



Université Claude Bernard



Lyon 1

## DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **17 octobre 2017**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **REDONDO IGLESIAS Eduardo**

Titre de la thèse : « Etude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications "véhicule électrique" : Combinaison des effets de vieillissements calendaire et de cyclage »



### Résumé

L'étude du vieillissement des batteries est nécessaire car la dégradation de leurs caractéristiques détermine en grande partie le coût, les performances et l'impact environnemental des véhicules électrifiés, notamment des véhicules 100 % électriques.

La méthodologie choisie pour cette thèse consiste en deux étapes bien différenciées, à savoir la caractérisation et la modélisation. Pour la première étape, on s'appuie sur des essais de vieillissement accéléré d'éléments de batterie. Malgré leur caractère accéléré, les campagnes d'essais de vieillissement sont très coûteuses en moyens humains comme matériels : une connaissance à priori des facteurs de vieillissement est nécessaire, soit par le moyen d'études bibliographiques, soit par la réalisation de pré-campagnes d'essais. Ces études préalables conduisent à la conception d'un plan d'expériences composé d'un certain nombre d'essais dont les résultats permettront de révéler comment les conditions d'utilisation influencent la dégradation des batteries.

Dans la seconde étape, grâce à la connaissance apportée par l'étape de caractérisation, on procède à la modélisation du vieillissement. Celle-ci permet de mettre en évidence des lois de vieillissement qui sont généralisées pour prédire l'évolution des performances d'une batterie soumise à de conditions d'utilisation variables dans le temps. Le modèle de vieillissement qui en résulte peut être utilisé pour concevoir et utiliser d'une manière optimale les batteries des véhicules pour minimiser à la fois la consommation d'énergie et de ressources naturelles.

En sachant que la dégradation d'une batterie se produit différemment selon si elle est au repos ou si elle est parcourue par un courant, une difficulté majeure est celle de déterminer comment se combinent les effets du vieillissement calendaire et de cyclage pour un véhicule électrique. Dans les applications "véhicules électriques", les batteries passent une part importante de leur temps au repos et les niveaux de courant pendant leur utilisation sont relativement faibles. Les résultats des essais de vieillissement accéléré réalisés dans cette thèse confirment le caractère non-linéaire de la combinaison des vieillissements calendaire et en cyclage lorsque les batteries

suivent des profils d'utilisation similaires à l'application considérée.

Le modèle de vieillissement qui est proposé dans le dernier chapitre se veut simple mais efficace. Ainsi il repose sur un faible nombre d'équations (2) et de paramètres (6) et il permet de simuler l'évolution de la capacité d'une cellule soumise à un vieillissement qui combine des périodes de cyclage et de repos. Les exemples d'application de ce modèle démontrent son utilité pour l'établissement de stratégies d'utilisation de batteries dans le but de prolonger leur durée de vie.

**Mots clés :**

Transport ; Énergie ; Stockage d'énergie ; Batterie ; Lithium-ion ; Vieillissement calendaire ;

Vieillissement en cyclage ; Fiabilité

**Title :**

Study of lithium-ion batteries ageing in electric vehicle applications: Calendar and cycling ageing combination effects.

**Abstract :**

Studying the ageing of batteries is necessary because the degradation of their features largely determines the cost, the performances and the environmental impact of electric vehicles, particularly of full electric vehicles.

The chosen method in this thesis is divided in two distinct phases, namely characterisation and modelling. The first phase is based on accelerated ageing testing of battery cells. Despite being accelerated, ageing test campaigns are expensive in terms of workforce and equipments: an a priori knowledge of ageing factors is necessary, either by the means of bibliographic studies or by performing preliminary test campaigns. These initial studies lead to an experimental design setup including a certain number of ageing tests. The obtained results may reveal the influence of use conditions on the degradation of batteries.

In the second phase, the battery ageing is modelled applying the knowledge acquired in the first phase. Here, the ageing laws are generalised to predict the performance degradation of a battery subjected to variable use conditions. The resulting ageing model can be used to optimally design and use the battery in a vehicle by minimising both energy and natural resources consumption.

Given that battery degradation occurs in a different way if the battery is in rest condition or if a current flows through, a major challenge is to determine how calendar and cycling ageing effects combine together. In electric vehicle applications, batteries are not used (in rest condition) most of the time and current levels are relatively low when they are used. The results from accelerated ageing tests which have been carried out during this thesis confirm the non-linearity of the combination of calendar and cycling ageing when usage profiles are applied to the batteries. The usage profiles are similar to the considered application: the electric vehicle.

In the last chapter of this manuscript a simple but effective ageing model is proposed.

It lies in a low number of equations (2) and parameters (6) and enables to simulate the capacity fade of a battery cell subjected to ageing conditions combining cycling and rest periods. The application examples prove the usefulness of this model for the development of battery use strategies for the purpose of extending their lifespan.

#### Keywords

Transport; Energy; Energy storage; Battery; Lithium-ion; Calendar Ageing; Cycling Ageing; Reliability