

AMÉLIORATION DE LA FIABILITÉ DES STRUCTURES MATRICIELLES DE BATTERIES

IMPROVING RELIABILITY ON BATTERY MATRIX STRUCTURES

Christophe SAVARD⁽¹⁾⁽²⁾, Éric NIEL⁽¹⁾, Laurent PIETRAC⁽¹⁾, Pascal VENET⁽²⁾, Ali SARI⁽²⁾

Université de Lyon

⁽¹⁾ INSA de Lyon – 20 avenue Albert Einstein – 69621 Villeurbanne Cedex

⁽²⁾ Université Claude Bernard de Lyon – 43 boulevard du 11 novembre 1918 – 69622 Villeurbanne Cedex
christophe.savard@insa-lyon.fr

Résumé

Une batterie stockant de l'énergie électrique se présente sous une forme matricielle de n lignes de cellules élémentaires sur m colonnes. Les caractéristiques électrique de ces cellules sont équilibrées entre elles. L'article compare différentes structures classiques avec une nouvelle architecture en terme de nombre d'interrupteurs, de fiabilité et évoque les degrés de liberté permettant de reconfigurer la structure afin d'en accroître la disponibilité.

Abstract

A battery stores electrical energy in a matrix of n rows by m columns of elementary cells. The electrical characteristics of these cells are balanced therebetween. This paper compares different classical structures with a new architecture in terms of number of switches, reliability and hint at the degrees of freedom for redesigning the structure in order to improve availability.

1 – Introduction

Le présent article vise à présenter les premiers travaux de simulation réalisés lors d'une étude de définition d'une architecture reconfigurable pour les systèmes de stockage de l'énergie électrique. Cette architecture devra être capable d'évoluer en cas de défaillance de l'une ou de plusieurs des cellules qui la compose. Une nouvelle architecture fiable et implantable dans les structures multicellulaires de batteries est proposée. Pour ce faire, le montage s'affranchit des connexions classiques en série et parallèle entre les cellules. Cette architecture innovante est comparée avec des structures plus classiques et évaluée en nombre d'interrupteurs par cellule élémentaire. Leur fiabilité respective est pareillement comparée, formulée par le temps moyen avant première défaillance (MTTF) de la structure matricielle. Ceci permet, à ce stade de la réflexion, d'affirmer que cette architecture, reposant sur une structure à base de redondance passive optimisée, baptisée C-3C, fondée sur l'exploitation d'un réseau d'interrupteurs commandables, présente un niveau de fiabilité correcte pour un coût raisonnable.

2 – Problématique

Les systèmes de stockage de l'énergie électrique (SSEE) sous forme électrochimique (piles et batteries) ou sous forme électrostatique (supercondensateurs) ne permettent de restituer l'énergie électrique que sous des tensions peu élevées, comprises entre un et quelques volts. La tension de ces cellules élémentaires est trop faible pour un usage courant, quelle que soit l'application considérée. En effet, dans une batterie, elle dépend essentiellement de la nature des électrodes [1]. Aussi, afin d'accroître la tension délivrée, des cellules élémentaires sont associés en série pour former les SSEE. Par ailleurs, de manière croissante, les SSEE sont sollicités pour des demandes en fort courant, notamment dans le cadre de la mobilité électrique [2], où « les unités de stockage d'énergie électrique doivent être dimensionnés de telle sorte qu'ils stockent suffisamment d'énergie et fournissent une puissance maximale suffisante afin de permettre une accélération telle que spécifiée et la capacité de répondre à des cycles de conduites prédéfinis ». Il est alors nécessaire d'associer en parallèle des structures élémentaires afin de disposer du courant adéquat. Les SSEE deviennent ainsi aptes à répondre aux sollicitations tant en puissance qu'en énergie. Ils pourront répondre aux prochains défis du stockage de l'énergie électrique tant sur les lieux de production, notamment lorsque l'énergie est issue de sources renouvelables intermittentes, que de manière centralisée pour des stockages stationnaires [3]

Néanmoins, les cellules ne possèdent pas toutes exactement les mêmes caractéristiques électriques. Celles-ci, comme la tension à vide ou le SoC (pour State-of-Charge), état de charge, doivent être équilibrées par des dispositifs appropriés [4]. Le concept de SoC est décrit au point « modélisation ». Cet équilibrage est effectué à l'aide de circuits dédiés, par un transfert de l'énergie excédentaire d'une cellule à une autre ou par sa dissipation sous forme de chaleur. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un équilibrage par le bas, tous les SoC étant ramenés au niveau de celui de la cellule la moins chargée [5].

Plus il y a d'éléments individuels qui composent la batterie, plus la fiabilité globale du SSEE risque d'être réduite. En effet, en considérant, dans un premier temps que toutes les cellules du système sont nécessaires quelle que soit leur connexion physique, d'un point de vue fiabilité elles sont associées en série. Ainsi la fiabilité d'une architecture physique de trois branches en parallèle contenant chacune trois cellules en série, identiques en termes de fiabilité, présente un temps moyen avant la première défaillance (MTTF pour Mean Time To Failure) de un neuvième de celui d'une cellule seule. La figure 1 présente une architecture physique parallèle contenant 3 lignes de 3 cellules identiques montées en parallèle dans laquelle chaque cellule fournit un courant I sous une tension V . Ce montage peut ainsi fournir un courant de $3I$ sous $3V$. Les cellules présentent un taux de défaillance instantanée $\lambda(t)$.

Dans cette approche, la fiabilité des interrupteurs est considérée comme grande par rapport à celle des cellules, ce qui explique que le diagramme de fiabilité ne prenne en compte que la fiabilité des cellules, donnée par $R(t)$, qui suit une Loi exponentielle. Le taux de défaillance de ces dernières est donc constant. D'une manière générale, les SSEE peuvent être considérés comme un assemblage de m colonnes et de n lignes de cellules. Une ligne est alors constituée, dans ce cas, de m cellules connectées en parallèle. Une colonne comprend n cellules câblées en série. La puissance que le SSEE est capable de fournir vaut le produit des $(n \cdot m)$ tension par courant d'une cellule.

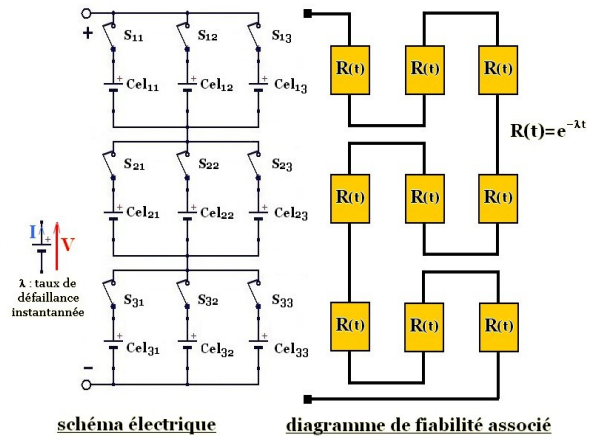


Figure 1 – schéma électrique et diagramme de fiabilité associé.

À performances égales et sans recourir à la redondance, une batterie présentera une fiabilité d'autant plus faible qu'elle comportera un nombre important de cellules. Pour remédier à cela, des cellules redondantes sont ajoutées. Comme décrit ci-après, le nombre et l'implantation de ces cellules dépendent de l'architecture de la batterie. Sans l'ajout de cellules redondantes, la batterie risque d'être rapidement indisponible, dans l'incapacité de fournir le courant nominal sous la tension nominale, correspondant à la mise à contribution d'un nombre de cellule égal aux cellules de base.

Lorsque la batterie est sollicitée en-deçà de sa puissance nominale, autrement dit, lorsqu'elle fonctionne en mode dégradé, noté ici « mode dégradé 1 », il est pertinent de rechercher la meilleure stratégie de mobilisation des ressources disponibles (les cellules). Celle-ci peut être construite dans l'optique de maximiser l'usage de l'énergie stockée, ou encore de réduire l'usure des cellules. D'autre part, lorsque la batterie est sollicitée à pleine puissance, mais qu'elle contient des cellules défectueuses en quantité et répartition telles que cela n'obère pas le fonctionnement (noté ici « mode dégradé 2 »), le déploiement de ces stratégies est une option à privilégier plutôt que d'utiliser simplement les premières cellules disponibles [6].

Les batteries sont alors composées d'un nombre non négligeable d'interrupteurs. Les interrupteurs sont inhérents aux circuits d'équilibrage et à la redondance. Une autre destination peut être alors envisagée pour ceux-ci : celle de permettre une reconfiguration dynamique des connexions entre les cellules actives à tout instant.

Afin de répondre aux demandes de la charge, les cellules peuvent être associées de différentes manières. Ces architectures prennent en compte la redondance, lorsqu'elle existe. Dans ce contexte, certaines structures apparaissent plus aptes à concilier la durée de vie utile de la batterie avec l'aptitude à répondre à la demande de la charge en puissance et en énergie.

Effectivement, un risque majeur doit être maîtrisé au sein des SSEE : celui du vieillissement prématuré des cellules qui chauffent le plus. Cela touche, par exemple, celles situées au centre des packs [7, 8], qui se retrouvent moins ventilées que les autres. Sans une bonne gestion des ressources disponibles, un pack de cellules finit souvent par fonctionner avec les éléments implantés sur les bords.

Cet article est structuré comme suit. Dans un premier temps, le modèle utilisé pour représenter le comportement électrique d'une cellule est présenté. La défaillance d'une cellule est ensuite détaillée en précisant les conséquences de la défaillance d'une ou plusieurs cellules sur le service en terme de puissance délivré par le système complet. Puis, différentes façons de câbler les cellules au sein d'une batterie sont présentées. Les montages sont alors évalués en termes de nombre d'interrupteurs, de fiabilité, par le calcul et la modélisation et des degrés de liberté possibles.

3 – Modélisation

Pour décrire une cellule, il suffit de deux paramètres électriques, faisant office de variables d'état et de deux autres paramètres d'état. En premier lieu, les caractéristiques électriques sont constituées de la tension à Vide E_0 et de la résistance série R_s , comme représenté par le schéma électrique équivalent de Thévenin du premier ordre, rappelé en figure 2. La première des deux variables définissant l'état de la cellule est le SoC, qui représente une image de la charge stockée et qui est borné entre 1 pour une cellule contenant le maximum de charge électrique et 0. Ce minimum correspond à une charge en-dessous de laquelle, si la cellule continuait à se décharger, les processus physico-chimiques internes d'oxydoréduction ne pourraient plus s'opérer correctement. Cette décharge profonde engendrerait des dégâts irréversibles et une forte réduction de la capacité de stockage de l'énergie. Pareillement, une cellule ne doit jamais être chargée au-delà d'une valeur maximum, au risque d'échauffement puis de dégradation irréversible. La tension à vide d'une cellule est corrélée à son SoC. Dans cet article, cette corrélation est considérée comme quasiment linéaire [9].

La seconde variable d'état est le SoH, pour État de Santé (State of Health). Il donne l'image de l'usure de la cellule, est compris entre 1 pour une cellule neuve et zéro pour une cellule très usée. Une cellule dont le SoH diminue jusqu'à 0 est une cellule qui n'est plus capable de stocker qu'une quantité d'énergie prédéfinie.

Une autre variable d'état doit être prise en considération bien qu'elle ne dépende pas uniquement du fonctionnement interne de la cellule : la température. En effet, la température est liée également aux conditions extérieures.

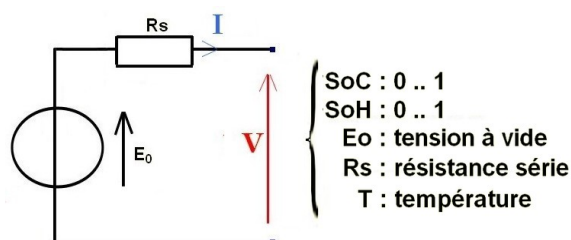


Figure 2 – schéma de Thévenin et variables d'état.

La défaillance d'une cellule se traduit par l'incapacité à recevoir ou à fournir le courant reçu ou demandé. Cette défaillance peut être temporaire. Dans ce cas, elle est réparable par décharge ou recharge de la cellule. C'est le cas lorsqu'une cellule se retrouve en décharge profonde avec un SoC inférieur ou égal à la valeur minimale fixée et qu'elle est sollicitée pour fournir de l'énergie. C'est symétriquement le cas lorsque la cellule est entièrement chargée et que la batterie reçoit encore du courant. Les circuits d'équilibrage ont comme objectif d'éliminer ce type de défaillance, une cellule ne devenant défaillante que s'il n'est plus possible d'extraire un courant suffisant sous une tension suffisante, une fois épuisées toutes les combinaisons internes accordant l'équilibre avec d'autres cellules. Dans ce cas, elle doit être déconnectée du reste de la structure. Un superviseur – le Système de Management des Batteries ou BMS (Batteries Management System) – s'emploie à ces opérations de surveillance du SoC [10] et du pilotage de l'équilibrage [11]. « Pour garantir une bonne durée de vie du système, le BMS doit en premier lieu pouvoir surveiller les grandeurs qui sont préjudiciables aux cellules qui composent la batterie. Si les seuils de ces grandeurs sont atteints, le BMS doit pouvoir indiquer au système utilisant la batterie, que cette dernière ne doit plus être utilisée. Si cette dernière est toujours utilisée, le BMS doit pouvoir isoler électriquement la batterie pour stopper son fonctionnement. [20] » « Le système de gestion global de la batterie établit l'estimation des paramètres d'état et les fonctions d'équilibrage. [19] »

La défaillance peut également devenir permanente. Une cellule trop âgée ne peut plus répondre aux sollicitations. Concrètement, pour des applications en énergie, une cellule est considérée comme usagée lorsque son SoH passe de 100% à une valeur prédéfinie de 80%. Pour des applications en puissance, un autre paramètre de la cellule est pris en considération : la résistance série du modèle électrique équivalent (figure 2). Cette résistance est pénalisante en ce sens qu'elle provoque une perte de puissance de la batterie. Elle augmente en raison de la corrosion des connexions et du ralentissement des réactions physico-chimiques [12]. Lorsque R_s double par rapport à sa valeur initiale, la batterie est considérée comme défaillante. Ainsi la dégradation d'une cellule est progressive et rarement soudaine. Bien que ce cas puisse également se produire, sa probabilité est très inférieure à celle d'une défaillance liée à l'usage et au vieillissement. Il est à noter que le vieillissement s'opère de deux manières. Il survient de manière calendaire (le contraire du slogan « la pile ne s'use que si l'on s'en sert »). Cela se traduit par une auto-décharge plus ou moins rapide selon la nature de la cellule et par une réduction progressive de sa capacité de stockage, s'exprimant par une diminution irréversible de son SoC maximum. Le vieillissement est aussi consécutif à l'usage : il est fonction du nombre de cycles opérationnels (cycles de charge-décharge) que supporte la cellule.

Associer des cellules élémentaires permet de fournir de l'énergie sous des tensions plus élevées en associant en série des cellules élémentaires et avec des courants plus importants en associant des cellules en parallèle. Selon l'architecture de la batterie et selon le nombre de cellules redondantes,

lorsque le nombre de cellules défaillantes dépasse le nombre de cellules redondantes disponibles, la batterie n'est plus à même de répondre au cahier des charges. La batterie est alors défaillante : soit temporairement s'il s'agit d'un manque d'énergie (tous les SoC des cellules proches de zéro), soit définitivement si trop de cellules présentent un SoH trop faible ou une résistance série trop importante.

Le risque d'une défaillance non réparable (non consécutive à une décharge temporaire mais à une perte de santé) est donc lié à l'exploitation et consécutif à l'historique de la batterie.

Ainsi, il apparaît pertinent de rechercher une architecture qui puisse permettre de mieux utiliser les ressources afin d'éviter, lorsque la batterie débite du courant, de vider trop de cellules et de faire défaillir la batterie. Il s'agit alors d'optimiser la disponibilité de la batterie et d'optimiser l'utilisation des ressources internes. Il est tout autant indiqué que cette architecture puisse limiter l'usure cyclique et calendaire des cellules. En partant d'un nombre de cellules de base conditionné par les besoins en puissance de l'application externe, et en ajoutant une certaine part de redondance, plusieurs combinaisons architecturales de cellules sont possibles. Il s'agit maintenant de comparer leur performance.

4 – Méthode

Afin de comparer les différentes structures susceptibles d'être implantées dans une batterie, il convient de préciser le cahier des charges : fournir un courant nominal de $(m-1)$ unités de courant sous n unités de tension, en partant du principe qu'une cellule élémentaire fournit une unité de courant sous une unité de tension et que la redondance est limitée à une seule colonne dans la batterie constituée de manière matricielle.

L'étude est limitée à un fonctionnement en pleine puissance, se concrétisant par la fourniture d'un courant nominal de $(m-1)$ unités sous une tension nominale de n unités, sans considérer un fonctionnement en-deçà ou en mode dégradé 1 (courant et/ou tension inférieurs aux valeurs maximales).

L'étude se cantonne également au cas de cellules toutes identiques en termes de loi de fiabilité, opérant en phase de maturité, possédant une fiabilité nettement inférieure à celle des interrupteurs. En effet, une cellule présente une durée de vie comprise généralement entre 500 et 2000 cycles de charge-décharge, lorsque ces cycles sont optimaux. Alors que, de leur côté, les transistors MosFet utilisés en guise d'interrupteurs pour connecter ces cellules présentent généralement des défaillances instantanées de l'ordre de quelques FIT à quelques centaines de FIT (taux de défaillance atteint en un milliard d'appareil.heures de fonctionnement) [13]. Même si les conditions de cyclage et de température peuvent altérer ces performances, le ratio entre les deux probabilités de défaillance est voisin de 1 pour 20 000. Cela justifie pourquoi, dans le diagramme de fiabilité de la figure 1, les interrupteurs sont considérés comme parfaits.

Dans cette étude, les architectures sont donc comparées au regard de la fiabilité pour des dispositifs fonctionnant en phase de maturité, pour une défaillance suivant une loi exponentielle. Dans le cas de batteries, la défaillance liée au vieillissement est un processus à dégradation progressive, dont la vitesse n'est pas constante, qui conditionne la disponibilité de la batterie. Ce point ne sera toutefois pas traité dans cette présente étude et fera l'objet de publications ultérieures.

Quatre structures matricielles différentes (figures 3 à 6) sont comparées afin de tester la pertinence de chacune d'elles en termes de nombre d'interrupteurs et de MTTF. Chacune d'elles est constituée de cellules et d'interrupteurs connectés différemment. Elles sont chacune capable de fournir le même courant sous la même tension. Trois de ces montages requièrent le même nombre de cellules (figures 3, 4 et 6), de base comme redondantes, ce qui permet de les comparer équitablement. Cette redondance, représentant une colonne supplémentaire dans la structure matricielle correspond au minimum nécessaire permettant de produire $(m-1)$ unités de courant [14], même lorsqu'une partie des cellules est défaillante. L'autre montage (figure 5) permet de définir une borne haute pour l'amélioration de la fiabilité par recours à la redondance. Deux montages (figures 4 et 6) permettent un équilibrage direct entre les cellules d'une même ligne. Lorsque ce n'est pas le cas (figures 3 et 5), le circuit est représenté avec les interrupteurs et éléments dissipatifs nécessaires [15, 16, 17]. Puis, une modélisation par chaînes de Markov complète les calculs de fiabilité.

Les quatre types de schémas examinés sont les suivants :

- **Modèle de base, référence de comparaison [18] :** structure matricielle de $(m-1)$ branches de base plus une m -ième branche en redondance passive, dont chaque branche comprend n cellules montées en série. Ce modèle, référencé 0, est donné à la figure 3. Il peut être qualifié d'architecture en parallèle de série. Sur la figure sont représentés des circuits d'équilibrage dissipatifs, permettant d'évacuer les excès de charge sur chaque cellule. Ce montage est le montage le plus simple à réaliser.

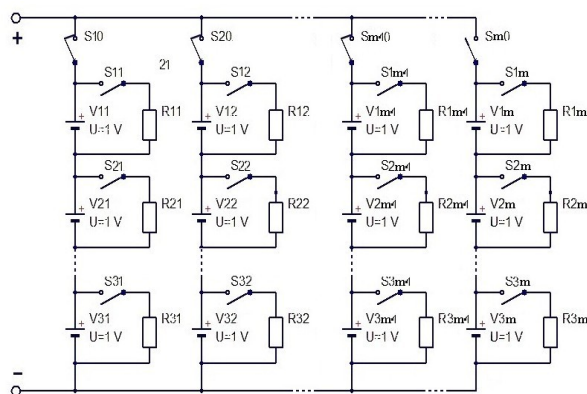


Figure 3 – structure parallèle de cellules en série, modèle 0.

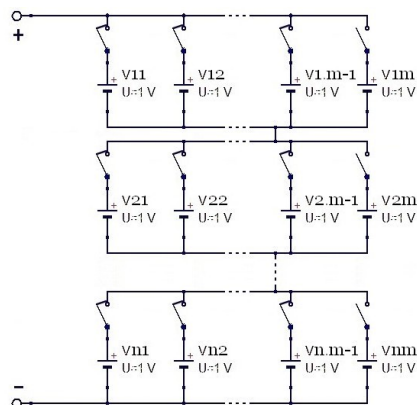


Figure 4 – structure série de cellules en parallèle, modèle 1.

● Modèle avec architecture en série de parallèle, référencé 1, donné en figure 4, comprenant une cellule redondante par ligne.

● Modèle avec redondance maximale, associant une cellule en redondance passive à chaque cellule d'un modèle 0 de $(m-1)$ colonnes, référencé 2, présenté en figure 5. Par redondance maximale, s'entend l'ajout d'une cellule en redondance pour toute cellule de base. Cette architecture permet principalement de fixer une valeur objectif pour la fiabilité. Pour être concurrentiel, tout autre montage devra présenter une fiabilité s'en approchant. Statistiquement, au-delà d'une quinzaine de cellules dans la batterie, l'ajout de redondance supplémentaire n'améliore plus la fiabilité qu'à la marge, quel que soit le nombre de cellules de base. En effet, plus la structure comprend d'ensembles « cellule associée à sa cellule redondante » et plus la part d'amélioration apportée par la redondance est dégressive (inversement proportionnelle au nombre total de cellules). Cependant, comme la défaillance peut survenir sur n'importe quelle cellule, il n'est pas possible de faire l'impasse sur certaines cellules plutôt que sur d'autres. Toutes les cellules de base doivent être redondées.

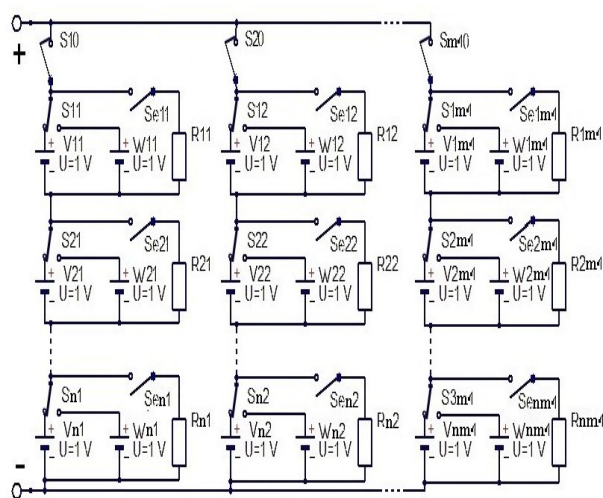


Figure 5 – structure parallèle de cellules en série, avec redondance maximale (une cellule redondante pour chaque cellule de base) et équilibrage ; modèle 2.

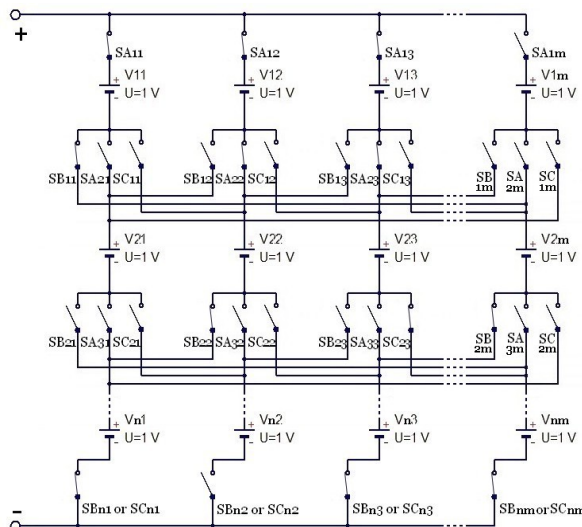


Figure 6 – structure C-3C, modèle 3, avec un exemple de configuration.

● Modèle fondé sur la nouvelle structure à redondance passive optimisée : la structure C-3C (signifiant une cellule vers trois cellules), référencé 3, détaillé en figure 6, et dont le principe de conception est détaillé en [14].

L'idée de base qui prévaut à la définition de la structure C-3C consiste à minimiser la redondance, tout en répondant aux exigences de puissance. Cela implique de s'écarter d'une structure matricielle classique en permettant l'adjacence d'une cellule appartenant à une ligne i vers les trois cellules voisines des lignes $i-1$ et $i+1$ (en amont comme en aval), sans connexion avec les autres cellules de la ligne i et à adjoindre seulement une cellule en redondance pour chaque ligne.

Outre de limiter le nombre de cellules supplémentaires, cette structure permet d'assurer un auto-équilibrage actif entre les cellules contiguës, sans ajout de circuit dédié. Par ailleurs, rien n'oblige à ce que les cellules électriquement contiguës le soit physiquement au sein du pack de cellules. Ainsi d'une cellule (ij) , le courant peut partir vers une des trois cellules auxquelles elle est connectée, cellules

pouvant se trouver en des endroits différents dans le pack. Ce qui limite l'impact du positionnement physique au sein de la batterie [19]. En mode décharge, les cellules de la ligne $i+1$ depuis lesquelles provient le courant traversant la cellule i peuvent être implantées à différents endroits dans le pack, assurant alors un choix entre des cellules présentant des paramètres de fonctionnement différents (température notamment).

L'inconvénient de cette structure réside dans le grand nombre d'interrupteurs associés à une cellule. Dans cette étude, les défaillances en stand-by, c'est-à-dire la défaillance de la cellule en attente avant qu'elle ne soit mise en service, ainsi que les défaillances des interrupteurs, sont considérées comme faibles au regard de la défaillance des cellules.

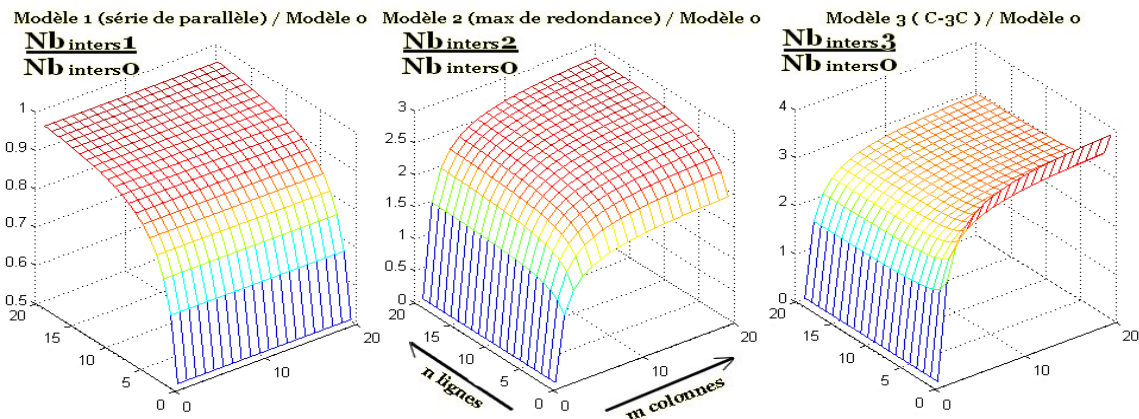


Figure 7 – comparaison du nombre d'interrupteurs pour chaque structure par rapport au modèle de référence.

5 – Résultats

Pour chaque architecture, le nombre d'interrupteurs est proportionnel aux nombres n de lignes et m de colonnes, comme indiqué respectivement dans les équations (1) à (4), selon les modèles référencés 0 à 3, sachant qu'il s'agit de fournir ou de recevoir $(m-1)$ unités de courant.

$$Nb_{inter\ 0} = (n+1) \cdot m \quad (1)$$

$$Nb_{inter\ 1} = n \cdot m \quad (2)$$

$$Nb_{inter\ 2} = (3 \cdot n + 1) \cdot (m - 1) \quad (3)$$

$$Nb_{inter\ 3} = 3 \cdot n \cdot m \quad (4)$$

Pour le montage C-3C, seuls $(3n-1) \cdot m$ interrupteurs sont utiles. Cependant, il est plus aisé de réaliser un module comprenant une cellule élémentaire associée à trois interrupteurs et de décliner ce module en m colonnes et n lignes que de réaliser un module spécifique pour la dernière ligne.

Lorsque le nombre de lignes et de colonnes deviennent grands, comparativement à la structure de base (modèle 0), le modèle 1 demande le même nombre d'interrupteurs, les modèles 2 et 3, trois fois plus, comme présenté dans la figure 7.

Les montages se scindent en deux classes : d'un côté les modèles 2 et 3 qui demandent trois fois plus d'interrupteurs que les montages de l'autre côté, les modèles 0 et 1. Pour continuer à les départager, il convient de les évaluer au regard de leur fiabilité.

Le diagramme de fiabilité du modèle 0 s'apparente à une redondance passive d'une colonne connectée aux trois autres, la première venant à défaillir étant remplacée par la colonne supplémentaire (figure 8). En effet en fonctionnement nominal, la batterie utilise, sur chaque ligne, les $(m-1)$ cellules de base, la cellule redondante n'est pas connectée au réseau. Elle ne se substitue à la première cellule défaillante que lorsque celle-ci le devient. Avant cela, elle est placée en stand-by et ne fait l'objet que d'un vieillissement calendaire, qui n'est pas prit en considération dans la présente étude. Par ailleurs, les commutations sont, à ce niveau d'étude, considérées comme parfaites. Les risques liés à la commutation font l'objet d'une autre étude.

Le diagramme de fiabilité du modèle 2 se résume à la mise en série de blocs correspondant à chaque cellule, d'après les hypothèses sur la fiabilité des interrupteurs, conformément au principe tracé en figure 1. Chaque bloc est redondé individuellement par un bloc identique monté en redondance passive. Le diagramme de fiabilité du modèle 1 et du modèle 3 présentent une redondance passive par ligne, les trois cellules de chaque ligne étant en série et toutes substituables par l'élément redondant.

La fiabilité, exprimée par la probabilité de défaillance postérieure à l'instant t , $R(t)$ et le MTTF pour les différents modèles est régie par des équations différentes. Pour chaque montage, $R(t)$ peut être calculé en décomposant la structure en lignes ou en colonnes puis en appliquant les formules relatives à la redondance passive. Le MTTF est obtenu en intégrant $R(t)$. Les formules résultant de ce calcul sont données respectivement en (5) et (6) pour le modèle 0, (7) et (8) pour le modèle 2 et (9) à (10) pour les modèles 1 et 3.

$$R_0(t) = e^{-n \cdot (m-1) \cdot \lambda_{cell} \cdot t} \cdot (1 + n \cdot (m-1) \cdot \lambda_{cell} \cdot t) \quad (5)$$

$$MTTF_0 = \frac{2}{n \cdot (m-1) \cdot \lambda_{cell}} \quad (6)$$

$$R_2(t) = e^{-n \cdot (m-1) \cdot \lambda_{cell} \cdot t} \cdot (1 + \lambda_{cell} \cdot t)^{n \cdot (m-1)} \quad (7)$$

$$MTTF_2 = \frac{1}{\lambda_{cell}} \cdot \left[\frac{2}{n \cdot (m-1)} + \sum_{k=2}^{n \cdot (m-1)} \frac{\prod_{i=1}^{k-1} (n \cdot (m-1) - i)}{[n \cdot (m-1)]^k} \right] \quad (8)$$

$$R_3(t) = R_1(t) = e^{-n \cdot (m-1) \cdot \lambda_{cell} \cdot t} \cdot (1 + (m-1) \cdot \lambda_{cell} \cdot t)^n \quad (9)$$

$$MTTF_{C-3C} = MTTF_1 = \frac{1}{(m-1) \cdot \lambda_{cell}} \cdot \left[\frac{2}{n} + \sum_{k=2}^n \frac{\prod_{i=1}^{k-1} (n - i)}{n^k} \right] \quad (10)$$

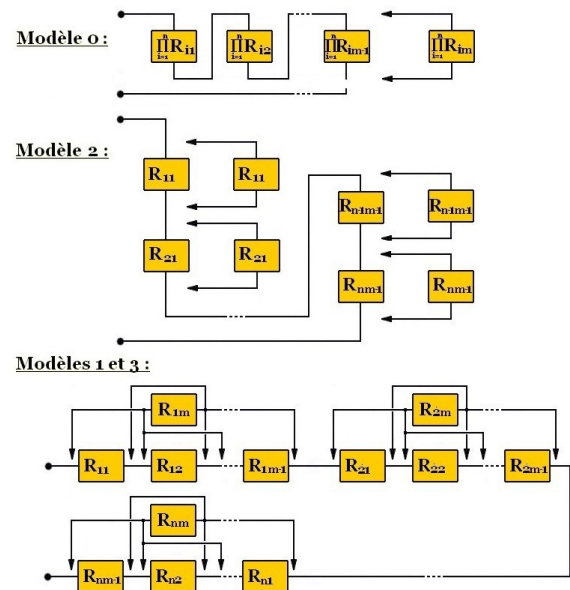


Figure 8 – diagrammes de fiabilité des différents modèles.

Modèle 3 (C-3C) / Modèle 0 (une colonne) Modèle 3 / Modèle 1 (série de parallèle) Modèle 3/Modèle 2 (redondance maximale)

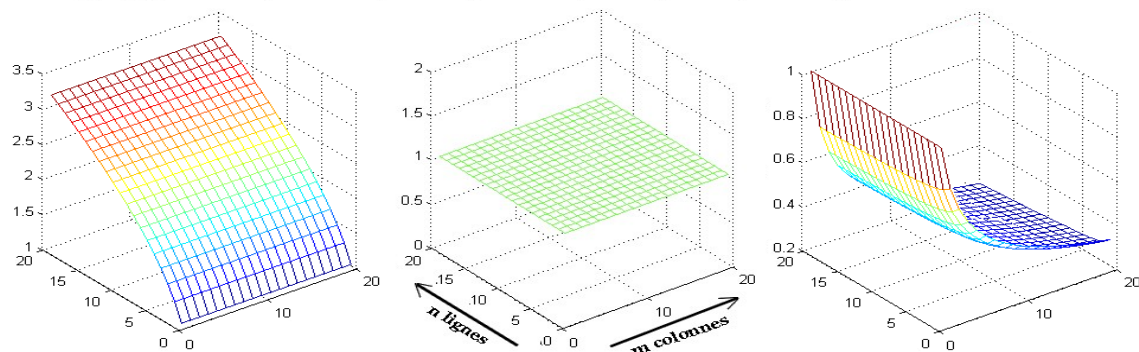


Figure 9 – expressions du MTTF du C-3C avec celui des différents modèles (pour un λ de 10^{-3} défauts/h).

La comparaison de la fiabilité des modèles 1 et 3 avec leurs concurrents, comme présenté en figure 9, montre que ces montages sont performants. Dans le détail, quel que soit le courant devant être débité (donc le nombre de colonnes), le C-3C est toujours plus fiable que le modèle 0 (une colonne redondante). Plus la tension à délivrer est élevée, plus le nombre de lignes est important, plus le modèle 3 présente une meilleure fiabilité que le modèle 0. Pour un petit nombre de colonnes, les modèles 1 et 3 présentent presque la même fiabilité que le système à redondance maximale malgré un nombre de cellules redondantes $(m-1)$ fois moins important. Un optimum pourrait être défini entre le surcoût engendré par le nombre de cellules redondantes et l'amélioration de la fiabilité, selon des critères économiques liés au coût des cellules et à la durée de fonctionnement espérée.

Les conséquences de la défaillance d'une cellule ne sont pas les mêmes selon le montage. Grâce aux différents interrupteurs, la cellule est isolée et remplacée au sein de la structure par la cellule en redondance, pour les montages 1 et 2. La colonne où se trouve la cellule défaillante se voit substituée par la colonne redondante dans le montage 0. Enfin, dans le montage 3, la cellule ne peut simplement plus être utilisée, dans l'optique d'une affectation dynamique des ressources.

De la même manière les conséquences de la défaillance de plusieurs cellules, ainsi que le seuil pénalisant ne sont pas les mêmes selon les montages. Pour le montage 0, le système devient défaillant dès qu'une seconde cellule devient défaillante. Pour les montages 1 et 3, si l'on s'interdit de sur-solliciter les cellules non défaillantes en ne leur permettant pas de débiter ou recevoir plus d'une unité de courant, il est possible de fonctionner en mode dégradé 2 tant qu'il y a moins de deux cellules

défaillantes par ligne. Pour le montage 2, toute cellule redondante activée devient un maillon faible. Tant qu'aucune ne défaille, le système est opérationnel.

L'impact de la probabilité de commutations et du taux de défaillance en attente peut, par ailleurs, être observé, par l'ajout d'un taux de disponibilité A, au sein des équations (5), (7) et (9) en multiple du facteur relatif à la redondance passive.

En reprenant le principe qui a prévalu à la définition du modèle 2, à redondance maximale, à savoir considérer une architecture avec autant de cellules redondantes que de cellules de base, il peut être également intéressant de s'interroger sur une structure maximale pour les montages 1 et 3. Celle-ci se concrétise par l'adjonction de $(m-1)$ cellules redondantes pour chaque ligne comprenant $(m-1)$ cellules de base. Les formules générales de la fiabilité et du MTTF sont données par les équations (11) et (12), pour un montage de n lignes.

$$R_3^{rddMax}(t) = e^{-n \cdot (m-1) \cdot \lambda \cdot t} \cdot \sum_{|\vec{k}|=n} \left[\binom{n}{\vec{k}} \cdot \prod_{i=0}^{m-1} \left(\frac{(n \cdot \lambda \cdot t)^{k_i}}{i!} \right) \right] \quad (11)$$

$$MTTF_3^{rddMax} = \int_0^{+\infty} e^{-n \cdot (m-1) \cdot \lambda \cdot t} \cdot \sum_{|\vec{k}|=n} \left[\binom{n}{\vec{k}} \cdot \prod_{i=0}^{m-1} \left(\frac{(n \cdot \lambda \cdot t)^{k_i}}{i!} \right) \right] \cdot dt \quad (12)$$

Pour un système ne comprenant qu'une seule ligne, le MTTF est assez simple à calculer, il vaut (13) :

$$MTTF_3^{rddMax}(1\text{ligne}) = \frac{m}{(m-1) \cdot \lambda} \quad (13)$$

Il est à noter dans ce cas que la fiabilité d'une ligne sera toujours au moins supérieure à celle d'une cellule seule, comme le montre la figure 10, présentant la fiabilité d'une ligne en architecture C-3C pour un taux de défaillance instantané λ de 10^{-3} déf/h, en fonction du courant maximal à débiter (en unités de courant). Pour que la structure puisse débiter $(m-1)$ unités de courant, elle est ici constituée de $(m-1)$ cellules de base et d'autant de cellules redondantes, associées selon le principe de la figure 6. Autrement dit, avec une telle architecture, la fiabilité d'une ligne sera toujours au moins égale à celle d'une cellule seule. Bien entendu, son association en série de n lignes dégradera la fiabilité globale.

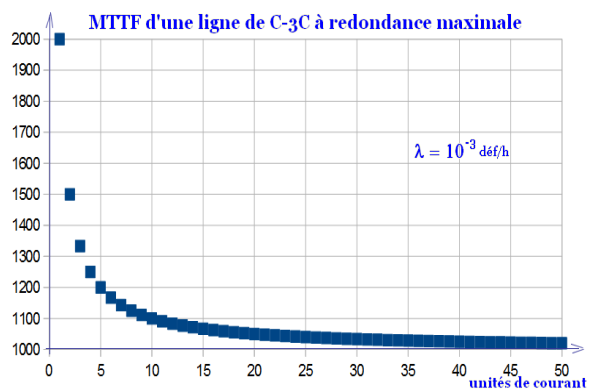


Figure 10 – évolution du MTTF d'une ligne de C-3C montée en redondance maximale.

6 – Vérifications

Les simulations des chaînes de Markov montrent que les résultats concordent avec les valeurs issues du calcul. Dans le détail, le graphe du modèle 0, comprenant m branches et devant fournir $(m-1)$ unités de courant, se résume en trois états avec une transition liée à la défaillance d'une cellule quelconque (figure 11). Dans l'état initial, la batterie fonctionne avec ses $(m-1)$ branches de base. Dès qu'une cellule dans une branche quelconque défaille, la branche entière est remplacée par la branche en redondance. L'état actif devient l'état « 1 » de la figure 11. Puis à la première défaillance suivante, la batterie n'est plus opérationnelle. L'état final comprend au minimum deux colonnes en défaut.

exemple avec $n=3, m=4$:

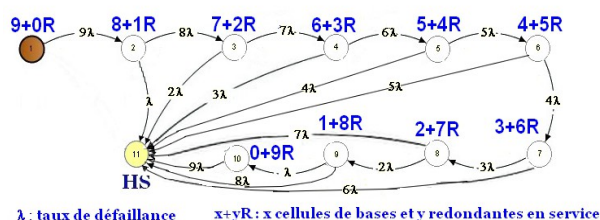


Figure 12 – chaîne de Markov du modèle 2.

exemple avec $n=3, m=4$:



Figure 11 – chaîne de Markov du modèle 0.

exemple avec $n=3, m=4$:

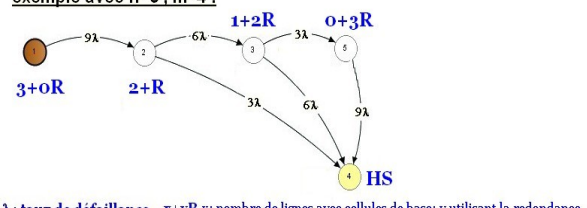


Figure 13 – chaîne de Markov des modèles 1 et 3.

Le montage avec redondance maximale induit un graphe dont la taille est liée au nombre de cellules avec, outre l'état initial et l'état final hors service, une succession d'états correspondant à la mise en service d'un élément redondant pour 1 à $n^*(m-1)$ cellules (figure 12).

Enfin, la chaîne de Markov de la structure C-3C comprend autant d'éléments intermédiaires que de lignes dans la batterie, comme montré pour $n=3$ et $m=4$ (permettant de produire un courant de 3 unités), en figure 13.

Il est possible de distinguer, dans les chaînes de Markov précédentes le taux de défaillance des cellules en attente et le taux des cellules de base. Par exemple, dans le cas de la figure 12, les transitions s'opérant entre, d'un côté, les états 2 à 10 et, de l'autre côté, l'état final, sont conditionnées par les taux de défaillance des cellules en redondance. Les autres transitions le sont par celui des cellules de base, si toutes les cellules de bases sont identiques.

Le Tableau 1 présente les résultats des calculs pour différents nombres de lignes et de colonnes, pour chaque schéma. Le C-3C présente toujours une fiabilité comprise entre la structure à une seule colonne redondante et le montage avec un nombre de cellules redondantes égal au nombre de cellules actives, ce qui indique que cette redondance est mieux utilisée.

7 – Conclusion

En conclusion, la nouvelle structure C-3C présente une fiabilité correcte et efficiente car intermédiaire entre celle d'une structure comprenant une colonne redondante (toujours supérieure) et celle d'une structure à redondance maximale (toujours inférieure). Lorsque le nombre de lignes croît, le montage en C-3C est plus performant que le modèle de base. Lorsque le nombre de colonnes croît, il existe un optimum économique entre fiabilité et surcoût lié à la redondance. Pour atteindre cette performance, il nécessite moins de cellules redondantes : 3 fois moins si l'application demande un courant valant 3 fois le courant nominal d'une cellule, 5 fois moins pour 5 fois le courant nominal et ainsi de suite.

MARKOV

CALCUL

Modèle 0 – une colonne redondante

N \ m	1	2	3	4	5	10		1	2	3	4	5	10
1	1998	1001	667	500	400	200		2000	1000	667	500	400	200
2	1000	500	333	250	200	100		1000	500	333	250	200	167
3	667	333	222	167	133	66,7		667	333	222	167	133	66,7
4	500	250	167	125	100	50,1		500	250	167	125	100,0	50,0
5	400	200	133	100	80,0	40,0		400	200	133	100	80,0	40,0

Modèle 2 – redondance maximale

N \ m	1	2	3	4	5	10		1	2	3	4	5	10
1	1998	1126	963	805	702	549		2000	1250	963	805	702	466
2	1126	805	708	531	549	315		1250	805	629	531	466	334
3	963	708	578	503	370	252		963	629	495	420	370	252
4	805	531	503	357	315	216		805	531	420	357	315	215
5	702	549	370	315	277	191		702	466	370	315	278	191

Modèles 1 et 3 – Cea et C3C

N \ m	2	3	4	5	6	11		2	3	4	5	6	11
1	1998	1001	667	500	400	200		2000	1000	667	500	400	200
2	1250	625	417	313	250	125		1250	625	417	313	250	125
3	963	482	321	241	193	96,3		963	482	321	241	193	96,3
4	805	402	268	201	161	80,5		805	402	268	201	161	80,5
5	694	347	232	174	140	69,4		702	351	234	176	140	70,2

Table 1 – comparaison des calculs de MTTF sur les quatre modèles, avec l'équation théorique et avec la simulation markovienne.

Des dispositifs nécessitant une fiabilité importante pour une puissance forte, notamment dans le domaine de la mobilité électrique ou pour des applications de type drones d'observation, demandant d'optimiser le poids, la gestion de l'énergie et la durée d'utilisation, constituent un applicatif possible pour cette architecture. Utiliser le C-3C dans une batterie sujette à des problèmes de hausse de température permet de pouvoir disposer de plus d'options de configurations internes pour n'utiliser que des cellules présentant une température adéquate.

La fiabilité d'un C-3C est la même qu'une architecture en série de parallèle (modèle 1), pour peu que les commutations ne grèvent pas le fonctionnement de la batterie. Le C-3C est pénalisé par son grand nombre d'interrupteurs. Cependant, c'est surtout là un atout majeur pour pouvoir reconfigurer en phase opérationnelle l'association des cellules sollicitées tout en permettant de soulager les plus faibles, dont l'usage pénaliserait la durée de vie en réduisant fortement leur SoH. En outre, grâce aux reconfigurations possibles, certaines cellules peuvent être équilibrées entre elles tandis que d'autres supportent le courant de la charge, quand la batterie fonctionne en-deçà de la puissance maximale.

Après cette étude d'évaluation de la fiabilité, pour poursuivre l'étude de ce montage, et en quantifier les apports, il convient maintenant de vérifier si la structure permet de disposer d'une plus grande disponibilité pour la batterie. En ne considérant pas les aspects maintenabilité de la batterie, la disponibilité s'entend ici comme la capacité à répondre au cahier des charges, y compris avec la détermination de stratégies assurant de fournir la puissance attendue en mode dégradé. L'objectif de cette étude est d'assurer la meilleure disponibilité en optimisant l'usage des ressources disponible, sans les remplacer en cas de défaillance. Pour cela, un algorithme permettant d'allouer les cellules pour répondre aux besoins de la charge tout en assurant l'équilibrage en interne doit être défini. Cet algorithme sera testé tant en fonctionnement nominal (pleine puissance), qu'en modes dégradés 1 et 2. Dans le premier cas, il s'agit de permettre un fonctionnement soit avec équilibrage des cellules non mises à contribution, soit une répartition des cellules actives permettant d'en limiter le vieillissement. En mode dégradé 2, il s'agit surtout de limiter le vieillissement. Ce même algorithme sera déployé sur la structure 1 afin de juger de l'amélioration apportée par l'architecture redistributive du C-3C.

Si tel était le cas, cette amélioration de la durée de vie de la batterie serait à examiner en regard du surcoût de fabrication induit par trois fois plus d'interrupteurs, leur coût étant en relation avec le courant qu'il doivent supporter. Un dernier aspect devra être examiné finement : celui des transitions et de la solution pour éviter les micro-coupures si le transistor qui doit fermer un chemin au préalable ouvert réagissait plus lentement que celui qui ouvre le circuit qui débitait ou recevait du courant.

Références

- [1] K. A. Smith, C. D. Rahn and C. Y. Wang, « Model-Based Electrochemical Estimation and Constraint Management for Pulse Operation of Lithium Ion Batteries, » in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 654-663, May 2010
- [2] A. F. Burke, « Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, » in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806-820, April 2007.
- [3] B. Multon, Hamid Ben Ahmed. « Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ? » revue 3EI, 2007, pp.6-16
- [4] H. Kim et K. G. Shin, « Scheduling of Battery Charge, Discharge, and Rest », 30th IEEE Real-Time Systems Symposium, 2009, RTSS 2009
- [5] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, « A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles », *Journal of Power Sources* n°236, pp°272-288, 2013
- [6] K. H. Chen and Z. D. Ding, « Lithium-ion battery lifespan estimation for hybrid electric vehicle, » *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, Qingdao, 2015, pp. 5602-5605.
- [7] A. Devie. « Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la stabilité ». Electric power. Thèse soutenue à l'Université Claude Bernard - Lyon 1, 2012
- [8] R. German, « étude du vieillissement calendaire des supercondensateurs et impact des ondulations de courant haute fréquence ». Electric power. Thèse soutenue à l'Université Claude Bernard – Lyon 1, 2013
- [9] R. Xiong, H. He, F. Sun, K. Zhao, « Online Estimation of Peak Power Capability of Li-Ion Batteries in Electric Vehicles by a Hardware-in-Loop Approach », *Energies* n°5, p°1455-1469, 2012, ISSN 1996-1073
- [10] K. L. Man, K. Wan, T. O. Ting, C. Chen, T. Krilavičius, J. Chang, et S. H. Poon, « Towards a hybrid approach to SoC estimation for a smart Battery Management System (BMS) and battery supported Cyber-Physical Systems (CPS) », présenté à 2012 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC), 2012, p. 113-116
- [11] V. R. H. Lorentz, M. M. Wenger, J. L. Grosch, M. Giegerich, M. P. M. Jank, M. Marz, et L. Frey, « Novel cost-efficient contactless distributed monitoring concept for smart battery cells », 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2012, p. 1342-1347
- [12] S. Bourlot, P. Blanchard, S. Robert, « Investigation of aging mechanisms of highpower Li-ion cells used for hybrid electric vehicles », *Journal of Power Sources* n°196, pp°6841-6846, 2011
- [13] S. Wang, Y. Wang, M. Lv and X. Ye, « A reliability assessment system for power MOSFET using multi-parameters, » *2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Tucson, AZ, USA, 2016, pp. 1-7
- [14] C. Savard, A. Sari, P. Venet, L. Piétrac, E. Niel, « C-3C: a structure for high reliability with minimum redundancy for batteries » 2016 IEEE International Congress of Industrial Technology, Taipei, Taiwan, 2016
- [15] Y.-S. Lee and M.-W. Cheng, « Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery strings, » *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1297–1307, Oct. 2005
- [16] D. Olivier Tremblay, "Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, pp. 289–298, 2009
- [17] R. Klein, N. A. Chaturvedi and A. Kojic, « Electrochemical model based observer design for a lithium-ion battery, » *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 289–301, Mar. 2013
- [18] N. Wade, P. Taylor, P. Lang and J. Svensson, « Energy storage for power flow management and voltage control on an 11kV UK distribution network, » *Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on, Prague, Czech Republic*, 2009, pp. 1-4.
- [19] S. Shili, A. Hijazi, P. Venet, A. Sari, X. Lin-Shi and H. Razik, « Balancing circuit control for supercapacitor state estimation, » *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015 Tenth International Conference on*, Monte Carlo, 2015, pp. 1-7.
- [20] A. Lièvre, « Développement d'un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules "mild hybrid" : détermination des indicateurs d'état (SoC, SoH et SoF). Energie électrique. Université Claude Bernard - Lyon 1, 2015

Mots-clefs

batterie, système de stockage de l'énergie électrique, reconfiguration, fiabilité, matrice, redondance