pourquoi aussi peu ?

Les charges de même signe se repoussant, il est difficile de les amasser. C'est pourquoi on recouvre la bouteille d'une feuille métallique. Cette dernière est reliée à la masse (il suffit de la tenir à la main !) lors de la charge. Soumise au champ électrique des charges à l'intérieur de la bouteille, la surface au contact du verre se couvre de charges opposées, jusqu'à ce que les charges en vis-à-vis se compensent. Cette astuce permet d'augmenter sensiblement la capacité, typiquement d'un facteur 100.

En pratique, pour réaliser un condensateur, nul besoin de bouteille : il suffit de disposer face à face deux conducteurs électriques, séparés par de l'air ou un autre isolant électrique. La capacité est alors proportionnelle à l'aire en vis-à-vis



et inversement proportionnelle à l'épaisseur (l'écart entre les deux surfaces). On réalise ainsi des condensateurs en enroulant dans un petit cylindre scellé deux feuilles d'aluminium séparées par une feuille d'isolant d'épaisseur micrométrique. Sur ce même principe, on fabrique des condensateurs en céramique mesurant quelques millimètres et ayant des capacités de l'ordre du microfarad.

Du charbon poreux pour emmagasiner les charges

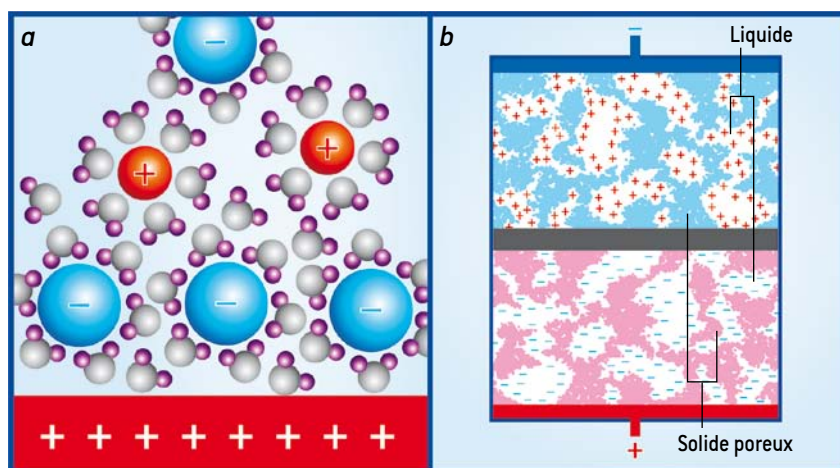
Tout cela est fort utile pour réaliser des circuits électroniques, mais ne suffit pas pour stocker une quantité substantielle de charges. Pour obtenir des capacités bien supérieures, il faut augmenter la surface du condensateur et réduire son épaisseur.

Pour ce qui est de l'épaisseur, les supercondensateurs exploitent un phénomène connu sous le nom de double couche électrochimique, qui advient lorsqu'un électrolyte (un solvant contenant des ions) se trouve en contact avec une surface chargée (voir la figure 2).

Imaginons que la charge de cette plaque soit positive. Elle attire les ions négatifs, les anions, qui viennent à proximité de la surface tandis que les ions positifs sont repoussés. Or chacun des anions est solvaté, c'est-à-dire entouré par des molécules du solvant, qui forment comme une cage protectrice autour de lui. Si la tension de la plaque n'est pas trop importante (en pratique, de l'ordre du volt), il n'y aura pas de transfert de charges entre la surface et les anions (cela évite en outre de déclencher des réactions d'électrolyse, qui requièrent des tensions seuils).

Le résultat est que, face à la plaque chargée positivement, se forme une couche d'anions, la plaque positive et la couche d'anions étant séparées par l'épaisseur d'une molécule de solvant. On a ainsi réalisé un condensateur d'épaisseur inférieure au nanomètre, soit une capacité d'une dizaine de microfarads par centimètre carré.

Reste à augmenter la surface. Comment ? En utilisant un matériau poreux, tels les charbons actifs qui peuvent pré-



2. LES SUPERCONDENSATEURS mettent à profit le phénomène de « double couche électrochimique » (a). Une surface chargée, mettons positivement, est mise au contact d'un liquide contenant des ions solvatés (entourés de molécules du solvant). Se constitue alors une couche d'anions, séparée de la surface positive par une épaisseur moléculaire. Cette configuration équivaut à un condensateur de très faible épaisseur. Dans un supercondensateur (b), cet effet de double couche électrochimique est reproduit sur toute la surface offerte par un matériau poreux baignant dans un liquide contenant des ions. La faible épaisseur des doubles couches et la grande surface effective confèrent au dispositif une très grande capacité électrique.

senter des surfaces de 1 000 à 2 000 mètres carrés par gramme – ce qui laisse espérer une capacité de 100 farads par gramme de matériau poreux. Le stockage en surface, caractéristique d'un condensateur classique, devient un stockage en volume.

Un supercondensateur typique est ainsi constitué de deux électrodes de charbon actif imprégnées d'une solution électrolytique et séparées par une membrane isolante, mais perméable aux ions (voir la figure 2). Par rapport aux batteries usuelles, l'absence de réactions chimiques autorise une stabilité de charge et de décharge bien plus importante, avec une durée de vie supérieure à un million de cycles de charge/décharge (contre quelques milliers de cycles pour une batterie lithium-ion).

Par ailleurs, comme le processus de charge ou de décharge met en jeu la mobilité des ions, mais ne transforme pas ces derniers, il peut s'effectuer en quelques secondes – durée à comparer aux minutes nécessaires à la décharge d'une batterie et aux dizaines de minutes, voire aux heures, pour la recharger. En revanche, la tension de fonctionnement (le volt) limite assez fortement la densité d'énergie

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTLY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

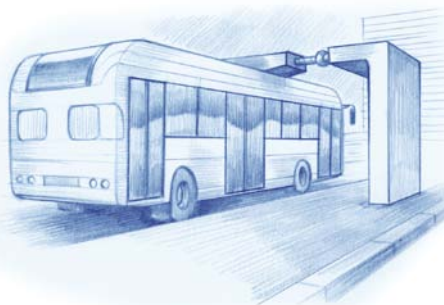
BIBLIOGRAPHIE

S. Kondrat et al., *Accelerating charging dynamics in subnanometre pores*, *Nature Materials*, vol. 13, pp. 387-393, 2014.

P. Jampani et al., *Advancing the supercapacitor materials and technology frontier for improving power quality*, *Interface*, vol. 19(3), pp. 57-62, 2010.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr



3. DES AUTOBUS TOUT ÉLECTRIQUES fonctionnant grâce à des supercondensateurs voient peu à peu le jour. La recharge des supercondensateurs, placés sur le toit du véhicule, est effectuée durant l'arrêt à chaque station, via une borne électrique installée en hauteur. L'énergie ainsi emmagasinée permet à l'autobus de se déplacer jusqu'à la station suivante.

électrique stockable : on atteint la dizaine de wattheures par kilogramme, soit un dixième de la densité d'énergie des batteries lithium-ion. Autrement dit, le dispositif est idéal pour stocker et fournir dans un temps record de l'énergie, mais en quantité modeste.

Parmi les nombreuses applications envisageables, on peut citer le domaine des transports (voir la figure 3) : les supercondensateurs servent désormais à récupérer l'énergie du freinage d'une voiture, qui sinon était perdue sous forme de chaleur. À la clef : des économies d'énergie pour les métros, les tramways (jusqu'à 40 pour cent), les véhicules disposant d'un système *Stop & Start* (extinction à l'arrêt et redémarrage), ou une poussée des performances des voitures de course, telle la *Toyota Supra HV-R*, ou de tourisme, telle la *Toyota Yaris Hybrid-R*. Cette dernière est équipée sous sa

banquette arrière d'un supercondensateur, de la taille d'une petite valise, qui fournit à deux moteurs électriques une puissance de 40 chevaux pendant dix secondes.

Le *Bluetram* du groupe Bolloré est plus ambitieux encore. Il s'agit d'un projet d'autobus entièrement électrique qui roulera en toute autonomie d'une station à une autre. Ses supercondensateurs, installés sur le toit, sont rechargés par un bras télescopique à chaque station en 90 secondes (à peine plus qu'un arrêt standard), pour une autonomie de plus d'un kilomètre. L'ensemble comporte 30 modules de 20 supercondensateurs, chacun pesant 500 grammes, de capacité 2 600 farads et de tension 2,7 volts, soit une énergie totale de 6 millions de joules environ. La mise en route est prévue d'ici 2015 à Singapour et à Bordeaux.



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

CONFÉRENCES-DÉBATS

Lundi 12 mai — 18h
La météorite d'Orgueil : une chute exceptionnelle
M. Gounelle, professeur au Muséum, membre de l'Institut Universitaire de France

Cycle Le Parc zoologique de Paris

Lundi 19 mai — 18h
Le rôle des zoos dans la conservation de la biodiversité
J.-L. Berthier, docteur vétérinaire, ancien responsable scientifique des collections animales vivantes, Muséum

Lundi 26 mai — 18h
La conception paysagère du Parc zoologique
Un exemple : la serre Guyane-Madagascar
M. Mugnier, paysagiste, Atelier Jacqueline Osty & Associés.
D. Larpin, botaniste, responsable des collections végétales tropicales, Muséum

Lundi 2 juin — 18h
Le Parc zoologique de Paris, une nouvelle espèce de zoo
S. Ferreira-Le-Morvan, directrice du Parc zoologique de Paris
A. Lécuyer, vétérinaire et directeur scientifique du Parc zoologique de Paris
E. Quertier, responsable pédagogique et culturel du Parc zoologique de Paris

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution — 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

BAR DES SCIENCES

Dimanche 25 mai — 17h30
Biodiversité des îles
A. Abdou, malacologue, Muséum
B. Pisanu, chargé d'étude, espèces invasives, Muséum
M. Guillaume, écologue, spécialiste des récifs coralliens, Muséum
F. Larrey, naturaliste, photographe, association Regard du Vivant Jean-Patrick Leleu, délégué aux affaires européennes et internationales, Muséum
J.-P. Leduc, délégué aux affaires européennes et internationales, Muséum

Café-restaurant La Baleine — 47 rue Cuvier, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "Les rendez-vous du Muséum"



QUESTION AUX EXPERTS

Boire un café dans l'après-midi empêche-t-il de dormir ?

En général, oui. Les effets de la caféine restent sensibles jusqu'à six heures après son ingestion, parfois plus longtemps.

Astrid NEHLIG



Chez les adultes, le café est la boisson la plus consommée dans le monde après l'eau. C'est un liquide complexe, contenant plus de 1 000 composés différents. En particulier, il est riche en caféine, une substance qui augmente la vigilance et la concentration, tout en apportant une sensation de bien-être. Le revers de la médaille est qu'il peut perturber le sommeil. Faut-il alors arrêter d'en boire à partir d'une certaine heure ?

En général, la consommation de café est élevée le matin et en début d'après-midi, puis diminue notablement après 16 heures. L'effet de la caféine sur la vigilance et la concentration peut être un avantage : augmentation des performances matinales, amélioration du travail de nuit, aide contre le décalage horaire... Une étude réalisée en 2006 par Pierre Philip, de l'Université de Bordeaux, a montré que la nuit, une tasse de café limite aussi efficacement les fautes de conduite qu'une sieste de 15 minutes.

Cependant, des questionnaires soumis à de larges échantillons de population ont révélé une association entre la consommation quotidienne de café et des troubles du sommeil. La caféine retarde l'endormissement, diminue la durée totale de sommeil, modifie sa qualité (le sommeil léger est prolongé au détriment du sommeil profond) et augmente la fréquence des réveils. Globalement, ces effets se traduisent par la sensation d'avoir mal dormi et entraînent

souvent des moments de somnolence pendant la journée.

Comment la caféine agit-elle ? L'envie de dormir est régulée par une substance synthétisée par le cerveau, l'adénosine. Celle-ci se fixe sur des récepteurs membranaires des neurones, dont elle ralentit l'activité. Elle provoque ainsi la somnolence. La caféine bloque ces récepteurs, ce qui inhibe l'action de l'adénosine.

Des individus insensibles à la caféine

Notons que les effets de la caféine sur le sommeil varient selon les individus. Pour des raisons mal comprises, ils sont moins marqués chez les consommateurs réguliers que chez les consommateurs occasionnels. En outre, environ 30 pour cent des individus s'y déclarent insensibles : ils peuvent boire un café juste avant d'aller se coucher, sans conséquence sur leur sommeil. On s'est longtemps interrogé sur les raisons de cette insensibilité. Ce n'est qu'en 2007 que l'équipe de Hans-Peter Landolt, de l'Université de Zurich, a montré qu'elle a une origine génétique et qu'elle s'explique par une variante particulière du gène codant le récepteur de l'adénosine.

La caféine agit vite : elle arrive au cerveau en à peine 10 minutes et atteint un pic de concentration 45 minutes après son ingestion. Sa concentration reste élevée pendant deux

à quatre heures en moyenne, puis la caféine est éliminée de l'organisme. Cette élimination est plus ou moins rapide selon les individus. Généralement, les effets de la caféine restent sensibles durant deux à six heures.

Les effets dépendent aussi de la dose totale absorbée. Au-dessous de 100 milligrammes de caféine, soit l'équivalent d'une tasse de café, ils sont peu marqués, voire imperceptibles. En revanche, l'absorption de 100 à 200 milligrammes de caféine 30 à 60 minutes avant le coucher retarde l'endormissement de 33 minutes en moyenne et raccourcit le sommeil d'environ 10 à 30 minutes. En 2013, Christopher Drake et ses collègues, de la Faculté de médecine de l'Université de Wayne State (Détroit, États-Unis), ont mis en évidence un effet significatif de la caféine sur le sommeil six heures après son absorption, mais la dose utilisée était de 400 milligrammes, ce qui équivaut à quatre tasses avalées d'un coup ! Ce n'est donc pas représentatif d'une consommation réelle, mais cela montre que pour les grands buveurs de café, l'effet peut durer plus longtemps.

De façon générale, mieux vaut arrêter de boire du café après 16 heures. C'est d'ailleurs ce que font la plupart des individus, qui ajustent bien leur consommation en fonction de leurs besoins et de leur sensibilité à la caféine. ■

Astrid NEHLIG est directrice de recherche à l'INSERM et à l'Hôpital Necker, à Paris.