

Modèle de batteries Ni-MH adaptée au Génie Electrique

description et validation expérimentale

Emmanuel KUHN, Christophe FORGEZ, Guy FRIEDRICH

Résumé— Nous présentons et justifions dans cet article un modèle à « constantes localisées » d'accumulateurs Ni-MH. Ce modèle utilise différents circuits électriques élémentaires pour représenter les phénomènes statiques et dynamiques présents au cœur de l'accumulateur.

L'originalité de nos travaux réside dans l'emploi de dérivées non entières pour modéliser l'impédance de Warburg associée aux phénomènes de diffusion.

A terme, notre étude permettra d'optimiser les lois de commande d'une chaîne de traction : Accumulateur-Moteur Electrique.

Les validations proposées s'appuieront à la fois sur des essais effectués sur banc de cyclage et sur une chaîne de traction.

utilisée pour la modélisation d'accumulateurs au plomb [4], [5] et peu pour les accumulateurs NiMH.

Cette dernière formulation présente le double intérêt de rester proche de la physique (chaque élément est l'image d'un phénomène précis) et est classique dans le domaine du Génie Electrique.

Nous présentons et justifions dans cet article un modèle électrique général de cellule NiMH et ses différentes évolutions afin de pouvoir être utilisé dans un environnement système. Après une justification du choix des modèles (dérivées non entières) et de l'identification correspondante des paramètres associés, nous validerons ce modèle par des essais sur banc de cyclage et sur chaîne de traction.

II. CHOIX DU CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT A CONSTANTES LOCALISEES

I. INTRODUCTION

Les problèmes de modélisation de batteries peuvent être abordés de deux façons différentes.

Une première méthode consiste à considérer les phénomènes électrochimiques du point de vue mathématique. En ce cas le système étudié est mis sous forme d'équations différentielles non linéaires dont les conditions aux limites dépendent de nombreux paramètres expérimentaux (pression, dimensions de l'accumulateur, concentrations des espèces) [1]. L'accès à ces paramètres étant difficile, l'approche mathématique s'adresse plus aux spécialistes du domaine qu'aux électrotechniciens.

Une autre méthode consiste à développer un circuit électrique équivalent dont les différents éléments reflètent les phénomènes électrochimiques en présence [2], [3]. L'identification de ces éléments se fait à partir de mesures expérimentales appropriées. Cette approche a été souvent

En reprenant les travaux de NOTTEN [6] relatifs à un accumulateur NiCd, nous sommes parvenus au schéma électrique équivalent de la figure Fig. 1. [7].

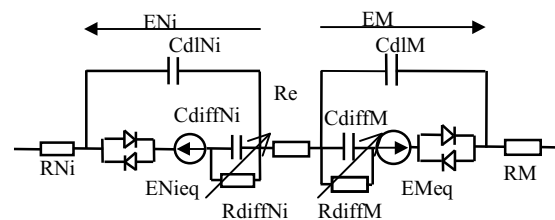


Fig. 1. Modèle de l'accumulateur NiMH.

E_{Ni} et E_{Me} représentent les potentiels d'équilibre respectifs des électrodes de Nickel et de Métal.

R_{Ni} et R_M représentent les résistances de connectique de chacune des électrodes.

R_e correspond à la résistance de l'électrolyte.

Cd_{Ni} et Cd_{LM} représentent les capacités de double couche.

Les diodes montées en anti-parallèle correspondent aux phénomènes de transfert de charge.

Les réseaux (R_{diffNi}, C_{diffNi}) et (R_{diffM}, C_{diffM}) s'apparentent aux phénomènes de diffusion.

Ce modèle permet une analyse fine des phénomènes présents sur chacune des électrodes mais se heurte à des problèmes d'identification. Outre les phénomènes non linéaires de diffusion (C_{diff} et R_{diff}), la séparation des deux électrodes

(M et Ni) nécessite un dispositif expérimental particulier (troisième électrode constituant une référence). L'ajout de cette troisième électrode, tout à fait possible et réalisé dans un laboratoire d'électrochimie partenaire, semble délicat dans le domaine du Génie Electrique.

Une première évolution de ce schéma consiste à regrouper les phénomènes électrochimiques d'une manière globale (Fig. 2). E_o correspond au potentiel d'équilibre total de la cellule.

$R\Omega$ correspond aux résistances de connectique et à la "résistance équivalente" de l'électrolyte.

Cdl: capacité double couche équivalente aux deux électrodes.

R_{tc} : phénomène de transfert de charge linéarisé.

Zwarburg: Impédance modélisant le phénomène de diffusion sur les 2 électrodes. Ce phénomène, non linéaire constitue la partie la plus délicate de la modélisation.

Ce nouveau schéma équivalent est parfois cité dans la littérature sous le nom de "schéma de Randles"[8].

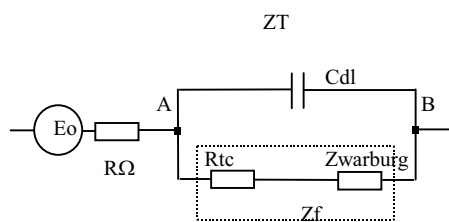


Fig. 2. Schéma électrique équivalent de Randles.

Dans le type d'accumulateur considéré, les constantes de temps $\tau = R_{tc}C_{dl}$ propres aux phénomènes de transfert de charge sont inférieures à celles des phénomènes de diffusion, de fait, nous pouvons simplifier le modèle de Randles en ramenant la capacité de double couche aux bornes de la résistance de transfert de charge Fig. 3.

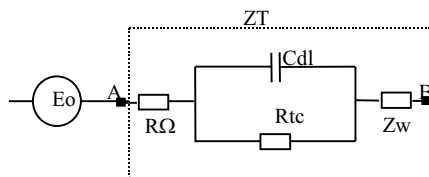


Fig. 3. Schéma de Randles modifié avec Cdl connectée à R_{tc} .

Lorsque nous nous plaçons dans le cadre des régimes sinusoïdaux, nous pouvons exprimer notre modèle sous la forme d'une impédance équivalente $Z_T(s)$ dont l'expression est :

$$Z_T(s) = R\Omega + \frac{R_{tc}}{1 + sR_{tc}C_{dl}} + Z_w(s) \quad (1)$$

$Z_w(s)$ correspond aux phénomènes de diffusion au sein de la batterie, et se note impédance de Warburg. Nous détaillerons sa structure dans la section suivante.

III. JUSTIFICATION DE L'EMPLOI DES DERIVEES NON ENTIERES ET IDENTIFICATION DES PARAMETRES

Une technique de caractérisation classique en électrochimie est l'impédancemétrie qui consiste en une simple analyse harmonique de la cellule

A. Présentation de la technique d'impédancemétrie

Elle est généralement utilisée comme un indicateur de l'état de charge [9] et plus rarement pour des caractérisations dynamiques.

Le principe de cette méthode est le suivant :

En mode potentiostatique, à une fréquence donnée $f = \frac{\omega}{2\pi}$,

nous superposons au potentiel d'équilibre E_o de la cellule une tension sinusoïdale $v(t) = V_{\max} \sin(\omega t)$ de faible amplitude ($V_{\max} < 10\text{mV}$).

Nous pouvons alors exprimer l'impédance complexe de la cellule Z_T sous la forme : $Z_T(s) = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \exp(j\varphi)$.

Avec φ le déphasage entre la tension instantanée $v(t)$ et le courant $i(t)$ circulant à travers la cellule.

En réitérant cette opération sur une zone de fréquences données, nous obtenons un ensemble de mesures dont la représentation théorique dans le plan de Nyquist est celle de la Fig. 4.

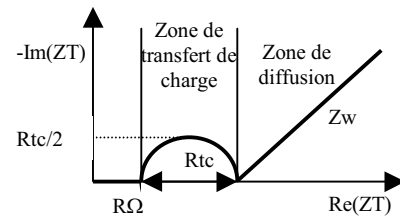


Fig. 4. Tracé de Nyquist idéal d'un accumulateur à un état de charge donné.

Comme nous pouvons le constater, le tracé de Nyquist de la figure Fig. 4. est constitué de deux zones bien distinctes:

Dans les hautes fréquences, nous avons un demi-arc de cercle correspondant aux phénomènes de transfert de charge.

Le premier point de ce demi-arc est une résistance $R\Omega$ correspondant à la résistance interne de l'accumulateur.

L'arc de cercle est typique d'une résistance R_{tc} en parallèle avec une capacité C_{dl} .

R_{tc} correspond à la résistance de transfert de charge, et C_{dl} à la capacité de double couche [10].

Dans les basses fréquences, nous avons une droite dont la pente dans le cas théorique est de 45°. Cette droite est la représentation dans le plan de Nyquist des phénomènes de diffusion qui s'expriment sous la forme d'une impédance équivalente appelée impédance de Warburg, et notée Z_w [10].

B. Modélisation de l'impédance de Warburg à l'aide de dérivées non entières.

La représentation de l'impédance de Warburg par une fonction de transfert donnée dépend des conditions aux limites du système électrochimique étudié.

Ainsi dans le cas d'une diffusion semi-infinie l'impédance de Warburg admet pour expression [11]:

$$Z_w(j\omega) = \sigma \omega^{-0.5} (1 - j) \quad (2)$$

ou σ est un paramètre dépendant des divers phénomènes électrochimiques présents.

Ne connaissant pas a priori les conditions aux limites de notre système, nous avons tracé le Bode de l'accumulateur à différents états de charge afin d'établir la structure générale de $Z_w(s)$.

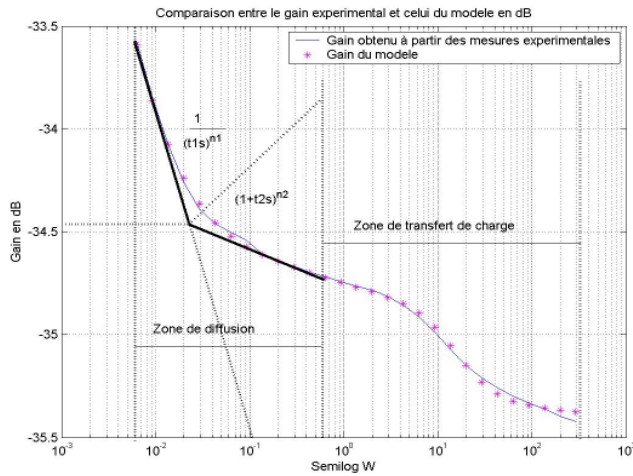


Fig. 5. Tracé de Bode du Gain de Z_w (Etat de charge de la batterie: SoC 60%).

Comme le montre la figure Fig. 5. le gain dans la zone de diffusion peut être approché par une fonction de transfert $Z_w(s)$ en puissances non entières de la variable de Laplace s . L'expression finale retenue pour l'impédance de Warburg est :

$$Z_w(s) = \frac{(1 + \tau_2 s)^{n_2}}{(\tau_1 s)^{n_1}} \quad (3)$$

τ_1, τ_2 sont les constantes de temps de $Z_w(s)$.

n_1, n_2 deux réels tels que $(n_1, n_2) \in]0, 1[$.

La présence de puissances non entières de s dans le domaine fréquentiel s'apparente à un système constitué de dérivées non entières dans le domaine temporel [12], [13].

La structure de $Z_w(s)$ étant définie à un état de charge donné, nous pouvons déterminer la contribution en tension $w(t)$ de l'impédance Warburg pour tout courant $i(t)$ puisque :

$$w(t) = L^{-1} \left(\frac{(1 + \tau_2 s)^{n_2} I(s)}{(\tau_1 s)^{n_1}} \right) \quad (4)$$

la structure de $Z_w(s)$ étant déterminée, nous pouvons calculer la réponse en tension $V(t)$ du modèle à un échelon quelconque de courant $I(t)$.

Compte tenu de (1), (3), et (4) nous avons :

$$V(t) = E_o + R\Omega I(t) + Rtd(1 - e^{-t/RtcCdl})I(t) + L^{-1} \left(\frac{(1 + \tau_2 s)^{n_2} I(s)}{(\tau_1 s)^{n_1}} \right) \quad (5)$$

C. Identification des paramètres

L'identification des différents paramètres s'effectue sous certaines hypothèses :

- Les réactions secondaires sont négligées.
- L'accumulateur NiMH est considéré comme linéaire [14].
- Les paramètres sont indépendants de l'évolution du courant et de la température. Ils ne dépendent que de l'état de charge de la batterie.

Aux états de charge 20%, 40%, 60%, 80%, 100% nous balayons par impédancemétrie N fréquences telles que $46\text{Hz} < f < 10^{-3}\text{Hz}$. Les paramètres $Rtc, Cdl, n_1, n_2, \tau_1, \tau_2$ sont ensuite identifiés à l'aide d'un algorithme de minimization au sens des moindres carrés [8].

Le potentiel d'équilibre de la batterie E_o ainsi que la résistance interne $R\Omega$ sont quant à eux identifiés en régime continu.

La pertinence des paramètres obtenus par cette méthode d'identification a été systématiquement évaluée en superposant aux états de charge considérés les tracés de Nyquist expérimentaux et ceux reconstruits à l'aide des paramètres (cf Fig. 6).

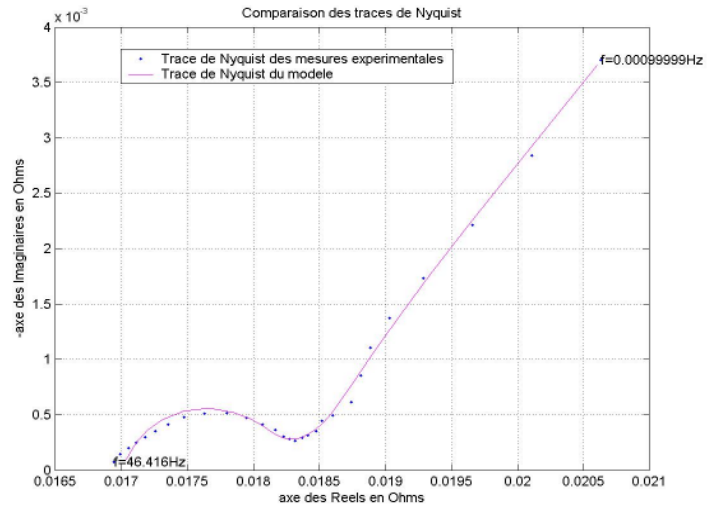


Fig. 6. Tracé de Nyquist de la batterie et de son modèle à SoC 60%.

IV. VALIDATION EXPERIMENTALE

A. Sur banc de cyclage

Afin d'estimer la précision du modèle établi en petits signaux nous partons d'un état de charge donné et imposons à la cellule des profils de courant type Fig. 7.

La variation de l'état de charge de l'accumulateur au cours d'un cycle complet de simulation, n'excède pas 2%. Les réponses en tension du modèle et de la cellule sont ensuite comparées Fig. 8, et exprimées en erreur absolue Fig. 9.

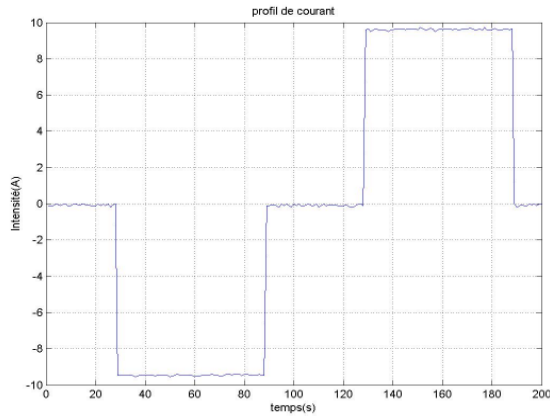


Fig. 7. Profil de courant de $|10A|$ max imposé à la batterie en partant de SoC 60%.

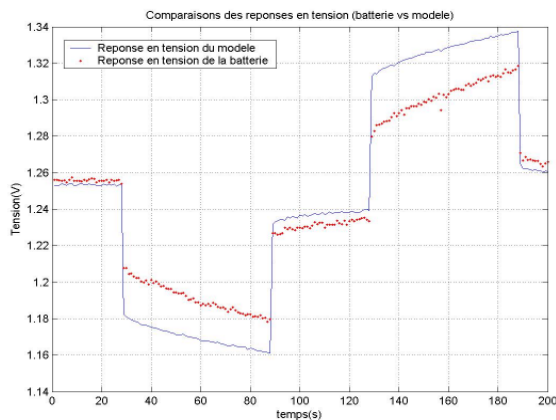


Fig. 8. Superposition des réponses en tension de la batterie et du modèle à paramètres petits signaux pour un profil de courant de $|10A|$ max.

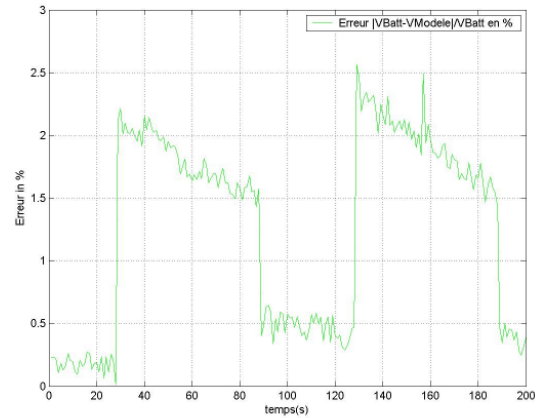


Fig. 9. Erreur absolue en % entre la tension calculée par le modèle à paramètres petits signaux et la tension de la cellule pour un profil de courant de $|10A|$ max.

Les erreurs absolues maximales entre le modèle petits signaux et la batterie sont reportées dans le Tableau 1.

Cellule 1.2V (1C=13.5A)	$ I_{max} =7A$	$ I_{max} =10A$
SoC de départ 100%	1.8%	2.5%
Erreur max		
SoC de départ 80%	1.3%	1.8%
Erreur max		
SoC de départ 60%	1.5%	1.8%
Erreur max		

Tableau 1. Erreurs maximales entre les réponses en tension de la cellule et celles du modèle à paramètres petits signaux.

Les erreurs relevées restent en dessous de 3% pour des courants d'amplitude $\pm 10A$ attestant ainsi la validité du modèle petits signaux en grands signaux.

Ces résultats remarquables mettent en évidence la linéarité de l'accumulateur NiMH considéré.

B. Sur chaîne de traction

Une machine électrique (42V, 7kW) a été couplée au banc de charge du laboratoire (Fig. 10). Ce dernier permet d'imposer des profils de charge représentatifs d'un véhicule électrique. La consigne de couple appliquée au moteur électrique correspond à des lois de contrôle optimales, qui ne seront pas exposées dans le cadre de cet article mais qui visent à maintenir un SOC constant lors de cycles caractéristiques de conduite urbaine. Le lecteur intéressé pourra se reporter à l'article [15] pour la présentation des lois de pilotage en considérant la batterie comme parfaite et l'article [16] pour la prise en compte des pertes dans la batterie.

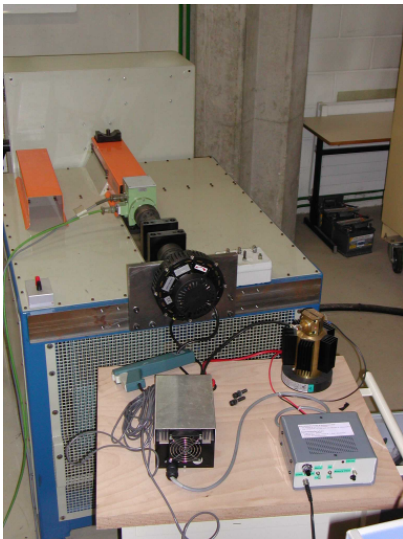


Fig. 10. Validation sur chaîne de traction

Les figures Fig. 11. et Fig. 12. présentent le profil de courant injecté dans la batterie et l'évolution de la tension correspondante.

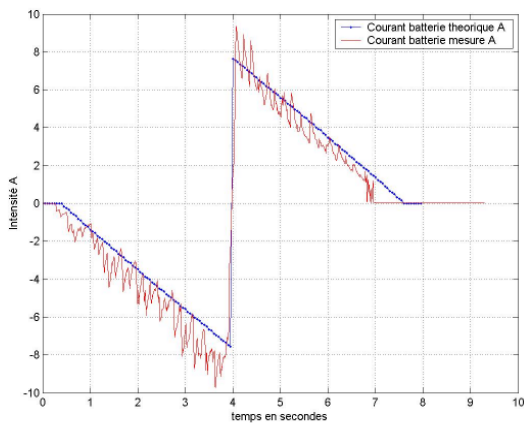


Fig. 11. Profil de courant injecté

La figure Fig. 11. présente le résultat des lois de contrôle optimale. Comme précédemment décrit, ces lois conduisent à une variation nulle du SOC sur un cycle de conduite (courant de charge = courant de décharge). Les ondulations de courant apparaissant sur les mesures sont dues au convertisseur PWM non modélisé dans la simulation.

La figure Fig. 12. présente la réponse en tension calculée par le modèle lorsque l'on injecte le courant mesuré sur le banc.

Les différentes conditions de l'essai et les paramètres correspondants sont reproduits en appendice.

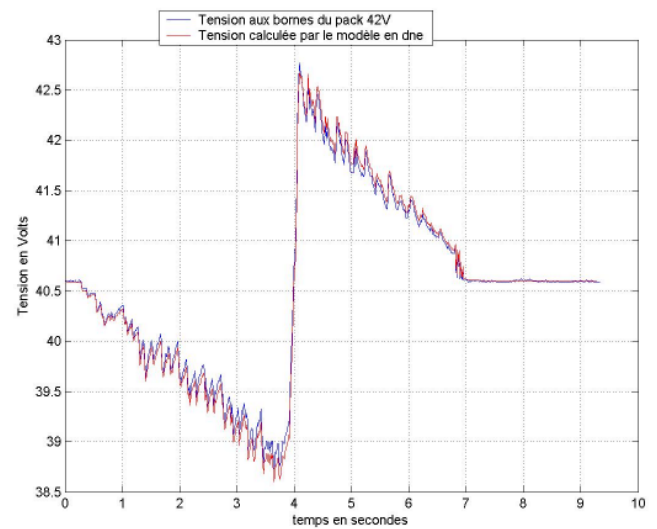


Fig. 12. Comparaison de la tension réelle et simulée pour le profil de courant décrit figure 11

L'analyse de la figure Fig. 12. permet de valider le modèle proposé tant en terme d'amplitude que de fréquence. On notera tout particulièrement la précision de la réponse dynamique permettant une bonne prise en compte du couplage entre le convertisseur et l'accumulateur Ni-MH.

La figure Fig. 13. qui effectue un zoom entre 4 et 5 secondes confirme les remarques précédentes.

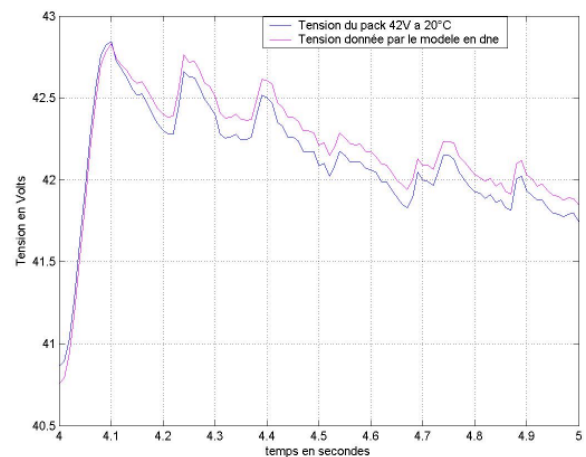


Fig. 13. Zoom entre 4 et 5 secondes de l'essai présenté figure 12.

V. CONCLUSION

L'article a proposé et justifié un modèle de batteries Ni-MH basé sur un schéma à constantes localisées correspondant à des phénomènes électrochimiques clairement identifiés. Les éléments de ce schéma ont été déterminés à partir d'une analyse harmonique petits signaux. Une série de vérifications expérimentales (sur banc de cyclage et chaîne de traction), caractéristiques d'une utilisation réelle, a permis de montrer une bonne précision, tout particulièrement pour les réponses dynamiques. On notera néanmoins, que bien que performant, en terme de modélisation dynamique, cette approche demeure mal adaptée à une approche énergétique à cause de la modélisation utilisée pour l'impédance de Warburg. Le lecteur intéressé par cet aspect pourra utilement se reporter à la publication [16].

APPENDICES

Etat de charge de la batterie au moment de l'essai sur la chaîne de traction : SoC 60%

Paramètres utilisés par le modèle en dérivées non entières à SoC 60%:

$$E_{eq} = 40.6V$$

$$R_{interne} = 6.17 \cdot 10^{-3} \Omega;$$

$$R_{tc} = 9.11 \cdot 10^{-4} \Omega; \quad C_{dl} = 73.32 F;$$

$$n_1 = 0.6046; \quad \tau_1 = 1.177 \cdot 10^6 s;$$

$$n_2 = 0.3455; \quad \tau_2 = 12.90 s;$$

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région de Picardie pour son soutien financier au travers du pôle de recherche DIVA .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. Karden, P. Mauracher, F. Schope, "Electrochemical modelling of lead/acid batteries under operating conditions of electric vehicles ", *Journal of power sources*, vol. 64, pp. 175-180, 1997.
- [2] S. Barsali, M. Ceraolo, " Dynamical models of lead-acid batteries : implementation issues ", *IEEE Transaction on energy conversion*, vol. 17, n°1, pp. 16-23, March 2002.
- [3] M. Ceraolo, "Dynamical models of lead-acid batteries ", *IEEE Transaction on power systems*, vol. 15, n°4, pp. 1184-1190, November 2000.
- [4] E. Karden. "Dynamic modelling of lead acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification", *Journal of Power sources*, vol. 67, pp. 69-84, 1997.
- [5] R. Giglioli, A. Buonarata, P. Menga, and M. Ceraolo, "Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead acid battery", EVS 1990.
- [6] PHL. Notten, "Electronic-network modelling of rechargeable Ni-Cd cells and its application to the design of battery management systems", *Journal of power sources*, vol. 77, pp. 143-158, 2000.
- [7] E. Kuhn, C. Forgez, and G. Friedrich, "Modèle pour accumulateurs Ni-MH en vue d'une application pour véhicule hybride électrique", EPF, Novembre 2002.
- [8] J. Macdonald, *Impedance Spectroscopy*. Wiley-Interscience, 1987.

- [9] F. Huet, "A review of impedance measurements for determination of the state of charge or state of health of secondary batteries", *Journal of power sources*, vol. 87, pp. 12-20, 2000.
- [10] A. Bard, *Electrochemical methods, Fundamentals and application*. J. Wiley and Sons, 2nd edition, 2000.
- [11] D. Landolt, *Corrosion et chimie de surface des métaux*. Traité des matériaux. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993.
- [12] A. Oustaloup, *La dérivation non entière*. Hermès, 1995.
- [13] A. Oustaloup, *Systèmes asservis linéaires d'ordre fractionnaire*. Masson, 1983.
- [14] Emmanuel Kuhn, Christophe Forgez, Guy Friedrich: Modèle de Batterie NiMH pour véhicule hybride parallèle-validation en grands signaux, RIGE à paraître.
- [15] Christophe Forgez, Guy Friedrich, Jean-Marie Biedinger: Method to find the hybridization rate for a parallel hybrid electrical vehicle. Congrès EVS-17, Montréal Octobre 2000.
- [16] Emmanuel Kuhn, Christophe Forgez, Guy Friedrich, Electric Equivalent Circuit of a NiMH Cell: Methods and Results, EVS 20; Long Beach, novembre 2004.