

Les condensateurs à double couche électrochimique

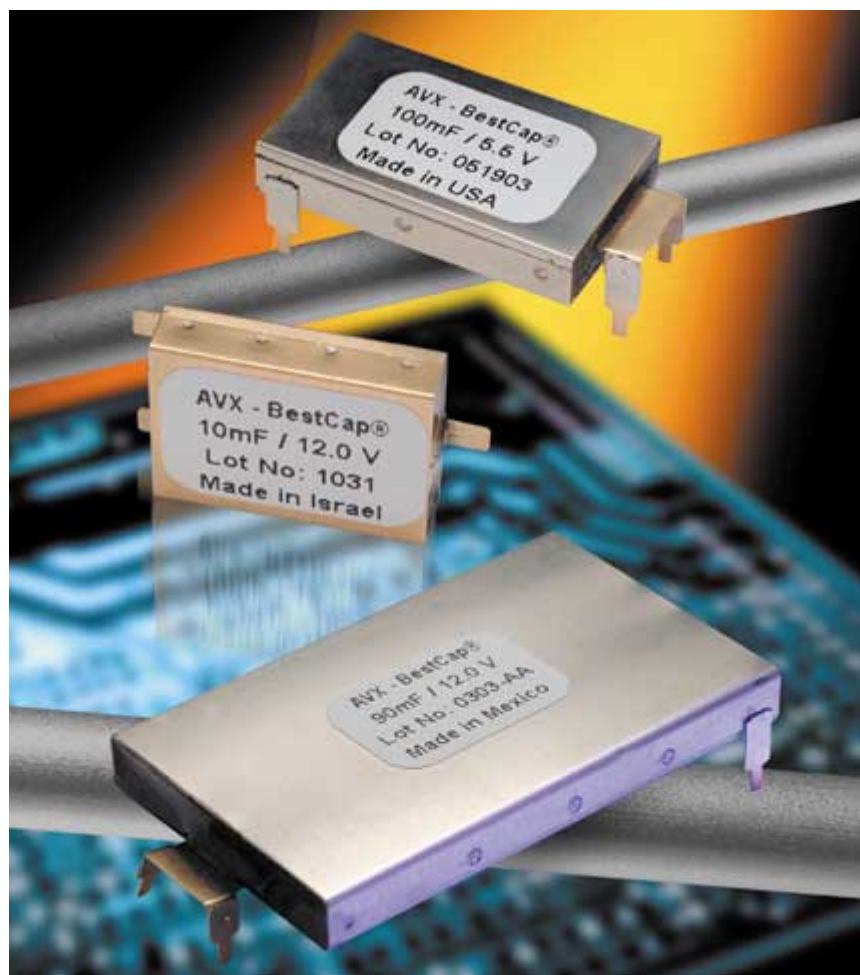
Technologie incontournable pour disposer d'une capacité de quelques millifarads à 5000 F, le supercondensateur à double couche électrochimique s'impose comme palliatif des faibles performances dynamiques des batteries.

Qu'il soit de filtrage, de découplage ou de liaison, la propriété principale d'un condensateur est de stocker de l'énergie et, encore mieux, de la restituer rapidement. Les faibles capacités disponibles sous les tensions usuelles ne lui permettent cependant pas d'assurer l'alimentation d'un système électronique dans la durée. Pour cet usage, les batteries conservent l'avantage de la densité d'énergie. La fonction de source d'énergie du condensateur reste donc cantonnée à des durées très limitées. De fait, utilisé en conversion d'énergie, il fera office de réservoir d'échange temporaire. Même si le remplacement des batteries est réalisable pour certaines applications, les condensateurs de forte capacité présentés ici sont davantage destinés à être associés aux accumulateurs et piles à combustibles dans le domaine des transports. Parallèlement, les supercondensateurs traditionnellement mis en œuvre pour la sauvegarde de mémoire sont offerts dans des formats adaptés à un grand nombre d'applications. En outre, leur faible tension de service n'est pas toujours un handicap pour assurer, dans un encombrement minimal, la fonction de découplage de circuits intégrés ou actionneurs

drainant des pics de courant de plusieurs ampères.

Le principe du supercondensateur, ou EDLC pour « Electrochemical double layer capacitor », repose sur une distance minimale entre les surfaces chargées en regard. Ici, les deux électrodes sont directement au contact d'un électrolyte. De ce fait, le diélectrique est on ne peut plus mince car constitué par la limite de phase entre l'électrode et l'électrolyte. Par conséquent, un condensateur de type EDLC est finalement constitué de deux capacités en série, séparées par la résistance de l'électrolyte et du séparateur d'électrodes, conducteur ionique.

Ce principe interdit les tensions de service trop élevées, sous peine d'assister à l'électrolyse d'un électrolyte aqueux. Les électrolytes organiques sont utilisés pour porter la tension à 2,3 V voire plus. La capacité finalement obtenue est maximisée par l'emploi de matériaux d'électrode offrant une surface spécifique importante, soit couramment des fibres ou un aérogel de carbone. Les électrodes en carbone activé présentent une surface et donc une capacité spécifique aux alentours de 2000 m² par gramme. La constante diélectrique de la double couche formée, ainsi que son épaisseur restent peu maî-



La série A BestCap d'AVX offre des capacités de 10 à 560 mF sous des tensions de service allant jusqu'à 12 V.

trisées. L'épaisseur de quelques fractions de nanomètres en présence d'électrolytes liquides résulte en une capacité spécifique de l'électrode de 150 à 300 F par gramme de matériau. Une valeur rarement obtenue en pratique, car de nombreux pores de l'électrode restent hors de portée des ions, et ne contribuent pas à la surface de la double couche. Il n'est donc pas surprenant que les nanotechnologies du car-

bone trouvent un terrain d'application avec ce type de composants, notamment dans le secteur des nanotubes qui favoriseront le contrôle du transport de charges.

En attendant, certains tels Cooper Bussmann explorent la voie des aérogels de carbone qui laissent une bonne maîtrise de la porosité et de la surface spécifique. Par ailleurs, d'autres s'orientent dans le champ des pseudo-condensa-

teurs, basés sur le même principe mais utilisant des oxydes métalliques et des techniques polymère. La double couche électrochimique est alors le lieu de réactions faradiques entre électrodes et électrolyte. Ces transferts de charge dépendant de la tension donnent naissance à une capacité non constante, fonction de la tension appliquée. La densité d'énergie stockée est alors moins assujettie à la surface spécifique de l'électrode. Ainsi, le coréen NessCap présente sa série PSHLR, qui offre une densité d'énergie de 5,2Wh/kg et 8,6Wh/l pour le modèle 120F/2,3V, contre respectivement 3,92 et 5,16 pour le modèle équivalent de la série ESLSR. La durée de vie passerait en revanche de 500 000 à 100 000 cycles : cette technologie parfois nommée « redox » se rapproche de celle des accumulateurs. Elle en retire avantages et inconvénients.

Le remplaçant des accumulateurs ?

Alors que le supercondensateur est parfois présenté comme un remplaçant des batteries, la puissance instantanée importante qu'il supporte, ainsi que sa durée de vie de plusieurs centaines de milliers de cycles le place d'ores et déjà favori dans les applications pour lesquelles l'accumulateur reste inefficace. Dans le secteur du transport, il assure le rôle de réservoir lors des phases de récupération d'énergie (freinage), et pourrait permettre des modes de transport en commun par « sauts de puce » : le tramway ponctionnerait à chaque station l'énergie nécessaire pour atteindre l'arrêt suivant. Les moteurs électromagnétiques linéaires, par exemple, ne peuvent actuellement prétendre au remplacement des systèmes hydrauliques de forte puissance, à moins d'une utilisation avec récupération d'énergie. Un tel mode de fonctionnement est envisageable dans un système de suspension active basé sur ces actionneurs semblables à des moteurs de haut-parleur électrodynamique. Mais pour développer une puissance crête de



50 kW afin de soulever le châssis du véhicule (*), il est délicat de se reposer sur le seul couple batterie-alternateur du véhicule. On envisage alors difficilement de se passer de condensateurs de très forte capacité. De même, l'alternateur autorisant l'arrêt temporaire du moteur au feu rouge (système « stop and go »), se passe pour l'instant de supercondensateurs car il concerne des véhicules de petite cylindrée, mais cela ne devrait pas durer. Reste que, pour toutes ces applications, la faible tension de service des supercondensateurs impose leur utilisation en série. La capacité est alors réduite mais l'énergie stockée est additive. Les principaux fournisseurs de supercondensateurs de forte puissance proposent donc des assemblages sous forme de modules haute tension : 14 à 75 V chez Epcos, ou jusqu'à 340V chez NessCap.

Nous n'avons pas détaillé ces offres dans ce « Dossier » car, hormis quelques applications standard auxquelles répondront ces fournisseurs (comme offrir le maximum de capacité dans l'encombrement d'une batterie 14V ou 42V pour l'automobile), chacun est susceptible de définir son propre cahier de charges pour ce type d'assemblage. Comme dans le cas d'une batterie d'accumulateurs, la performance et la durée de vie de l'ensemble seront malgré tout dépendantes de la gestion thermique et de l'équilibrage des cellules, aussi la conception d'un module gagnera-t-elle à être confiée au spécialiste fournisseur des éléments. Ces derniers proposent au passage des tech-

niques d'équilibrage actif, permettant d'éviter qu'une cellule de la chaîne ne se charge au-delà de sa tension nominale et n'entraîne une dérive fatale des caractéristiques du module.

Le supercondensateur pourra également être utilisé comme réservoir de découplage local, par exemple au niveau d'un moteur lève-vitre : en répondant à la plus grosse partie de l'appel de courant, il permet de réduire la section du câblage tout en diminuant la pollution électromagnétique. C'est dans un esprit similaire que certains modèles ultraminces ont été développés, pour pouvoir s'intégrer dans un système au format PC Card : la norme n'autorisant que des appels de courant de 1A, il est délicat de concevoir des modems GSM performants

Le secteur de l'énergie renouvelable, solaire ou éolienne, est fréquemment évoqué par les fournisseurs de fortes capacités (doc. Epcos).

dans ce format, alors que l'amplificateur impose des pics de 2A pendant 500 µs, toutes les 4ms. Un supercondensateur correctement dimensionné permettra de lisser le courant pris sur le bus PCMCIA et de fournir l'intensité nécessaire au modem. De même, il est pratiquement impossible de faire fonctionner un GSM à partir de piles primaires alcalines qui présentent une résistance interne trop élevée. L'emploi d'une forte capacité pour pallier cet inconvénient. Dès qu'il s'agit de répondre à des pics de courant, la résistance série est souvent primordiale, car elle provoque une chute de tension immédiate qu'une capacité plus importante ne saurait compenser. De plus, le rapport cyclique des impulsions ne peut être trop élevé, il sera de préférence inférieur à 20% : il faut bien que le condensateur se recharge entre deux pics.

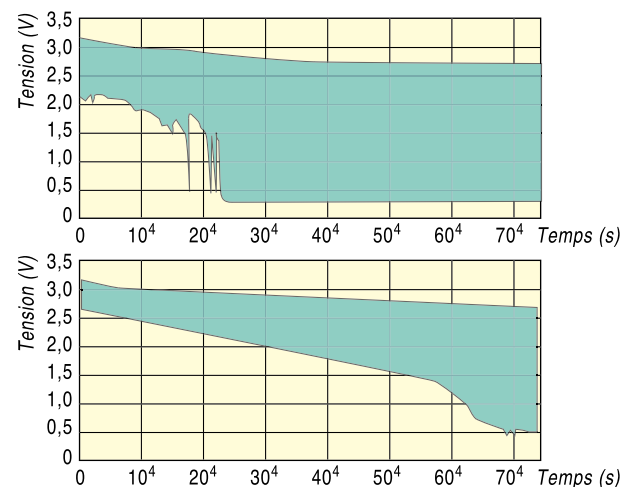
Un couple idéal

Les accumulateurs et piles primaires supportent mal les décharges profondes et les sollicitations répétées à fort courant. Ce n'est pas le cas des condensateurs qui sont de ce fait de plus

Le supercondensateur au secours des piles

FIGURE

Cooper Bussmann compare un système de deux piles AA seules (en haut) ou associées à un condensateur de 6F en parallèle, sans autre circuit (en bas). La décharge simule un zoom d'appareil photo de 4W actionné pendant 3s toutes les 3 minutes (55 cycles sur 10000s). Sans condensateur, la tension chute sous 1,5V trois fois plus tôt.



(*) Système Bose présenté par notre confrère Electronique International Hebdo - n°574 du 14 octobre 2004, p.37.

en plus appréciés dans le secteur du jouet électrique: la charge rapide très adaptée à la patience limitée de l'enfant reste sûre et ne demande pas d'électronique sophistiquée. La tension réduite n'est pas forcément restrictive si l'on accepte une diminution de la durée de vie: de 1 million à 10 000 cycles, totalement suffisants pour animer une petite voiture électrique sous 4,5V au lieu de 2,5V. Pour un tel usage, le courant de fuite importe peu et on pourra réaliser des modules série avec équilibrage passif (pont résistif).

Par ailleurs, alors que la pile se décharge à tension pratiquement constante, le condensateur obéit à la loi: $i = C \cdot du/dt$ signifiant qu'à courant constant, la tension décroît linéairement. De ce fait, la capacité n'est jamais entièrement exploitée si le supercondensateur est la seule source d'énergie. Les circuits intégrés qui apprécient les tensions d'alimentation bien régulées n'ont que peu d'intérêt à s'alimenter exclusivement sur un supercondensateur, si l'on doit y associer un convertisseur élévateur-abaisseur au rendement discutable. Dans les applications de faible puissance sur des durées idéalement les plus longues possibles, le supercondensateur n'aura donc jamais l'avantage sur la batterie si ce n'est celui de la durée de vie. Il sera donc utilisé au mieux en association: en répondant aux sollicitations ponctuelles, la puissance nominale de la batterie peut être revue à la baisse et sa décharge sera optimisée (figure).

Pour toutes ces applications, Epcos et Maxwell présentent des petits composants jusqu'à 10F, au facteur de forme compatible. AVX, Cooper ou Nec offrent, eux, des cellules prismatiques ultra-minces dans la gamme du millifarad, déjà aptes au découplage ou à la préservation des batteries.

Mis à part les produits cylindriques ou prismatiques, de la taille d'une boîte de soda ou de lait offrant des capacités de plusieurs centaines voire milliers de farads chez Epcos, Maxwell ou NessCap, de nombreux produits



se présentent sous une forme similaire à une pile «bouton» voire en empilage de deux ou trois de ces cellules. De faible capacité, avec une résistance série relativement

Ce modèle Boostcap de Maxwell Technologies offre 350F dans des dimensions compatibles avec les piles primaires LR20.

importante (plusieurs dizaines d'ohms), elles serviront à la sauvegarde de mémoire pour des automates ou à l'alimentation provisoire d'horloges temps réel. Les capacités intermédiaires se présentent sous la forme classique des condensateurs électrolytiques radiaux, avec des résistances plus faibles, soit pour le découplage d'alimentations, soit pour la sauvegarde de fonc-

tionnement (mise en veille «propre» d'un système lors d'une coupure d'alimentation).

Pour finir, on évoquera l'utilisation de supercondensateurs, en complément ou remplacement des batteries derrière les piles à combustibles ou cellules solaires aux performances transitoires très limitées, ou encore dans les installations éoliennes. D'une manière générale, leur endurance face aux températures extrêmes les qualifie pour les applications à haute disponibilité où les batteries, contraignantes à entretenir et parfois inefficaces, ne peuvent suffire à garantir une fiabilité absolue.

JEAN-FLORENT HELIE

Les critères de choix

Bien spécifier son besoin

Pour les propriétés électriques aussi bien que pour la durée de vie, il est préférable de bien spécifier son besoin pour apprécier les fiches de caractéristiques. Pour les régimes impulsions, une faible résistance série reste primordiale compte tenu des tensions de service réduites.

Les composants que nous avons listés dans le tableau répondront aux trois principales applications: impulsions de courant, alimentation de sauvegarde et alimentation principale. Les plus grosses capacités résolument tournées vers les applications de puissance précisent leurs densités de puissance spécifique en kilowatt par kg et par litre, ainsi que leur courant maximal. Il faudra cependant souvent véri-

fier dans quelles conditions ont été mesurées ces données, si on veut les comparer avec les caractéristiques d'une batterie. Les fabricants fournissent également la capacité énergétique

en watts-heures ou en joules; nous ne l'avons pas reportée car la conversion est évidente: $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$, et l'énergie stockée dépendra de la tension d'utilisation: $E = 1/2 \cdot C \cdot U^2$. L'énergie échangée est directement issue du différentiel de tension pour une capacité donnée: une décharge de U à $U/2$ représente les 3/4 de l'énergie stockée au départ.

De par la nature particulière du diélectrique, les condensateurs à double couche électrochimique ne peuvent pas être spécifiés avec précision par la mesure classique d'une constante de temps dans un circuit RC à 63% de la tension appliquée. Les fournisseurs décrivent parfois la méthode utilisée dans leurs notes d'application. Souvent, il s'agira d'une charge

à courant constant: la mesure d'un ΔT pour un différentiel de 1V (de 1,5 à 2,5 V) sous 1 A donne directement la capacité en farads. Autant dire que la capacité effective pour une décharge sous quelques mA ou au contraire sous une centaine

Suite p. 76

Au-delà de quelques volts, il faudra recourir à un assemblage modulaire, tel ce modèle 14V de 300F proposé par Epcos.



De 50mF à 56F, Kanebo propose des cellules cylindriques ou des formats bouton brochés pour montage vertical ou horizontal.

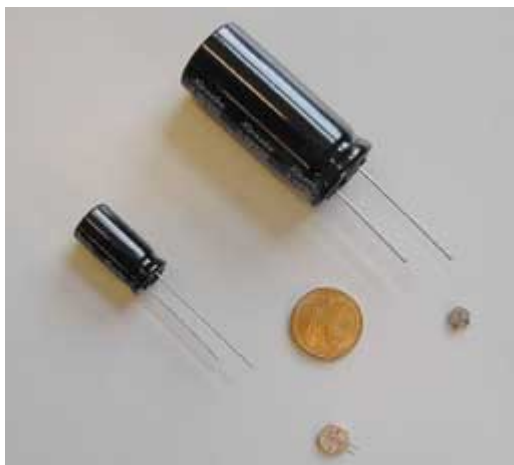
➤ d'ampères risque d'être un peu différente. La tolérance sur la capacité est donc couramment de -20% à +80% de la valeur nominale. C'est le cas de tous les produits pour lesquels nous n'avons pas spécifié d'autre plage.

Faux fuyants

Pour les courants faibles, on appréciera l'indication du courant de fuite, car il n'est pas impossible que ce dernier soit plus important que le courant de veille du sous-système alimenté. Le recours à un supercondensateur au lieu d'une pile ou d'un accumulateur peut alors paraître inepte, mais si le temps de sauvegarde reste intéressant, il n'est pas forcément judicieux de se priver de la souplesse d'utilisation du condensateur; cela dépendra du cahier des charges.

On constate pourtant que les produits au format pile bouton délivrant des courants faibles et a priori exclus des applications à forts courants impulsions, du fait de leur résistance série élevée, spécifient rarement leur courant de fuite. Ce dernier est mesuré lors d'une charge longue: il s'agit du courant circulant dans le condensateur lorsque la tension n'augmente plus. Ce courant a un caractère logarithmique et décroît d'un facteur 10 pour une décharge de 1h à 10h, et d'autant sur la période 10h à 100h. Pour ne pas fausser la mesure, le composant testé est court-circuité pendant plusieurs heures (jours) afin de s'assurer que le composant est totalement exempt de charge d'absorption diélectrique, ce qui n'a rien à voir avec des conditions d'utilisation normales. Parfois, certains spécifient ces pertes par autodécharge en donnant la tension à vide au bout de 24h.

Pour les plus gros composants (Epcos, Maxwell, NessCap), le courant de fuite peut paraître dérisoire en regard des énergies traitées, mais cette donnée pourra servir à apprécier la consommation d'un système d'équilibrage



réversible, mais ce n'est pas le cas lors des chocs à haute température qui dégradent l'électrolyte: certains processus d'assemblage comme la refusion sont de ce fait interdits si l'on souhaite rester dans les spécifications garanties. Il en est de même pour l'effet des surtensions sur la capacité et la durée de vie. Certains produits d'un même fabricant peuvent être identiques mais spécifiés donc étiquetés différemment: 800mV de tension de service supplémentaire se paieront au prix d'une plage d'utilisation en température réduite, ou à l'inverse la refusion n'est possible que pour une tension réduite.

pour un module. Ces derniers parlant de courant de polarisation et non de courant de fuite, du fait de la présence de cette circuiterie active ou passive.

Une résistance série primordiale

Lorsque la tension de service est de 2,5V et que les courants atteignent plusieurs ampères, la résistance série est à l'origine d'une part non négligeable de la chute de tension. Donnée généralement en régime alternatif à 1kHz, elle peut être aussi spécifiée pour une décharge à courant constant (ESR_{DC}). Pour les applications non impulsives, cette résistance peut être de l'ordre de la centaine d'ohms.

Or même une décharge à faible courant constant est souvent précédée d'une impulsion qui peut s'avérer problématique dans ces conditions. De plus, l'augmentation de cette résistance série sera perceptible aux faibles températures. Cet effet dû au ralentissement des ions dans l'électrolyte et au travers du séparateur est

féremment: 800mV de tension de service supplémentaire se paieront au prix d'une plage d'utilisation en température réduite, ou à l'inverse la refusion n'est possible que pour une tension réduite.

On précise au passage que bien que non polarisés par construction, ces condensateurs acquièrent une polarité dès la première utilisation et seront donc utilisés comme tels. Les inversions ou pics de tension inverse peuvent être délétères ou affecter la durée de vie, même si certains fournisseurs proclament une certaine résistance à cet égard.

Alors que la durée de vie indiquée se limite souvent à une baisse caractérisée de 30% de la capacité et une augmentation de la résistance série d'un facteur trois à quatre, pour des cyclages thermiques et électriques sur un bon millier d'heures, l'utilisation dans des conditions stables et bien déterminées permettra d'extraire la quintessence du composant pendant de nombreuses années. Certains comme AVX

spécifient un doublement du courant de fuite et une augmentation de résistance de 50% seulement pour déterminer la plage d'utilisation: la pertinence d'un critère de fin de vie sera donc jugée encore une fois selon le cahier des charges. Par exemple, dépasser de 10°C la température maximale avec des dommages limités peut s'envisager si le composant est utilisé à 1,8V au lieu de 3,6V.

Lorsque le besoin est bien spécifié, on pourra éventuellement profiter d'une offre sur mesure, souvent proposée en format prismatique, de plus ou moins grande dimension. Leur fabrication qui s'inspire de celle des accus lithium polymère se prête bien à la personnalisation, et le composant ultramince se marie bien avec les accus: les deux composants pourront s'associer dans un pack batterie musclé.

Puissance ou efficacité?

Nous avons choisi de reporter la puissance spécifique supportée par les gros supercondensateurs, afin de distinguer ces produits, qui ciblent le stockage et la récupération de hautes énergies, de ceux destinés aux plus faibles courants. Cependant ces valeurs, généralement spécifiées dans le cadre d'un montage adapté en impédance, ne doivent pas être prises au pied de la lettre: comme dans le cas d'une batterie, la moitié de l'énergie est dépensée sous forme de chaleur, et l'autre moitié est délivrée à la charge sous forme de puissance électrique. Des conditions que le bon sens pousse à éviter autant que possible.

Comme dans le cas d'une batterie, l'efficacité (EF) du cycle de charge-décharge devra être prise en compte. Pour une décharge de V_0 à $V_0/2$, la puissance instantanée sera calculée par la formule $9/16 \times (1-EF) \times V_0^2 / R_{uc}$; avec R_{uc} la résistance du supercondensateur, car il faut ici en plus tenir compte de la chute de tension lors de la décharge, ce qui n'est pas le cas de la batterie. C'est pourquoi la valeur en adaptation d'impédance reste utilisable à des fins de comparaison entre batteries et condensateurs. Mais il faut veiller à comparer ce qui est comparable.

JEAN-FLORENT HELIE

Le coréen NessCap propose une vaste gamme de 3 à 5000F, sous forme cylindrique jusqu'à 120F et prismatique au delà.



Les supercondensateurs de 10 mF à 5000 F

Fabricant (fournisseur)	Famille	Type	Capacité (F) (tolérance)	Tension de service (V) (tension de crête max.)	Puissance spécifique kW/kg - kW/l	Courant max. (courant de fuite)	Résistance interne (mΩ) ESR - ESR ₉₀	Dimensions diamètre x hauteur ou L x l x h (mm) - Poids	Observations
AVX	BestCap série A	Prismatique	70 - 140 - 280 - 560 mF	3,6 (4,5)		(5 à 40 μA)	168 à 25	48 x 30 ou 28 x 17 x (2,9 à 6,4) - 4,2 à 15,9 g	Température d'utilisation : - 20 à + 75°C ; (ΔC = 30 % ; ΔESR = 50 % ; Δlfuite = 100 %).
			33 - 50 - 68 - 100 - 200 - 400 mF	5,5 (6,9)		(5 à 40 μA)	300 à 35	20 x 15 ou 48 x 30 ou 28 x 17 x (3,5 à 9,6) - 2,3 à 18,4 g	
			120 - 33 mF	9 (11,3)		(20 - 5 μA)	70 à 84 et 250 à 300	48 x 30 ou 28 x 17 x (4,9 à 8,4) - 5 ou 15,6 g	
			10 - 22 - 90 mF	12 (15)		(20 - 5 μA)	90 à 600	48 x 30 ou 28 x 17 x (6,5 à 10) - 3,5 à 19,3 g	
			33 mF	7 (8,8)		(5 μA)	225 à 270	28 x 17 x (4,5 à 8) - 4,3 g	
	BestCap série B faible épaisseur	Prismatique	50 mF	3,6 (4,5)		(5 μA)	100 à 120	28 x 17 x (2,1 ou 3,2) - 2,9 g	Température d'utilisation : - 20 à + 70°C ; (ΔC = 30 % ; ΔESR = 50 % ; Δlfuite = 100 %).
			22 - 33 mF	4,5 (5,6)		(5 μA)	204 à 150	20 x 15 ou 28 x 17 x (2,1 à 3,5) - 3,2 g	
			15 - 30 - 33 - 60 mF	5,5 (6,9)		(5 ou 10 μA)	300 à 80	28 x 17 ou 20 x 15 x (2,7 à 8,3) 1,7 à 5,5 g	
			22 mF	9 (11,3)		(5 μA)	250 à 300	28 x 17 x (4,1 à 7,6) - 4,4 g	
			15 mF	12 (15)		(5 μA)	350 à 420	28 x 17 x (5,3 à 8,8) - 5 g	
Cooper Bussmann	Série A-2R5	Cylindrique radiale	0,47 - 1 - 1,5 - 4,7	2,5 (3)			150 à 25	8 x 20 - 10 x 20,5 - 10 x 30 - 16 x 35	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C ; endurance 1000 h à 70°C (ΔC=30% ; ΔESR = 300 %).
	Série B-2R5	Cylindrique radiale	0,22 à 50 (11 réf.)	2,5 (3)			3000 à 25	5 x 11,5 à 18 x 41,5	
	Série F	Prismatique ultra-mince - fabrication custom ex ref. FA021740-3R6154	0,15	1,8 à 2,3 ou 3,6 à 4,2			200	2 x 17 x 40mm	
	Série PB	Modules 2 éléments 5 V	0,1 - 0,47 - 1	5 (6)			10, 2 et 1 Ω	5,5 x 10,8 x 12,5 à 8,5 x 16,8 x 21,5	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C ; endurance 1000 h à 70°C (ΔC = 30% ; ΔESR = 300 %).
	Série PA	Modules 2 éléments 5 V	0,22 - 0,47	5 (6)			0,3 et 0,2 Ω	8,5 x 16,8 x 21,5 et 10,5 x 20,8 x 21,5	
	Série X	Prismatique custom	100 à 2500	2,5				0,5 min.	T° d'utilisation: - 25 à + 70°C.
Elna	Série DX	Double cellule bouton à montage horizontal ou vertical	47 - 100 - 220 - 330 mF	5,5			120 à 75 Ω	11,5 x 4,5	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C ; endurance 1000 h à 70°C (ΔC = 30 % ; ΔESR = 400 %)
	Série DX-L	Double cellule bouton à montage vertical, sur ruban T20 pour insertion auto.	47 - 100 - 220 - 330 mF	5,5			120 à 75 Ω	14,2 x 4,5	
	Série DB	Double cellule bouton radiale	47 - 100 - 220 - 330 - 470 - 1 000 mF	5,5			120 à 30 Ω	13,5 x 7,5 et 21,5 x 8	Idem ci-dessus ; température d'utilisation : - 25 à + 85°C.
	Série DK	Triple cellule bouton radiale	47 - 100 - 470 - 1 000 mF	6,3			300 à 30 Ω	13,5 x 9,5 et 21,5 x 9,5	
	Série DH	Triple cellule bouton radiale	47 - 100 - 220 - 470 - 1000 mF	5,5			300 à 30 Ω	13,5 x 9,5 et 21,5 x 9,5	
	Série DC	Cellule bouton faible épaisseur	180 - 330 - 2 200 mF	2,5 - 2,4 - 2,4			120 - 40 - 20 Ω	6,8 x 2,1 - 11 x 1,6 - 18,3 x 2	Idem ci-dessus ; température d'utilisation : - 25 à + 70°C.
	DCK	Cellule bouton faible épaisseur	220 mF	3,3			200 Ω	6,8 x 2,1	
	DS	Cellule bouton faible épaisseur brochée pour refusion 240 °C	180 mF	2,5	V		120 Ω	6,8 x 2,8	Idem ci-dessus ; température d'utilisation : - 25 à + 70°C.

Les supercondensateurs de 10 mF à 5000 F

Fabricant (fournisseur)	Famille	Type	Capacité (F) (tolérance)	Tension de service (V) (tension de crête max.)	Puissance spécifique (kW/kg - kW/l)	Courant max (courant de fuite)	Résistance interne (mΩ) ESR - ESR _{dc}	Dimensions diamètre x hauteur - Poids	Observations	
Elna	DSK	Cellule bouton faible épaisseur brochée pour refusion 240°C	220 mF	3,3			220 Ω	6,8 x 2,8	Température d'utilisation : - 25 à + 60°C; endurance 1 000 h à 70°C (ΔC = 30 % ; ΔESR = 400%).	
	Série DZ	Cylindrique radiale	1 - 3,3 - 4,7 - 10 - 50 - 100	2,5			1 à 80 120 à 10 sur série DZ-N	8 x 22 à 35 x 50	Idem ci-dessus; température d'utilisation: - 40 à + 70°C.	
Epcos	B49100	Cellule prismatique radiale à souder	5 (- 10 + 30 %)	2,3 (2,7)	1,2 - 3,9	2 A - (20 μA)	200 - 330	4,75 x 22,75 x 14,75 - 5,5 g	T° util : - 30 à + 70°C; T° stock : - 40 à + 70°C; endurance 90 000 h - 500 000 cycles; (0,5 A et 1 A; ΔC = 20 % ; ΔESR = 200 %).	
			10 (- 10 + 30 %)	2,3 (2,7)	1,9 - 3,9	3 A - (40 μA)	110 - 180	4,7 x 23,5 x 29 - 6,4 g		
	B49400	Cylindrique axiale terminaison spéciale	200 (- 10 + 30 %)	2,5 (2,8)	16 - 18	50 A - (700 μA)	1,8 - 3	30 x 68 - 55 g	Température d'utilisation: - 35 à + 70°C; température de stockage: - 40 à + 70°C.	
			Cylindrique axiale à vis	600 (- 10 + 30 %)	2,5 (2,8)	16,3 - 18,8	300 A	0,6 - 1		50 x 70 - 160 g
			Cylindrique axiale à vis	1 200 (- 10 + 30 %)	2,5 (2,8)	13 - 17,3	300 A	0,4 - 0,6		50 x 114 - 300 g
			Cylindrique axiale terminaisons à vis	2 700 (- 10 + 30 %)	2,5 (2,8)	11,3 - 13	500 A	0,23 - 0,3		90 x 82 - 600 g
				3 600 (- 10 + 30 %)	2,5 (2,8)	11,2 - 12,3	500 A	0,2 - 0,26		90 x 100 - 700 g
	5 000 (- 10 + 30 %)	2,5 (2,8)	7,4 - 7,8	500 A	0,25 - 0,40	90 x 109 - 850 g				
	B49610	Cylindrique axiale	1 800 (- 10 + 30 %)	2,3	3,8 - 5,1		1	51 x 126 - 350g	Température d'utilisation: - 25 à + 60°C.	
	B49620	Cylindrique axiale	1 800 (- 10 + 30 %)	2,3	10,7 - 12,8		0,4	51 x 126 - 310 g		
2 300 (- 10 + 30 %)			2,3	4,8 - 5,7		0,7 - 1	51 x 161 - 390 g			
Kanebo (Endrich)	Série R	Cellule bouton pour refusion	60 - 200 - 300 mF (- 25 à + 50 %)	2,5			100 à 30 Ω	4,8 x 1,4 - 0,07 g/6,8 x 1,4 - 0,16 g/6,8 x 2,1 - 0,2 g	T° util : - 25 à + 70°C; endurance : 500 h sous 2,5 V à 70°C et 70 % des spécifications initiales; 10 000 cycles à 50 % des spécifications initiales.	
	Série NR	Cellule bouton pour refusion	50 - 150 - 250 mF (- 25 à + 50 %)	3,3			1 000 ou 200 Ω	4,8 x 1,4 - 0,07 g/6,8 x 1,4 - 0,16 g/6,8 x 2,1 - 0,2 g	T° util : - 25 à + 60°C; endurance : 500 h sous 3,3 V à 60°C et 70 % des spécifications initiales; 10 000 cycles à 50 % des spécifications initiales.	
	Série SR/HR	Cellule bouton pour refusion sans plomb	60 mF (- 25 à + 50 %)	2,5			250 Ω	4,8 x 1,4 - 0,07 g	T° util : - 25 à + 70°C (- 20 à + 60°C pour 3,3 V); endurance : 500 h sous Ur à Tmax; pour 70 % des spécifications initiales; 10 000 cycles à 50 % des spéc. init.	
			50 mF (- 25 à + 50 %)	3,3			1 000 Ω	4,8 x 1,4 - 0,07 g		
	Type L	Cellule bouton pour soudage manuel	65 mF (- 25 à + 50)	3,3			160 Ω	6,8 x 1,4 - 0,16 g	T° util : - 20 à + 60°C; endurance : 500 h sous 2,5 V à 60°C et 70 % des spécifications initiales; 10 000 cycles à 50 % des spécifications initiales.	
	Série PAS-OP	Cylindrique radiale faible ESR	0,7 - 1 - 2	2,3			100 - 70 - 50 mΩ	8 x 11 - 8 x 15 - 10 x 16	T° util : - 25 à + 60°C; endurance 100 000 cycles min.	
	Série PAS-OH	Cylindrique radiale haute capacité	4,7 - 10 - 22 - 56	2,3			300 à 50 mΩ	10 x 20 - 12,5 x 20 - 12,5 x 35 - 18 x 40	T° util : - 25 à + 60°C; endurance 100 000 cycles min.	
Maxwell Technologies	BCAP0008	Axiale à vis	1 800 (± 20 %)	2,5	2,08 - 2,78	450 A - (4 mA)	0,45 - 0,9	50 x 150 - 400 g	T° util : - 40 à + 65°C; T° stockage : - 40 à + 70°C; endurance : 1 000 h (2,5 V ; 70°C; ΔC = 20 % et ΔESR = 40 %) ; 500 000 cycles 20 A ou stockage 10 ans (25°C ΔC = 20 % et ΔESR = 200 %).	
	BCAP0010	Axiale à vis	2 600 (± 20 %)	2,5	2,04 - 2,55	600 A - (5 mA)	0,3 - 0,7	60 x 150 - 525 g		
	BCAP0013	Axiale à vis	450 (± 20 %)	2,5	1,64 - 2,08	180 A - (3 mA)	0,8 - 2,4	50 x 75 - 190 g		
	BCAP0350	Soudure axiale	350 (± 20 %)	2,5	3,9 - 4,68	20 A - (1 mA)	1,6 - 3,2	33 x 61,5 - 60 g		

Les supercondensateurs de 10 mF à 5000F

Fabricant (fournisseur)	Famille	Type	Capacité (F) (tolérance)	Tension de service (V) (tension de crête max.)	Puissance spécifique kW/kg - kWh/l	Courant max. (courant de fuite)	Résistance interne (mΩ) ESR - ESR _{bc}	Dimensions diamètre x hauteur - Poids	Observations
Maxwell Technologies	PC100E	Prismatiques à cosses	100 (± 20 %)	2,5	1,5 - 1,7	25 A - (0,3 mA)	9 - 13	34 x 64 x 16 - 37 g	T° util : - 40 à + 65°C; T° stockage: - 40 à + 70°C; endurance : 1 000 h (2,5 V ; 70°C; ΔC = 20 % et ΔESR = 40 %); 500 000 cycles 20 A ou stockage 10 ans (25°C ΔC = 20 % et ΔESR = 200 %).
	PC2500	Prismatique à vis	2 700 (± 20 %)	2,5	1,03 - 1,25	100 A - (6 mA)	0,55 - 1	161 x 61,5 x 61,5 - 725 g	
	PC5	Prismatique à souder	4 (± 20 %)	2,5	0,47 - 1,25	1 A - (0,02 mA)	120 - 400	14 x 23,6 x 4,8 - 4 g	
	PC10	prismatique à souder	10 (± 20 %)	2,5	0,66 - 1,39	2,5 A - (0,04 mA)	60 - 180	29,6 x 23,6 x 4,8 - 6,3 g	
	PC5-5	Prismatique sur câble connectorisé JST-ZHR-2	1,8 (± 20 %)	5	120 - 312	1 A - (0,02 mA)	390 - 800	24,2 x 17,4 x 10,8 - 8 g	
Nec Tokin	HP	Prismatique ultramine	10 - 22 et 47 mF	4,2 (4,7)		(5 mA)	200 à 350 Ω	29,5 x 12 x 2,3 - 34 x 14 x 2,3 42,5 x 17 x 2,3	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C.
	ED/L	Prismatique ultramine	47mF	3,6 (4,4)		(5 mA)	200 mΩ	26,5 x 38,5 x 2	
			22mF	7 (7,8)		(5 mA)	300 mΩ	26,5 x 38,5 x 3,4	
	FCOH	Cylindrique CMS	47 à 1 000 mF	5,5 (6,3)		(71 μA à 1,5 mA) autodécharge: 4,2 V (24 h)	50 à 7 Ω	10,5 x 5,5 à 21 x 10,5 - 1 à 6,7 g	
	FCOV	Cylindrique CMS	100 - 220 - 470 mF	3,5 (4)		(90 à 420 μA)	50 à 25 Ω	10,5 x 5,5 à 10,5 x 8,5 - 1 à 1,4 g	
	FMOH	Résine moulée sur ruban pour assemblage automatique	10 à 220 mF	5,5 (6,3)		(15 à 330 μA)	300 à 100 Ω - 4,2 V	10,5 x 11,5 x (5 à 6,5) - 1,3 à 1,6 g	
	FMOV		47 à 300 mF	3,5 (4)		(42 à 200 μA)	200 à 100 Ω	10,5 x 11,5 x (5 à 6,5) - 1,3 à 1,6 g	
	FME		22 à 60 mF	5,5 (7,4)		(33 à 71 μA)	40 à 20	10,5 x 11,5 x 5 - 1,3 g	
	FMR		47 à 62 mF	5,5 (6,3)		(71 μA)	200 Ω	10,5 x 11,5 x 6,5 - 1,6 g	T° d'utilisation: - 40 + 85°C.
	FMOJ		47 à 62 mF	6,5 (7,4)		(85 μA)	200 Ω	10,5 x 11,5 x 6,5 - 1,6 g	T° d'utilisation: - 25 à + 70°C.
	FMC		47 à 330 mF	5,5 (6,3)		(71 à 500 μA)	100 à 25 Ω	11,5 x 10,5 x 5 à 15 x 14 x 9 - 1,3 à 3,5 g	
	HV	Cylindrique radiale	10 à 100 (± 30 %)	2,7		(8 à 80 mA)	500 à 100 mΩ	10 x 35 à 22 x 50 - 4,5 à 24 g	T° d'utilisation: - 25 à + 60°C.
	FAOH	Cylindrique radiale	47 à 1 600 mF	5,5		(71 μA à 1,5 mA)	20 à 2,5 Ω	16 x 15,5 à 44,5 x 18,5 - 6,2 à 65 g	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C.
	FA1A	Cylindrique radiale	22 à 750 mF	11		(66 μA à 1,41 mA)	20 à 4 Ω	16 x 25 à 44,5 x 18,5 - 7,5 à 83 g	
	FSH	Cylindrique radiale	43 à 55mF	3,5 (4)		(39 μA)	50 Ω	11 x 5,2 - 1 g	
	FSH	Cylindrique radiale	22 à 33 mF	6,5 (7,5)		(40 μA)	60 Ω	11,5 x 8,5 - 1,7 g	
	FSOH	Cylindrique radiale	22 à 1 300 mF	5,5 (6,3)		(33 μA à 1,5 mA)	60 à 7 Ω	11,5 x 8,5 à 28,5 x 14 - 1,6 à 18 g	
	FS1A	Cylindrique radiale	470 à 1 300 mF	11 (12,6)		(1,41 à 3 mA)	7 Ω	28,5 x 25,5 ou 28,5 x 31,5 - 32 ou 35 g	
	FS1B	Cylindrique radiale	1 à 6,5	12 (13,6)		(3,6 à 18 mA)	7,5 à 4 Ω	28,5 x 38 ou 44,8 x 60 - 40 ou 160 g	
	FE	Cylindrique radiale	47 à 2 100 mF	5,5 (6,3)		(71 μA à 2,3 mA)	14 à 0,6 Ω	14,5 x 14 à 44,5 x 18,5 - 3,9 à 72 g	T° d'utilisation: - 40 + 70°C.
	FT	Cylindrique radiale	0,1 à 7,2	5,5 (6,3)		(0,15 à 8,4 mA)	16 à 0,6 Ω	11,5 x 8,5 à 44,5 x 17 - 1,6 à 72 g	Température d'utilisation : - 40 + 85°C.
	FR	Cylindrique radiale	22 à 1600 mF	5,5 (6,3)		(33 μA à 1,5 mA) autodécharge: 4,2 V (24 h)	220 à 60 Ω	11,5 x 14 à 21,5 x 22 - 2,3 à 13,3 g	
	FYD	Cylindrique radiale	22mF à 3300 mF	5,5 (6,3)		(33 μA à 3,3 mA)	220 à 35 Ω	11,5 x 8,5 à 28,5 x 22 - 1,6 à 22,9 g	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C.
	FYD	Cylindrique radiale	56 à 70mF	3,5 (4)		(50 μA)	150 Ω	11 x 5,2 - 1 g	
	FYD	Cylindrique radiale	27 à 40 mF	6,5 (7,4)		(49 μA)	200 Ω	11,5 x 8,5 - 1,6 g	
FYH	Cylindrique radiale	22mF à 1000mF	5,5 (6,3)		(33 μA à 1,5 mA)	200 à 20 Ω	11,5 x 7 à 28,5 x 11 - 1,5 à 13,9 g		
FYL	Cylindrique radiale	10 - 22 et 47 mF	5,5 (6,3)		(15 à 71 μA)	300 ou 200 Ω	11 x 5 ou 12 x 5 - 0,9 à 1,2 g		

Les supercondensateurs de 10 mF à 5000F

Fabricant (fournisseur)	Famille	Type	Capacité (F) (tolérance)	Tension de service (V) (tension de crête max.)	Puissance spécifique (kW/kg - kW/l)	Courant max. (courant de fuite)	Résistance interne (mΩ) ESR - ESR _{eq}	Dimensions diamètre x hauteur - Poids	Observations
Nec Tokin	série FG	Cylindrique radiale	10 mF à 4,7	5,5 (6,3)		(15 µA à 7,1 mA) 4,2 V	300 à 35 Ω	11 x 5,5 à 28,5 x 22 - 0,9 à 27,3 g	Température d'utilisation : - 25 à + 70°C.
	série FGH	Cylindrique radiale	100 - 220 - 470 et 1000 mF	5,5 (6,3)		(150 µA à 1,5 mA) 4,2 V	100 - 100 - 65 - 35 Ω	11 x 5,5 à 21,5 x 9,5 - 1 à 7,2 g	
NessCap (Axess Technology)	ESLSR	Cylindrique radiale	3 - 5 - 10 - 25 - 60 - 120 (- 10 à + 20 %)	2,3 (2,7)	2,35 à 4,24/ 3,09 à 6,61	0,615 à 17,2 A décharge de 5 s à Vr/2, 2,2 A à 34,9 A min. courant max décharge de 1 s à Vr/2, (500 µA à 1,7 mA)	150 - 200 à 17 - 25	8 x 20 - 10 x 20 - 10 x 30 - 16 x 25 - 18 x 40 - 22 x 45 - 1,7 - 2,5 - 4 - 7,8 - 14 - 22,5 g	T° d'utilisation : - 25 à + 60°C; (DC = 30 % ; DESR = 400 %) T° stockage : - 40 à 85°C endurance 500 000 cycles (30 % C et ESR x 2).
	ESLLR	Cylindrique radiale	3 et 7 (- 10 à + 20 %)	2,3 (2,7)	7,78 - 13,2 (3F) 6,61 - 11,02 (7F)	0,651 - 2,7 1,5 - 5,2 (500 et 850 µA)	75 - 100 60 - 80	8 x 20 et 8 x 30 1,7 et 2,5 g	T° d'utilisation : - 40 à + 60°C : 20 % C ; initiale et 2 x ESR à 25°C ; T° stockage : - 40 à + 70°C ; endurance 500 000 cycles (30 % C et ESR x 2).
	ESLLP	Prismatique à vis	1 200 - 2 500 - 3 500 (- 10 à + 20 %)	2,3 (2,7)	3,31 à 4,64/ 3,71 à 6,37	234 à 596/ 727 à 1464 (12-16-24 mA)	0,4 à 0,6 - 0,5 à 0,75	165 x 60 x (28 - 52 - 72) 380 - 650 - 800 g	Température d'utilisation : - 40 à 60°C ; température de stockage : - 40 à + 70°C ; endurance 500 000 cycles (- 30 % C et ESR x 2).
	ESHSR	Cylindrique radiale	3 - 5 - 10 - 25 - 50 - 100 (- 10 à + 20 %)	2,7 (2,85)	6,3 à 12,15/ 8,2 à 18,23	0,764 à 21,4/ 3,1 à 58,7 (1 à 1,7 mA)	75 - 100 à 10 - 13 mΩ	8 x 20 - 10 x 20 - 10 x 30 - 16 x 25 - 18 x 40 - 22 x 45 1,5 - 2,5 - 2,5 - 7,8 - 14 - 22,5 g	
	ESHSP	Prismatique à vis	600 - 1 700 - 3 500 - 5 000 (- 10 à + 20 %)	2,7 (2,85)	5,12 à 9,11/ 6,39 à 12,07	145 à 964 500 à 2 250 (5 à 22 mA)	0,8 - 1 à 0,35 - 0,4	90 x 60 x 28 à 165 x 60 x 72 - 200 à 890 g	
	ESHLR	Cylindrique « snap-in »	90 (- 10 à + 20 %)	2,7 (2,85)	10,13/13,32	21,2/70,7 (1,6 mA)	6 - 8	22 x 45 - 22,5 g	
	ESHLP	Prismatique	300 ou 600 (- 10 à + 20 %)	2,7 (2,85)	8,5/10,12 8,68/10,97	78/339 151,2/597,4 (3 et 3,5 mA)	0,6 - 0,65 0,55 - 0,6	165 x 60 x 28 - 330 ou 350 g (autres modules de 15 à 90 V dans cette série)	
	EMLLR	Module double cellule terminaisons filaires	1,5 et 3,5 (- 10 à + 20 %)	4,6 (5,4)	7,56/7,35 7,68/9,04	0,652/2,7 1,5/5,5 (1,2 et 1,4 mA)	150 - 200 100 - 130	25 x 17 x 8,5 - 3,5 g 31 x 17 x 8,5 - 5,3 g	- 40 à + 60°C : 30 % (sauf EMHRS à 20 %) C initiale et 2 x ESR à 25°C ; stockage : - 40 à + 70°C ; endurance 500 000 cycles (- 30 % C et ESR x 2).
	EMHRS	Module double cellule terminaisons radiales	1,5 ou 2,5 (- 10 à + 20 %)	5,4 (5,7)	10,41/11,39 11,2/10,39	0,765/3,1 A 1,3/5,1 A (1,6 ou 1,7 mA)	150 - 200 100 - 130	22 x 17 x 8,5 - 3,5 g 25 x 20,5 x 10,5 - 5 g	
	PSHLR	Cylindrique radiale	20 - 30 - 50 - 120 (- 10 à + 20 %)	2,3 (2,5)	2,6 à 6,6/4,3 à 11	0,016 à 0,1 A : déch. de 30 min entre 2,3 et 0,9 V 0,5 à 3 A : déch. de 40 s de Vr à Vr/2 (300 à 650 µA)	40 - 55 à 20 - 30	10 x 30 - 10 x 40 - 16 x 25 - 18 x 40 4 - 5 - 8 - 17 g	- 25 à + 60°C : 30 % C initiale et 5 x ESR à 25°C ; stockage : - 30 à + 70°C ; endurance 100 000 cycles (- 30 % C et ESR x 3).
Nichicon	UC	Radial	1 - 2,2 - 3,3 - 4,7 - 10 - 22 - 33 - 47 (± 20 % 120 Hz 20°C)	2,5		(0,5 C mA avec C = capacité en farad)	2 - 1 - 1 - 0,5 - 0,5 - 0,1 - 0,1 - 0,1 Ω	8 x 11,5 à 18,40	T° util : - 25 à + 70°C (- 30 % C) ; endurance 1 000 h à 70°C (- 30 % C et 300 % ESR).
	JC	Terminaisons à vis	470 - 1 000 - 1 500 - 2 200 (± 20 % 120 Hz 20°C)	2,5			12 - 10 - 8 - 5 mΩ	35 x 120 à 76,2 x 120	T° util : - 25 à + 60°C (- 30 % C) ; endurance 1 000 h à 60°C (- 30 % C) ; stockage 1000 h à 60°C (- 15 % C).
	JC	snap-in	15 à 150 (13 réf.) (± 20 % 120 Hz 20°C)	2,5			120 à 40 mΩ	22 x 20 à 35 x 50	
Panasonic	EECSOHD	Série SD double cellule bouton montage vertical ou horizontal	22 - 47 - 100 - 220 - 33 mF	5,5			150 à 75 Ω	10,5 x 5 à d 10,5 x 6,5	T° d'utilisation : - 25 à + 70°C ; endurance : 1 000 h à 70°C (- 30 % C ; ESR x 4).

Les supercondensateurs de 10 mF à 5 000 F

Fabricant (fournisseur)	Famille	Type	Capacité (F) (tolérance)	Tension de service (V) (tension de crête max.)	Puissance spécifique kW/kg - kW/l	Courant max. (courant de fuite) (10 μ A)	Résistance interne (m Ω) ESR - ESR _{DC}	Dimensions diamètre x hauteur ou L x l x H (mm) - Poids	Observations
Panasonic	EECEN0F	Série EN cellule bouton pour refusion 240°C	200 mF	3,3			200 Ω	6,8 x 1,8 - poids 0,2 g	T° d'utilisation : - 10 à + 60°C; endurance 500 h (- 30% C; ESR x 20).
	EECS5R5	Série SG double cellule bouton montage vertical ou horizontal»	470 - 1 000 - 1 500 mF	5,5			30 Ω	19 x 5	T° d'utilisation : - 25 à + 70°C; endurance 1000 h à 70°C (- 30 % C; ESR x 4).
	EECSE0H	Série SE double cellule, en ruban	22 - 47 - 100 - 220 mF	5,5			150 à 75 Ω	13 x 5,4	
	EECF5R5U	Série NF double cellule radiale	100 - 220 - 47 - 1 000 - 1 500 mF	5,5			75 à 30 Ω	13,5 x 7,5 ou 21,5 x 8	
	EECF5R5H	Série F double cellule radiale	47 - 100 - 470 - 680 - 1 000 mF	5,5			120 à 50 Ω	13,5 x 9,5 ou d 21,5 x 9,5	T° d'utilisation : - 25 à + 85°C; endurance 1 000 h à 70°C (- 30% C; ESR x 4).
	EECE0EL	Série EL cellule bouton	0,47 et 2	2,5			40 et 15 Ω	9,5 x 2,2 et 18,5 x 2,2	T° d'utilisation : - 25 à + 70°C; endurance 1 000 h à 70°C (- 30 % C; ESR x 4).
	EECHW0D	Série HW cylindrique radiale	1 - 3,3 - 4,7 - 10 - 22 - 30 - 50 (- 20 à + 40 %)	2,3			1 à 0,1 Ω	8 x 22 - 12,5 x 23 - 12,5 x 35 - 18 x 35 - 18 x 40	T° d'utilisation : - 25 à + 70°C; (+ 60 pour 30 et 50 F); endurance 1 000 h à Tmax (- 30 % C; ESR x 4).