

Modèle de Batterie NiMH pour véhicule hybride parallèle: validation en grands signaux

E. Kuhn

Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, BP20529-60205 Compiègne cedex.

Résumé

Afin d'établir des lois de commandes relatives à la chaîne de traction d'un véhicule hybride parallèle, nous devons au préalable disposer d'un modèle d'accumulateurs précis et simple à mettre en œuvre.

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

Notre approche consiste à représenter l'accumulateur par un modèle à constantes localisées dont l'identification est assurée par impédancemétrie.

La pertinence de cette méthode a été vérifiée sur un accumulateur NiMH commercialement disponible et dédié aux applications véhicules électriques.

Nous montrons également que du fait de la linéarité de l'accumulateur dans une gamme de courants donnée, le modèle établi en petits signaux reste valide en grands signaux.

I. INTRODUCTION

L'accumulateur est le point central des systèmes à énergie embarquée, ceci est particulièrement vrai pour les véhicules hybrides parallèles.

Dans de tels véhicules un moteur électrique alimenté par batteries assiste le groupe thermique dans des conditions bien définies.

L'optimisation des lois de commande relatives à ce type de véhicule rend nécessaire l'emploi d'un modèle d'accumulateur devant :

- refléter au mieux la dynamique et l'état de charge.
- être suffisamment simple pour une implantation temps réel.

L'approche retenue pour modéliser l'accumulateur est celle d'un circuit électrique équivalent à constantes localisées.

Nous aborderons dans cet article les thèmes suivants :

- Présentation et justification du schéma à constantes localisées retenu.
- Identification des paramètres et justification de l'emploi de dérivées non entières dans le modèle.
- Précision du modèle obtenu et justification de la validité du modèle petits signaux en régime grands signaux.

II. ETAT DE L'ART DES MODELES DE BATTERIES EMPLOYEES.

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

Nous présentons et justifions dans cet article un modèle électrique général de cellule NiMH 1.2V 13.5Ah.

III. CHOIX DU CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT A CONSTANTES LOCALISEES.

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

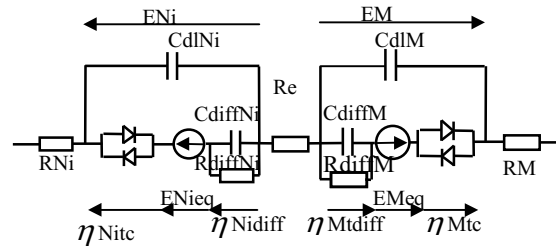


Fig. 1. Modèle de l'accumulateur NiMH.

ENieq et EMieq représentent les potentiels d'équilibre respectifs des électrodes de Nickel et de Métal.

RNi et RM représentent les résistances de connectique de chacune des électrodes.

Re correspond à la résistance de l'électrolyte.

CdNi et CdM représentent les capacités de double couche.

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

Les réseaux (RdiffNi, CdiffNi) et (RdiffM, CdiffM) s'apparentent aux phénomènes de diffusion.

Afin de simplifier les procédures d'identification, nous avons fait le choix de considérer les phénomènes électrochimiques globalement. Ainsi, nous sommes parvenus au schéma électrique équivalent de Randles Fig. 2. [8], avec Eo le potentiel d'équilibre total de la cellule NiMH.

ZT

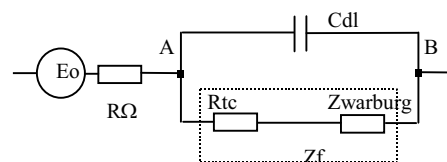


Fig. 2. Schéma électrique équivalent de Randles.

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.

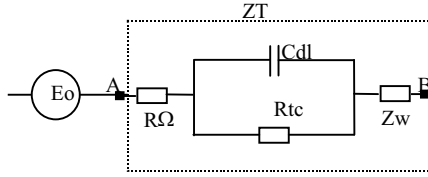


Fig. 3. Schéma de Randles modifié avec Cdl connectée à Rtc.

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

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

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

IV. IDENTIFICATION DES PARAMETRES ET JUSTIFICATION DE L'EMPLOI DE DERIVEES NON ENTIERES DANS LE MODELE.

A. Présentation de la technique d'impédancemétrie

Cette méthode est d'un emploi courant pour la caractérisation des systèmes électrochimiques. 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 ($V_{max}<10mV$).

Nous pouvons alors exprimer l'impédance complexe de la cellule ZT sous la forme : $ZT = \frac{V_{max}}{Im\ ax} \exp(j\phi)$.

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.

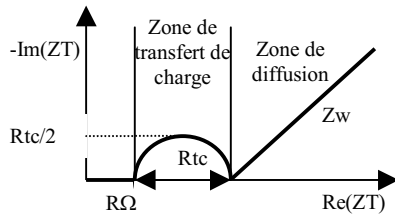


Fig. 4. Tracé de Nyquist idéal d'un accumulateur à un état de charge donné.

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 $Z_w(s)$.

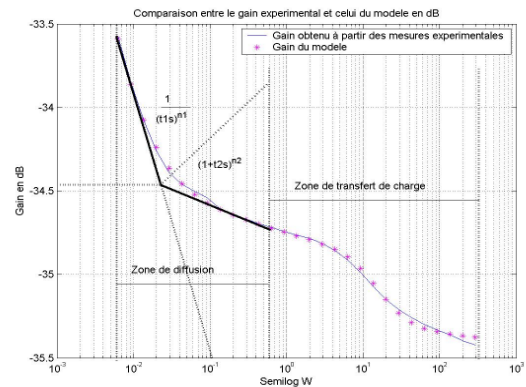


Fig. 5. Tracé de Bode du Gain de Z_w

(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 :

$$Z_w(s) = \frac{(1 + \tau 2s)^{n2}}{(\tau 1s)^{n1}} \quad (3)$$

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 :

$$V(t) = E_o + R_o I(t) + R_{tc} (1 - e^{-t/R_{tc} C_{dl}}) I(t) + L^{-1} \left(\frac{(1 + \tau_2 s)^{n_2} I(s)}{(\tau_1 s)^{n_1}} \right) \quad (5)$$

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.
- 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 R_{tc} , C_{dl} , n_1 , n_2 , τ_1 , τ_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_o 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 figure Fig. 6).

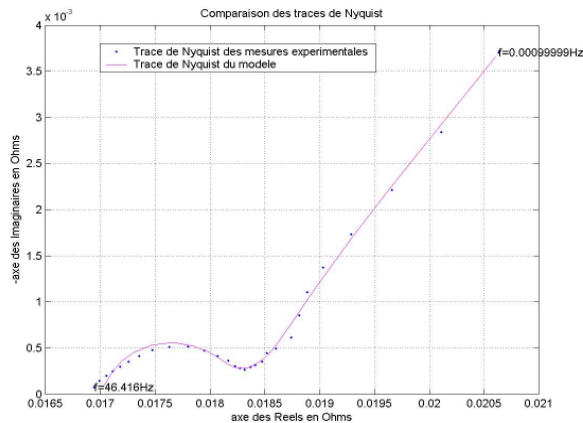


Fig. 6. Tracé de Nyquist de la batterie et de son modèle à SoC 60%.

V.PRECISION DU MODELE.

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.

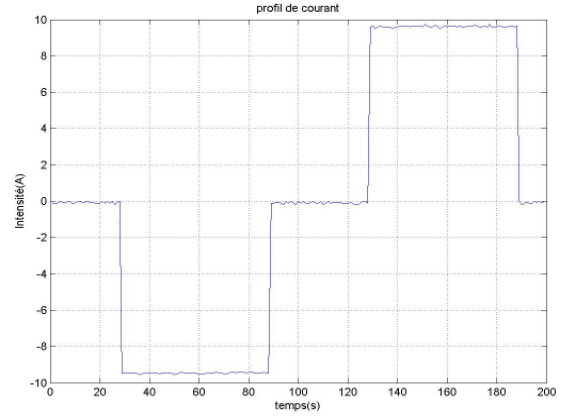


Fig. 7. Profil de courant de $|10A|$ max imposé à la batterie en partant de SoC 60%.

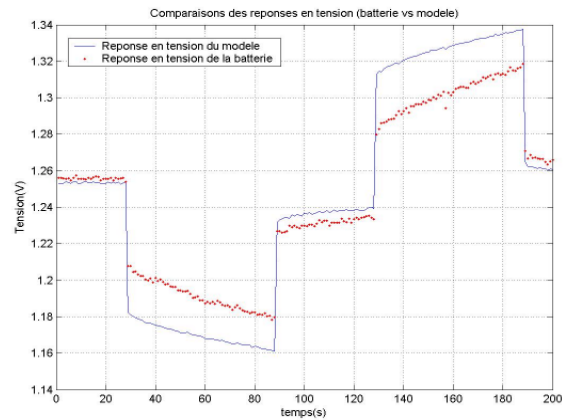


Fig. 8. Superposition des réponses en tension de la batterie et du modèle à paramètres petits signaux pour un profil de courant de $|10A|$ max.

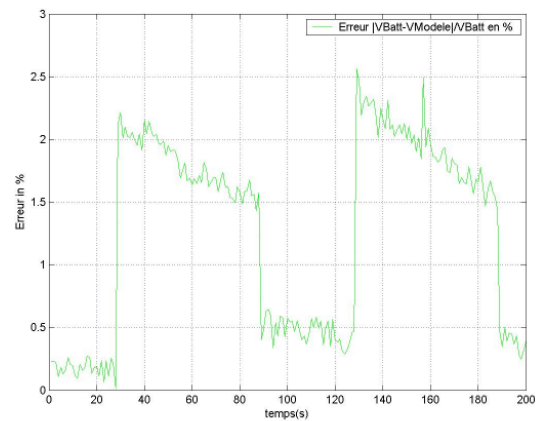


Fig. 9. Erreur absolue en % entre la tension calculée par le modèle à paramètres petits signaux et la tension de la cellule pour un profil de courant de $|10A|$ max.

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 REPONSES EN TENSION DE LA CELLULE ET CELLES DU MODELE A PARAMETRES PETITS SIGNAUX .

Les erreurs relevées restent en dessous de 3% pour des courants d'amplitude +/-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.

VI. LINEARITE DE LA CELLULE NiMH 1.2V 13.5AH

A. Impédancemétrie grands signaux

Le modèle électrique équivalent de l'accumulateur NiMH a été établi en supposant que ce dernier était linéaire, nous nous proposons dans cette section de le prouver expérimentalement.

Si l'hypothèse de linéarité est vraie, nous pouvons relâcher la contrainte d'amplitude qui était jusqu'alors imposée au signal de tension sinusoïdal.

Tout en conservant la structure du modèle établi Fig. 3., nous identifions nos paramètres par impédancemétrie grands signaux en mode galvanostatique. (i.e.: au lieu d'imposer une tension $v(t)=V_{max}.\sin(\omega t)$ autour du potentiel d'équilibre de la batterie E_0 , nous imposons un courant $i(t)=I_{max}.\sin(\omega t)$ d'amplitude $I_{max}=4A$ sur une zone de fréquences $68Hz < f < 0.0031Hz$).

Une amplitude de courant I_{max} telle que $I_{max}=4A$ en mode galvanostatique correspond à une amplitude de tension $54mV < V_{max} < 75mV$ en mode potentiostatique. Ces valeurs nous placent directement (si elle existe) dans la zone de non linéarité de l'accumulateur.

Il est à noter que cette démarche expérimentale serait totalement inapplicable sur des accumulateurs non linéaires de type plomb.

A partir des mesures d'impédancemétrie grands signaux effectuées à différents états de charge, nous obtenons les paramètres du modèle.

La validité de ce modèle grands signaux est ensuite testée sur les profils de courants déjà utilisés pour valider le modèle petits signaux (cf Fig. 7). Les réponses en tension du modèle grands signaux et de la cellule sont ensuite comparées et exprimées en erreur absolue. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 2.

Cellule 1.2V(1C=13.5A)	$ I_{max} =7A$	$ I_{max} =10A$
SoC de départ 100%	2.4%	3.3%
Erreur max		
SoC de départ 80%	2%	2.8%
Erreur max		
SoC de départ 60%	1.8%	2.3%
Erreur max		

TABLEAU 2. ERREURS MAXIMALES ENTRE LES REPONSES EN TENSION DE LA CELLULE ET CELLES DU MODELE A PARAMETRES GRANDS SIGNAUX .

La comparaison des Tableaux 1 et 2 montre que la précision du modèle obtenu par impédancemétrie grands signaux reste comparable à celle obtenue en petits signaux. Ces résultats valident l'hypothèse de linéarité faite au début de la modélisation sur l'accumulateur NiMH.

B. Vérifications complémentaires.

La linéarité établie précédemment sur la cellule NiMH, est confirmée par deux expériences complémentaires. La première est effectuée dans la zone de transfert de charge, la deuxième dans la zone de diffusion.

a). A un état de charge donné, nous effectuons des mesures de tension pour différents échelons de courant selon la méthode : « *normal pulse voltammetry* [10] ». L'amplitude et la durée des courants imposés nous situent directement dans la zone des phénomènes de transfert de charge. Les caractéristiques $I_{batt}(\tau)=f(V_{batt}(\tau))$ à différents instants d'échantillonnage ($0 < \tau < 2s$) Fig. 10 traduisent la linéarité de la cellule dans la zone d'étude considérée.

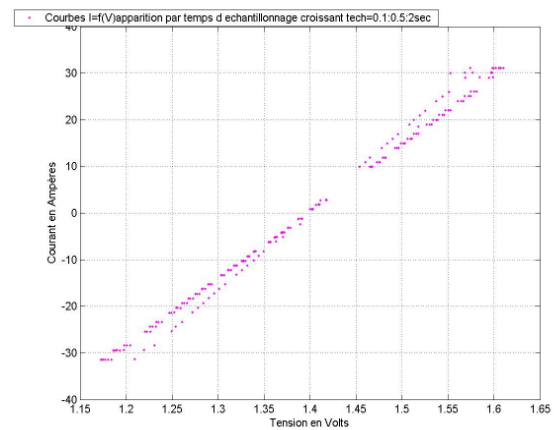


Fig. 10. Caractéristiques $I_{batt}(\tau)=f(V_{batt}(\tau))$ pour des instants d'échantillonnage $0.1 < \tau < 2sec$.

b). Dans un deuxième temps nous appliquons à un état de charge donné des sinusoïdes de courants d'amplitude variable et de fréquence appartenant à la zone de diffusion. Les réponses en tension associées ne subissent aucune distorsion, ce qui tend à prouver la linéarité de la batterie dans la zone considérée. Fig. 11. et Fig. 12.

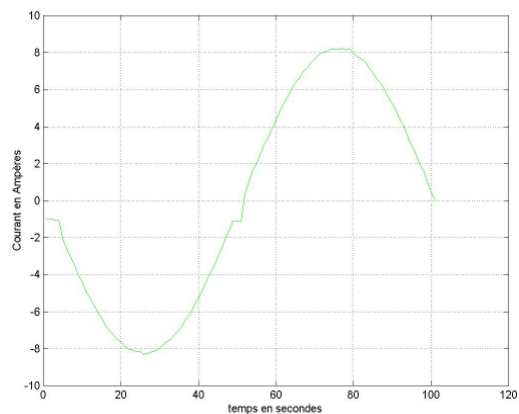


Fig. 11. Courant sinusoïdal imposé à la batterie à SoC 100%, $I_{max}=8.75A$, $T=100s$.

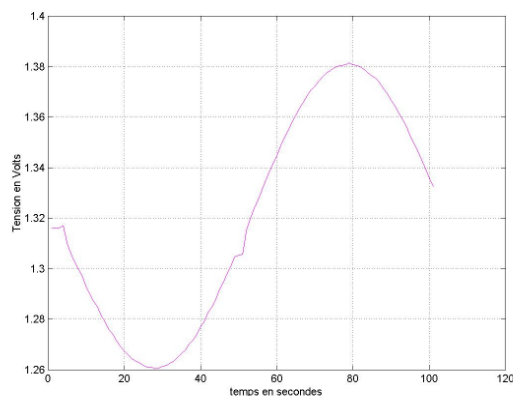


Fig. 12. Réponse de la cellule à un courant sinusoïdal d'amplitude 8.75A, et de période $T=100s$.

VII. CONCLUSION.

Nous avons établi en régime petits signaux un modèle électrique équivalent de cellule NiMH 1.2V 13.5Ah.

La structure du modèle présenté est constituée d'éléments électriques équivalents et d'une fonction de transfert utilisant les puissances non entières de s .

Les différents paramètres du modèle sont facilement identifiables par la technique d'impédancemétrie petits signaux en mode potentiostatique.

Les erreurs maximales mesurées entre les réponses en tension du modèle petits signaux et de la cellule ont été estimées pour différents profils de courants et ne dépassent pas 3%. Ces résultats sont très satisfaisants pour notre application.

Des travaux complémentaires ne figurant pas dans cet article ont validé l'utilisation du modèle petits signaux pour des courants allant jusqu'à 27A d'amplitude. Nous ne sommes pas allés au delà de cette valeur par crainte de dégrader de façon irréversible les caractéristiques intrinsèques de l'accumulateur.

La validité du modèle petits signaux en grands signaux est justifiée du fait de la linéarité de l'accumulateur NiMH qui a été prouvée à l'aide de différentes mesures dont l'impédancemétrie grands signaux en mode galvanostatique.

VIII. REMERCIEMENTS.

L'auteur tient à remercier Mrs Ille et Macret pour l'aide prodiguée dans la mise en place des appareillages utilisés au cours des différentes mesures.

IX. REFERENCES.

- [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.