

Modélisation d'accumulateurs Ni-mH en vue d'une application pour véhicule hybride électrique

E. Kuhn, C. Forgez G. Friedrich

Université de Technologie de Compiègne (UTC)
LEC (EA 1006) BP 20 529
60 205 COMPIEGNE CEDEX France
email: guy.friedrich@utc.fr

Résumé

Le stockage d'énergie reste le point de blocage des véhicules propres.

La difficulté dans la modélisation d'une batterie, réside dans la diversité des compétences requises (électrochimie et "génie électrique") et dans l'adoption d'un vocabulaire commun entre les différents spécialistes pour aboutir à un modèle suffisamment fiable d'un point de vue électrochimique et suffisamment simple pour pouvoir être implanté dans des lois de contrôle temps réel ou modèle d'analyse nécessaire à une optimisation système.

Le laboratoire d'électromécanique de Compiègne (LEC) s'est engagé dans le cadre d'un pôle de recherche régional pour proposer une modélisation d'accumulateurs Ni-mH utilisés dans des véhicules hybrides.

L'objectif de cette étude est de proposer un modèle permettant à la fois d'optimiser les lois de commande du véhicule mais aussi de modéliser finement le comportement de l'ensemble accumulateur, convertisseur, machine en vue d'une conception optimale.

Un schéma de type "constantes localisées", classique pour les électrotechniciens, est proposé et justifié

1 Introduction

En attendant une rupture technologique du type "piles à combustible", à la fois fiables, pratiques et de coût raisonnable, les solutions de type hybride permettent d'obtenir un compromis acceptable.

La gestion de l'énergie embarquée y est fondamentale et de nombreuses études tant universitaires qu'industrielles ont proposé différentes approches et stratégies de gestion d'énergie électriques et thermiques.[1] [2] [3]

Les défauts communs à toutes ces approches sont dus à une mauvaise modélisation de la batterie conduisant à des résultats expérimentaux éloignés de ceux obtenus en simulation ou réclamant de longues phases de recalage.

La difficulté pour la modélisation d'une batterie, réside dans la diversité des compétences requises (électrochimie et "génie électrique") et dans l'adoption

d'un vocabulaire commun entre les différents spécialistes pour aboutir à un modèle suffisamment fiable d'un point de vue électrochimique et suffisamment simple pour pouvoir être implanté dans des lois de contrôle temps réel.

2 Bilan pour la modélisation des batteries pour le Génie électrique

Différentes approches sont généralement utilisées pour la modélisation des batteries:

- *Enregistrement puis tabulation des performances des batteries* : cette approche est souvent limitée car les cyclages effectués ne sont pas systématiquement l'image des conditions réelles d'utilisation. En outre, certains phénomènes physiques fondamentaux sont parfois négligés (température de fonctionnement, réponse dynamique...) [4], [5]
- *Résolution des équations thermodynamiques des phénomènes intervenant dans le processus de conversion*. Cette approche est parfois utilisée dans la conception des accumulateurs eux mêmes mais demeure un domaine de spécialistes et les résultats manquent encore de précision.

L'approche développée consiste à développer un schéma équivalent de type "constantes localisées", familier au Génie Electrique, et suffisamment proche de la réalité physique des phénomènes.

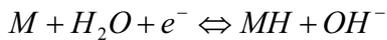
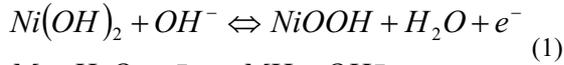
Cette approche s'inspire de celle développée par l'équipe de NOTTEN [6], appliquées aux batteries de faible puissance de type Ni-Cd mais généralisable, dans le principe, aux batteries de type Ni-mH

Ce modèle permet de prendre en compte les réactions principales intervenant, tant dans les régimes statiques (tension à vide), que dynamiques (réaction à des profils de courant).

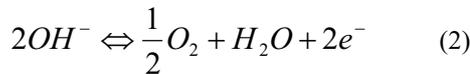
3 Etude proposée : le ‘schéma à constantes localisées’

3.1 Phénomènes de base (réactions principales)

Au cours des charges et des décharges d’une cellule d’accumulateur, l’apport ou l’extraction d’électron est réalisé par le biais d’oxydation ou de réduction de molécules, appelée espèces, présentes au sein des électrodes. Sous l’influence des réactions chimiques, les espèces libèrent ou acceptent des électrons se transformant en d’autres espèces. L’électrolyte véhicule les électrons d’une électrode vers l’autre par l’intermédiaire d’ions, OH^- par exemple. Les réactions chimiques présentes au sein de chaque électrode d’une cellule Ni-mH sont définies ci-dessous :



Ces réactions sont appelées réactions primaires car ce sont les premières à intervenir dans le cadre de charge ou de décharge normales. En revanche lorsqu’au moins une espèce mise en jeu dans une de ces réactions est épuisée, la réaction concernée s’arrête. Dans ce cas si les autres réactions n’ont pas encore épuisé les espèces mises en jeu, une nouvelle réaction s’amorce de manière à remplacer celle arrêtée et à assurer la continuité de la charge ou de la décharge. Cette réaction appelée réaction secondaire fait intervenir des espèces autres que celles initialement épuisées. On assiste alors à un dégazage :



Nous nous limiterons aux réactions primaires car dans le cadre d’une utilisation de type véhicule hybride, la batterie est supposée ne pas atteindre des régimes de surcharges ou surdécharges, ce qui évite ainsi l’apparition de réactions secondaires [7]. Toutes ces réactions obéissent à deux grandes familles de phénomènes qui agissent au sein des interfaces électrochimiques : les phénomènes statiques et les phénomènes dynamiques [8]. Les phénomènes statiques sont directement liés aux potentiels chimiques stabilisés. Les phénomènes dynamiques sont issus de l’apparition d’un gradient de concentration des espèces présentes.

3.2 Statiques

3.2.1 Potentiels chimiques et électrochimiques

Le potentiel chimique d’une espèce i représente une quantité d’énergie stockée et est défini en fonction de son activité thermodynamique.

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \left(\frac{a_i}{a_{refi}} \right) \quad (3)$$

avec respectivement, a_i et a_{refi} les activités thermodynamiques actuelle et de référence de l’espèce i , μ_i^0 le potentiel standard défini à l’équilibre lorsque

l’activité est unitaire, T la température (en K) et R la constante des gaz ($R=8.314\text{J/mol.K}$). La variation du potentiel chimique résulte d’une variation de la concentration de l’oxydant ou du réducteur. Lorsque l’espèce i est chargée, le potentiel électrochimique se constitue du potentiel chimique est d’un terme $ZF\Phi^\alpha$ qui exprime le travail pour transférer une mole d’une espèce neutre vers une espèce chargée dans la phase α avec Z le nombre de charges, F la constante de Faraday $F=96500\text{C}$, et Φ le potentiel électrostatique. Le potentiel électrochimique est régi par l’équation de Nernst :

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln \left(\frac{a_i}{a_{refi}} \right) + Z_i F \Phi \quad (4)$$

Le potentiel électrochimique de chaque électrode s’obtient alors en effectuant la somme des potentiels chimiques des oxydants moins ceux des réducteurs.

En se ramenant au domaine électrique, par un rapport de transformation $\frac{1}{ZF}$, on définit le potentiel d’une

électrode comme la somme d’un potentiel d’équilibre E^{eq} et d’un surpotentiel η .

$$E = E^{eq} + \eta \quad (5)$$

Le potentiel d’équilibre issu du potentiel standard E_0^{eq} et d’un terme dépendant des activités des oxydants et des réducteurs.

$$E^{eq} = E_0^{eq} + \frac{RT}{z_i F} \ln \left(\frac{\prod_i \frac{a_{ox}}{a_{ox}^{ref}}}{\prod_i \frac{a_{red}}{a_{red}^{ref}}} \right) \quad (6)$$

Ce potentiel exprime l’énergie emmagasinée au sein de l’électrode en fonction de l’énergie initiale et des activités thermodynamiques des espèces présentes.

Le surpotentiel traduit le transfert des charges.

3.2.2 Résistance équivalente d’électrolyte et de connectiques

Lors de transferts de charges, les courants électriques circulant au sein des électrodes vont traverser également l’électrolyte. En fonction de la conductivité de l’électrolyte, les charges vont rencontrer une résistance plus ou moins importante à leur passage, ce qui va se matérialiser au travers d’une résistance électrique équivalente de l’électrolyte. Bien que les valeurs des résistances de connectique soient faibles (quelques $\text{m}\Omega$), celles ci doivent également être prises en compte au sein du modèle. Ceci permettra d’évaluer par la suite les pertes par effet Joule et coupler éventuellement le modèle électrique équivalent avec un modèle thermique de l’accumulateur.

3.3 Phénomènes dynamiques

3.3.1 Capacité double couche

A chaque électrode se crée à l'interface avec électrolyte, un condensateur dont le diélectrique a une épaisseur voisine de quelques dixièmes de nanomètres. Ce condensateur accumule les charges issues des réactions chimiques en charge et décharge. Cette capacité électrique est d'autant plus grande que les surfaces des électrodes sont importantes. On matérialise cette capacité appelée capacité double couche par un condensateur en parallèle sur chacune des électrodes (Fig. 1).

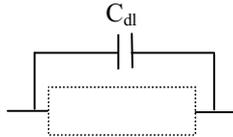


Fig. 1 Position de la capacité double couche

3.3.2 Phénomène de transfert de charges

3.3.2.1 Description

Le phénomène de transfert de charges correspond au flux des espèces oxydantes et réductrices véhiculant les charges d'une électrode à une autre électrode. La circulation de ce flux est plus ou moins facilitée selon l'état de charge de l'accumulateur.

3.3.2.2 Equations

Ce flux de charges est le courant électrocinétique et, est régi par l'équation de Butler Volmer

$$I = I^0 \left(\exp^{-\alpha F \eta} - \exp^{-(1-\alpha) F \eta} \right) \quad (7)$$

avec F la constante de Faraday, α le coefficient de transfert de charge, η le surpotentiel de l'électrode.

3.3.2.3 Schéma équivalent

La présence des exponentielles dans l'équation de Butler Volmer conduit à représenter ce phénomène par des diodes placées en anti-parallèle au sein de chacune des électrodes (Fig. 2). Il est à noter que le seuil des diodes n'a rien de commun avec celui des diodes qu'on rencontre en électronique bien entendu.

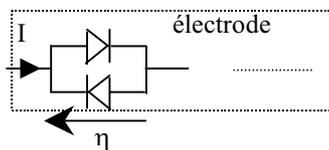


Fig. 2 Modèle électrique du transfert de charge

3.3.3 Phénomène de diffusion

3.3.3.1 Description

Lors d'une charge ou d'une décharge, le courant qui circule dans la batterie contribue soit à l'oxydation ou à la réduction d'espèces ce qui se traduit par un flux apparent des espèces. Sous l'effet des variations spatiales et temporelles de ces dernières, des gradients de concentrations au sein de l'électrode vont apparaître,

ceci va avoir pour conséquences des déplacements de matières au sein de l'électrode qui vont contribuer à la modification des potentiels électrochimiques. Le transport de matière peut être renforcé sous l'effet du champ électrique présent au sein des électrodes (ou par effet mécanique brassage de l'électrolyte). Ce phénomène est lent mais devient prépondérant par rapport au transfert de charge lorsque l'électrode s'écarte de son potentiel d'équilibre. Ceci se produit lorsque les charges ou décharges s'effectuent à courants élevés.

3.3.3.2 Equations

On peut déterminer le phénomène de diffusion par deux méthodes. La première méthode consiste à résoudre numériquement les équations de Fick qui permettent de définir le courant de diffusion J_d .

$$J_d^i(x,t) = -D_j^i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = D_j^i \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2}$$

avec D_j^i le coefficient de diffusion de l'espèce i , C_i la concentration de l'espèce i , x la direction de diffusion. Ces équations traduisent les variations temporelles et spatiales des concentrations d'une espèce i (Fig. 3).

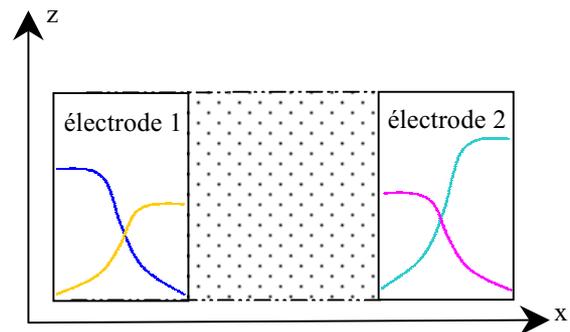


Fig. 3 Profil de concentration des différentes espèces

La seconde méthode consiste à modéliser ce phénomène de diffusion à l'aide d'un réseau de circuits RC. Chaque circuit RC est censé simuler le phénomène de diffusion sur une petite partie d'une électrode [6]. Cette modélisation de la diffusion reste délicate car le recours à un nombre fini de circuits RC ne permet pas de rendre compte de la complexité du phénomène.

3.3.3.3 Schéma équivalent

Bien souvent la modélisation de la diffusion est obtenue à l'aide d'une boîte noire appelée 'impédance de Warburg'. Etant donné que nous cherchons un modèle à constantes localisées, nous orienterons notre modèle de la diffusion sur un circuit RC parallèle à coefficients variables (Fig. 4)

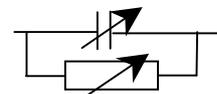


Fig. 4 Modèle électrique de la diffusion

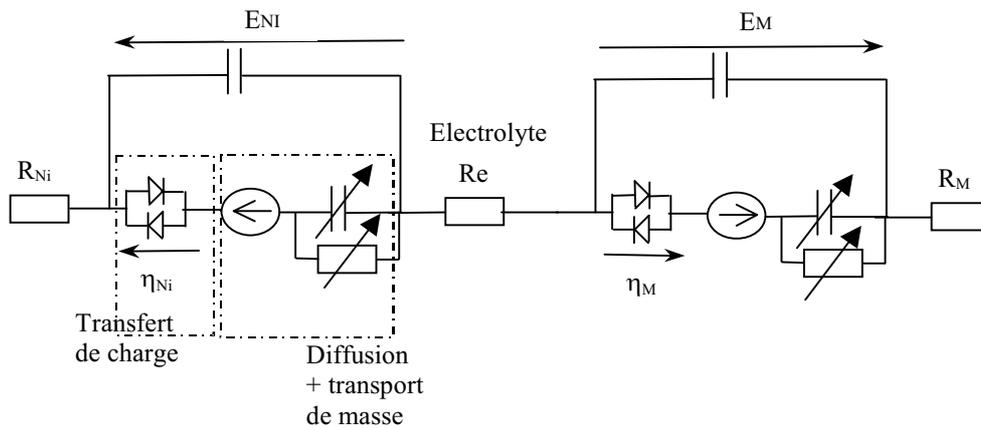


Fig. 5 Schéma électrique équivalent à deux électrodes

4 Schéma équivalent proposé

Le schéma équivalent que nous proposons (Fig. 5), représente les phénomènes statiques et dynamiques présents au sein de chaque électrode. Ainsi on retrouve les capacités double couche aux bornes de chaque électrode, au sein desquelles le transfert de charges représenté par des diodes têtes bêtes est en série avec un potentiel standard, également en série avec un circuit RC traduisant le phénomène de diffusion. Les résistances de connectiques des électrodes ainsi que la résistance d'électrolyte sont également représentées.

5 Limites de l'étude et perspectives

Le modèle à constantes localisées reflète parfaitement les différents phénomènes statiques et dynamiques régissant les réactions chimiques principales mises en jeu au sein de l'accumulateur Ni-mH. La principale difficulté concerne maintenant l'identification des différents composants avec une structure dans laquelle on sépare les deux électrodes. Ceci pourra être réalisé à l'aide de mesures spectroscopiques [9][10]. Il est cependant difficile, voire dangereux, de séparer les modèles des deux électrodes, ceci notamment lorsque le transport de masse devient trop important [10]. Dans un premier temps, nous limiterons l'identification à un modèle englobant les deux électrodes. Pour cela, des mesures d'impédancemétrie et des essais sous forts courants sont en cours de réalisation. Un banc de cyclage automatique Digatron MBT 300-010-2 financé par la région Picardie au travers du pôle DIVA (Fig. 6) a été acquis pour cette étude. Ce banc permet de relever les réponses 'tension-courant' d'un élément d'accumulateur sur une large plage de fréquence pour différents états de charge à différentes températures. Ce banc permet en outre de tester des éléments dont la tension est comprise entre 0 et 10 V avec des courants allant jusqu'à 300 A. C'est pourquoi ce banc n'effectue des mesures que sur un élément d'accumulateur.

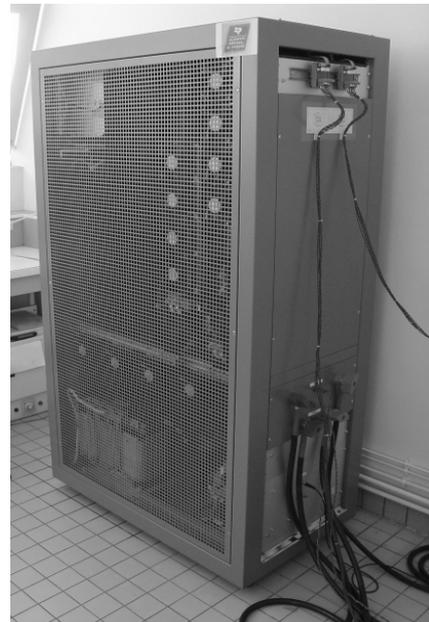


Fig. 6 Banc de cyclage Digatron

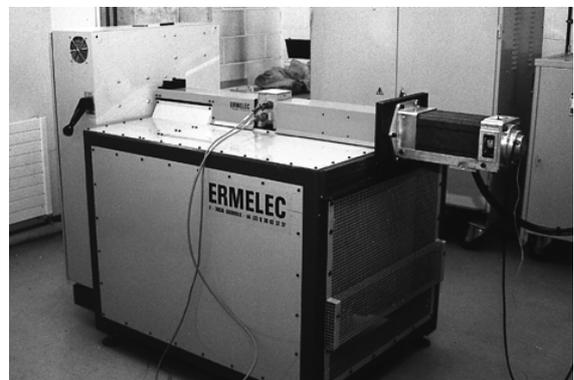


Fig. 7 Banc de cyclage chaîne de traction

Une fois les valeurs des composants identifiées, le modèle servira à la caractérisation d'un accumulateur complet composé de plusieurs éléments. Ensuite la validité de ce modèle électrique équivalent sera vérifiée par des essais sur une chaîne de traction électrique correspondant aux cycles normalisés de conduite. Une chaîne de traction composée d'une machine à courant continu de 10kW sera accouplée au banc d'essais machines du laboratoire d'électromécanique de Compiègne (LEC) qui émuler la charge mécanique du véhicule en fonction des vitesses et accélérations imposées par les cycles (Fig. 7). La complémentarité de ces bancs correspond à la possibilité de tester la véracité de modèles prédictifs de batteries sur des associations d'accumulateurs

Ces deux bancs constituent un équipement de caractérisation et de validation unique en France.

6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la "Région de Picardie" pour leur confiance et leur soutien financier au travers du pôle régional de recherche "DIVA" (Diagnostic et Véhicules Avancés).

7 Bibliographie

- [1] G. Paganelli, J-J. Satin, T M. Guerra, A. Noël, M. Delhom, E. Combes, J E Guy
'Conception and control of parallel hybrid car powertrain', International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, septembre 1998, Brussels.
- [2] C Forgez, G. Friedrich, J.M. Biedinger.
'Method to find the hybridization rate for a parallel hybrid vehicle.'
EVS 17, Montréal, Octobre 2000,
- [3] C Forgez, G. Friedrich, J.M. Biedinger.
'Système flou de supervision des modes de fonctionnement d'un véhicule hybride électrique parallèle'
GEVIQ 2000, Marseille, Mars 2000
- [4]: O. Caumont, P. Le Moigne, X. Muneret, P. Lenain, C. Rombaut
'Etat de charge d'une batterie plomb Acide en utilisation véhicule électrique.'
RIGE, Vol 2, 1999, pp 278, 304
- [5] ADVISOR: Advanced vehicle simulator
- [6] Bergveld; Kruijt; Notten
'Electronic network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of a battery management system'
Journal of power sources 77, 1999, pp143-158

[7]. 'Power requirements for batteries in hybrid vehicles', F. Nelson, Journal of power sources, 91:2, 26, 2000.

[8] A. Bard. 'Electrochemical methods, Fundamental and applications'. J Wiley and Sons, 2nd edition, 2000

[9] Illangovan

'Determination of impedance parameters of individual electrodes and internal resistance of batteries by a non destructive technique.'
Journal of power sources. 1994; vol 50, pp 33-45.

[10] 'Impedance Spectroscopy', J.R. Macdonald, Wiley, 1987