

Guide technique sur le remplacement des batteries par des supercondensateurs

Par Mark Patrick



Pratiquement chaque jour est marqué par le lancement d'un nouvel appareil wearable (à porter sur soi), tel que des écouteurs audio, ou de nouveaux gadgets, tels que des assistants IA. Mais tous ces appareils posent un problème important : la mise au rebut de leurs batteries.

Selon Eurostat, l'organisme de l'Union européenne chargé des statistiques, environ 242 000 tonnes de piles ont été vendues dans l'UE en 2021, et environ 108 000 tonnes ont été collectées en vue d'être recyclées. Les pays de l'UE sont tenus d'atteindre un objectif d'efficacité de recyclage des batteries compris entre 50 et 75 % en fonction de la composition chimique¹. Mais le mieux serait de ne pas avoir besoin de les déployer ni de les recycler.

Les supercondensateurs, ou supercaps, pourraient constituer une source d'énergie rechargeable alternative pour certaines applications. Le coût relativement élevé de la densité d'énergie proposée, par rapport aux technologies lithium-ion et lithium-polymère, pourrait toutefois être un obstacle. Par ailleurs, comme leur nom l'indique, ce ne sont pas des condensateurs ordinaires, et de nombreux ingénieurs n'ont pas encore eu l'occasion de les intégrer à leurs conceptions.

Alors que faut-il savoir sur les supercondensateurs avant de les utiliser ? Quand faut-il les utiliser comme source d'énergie principale, et quand les utiliser comme source d'énergie secondaire ? Et pour commencer, pouvons-nous modifier nos produits afin qu'ils consomment moins d'énergie ?

Qu'est-ce qu'un supercondensateur ?

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie électrostatique. Ils fonctionnent suivant le même principe que les condensateurs. On les charge en quelques secondes ou quelques minutes, puis on libère cette énergie dans un circuit lorsqu'on en a besoin. Mais il existe également de nombreuses différences. Tout d'abord, les supercondensateurs ont des capacités nettement supérieures à celles d'un condensateur électrolytique classique, et l'ESR (résistance série équivalente) est également beaucoup plus faible. Ils fonctionnent sur une plage de température similaire.

Mais leur structure est différente de celle des condensateurs classiques. Ils utilisent une conception à double couche, inventée par H. I. Becker de General Electric, et brevetée en 1953. Au fil des années, les matériaux des électrodes ont été optimisés afin de réduire les coûts de fabrication, d'augmenter la puissance et l'énergie spécifiques et d'améliorer la stabilité. En raison de leur structure différente, les supercondensateurs sont également nommés condensateurs électriques à double couche (EDLC).

Malgré ces qualités intéressantes, les supercondensateurs ne répondent pas aux attentes en matière de performances des batteries. Par rapport à la technologie lithium-ion, la densité énergétique volumétrique (Wh/kg) est beaucoup plus faible : les meilleurs supercondensateurs sont plus proches de la densité d'énergie d'une batterie plomb-acide d'entrée de gamme (**Figure 1**).

Alors que la tension d'une batterie reste relativement stable pendant la décharge, la tension d'un supercondensateur chute de sa valeur nominale (2,5 à 2,7 V) jusqu'à zéro. Un convertisseur

CC/CC ou un circuit intégré de gestion de l'alimentation (PMIC) est donc nécessaire pour fournir la tension de sortie stable nécessaire à votre circuit. Sachez par ailleurs que l'application d'une tension plus élevée les endommage. Les circuits de charge et de protection doivent donc respecter leur valeur V_{max} nominale. Enfin, l'autodécharge sur un mois est d'environ 30 % voire plus, au lieu d'une valeur typique de 10 % pour les batteries rechargeables.

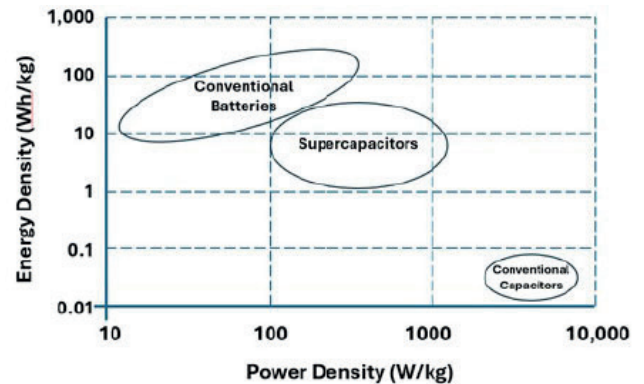


Figure 1 : Les supercondensateurs offrent une puissance et une densité énergétique nettement supérieures à celles des condensateurs classiques. (Source : Vishay)

Les supercondensateurs présentent néanmoins de grands avantages. En raison de leur faible ESR, ils peuvent fournir beaucoup d'énergie, très rapidement. C'est comme si vous compariez le fait de verser un litre d'eau avec une bouteille de vin (batterie) ou avec un seau (supercondensateur). C'est pourquoi ils sont souvent utilisés en complément des batteries dans des applications telles que les véhicules électriques, pour récupérer l'énergie issue du freinage régénératif et la restituer au démarrage. Il est par ailleurs possible de les charger en quelques secondes seulement, et sur des milliers, voire des millions de cycles (**Tableau 1**). On les utilise donc dans certaines applications de véhicules autonomes : un pack constitué de nombreux supercondensateurs peut être rechargé en quelques minutes au lieu de plusieurs heures.

Caractéristique	Unité	Supercondensateur	Batterie lithium-ion
Tension	V	~2,7 V	3,0 à 4,2 V
Temp. de fonctionnement à froid	°C	-40	-20 (0 pour la charge)
Temp. de fonctionnement à chaud	°C	+65 (+85 fonctionnement réduit)	+60 (+45 pour la charge)
ESR	mΩ	~5 mΩ à 75 mΩ	~150 mΩ à 500 mΩ
Cycles de charge		> 500 000	300 à 4 000
Durée de charge		secondes/minutes	Heures
Densité d'énergie	Wh/kg	1 à 10	200 à 300
Densité de puissance	W/kg	1 000 à 10 000	100 à 1 000
Autodécharge		Semaines	> Mois

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques typiques des supercondensateurs et des cellules lithium-ion

Par exemple, la technologie d'éléments au lithium-chlorure de thionyle (Li-SOCl₂) offre des temps de décharge de plusieurs années: parfait pour des applications de l'IoT telles que les compteurs d'eau, les verrous et les minuteurs. Grâce à ses faibles niveaux de décharge, ce principe chimique des batteries produit une couche de passivation. Lorsqu'un circuit se réveille et consomme plus d'énergie, la résistance interne augmente et peut provoquer une baisse de tension lorsque la tension de sortie chute. Les piles bouton, telles que la CR2023, présentent également une décharge stable plutôt que pics de décharge typiques des applications de l'IoT, qui se réveillent pour transmettre et recevoir des données (Figure 2). Dans de telles situations, les supercondensateurs peuvent être associés à une batterie pour assurer l'alimentation lorsque la cellule principale ne peut pas fournir des pics d'énergie.

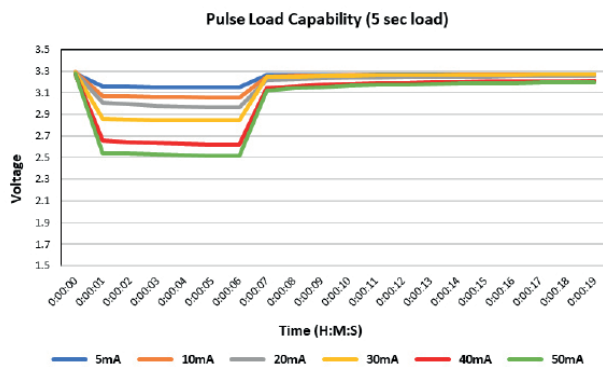


Figure 2 : Les fiches techniques des piles bouton peuvent inclure une capacité de charge d'impulsion (Duracell CR2032-36), mais ce profil d'utilisation réduit leurs heures de service spécifiées par rapport au fonctionnement à décharge continue. (Source : Duracell)

Quelles modifications faut-il apporter à la conception pour pouvoir utiliser un supercondensateur ?

Selon la note technique SN009 de Würth³, quatre étapes simples sont nécessaires pour concevoir des supercondensateurs pour une application. Il faut pour cela :

1. Identifier le mode de fonctionnement du processus de décharge : résistance, puissance ou intensité constant(e).
2. Calculer la capacité nécessaire à l'application.
3. Identifier un processus de charge approprié : tension ou courant constant.
4. Calculer la durée de charge et, si nécessaire, une résistance de protection.

Le calcul de la capacité nécessaire est complexe, car la tension de sortie varie pendant la décharge. Cela signifie que les calculs doivent également tenir compte de l'efficacité d'un convertisseur Boost ou Buck-Boost. Les convertisseurs CC/CC peuvent offrir des rendements optimaux supérieurs à 90 %. Ils peuvent toutefois également être inférieurs à 70 % lorsque la relation entre la tension d'entrée et de sortie est défavorable.

Un autre point à retenir est que les convertisseurs CC/CC ne fonctionnent que jusqu'à une tension d'entrée minimale spécifiée, par exemple de 1,0 V. Ainsi, le convertisseur ne fonctionne qu'entre la V_{max} du condensateur (~2,7 V) et la V_{in} (min) donnée.

À titre d'exemple, si une application a besoin de 0,5 W pendant 10 minutes de fonctionnement (600 secondes), elle a besoin de $E = P \cdot t = 0,5 \text{ W} \cdot 600 \text{ s} = 300 \text{ J}$. Si le convertisseur de puissance utilisé fonctionne entre 2,7 V et 1,0 V, on calcule la capacité minimale requise de la manière suivante :

$$C = 2 \cdot \frac{E}{V_1^2 - V_2^2} = 2 \cdot \frac{300}{(2.7 \text{ V})^2 - (1.0 \text{ V})^2} \approx 48 \text{ F}$$

Comme d'autres types de condensateurs, les supercondensateurs ont une tolérance assez importante. La tolérance indiquée pour les supercondensateurs à double couche WCAP-STSC de Würth Elektronik⁴ est de +30 %/-10 %. Compte tenu de la tolérance et des pertes du convertisseur CC/CC, vous choisirez probablement une capacité supérieure à 50 F.

Les supercondensateurs ne semblent pas suivre l'approche de valeur standard de la série E. C'est également le cas de la série WCAP-STSC de Würth, qui commence à 3 F, avec huit autres valeurs pour terminer à 350 F. Cela peut avoir un impact positif ou négatif sur votre conception, selon l'adéquation entre vos besoins de capacité et les valeurs disponibles.

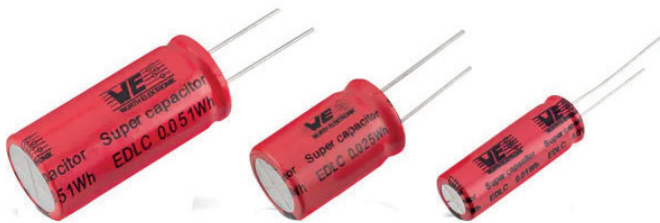


Figure 3 : Les supercondensateurs à double couche WCAP-STSC de Würth sont disponibles avec des capacités pouvant atteindre 350 F. (Source : Würth Elektronik)

Les dispositifs WCAP-STSC sont proposés en versions traversante (THT, ≤ 100 F) ou enfichable (> 100 F), avec des tensions nominales de 2,7 V à 65 °C et de 2,3 V à 85 °C. L'ESR varie de 3,5 m Ω pour les appareils qui ont la plus forte capacité à 70 m Ω pour ceux qui ont la plus faible. Notez que la fiche technique précise qu'après 500 000 cycles, l'ESR du condensateur peut potentiellement augmenter au maximum de deux, et que la variation de capacité peut atteindre 30 %. Il peut être utile de tenir compte de ces facteurs dans les calculs de prévision énergétique.

Si vous choisissez une approche de la charge avec tension constante, une résistance de protection série (R_p) sera nécessaire pour limiter le courant consommé. On détermine une valeur appropriée en fonction de la limite de courant supérieure, de la tension et du RESR du supercondensateur de la manière suivante :

$$R_p = \frac{V}{I} - R_{ESR}$$

Il peut être difficile d'utiliser des supercondensateurs en raison de leur faible tension nominale. Certains fournisseurs ont toutefois trouvé des moyens d'améliorer tout cela. La série 230 EDLC-HV ENYCAP⁵ de Vishay / BC Components est proposée avec une tension nominale de 3,0 V (65 °C, 2,6 V à 85 °C) et des capacités de 5 à 60 F. Ces supercondensateurs traversants (radiaux) sont également conformes AEC-Q200.

Pour des tensions plus élevées, la série Hybrid Storage 196 HVC ENYCAP⁶ propose des valeurs comprises entre 1,4 et 8,4 V, avec différents types de montage (**Figure 4**). La capacité supérieure est obtenue en associant plusieurs éléments dans un même boîtier. Les capacités disponibles vont de 4 à 90 F.



Figure 4 : Les supercondensateurs ENYCAP de Vishay offrent une tension nominale plus élevée, comme la série 230 EDLC-HV 3,0 V (à gauche) et la série 196 HVC jusqu'à 8,4 V (à droite). (Source : Vishay)

Bien entendu, vous pouvez également construire votre propre système de stockage à supercondensateurs multicellulaires pour accroître la tension nominale. Une certaine forme d'équilibrage des éléments sera toutefois nécessaire en raison des limitations de V_{max} , comme avec les blocs de batteries Li-Ion. Cet équilibrage peut être passif au moyen de résistances, de diodes ou de MOSFET, ou actif avec des amplificateurs opérationnels ou des convertisseurs CC/CC. L'approche choisie dépendra du budget disponible pour les circuits, de l'efficacité énergétique souhaitée, de l'impact sur la capacité globale et de la vitesse d'équilibrage de la charge. Pour plus d'informations sur ces approches, consultez la note d'application ANP090⁷ de Würth.

Convertisseurs de puissance dédiés aux supercondensateurs

Comme on pouvait s'y attendre, les fabricants de semi-conducteurs ont développé des convertisseurs de puissance dédiés afin de simplifier une partie importante du travail avec les supercondensateurs. Citons par exemple la puce Analog Devices LTC3355 Buck CC/CC avec chargeur SCAP intégré⁸. Elle est spécifiquement conçue pour utiliser le supercondensateur comme source d'alimentation de secours, pour laisser le temps de réaliser les tâches « vitales » lorsque l'alimentation principale tombe en panne.

La LTC3355 peut fournir de 2,7 à 5 V au circuit cible à partir d'une entrée de 3 à 20 V. Au démarrage, le convertisseur abaisseur CC/CC interne commence également à charger le supercondensateur. Le courant de charge est limité à 1 A, et un circuit de démarrage progressif limite le courant d'appel. Une protection contre les surtensions est également mise en œuvre. Le seuil de l'indicateur de panne d'alimentation (PFI) est programmable. Dès que la tension d'entrée passe en dessous du PFI, la tension de sortie du convertisseur CC/CC est fournie à l'aide d'un convertisseur d'amplification alimenté par le supercondensateur.

Les broches de sortie transmettent des signaux d'état à un microcontrôleur hôte, tel que CPGOOD, une fois que le

supercondensateur est chargé à 92,5 %, et RSTB lorsque la tension de sortie a atteint 92,5 % de la valeur définie. La charge du supercondensateur peut être contrôlée à l'aide de la broche EN_CHG, tandis que des rendements de conversion plus élevés à de faibles courants de charge sont pris en charge en activant le mode rafale sur la broche MODE (Figure 5). Il est possible d'évaluer le LTC3355 avec la carte de démonstration DC2040A⁹, ou de le simuler dans LTspice¹⁰.

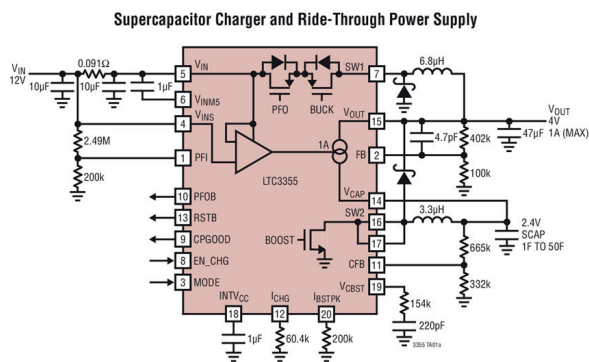


Figure 5 : Les convertisseurs CC/CC hautement intégrés, tels que le LTC3355, peuvent alimenter une charge et gérer un supercondensateur comme source d'alimentation de secours. (Source : Analog Devices)

Supercondensateurs et récupération d'énergie

Les progrès dans le domaine des microcontrôleurs ultra-basse consommation (MCU) se poursuivent, ce qui permet envisager certaines applications avec des supercondensateurs maintenus chargés par des panneaux solaires. Des fournisseurs tels qu'e-peas proposent des gestionnaires d'énergie ambiante hautement intégrés et flexibles, comme l'AEM00940, qui figure sur leur carte d'évaluation EVK00940¹¹, pour permettre ces approches de récupération d'énergie. Grâce à son circuit de démarrage à froid unique, il peut démarrer avec un élément de stockage vide, une tension d'entrée de 380 mV seulement et une puissance d'entrée de 3 µW. La solution complète est également très compacte sur votre circuit imprimé, car elle ne nécessite que neuf composants externes (Figure 6).

Côté sortie, l'AEM00940 propose deux alimentations de sortie, LVOUT et HVOUT. La sortie LVOUT est conçue pour alimenter un microcontrôleur à 1,2 V ou 1,8 V. La sortie HVOUT offre plus de souplesse : elle est configurable de 1,8 V à 4,1 V pour alimenter un émetteur-récepteur radio. Les deux sorties peuvent être activées et désactivées indépendamment l'une de l'autre.

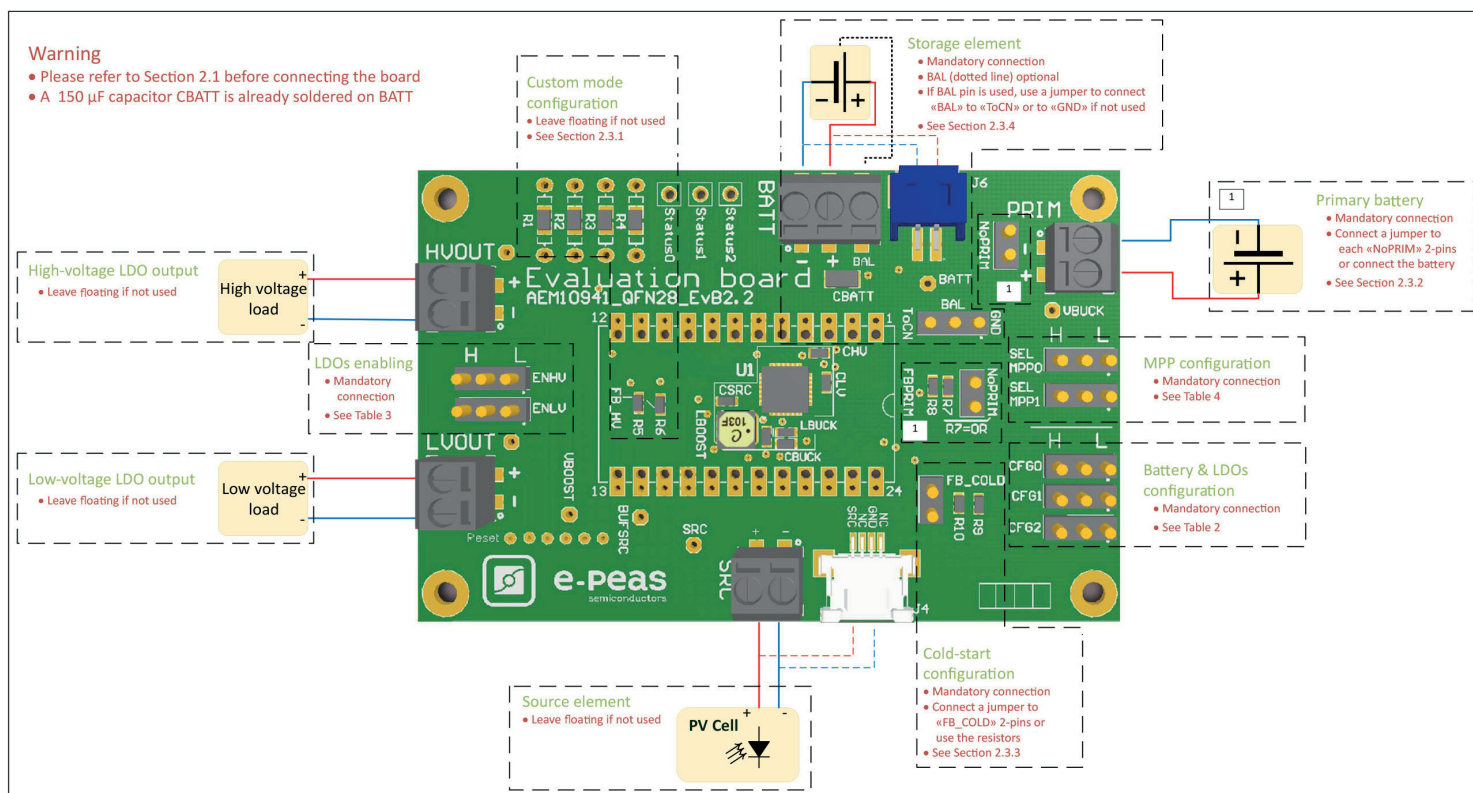


Figure 6 : Si votre application nécessite une très faible puissance, votre source d'énergie pourrait être un PMIC de récupération d'énergie avec un supercondensateur. (Source : e-peas)

Pour le stockage, ce dispositif prend en charge un supercondensateur à cellule simple ou double. Sur un supercondensateur à cellule double, une borne assure l'équilibrage, qui est également géré par l'AEM00940, afin de compenser tout déséquilibre susceptible de surcharger l'une des cellules. Il est également possible d'utiliser des batteries Li-Ion, LiFePO4 et à semi-conducteurs pour stocker l'énergie récupérée.

La carte de développement accepte toute une gamme de sources de récupération d'énergie, telles que les cellules photovoltaïques (PV) à tension constante, les sources pulsées, les sources intermittentes, etc. Des sources de courant alternatif basse et haute fréquence peuvent être appliquées. Elles sont redressées sur la carte. Il est également possible de connecter une source de batterie principale si nécessaire.

Achat des MCU à la plus faible puissance

Si la source d'alimentation est une question importante, il convient également de choisir un microcontrôleur qui consomme le moins d'énergie possible. Mais il est facile de se tromper lorsque l'on compare des MCU à très faible consommation. Certaines applications exigent une consommation d'énergie minimale pendant leur fonctionnement, tandis que d'autres passent la majorité de leur temps en veille profonde.

La question qui se pose alors est la suivante : quelle part de l'état du MCU est stockée pendant la veille. Certains MCU sortent de veille avec quelques périphériques encore configurés seulement, tandis que d'autres peuvent conserver une partie raisonnable du contenu de leur SRAM. La part du MCU encore prête à être utilisée après la sortie de veille a un impact sur la quantité de code à exécuter et, plus important encore, sur la quantité d'énergie qui sera consommée.

Il est difficile de comparer deux composants entre eux, mais on peut utiliser le code d'analyse comparative ULPMark¹² de l'EEMBC. Trois variantes de code permettent de fournir une comparaison exacte de la consommation d'énergie des MCU. L'analyse comparative CoreProfile permet de déterminer le coût réel de la veille profonde en exécutant les tâches quotidiennes du MCU en mode actif avant de passer en veille. L'analyse PeripheralProfile se concentre sur l'impact des périphériques courants, tels que la modulation de largeur d'impulsion (MLI), les convertisseurs analogique-numérique (CAN), l'interface périphérique série (SPI) et l'horloge en temps réel (RTC). Enfin, l'analyse CoreMark porte sur la puissance active uniquement pendant l'exécution d'une tâche utile.

Les microcontrôleurs à ultra-basse consommation STM32U0¹³ de STMicroelectronics obtiennent un résultat CoreProfile respectable de plus de 400, et un résultat PeripheralProfile d'environ 150 pour un fonctionnement en 1,8 V¹⁴. D'après l'Arm Cortex-M0+, ils sont conçus pour fonctionner sur batterie avec des périphériques généralement utilisés dans les applications wearables, médicales, industrielles et de compteur intelligent. Par rapport à la génération de MCU précédente, la consommation d'énergie en mode de fonctionnement ($\mu\text{A}/\text{MHz}$) a diminué de 36 %, et la consommation en mode basse puissance statique (nA) a chuté de 1 687 %. Le STM32U031 d'entrée de gamme peut être testé à l'aide de la carte de développement NUCLEO-U031R8 au format Arduino¹⁵, qui inclut un débogueur ST-LINK (Figure 7).

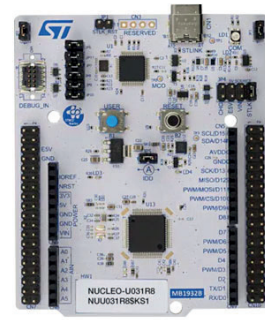


Figure 7 : Le MCU STM32U031 de STMicroelectronics est facile à évaluer pour les applications basse consommation grâce à cette carte de développement Nucleo compatible Arduino. (Source : STMicroelectronics)

Garder un œil sur la consommation d'énergie

Il est pratiquement impossible de mesurer la consommation d'énergie de ces applications à très faible consommation avec des outils traditionnels comme un multimètre numérique (DMM) en raison de la large plage dynamique des mesures. De plus, il est intéressant de déterminer la consommation d'énergie avec différents modes de fonctionnement et configurations afin de s'assurer que les modifications apportées améliorent la conception.

Les outils d'optimisation énergétique, tels que le Qoitech Otii Arc Pro¹⁶ et l'Otii Ace Pro¹⁷, sont des unités source-mesure (SMU) : ils permettent de fournir de l'énergie au circuit testé tout en mesurant sa consommation d'énergie. L'Otii Arc Pro est conçu pour les circuits nécessitant une alimentation jusqu'à 5 V. Il offre une résolution de mesure de courant de 5 nA et une plage dynamique allant du nA à 5 A. L'Otii Ace Pro offre la même plage de mesure de neuf ordres de grandeur, mais peut fournir une alimentation jusqu'à 25 V. Une autre différence tient à son mode en ligne, qui permet à l'Ace Pro de mesurer l'intensité et la tension sans fournir d'alimentation (Figure 8).



Figure 8 : L'Otii Ace Pro est idéal pour évaluer avec précision les besoins d'alimentation de votre application de microcontrôleurs ultra-basse consommation. (Source : Qoitech)

Le logiciel Otii 3 Desktop Application permet de connecter l'un ou plusieurs des outils de mesure à un PC afin d'assurer l'analyse de l'alimentation de configurations et d'applications complexes. Il est par exemple possible d'utiliser deux Ace Pros pour analyser une source de récupération d'énergie et un supercondensateur connecté à un PMIC, tandis qu'un troisième Ace Pro fonctionne comme charge variable¹⁸ (Figure 9). Qoitech propose également une interface de programmation Python pour réaliser des configurations de test automatique.

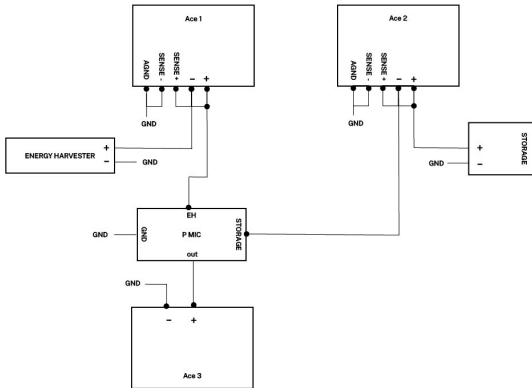


Figure 9 : Il est possible de tester les solutions de récupération d'énergie avec une charge simulée en associant plusieurs unités de mesure de puissance Otii Ace. (Source : Qoitech)

Les supercondensateurs comme sources d'alimentation primaires ou secondaires

Il est inquiétant d'apprendre combien de piles à usage unique et rechargeables sont jetées chaque jour. Heureusement, de nombreux pays ont mis en place des systèmes de recyclage. Mais les autres risquent une pollution grave de leurs terres, de leurs cours d'eau et de leur air si les piles sont jetées dans des décharges ou incinérées.

Il devient de plus en plus envisageable de remplacer ces piles par des supercondensateurs grâce aux microcontrôleurs ultra-basse consommation et aux convertisseurs de puissance efficaces. La récupération d'énergie est une approche bien adaptée aux applications d'IoT sans fil. Les supercondensateurs peuvent aussi être utilisés dans une combinaison hybride avec des cellules primaires, ce qui permet de dépasser leurs limitations lorsqu'ils sont utilisés avec des circuits à faible consommation de courant ou avec un profil de puissance de type rafale. L'expérimentation et les tests en laboratoire sont également facilités par des outils tels que l'Otii Ace Pro.

Bien que leur utilisation soit similaire à celle des condensateurs, avec la possibilité de les charger en quelques secondes ou minutes seulement et des cycles de recharge pratiquement illimités, il existe quelques différences significatives, comme leur Vmax limitée. Mais comme on pouvait s'y attendre, l'industrie des semi-conducteurs a développé une gamme de technologies de convertisseurs CC/CC innovantes pour gérer cette complexité avec une conception d'alimentation simple et compacte.

- 1 : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators&stable=02
- 2 : <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Duracell/CR2032-36?qs=1Kr7Jg1SGW8pu%252B8ZxE4A%2FA%3D%3D>
- 3 : https://eu.mouser.com/pdfDocs/SN009a_EN.pdf
- 4 : <https://eu.mouser.com/new/wurth-elektronik/wurth-wcap-stsc/>
- 5 : <https://eu.mouser.com/new/vishay/vishay-230-edlc-hv-enycap-capacitors/>
- 6 : <https://eu.mouser.com/new/vishay/vishay-196-hvc-enycap-caps/>
- 7 : https://eu.mouser.com/pdfDocs/ANP090a_EN_KeeptheBalance_BlancingofSupercapacitors.pdf
- 8 : <https://eu.mouser.com/new/analog-devices/adi-ltc3355-scap-chargers/>
- 9 : <https://eu.mouser.com/new/analog-devices/adi-dc2040a-demo-circuit/>
- 10 : <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- 11 : <https://eu.mouser.com/new/e-peas/e-peas-evk00940-eval-board/>
- 12 : <https://www.eembc.org/ulpmark/>
- 13 : <https://eu.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-stm32u0-low-power-mcus/>
- 14 : <https://www.eembc.org/ulpmark/ulp-cp/scores.php>
- 15 : <https://eu.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-nucleo-u031r8-board/>
- 16 : <https://eu.mouser.com/new/qoitech/qoitech-otii-arc-pro/>
- 17 : <https://eu.mouser.com/new/qoitech/qoitech-otii-ace-pro/>
- 18 : <https://www.qoitech.com/usecases/evaluatephotovoltaics-for-embedded-devices/>