



Tram sans caténaire Citadis, fabriqué par Alstom, équipé de supercondensateurs, en service à Rio de Janeiro - ©VLT Carioca.

Les supercondensateurs

principes fondamentaux et perspectives industrielles

Jean Vergnet

Docteur en électrochimie, Collège de France

Les supercondensateurs semblent la solution idéale pour électrifier la mobilité collective, mais ils sont aujourd'hui remplacés par des batteries. Afin de comprendre cette situation, cet article détaille d'abord le fonctionnement et l'état de l'art des supercondensateurs avant de discuter des applications, avec un focus sur la mobilité électrique.

Introduction

Le principe du condensateur repose sur l'accumulation de charges opposées de part et d'autre d'un isolant. L'énergie dépensée pour accumuler ces charges peut ensuite être récupérée quasi-instantanément mais le nombre de charges est assez faible.

Le condensateur est donc un système de stockage d'énergie très adapté aux fortes puissances mais avec une énergie très faible. Afin de pallier ce problème, les supercondensateurs – aussi appelés *ultracapacitors*, *supercapacitors* en anglais – ont été développés. Ces supercondensateurs offrent une capacité bien plus élevée que les

condensateurs simples pour des performances en puissance comparables, offrant ainsi un intermédiaire entre les batteries et les condensateurs.

Le principe du supercondensateur a été découvert en 1853 par le physicien Helmholtz. Toutefois, le premier brevet n'a été déposé qu'en 1957 par la société

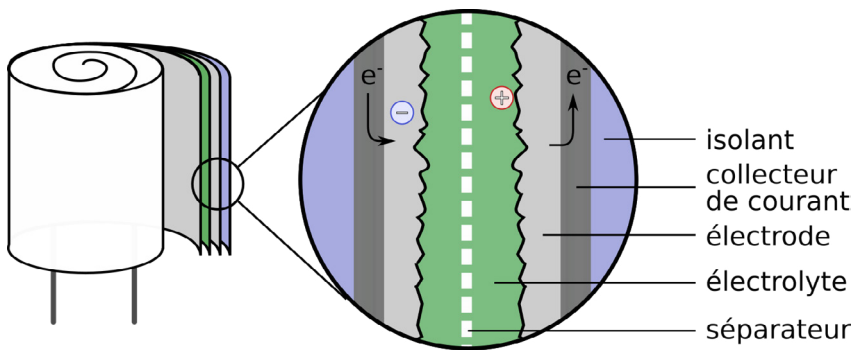


Figure 1 : Composants d'un condensateur assemblés en couches successives.

General Electric (électrodes en carbone poreux et électrolyte aqueux). En 1966, la société SOHIO Corporation propose d'utiliser un électrolyte organique pour augmenter la tension de fonctionnement. Le premier supercondensateur fut commercialisé en 1971 par NEC [1].

Face au besoin de flexibilité énergétique croissant, tant pour la mobilité que le stationnaire, les supercondensateurs sont donc apparus comme une solution alternative ou complémentaire des batteries dont la décharge est plutôt lente. Cependant, aujourd'hui, force est de constater que ces supercondensateurs n'ont pas remplacé les batteries et que même les systèmes hybrides (batterie + supercondensateur) ne sont pas la norme.

Cet article propose de revenir sur les raisons qui ont conduit à cet état de fait en détaillant d'abord les différents types de supercondensateurs et leurs principes de

fonctionnement, suivi d'un bref état de l'art. Dans une seconde partie, nous nous pencherons sur les applications possibles de ces composants et comment, dans ces applications, ils se comparent avec les batteries, notamment dans le cas de la mobilité collective.

Fonctionnement

Mécanismes de stockage d'énergie Condensateur simple

Un condensateur simple se compose de deux plaques conductrices d'électrons séparées par un diélectrique solide ou gazeux. En apposant une tension entre ces plaques, les électrons vont se déplacer vers la plaque de plus haut potentiel, ce qui aura pour effet d'abaisser ce potentiel ; à l'inverse, le déficit d'électrons dans l'autre plaque va augmenter son potentiel. Le flux d'électron se poursuit donc jusqu'à ce que les deux plaques aient le même potentiel effectif (poten-

tiel externe + effet d'accumulation électronique). Cette dynamique se comprend par analogie avec la statique des fluides : si deux cuves d'eau sont reliées par un conduit, le liquide se déplace de la cuve avec le plus haut niveau d'eau vers celle avec le plus bas niveau, jusqu'à ce que les deux niveaux soient égaux.

Condensateur à double couche électrochimique (EDLC)

Dans un condensateur à double couche électrochimique (*Electrostatic Double Layer Capacitor*, EDLC), les plaques baignent dans un électrolyte qui est un matériau, généralement liquide, qui contient des ions capables de se déplacer d'une électrode à l'autre. Aussi, lors de l'accumulation de charges sur chacune des plaques, le champ électrique induit dans ce liquide va pousser les ions à se déplacer. Sur la plaque chargée négativement, les ions chargés positivement vont ainsi se rapprocher de l'électrode tandis que les ions chargés négativement seront repoussés loin de l'interface. Ce double mouvement crée une distribution de charge dans le liquide : une zone chargée positivement proche de la surface et une zone plus diffuse. Cette double couche liquide agit comme une contre-électrode et chaque ensemble {électrode + double couche liquide} forme un condensateur. Dans ces conditions, le système composé de deux électrodes baignant dans l'électrolyte peut être modélisé par deux condensateurs en série.

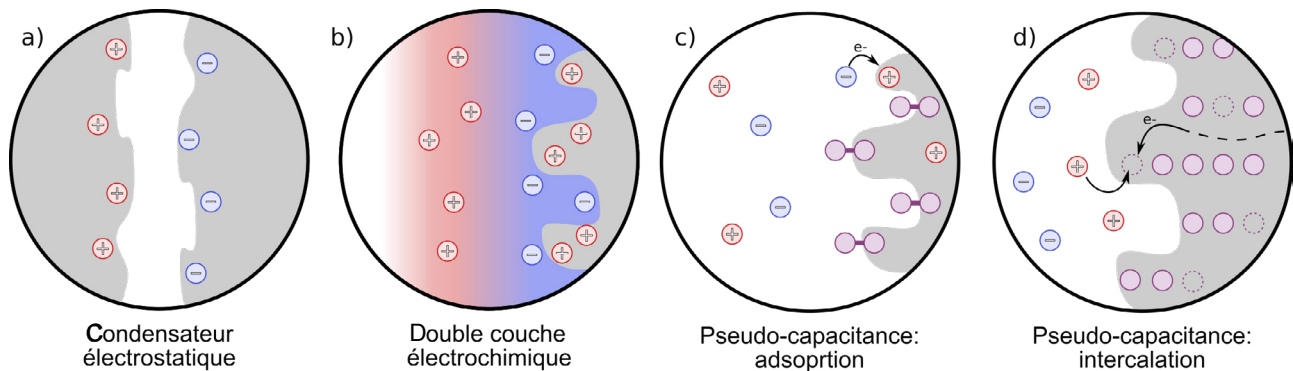


Figure 2 : Mécanismes du stockage d'énergie : a) condensateur plan, b) condensateur avec électrolyte, c) et d) pseudo-capacitance.

●●● Pseudo-condensateur à réaction faradique

Dans les condensateurs simples et les EDLC, il n'y a – en théorie – aucun transfert de charge entre l'électrode et l'électrolyte, i.e. pas de réaction chimique. L'énergie y est donc stockée sous forme électrostatique, c-à-d. physique. Il est toutefois possible que les ions dissous dans l'électrolyte réagissent (i.e. échange des électrons) avec l'électrode. Si cette réaction est irréversible, c'est une réaction parasite qu'il faut empêcher. En revanche, si elle est réversible et contrôlée, elle permet de stocker de l'énergie sous forme chimique – et non pas physique – et l'on parle alors de pseudo-capacité (PC).

Cette réaction peut donner lieu à une liaison entre l'ion et la surface (adsorption) ou à la pénétration de l'ion à l'intérieur de l'électrode (intercalation). L'intercalation est plus lente que l'adsorption, mais elle offre plus d'énergie car la quantité d'ions stockée est proportionnelle au volume de l'électrode et non à sa surface. Elle est donc privilégiée pour développer des systèmes de stockage qui combinent les avantages des condensateurs simples et batteries en termes de rapport puissance/énergie. Il s'agit d'ailleurs du même processus que dans une électrode de batterie. Ce processus d'intercalation s'accompagne malheureusement d'un gonflement du matériau ainsi que d'une perte faible

“ Les matériaux pseudo-capacitifs « type batterie » sont des semi-conducteurs (voire des isolants) qui présentent donc une résistance interne, ce qui limite la puissance maximale et crée une déperdition de chaleur par effet Joule.”

mais constante de capacité ¹. De plus, les matériaux pseudo-capacitifs « type batterie » sont des semi-conducteurs (voire des isolants) qui présentent donc une résistance interne, ce qui limite la puissance maximale et crée une déperdition de chaleur par effet Joule [2].

Performances

Les avantages d'utiliser la double couche électrochimique comme contre-électrode sont nombreux. En effet, il faut d'abord comprendre que dans un condensateur simple, la capacité spécifique (en Farad par gramme, F/g) est donnée par :

$$C = \epsilon \cdot A / d$$

où ϵ est la permittivité de l'isolant/électrolyte, A est la surface spécifique (m^2/g) et d est la distance qui sépare les charges de signe opposé.

¹ En charge, les ions s'accumulent à la surface et en décharge, les ions insérés ne sont pas tous extraits, causant, dans les deux cas, des dommages structuraux et une perte de capacité.

Pour un condensateur plan, d est égal à la distance entre les plaques. L'épaisseur de l'isolant dépend donc de la tension de claquage visée. Pour l'oxyde d'aluminium, cette tension de claquage vaut 1,4 nm/V, il faut donc compter $d=3$ nm pour une tension de 2,5 V. Pour un EDLC, la séparation de charge d est de l'ordre de la taille d'une molécule de solvant. Le diamètre de la molécule d'eau vaut environ 0,3 nm, donc un EDLC à électrolyte aqueux aura une séparation de charge $d = 0,3$ nm, 10 fois plus faible que pour un condensateur simple. En pratique, cela équivaut à une capacité surfacique de ϵ/d de 10 à 20 $\mu F/cm^2$ (0,1 F/m²).

Dans un condensateur plan, la surface spécifique A est égale à la densité du matériau brut (aluminium) divisée par l'épaisseur de l'électrode (entre 20 et 100 μm). Dans un EDLC, l'électrode est extrêmement poreuse et sa surface spécifique peut être extrêmement grande. Elle ne dépend (presque) plus de la densité du matériau brut. Il faut toutefois que les pores soient suffisam-

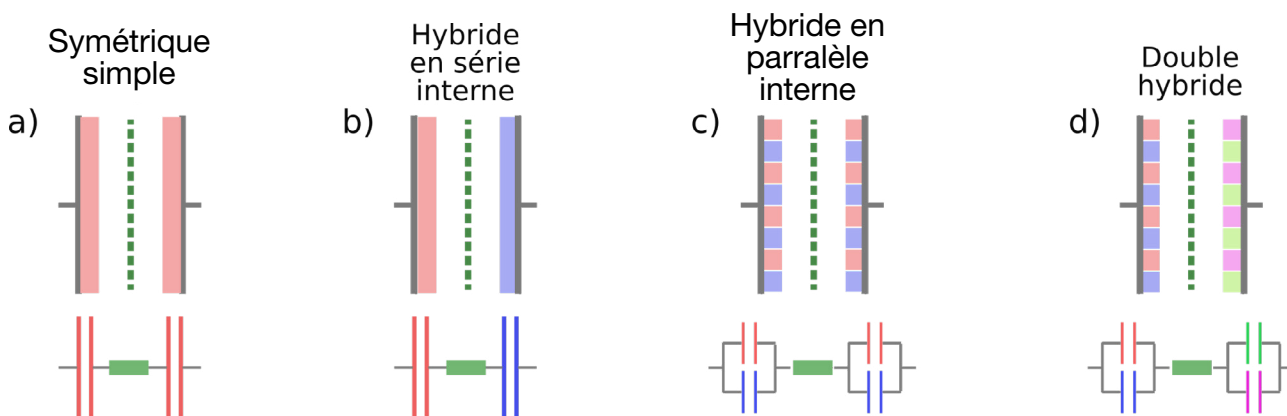


Figure 3 : Géométries des supercondensateurs hybrides.

ment grands pour que les ions de l'électrolyte puissent y pénétrer (mouillabilité) ce qui limite en pratique la surface spécifique.

A cette capacité électrostatique vient s'ajouter la contribution pseudo-capacitive, due à la réaction des ions avec la surface ou à leur intercalation. Cette pseudo-capacité est bien plus élevée mais plus lente à mobiliser, si bien que sa contribution effective dépend fortement de la géométrie du supercondensateur et de son mode d'utilisation [3].

État de l'art : le condensateur hybride

Il existe donc deux types de supercondensateurs : les EDLC, purement électrostatiques et les PC, reposant sur un stockage chimique. Les EDLC ont une décharge plus rapide et une durée de vie plus longue, tandis que les PC bénéficient d'une densité d'énergie bien supérieure. Les supercondensateurs visent les applications qui requièrent une densité de puissance supérieure à celle des batteries et une densité d'énergie supérieure à celle des condensateurs électrostatiques. Les condensateurs les plus performants utilisent donc les deux types électrodes EDLC / PC afin d'obtenir le meilleur des deux systèmes. Pour cela, des systèmes hybrides ont été développés.

Typologie des condensateurs hybrides

Un supercondensateur symétrique simple (figure 3a) dont les deux électrodes sont constituées du même matériau actif, peut être modélisé par deux condensateurs identiques en série. On y ajoute une résistance qui représente la conductivité ionique de l'électrolyte. Partant de ce système, on peut remplacer l'une des deux électrodes par un autre matériau pour obtenir un système composé de deux condensateurs distincts en série (e.g. une électrode de type PC & une de type EDLC). Malheureusement, dans ce genre de système,

appelé Hybride en série interne (figure 3b), la résistance interne du système est déterminée par la cinétique de l'électrode la plus lente.

Afin de pallier ce problème, il est possible de réaliser des électrodes composites, faites de particules d'électrode de batteries enchâssées dans une matrice de matériau conducteur à forte surface spécifique. Dans ce dispositif, appelé Hybride en parallèle interne (figure 3c), chaque électrode composite peut alors être modélisée par deux condensateurs en parallèle. L'effet tampon entre les deux condensateurs joue alors à plein, ce qui permet de réduire la résistance interne de chaque électrode. Afin d'optimiser encore la géométrie, il est possible de réaliser un Double Hybride (figure 3d) : un condensateur asymétrique où chaque électrode est un composite spécifique. Un double hybride est donc polarisé, ce qui permet d'optimiser les électrodes en fonction de la charge qu'elles doivent supporter.

Matériaux d'électrodes composites

Les électrodes les plus performantes utilisent des géométries hybrides. Les électrodes composites sont constituées d'une matrice de carbone (matériau

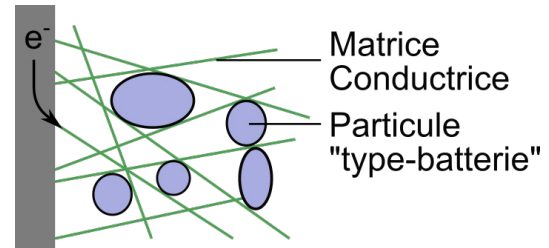


Figure 4 : Géométrie schématique d'une électrode composite.

EDLC) pour la conductivité et la capacité électrostatique rapide dans laquelle sont insérées des particules de matériau à pseudo-capacité, qui prodiguent une capacité plus dense mais plus lente à mobiliser.

EDLC : Carbone nano-structuré

Dans une électrode composite, la matrice assure à la fois la conductivité électrique et la capacité électrostatique. Parmi les matériaux possibles, les composites carbonés nano-structurés se distinguent en réalisant un bon compromis. Leur faible résistance ohmique permet d'acheminer efficacement les électrons à l'interface avec l'électrolyte ou aux particules « type-batterie ». De plus, les dérivés de carbone peuvent être nano-structurés sous forme de nanotubes, de feuillets (graphène) ou d'aérogel (figure 5) afin d'obtenir des



Figure 5 : Aérogel de carbone obtenu à partir d'un alliage carbone-métal (carbure) où le métal a été dissous dans l'acide. Ce matériau extrêmement poreux a une masse volumique proche de celle de l'air.

●●● surfaces spécifiques extrêmement élevées (2000 m²/g) ce qui équivaut à 100F/g de carbone. Enfin, ces matériaux allient une grande flexibilité et une résistance mécanique qui leur permettent d'accommoder le gonflement des particules « type batterie » dû à l'intercalation d'ions. Ces différentes propriétés et leur coût de revient relativement bas ont conduit à leur utilisation quasi-exclusive dans les EDLC et les matrices de matériaux composites.

Particules type-batteries (pseudo-capacitance)

Les électrodes composites sont composées de particules « type-batterie » encastrées dans une matrice de carbone. Ces particules doivent avoir une grande capacité tout en réalisant un bon compromis entre une bonne conductivité électronique, une faible variation de volume lors de la charge et une intercalation rapide. A cela s'ajoutent les conditions usuelles d'avoir un faible coût économique et environnemental. Au niveau fondamental, deux familles de composés ont été proposées pour améliorer ce système: les oxydes métalliques et les polymères conducteurs.

Les *oxydes métalliques* présentent une excellente capacité volumique et ne changent pas (ou peu) de volume lors de la charge. Parmi eux, l'oxyde de ruthénium offre une bonne conductivité électronique mais il est malheureusement cher et toxique, et doit donc être utilisé en petite quantité, sous forme de nanoparticules. L'oxyde de manganèse offre un compromis différent car il est moins cher, moins toxique mais moins conducteur et nécessite donc une ma-

trice de carbone pour acheminer les électrons efficacement. Certains sulfures métalliques sont actuellement à l'étude pour offrir un intermédiaire entre ces deux oxydes.

Comparés aux oxydes métalliques, les *polymères conducteurs* sont plus légers, plus conducteurs plus flexibles mécaniquement, peu coûteux, respectueux de l'environnement et ont une capacité théorique plus élevée que les oxydes. Malheureusement ils présentent un fort gonflement lors de la charge. Si ce gonflement n'est pas pris en compte dans la géométrie de l'électrode, il endommage la matrice carbonée environnant le matériau, ce qui réduit les points de contacts électriques avec celle-ci et cause une perte irréversible de capacité.

L'électrolyte

L'électrolyte liquide présent entre les électrodes est composé de sels ioniques dissous dans un solvant, lequel peut être classé en trois catégories: solvant aqueux, solvant organique et liquide ionique.

Électrolyte aqueux

Les électrolytes aqueux sont composés de sels ioniques tels que H₂SO₄, KOH, Na₂SO₄ et NH₄Cl dissous dans de l'eau. Ils peuvent fournir une concentration ionique plus élevée et une meilleure conductivité ionique que leurs homologues organiques. Malheureusement, la différence de potentiel entre les électrodes est limitée par la réaction de séparation de l'eau (2H₂O → 2H₂ + O₂), ce qui limite leur densité d'énergie et de puissance.

Électrolyte organique

Par rapport à de l'eau, les solvants organiques résistent à de plus grandes tensions, jusqu'à 3,5 V. Dans ces électrolytes organiques, la teneur en eau doit être inférieure à 5 parties par million ce qui pose des contraintes supplémentaires. Ils présentent également une force de traînée plus grande que l'eau, qui se traduit par une résistance ohmique 20 à 50 fois supérieure. Dans les EDLC, les solvants couramment utilisés sont l'acétonitrile et le carbonate de propylène, associés à des sels ioniques type TEABF₄. Dans les pseudo-condensateurs, on utilise plutôt des sels de lithium (e.g. LiPF₆) car la faible taille de l'ion Li permet une grande densité surfacique et une intercalation dans les électrodes type-batterie (i.e. batterie Li-Ion).

Liquide ionique

Certains sels ioniques sont liquides à température ambiante sans besoin de solvant. Ces liquides ioniques présentent une stabilité thermique et chimique élevée, une faible inflammabilité, une large fenêtre de stabilité électrochimique (environ 3,8 V) et une faible conductivité électrique (10 mS/cm). En revanche, ils peuvent être assez visqueux, ce qui provoque une forte résistance ionique et empêche le liquide de pénétrer dans les pores les plus petits. De plus, ces sels ioniques sont bien plus chers que les solvants. Une solution consiste à modifier la forme et la taille des ions pour optimiser les propriétés des liquides ioniques, ou à diluer ces liquides ioniques dans un solvant pour réaliser un compromis efficace entre les avantages et les inconvénients des différents types d'électrolytes.

“ Les supercondensateurs sont d'abord utilisés dans les systèmes qui requièrent des pics de fortes puissances car ils permettent de répartir les appels de puissance dans le temps et donc de diminuer la contrainte réseau. ”

Pour conclure cet état de l'art, notons que les systèmes les plus performants tirent profit de la synergie entre leurs composants. Pour aller plus loin dans ces comparaisons, il faudrait donc adopter une approche systémique qui dépasse le cadre de cet article [4].



Figure 6 : Tramway de Nice, sans caténaire, utilisant des supercondensateurs (en vert) pour alimenter les moteurs (en rouge) et récupérer l'énergie de freinage [5].

Applications industrielles

La seconde partie de cet article est consacrée à l'utilisation des supercondensateurs dans l'industrie. Elle est largement issue d'un entretien avec M. Thierry Drezen, qui a dirigé l'équipe « Innovation supercondensateurs » chez Blue Solution.

État de l'art des supercondensateurs commercialisés

Les supercondensateurs disponibles commercialement avec la plus haute densité d'énergie sont des hybrides qui contiennent une électrode en charbon actif type EDLC et une électrode en graphite pré-lithiée « type-batterie » avec un électrolyte organique contenant des sels de lithium (LiPF_6). Lors de la charge, les ions Li quittent l'électrode en graphite et vont former la double couche électrochimique sur le charbon actif. La capacité de la double couche est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle de l'électrode en graphite « type-batterie ». Aussi, seule une très

faible partie des ions Li^+ quitte en réalité le graphite qui reste essentiellement chargé à plus de 90 %. Le fait de rester dans cette plage « quasi-chargée » permet une intercalation très rapide tout en fournissant un gros gain de capacité. Ce genre de condensateurs hybrides, appelés *Li-capacitors* (LiC) sont produits par la firme japonaise JSR.

Les supercondensateurs les plus courants restent néanmoins les systèmes symétriques charbon/charbon (EDLC) dans un électrolyte organique, commercialisés par de nombreuses entreprises, qui offrent une énergie plus faible mais une durée de vie et une puissance améliorées par rapport au LiC.

Applications industrielles des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont d'abord utilisés dans les systèmes qui requièrent des pics de fortes puissances car ils permettent de répartir les appels de puissance dans le temps et donc de diminuer la contrainte réseau. Cela inclut les portes d'avion qui utilisent les

ressources limitées de l'appareil ou la soudure à l'arc, qui utilise des impulsions très intenses. Dans les véhicules électriques (VE) ou hybrides-électriques (VHE), ces condensateurs permettent d'étaler les appels de puissance sur la batterie lors du démarrage, ce qui allonge sensiblement la durée de vie de la batterie. Ce « lissage » des pics de consommation par des condensateurs est crucial dans les stations de tramways à supercondensateurs qui doivent se recharger en quelques secondes. Toujours dans le stockage stationnaire, cette fonction de lissage est également utilisée pour réguler la fourniture en entrée des sites industriels qui ont besoin d'une fourniture très « propre » type micro-électronique, ou en sortie des sites de production d'énergie intermittentes, souvent couplés à des batteries.

Les supercondensateurs sont également présents dans les systèmes de récupération d'énergie qui nécessitent de fortes puissances et un stockage de courte durée. Ainsi, dans les grues portuaires, la forte puissance néces- ●●●

●●● saire pour lever les containers peut être récupérée lors de leur descente. De même, dans les téléphériques, l'énergie nécessaire à la montée de la cabine est récupérée à son retour. Dans les automobiles, l'énergie générée lors du freinage est réutilisée lors du démarrage. Cela s'étend également aux moteurs de certaines voitures (Peugeot, Mazda) où la fonction « start & stop », basée sur la récupération de l'énergie de l'arbre moteur, est assurée par des supercondensateurs Maxwell.

Enfin les supercondensateurs sont utilisés comme source d'énergie principale pour la mobilité quand l'autonomie requise est faible mais que la durée de vie est primordiale. C'est le cas de certains transports collectifs, que nous abordons maintenant plus en détail.

Focus sur les transports collectifs à supercondensateur

Pour comprendre les problématiques spécifiques à la mobilité fonctionnant uniquement sur supercondensateurs, on peut prendre l'exemple de la navette maritime Ar Vag Tredan (2014) qui fait la navette entre deux ports de Bretagne, avec une autonomie de 30 min, et se recharge à chaque arrêt. A raison de 7 allers retours par jour, elle doit être rechargée plus de 4 000 fois par an, ce qui est impossible pour une batterie (durée de vie d'un millier de charges) mais pas pour un supercondensateur (un million de charges). En effectuant des recharges plus fréquentes mais plus rapides, la navette a besoin de beaucoup moins d'énergie stockée que sur un système à combustion ou à batterie. Dans un contexte où le stockage d'énergie est limitant en termes de place et

de prix, ce sous-dimensionnement offre un avantage comparatif par rapport aux batteries. La longévité et la vitesse de charge des supercondensateurs compensent ainsi leur prix élevé et leur manque d'autonomie.

Les tramways, qui effectuent de courts trajets entre des stations électrifiées, se trouvent dans ce même cas de figure et peuvent donc fonctionner sur supercondensateurs. En effet, un tramway utilisant un stockage interne n'a pas besoin d'être alimenté entre les stations, ce qui permet de se passer de caténaire ou de troisième rail et simplifie considérablement l'implantation et l'acceptabilité. C'est le cas du tramway de Rio de Janeiro et de celui de Nice, construits par Alstom entre 2015 et 2016 ou de celui de Mannheim, produit par Skoda en 2019. Pour diminuer encore le besoin d'infrastructures, on peut remplacer les rails par des pneus et faire rouler le tram sur des voies de bus. C'est le principe du BlueTram, qui a été déployé par la société Blue Solution à l'Université nationale de Singapour.

En station, la recharge de ces tramways dure une vingtaine de secondes, ce qui correspond à la durée normale d'un arrêt. Cette charge très rapide induit un fort appel de puissance qui peut mettre le réseau de distribution à rude épreuve. Pour résoudre ce problème, chaque station est équipée d'un pack de supercondensateurs qui se recharge progressivement entre deux trains et minimise la contrainte instantanée. De plus, l'énergie de freinage peut être récupérée et stockée ou renvoyée vers la station en fonction de l'architecture et du besoin, afin de réduire encore la consommation d'énergie et l'impact sur le réseau.

“Un tramway utilisant un stockage interne n'a pas besoin d'être alimenté entre les stations, ce qui permet de se passer de caténaire ou de troisième rail et simplifie considérablement l'implantation et l'acceptabilité.”



L'auteur

Jean Vergnet est un ancien élève de l'École polytechnique et Ingénieur du corps des Ponts, des eaux et forêts. Après un stage-conseil à RTE sur le projet de Batteries à large échelle « Ringo », il a effectué son doctorat au Collège de France sur les batteries Na-Ion. À l'interface entre politiques publiques et expertise technique, il s'intéresse au rôle du stockage dans l'évolution du réseau face à la montée des énergies renouvelables. Membre de la SEE depuis avril 2017, il a coordonné le dossier « batteries » (REE 2017-5).

Tramways à condensateurs vs bus à batterie

L'alternative aux supercondensateurs consiste à utiliser des batteries. Dans ce cas, la recharge en 20 secondes n'est pas possible mais l'autonomie est plus longue, ce qui permet de dimensionner les batteries pour pouvoir effectuer plusieurs rotations avant de devoir recharger au dépôt. Cela permet d'éviter l'infrastructure de charge en station et donne plus de flexibilité lors de l'exploitation.

La quantité d'énergie à stocker dans un bus à batterie est donc bien plus grande que dans un tramway à supercondensateurs ce qui donnait un avantage économique à ceux-ci quand le prix des batteries était encore élevé. Cependant, la baisse du prix des batteries sur les 10 dernières années, associée à l'absence d'infrastructures fixes, a fait largement

pencher la balance en faveur des bus à batteries. Cette situation explique que les métropoles comme Paris ont opté pour les batteries, de même que les constructeurs de voitures individuelles.

On peut considérer que par rapport aux supercondensateurs, les batteries offrent la possibilité d'espacer les points de recharge. Dans cette perspective, l'hydrogène se présente comme une continuation de ce mouvement car il requiert une infrastructure de recharge plus lourde en station mais un espacement plus grand des points de recharge.

Conclusion : Quelles perspectives pour les supercondensateurs ?

Malgré leurs performances en puissances, les supercondensateurs ont une densité d'énergie bien plus faible que les batteries et leur prix n'a pas suffisamment baissé au cours des 10 dernières années pour être compétitifs sur des applications où le stockage est juste une « commodité ». Dans ce contexte, les intégrateurs vont donc préférer les batteries. Les supercondensateurs ne vont rester utiles que dans des marchés de niche où leurs caractéristiques spécifiques sont requises. C'est le cas

de l'aérospatial où leur longévité et leur résilience les rendent incontournables.

En revanche sur le long terme, une fois que la mobilité sera complètement électrifiée, le besoin d'efficacité énergétique va devenir la priorité. A ce moment-là, la récupération de l'énergie (lors du freinage par exemple) va devenir incontournable. Cette récupération nécessite de charger avec de très fortes puissances qui sont inaccessibles aux batteries. Les supercondensateurs feront alors leur retour dans la mobilité individuelle, de l'automobile aux vélos électriques. Et pourquoi pas aux trottinettes ! ■

Résumé

Les supercondensateurs ont longtemps fait figure d'alternative possible aux batteries. En effet, leur longévité et leur vitesse de charge permettent d'effectuer des recharges très fréquentes qui compensent leur faible densité d'énergie, ce qui est particulièrement adapté au cas de la mobilité collective. Cependant, si les supercondensateurs restent utilisés dans certains cas spécifiques, ils sont aujourd'hui remplacés par des batteries dans la mobilité collective.

Cet article vise à éclairer cette situation en adoptant une approche « bottom-up ». La première partie, plus fondamentale, détaille le fonctionnement et l'état de l'art de ces supercondensateurs. La seconde partie, plus appliquée, décrit la réalité industrielle de cette technologie en listant les applications possibles, avec un focus sur le tram à supercondensateur avant d'ouvrir des perspectives à long terme. ■

Abstract

Super capacitors have long been framed as a possible alternative to batteries. Indeed, their longevity and fast charging speed allow for frequent recharges which compensate for their low energy density and are particularly suitable for collective mobility. While these supercapacitors are still used in certain specific cases, they are now being replaced by batteries in collective mobility.

This article aims to shed light on this situation by adopting a "bottom-up" approach. The first fundamental part details the principles and the state of the art of supercapacitors. The second, more applied part describes the industrial reality of this technology by listing the possible applications, with a focus on the supercapacitor tramways before opening some long-term perspectives. ■

Références

- [1] G. Algicek, 'Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications au véhicule électrique', Université de technologie de Belfort Montbéliard.
- [2] P. Simon, 'Le stockage électrochimique de l'énergie : principes, applications et futurs défis', *Ann. Mines - Responsab. Environ.*, vol. 78, no. 2, p. 67, 2015.
- [3] K. V. G. Raghavendra et al., 'An intuitive review of supercapacitors with recent progress and novel device applications', *J. Energy Storage*, vol. 31, p. 101652, Oct. 2020.
- [4] J. M. Baptista, J. S. Sagu, U. W. Kg, and K. Lobato, 'State-of-the-art materials for high power and high energy supercapacitors: Performance metrics and obstacles for the transition from lab to industrial scale – A critical approach', *Chem. Eng. J.*, vol. 374, pp. 1153–1179, Oct. 2019.
- [5] 'Nice : Alstom et la Métropole dévoilent les innovations du futur tramway', <http://www.avem.fr/actualite-nice-alstom-et-la-metropole-devoilent-les-innovations-du-futur-tramway-6093.html>, Feb. 04, 2021.