

Impédancemétrie impulsionnelle pour batteries

Li-Ion

D.V.DO

Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique – BP 20529, 60205 Compiègne, FRANCE

Résumé— Dans cet article, nous proposons une méthode d'impédancemétrie impulsionnelle pour la détermination de l'impédance de batterie. Cette méthode est basée sur l'application d'un pulse de courant à la batterie pour exciter différents phénomènes internes. La réponse en tension est enregistrée sur une période T_a . A partir du calcul des spectres en tension et en courant, on évalue l'impédance de batterie. Nous étudions dans cet article l'influence des paramètres principaux du pulse sur la détermination de l'impédance tels que l'amplitude du pulse, la fréquence d'échantillonnage (F_c), la durée du pulse (L_a) et la période d'analyse (T_a).

I. INTRODUCTION

En raison de la forte augmentation des prix des carburants, le développement des véhicules électriques ou hybrides électriques connaît un regain d'intérêt. Pour ce genre de véhicule, la maîtrise de la gestion d'énergie et par conséquent la surveillance des batteries est indispensable pour optimiser la consommation d'énergie ainsi que la durée de vie des accumulateurs. L'état de charge (SoC) est un des facteurs essentiels pour caractériser l'état des éléments de stockage. Sa connaissance est d'autant plus critique pour le Li-ion, qu'une charge mal maîtrisée pour cette technologie peut conduire à la destruction de l'accumulateur.

De nombreuses méthodes pour estimer l'état de charge ont été proposées, dont la plupart sont basées sur des modèles d'impédance, on peut citer à ce titre les techniques d'observation par filtrage de Kalman [1] – [4]. Les modèles de batteries utilisés sont des modèles à constantes localisées [5]. L'identification des paramètres d'un tel modèle est effectuée à partir des spectres d'impédancemétrie réalisés généralement sur une batterie neuve. Pour faire évoluer au fur et à mesure du vieillissement de l'accumulateur les paramètres du modèle implanté dans un système embarqué de gestion d'énergie, il est donc nécessaire de mettre au point des techniques d'identification et de caractérisation en ligne.

Plusieurs techniques sont utilisées pour déterminer l'impédance d'une batterie en temps réel. On peut citer à titre d'exemple les méthodes basées sur les multisines [6], les méthodes impulsionnelles [7], [8], ou les méthodes basées sur le bruit blanc [9].

L'article propose d'évaluer une méthode impulsionnelle. Cette méthode est basée sur l'application d'un pulse de courant pour exciter différents phénomènes internes à la batterie. La réponse en tension est enregistrée sur une période T_a . A partir du calcul des spectres en tension et en courant,

on évalue l'impédance de batterie. Nous étudions dans cet article l'influence des paramètres principaux du pulse sur la détermination de l'impédance tels que l'amplitude du pulse, la fréquence d'échantillonnage (F_c), la durée du pulse (L_a) et la période d'analyse (T_a).

II. PRESENTATION DU MODELE DE BATTERIE

A. Principaux phénomènes électrochimiques de batterie

Afin de déterminer un modèle de batterie, nous procédons au recensement des principaux phénomènes électrochimiques présents au sein d'un accumulateur.

- Phénomènes statiques : résident dans le potentiel d'équilibre E_{eq} , qui représente le potentiel électrochimique proportionnel à la somme des potentiels chimiques contenus dans les espèces présentes aux deux électrodes et dans la résistance R_Ω , qui représente les résistances de connectique et d'électrolyte.

- Phénomènes dynamiques : résident dans le phénomène de transfert de charge R_{tc} , la capacité de double couche C_{dl} , et le phénomène de diffusion qui survient dans les basses fréquences.

B. Caractéristique de l'impédance

La figure 1 montre le tracé de Nyquist de l'impédance réelle de batterie à SoC 60%, température d'ambiance (22°C) pour des fréquences de 495 Hz à 10 mHz. Le phénomène transfert de charge apparaît dans cette courbe comme un demi cercle. Il peut être représenté à l'aide d'un circuit RC parallèle. La diffusion se caractérise théoriquement par une droite à 45° .

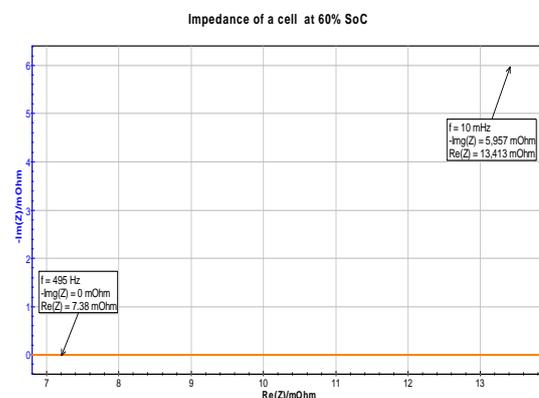


Fig. 1. Tracé de l'impédance d'une batterie Li-Ion A123 à SoC 60%

C. Schéma équivalent

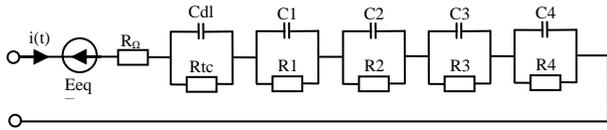


Fig. 2. Circuit électrique équivalent

Un schéma électrique équivalent de la batterie développé suivant la structure de Foster [5], est proposé Fig. 2.

Ce modèle résulte de la combinaison d'une source de tension, qui représente la tension d'équilibre (E_{eq}) en circuit ouvert de la batterie, d'une résistance (R_{Ω}) correspondante à la résistance de connectique et résistance d'électrolyte, et d'une série de circuits RC parallèles qui représentent les phénomènes de transfert de charge (C_{dl}/R_{tc}) et de diffusion ($C1/R1, \dots, C4/R4$). Dans le cadre de cet article, la série de circuits RC parallèles est limitée à 4 circuits, cela est suffisant pour approcher le phénomène de diffusion jusqu'à 10 mHz.

III. PRINCIPE DE L'IMPEDANCEMETRIE IMPULSIONNELLE

A. Principe

La méthode d'impédancemétrie utilisée dans cette étude a été décrite dans [7]. Soit $I(s)$ et $V(s)$ respectivement les transformées de Laplace de la mesure temporelle d'un courant $i(t)$ et d'une tension $v(t)$. Le rapport $V(s)/I(s)$ permet d'obtenir la fonction de transfert de l'impédance $Z(s)$:

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = \frac{\int_0^{\infty} v(t)e^{-st} dt}{\int_0^{\infty} i(t)e^{-st} dt} \quad (1)$$

Pour obtenir $Z(s)$, les données réelles mémorisées sont analysées par l'algorithme de transformation de Fourier rapide (Fast Fourier Transformation – FFT).

B. Dispositif expérimental

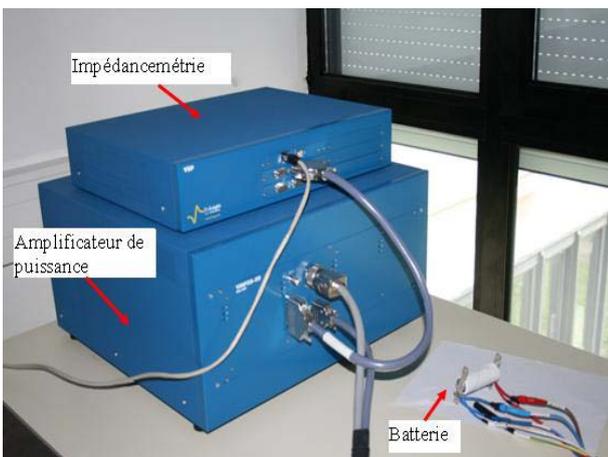


Fig. 3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est montré Fig. 3. La batterie utilisée dans cet article est une batterie Li - Ion commercialisée par la société A123.

Pour identifier l'impédance de batterie, nous utilisons un banc d'impédancemétrie Biologic. Cet appareil nous donne la possibilité de réaliser les techniques d'impédancemétrie classiques pour identifier l'impédance réelle de la batterie (Fig. 1). L'impédance obtenue par ces techniques servira de référence pour la comparaison avec les résultats d'impédancemétrie impulsionnelle.

A l'aide de l'amplificateur de puissance, nous imposons des pulses de courant à la batterie. Les mesures $I(t)$ et $V(t)$ se feront via l'appareil Biologic.

C. Profil du courant

Pour minimiser le changement de l'état de charge, le courant a été appliqué sous la forme d'une impulsion [8]. L'impédance du modèle $Z(\omega)$ est déterminée par (1). Fig. 4 représente un exemple d'impulsion de courant à 4A et sa réponse en tension sur une fenêtre d'observation ($T_a=12000s$) qui est suffisamment longue par rapport à la durée du pulse ($L_a = 100s$). Les spectres du courant et de la tension sont montrés Fig. 5.

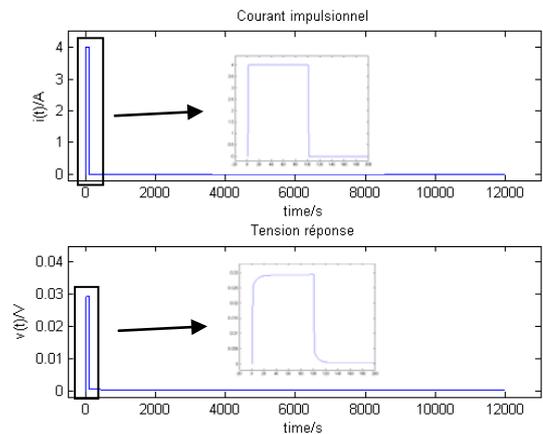


Fig. 4. Profil du courant et la réponse en tension

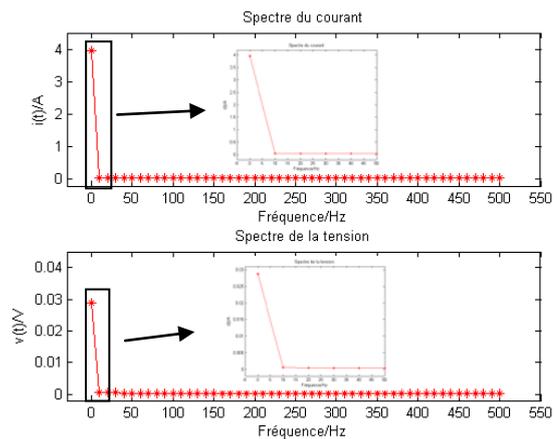


Fig. 5. Spectre du pulse de courant et de la tension correspondante

IV. INFLUENCE DES PARAMETRES DU PULSE SUR LA DETERMINATION DE L'IMPEDANCE

Les difficultés principales résident dans le choix de l'amplitude du pulse, de la fréquence d'échantillonnage (F_e), de la durée des pulses (L_a) et de la fenêtre d'observation (T_a) pour couvrir la plage la plus importante possible de fréquence.

A. Influence de l'amplitude du pulse

La figure 6 présente l'impédance de batterie aux pulses de 5A, 10A, 20A. Ces pulses ont une durée de 100ms et une fenêtre d'observation de 300s. Les résultats montrent que l'amplitude du pulse n'influence pas à la détermination de l'impédance. Dans les 3 cas, les impédances déterminées ne changent pas ni de formes ni d'amplitudes. Cependant, on peut remarquer que l'incertitude sur $Z(s)$ est plus importante sur l'essai à 5A qu'à 10A ou 20A. Ce qui est normal puisque le rapport signal/bruit plaide en faveur d'essai à forte intensité.

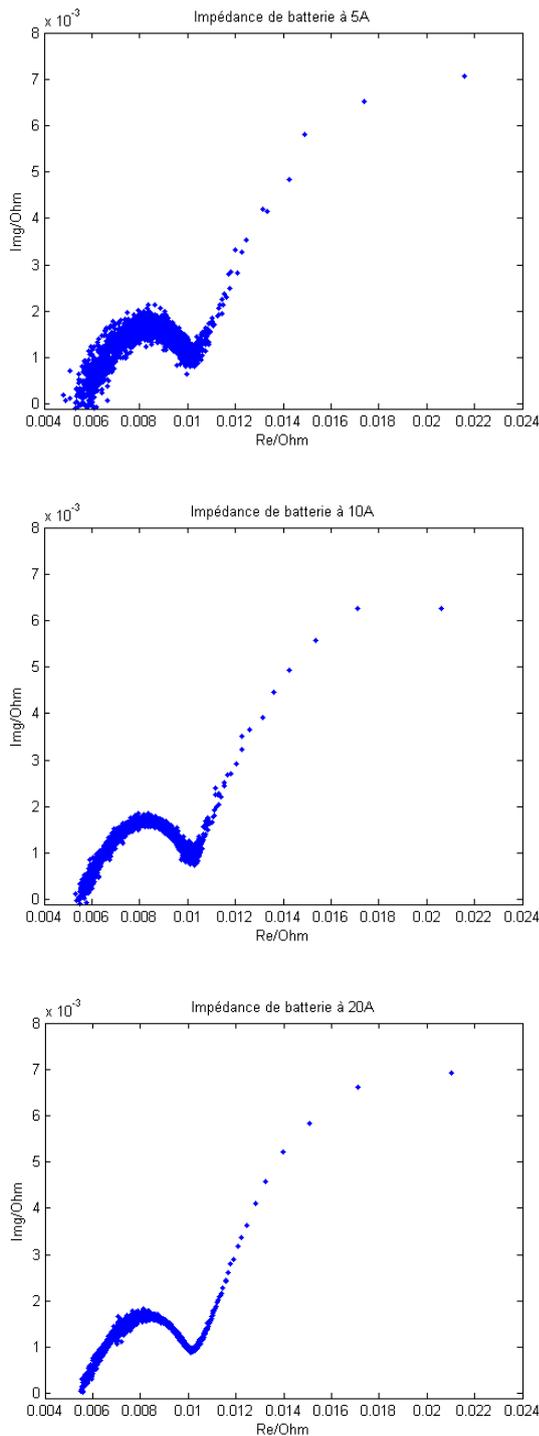


Fig. 6. Influence de l'amplitude du pulse sur la détermination de l'impédance

Remarque : Le fait que l'impédance mesurée dans les trois cas est la même, cela conforte l'idée que la batterie peut être modélisée par un modèle linéaire valide pour la gamme d'intensité [-20A, 20A].

B. Influence de la fréquence d'échantillonnage ($F_e=1/T_e$)

Les impulsions utilisées ont une même durée fixée à 100ms, une amplitude de 20A, et mémorisée sur une période de 300s. Les fréquences d'échantillonnage testées correspondent à 10 Hz, 100 Hz et 1 kHz. Les résultats ont montrés que le changement de F_e influence sur l'identification de l'impédance dans la zone de transfert de charge (Fig. 7).

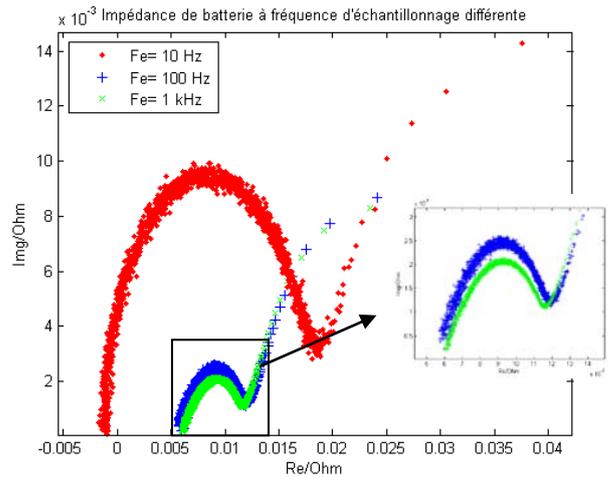


Fig. 7. Influence de la fréquence d'échantillonnage sur la détermination de l'impédance

C. L'influence de la durée du pulse

Nous avons testé l'influence de la durée du pulse, les mesures sont effectuées à même fréquence d'échantillonnage à 1 kHz, les pulses ont une amplitude de 20A et les essais sont enregistrés sur une fenêtre de 300s. Nous testons la durée de pulse à 100 ms, 50 ms et 10 ms. L'influence de la durée de pulse sur l'impédance est représentée Fig. 8. Les résultats ont montré que ce paramètre influence la détermination de l'impédance en haute fréquence.

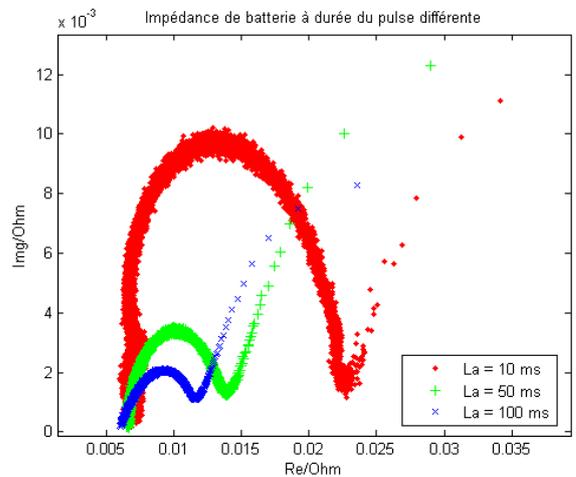


Fig. 8. Influence de la durée de pulse sur la détermination de l'impédance

D. L'influence de la période d'analyse

La figure 9 représente l'influence de la période d'analyse sur les mesures. $Z(w)$ est mesurée avec une période de courant à 10s, 100s et 300s avec une amplitude de 20A, la fréquence d'échantillonnage à $F_e = 1$ kHz et la durée de pulse à 10^{-1} s.

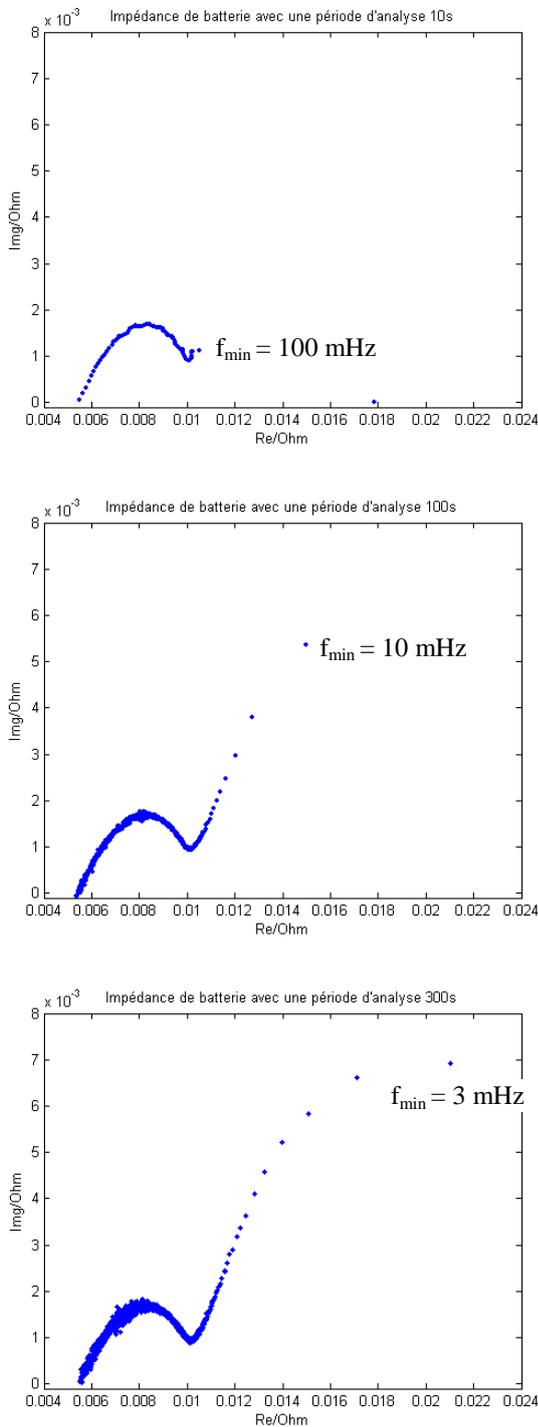


Fig. 9. Influence de la période d'analyse sur la détermination de l'impédance

Dans la zone de transfert de charge, les mesures de l'impédance sont précises du fait d'un choix correct de F_e et de la durée du pulse. En revanche, plus la largeur de la fenêtre d'analyse est large, plus il est possible d'obtenir des informations sur l'impédance en basse fréquence.

Remarque : La dépendance de la détermination de l'impédance à cette fenêtre d'observation nous donne la possibilité d'évaluer la valeur de la fréquence minimale observable telle que $f_{min} = 1/T_a$.

V. CONCLUSION

Nous avons testé une méthode d'impédancemétrie impulsionnelle pour la détermination de l'impédance d'une batterie Li-Ion.

Nous avons évalué l'influence de différents paramètres (amplitude, fréquence d'échantillonnage, largeur du pulse et la période d'analyse du pulse) sur les performances d'identification.

Nous avons montré que pour notre batterie, les mesures d'impédance ne dépendent pas de l'amplitude du courant tout au moins dans une gamme de 5A à 20A. En revanche, une trop faible amplitude augmente l'incertitude en raison d'un rapport signal/bruit défavorable. Une largeur de pulse trop faible ne permet pas d'identifier correctement l'impédance à haute fréquence, tandis qu'une largeur d'observation trop courte ne permet pas d'identifier en basse fréquence.

REFERENCES

- [1] G.L.Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPb-based HEV battery packs. Part1. Background", *J. Power Sources*, vol. 134, pp. 252-261, 2004
- [2] G.L.Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPb-based HEV battery packs. Part2. modelling and identification", *J. Power Sources*, vol. 134, pp. 262-276, 2004
- [3] G.L.Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPb-based HEV battery packs. Part3. State and parameter estimation", *J. Power Sources*, vol. 134, pp. 277-292, 2004
- [4] A. Vasebi, M. Partovibakhsh, S. M. Taghi Bathaee, "A novel combined battery model for state of charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications", *J. Power Sources*, vol. 174, pp. 30-40, 2007.
- [5] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte, G.Friedrich, "Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures", *J. Power Sources*, vol. 158 pp. 1490-1497, 2005
- [6] E. Van Gheem, J. Vereecken, J. Schoukens, R. Pintelon, P.Guillaume, P. Verboven, L. Pauwels, "Instantaneous impedance measurements on aluminium using a Schroeder multisine excitation signal", *Electrochimica Acta*, vol. 49, pp. 2919-2925, 2004
- [7] K. Takano, K. Nozaki, Y. Saito, K. Kato, A. Negishi, "Impedance spectroscopy by voltage-step Chronoamperometry using the Laplace Transform method in a Lithium-Ion battery", *J. Electrochemical Soc.*, vol. 147 (3), pp. 922-929, 2000
- [8] K. Onda, M. Nakayama, K.Fukuda, K. Wakahara, T. Araki, "Cell impedance measurement by Laplace Transformation of charge or discharge Current-Voltage", *J. Electrochemical Soc.*, vol. 153 (6), pp. A1212-A1018, 2006
- [9] J.P Christophersen, C.G. Motloch, J.L. Morrison, I.B. Donnellan, W.H.Morrison, "Impedance Noise Identification for State of Health Prognostics", 43rd Power Sources Conference, July 2008