

éléments. Or le nombre de combinaisons possibles est immense, même pour un ordinateur : il est impossible de les tester toutes.

L'artiste est parti d'une population de 1 500 pattes aléatoires qu'il a soumises au processus de mutations et de sélection. Seuls les 100 meilleurs membres (qui s'approchaient le plus du pas idéal, c'est-à-dire le triangle arrondi) étaient conservés, les autres étant éliminés. L'étape de reproduction correspondait à un mélange des tiges sélectionnées de façon à confectionner une nouvelle population (les « parents » compris) de 1 500 pattes, celles-ci étant à

nouveau mises en compétition. Au terme de quelques mois de ce processus, l'ordinateur a livré les 11 longueurs optimales pour une marche performante.

Les créatures ainsi obtenues sont d'abord testées dans un bac à sable d'environ 500 mètres carrés avant d'être mises en conditions réelles sur une plage balayée par les vents. Les espèces se succèdent et les nouvelles remplacent les anciennes, celles-ci étant alors reléguées dans un « cimetière » où, le soleil et le vent aidant, le plastique prend progressivement l'apparence de vrais fossiles.

L'adaptation est parfois déroutante. Par exemple, dès que le vent souffle trop fort, la créature *Animaris Sabulosa* se fixe au sol en plantant un piquet avec un marteau, les deux éléments faisant partie de son anatomie ! Autre cas, *Animaris Rhinoceros* peut transporter un individu. T. Jansen espère qu'un jour ses créatures seront suffisamment indépendantes pour vivre leur vie, seules sur la plage, en toute autonomie... ■

J.-A. Meyer et A. Guillot, *Vers une robotique animale*, *Pour la Science*, n° 300, 2002.

Exposition à la Cité des sciences et de l'industrie : <http://bit.ly/1k1YbQ3>



Retrouvez ces créatures en mouvement  
en flashant ce QR-code ou à l'adresse :  
[www.strandbeest.com](http://www.strandbeest.com)



## IDÉES DE PHYSIQUE

## Charges en stock

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

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

**R**echarger 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.

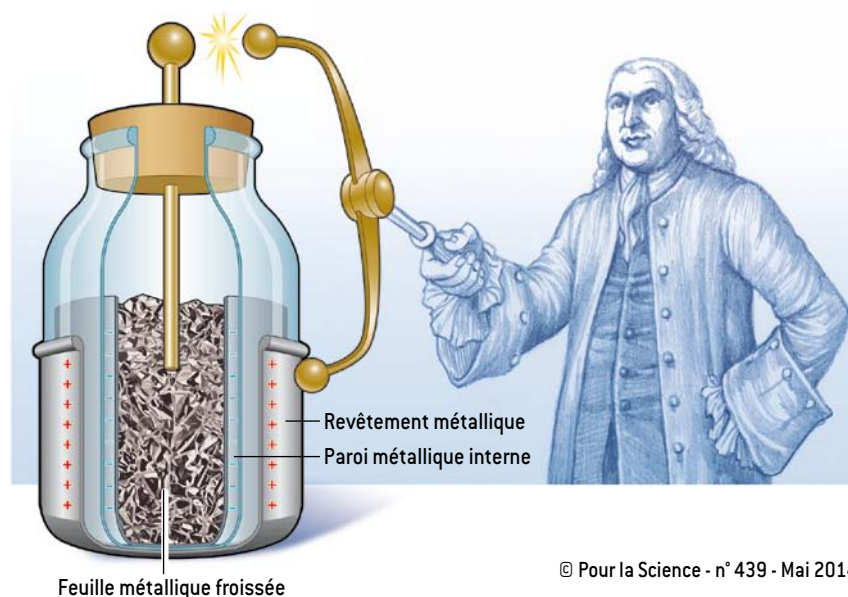
(voir la figure 1). Comment fonctionne-t-elle ? Imaginons qu'à l'aide d'un générateur, nous recueillons à l'intérieur de la bouteille le « fluide électrique », des électrons par exemple. Ces charges négatives, qui circulent au sein de l'étain, un très bon conducteur, se repoussent mutuellement jusqu'à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

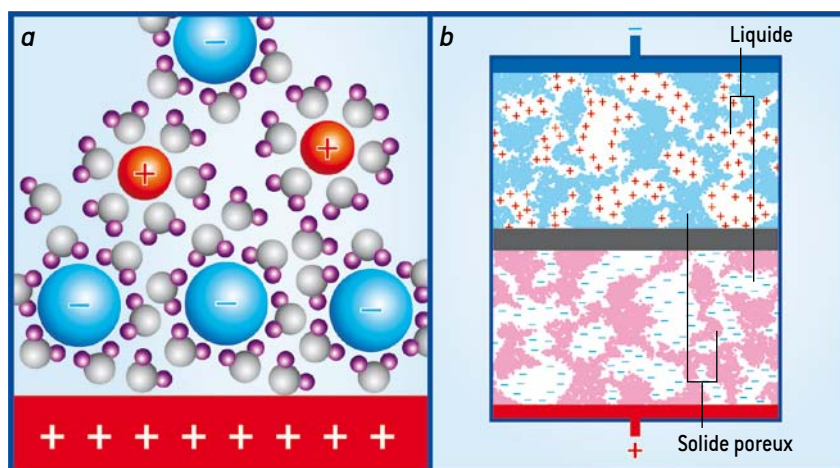
Tout cela est fort utile pour réaliser des circuits électroniques, mais ne suffit pas pour stocker une quantité substantielle de charges. Pour obtenir des capacités bien supérieures, il faut augmenter la surface du condensateur et réduire son épaisseur.

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 solvate, 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](http://www.pourlascience.fr)