

# Utilisation des supercondensateurs et des batteries pour le stockage de l'énergie embarquée pour véhicule électrique

Moez HADJ KACEM<sup>#1</sup>, Souhir TOUNSI<sup>\*2</sup>, Rfik NEJI<sup>#3</sup>

<sup>#</sup>University of Sfax Laboratory of Electronic and Information Technology (LETI-Sfax), E.N.I.S Tunisia

<sup>\*</sup> Science and Technologies of Image and Telecommunications (SETIT), ISBS – Tunisia

<sup>1</sup>Moez\_haj\_kacem@voila.fr  
<sup>2</sup>souhir.tounsi@iseecs.rnu.tn  
<sup>3</sup>rafik.neji@enis.rnu.tn

**Abstract**— Les composants de stockage de l'énergie électrique restent le point bloquant au développement de l'électrification des véhicules électriques. Les supercondensateurs stockent l'énergie électrique majoritairement sous forme de charges électriques (réservoirs de puissance) de manière complémentaire aux batteries électrochimiques (réservoirs d'énergie). C'est la raison pour laquelle l'association de ces deux composants est intéressante pour les applications traction électrique.

**Keywords**— stockage de l'énergie ; véhicule électrique ; supercondensateurs ; énergie ; batterie.

## I. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la dégradation de la qualité de l'air et les recherches d'une meilleure qualité de vie a conduit les autorités à prendre des mesures dans le but de réduire les émissions de polluants. De ce fait, l'industrie automobile entreprend de s'adapter à ces nouvelles contraintes en promouvant le véhicule électrique dans notre vie quotidienne. Cette solution doit intégrer un rapport qualité prix convenable. Des véhicules électriques ont été réalisés et commercialisés. Ils utilisent différents types de batterie pour le stockage de l'énergie (Pb, Ni-Cd, Li-Ion ...), mais leur durée de vie et leur coût d'entretien ont freiné le développement de ces véhicules. Le problème du stockage de l'énergie embarquée dans le véhicule peut être résolu en utilisant les supercondensateurs et les batteries. Une bonne gestion de l'énergie à bord entre les deux deniers éléments de stockage et l'énergie fossile donnera certainement le véhicule de demain [1].

Les batteries ont une forte densité énergétique mais une faible densité de puissance. Leur durée de vie en nombre de cycles charge-décharge est relativement limitée. Le développement technologique et la maîtrise de fabrication de nouveaux matériaux ont permis la réalisation d'autres systèmes modernes de stockage d'énergie électrique comme les supercondensateurs. Ils peuvent être utilisés de façon complémentaire aux batteries ou à la pile à combustible. Un choix de complémentarité en termes de puissance instantanée disponible et de quantité d'énergie stockée permettra d'augmenter les performances des systèmes d'alimentation des véhicules électrique (VE) par exemple

## II. ACCUMULATEURS DE RECHARGE

Un accumulateur électrique est un dispositif destiné à stocker l'énergie électrique afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement. Cette opération est aussi appelée stockage d'énergie (figure1).

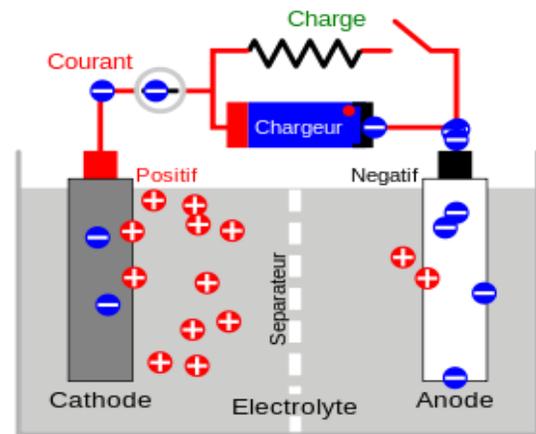


Fig. 1. Principe des accumulateurs électrochimiques en cours de charge

La question du stockage de l'électricité a mobilisé les scientifiques depuis déjà deux siècles et reste encore l'une des clés de l'évolution du système énergétiques en générale et du VE en particulier.

Il existe plusieurs sources d'énergie possibles pour alimenter un VE [2]. On pourra utiliser :

- Des batteries d'accumulateurs électrochimiques;
- Une pile à combustible;

Ces sources peuvent être couplées à des dispositifs de stockage de puissance :

- Des supercondensateurs ; sont particulièrement efficaces pour répondre à ce besoin. Capable de se

charger et se décharger très rapidement et quasiment sans usure.

### A. Batteries

Une batterie de traction est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite ; elle se compose de plusieurs éléments formés chacun d'une anode, d'une cathode, d'un séparateur convenable pour isoler électriquement les électrodes à l'intérieur, d'un électrolyte et d'un récipient [2,3]. Sa capacité varie de 15 à 30 kW.h environs, ce qui correspond à une autonomie de 100 à 250 km selon le véhicule et le cycle de conduite effectué. Sa masse, qui est de l'ordre de 300kg, permet de d'abaisser le centre de gravité du véhicule et d'améliorer ainsi sa tenue de route.

Deux technologies sont proposées sur le marché permettant une production en série : le Plomb- Acide (Pb-PbO<sub>2</sub>) et le Nickel Cadmium (Ni-Cd). Les couples à base de plomb ont l'avantage d'être plus économiques mais assurent des performances minimales. De ce fait, d'autres solutions sont exploitées telles que le Ni-Cd, car elles possèdent de meilleures performances mais leurs coûts, qui diminuent avec l'industrialisation, sont plus élevés [2,3].

Le choix du modèle le plus approprié suivant les besoins énergétique de VE.

#### . Modèles à paramètres constants

##### Modèle statique (E<sub>0</sub>,R)

Le modèle le plus simple de batterie est le modèle statique (E<sub>0</sub>,R) à paramètres constants, qui implémente l'équation suivante :

$$V_{batt} = E_0 - R \cdot I_{batt} \quad (1)$$

Avec  $R$  : résistance interne de la batterie

$E_0$  : f.e.m. à vide (force électromotrice)

La variation de tension en fonction du courant (figure 2) prélevé à la batterie  $I_{batt}$  est ainsi modélisée. La valeur du paramètre  $R$  est une donnée connue du constructeur. Elle peut également être déduite de courbes de tension issues d'essais (de même que le paramètre  $E_0$ ). Le paramètre  $E_0$  étant constant, l'état de charge de la batterie ne varie pas. Ce modèle à quantité d'énergie infinie ne convient donc pas à une étude d'autonomie

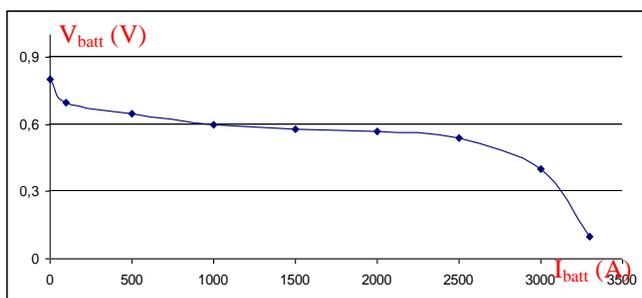


Fig. 2.  $V_{batt} = f(I_{batt})$  pour le modèle statique

##### Modèle dynamique (E<sub>0</sub>,R,C)

L'ajout d'un élément capacitif introduit une dynamique dans le modèle (Figure 3).

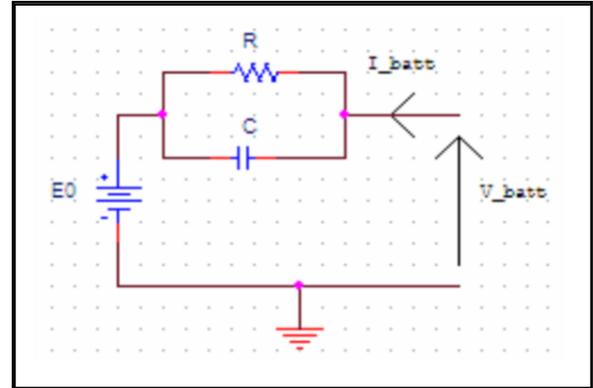


Fig. 3. Modèle dynamique

L'équation désormais implémentée est la suivante :

$$V_{batt} = E_0 - \frac{R}{1 + R \cdot C \cdot p} \cdot I_{batt} \quad (2)$$

Les valeurs des paramètres  $E_0$ ,  $R$  et  $C$  sont calculées à partir de données d'essais (ou de courbes constructeur).

La variation de tension en fonction du courant (figure 4) prélevé à la batterie  $I_{batt}$  est ainsi modélisée

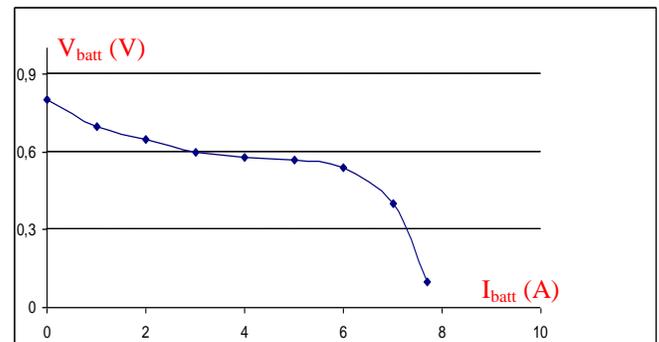


Fig. 4.  $V_{batt} = f(I_{batt})$  pour le modèle dynamique

### B. Supercondensateurs

De par leur forte densité de puissance, les supercondensateurs sont des éléments de stockage particulièrement intéressants pour des systèmes embarqués caractérisés par des transferts d'énergie à haut rendement et de courte durée, typiquement de l'ordre de la seconde. Les performances dynamiques élevées de ces composants s'appuient sur la très faible résistance interne ainsi que sur la nature majoritairement électrostatique du stockage de l'énergie. En revanche, leur faible énergie spécifique implique, la plupart du temps, une association avec

une source d'énergie principale (accumulateurs électrochimiques par exemple) pour répondre à l'ensemble du besoin en énergie électrique propre à l'application.

#### - Structure et fonctionnement des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont constitués de deux électrodes en carbone activé isolées électriquement par un séparateur poreux et de collecteurs de courant permettant d'acheminer le courant jusqu'aux bornes extérieures. Le tout est imprégné d'électrolyte permettant le transport des ions entre les deux électrodes. L'un des atouts du supercondensateur est son faible résistance interne. Les résistances de contact entre les grains de carbone, au sein même l'électrode, ainsi que les résistances de contact entre un collecteur de courant et une électrode peuvent cependant entraîner des valeurs de résistance non négligeables.

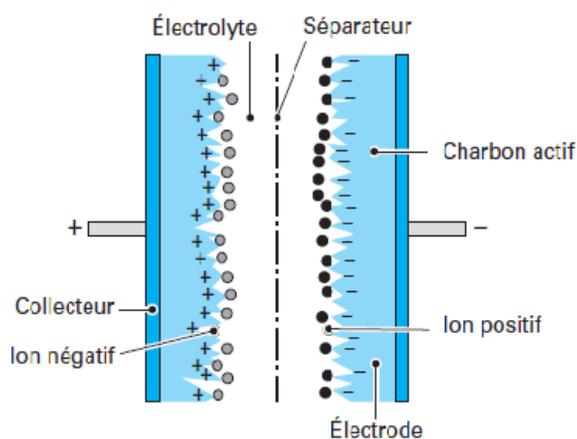


Fig. 5. Structure d'un supercondensateur

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateurs, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique.

Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000 F) [4]. Ceci fait des supercondensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint, idéalement complémentaires aux batteries ou à la pile à combustible. L'utilisation de structures série parallèle de plusieurs cellules de supercondensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés.

#### - Intérêt des supercondensateurs

Les premiers supercondensateurs avaient une résistance série élevée, ce qui induisait un rendement moyen et une puissance spécifique limitée. Au cours des dernières années, on a assisté à un très grand effort de la part des fabricants afin de diminuer la résistance interne, augmenter la capacité de stockage, ainsi

que la tension nominale de fonctionnement. Le tableau suivant [4,5] donne l'illustration de l'évolution des performances des supercondensateurs.

TABLE I. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES SUPERCONDENSATEURS MAXWELL

Tension Nominale	Capacité (F)	Volume (L)	Résistance série (mΩ)	Puissance Spécifique	Energie Spécifique	Courant (A)
2.3V	100	0.031	8	4.5 kW/kg ; 5.4 kW/l	2.0 Wh/kg ; 2.4 Wh/l	30
	600	0.183	2	2.3 kW/kg ; 3.6 kW/l	1.5 Wh/kg ; 2.4 Wh/l	300
	1800	0.26	0.4	10.7 kW/kg ; 12.8 kW/l	4.5 Wh/kg ; 5.1 Wh/l	-
	2300	0.59	0.5	3.6 kW/kg ; 4.5 kW/l	2.3 Wh/kg ; 2.9 Wh/l	400
	2700	0.60	0.6	3.0 kW/kg ; 3.7 kW/l	2.7 Wh/kg ; 3.3 Wh/l	400
	3600	0.59	0.59	1.7 kW/kg ; 1.9 kW/l	4.1 Wh/kg ; 4.5 Wh/l	200
2.5V	200	0.047	1.8	16 kW/kg ; 18 kW/l	3.2 Wh/kg ; 3.7 Wh/l	50
	600	0.14	0.6	16.3 kW/kg ; 18.8 kW/l	3.3 Wh/kg ; 3.8 Wh/l	300
	1200	0.23	0.4	13 kW/kg ; 17.3 kW/l	3.5 Wh/kg ; 4.6 Wh/l	300
	2700	0.52	0.23	11.3 kW/kg ; 13 kW/l	3.9 Wh/kg ; 4.5 Wh/l	500
	3600	0.64	0.2	11.2 kW/kg ; 12.3 kW/l	4.5 Wh/kg ; 4.9 Wh/l	500
	5000	0.80	0.25	7.4 kW/kg ; 7.8 kW/l	5.1 Wh/kg ; 5.4 Wh/l	500
2.7V	2600	0.36	0.28	4.1 kW/kg	5.6 Wh/kg	500

Les supercondensateurs ont plusieurs atouts pour les applications de traction électrique [5]. Leur utilisation comme système de puissance secondaire permet de fournir une source de puissance rapidement disponible lors des phases d'accélération et de freinage. En effet, la constante de temps des condensateurs est plus faible que celle des générateurs électrochimiques classiques (décharge possible en quelques secondes) et les supercondensateurs sont capables de fournir une puissance importante sur un temps très court [6]. De plus, en cas de limitation énergétique, l'utilisation d'un supercondensateur associé à une batterie permet d'augmenter la durée de vie de cette dernière en évitant les décharges profondes lors des appels de puissance. Enfin, ce genre de dispositif possède une bonne cyclabilité (plus de 5.10<sup>5</sup> cycles) et une bonne stabilité du fait de l'absence de réactions électrochimiques aux électrodes. Le tableau suivant nous donne une comparaison entre les trois systèmes de stockage.

TABLE II. COMPARAISON DES DIFFERENTS SYSTEMES DE STOCKAGE

	Condensateurs classiques	Supercondensateurs	Batteries
Energie Spécifique (Wh.kg <sup>-1</sup> )	<0,1	1 à 10	10 à 150
Puissance spécifique (W.kg <sup>-1</sup> )	<100,000	<10,000	<1,000
Durée de Vie (Cycles)	>500,000	>500,000	1000
Durée de la charge nominale	10 <sup>2</sup> à 10 <sup>3</sup> secondes	1 à 30 secondes	1 à 5 heures
Durée de la décharge nominale	10 <sup>2</sup> à 10 <sup>3</sup> secondes	1 à 30 secondes	0,3 à 3 heures
Rendement charge/décharge(%)	>95%	85% à 98%	70% à 85%

D'après les données présentées dans ce tableau, les supercondensateurs se positionnent entre les batteries et les condensateurs classiques [5, 6,7]. Leur plus grand avantage est leur énergie spécifique bien plus élevée que celle des condensateurs classiques. Mais l'énergie stockée est 10 fois plus faible que l'énergie stockée dans une batterie. Le problème des batteries classiques réside dans leur faible puissance spécifique qui représente 2% de la puissance spécifique d'un supercondensateur ; dans ce domaine les condensateurs restent indétrônables avec une puissance spécifique qui peut atteindre les 100kW.kg<sup>-1</sup>; ce qui représente dix fois la puissance spécifique d'un supercondensateur (figure 6). L'autre avantage des supercondensateurs est leur durée de vie importante, avec plus de 5.10<sup>5</sup> cycles ou plus de 10 ans.

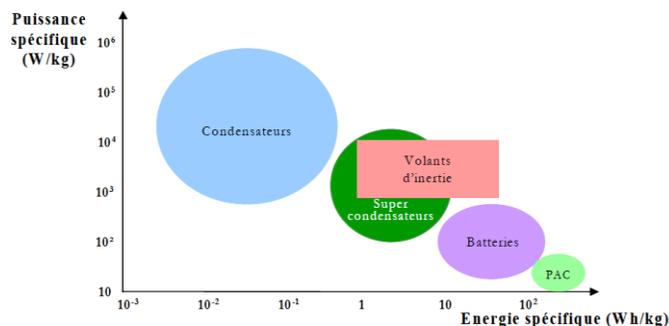


Fig. 6. Comparaison des densités de puissance et d'énergie pour différents éléments de stockage

#### - Application des supercondensateurs dans le domaine du transport

Actuellement, l'évolution des performances et des coûts des supercondensateurs (SC) ne fait qu'un grand nombre de fabricants de systèmes électriques et de laboratoires de recherche dans le domaine de l'électronique de puissance s'intéressent à l'utilisation de ces composants dans les applications présentant des pics de puissance importants par rapport à la puissance moyenne. On peut distinguer deux principales familles. L'une concerne les systèmes isolés pour lesquels seuls les systèmes de faible puissance émergent, l'autre les systèmes hybrides (multi-sources) plus adaptés aux applications de puissance.

Dans le domaine des transports terrestres, les applications envisagées pour les supercondensateurs regroupent l'automobile, en particulier les nouvelles architectures de chaîne de traction hybride,

- le transport collectif urbain : bus, tramways, métros,

- les trains.

Sur le segment de l'automobile la technologie des supercondensateurs satisfait les fonctions

- de démarrage, en particulier les contraintes à faible température

- d'organe de puissance des chaînes de traction hybride des architectures 42 V

Il existe deux familles de supercondensateurs qui se distinguent par le type d'électrolyte utilisé : organique ou aqueux. Néanmoins les deux familles utilisent des électrodes en charbon actif. L'électrolyte à base organique accepte des tensions maximales de l'ordre de 2,7V contre seulement 1V pour les autres, en contrepartie, la capacité massique des supercondensateurs de type organique est plus faible que pour la deuxième technologie. Il est à noter que dans le tableau ci-dessous, le supercondensateur Esma\* est constitué de deux supercondensateurs en série.

TABLE III. DONNEES CONSTRUCTEUR DE DIVERS SUPERCONDENSATEURS

Constructeur	Capacité / Tension nominale (F) / (V)	Poids (kg)	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Type
Maxwell	3 000 / 2,7V	0,51	6	12 000	Organique
Batscap	2 600 / 2,7V	0,5	5,3	20 000	Organique
Esma	80 000 / 1,7V *	2,8	9	500	Aqueuse
Nesscap	3 000 / 2,7V	0,53	5,73	11 000	Organique

### III. STOCKAGE D'ÉNERGIE EMBARQUÉ

L'objectif de ce paragraphe est de proposer une procédure de prédimensionnement du stockage mixte. Les modèles utilisés sont des modèles statiques, simples, car l'objectif est d'obtenir une valeur « initiale » pour le pack de supercondensateurs et de la batterie [8,9].

#### A. Modèles supercondensateurs et batteries

Le modèle utilisé pour le pack de supercondensateurs est un modèle constitué d'une capacité principale en série avec une résistance interne et avec une cellule RC de surtension (en fonction des données disponibles pour chaque supercondensateur). Il s'agit d'une version simplifiée du modèle développé dans [9].

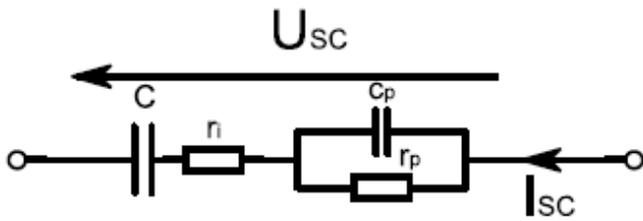


Fig. 7. Modèle constructeur de supercondensateur

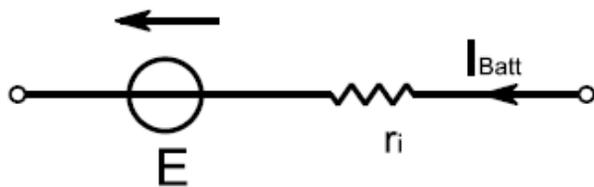


Fig. 8. Modèle constructeur de la batterie au plomb

$$Z_C(s) = \frac{1}{C s} + r_i + \frac{r_p}{1 + r_p C_p s} \quad (3)$$

avec : la  $C$  capacité nominale du supercondensateur,  $r_i$  la résistance interne fournie par les données constructeurs,  $r_p C_p$  la cellule une cellule de surtension observée lors du passage du courant et  $s$  l'opérateur de Laplace.

Le modèle de la batterie est constitué d'un générateur idéal de tension en série avec une résistance interne. De plus, ces deux éléments dépendent de l'état de charge de la batterie obtenu par l'intégration du courant. La loi de Peukert qui lie la capacité de la batterie au courant n'est pas prise en compte dans ce modèle.

$$U_{Batt} = E - r_i \cdot I_{Batt} \quad (4)$$

avec :  $E$  la tension à vide de la batterie,  $r_i$  la résistance interne fournie par les données constructeurs

### B. Gestion de l'énergie

Le stockage de l'énergie électrique doit avoir une gestion d'énergie pour partager le flux de puissance entre les deux sources. La règle que nous nous sommes donnée réside dans la limitation du courant de la batterie. Les SC fournissent alors la différence entre le courant demandé par le véhicule et le courant fourni par la batterie et limité à une valeur imposée. La variable d'ajustement, sera dans ce cas, la valeur du courant des SC [10]. Pour obtenir la référence du courant des SC, nous mesurons le courant circulant sur le bus continu et nous lui soustrayons la valeur maximale admissible du courant dans les batteries. Cette loi de gestion peut être écrite sous la forme mathématique suivante :

$$I_{cvs\_ref\_SC} = I_{Bus \text{ mesuré}} - I_{cvs\_Batt\_Max} \quad (5)$$

Etant donné qu'il y a des convertisseurs pour l'interface les sources et les machines électriques, les dynamiques sont maîtrisées et la fonction est réalisable. Électriquement parlant, les batteries régulent la tension du bus et les SC imposent les courants sur le bus continu.

Il est à noter dans l'éq. 5 que la limitation du courant de la batterie est faite au niveau du bus continu ( $I_{cvs\_Batt\_Max}$ ). Un autre choix possible est la limitation du courant de la batterie,  $I_{Batt}$ , algorithme illustré sur la figure suivante. Nous avons choisi d'explorer la première option. La justification vient du choix de garder constante la puissance délivrée par la batterie. Le fait de limiter le courant sur le bus permet de compenser la baisse de la tension des batteries.

Lorsque les SC atteignent une butée en tension, le courant des SC est annulé et la totalité du courant est alors fournie ou absorbée par la batterie sous condition qu'elle puisse le faire. Lorsque la batterie atteint aussi sa limite en tension maximale, les freins mécaniques sont alors utilisés pour ralentir le véhicule et lorsque la batterie atteint sa butée en tension minimale, l'accélération du véhicule est alors limitée. Pour supprimer tout risque d'oscillation entre deux modes de fonctionnement, plusieurs contrôleurs proportionnel-intégral ont été ajoutés pour lisser le basculement de mode de fonctionnement.

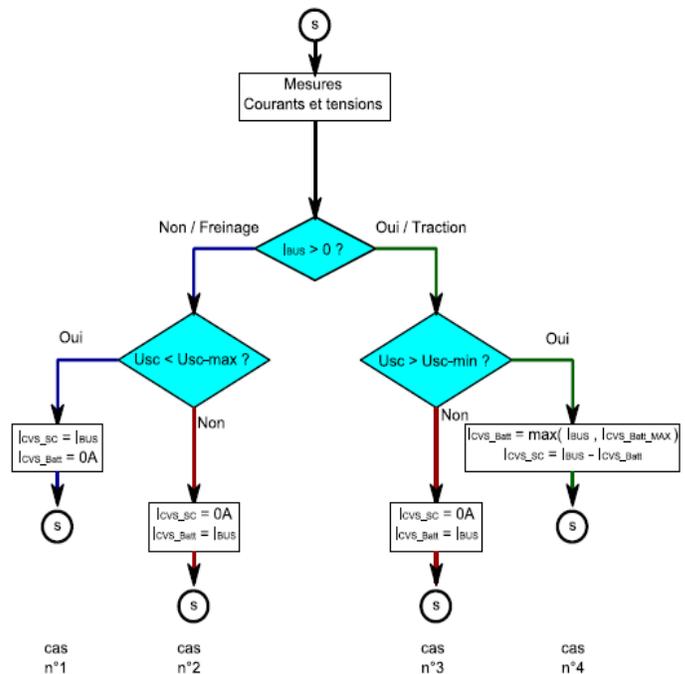


Fig. 9. Algorithme de limitation du courant de la batterie au niveau du bus continu

L'algorithme est programmé en langage C et intégré dans un bloc S-fonction de matlab/simulink. Le taux de

rafraîchissement des consignes de courant du stockage d'énergie est alors de 100ms. La figure 10 donne un exemple de limitation du courant avec un pack de SC.

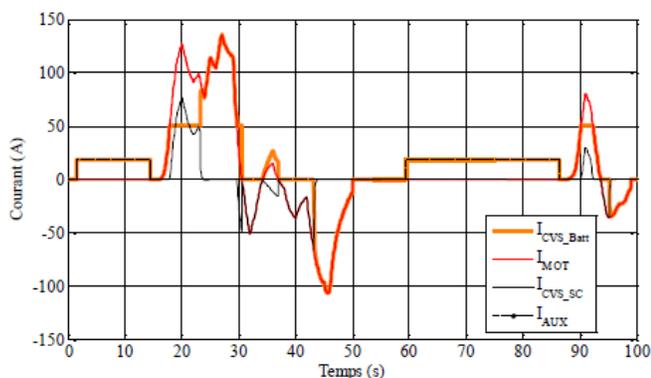


Fig. 10. Exemple de limitation du courant à 50A avec un pack de SC de 1,5F

Une fois le modèle du véhicule est défini, ainsi que la loi de gestion d'énergie, il ne reste plus qu'à dimensionner le pack de batterie et de supercondensateurs.

#### IV. CONCLUSION

Dans cet article nous avons présenté le comportement électrique et énergétique des SC et des batteries dans des applications de type traction électrique. Nous avons développé aussi un outil de caractérisation du comportement des supercondensateurs afin de les exploiter dans les applications « courant fort » telles que le transport.

Afin de gérer convenablement l'énergie embarquée à bord du véhicule, il est nécessaire de bien dimensionner le stockeur, maîtriser la gestion d'énergie en temps réel par l'étude de l'architecture des convertisseurs de puissance DC/DC, d'optimiser l'efficacité énergétique (freinage récupératif) ainsi que la durée de vie des supercondensateurs (mécanismes de

défaillances et facteurs de vieillissement).

#### REFERENCES

- [1] M. HADJ KACEM, « Conception des Composants Electriques de la Chaîne de Puissance d'un Véhicule Electrique »; Thèse de Doctorat 2013. ENIS Tunisie.
- [2] R. NEJI, S. TOUNSI et F. SELLAMI: «Contribution to the definition of a permanent magnet motor with reduced production cost for the electrical vehicle propulsion»; European Transactions on Electrical Power (ETEP), 2006, 16: pp. 437-460.
- [3] N. JANIAUD : « Modelisation Du Systeme De Puissance Du Vehicule Electrique En Regime Transitoire En Vue De L'optimisation De L'autonomie, Des Performances Et Des Coûts Associes »; Thèse de Doctorat 2011, E.PARIS SUD.
- [4] Nassim RIZOUG: «Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande»; Thèse de Doctorat 2006, l'Université des Sciences et Technologies de Lille.
- [5] Maxwell technology: « Boostcap Ultracapacitor Module Operating Manual », www.Maxwell.com, Janvier 2003.
- [6] A. Rufer: « Le super-condensateur et la batterie se marient pour fournir de l'énergie » ; Electronique, No 100, Février 2000.
- [7] J. Lachaize: «Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction»; thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, septembre 2004.
- [8] M.HADJ KACEM, S.TOUNSI et R. NEJI: « Systemic Design and Control of Electric Vehicles Power Chain »; IJSTR, volume1, n° 2012.
- [9] Hammar A., Lallemand R., Venet P., Coquery G., Rojat G., Chabas J. : « Electrical characterization and modelling of round spiral supercapacitors for high power applications »; ESSCAP, Lausanne, Switzerland (2006).
- [10] G. Pereira, P. Bartholoméüs, P. Le Moigne, C. Rombaut, P. Van Berten,: « Structures de conversion d'énergie d'un engin de transport en commun urbain à supercondensateurs. »; EPF2000, Lille, December 2000, Actes pp. 225-230.