



**HAL**  
open science

## Architecture de stockage adaptative

Firdaous El Mahboubi, Vincent Boitier, Marise Bafleur

► **To cite this version:**

Firdaous El Mahboubi, Vincent Boitier, Marise Bafleur. Architecture de stockage adaptative. Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-nanoélectronique (JNRDM), May 2016, Toulouse, France. 5p. hal-01746142

**HAL Id: hal-01746142**

**<https://hal.science/hal-01746142v1>**

Submitted on 29 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Architecture de stockage adaptative

Firdaous EL MAHBOUBI, Vincent BOITIER, Marise BAFLEUR  
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France  
7 avenue du COLNEL Roche, Toulouse, France

E-mail : felmahbo@laas.fr

### Résumé

*L'autonomie énergétique est un verrou majeur au déploiement massif de réseau de capteurs sans fil dans de nombreuses applications. La récupération d'énergie et le stockage constituent une voie pour améliorer cette autonomie. Dans certaines applications en environnement sévère (températures extrêmes) ou nécessitant des durées de vie élevées, l'utilisation de batteries pour le stockage est prohibée. On a recours dans ce cas à du stockage sur supercondensateurs. Ce type de stockage présente des inconvénients et impose des compromis pour satisfaire au mieux les trois objectifs suivants: obtenir rapidement une tension suffisante lors de la charge initiale (capacité faible), stocker une quantité importante d'énergie en limitant la tension d'usage (capacité forte), utiliser au mieux l'énergie stockée. Pour répondre à ces critères apparemment contradictoires, il est proposé une architecture de stockage adaptative composée d'une matrice de supercondensateurs. La structure initiale (série) permet à la source d'énergie (récupérateur d'énergie) de 'voir' une capacité faible au démarrage. Les supercondensateurs sont ensuite reconfigurés. La structure finale (parallèle) garantit un stockage maximal sans trop monter la tension. Cette architecture adaptative permet un compromis entre le temps de démarrage, la tension d'usage maximale, l'autonomie du système et le taux maximal d'utilisation de l'énergie.*

### 1. Introduction

La récupération d'énergie est nécessaire pour assurer l'autonomie énergétique de capteurs sans fil en réseau. Généralement, ce type de système comporte en outre un

dispositif de stockage d'énergie, afin d'être capable de fonctionner en cas de récupération intermittente, ou d'appel de puissance important par la charge.

Le dispositif utilisé dans les applications de stockage, est soit une batterie et soit un supercondensateur. Dans certains cas le supercondensateur est plus intéressant que les batteries. Par exemple dans le cas des températures extrêmes (sur les avions), en termes de sécurité (pour éviter l'explosion des batteries), il bénéficie d'une durée de vie nettement plus grande que celle d'une batterie et le pic de puissance que peut délivrer les supercondensateurs est fortement plus grand que celui de la batterie. Cependant, les supercondensateurs ont trois inconvénients majeurs. Tout d'abord, la tension de sortie varie en fonction de la charge stockée, ce qui empêche l'alimentation directe de la charge et donc, la nécessité d'un convertisseur DC-DC. Deuxième inconvénient, est relatif au démarrage avec, les supercapacités vides, ce qui nécessite de récupérer assez d'énergie pour atteindre un niveau suffisant de tension pour alimenter le système électronique associé. A puissance de récupération constante, pour stocker une grande quantité d'énergie, la capacité devra être élevée, mais dans ce cas la constante de temps sa charge sera grande. Si on désire un démarrage rapide du système, la valeur de la capacité devra être petite. Un compromis est à trouver entre deux contraintes. Le troisième inconvénient est que le convertisseur DC-DC s'arrête de fonctionner en dessous d'un certain seuil de tension.

Ainsi, lors de la décharge une partie de l'énergie stockée dans les supercondensateurs ne peut pas être utilisée.

Pour permettre de résoudre en partie ces problématiques, nous proposons dans ce papier une architecture de stockage adaptative de l'énergie.

## 2. Structure de stockage adaptative

Le principe de cette structure consiste à utiliser une matrice de supercondensateurs dont la configuration est modifiée en fonction de l'état de charge globale de la structure (ou d'une seule cellule connectée à la masse), passant de la configuration « *tout série* », à une configuration « *tout parallèle* » ou inversement avec des états discrets intermédiaires. Le cycle est réversible à chaque étape (Figure 1), les configurations successives des condensateurs élémentaires formant le condensateur adaptatif, d'une faible valeur de capacité équivalente (faible constante de temps – état 0) à la capacité maximum (état N). Des interrupteurs sont utilisés pour changer l'association des supercondensateurs.

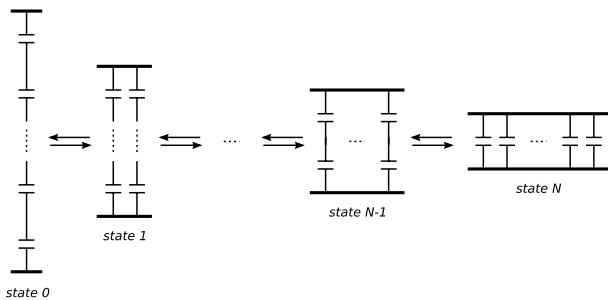


Figure 1: Les configurations successives de la structure adaptative [1]

L'utilisation d'une topologie adaptative de capacité de stockage n'est pas nouvelle. Il existe d'autres solutions possibles avec des convertisseurs DC-DC [2], avec plusieurs condensateurs [3], avec les lourdes pertes dans le nombre d'interrupteurs utilisés [4]. Au final, nous avons étudié deux structures envisageables [5][6], très similaires, qui permettent de réduire le temps de démarrage et de maximiser le taux d'énergie stockée.

### 2.1. Présentation des deux structures adaptatives

Chacune des deux structures adaptatives est constituée de quatre condensateurs (chacun de capacité C). Les cellules sont interconnectées judicieusement par des interrupteurs, qui permettent de faire trois configurations. Une configuration « *série* » (S), dont le but est d'avoir une capacité équivalente quatre fois plus petite, afin d'effectuer un démarrage rapide. Ensuite, une configuration « *série-parallèle* » (SP), et en fin une configuration « *tout parallèle* » (P) pour gagner en autonomie et utiliser le taux maximal d'énergie stockée.

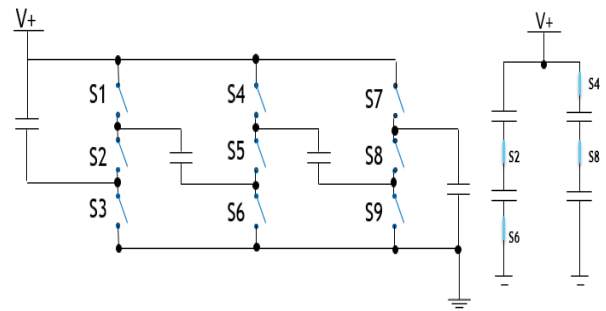


Figure 2: a) A droite, l'architecture de la première structure adaptative [5]. b) A gauche, La configuration « SP » de cette architecture.

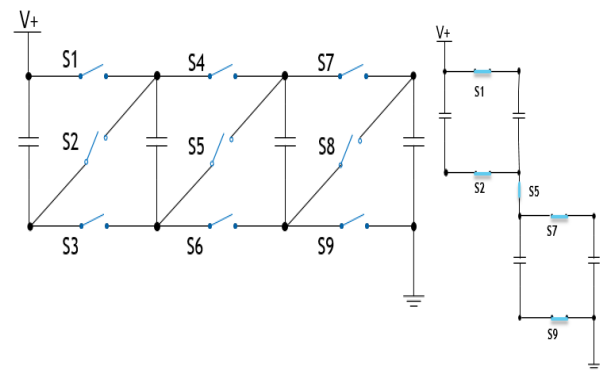


Figure 3: A droite, l'architecture de la deuxième structure adaptative [6]. A gauche, La configuration « SP » de cette architecture.

Les deux structures [5][6] présentent juste une différence pour la configuration SP (Figures 2 et 3). Le changement d'une configuration à l'autre se fait par une logique de commande. La mesure de la tension aux bornes de la structure globale (ou bien aux bornes de la dernière cellule connectée à la masse) est l'entrée du bloc logique de commande, les sorties viennent piloter les interrupteurs.

### 2.2. Analyse : Système parfait

Nous avons simulé ce comportement dans le cas de l'association de 4 condensateurs élémentaires de 50mF chacun, d'un générateur à puissance constante avec une limitation de tension à 3 V.

#### 2.2.1. Charge

L'évolution de la tension (figure 4) aux bornes de la matrice adaptative est comparée à deux condensateurs, un de capacité faible (démarrage rapide) et l'autre d'une grande capacité (grande quantité d'énergie).

La faible valeur initiale de la capacité équivalente dans la configuration (S) permet une montée très rapide de la tension, ce qui peut être interprété comme permettant un démarrage rapide du nœud d'un réseau de capteurs et la grande valeur finale de la capacité

équivalente dans la configuration (P) permettant l'utilisation d'une grande quantité d'énergie.

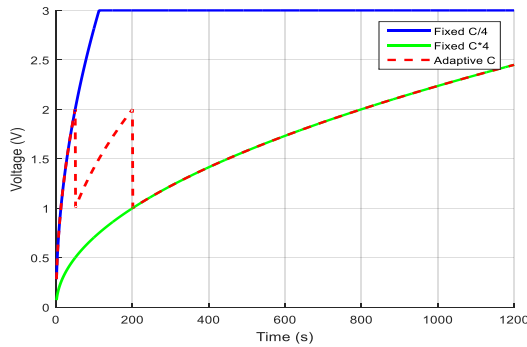


Figure 4: L'évolution de la tension en fonction du temps pour un SC de faible capacité, pour la structure adaptative et pour une grande capacité, pour la même source d'alimentation

### 2.2.2. Décharge

Pendant la décharge le chemin des cycles des configurations se déroule dans le sens inverse (la configuration P vers la configuration S). L'évolution de la tension (figure 5) aux bornes de la matrice adaptative est comparée à deux condensateurs de valeur fixe, pendant la décharge. Le système s'arrête de fonctionner à une tension (tension minimale du fonctionnement d'un étage de puissance) et une partie de l'énergie reste stockée dans les condensateurs. Par contre, dans la structure adaptative, le changement de configuration permet d'accroître le niveau de la décharge et de minimiser l'énergie résiduelle dans les supercondensateurs.

Il est donc clair que l'emploi d'un grand nombre de condensateurs permet d'accroître le taux d'utilisation de l'énergie stockée, et donc l'autonomie du système. Toutefois, on ne peut utiliser un nombre N arbitrairement élevé sans payer le prix d'une plus forte complexité.

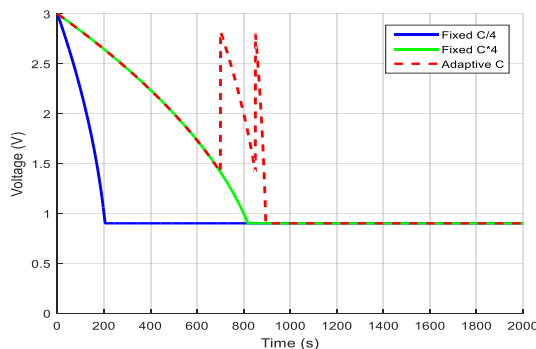


Figure 5: Evolution de la tension en fonction du temps pour un condensateur adaptatif comparé à deux SCs de valeur fixe, pour la même source d'alimentation

La structure adaptative permet de résoudre les problématiques citées précédemment (paragraphe I) dans

le cas de cellules parfaites. Ce qui permet de valider le concept de la structure de stockage adaptative.

## 3. Analyse : Système réel

Cette structure adaptative, dans des conditions réelles, entraîne certaines contraintes. Dans le cas d'une dispersion de capacité, on peut avoir des pertes importantes, liées aux courants d'équilibrage en résultant.

Pour évaluer ces pertes, dans le cas d'une structure adaptative constituée de quatre supercondensateurs, nous avons effectué une étude de l'impact de la variabilité de la valeur de ces condensateurs sur les pertes maximales dans chaque structure, pour une gamme de tolérance définie (-10% +30%). À la fin, on constate que pour minimiser les pertes relatives stockées, il faut placer les capacités de valeurs maximales (Cmax) et les capacités de valeurs minimales (Cmin) de la façon suivante : [Cmin Cmin Cmax Cmax] pour [5] et de la façon suivante [Cmin Cmax Cmin Cmax] pour [6]. Dans ce cas, les pertes se produisent principalement lors de la première commutation, non pas au cours de la deuxième commutation, car l'équilibrage des tensions aux bornes des supercondensateurs ont été déjà réalisés.

Dans le cas où les supercondensateurs présentent une certaine dispersion, il y a va avoir une phase d'équilibrage lors du passage d'une configuration à la suivante, car les tensions ne seront pas identiques aux bornes des supercondensateurs. Cela se traduit par un pic de courant. À titre d'exemple, nous présentons (Figure 6 et 8) le passage SP → P qui présente de forts pics de courant, pour les deux structures adaptatives (Paragraphe 2.1), en modélisant les interrupteurs par une résistance et en prenant un modèle de capacité (C) connecté à sa résistance série (ESR) pour les condensateurs.

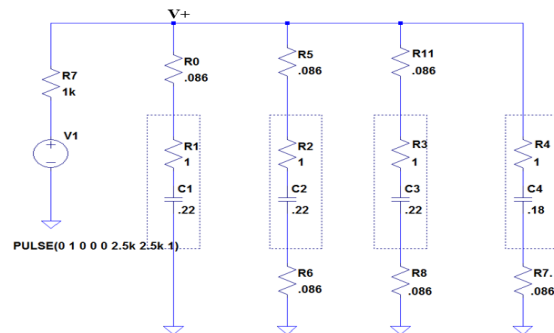


Figure 6: La configuration (P) pour la première structure adaptative [5]

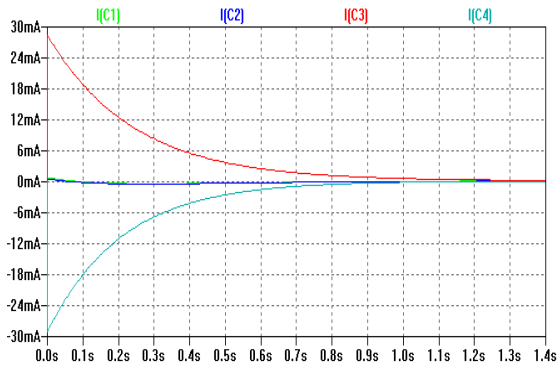


Figure 7: Le pic de courant dans les supercondensateurs à la 2ième commutation, pour la première structure adaptative [5]

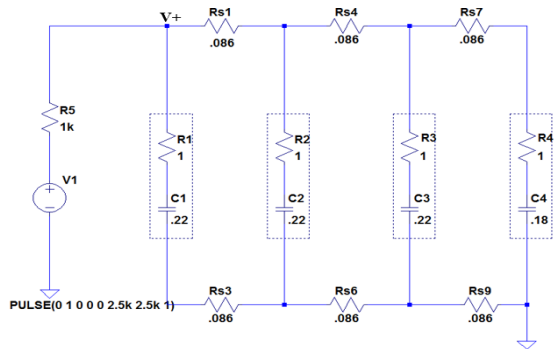


Figure 8: La configuration (P) pour la deuxième structure adaptative [6]

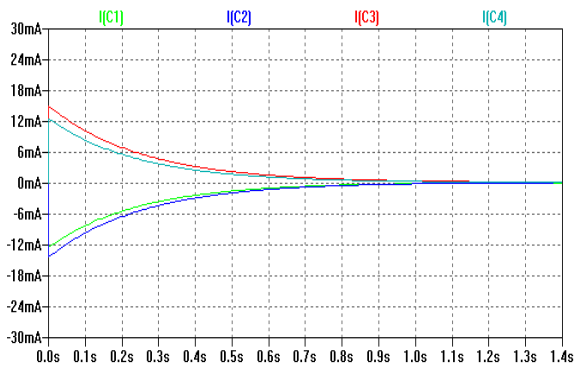


Figure 9: Le pic de courant dans les supercondensateurs à la 2ième commutation, pour la deuxième structure adaptative [6]

L'étude du pic du courant (Figure 7 et 8) dans chacune des structures [5][6], permet de choisir la deuxième structure adaptative comme meilleure structure. Car, le pic du courant maximal qui circule lors des commutations dans la première structure [5], est deux fois plus grand que le courant qui circule dans la deuxième structure adaptative [6].

La structure choisie est assez simple pour être réalisable, mais pour apporter un gain significatif, il reste à optimiser la partie commande en minimisant sa complexité.

## 4. Commande des interrupteurs

Pour mettre en œuvre les configurations successives des condensateurs élémentaires, il faut choisir correctement les interrupteurs et la logique de contrôle.

En ce qui concerne les interrupteurs, nous avons choisi des transistors du type CMOS (ADG801), pour éviter la présence des diodes body qui peut induire un chemin de courant quand les interrupteurs sont en mode OFF.

Du point de vue contrôle, la solution retenue dans [6] est beaucoup plus simple que celle de [5], car elle utilise pour la commutation, la mesure de la tension du condensateur relié à la masse et il nécessite deux comparateurs et deux portes logiques (Figure 10). Alors, que dans l'autre [5] elle utilise la mesure par rapport à la tension globale de la structure et nécessite deux comparateurs, deux bascules RS et plusieurs portes logiques.

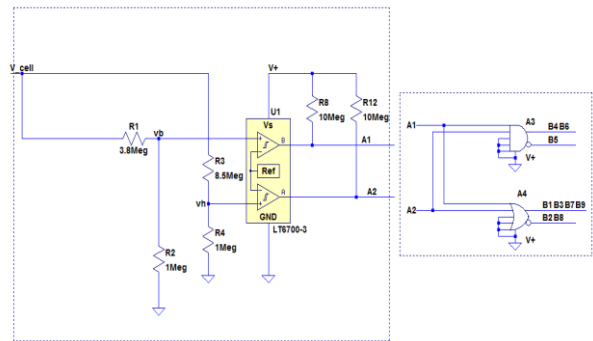


Figure 10: La logique de contrôle de la structure adaptative choisie [6]

L'alimentation de la structure adaptative sera réalisée à l'aide d'une source de tension. Cependant, une problématique concerne l'auto-alimentation du circuit de commande lorsque les supercondensateurs sont vides.

Pour résoudre cette problématique, nous avons pensé à réaliser une structure qui démarre par défaut en configuration série, permettant ainsi sa charge sans alimenter la partie commande. Pour cela, nous avons pensé à plusieurs solutions:

- Utilisation de transistors fermés (normally-on) en mode normal, pour les interrupteurs qui réalisent la configuration « tout série ». Cette solution n'est pas réalisable suite à l'absence de ce type de transistor (PMOS à appauvrissement P) dans le domaine commercial.
- Autre solution, utilisation de diodes en parallèle aux transistors qui réalisent la configuration « tout série », pour assurer une charge par défaut, qui permet d'alimenter le circuit de commande. Une fois le circuit de commande alimenté, le

retour des cycles de configuration se fait que par les interrupteurs. Ensuite, pour éviter les courts circuits pendant la décharge, on peut mettre un retard sur certains interrupteurs (S2, S5 et S8) (Figure 3).

## 5. Le choix des seuils

Le passage d'une configuration à autre se fait par rapport à une comparaison, entre la tension de la structure (ou d'une cellule) et des seuils de tension prédéterminés (seuil haut et seuil bas).

Pendant la charge, lorsque la tension mesurée de charge franchit la valeur du seuil haut, les interrupteurs concernés changent leur état afin de changer la configuration de la structure. De même, pendant la décharge de la structure, lorsque la tension mesurée atteint la valeur du seuil bas, les interrupteurs commutent pour changer la configuration de la structure.

Le choix des seuils théoriques dépend de l'objectif souhaité (récupération maximale d'énergie [5], haute tension...). Pour maintenir un bon comportement les tensions de seuils (seuil haut  $V_h$  et seuil bas  $V_b$ ) doivent respecter :

$$2V_{\min} < V_h < V_{sc-\max} \quad (1)$$

$$V_{\min} < V_l \quad (2)$$

Où le système cesse à fonctionner au-dessous de la tension  $V_{\min}$  (volts),

## 6. Conclusion

Dans cet article, nous avons démontré tout l'intérêt à disposer d'un dispositif de stockage capacitif adaptatif dont la capacité équivalente, à la manière d'une boîte de vitesse mécanique, s'adapte à l'énergie à stocker, optimisant en permanence la constante de temps et l'énergie stockable.

Nous avons montré qu'il était possible de concevoir une structure adaptative auto-alimentée. Il reste à valider le test en simulations sur le logiciel (Ltspace), d'apporter une évaluation fine des pertes liées en particulier aux interrupteurs et aux tensions de seuil des diodes. Ensuite, la réalisation de deux circuits imprimés, un pour la structure de stockage adaptative et l'autre pour la partie, commande pour valider expérimentalement les résultats de simulation.

À plus long terme et dans un objectif de miniaturisation du nœud du réseau de capteurs, ce principe de supercondensateur adaptatif pourrait être intégré sur silicium puisque la faisabilité de l'intégration de supercondensateurs sur silicium a récemment été démontrée [7].

## Références

- [1] R. Monthéard «Récupération d'énergie aéroacoustique et thermique pour capteurs sans fil embarqués sur avion», 2014.
- [2] M. Uno et K. Tanaka, « Single-Switch Cell Voltage Equalizer Using Multistacked Buck-Boost Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode for Series-Connected Energy Storage Cells », IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no 8, p. 3635-3645, oct. 2011
- [3] J.-F. Nie, X. Xiao, Z. Nie, P. Tian, et R. Ding, « A novel three-level changeover circuit of super-capacitor bank for energy storage systems », in IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, p. 144-149.
- [4] M. Uno et H. Toyota, « Equalization technique utilizing series-parallel connected supercapacitors for energy storage system », in IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008, 2008, p. 893-897.
- [5] R. Monthéard, M. Baffleur, V. Boitier, J.-M. Dilhac and X. Lafontan «Self-adaptive switched ultra-capacitors: a new concept for efficient energy harvesting and storage », MEMS, 2012.
- [6] Y. Kim, S. Park, Y. Wang, Q. Xie, N. Chang, M. Poncino, et M. Pedram, « Balanced reconfiguration of storage banks in a hybrid electrical energy storage system », in 2011 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 2011, p. 624-631.
- [7] Peihua Huang, Min Heon, David Pech, Magali Brunet, Pierre-Louis Taberna, Yury Gogotsi, Samuel Lofland, Jeffrey D. Hetteringer and Patrice Simon «Micro-supercapacitors from carbide derived carbon (CDC) films on silicon chips » Journal of Power Sources, 2013.

## Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet européen SMARTER financé par le programme CHIST-ERA, "Green ICT, towards Zero Power ICT".