

Etude de l'influence de l'association de batterie au plomb et de supercondensateurs sur l'autonomie d'une benne à ordures ménagères

Stéphane BUTTERBACH ^a, Bogdan VULTURESCU ^a, Christophe FORGEZ ^b et Gérard COQUERY ^a

^a IFSTTAR, Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN), 25 allée des marronniers, 78000 Versailles.

^b UTC, Laboratoire d'Electromécanique (LEC), BP 20509, 60205 Compiègne Cedex
stephane.butterbach@ifsttar.fr

RESUME – L'étude d'une benne à ordures ménagères (BOM) bi-mode (mode thermique et mode 100% électrique) par le biais de VEHLIB permet de dimensionner entièrement le véhicule. Un modèle détaillé de la batterie au plomb est présenté dans cet article, ce modèle tient compte des dynamiques électriques de la batterie au plomb mais aussi des limitations en recharge. Ce modèle permet d'affiner les résultats sur la consommation en énergie du véhicule et sur les variations en tension aux bornes de la batterie.

ABSTRACT – The study of garbage truck bi-mode (BOM) trough VEHLIB allows sizing this vehicle. A detailed lead acid battery model is shown in this article. This model takes into account the electric dynamics and the charge limitation of this battery. The vehicle energy consumption and the battery voltage could be calculated with this new model.

MOTS-CLES – Batterie au plomb, Supercondensateurs, Modélisation, Véhicule lourd, Gestion d'énergie.

1. Introduction

En France, il existe un nombre réduit de BOM hybride ou 100% électrique. Les véhicules hybrides réduisent de 20% leur pollution atmosphérique comparés à celle générée par un véhicule conventionnel [1] et sont plus silencieux. Actuellement les principales faiblesses des véhicules électriques sont leur coût initial et leur faible autonomie. Les véhicules hybrides sont alors une solution pour obtenir une autonomie importante car ils intègrent une motorisation thermique et offrent par la même occasion une grande autonomie [2]. Un autre axe de recherche pour la diminution des couts est d'augmenter de la durée de vie des batteries.

La solution économique pour la BOM, du moins pour le moyen terme, est d'utiliser des batteries au plomb. Bien qu'il existe d'autres technologies de batterie de traction, les batteries au plomb dominent encore le marché [3] et sont à 90% recyclable en fin de vie [4]. Une source hybride électrique va être présentée dans cet article. La source hybride est composée de batteries et de supercondensateurs connectée en parallèle sur un bus haute tension (Figure 1). Le but de l'association des batteries et des supercondensateurs est de permettre une diminution du stress électrique et l'augmentation de la durée de vie des batteries. L'association de supercondensateurs avec des batteries et des piles à combustible est très étudiée dans les laboratoires mais peu se focalise sur l'augmentation de la durée de vie [5]-[7]. Nous allons présenter une simple gestion d'énergie qui est basée sur la limitation du courant de la batterie [8]. La modélisation du véhicule et le modèle précis de la batterie au plomb vont être présentée dans cet article. L'influence de certains paramètres sur la consommation en énergie et du stress en courant va être abordée à la fin du document.

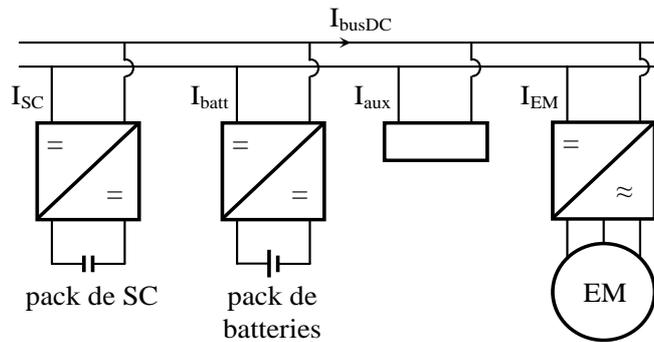


Figure 1 : Schéma électrique du véhicule

La BOM a été modélisée et simulée sous VEHLIB qui est une bibliothèque fonctionnant sous l'environnement de Matlab/Simulink. Les véhicules électriques ou hybrides, qu'ils soient routiers et ferrées, peuvent être simulés avec différents types de profil de mission. Les modèles détaillés employés sous VEHLIB sont décrits dans [9]. Dans cette section, nous allons décrire les paramètres principaux de notre modèle de véhicule électrique. Dans la section suivante, nous nous focaliserons sur le modèle de batterie utilisée pour cette simulation.

2. Modélisation du véhicule

Dans cette section, nous allons détailler les modèles utilisés et les paramètres du véhicule.

2.1 Le véhicule

Le châssis et les dimensions du véhicule sont identiques à ceux du Puncher de PVI, qui est une BOM électrique ayant un Poids Total Autorisé en Charge (PTAC) de 20 tonnes (composé d'un châssis de 5t, de 5t de batteries au plomb et jusqu'à 10t de charge utile). Le modèle du véhicule prend en compte la force au roulement (considérée comme constante : 100N/t), la force aérodynamique et la gravité. Réellement le véhicule n'atteint jamais sa charge maximale donc le poids du véhicule a été considéré comme étant à moitié chargé, soit 15t, lors du cycle. Les valeurs sont détaillées dans [10].

2.2 Profil de mission

En 1990, dans le cadre du programme de recherche européen DRIVE suite de l'étude EUREV (Etude sur les Usage REel des Véhicules), l'étude Artémis 400 [9] portait, entre autre, sur le profil de mission type d'une BOM. Une des BOM de Grenoble a alors été instrumentalisée afin d'enregistrer sa vitesse de déplacement et le régime moteur pendant une semaine. Un cycle type BOM a été créé en utilisant principes et les méthodes développés pour un véhicule conventionnel. Ce cycle Artemis 400 est constitué d'une phase de liaison et d'une phase de collecte.

Les paramètres et le profil de mission du véhicule étant connus, nous devons alors mettre en place une loi de gestion d'énergie pour le stockage hybride électrique à bord de ce véhicule.

2.3 La gestion d'énergie

La loi de commande est basée sur la limitation du courant de la batterie [10]. Le reste de la puissance demandée par le bus haute tension sera fourni par les supercondensateurs. Les supercondensateurs se rechargent avec le freinage électrique du véhicule mais aussi par le biais des batteries seulement si la tension des supercondensateurs est trop faible. Si les supercondensateurs atteignent l'une des deux butées en tension (tension minimale ou maximale), alors les batteries fournissent ou absorbent la totalité de la puissance venant du bus haute tension.

Cette section a permis de décrire le modèle du véhicule, de sa gestion d'énergie et de son profil de mission. Dans la section suivante, nous nous focaliserons sur le modèle de la batterie. Le choix, l'identification et la validation du modèle de la batterie sera décrite dans la section suivante.

3. Modélisation de la batterie au plomb

3.1 Le modèle

Il existe beaucoup de modèles de batterie comme par exemple ceux qui sont basés sur des lois électrochimiques [11], des modèles de Thévenin [12] et aussi des circuits de Randles [13]-[14].

Le modèle de batterie choisi est basé sur une variante des circuits de Randles (figure 3). Ce modèle permet de simuler les dynamiques électriques et chimiques des batteries au plomb avec précision. Nous y retrouvons « OCV » la tension à vide de la batterie (Open Circuit Voltage), « R_{pol} » la résistance de polarisation et « $Z_{Warburg}$ » une impédance simulant les effets de la diffusion chimique.

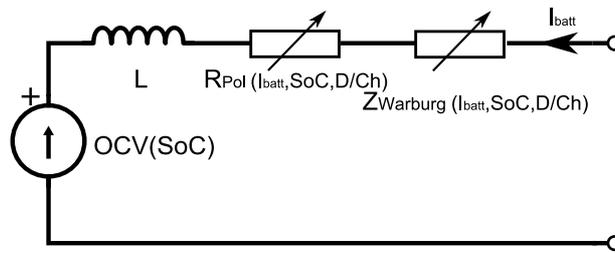


Figure 2 : Modèle de la batterie au plomb

3.2 L'identification

Nous avons divisé l'identification du modèle en deux étapes : la tension à vide de la batterie et la mesure de son impédance interne.

Lors de l'identification de l'impédance, il est courant de lier la valeur des impédances internes en fonction du courant circulant dans la batterie et le SoC. Dans notre démarche, nous allons directement mettre en équation la chute de tension provoquée par le passage du courant.

3.2.1 La tension à vide de la batterie (OCV)

Nous avons placé la batterie dans une enceinte climatique et maintenu la température à 25°C. La batterie a été déchargée et rechargée par paliers. Chaque palier est composé d'un temps de décharge (ou de recharge) suivi d'un temps de repos de 2h.

La différence de tension à vide de la batterie entre la charge et la décharge est de l'ordre de 100mV qui est observable dans la Figure 3. L'évolution de la tension à vide de la batterie en fonction de l'état de charge de la batterie peut être considérée comme linéaire entre 20% et 100%. Le modèle ainsi utilisé est une fonction affine (eq. 1).

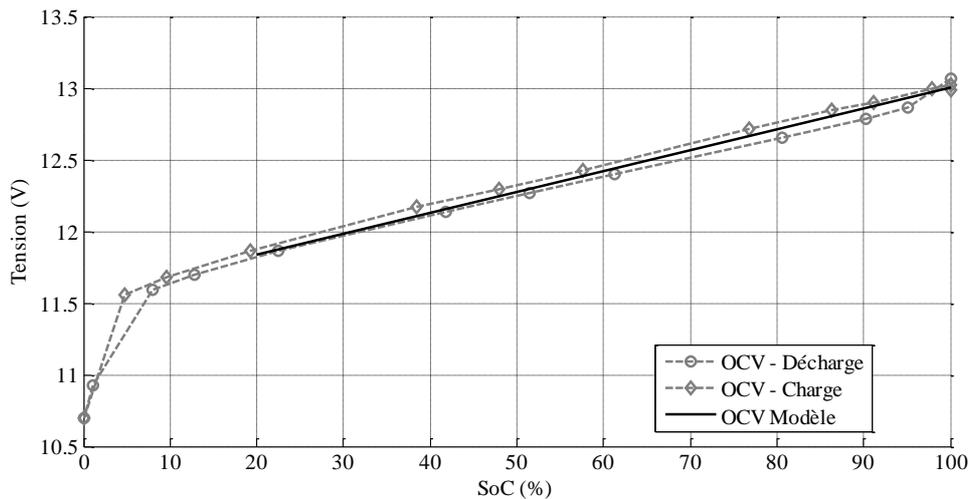


Figure 3 : Evolution de la tension à vide de la batterie

$$OCV = U_0 + u_r * SoC \quad [V] \quad (1)$$

3.2.2 L'impédance interne

L'identification des deux types de résistance interne se base sur les temps de réponses de la batterie Figure 5 :

- La chute de tension qui se produit internement (temps de réponse <100ms) est modélisée par une résistance qui est appelée dans la suite du document résistance de polarisation.
- La chute de tension restante est modélisée par l'impédance de Warburg (temps de réponse de l'ordre de la seconde).

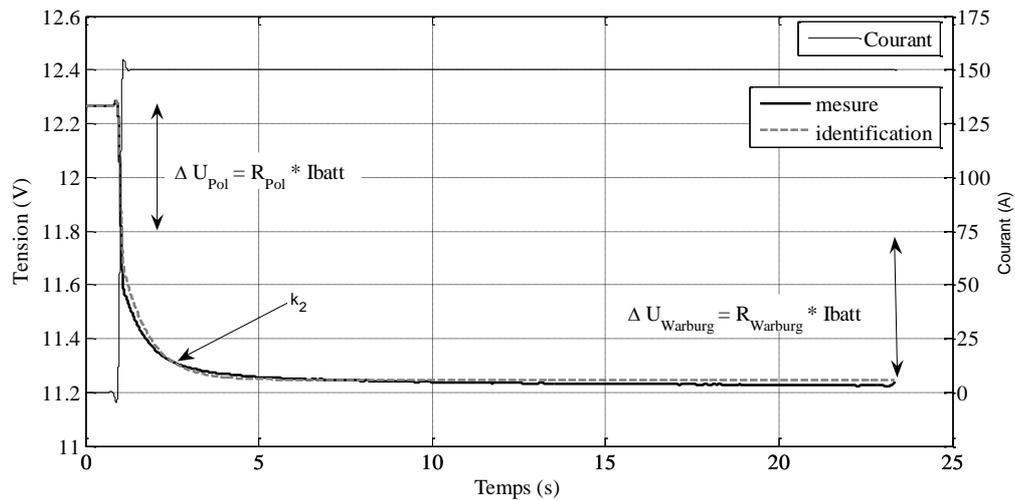


Figure 4 : Identification des paramètres

La résistance de polarisation (R_{Pol})

Le résultat de l'identification est dans la Figure 6 (Phase de charge) et l'équation 2 lie la chute de tension de polarisation au courant circulant dans la batterie. Lorsque l'état de charge de la batterie augmente, les deux paramètres sont ajustés afin que la droite passe toujours par le point (-1A, -200mV) pour la charge et le point (200A, 800mV) pour la décharge. Lors de la phase d'identification, nous avons le choix entre faire passer les droites par un unique point en charge et en décharge ou de garder les pentes des droites constantes, la première méthode permet d'obtenir une plus faible erreur relative lors des simulations.

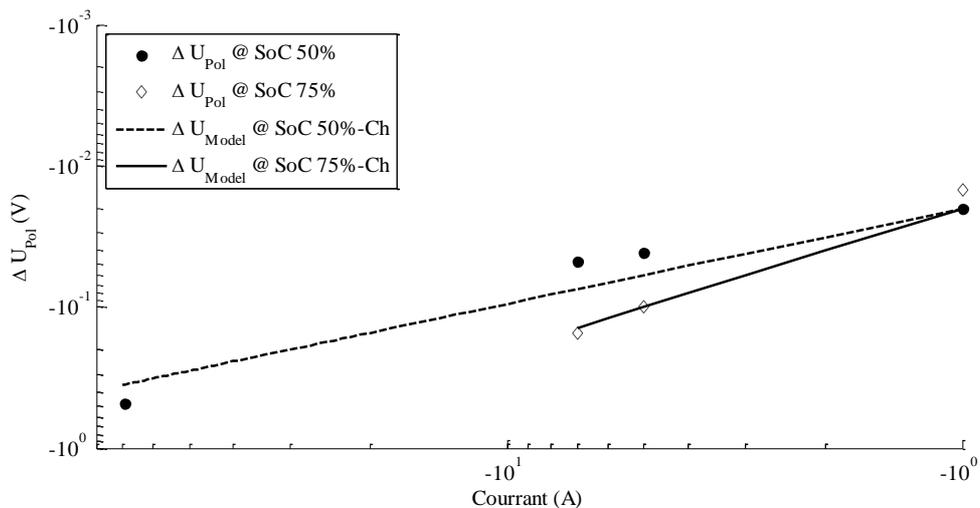


Figure 5 : Evolution de la chute de tension de polarisation en fonction du courant (Charge)

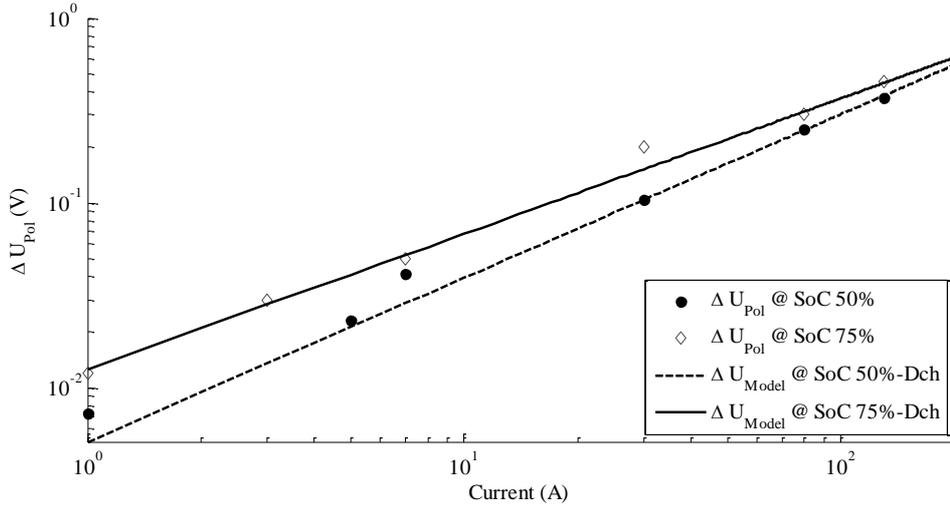


Figure 6 : Evolution de la chute de tension de polarisation en fonction du courant (Décharge)

$$\ln(\Delta U_{Pol}) = \ln(U_{r0}) + \alpha_r * \ln|I_{batt}| \quad [-] \quad (2)$$

$$R_{Pol} = \frac{\Delta U_{Pol}}{I_{batt}} \quad [\Omega] \quad (3)$$

L'impédance de Warburg ($Z_{Warburg}$)

L'effet de la diffusion peut être modélisé soit par des dérivées partielles soit par une impédance de Warburg [13]-[14]. Pour des raisons de facilité de mise en œuvre et de temps de calcul, notre choix s'est porté sur la série de 4 cellules RC. Pour obtenir cette approximation, il faut approximer la fonction de l'impédance de Warburg (équation 4) en appliquant le théorème de Mittag-Leffler [14], afin d'obtenir une série infinie de cellule RC (équation 5) avec le changement de variable (équation 8). Techniquement, il est impossible de simuler cette série infinie, nous avons alors choisi de se limiter à 4 cellules RC, ce qui nous permet de garder une bonne précision et d'avoir des temps de simulation raisonnable (équation 5). L'identification de la chute de tension due à la diffusion est présentée Figure 4 et l'équation 6 lie la chute de tension au courant. Les équations 8 et 9 permettent de calculer la constante de temps de la diffusion. Le paramètre u_w est le seul paramètre qui dépend de l'état de charge de la batterie (pente de la droite variable). Le paramètre U_{w0} est maintenu fixe. Pour le paramètre k_2 , c'est la pente de la droite α_{k2} qui est influencée par l'état de charge de la batterie et le paramètre k_{2_0} est maintenu fixe.

$$Z_{Warburg} = \frac{k_2}{\sqrt{s}} \tanh\left(\frac{k_1}{k_2} \sqrt{s}\right) \quad [\Omega] \quad (4)$$

$$Z_{Warburg} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R_n + \frac{1}{C_n} s} \approx \sum_{n=1}^4 \frac{1}{R_n + \frac{1}{C_n} s} \quad [\Omega] \quad (5)$$

$$\Delta U_{Warburg} = U_{w0} + u_w * \ln|I_{batt}| \quad [V] \quad (6)$$

$$R_{Warburg} = \frac{\Delta U_{Warburg}}{I_{batt}} = k_1 \quad [\Omega] \quad (7)$$

$$R_n = \frac{8}{(2n-1)^2} \frac{k_1}{\pi^2} \text{ et } C = \frac{k_1}{2 * k_2^2} \quad [\Omega] \text{ \& \text{ [F]} \quad (8)$$

$$\ln(k_2) = \ln(k_{2_0}) + \alpha_{k2} * \ln|I_{batt}| \quad [-] \quad (9)$$

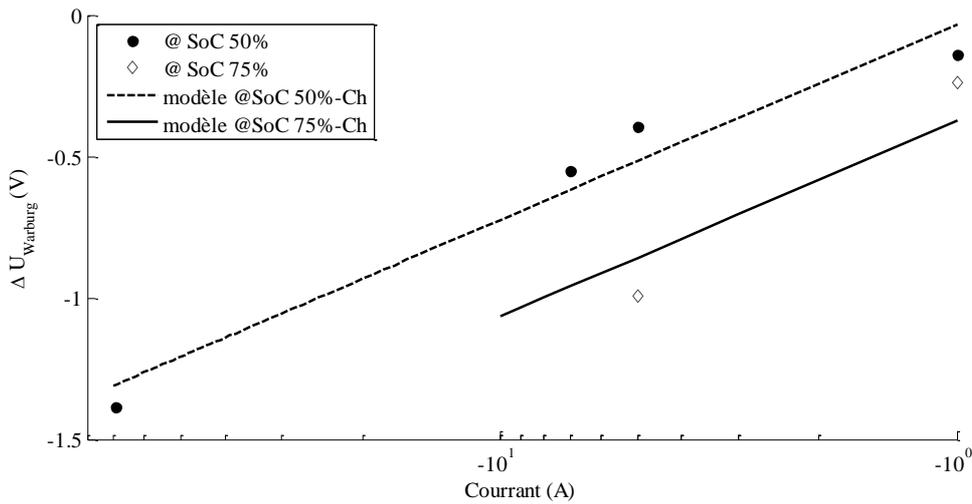


Figure 7 : Evolution de la chute de tension de Warburg en fonction du courant (Charge)

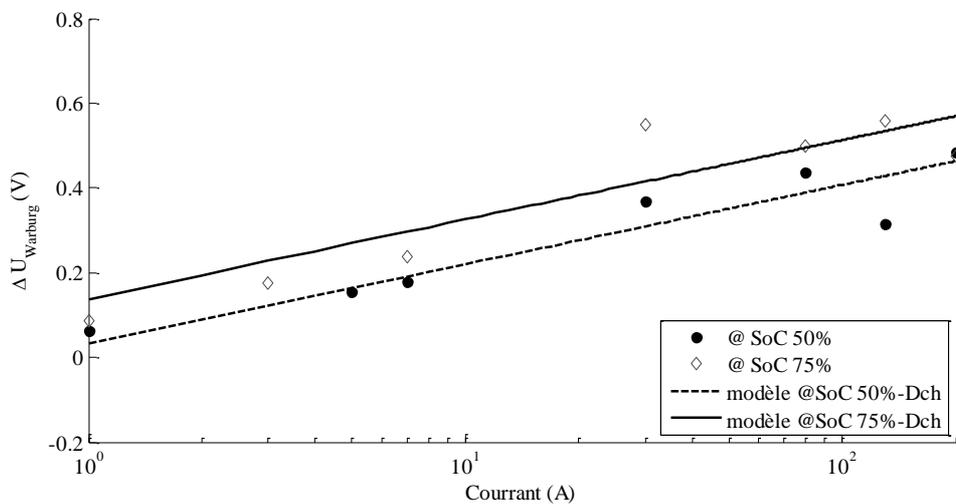


Figure 8 : Evolution de la chute de tension de Warburg en fonction du courant (Décharge)

3.2.3 La limitation du courant de recharge

Lors de la campagne d'essais, comme le constructeur nous a conseillé de recharger la batterie à tension constante sans aucune limitation en courant, nous avons alors rechargé, pour cet essai, la batterie à tension constante par palier. Le fait de recharger la batterie par palier permet de garder la batterie à une température proche de la température ambiante. Le courant maximum absorbé par la batterie en fonction de son état de charge est illustrée Figure 9. Dans le cas d'une solution embarquée, si la batterie n'est pas assistée pour le freinage électrique du véhicule, cette limitation en courant va fortement réduire la puissance du freinage électrique. La gestion d'énergie du véhicule devra intégrer la limitation en courant de recharge de la batterie.

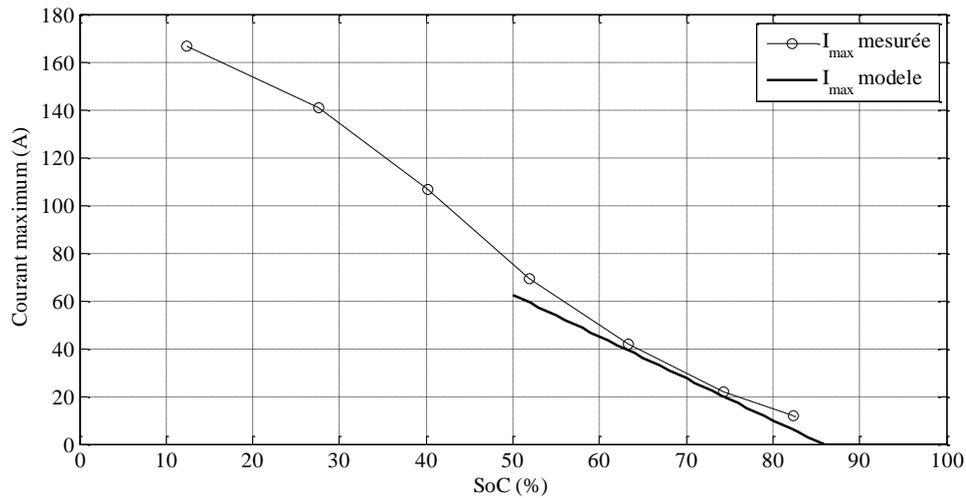


Figure 9 : Courant de charge maximum

$$\begin{cases} I_{\text{Charge_max}} = 140 - \frac{140}{85} * SoC[\%] & \forall SoC \in [50, 85] \\ I_{\text{Charge_max}} = 0 & \forall SoC \in]85, 100] \end{cases} \quad [A] \quad (10)$$

4. Les résultats de simulation

Après avoir validé le modèle sur des créneaux de courant de 20 secondes à 1 minute, après l'avoir validé sur des profils de courant d'une durée de 20 minutes, nous avons testé notre modèle sur un profil de courant d'une durée de 8 heures (soit une répétition de 24 fois du profil Artemis 400). Un extrait du profil de courant qui est la sixième heure du cyclage est illustré Figure 10. Le comparatif entre le modèle de Thévenin et la batterie nommée UK06 est illustré Figure 11 et un autre comparatif entre cette même batterie et le nouveau modèle est illustré dans la Figure 12. L'erreur relative entre le modèle de Thévenin et la réalité est comprise entre +4% et -2%, avec une moyenne de 2% sur la journée. Avec le nouveau modèle l'erreur relative n'est plus que de 0,5% et comprise entre +2% et -1%. De plus le nouveau modèle prend en compte la limitation en courant de charge que nous allons étudier dans la suite de l'article.

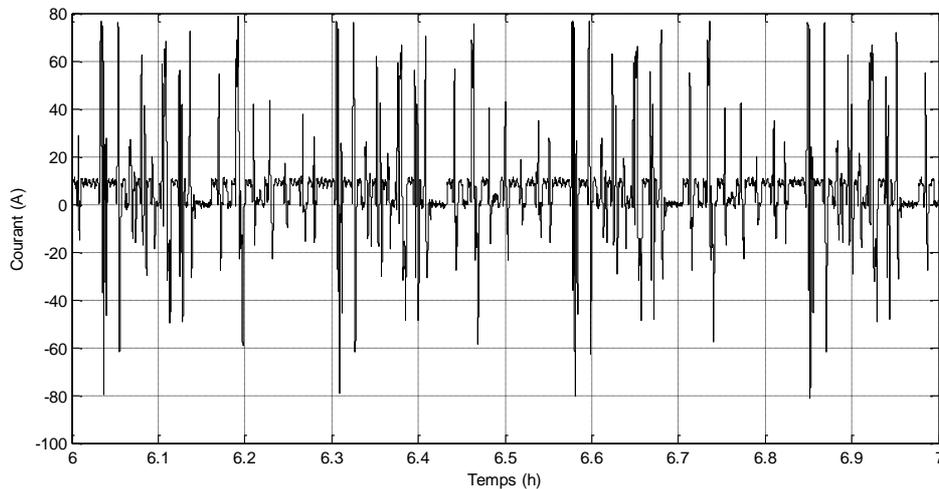


Figure 10 : Profil de courant long (extrait 8 heures)

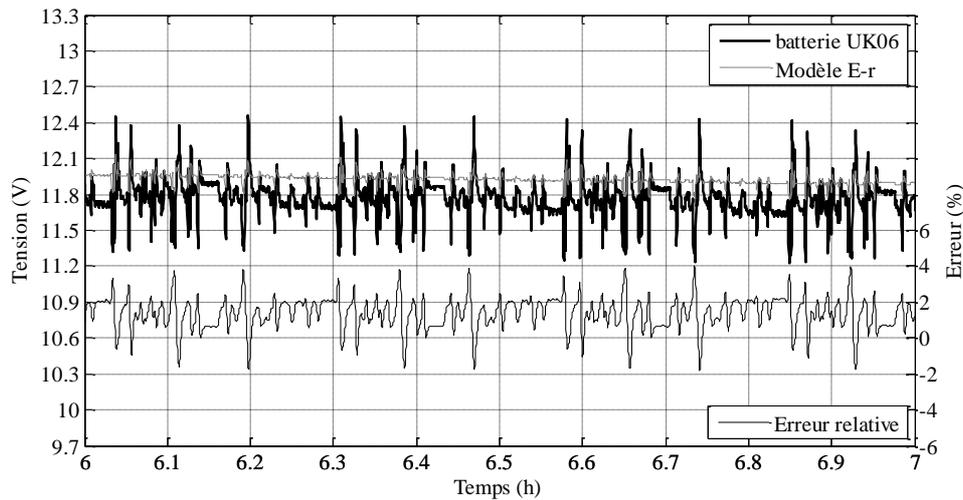


Figure 11 : Comparatif entre le modèle E-R et la batterie UK06

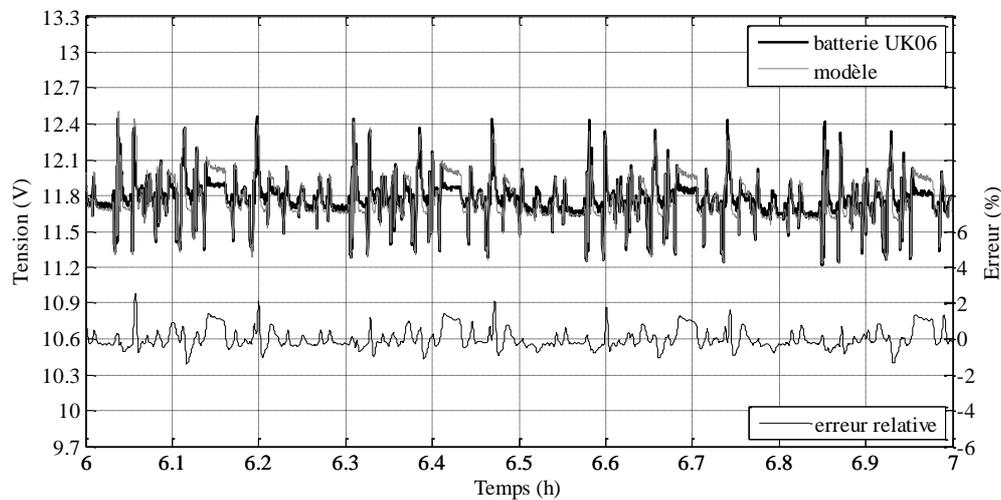


Figure 12 : Comparatif entre le modèle fin et la batterie UK06

4.1 L'influence de l'assistance du pack de SC

En début de journée, la batterie étant totalement rechargée, la recharge de la batterie est interdite. Le freinage électrique du véhicule est interdit par la batterie. Dans le cas d'une batterie assistée de supercondensateurs, le freinage électrique est autorisée quelque soit l'état de charge de la batterie car ce sont les supercondensateurs qui se rechargent avec le freinage électrique.

La batterie qui est assistée de supercondensateurs ne sera jamais rechargée par le freinage électrique et ne fournira jamais de fort courant lors des phases d'accélération du fait de la loi de gestion d'énergie. Cette batterie assistée de supercondensateurs se déchargera alors constamment de 6,3MJ pour un cycle de collecte tout au long de la journée.

La batterie non assistée doit fournir 9,1MJ en début de journée du fait de l'absence de freinage électrique contre seulement 6,3MJ en fin de journée. Au début de la journée, les batteries étant totalement chargées n'acceptent aucun courant de recharge, cette limitation entraine une surconsommation en énergie de 40% pour la batterie non assistée. La surconsommation en énergie électrique sur la journée entière est de 19,6%.

La batterie non assistée doit subir de plus fortes demande en puissance, doit subir des microcycles de charges-décharges lors des freinages électriques et doit subir une décharge plus profonde que pour la batterie assistée. La batterie assistée subira des décharges moins profondes, un état de charge final de 65% contre un état de charge de 55%, ce qui entraine une augmentation de sa durée de vie de 30% selon la datasheet du constructeur.

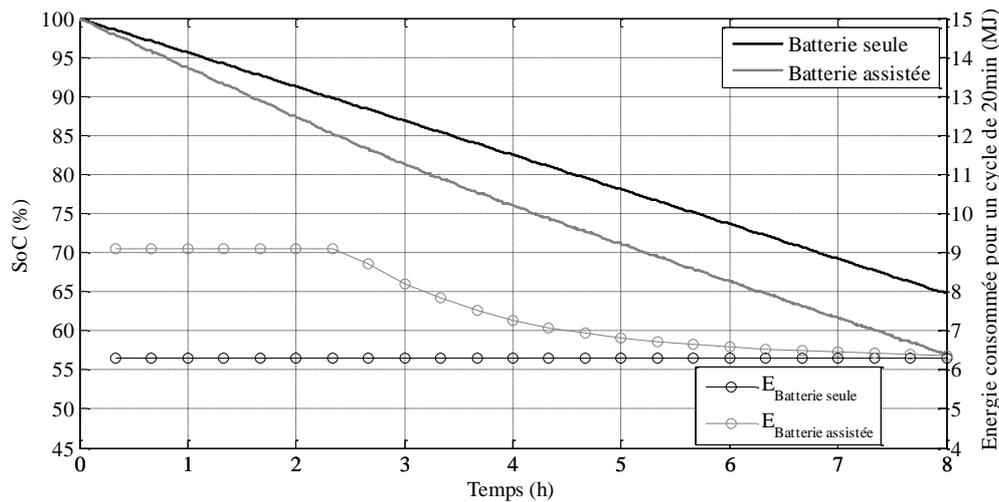


Figure 13 : Comparatif batterie avec et sans assistance

5. Conclusion

Nous avons présenté une nouvelle approche de la modélisation de la batterie basée sur des circuits de Randles modifiés. Nous obtenons alors une meilleure précision dans les simulations numériques du véhicule. La limitation de recharge de la batterie a été pris en compte pour l'étude de la consommation en énergie du véhicule.

De plus, ce modèle permet de mettre en avant les avantages non négligeables de l'association d'une batterie au plomb et de supercondensateurs. Dans un autre article [10], nous avons montré la diminution de la valeur efficace du courant circulant dans la batterie, la suppression des fortes demandes en courant de la batterie et la suppression de la recharge de la batterie par le freinage électrique. Dans cet article, nous montrons la diminution de la consommation en énergie de la batterie et l'apport d'un modèle fin de la batterie sur un simple modèle de Thevenin.

Références

- [1] ADEME, <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13635>, 2011
- [2] Van Mierlo J., Maggetto G., Lataire Ph., Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles, *Energy Conversion and Management*, 47 (2006) 2748-2760.
- [3] Van den Bossche P., Vergels F., Van Mierlo J., Matheys J., Van Autenboer W., SUBAT: An assessment of sustainable battery technology, *Journal of Power Sources* 162 (2006) 913-919.
- [4] ADEME RPA 2009 :
<http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=3C47B6F794BD946B7F1E04FB3B9E67211259244883311.pdf>
- [5] Dougal R. A., Liu S., White R. E., Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids *IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 120-131, March 2002.
- [6] Guidi G., Undeland T., Hori Y., Effectiveness of supercapacitors as power-assist in pure EV using a sodium-nickel chloride battery as main energy storage, in *Proc. 2009 24th Electric Vehicle Symposium*.
- [7] Pay S., Baghzouz Y., Effectiveness of battery-supercapacitors combination in electric vehicles, in *Proc. 2003 IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy*.
- [8] Vulturescu B., Coquery G., De Bernardinis A., Lallemand R., Traction braking energy management for urban light railway vehicles by using supercapacitors. *Technology and adapted simulation tools*, in *Proc. 2005 SPRTS Conference, Bologna, Italy*.
- [9] André M., Characterization of the traffic conditions and driving cycles development using real-world driving measurement, in *Proc. 1995 International Workshop on vehicle driving cycles, Ottawa, Canada*.
- [10] Butterbach S., Vulturescu B., Coquery G., Forgez Ch., Friedrich G., Design of a Supercapacitor-Battery Storage System for a Waste Collection Vehicle, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference - VPPC 2010, Lille*.
- [11] Mayer, D., Biscaglia, S. Modelling and analysis of lead acid battery operation *Telecommunications Energy Conference, 1989. INTELEC '89. Conference Proceedings., Eleventh International, 1989*, pp. 23.3/1-23.3/6 vol.2

- [12] Zhan, C.-J., Wu, X., Kromlidis, S., Ramachandramurthy, V., Barnes, M., Jenkins, N., Ruddell, A. Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, 2003, Vol. 150(2), pp. 175-182
- [13] Karden, S. Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries, Verlag, S. (ed.) Shaker Verlag, 2001
- [14] Kuhn E., Forgez C., Lagonotte P., Friedrich G., Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures, Journal of Power Sources 158 (2006) 1490–1497.