

# Pris en compte du vieillissement pour la modélisation d'une source hybride Batterie/ Supercondensateur

Tedjani MESBAHI<sup>1</sup>, Nassim RIZOUG<sup>1</sup>, Patrick BARTHOLOMEUS<sup>2</sup>, Philippe LEMOIGNE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ecole Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile, Rue Georges Charpak BP76121, 53061 LAVAL Cedex 9 – France

<sup>2</sup>L2EP-Ecole Centrale de Lille - Cité Scientifique BP 48 - 59851 Villeneuve d'Ascq Cedex, Lille, France

Contact: [tedjani.mesbahi@estaca.fr](mailto:tedjani.mesbahi@estaca.fr)

**RESUME** – L'un des principaux verrous technologiques dans le domaine des véhicules propres est lié à la source de stockage de l'énergie électrique. C'est dans ce contexte que les constructeurs se mobilisent pour améliorer les technologies de batteries et pour prédire précisément leurs comportements. Le travail proposé ici traite de la modélisation de sources de stockage hybrides composées d'une association batterie lithium-ion et supercondensateurs. L'objectif est de permettre la prise en compte du vieillissement des composants de ce système. Le développement d'un modèle incluant les aspect électrique et thermique permet d'évaluer la dégradation progressive des performances des sources du système. Les résultats de simulation montrent les performances du modèle actif pour une source hybride et confirment la faisabilité de notre démarche. L'outil ainsi développé est destiné à comparer les méthodes de gestion des sources dans un système de stockage hybride mais également à en développer de nouvelles en intégrant le paramètre de durée de vie pour la conception de ces systèmes.

**Mots-clés**— Batteries Li-ion, supercondensateurs, modèle électrothermique, modèle du vieillissement, source hybride, véhicule électrique.

## 1. INTRODUCTION

Le secteur des transports est à l'origine de 27% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. Il représente ainsi l'une des principales causes du réchauffement de notre planète [1]. C'est pour cette raison que les constructeurs automobiles ont redoublé d'effort afin de mettre à la disposition du public des voitures propres (véhicules hybrides et électriques). Néanmoins, les sources de stockage d'énergie utilisées dans les véhicules tout électrique ne permettent pas de rivaliser avec leurs homologues thermiques (autonomie faible, périodes de recharge important, prix d'achat élevé) [2]. Dans ce contexte, les technologies dites lithium-ion sont aujourd'hui incontournables. En effet, ces technologies ont une très bonne densité d'énergie, ne possèdent pas d'effet mémoire et ont une durée de vie importante [3]. Alors qu'aujourd'hui, 96% du marché des véhicules hybrides est équipé de batteries à hydrure métallique de nickel (NiMH), d'ici 10 ans, on prévoit que 70% des véhicules hybrides et 100% des tout électriques, devraient fonctionner avec des batterie lithium-ion [4]. Afin d'améliorer la durée de vie et l'efficacité de la source d'énergie

embarquées d'un véhicule électrique, une hybridation d'une batterie lithium-ion avec supercondensateur peut être une solution intéressante. On peut obtenir des dispositifs de stockage d'énergie avec à la fois une densité de puissance élevée tout en maintenant la capacité de stockage d'énergie [5][6]. De plus, l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie hybrides, dans le domaine de traction électrique, peut permettre, dans certains cas, la diminution de la masse et la minimisation des contraintes de puissances appliquées aux batteries [1].

Ce papier présente une étude sur l'hybridation des batteries lithium-ion avec une source de puissance, le supercondensateur, pour l'alimentation d'un véhicule tout électrique. Pour cette étude, le développement d'un modèle actif permet de prendre en considération les comportements électrothermiques ainsi que le vieillissement du système. La modélisation et le dimensionnement des packs batteries lithium-ion et supercondensateurs sont détaillés dans cet article. La méthode de gestion d'énergie basée sur la limitation de puissance de la batterie est présentée. Enfin, les résultats de simulation de notre modèle global de la source hybride sont présentés.

## 2. LA SOURCE HYBRIDE BATTERIE/ SUPERCONDENSATEUR

L'idée principale de ce concept de source hybride consiste à associer à la source d'énergie, une source de puissance [7] afin d'optimiser l'utilisation des deux sources. Cette solution peut présenter de meilleures performances notamment en termes de coût, de dimensionnement ou de durée de vie qu'un système uniquement composée de batteries, comme c'est le cas de la plupart des véhicules électriques actuels.

### 2.1. Caractéristiques de la source hybride

#### ➤ Batteries lithium-ion

Les batteries lithium-ion représentent la nouvelle génération de systèmes de stockage pour véhicules électriques. Pour cela, de nombreuses études sont faites par les fabricants de véhicules mais également de batteries, et l'émulation est forte dans cette période de révolution technologique automobile [3]. Différentes technologies Lithium-ion sont

disponibles sur le marché avec des niveaux de performances différents. Cette différence s'explique par le fait que l'électrode positive de ces technologies peut être constituées de différents matériaux, tels que : le Cobalt, le Nickel et le Manganèse ou bien le Phosphate de Fer [8]. Dans notre cas, la technologie lithium-ion à basse de manganèse (NMC) 40 HED du fabricant des batteries KOKAM a été choisie pour composer la source de stockage hybride. Le tableau (1) présente les caractéristiques de technologie sélectionnée [9].

Tableau 1: Caractéristiques de batterie Li-ion KOKAM 40HED

| Batterie                         | Valeur |
|----------------------------------|--------|
| Tension nominale (V)             | 3.7    |
| Capacité nominale (Ah)           | 40     |
| Energie spécifique ( Wh /Kg)     | 133.8  |
| Courants Max charge/décharge (A) | 40/40  |
| Masse (kg)                       | 0.935  |
| Volume ( l)                      | 0.42   |

➤ Supercondensateurs

Le supercondensateur est un système de stockage qui ne comporte pas de réaction électrochimique [10]. Il présente donc une très grande durée de vie. Il a une puissance spécifique très élevée mais une énergie spécifique bien plus faible que les batteries [11]. Dans cette étude, la technologie Maxwell 350F/2.7V dont les caractéristiques sont données dans le Tableau (2) est utilisé [12].

Tableau-2: Caractéristiques de la technologie Maxwell 350/2.7 supercondensateur.

| Scp                              | Valeur  |
|----------------------------------|---------|
| Tension nominale (V)             | 2.7     |
| Capacité nominale (F)            | 350     |
| Courants Max charge/décharge (A) | 840/840 |
| Densité de puissance ( W/Kg )    | 4300    |
| Energie spécifique ( Wh /kg)     | 5.062   |
| Masse ( Kg )                     | 0.063   |
| Volume ( l)                      | 0.053   |

2.2. Architecture de la source de stockage d'énergie

Il existe différentes possibilités pour associer ces sources d'énergie électriques : parallèle ou série avec un ou deux convertisseurs[13]. Nous avons choisi, pour cette étude, l'architecture parallèle présentée en Figure.1. Ce choix est justifié par la simplicité et le bon rendement énergétique de cette configuration. Le convertisseur utilisé est de type

abaisseur ce qui permet à la tension du supercondensateur de varier entre USC\_max et USC\_min [1] .

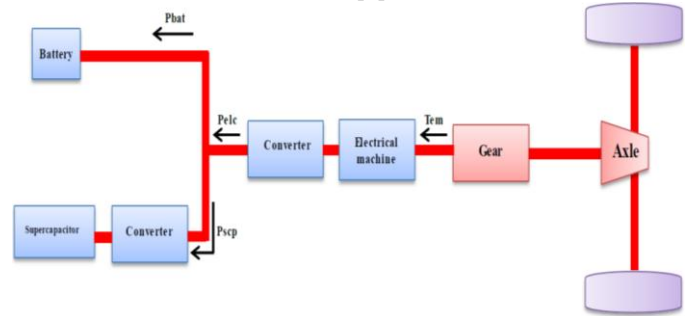


Fig.1 Architecture parallèle avec un convertisseur DC/DC

3. MODELE DYNAMIQUE DU VEHICULE ELECTRIQUE

Les performances critiques pour le dimensionnement de la chaîne de traction du véhicule sont : la vitesse maximale, la pente maximale ainsi que l'accélération maximale. De plus, dans le domaine du véhicule électrique, l'autonomie doit être considérée comme un facteur de performances déterminant.

La puissance et l'énergie sont imposées par la dynamique du véhicule électrique sous des conditions (cycle de vitesse et profil de pente, masse du véhicule) définissant le trajet à parcourir. [7].

Les cycles de conduite sont composés d'un profil de vitesse et d'un profil de pente de la route. Actuellement, différents cycles normalisés et non normalisés existent (UDC, NEDC, ARTEMIS).

Dans notre cas, le cycle ARTEMIS (Assesment and Reliability of Transport Emission Models Inventory Systems) est utilisé. La pente moyenne est fixée à 2,5%. Ce cycle possède des dynamiques de conduite beaucoup plus proches de la réalité que les cycles UDC et NEDC [1]. La Figure.2 présente les cycles ARTEMIS urbains et routiers utilisées.

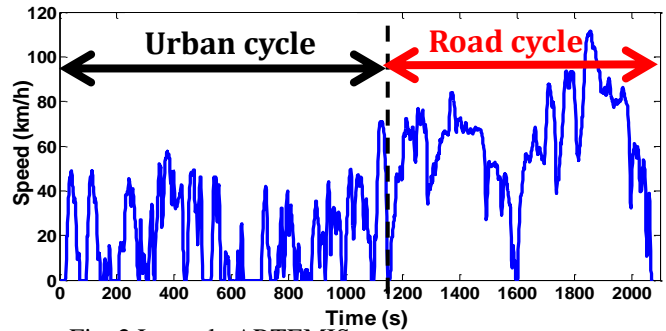


Fig. 2 Le cycle ARTEMIS

Un modèle dynamique du véhicule électrique a été développé afin de définir la puissance et l'énergie électrique nécessaire pour le dimensionnement de la source hybride batterie/supercondensateurs. L'entrée de ce modèle est le profil de conduite, et la sortie est la puissance électrique.

La force de traction nécessaire au déplacement du véhicule électrique (équation 1) est donnée par la somme des forces résistante à l'avancement ajoutée à la force d'accélération  $F_{acc}$  présenté dans la Figure.3.

$$F_{res} = F_{aero} + F_{roll} + F_{gx} + F_{acc} \quad (1)$$

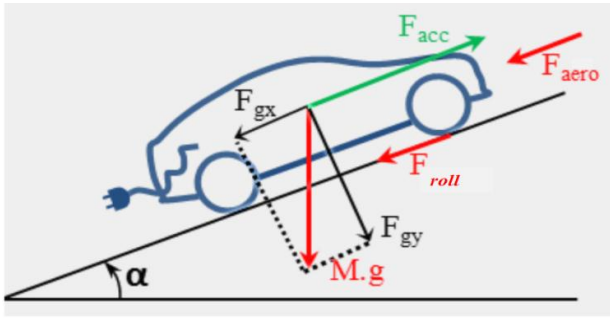


Fig. 3 Forces sur un VE en roulement

Les forces résistantes au roulement, détaillées par l'équation (2), sont :

- La force aérodynamique  $F_{aero}$ ,
- La force  $F_{roll}$  due au contact des roues sur la chaussée
- La force gravitationnelle  $F_{gx}$  due à la pente  $\alpha$ .

$$\begin{cases} F_{aero} = 0.5 \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V_{veh} \\ F_{roll} = M \cdot g \cdot (C_0 + C_1 \cdot V_{veh}^2) \\ F_{gx} = M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \\ F_{acc} = M \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

Avec,  $\rho$  densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>),  $S$ : la surface du véhicule (m<sup>2</sup>),  $C_0$  et  $C_1$  sont les coefficients de résistance au roulement,  $\alpha$  est la pente de la chaussée,  $V_{veh}$  : vitesse du véhicule et  $M$  la masse du véhicule.

Pour la valider cette étude, nous avons sélectionné les caractéristiques d'un véhicule électrique urbain de type « Bluecar ». Les paramètres sont donnés dans le Tableau. 3. A noter que la masse  $M$ , renseignée dans ce tableau, représente la masse de tous les organes du véhicule électrique (châssis, habitacle ...), mais n'inclut pas la masse du système de stockage d'énergie.

Tableau-3: paramètres du véhicule électrique urbain de type « Bluecar ».

| Paramètres   | Valeur |
|--|--------|
| Masse du VE sans SSE (kg)                                | 860    |
| Surface frontale (m <sup>2</sup> )                       | 2.75   |
| Densité de l'air (kg/m <sup>3</sup> )                    | 1.2    |
| Coefficient de pénétration dans l'air                    | 0.3    |
| Coefficient de résistance au roulement à l'état statique | 0.008  |

La Figure 4 montre la puissance et l'énergie nécessaires pour la propulsion du véhicule électrique selon le cycle de conduite ARTEMIS. La puissance positive correspond à la puissance que le système de propulsion transmet aux roues.  $P_{V\_cons}$  étant la valeur maximale de cette puissance consommée. La partie négative représente la puissance récupérée durant les phases de freinage et  $P_{V\_rec}$  est la valeur maximale de puissance récupérable par la source de stockage d'énergie [1].

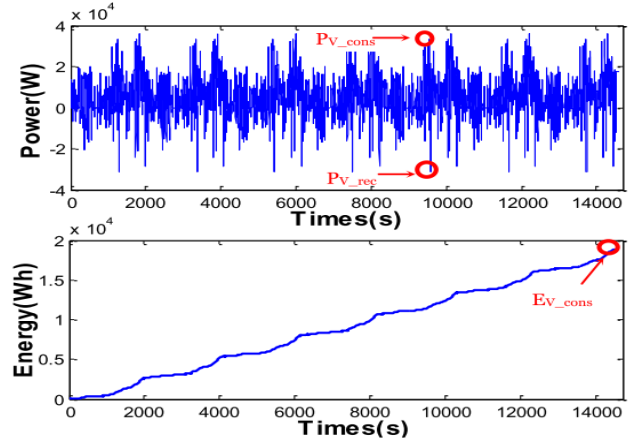


Fig. 4 Profils de puissance et d'énergie pour un VE

Le paramètre  $E_{V\_cons}$  représente la valeur maximale de l'énergie consommée nécessaire à l'autonomie du VE. Pour atteindre une distance désirée de 150Km, le cycle de conduite ARTEMIS est répété 7 fois.

#### 4. DIMENSIONNEMENT DE LA SOURCE HYBRIDE DU VE

##### 4.1. Méthode de gestion d'énergie

On trouve dans la littérature un grand nombre des stratégies de gestion de l'énergie destinées aux sources de stockage hybride [14]. La méthode utilisée dans notre cas fait partie des stratégies à base de règles déterministes. Cette stratégie, que nous nommons « limitation de puissance » permet de limiter les flux de puissance traversant le pack de batteries en fonction des limites de courants données par le fabricant [15]. En revanche, le reste de la puissance demandée par le VE est fourni par les supercondensateurs [1]. Le principe de cette stratégie est présenté en Figure 5.

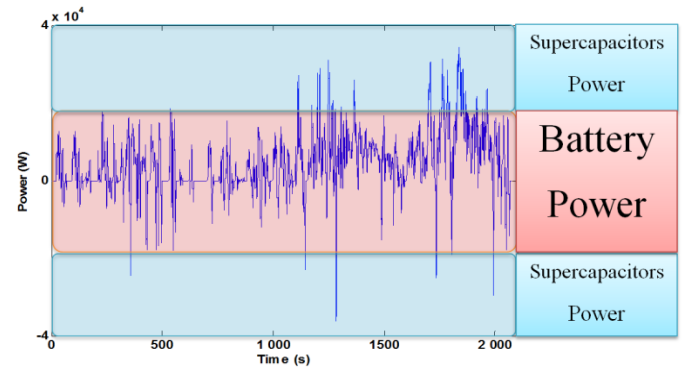


Fig. 5 La méthode de gestion d'énergie « limitation de puissance »

#### 4.2. Dimensionnement du pack de batteries

Le pack de batteries est dimensionné pour assurer l'énergie pour 150 km d'autonomie et le cycle de conduite ARTEMIS.

En utilisant la configuration de la source hybride montrée dans Figure.1, nous pouvons déterminer le nombre de cellules en série pour une branche du pack de batteries Nb avec l'équation suivante :

$$N_{bat\_s} = \frac{U_{bus}}{U_{cel\_bat}} \quad (3)$$

$U_{bus}$  : Tension de bus continu,  $U_{cel\_bat}$  : Tension nominale de cellule de batterie lithium-ion .

Afin de trouver le nombre de branches du pack de batteries Nb, l'énergie du pack batteries doit être définie:

$$E_{bat} = N_{bat\_s} \cdot N_{bat\_p} \cdot C_{cel\_bat} \cdot U_{cel\_bat} \cdot DOD \quad (4)$$

$C_{cel\_bat}$  : Capacité nominale de cellule de batterie lithium-ion. La profondeur de décharge DOD est fixé dans notre cas à 80%.

Le nombre de branches du pack de batteries Nb est donné par :

$$N_{bat\_b}^E = \frac{E_{bat\_cons}}{N_{bat\_s} (E_{cel\_bat} - \alpha_{bat\_cons} w_{cel\_bat} 1.4)} \quad (5)$$

La masse et le volume du pack de batteries sont calculé par :

$$\begin{cases} W_{bat} = (1 + \epsilon_{bat}) \cdot N_{bat\_s} \cdot N_{bat\_p} \cdot w_{cel\_bat} \\ V_{bat} = (1 + \gamma_{bat}) \cdot N_{bat\_s} \cdot N_{bat\_p} \cdot v_{cel\_bat} \end{cases} \quad (6)$$

Avec :

$$\epsilon_{bat} = \gamma_{bat} = 0.4$$

$w_{cel\_bat}$  et  $v_{cel\_bat}$  sont respectivement la masse et le volume des cellules de batteries lithium-ion.

#### 4.3. Dimensionnement du pack de supercondensateurs

La tension du pack de supercondensateurs varie entre une tension maximale  $U_{Bus}$  et minimale de  $\frac{1}{2}U_{Bus}$  ; l'énergie utile représente 75% de l'énergie stockée dans les supercondensateurs. L'énergie utile disponible dans un pack de  $N_{sc\_s}$  éléments en série et  $N_{sc\_p}$  branches est exprimée par :

$$N_{sc\_p} = \frac{8 \cdot \Delta E_{sc}}{3 \cdot U_{sc\_max}^2} \cdot \frac{N_{sc\_s}}{C_{cel\_sc}} \quad (8)$$

Où  $C_{cel\_sc}$  et  $U_{sc\_max}$  sont respectivement la capacité nominale et la tension maximale d'un élément supercondensateur.

La masse et le volume du pack de supercondensateurs sont calculé par :

$$\begin{cases} W_{sc} = (1 + \epsilon_{sc}) \cdot N_{sc\_s} \cdot N_{sc\_p} \cdot w_{cel\_sc} \\ V_{sc} = (1 + \gamma_{sc}) \cdot N_{sc\_s} \cdot N_{sc\_p} \cdot v_{cel\_sc} \end{cases} \quad (9)$$

Avec  $\epsilon_{bat} = \gamma_{bat} = 0.4$  ; et  $W_{cel\_sc}$ ,  $V_{cel\_sc}$  sont la masse et le volume de la cellule de supercondensateur, respectivement.

### 5. MODELE DE LA SOURCE HYBRIDE BATTERIE/SUPERCONDENSATEUR

Les modèles de la batterie et du pack supercondensateur sont utilisés pour simuler le comportement de la source de stockage hybride dans les applications de véhicules électriques. Dans ce contexte, le modèle développé est une combinaison du modèle électrothermique avec un modèle du vieillissement de chaque composant de stockage. Par conséquent, on peut utiliser ce modèle pour tester différents cycles de conduite ainsi stratégies de gestion d'énergie de la source de stockage hybride. L'étude de l'impact de la température et des niveaux de tension sur la durée de vie de cette source devient possible avec le modèle développé.

Figure.6 montre le schéma de principe de combinaison des modèles.

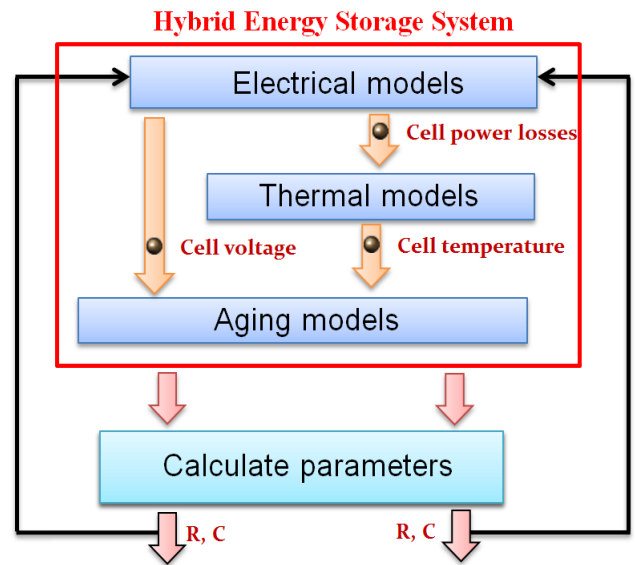


Fig. 6 Schéma de principe de combinaison des modèles

#### 5.1. Modèle de batterie lithium-ion

Il existe plusieurs modèles de la batterie, comme par exemple ceux qui sont basés sur des lois électrochimiques, des modèles de Thévenin et aussi des circuits de Randles [16][17].

Le modèle de batterie choisi est basé sur une variante des circuits équivalents. Ce modèle permet de simuler les dynamiques électriques et chimiques des batteries lithium-ion avec précision [18].

Figure 7 présente le modèle de la batterie lithium-ion. Nous retrouvons «  $U_{oc}$  » la tension à vide de la batterie (Open Circuit Voltage), la branche ( $R_{dl}$   $C_{dl}$ ) présente le phénomène de transfert de charge à l'intérieur de la batterie [19] .

La modélisation des processus de diffusion dans une cellule batterie est réalisée par une autre branche ( $R_{dif}$   $C_{dif}$ ). Enfin, la résistance série  $R_0$  correspond aux résistances de connectique de chacune des électrodes et de électrolyte [20] .

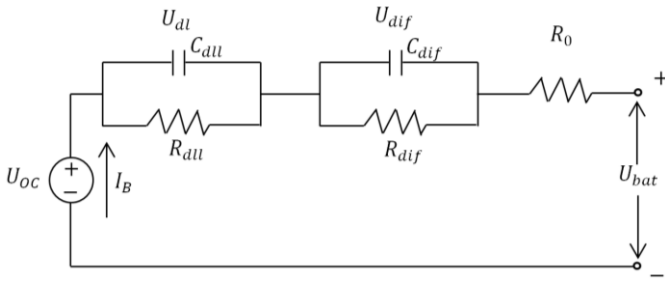


Fig. 7 Modèle de la batterie lithium-ion

La Figure 8 présente les mesures de spectroscopie d'impédance de la batterie lithium-ion Kokam SLPB 40 Ah. Le tracé de Nyquist de cette Figure est constitué de deux zones bien distinctes :

Pour les hautes fréquences, nous avons un demi-arc de cercle correspondant aux phénomènes de transfert de charge. La seconde zone de basses fréquences, constituée d'une droite de pente 45° représente les phénomènes de diffusion dans le plan Nyquist.

La Figure 8, montre aussi l'influence de l'état de charge (SOC) de la batterie sur son impédance.

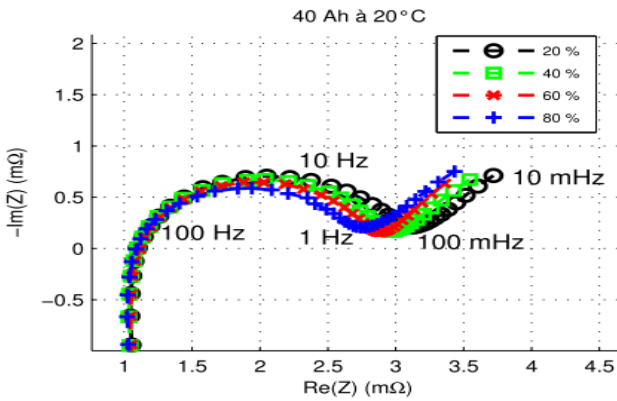


Fig. 8 Représentation des mesures de spectroscopie d'impédance Kokam SLPB 40 Ah [21]

A partir de l'évolution des températures, nous pouvons extraire un modèle thermique simple pour la prédétermination de la température des cellules de la batterie lithium-ion. Il peut être basé sur une ou plusieurs constantes de temps thermiques.

Dans notre cas, un modèle simple basé sur une seule constante de temps produit d'une résistance et d'une capacité thermiques  $R_{th}$ ,  $C_{th}$  est sélectionné Figure 9.

Le lien entre les modèles électrique et thermique est les pertes de puissance à l'intérieur de la batterie. Les pertes peuvent être exprimées par :

$$P_{loss} = R_i \cdot i_{R,i}^2 \quad (10)$$

La résistance thermique  $R_{th}$  est calculée par l'équation suivante :

$$R_{th} = \frac{1}{\frac{dQ_{gen}}{dt}} (T_{steady-state} - T_{amb}) \quad (11)$$

Où  $\frac{dQ_{gen}}{dt}$  est le chaleur dégagée équivalent aux pertes de puissance et  $T_{amb}$  la température ambiante.

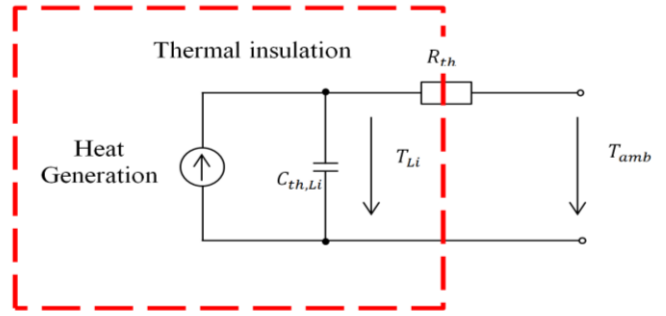


Fig. 9 Modèle thermique de la batterie lithium-ion

La durée de vie des batteries est un élément essentiel pour le développement des véhicules propres dans des conditions de coûts acceptables. Pour cela, la maîtrise de la durée de vie ainsi que la gestion des batteries lithium-ion sont des enjeux très importants [3].

Afin d'obtenir un modèle performant de la batterie lithium-ion pour le domaine de traction électrique, la dégradation de la capacité de la batterie est prise en compte par un modèle de vieillissement.

Ce modèle de durée de vie de batterie lithium-ion basé sur une approche semi-empirique a été publié par M. Ecker et al. En 2012 [22] et C. Guenther et al. en 2013 [23]. Il a été choisi pour cette étude afin d'évaluer la capacité et la résistance interne de la batterie. La dégradation de la capacité peut être exprimée par :

$$a_{bat}(t, V, T) = a_{init} \cdot [1 + c_a \cdot \sqrt{t} \cdot (c_T^{\Delta T} \cdot c_V^{\Delta V})] \quad (12)$$

Où  $a_{init}$  correspondant à la durée de vie nominale de la batterie.

$V$  et  $T$  sont la tension moyenne et la température de la cellule au lithium-ion. Les constantes  $T_0$ ,  $V_0$ ,  $\Delta T$  et  $\Delta V$  peuvent être choisies arbitrairement comme points de référence pour le modèle de vieillissement,  $c_a$ ,  $c_T$  et  $c_V$  sont les paramètres du modèle qui doivent être déterminés expérimentalement.

Ce modèle est utilisé pour l'évaluation de capacité de la batterie, la résistance interne ou les paramètres de l'impédance.

## 5.2. Modèle de supercondensateurs

L'analyse fréquentielle est un outil performant pour la caractérisation électrique de différents systèmes électroniques. De plus, l'impédance mesurée lors de l'étude du comportement dynamique des supercondensateurs, permet d'obtenir un modèle électrique exprimé dans le domaine fréquentiel [7]. Celui-ci peut être transposé dans le domaine temporel ou traduit par un circuit électrique équivalent [24].

Un modèle de supercondensateur de ligne de transmission publié par N, Rizoug et al. en 2010 [25] est sélectionné dans notre cas (Figure 10).



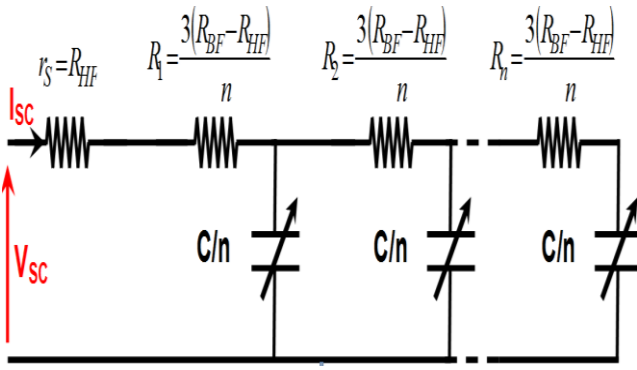


Fig. 10 Modèle de supercondensateur à ligne de transmission[24] [25]

La Figure 11 montre la comparaison entre la réponse fréquentielle d'un élément supercondensateur testé avec la réponse d'un modèle de ligne de transmission. Ce test est réalisé avec une plage de fréquence comprise entre 50mHz et 50Hz [25].

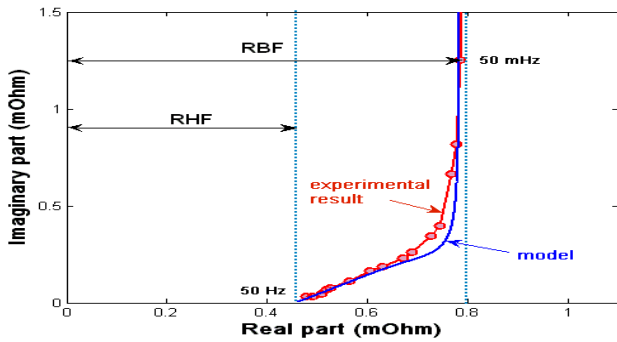


Fig. 11 Comparaison des résultats expérimentaux avec la réponse fréquentielle du modèle à ligne de transmission [24] [25]

La réponse du modèle à ligne de transmission avec la réponse expérimentale pour un essai à courant constant I=100A est présenté par la Figure 12.

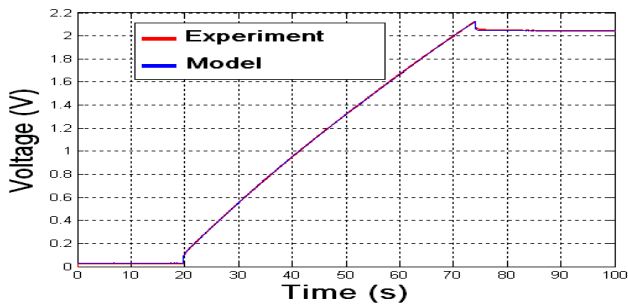


Fig. 12 Réponse avec un courant constant I=100A [25].

Pour une utilisation optimale des supercondensateurs, l'étude du comportement électrique est insuffisante. Pour cela, le modèle développé dans cette étude doit prendre en compte le comportement thermique.

Un modèle thermique à bass d'un circuit RC similaire au modèle utilisé pour la batterie lithium-ion (Figure 9) a été choisi.

La durée de vie des supercondensateurs est directement liée à leurs conditions d'utilisation. Elle dépend essentiellement du nombre de cycles 'charge-décharge', de la température et de la variation de tension [24].

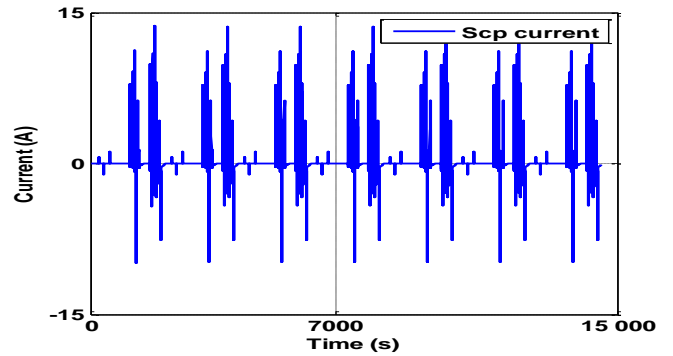
Un modèle de durée de vie proposé par O, Bohlen et al. en 2007 [26], [27] est utilisé pour l'évaluation de la capacité et de résistances internes. Ce modèle de vieillissement est également basé sur l'approche semi-empirique comme pour celui de la batterie. Le modèle de vieillissement des supercondensateurs est exprimé par :

$$a_{scp}(t, V, T) = a_{init} \cdot \left[ 1 + c_a \cdot t \left( c_T^{\frac{T-T_0}{\Delta T}} \cdot c_V^{\frac{V-V_0}{\Delta V}} \right) \right] \quad (13)$$

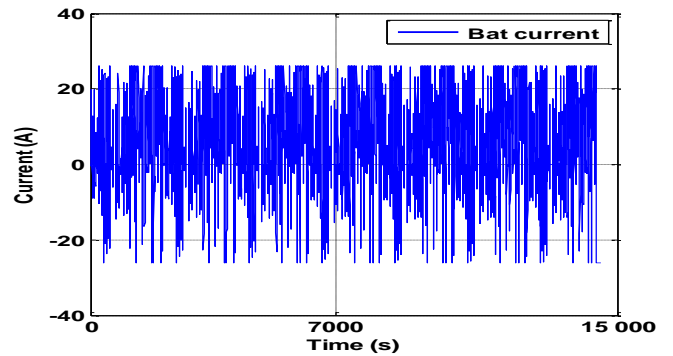
Avec V, T la tension et la température moyenne de chaque cellule supercondensateurs,  $c_a$ ,  $c_T$  et  $c_V$  sont des paramètres d'ajustement et  $a_{init}$  représente la durée de vie des supercondensateurs.

## 6. RESULTATS DE SIMULATION

Afin de valider le modèle de batterie/ supercondensateurs développé pour les applications de véhicules électriques. Plusieurs tests de simulation sur le logiciel MATLAB – SIMULINK ont été réalisés.



(a)

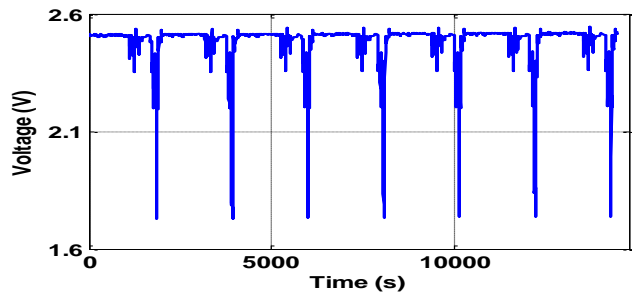


(b)

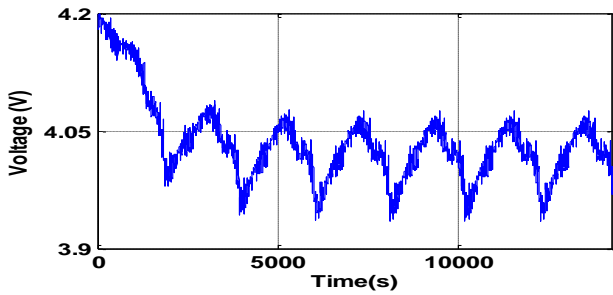
Fig. 13.a,b Courants des supercondensateurs et de batterie

Les courants des supercondensateurs et de batterie sont représentés dans la figure 13.a et b, Comme montré sur cette figure, la batterie doit assurer le courant de charge sur une plage de variation définie par ses limites maximales. Au-delà

de ces limites, le courant est fourni ou récupéré par le pack de supercondensateurs.



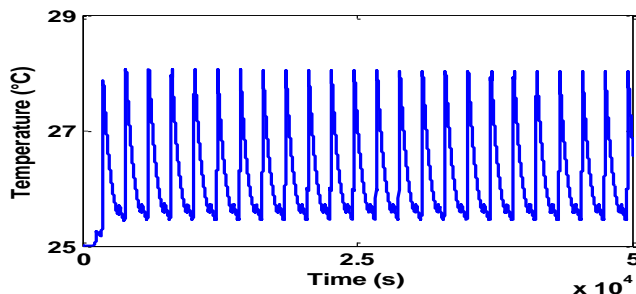
(a)



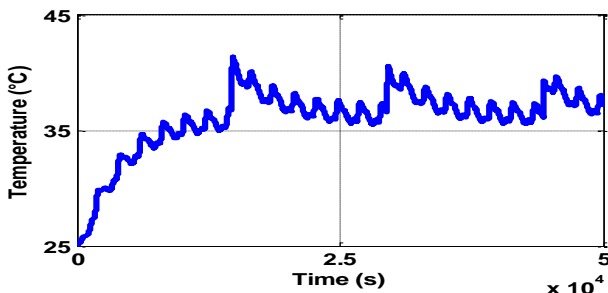
(b)

Fig. 14.a,b Tensions des supercondensateurs et de batterie

Les tensions des deux composants de stockage pendant une mission du VE sont représentées dans la figure. 14.a et b. La variation de la tension de la batterie ou des supercondensateurs est également liée au courant qui traverse le composant de stockage.



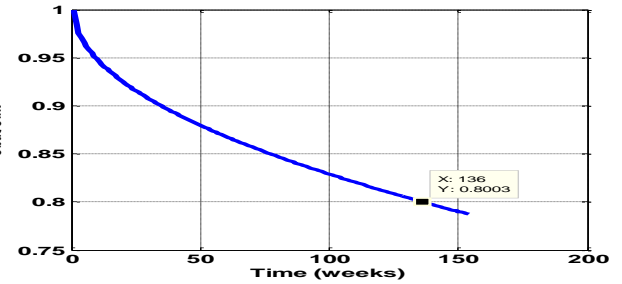
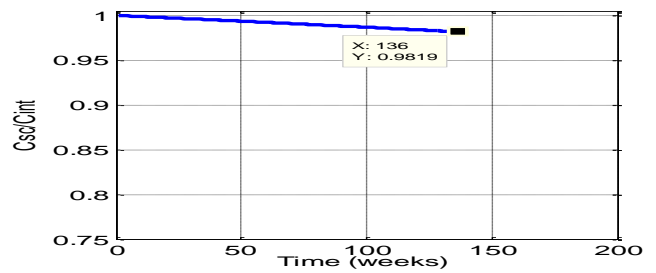
(a)



(b)

Fig. 15.a,b Réponses thermiques des supercondensateurs et de batterie.

La figure. 15.a et b montre l'évolution des températures des supercondensateurs et de batterie dont le régime stationnaire est obtenu au bout de quelques dizaines de minutes pour les supercondensateurs. Ce régime stationnaire est nettement plus long à obtenir pour les batteries.



(b)

Fig. 16.a,b Dégradation de capacité des supercondensateurs et de batterie.

Le vieillissement a pour conséquence la baisse de la capacité ou l'augmentation de la résistance de la source au fil du temps. Seule l'évolution de la capacité des supercondensateurs et des batteries est représentée en figure 16.a et b puisque, dans le cas présent, c'est le paramètre le plus influent sur le vieillissement.

La fin de vie des composants est fixée, par définition, à 20% de perte de capacité par rapport leur valeur initiale. Dans ce contexte, et comme le montre la figure 16, la fin de vie des batteries est obtenue après 136 semaines d'utilisation consécutive du système. Par contre, le vieillissement des supercondensateurs est estimé dans le même temps à seulement 1,8 %.

Ce modèle étant validé, l'objectif est maintenant de l'utiliser pour comparer les différentes stratégies de gestion de l'énergie de ces sources hybrides. Il pourra être également utilisé pour en tester de nouvelles où le critère de durée de vie pourrait être pris en compte. Cela peut être envisagé en gérant la répartition des contraintes imposées aux deux sources. Compte-tenu des résultats obtenus, il existe des marges de manœuvre en exploitant mieux les supercondensateurs. C'est ce vers quoi nous nous orientons actuellement.

## 7. CONCLUSIONS

Dans cet article, un modèle complet d'une source électrique hybride constituée d'une batterie lithium-ion et de supercondensateurs a été proposé. Celui-ci combine les aspects électrique, thermique, et permet d'évaluer le vieillissement de chacun des composants de stockage. Nous obtenons alors un

modèle complet du système de stockage du véhicule électrique.

On peut de cette manière évaluer l'impact de cycles de conduite du véhicule et des méthodes de gestion de l'énergie sur la durée de vie de chaque source d'énergie. On peut également grâce à cet outil tester de nouvelles méthodes de gestion incluant le critère de la durée de vie.

L'objectif est maintenant de travailler au développement de nouvelles stratégies de gestion des sources incluant, en plus des critères couramment rencontrés (coût, volume, etc.), celui de la durée de vie et de les tester grâce au modèle développé. En parallèle à cela, il faut également valider la fiabilité de ce modèle par des résultats expérimentaux au moins sur un cas test.

## 8. REFERENCES

- [1] R. Sadoun, "Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage," Thèse Ecole Centrale de Lille, 2013.
- [2] G. Guidi, T. M. Undeland, and Y. Hori, "Effectiveness of Supercapacitors as Power-Assist in Pure EV Using a Sodium-Nickel Chloride Battery as Main Energy Storage," *EVS24 Stavanger, Norway*, pp. 1–9, 2009.
- [3] Q. Badey, "Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile," Thèse, Université Paris-Sud 2012.
- [4] P. Nelson and S. C. Ave, "Advanced Lithium-Ion Batteries for Plug-in Hybrid-Electric Vehicles." Argonne National Laboratory, Transportation Technology R&D Center, 2007.
- [5] M. a. Tankari, M. B. Camara, and B. Dakyo, "DC-bus voltage control for multi-sources systems - Battery and Supercapacitors," *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1270–1275, Nov. 2011.
- [6] Y. Zhang and Z. Jiang, "Dynamic power sharing strategy for active hybrid energy storage systems," *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 558–563, Sep. 2009.
- [7] W. Lajnef, "Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides," Thèse, L'Université Bordeaux 1, 2006.
- [8] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. Le Moigne, "Li-Ion Battery Emulator for Electric Vehicle Applications," *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–8, Oct. 2013.
- [9] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. L. Moigne, "Optimal Sizing of Hybrid Supply for Electric Vehicle Using Li-ion Battery and Supercapacitor," *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*.
- [10] A. Hammani, R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. Le Moigne, "Influence of the management strategies on the sizing of hybrid supply composed with battery and supercapacitor," in *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, 2012, pp. 1–7.
- [11] J. Nzisabira, Y. Louvigny, and P. Duysinx, "Comparison of ultra capacitors, hydraulic accumulators and batteries technologies to optimize hybrid vehicle ecoefficiency," *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 353–358, Mar. 2009.
- [12] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Barbedette, and P. LeMoigne, "Sizing of hybrid supply (battery-supercapacitor) for electric vehicle taking into account the weight of the additional Buck-Boost chopper," *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 8–14, Mar. 2012.
- [13] G. Wang, P. Yang, and J. Zhang, "Fuzzy optimal control and simulation of battery-ultracapacitor dual-energy source storage system for pure electric vehicle," *2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, pp. 555–560, Aug. 2010.
- [14] A. L. Allegre, A. Bouscayrol, and R. Trigui, "Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications," in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, pp. 213–220.
- [15] A. L. Allègre, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Different energy management strategies of Hybrid Energy Storage System ( HESS ) using batteries and supercapacitors for vehicular applications." *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*
- [16] D. V. Do, C. Forgez, K. El, K. Benkara, G. Friedrich, and S. Member, "Impedance Observer for a Li-Ion Battery Using Kalman Filter," *IEEE Transactions ON Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3930–3937, 2009.
- [17] M. Thele, S. Buller, D. U. Sauer, R. W. De Doncker, and E. Karden, "Hybrid modeling of lead-acid batteries in frequency and time domain," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 461–466, Jun. 2005.
- [18] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, "Application-specific parameterization of reduced order equivalent circuit battery models for improved accuracy at dynamic load," *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 4085–4093, Dec. 2013.
- [19] H. Dai, X. Zhang, X. Wei, Z. Sun, J. Wang, and F. Hu, "Cell-BMS validation with a hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 52, pp. 174–184, Nov. 2013.
- [20] L. S. Applications, S. Brown, and D. Thesis, *Diagnosis of the Lifetime Performance Degradation of Lithium-Ion Batteries*. 2008.
- [21] M. Montaru, "Contribution a l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages." Thèse Institut Polytechnique de Grenoble, 2009
- [22] S. Käbitz, J. B. Gerschler, M. Ecker, Y. Yurdagel, B. Emmermacher, D. André, T. Mitsch, and D. U. Sauer, "Cycle and Calendar Life Study of a Graphite/NMC-Based Li-Ion High Energy System Part A: Full Cell Characterization," *Journal of Power Sources*, pp. 1–12, Mar. 2013.
- [23] C. Guenther, B. Schott, W. Hennings, P. Waldowski, and M. a. Danzer, "Model-Based Investigation of Electric Vehicle Battery Aging by Means of Vehicle-to-grid Scenario Simulations," *Journal of Power Sources*, pp. 1–7, Feb. 2013.
- [24] N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. Le Moigne, "Study of the Ageing Process of a Supercapacitor Module Using Direct Method of Characterization," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 220–228, Jun. 2012.
- [25] N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. L. Moigne, "Modeling and Characterizing Supercapacitors Using an Online Method," *IEEE Transactions ON Industrial Electronics* vol. 57, no. 12, pp. 3980–3990, 2010.
- [26] O. Bohlen, J. Kowal, and D. U. Sauer, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 172, no. 1, pp. 468–475, Oct. 2007.
- [27] O. Bohlen and J. Kowal, "Ageing behaviour of electrochemical double layer capacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 173, no. 1, pp. 626–632, Nov. 2007.