



HAL
open science

Modélisation de batterie à partir de données d'usage réel et de l'exploitation de l'algorithme d'optimisation Big-Bang Big-Crunch

Loic Vichard, Simon Morando, Alexandre Ravey, Fabien Harel, Pascal Venet, Serge Pelissier, Daniel Hissel

► **To cite this version:**

Loic Vichard, Simon Morando, Alexandre Ravey, Fabien Harel, Pascal Venet, et al.. Modélisation de batterie à partir de données d'usage réel et de l'exploitation de l'algorithme d'optimisation Big-Bang Big-Crunch. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981886

HAL Id: hal-02981886

<https://hal.science/hal-02981886v1>

Submitted on 28 Oct 2020

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

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

Modélisation de batterie à partir de données d'usage réel et de l'exploitation de l'algorithme d'optimisation Big-Bang Big-Crunch

Loic Vichard^{1,2}, Simon Morando⁶, Alexandre Ravey^{1,2}, Fabien Harel^{2,5}, Pascal Venet^{2,4}, Serge Pelissier⁵, and Daniel Hissel^{2,3}

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS

²FCLAB, CNRS

³FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS

⁴Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, Ampère, F-69622, Villeurbanne, France

⁵Univ Lyon, IFSTTAR, AME, LTE F-69675, LYON, France

⁶Faurecia Clean Mobility (FCM) - System Advanced Technologies - Powertrain 25500 BAVANS - France

RESUME – Le sujet de cette étude est de modéliser des batteries intégrées dans une flotte de dix véhicules postaux à hydrogène, développés dans le cadre du projet européen Mobypost. Ce dernier a permis de créer et enrichir une base de données, grâce à une instrumentation approfondie des véhicules. En utilisant cette base de données et un algorithme d'optimisation, cette étude présente un moyen rapide de modéliser le comportement électrique d'une batterie à l'aide de données d'usage réel avec une Normalized Root Mean Square Error en dessous de 0.02.

Mots-clés – Modélisation de batteries, Algorithme d'optimisation.

1. INTRODUCTION

Avec la popularité grandissante des véhicules électriques et des véhicules à hydrogène, les batteries utilisées dans ces applications sont de nos jours au centre des attentions [1]. Toutefois, il est souvent mentionné que les batteries sont des éléments très critiques et onéreux dans une chaîne de traction électrique. En effet, leur durée de vie et leur autonomie sont encore une limite à un développement à l'échelle mondiale, puisque les véhicules électriques ne peuvent toujours pas concurrencer les véhicules thermiques dans ces domaines.

Afin d'améliorer la gestion de l'énergie de ces composants, et donc leur autonomie ainsi que leur durée de vie, une bonne connaissance de leur comportement dynamique est primordiale. C'est pourquoi des modèles mathématiques sont nécessaires afin de représenter et de prédire ces comportements.

Généralement, les modèles de batteries sont déterminés à partir de caractérisations utilisant un courant constant ou un profil de courant simplifié. Ces modèles peuvent également être déterminés en pratiquant une spectrométrie d'impédance. Ces procédés nécessitent de mettre en place des essais, ce qui implique du matériel, de l'argent et du temps.

L'objet de cette étude est de présenter un moyen rapide de modéliser une batterie en utilisant seulement un algorithme d'optimisation, des cycles d'usage réel et un circuit électrique équivalent temporel simple. La particularité de ces travaux est l'utilisation d'une base de données directement issue d'une flotte de véhicules postaux.

Dans une première partie, le projet européen Mobypost ainsi que les véhicules seront brièvement présentés. Dans une seconde partie, les données utilisées pour modéliser les batteries seront énumérées et illustrées. Dans une troisième partie, le circuit électrique équivalent et ses équations mathématiques seront

détaillés. Dans une quatrième partie, l'algorithme d'optimisation utilisé pour identifier les paramètres du circuit électrique équivalent sera présenté. Finalement, les résultats seront discutés dans une cinquième partie pour terminer par une conclusion et les perspectives sur ces travaux.

2. MOBYPOST

2.1. Concept

Le projet européen Mobypost visait à développer et instrumenter une flotte de dix véhicules hybrides hydrogènes, alimentés par une pile à combustible et destinés à des applications de livraisons postales Fig.(1) [2],[3].



Fig. 1. 3 véhicules de la flotte Mobypost

Le dimensionnement de tels véhicules, légers, intégrant une pile à combustible dans une architecture série, doit prendre en compte le type d'application : services de livraison postale, soit un nombre conséquent d'arrêts et de démarrages ainsi qu'une autonomie minimum de 25km [4, 5].

Le pack de batteries est, lui, composé de quatre modules (U24-12X) connectés en série et fabriqués par la société Valence. Ces modules présentent une tension nominale de 12.8V, ainsi qu'une capacité nominale de 110Ah, mesurée avec un courant C/5 à 23°C. Chaque module est composé de 4 groupes en série de cellules, LiFeMgPO4 3.2V qui elles, sont connectées en parallèle [3].

2.2. Instrumentation des véhicules et base de données

Comme mentionné précédemment, le projet européen Moby-post a permis de créer et d'enrichir une base de données, grâce à l'instrumentation d'une flotte de véhicules postaux à hydrogène sur une durée de trois ans [3]. Les deux sources d'énergie qui composent la chaîne de traction (batteries, pile à combustible) ont été instrumentées à une fréquence de 1Hz. Plus de 1500 cycles de conduite sont maintenant accessibles dans cette étude afin de modéliser les batteries. Les données utilisées dans cette première étape sont : le courant circulant à travers le pack de batteries (I), l'état de charge d'un module (SOC), ainsi que la réponse en tension d'une cellule de ce module (V_{cell}), et la température (T).

Les figures 2, 3, 4 et 5 illustrent les grandeurs physiques mentionnées précédemment, mesurées durant une livraison postale. Celle-ci a été effectuée sans hydrogène c'est à dire avec la pile à combustible inactive.

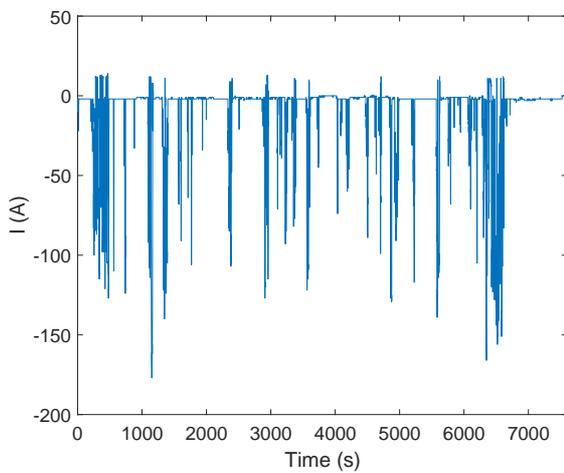


Fig. 2. Courant du pack batteries

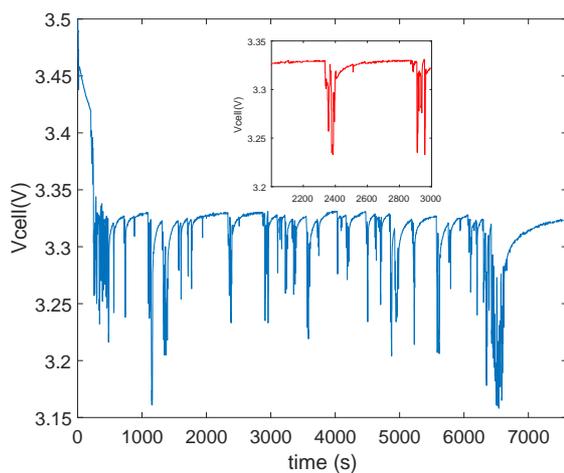


Fig. 3. Réponse en tension d'une cellule

La figure 4 illustre l'évolution de l'état de charge de la batterie au cours de cette livraison. Il est important de notifier que cet état de charge est déterminé par le *battery management system* (système de gestion de l'énergie des batteries), développé par le fabricant.

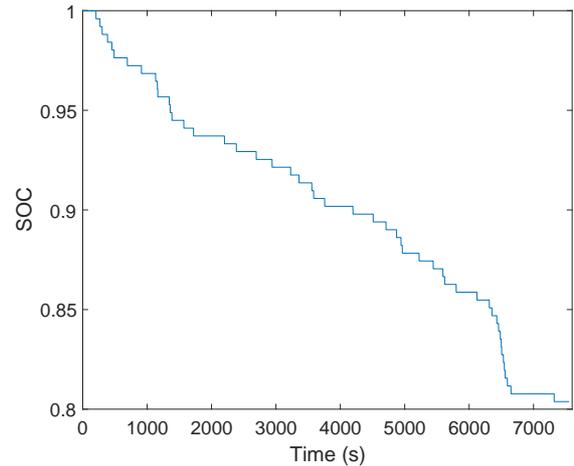


Fig. 4. Évolution de l'état de charge d'un module

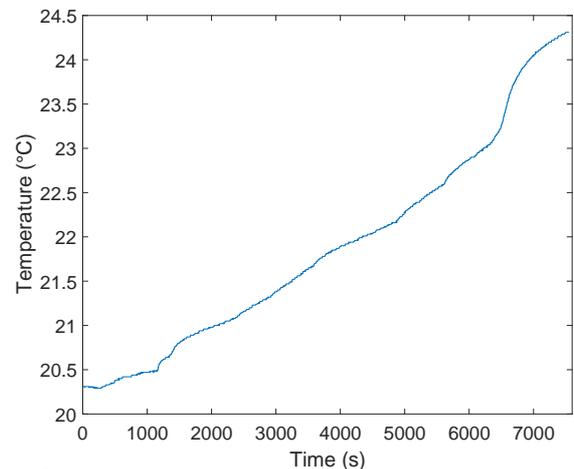


Fig. 5. Évolution de la température d'un module

3. MODÉLISATION DE LA BATTERIE

3.1. Circuit électrique équivalent de Thévenin

Le modèle de Thévenin peut être utilisé afin de représenter au mieux la réponse temporelle en tension d'une cellule de batterie. De tous les modèles qui peuvent être trouvés dans la littérature, une des structures les plus communes est celle illustrée par la Fig 6. La réponse temporelle d'une tension d'une cellule de batterie est composée de périodes transitoires de différentes durées. Il est donc nécessaire d'ajouter plusieurs circuits R/C, qui présenteront des constantes de temps (τ) différentes, afin que le modèle puisse les reproduire. Dans cette structure des circuits R/C séries sont utilisés afin de représenter les impédances liées aux effets de transfert de charges, de double couche et de diffusions. Certaines études se concentrent sur des modèles avec un seul circuit R/C [6, 7, 8], d'autres avec deux circuits R/C [9, 10, 11, 12, 13, 14], ou encore avec trois circuits R/C [15] [16].

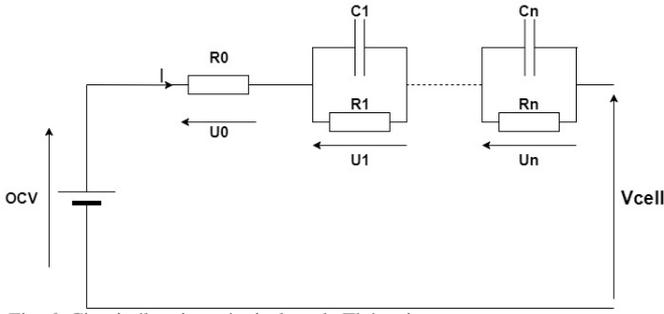


Fig. 6. Circuit électrique équivalent de Thévenin

Dans cette étude, le circuit électrique équivalent de Thévenin est utilisé avec trois circuits R//C afin d'obtenir une meilleure précision. En effet, ces trois circuits R//C ont été choisis dans le but de représenter les effets de transfert de charge, les phénomènes de diffusion, ainsi que les phénomènes de relaxation.

3.2. Équations du modèle

En appliquant les lois de Kirchoff sur le circuit électrique équivalent de la figure 6, l'expression de la réponse en tension estimée d'une cellule batterie peut être écrite comme dans l'équation (1).

$$estimated_{V_{cell}} = OCV - U0 - U1 - \dots - Un \quad (1)$$

L'étape suivante est de résoudre l'équation différentielle (2) due au circuit R//C, afin d'exprimer la réponse temporelle d'un $U_n(t)$ comme dans l'équation (3). Il est important de mentionner ici que la fréquence d'acquisition est de 1 Hz.

$$\dot{U}_n = \frac{1}{C_n} \cdot I - \frac{1}{R_n \cdot C_n} \cdot U_n \quad (2)$$

$$U_n(t) = U_n(t-1) \cdot e^{-1/(R_n \cdot C_n)} + R_n \cdot (1 - e^{-1/(R_n \cdot C_n)}) \cdot I(t) \quad (3)$$

Afin d'obtenir une meilleure précision et de refléter la réalité, certaines dépendances doivent être absolument prises en compte. Dans cette étude une dépendance thermique sera ajoutée à la tension à vide de la batterie (OCV - Open Circuit Voltage). Une dépendance à l'état de charge a aussi été ajoutée pour obtenir la représentation temporelle de l'équation (4). Cette expression de l'OCV en fonction de la température et du SOC reste un peu mystérieuse car elle est basée sur de "nombreux essais" non détaillés dans ce papier. Les résistances seront dépendantes seulement de la température comme illustré par la fonction (5).

$$OCV(t) = a + \frac{b \cdot (25 - T(t))}{SOC(t)} + \frac{c}{SOC(t)} + d \cdot SOC(t) + e \cdot \ln(SOC(t)) + f \cdot \ln(1.001 - SOC(t)) + g \cdot \ln(1.01 - SOC(t)) + h \cdot \exp(i \cdot T(t)) \quad (4)$$

a, b, c, d, e, f, g, h et i sont des constantes.

$$R_n(t) = a_n \cdot \exp(b_n \cdot T) \quad (5)$$

a_n et b_n sont des constantes.

Le circuit électrique présente donc 24 paramètres, énumérés ci-dessous, qui sont à identifier afin de reproduire en sortie une tension estimée la plus proche possible de la tension réelle.

OCV : a,b,c,d,e,f,g,h et i
R0 : a1,b1

R1 : a2,b2
R2 : a3,b3
R3 : a4,b4
Cn : C1,C2,C3

Afin d'identifier ces paramètres, nous avons besoin dans un premier temps de calculer l'erreur à l'aide des équations ci-dessous. Nous avons donc utilisé dans l'algorithme d'optimisation l'erreur moyenne quadratique normalisée (8) (pour *Normalized Root Mean Square Error*) obtenue grâce aux expressions suivantes : *Error* (6) et *Root Mean Square Error* de l'équation (7).

$$Error = real_{V_{cell}} - estimated_{V_{cell}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Error^2} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\max(real_{V_{cell}}) - \min(real_{V_{cell}})} \quad (8)$$

4. ALGORITHME D'OPTIMISATION

4.1. Principe de l'optimisation

Le principe d'optimisation consiste à identifier le jeu de paramètres d'entrée (x_n) qui minimise ou maximise une fonction mathématique $f(x_n)$. La nature est une source majeure d'inspiration lorsqu'il s'agit de proposer des méthodes d'optimisation, tels que le système de colonie de fourmis (ACO), l'algorithme génétique (GA), ou encore l'algorithme *Big-Bang Big-Crunch* (BB-BC). Ici, l'objectif est d'identifier le jeu de paramètres d'entrée (paramètres du circuit équivalent présentés précédemment), qui va minimiser l'erreur NRMSE (8) afin que la tension estimée obtenue en sortie de notre circuit électrique équivalent se rapproche le plus possible de la tension réelle, mesurée par le *battery management system*.

4.2. L'algorithme Big-Bang Big-Crunch

Dans cette étude, l'algorithme d'optimisation utilisé est le BB-BC. Cet algorithme de type évolutionniste repose sur une des théories de l'évolution de l'univers [17]. Cette théorie, basée sur la relativité générale d'Einstein, explique que la phase d'expansion de l'univers dûe au Big Bang prendra fin, pour être remplacée par la phase de Big Crunch, qui consiste en une contraction de l'univers. Morando et al.[18] mettent en évidence cet algorithme, qui présente de bonnes performances dans le but d'optimiser la structure de réseaux de neurones. C'est pourquoi il a été décidé d'utiliser cet algorithme dans cette étude.

Le BB-BC est basé sur le déroulement des étapes suivantes :

Étape 1 : Créer une population initiale aléatoire de N_{pop} individus, en respectant les limites de l'espace de recherche.

Étape 2 : Évaluer les performances de chaque individu de la population à travers la fonction objectif. La fonction objectif étant l'erreur NRMSE entre la tension de cellule réelle et la tension de cellule estimée.

Étape 3 : Trouver le centre de masse correspondant au meilleur individu (jeu de paramètres d'entrée permettant l'erreur la plus faible).

Étape 4 : Créer de nouveaux individus autour du centre de masse en ajoutant ou en soustrayant une valeur aléatoire qui diminue lorsque le nombre de générations augmente (réduction de

l'espace de recherche), tout en gardant une probabilité d'exploration afin de ne pas se bloquer dans un minimum local.

Étape 5 : Retourner à l'étape 2 tant que les critères d'arrêt n'ont pas été atteints.

La réduction de l'espace de recherche est représentée par une fonction proportionnellement inverse au nombre de générations, illustrée par l'équation (9).

$$RS_{div}(gen) = \frac{1}{gen} \quad (9)$$

Cette fonction réduit drastiquement l'espace de recherche lors des premières générations et cela peut entraîner une progression vers un minimum local, au lieu d'une progression vers le minimum global désiré. Afin d'éviter cela, une autre méthode de réduction de l'espace de recherche, proposée par [18], a été utilisée dans cette étude. Cette méthode réduit l'espace de recherche de manière plus lente lors des premières générations, pour ensuite accélérer la réduction en vue de trouver le minimum global de manière plus efficace. La fonction linéaire (9) a donc été remplacée par une fonction exponentielle.

Il est important de mentionner que cet algorithme est un algorithme stochastique : ainsi pour être sûr d'atteindre le minimum global, un nombre infini de générations est nécessaire. Dans cette étude, ce qui est recherché est le jeu de paramètres qui permettra de reproduire la réponse en tension d'une cellule batterie, pour une gamme complète de températures avec une bonne précision. L'un des objectifs étant aussi de conserver un temps de calcul court, il ne faut pas définir pas un nombre de générations trop important. Cela revient à ne pas viser exactement le minimum global, mais une valeur qui s'en rapproche fortement.

5. RÉSULTATS

Les figures 7 et 10 comparent la tension estimée d'une cellule batterie provenant du modèle intégrant les paramètres précédemment identifiés, avec la tension réelle mesurée provenant de la base de données. Ici l'erreur NRMSE entre les deux tensions est de $NRMSE = 0.0185$, ce qui prouve l'efficacité de la méthode proposée.

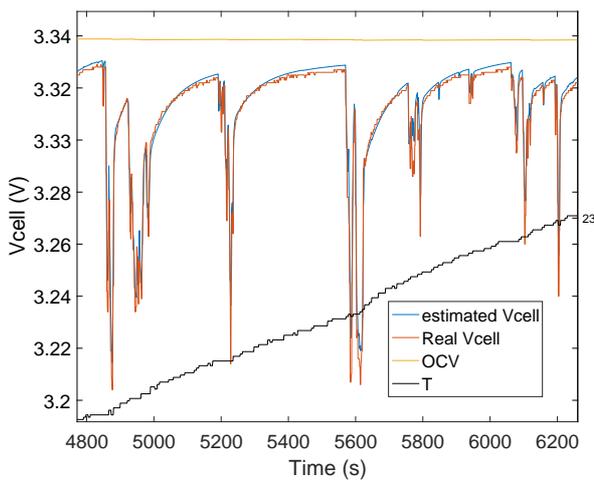


Fig. 7. Comparaison tension réelle/estimée avec un cycle de conduite utilisé pour l'identification des paramètres

Les tableaux 1 et 2 présentent les valeurs moyennes des trois constantes de temps, ainsi que leur valeur de capacité associée pour le cycle de conduite qui a été utilisé pour l'identification des paramètres. Les valeurs des constantes de temps sont des

moyennes, puisque leur valeur dépend de l'évolution des résistances. Ces constantes de temps présentent trois valeurs différentes : 2 secondes afin de reproduire les effets de transfert de charges ainsi que les effets de double couches, 66 secondes et 500 secondes afin de reproduire à la fois les phénomènes de diffusion et les phénomènes de relaxation. Concernant les phénomènes de relaxation, afin d'obtenir une reproduction bien plus précise de ces effets, des circuits R/C supplémentaires devraient être ajoutés avec des constantes de temps supérieures allant jusqu'à plusieurs heures [19]. La figure 8 illustre cette évolution de la résistance interne globale R_{in} , qui est la somme des quatre résistances du modèle, en fonction de la température.

Tableau 1. Valeurs des paramètres du modèle ainsi que les constantes de temps associées pour $20.5^{\circ}C < T < 24.5^{\circ}C$

Components	Values
τ_1	66 s
τ_2	2 s
τ_3	500 s
C_1	72000F
C_2	2700F
C_3	500000F
a	3.22 V
b	-0.001 V/°C
c	-0.0216 V
d	0.182 V
e	-0.0886 V
f	-0.0632 V
g	0.0778 V
h	-0.001 V
i	-0.5 °C ⁻¹

Tableau 2. Valeurs des coefficients de résistances

Resistance	a_n	b_n
R_0	0.0003 Ω	-0.0753 °C ⁻¹
R_1	0.0010 Ω	-0.0052 °C ⁻¹
R_2	0.0013 Ω	-0.0301 °C ⁻¹
R_3	0.0010 Ω	-0.0025 °C ⁻¹

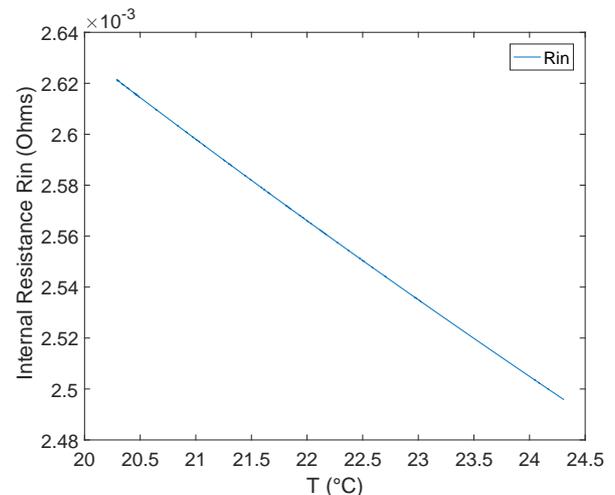


Fig. 8. Évolution de la résistance interne en fonction de la température

Les résultats illustrés précédemment prouvent que les équations déduites du circuit électrique équivalent sont capables de

reproduire la réponse en tension d'une cellule de batterie tout en prenant en compte les dépendances liées à la température ainsi qu'à l'état de charge. Ces résultats prouvent également la capacité à identifier les bons paramètres de ce circuit électrique équivalent. Ici les résultats sont illustrés en utilisant le cycle de conduite qui a servi pour l'identification des paramètres. La méthode n'est donc pas validée. La prochaine étape est de vérifier que les paramètres sont capables de reproduire tous les cycles de conduite de cette batterie.

6. VALIDATION

Afin de valider cette méthode de modélisation, et de vérifier si les paramètres identifiés sont cohérents, et s'ils permettent de représenter la réponse en tension de la batterie de manière générale, d'autres cycles de conduite doivent donc être utilisés afin de quantifier l'erreur. Pour cela, un cycle de conduite où la température est comprise entre 5°C et 9°C a été choisi. Les figures 9 et 11 peuvent valider la cohérence des paramètres et des équations, puisque le modèle est capable d'ajuster la chute de tension en fonction de la gamme de température.

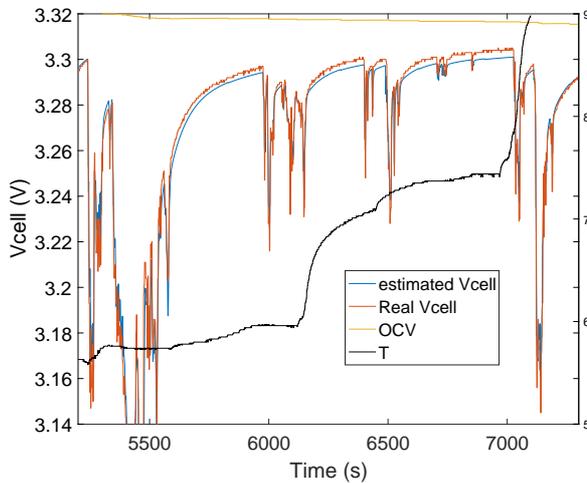


Fig. 9. Comparaison tension réelle/estimée avec un cycle de conduite utilisé pour validation

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article présente une modélisation de batterie à partir de cycles de conduite réels prenant en compte les dépendances liées à la température ainsi qu'à l'état de charge. Cette modélisation est effectuée en utilisant un circuit électrique équivalent de Thevenin, et des données d'usage réel directement extraites de la base de données *Mobypost*, à travers un algorithme d'optimisation. Cette méthode présente de bonnes performances, puisque le niveau d'erreur, ainsi que le temps d'exécution, sont faibles. Des travaux futurs viseront à améliorer d'avantage la dépendance liée à la température et à l'état de charge.

8. REMERCIEMENTS

Cette étude a pu être réalisée grâce au financement de la région Franche-Comté

9. RÉFÉRENCES

- [1] B. Blunier, D. Bouquain, and A. Miraoui, "Fuel cells, energy management using fuel cells and supercapacitors," *Alternative Propulsion Systems for Automobiles* (Expert Verlag, 2008), pp. 97–116, 2008.
- [2] A. Ravey, S. Faivre, C. Higel, F. Harel, and A. Djerdir, "Energy management of fuel cell electric vehicle with hybrid tanks," in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2014, pp. 3962–3967.

- [3] L. Vichard, A. Ravey, S. Morando, F. Harel, P. Venet, S. Pelissier, and D. Hissel, "Battery aging study using field use data," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Dec. 2017.
- [4] C. Higel, F. Harel, D. Candusso, S. Faivre, A. Ravey, D. Guilbert, A. Ndiaye, D. Bouquain, A. Djerdir, and A. Gaillard, "Part 1 : Mobypost vehicle's powertrain modeling, simulation and sizing," in *Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDfC 2013)*, 2013.
- [5] S. Faivre, A. Ravey, D. Guilbert, A. Ndiaye, A. Gaillard, D. Bouquain, A. Djerdir, C. Higel, F. Harel, and D. Candusso, "Part 2-mobypost vehicle's powertrain design and experimental validation," in *International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells (FDfC 2013)*, 2013.
- [6] S. Tian, M. Hong, and M. Ouyang, "An experimental study and nonlinear modeling of discharge i-v behavior of valve-regulated lead-acid batteries," *IEEE transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 452–458, 2009.
- [7] B. Y. Liaw, G. Nagasubramanian, R. G. Jungst, and D. H. Doughty, "Modeling of lithium ion cells—a simple equivalent-circuit model approach," *Solid state ionics*, vol. 175, no. 1, pp. 835–839, 2004.
- [8] M. Dubarry and B. Y. Liaw, "Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 174, no. 2, pp. 856–860, 2007.
- [9] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and iv performance," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006.
- [10] J. Zhang, S. Ci, H. Sharif, and M. Alahmad, "An enhanced circuit-based model for single-cell battery," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*. IEEE, 2010, pp. 672–675.
- [11] B. Schweighofer, K. M. Raab, and G. Brasseur, "Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 52, no. 4, pp. 1087–1091, 2003.
- [12] S. Abu-Sharkh and D. Doerffel, "Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 130, no. 1, pp. 266–274, 2004.
- [13] S. Barsali and M. Ceraolo, "Dynamical models of lead-acid batteries : Implementation issues," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 17, no. 1, pp. 16–23, 2002.
- [14] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, and B. Yurkovich, "A technique for dynamic battery model identification in automotive applications using linear parameter varying structures," *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 10, pp. 1190–1201, 2009.
- [15] R. C. Kroeze and P. T. Krein, "Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations," in *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*. IEEE, 2008, pp. 1336–1342.
- [16] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, and B. Yurkovich, "Electro-thermal battery model identification for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 449–457, 2011.
- [17] O. K. Erol and I. Eksin, "A new optimization method : big bang–big crunch," *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 2, pp. 106–111, 2006.
- [18] S. Morando, M. Pera, N. Youfi Steiner, S. Jemei, D. Hissel, and L. Larger, "Reservoir computing optimisation for pem fuel cell fault diagnostic," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Dec. 2017.
- [19] A. Li, S. Pelissier, P. Venet, and P. Gyan, "Fast characterization method for modeling battery relaxation voltage," *Batteries*, vol. 2, no. 2, pp. 1–15, 2016.

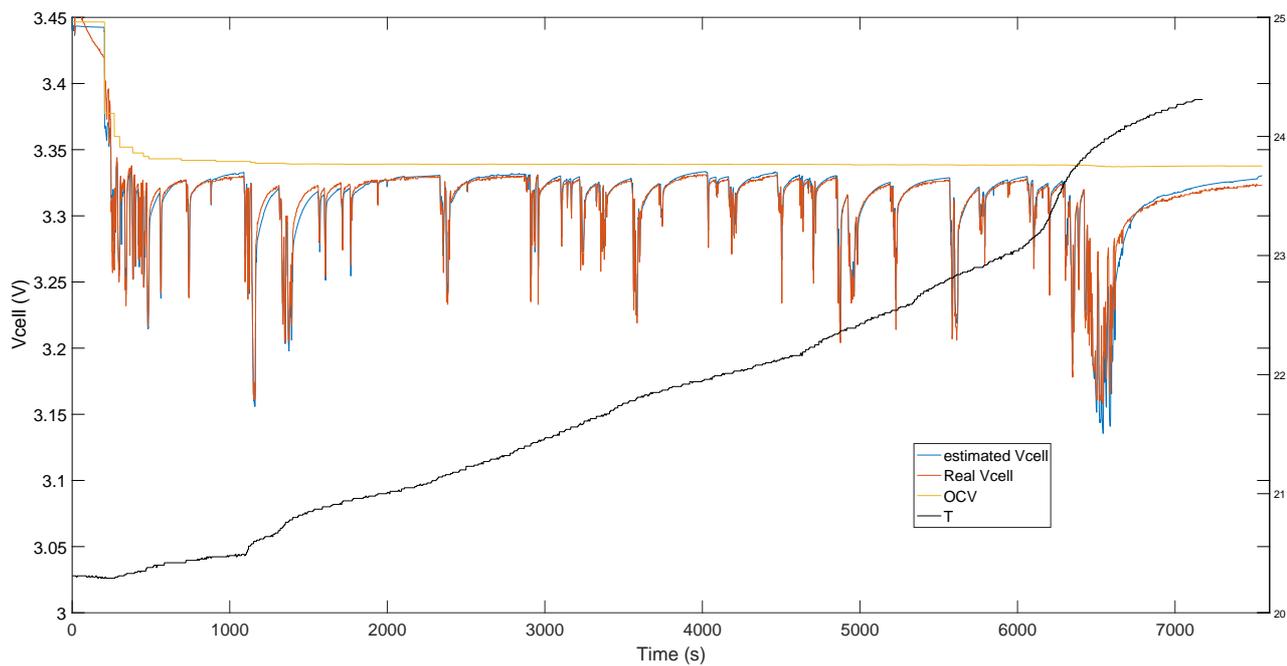


Fig. 10. Comparaison tension réelle/estimée avec un cycle de conduite complet utilisé pour l'identification des paramètres

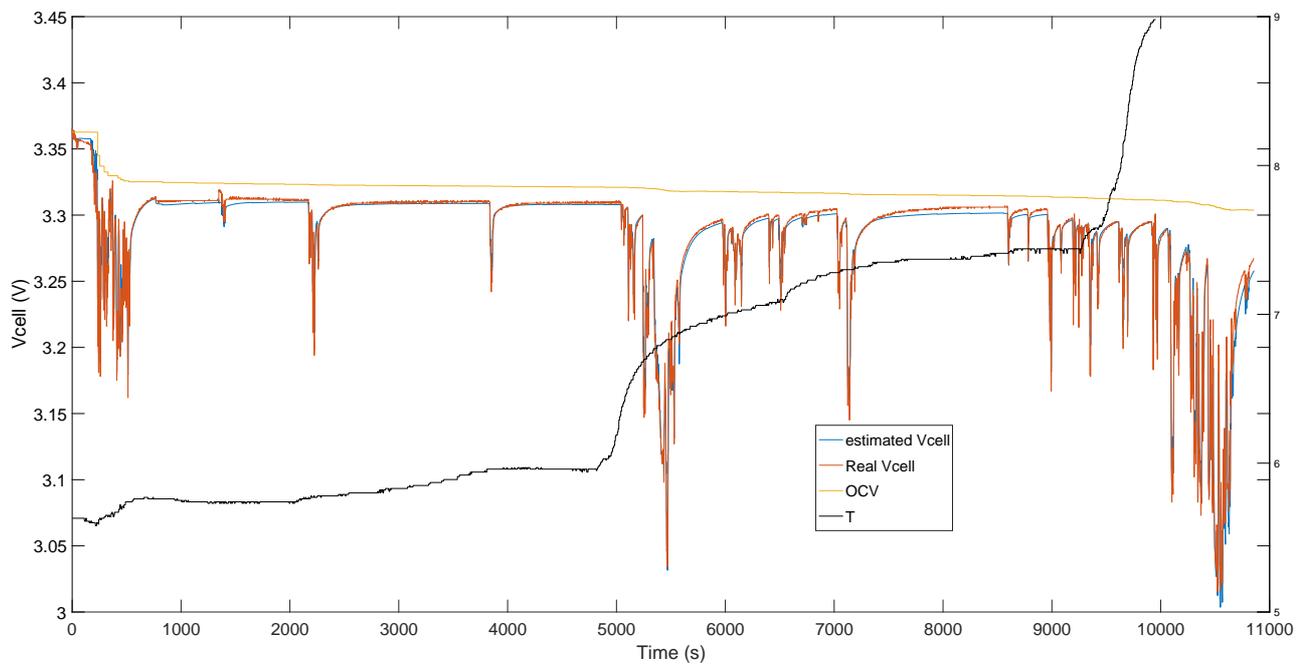


Fig. 11. Comparaison tension réelle/estimée avec un cycle de conduite complet utilisé pour validation