

# MODELES DE DEGRADATION DES BATTERIES D'ACCUMULATEURS

## DEGRADATION MODELS FOR BATTERIES OF ACCUMULATORS

Marion Soussens, Roland Laulheret, André Cabarbaye  
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)  
18, avenue Edouard Belin - 31401 Toulouse

André Cabarbaye  
CAB INNOVATION  
3, rue de la Coquille – 31500 Toulouse  
[www.cabinnovation.com](http://www.cabinnovation.com)

### Résumé

Cet article propose un modèle théorique de dégradation des batteries d'accumulateurs, accéléré en température et en fonction de la profondeur de décharge, afin de faciliter le dimensionnement des systèmes ainsi que leur suivi dans le cadre du Health Monitoring. Le modèle choisi est un processus gamma non stationnaire, accéléré par un facteur d'Arrhenius pour la température et un facteur de type puissance inverse pour la DOD (Depth Of Discharge). Il est ajusté par la méthode du maximum de vraisemblance à partir de données issues de batteries utilisées dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées.

### Summary

This paper proposes a theoretical model of electrical batteries degradation, accelerated by the temperature and the Depth Of Discharge (DOD), in order to facilitate the design of systems and their Health Monitoring. The chosen model is a non-stationary gamma process, accelerated by an Arrhenius factor and a power inverse factor for DOD. It is fitted by maximum likelihood method using data from batteries in varied conditions and environment.

### Introduction

Le stockage d'énergie est indispensable à la mobilité et à l'exploitation d'une production d'énergie intermittente. Aussi, la batterie d'accumulateurs électrochimiques constitue-t-elle un élément clé de très nombreux systèmes mobiles (satellite, voiture électrique...) ou autonomes (lampadaire solaire...).

Bien que ce moyen de stockage ait récemment bénéficié d'améliorations significatives, avec l'introduction des technologies Lithium-ion ou Lithium fer phosphate (plus sûre) d'une densité énergétique trois fois supérieure à celle d'une batterie au plomb, la batterie reste un élément relativement lourd, volumineux et onéreux qui conditionne le dimensionnement des systèmes.

Les nouvelles batteries supportent plus de cycles de recharge qu'auparavant ce qui leur donne une longévité environ trois fois supérieure à celle des batteries au plomb. Mais elles restent cependant toujours soumises à des phénomènes de dégradation dans le temps, en termes de capacité et de résistance interne, qui dépendent fortement des conditions d'utilisation (cycle et profondeur de décharge) et d'environnement (température).

Aussi, la disponibilité d'un modèle paramétrique de dégradation des batteries, en fonction de leur cyclage et des covariables influentes, constituerait un précieux outil de dimensionnement des systèmes, notamment quand ces derniers ne sont pas réparables comme les engins spatiaux. Il se révélerait également être un élément essentiel de diagnostic et de pronostic dans le cadre du suivi en ligne de ces systèmes dans une boucle de Health Monitoring mise en œuvre durant toute leur vie opérationnelle.

Dans le cadre d'une étude méthodologique portant sur les phénomènes de vieillissement des systèmes orbitaux [4], le CNES a été amené à rechercher un modèle théorique de dégradation applicable aux batteries d'accumulateurs.

### Choix d'un modèle de dégradation

Dès lors qu'un produit est sujet à un processus de dégradation que l'on peut quantifier dans le temps et sur lequel un seuil limite d'acceptabilité peut être fixé, il est possible de suivre son évolution en essais, afin d'évaluer sa fiabilité prévisionnelle, ou durant sa vie opérationnelle, pour connaître son état de santé au jour le jour et pouvoir estimer son potentiel restant. Par ailleurs, les conditions d'utilisation et d'environnement peuvent accélérer le processus de dégradation et influencer par la même la fiabilité du produit.

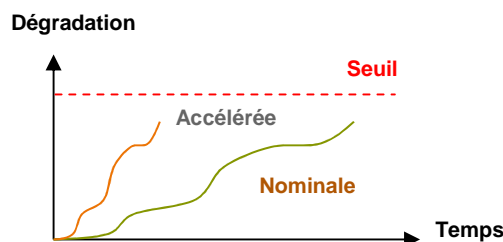


Figure 1. Processus de dégradation

En observant les écarts de dégradation par unité de temps, le phénomène peut se modéliser par un processus Gamma, si la dégradation est toujours croissante (détérioration monotone), ou par un processus de Wiener si la dégradation peut se réduire momentanément par des phénomènes d'amélioration voire de guérison [1]. Par ailleurs, le phénomène de dégradation peut être stationnaire ou non-stationnaire et être influencé par les conditions environnementales [4].

Au-delà de la dégradation en stockage et pendant les premiers cycles d'utilisation (perte de 10 % environ), la capacité d'une batterie se détériore progressivement durant les cycles de charge et décharge. Cette dégradation est monotone et peut se modéliser par un processus Gamma non stationnaire, car la vitesse de dégradation en fonction du nombre de cycles n'est pas, a priori, constante.

Ce processus est accéléré en température et par la profondeur de décharge. Aussi, le modèle de dégradation choisi est un processus gamma non stationnaire, accéléré par un facteur d'Arrhenius pour la température et un facteur de type puissance inverse pour la DOD. Il pourrait être complexifié, si nécessaire, pour prendre en compte d'autres covariables influentes telles que l'humidité par exemple. Il est également possible de considérer un seuil de défaillance aléatoire.

Ce modèle est alors ajusté par la méthode du maximum de vraisemblance à partir de données issues de différentes batteries utilisées dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées.

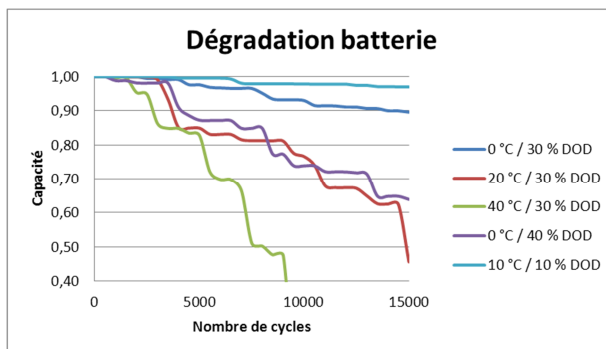


Figure 2. Batteries soumises à différentes conditions

### Modélisation par un processus gamma non stationnaire accéléré

Un processus  $(X_t)_{t>0}$  est un processus gamma stationnaire  $Ga(\alpha, \beta)$  si :

- $X(0) = 0$ ,
- $X$  est un processus à accroissements indépendants,
- Quel que soit  $t > 0$  et  $h > 0$ , la loi de l'accroissement  $X(t+h) - X(t)$  est une loi gamma  $\Gamma(\alpha h, \beta)$  de densité :

$$t > 0, \quad f(x) = \frac{\beta^{-\alpha h}}{\Gamma(\alpha h)} x^{\alpha h - 1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Afin de représenter une évolution plus complexe de la dégradation, ce processus peut être rendu non stationnaire, au moyen d'une fonction croissante  $m(t)$ , en remplaçant  $\alpha h$  par  $m(t+h) - m(t)$ . La fonction  $m(t) = pt^q$  avec  $p$  et  $q > 0$ , peut-être pour cela utilisée car elle permet de modéliser simplement différents types de trajectoire.

De la même manière que dans le cas du modèle Standard de Vie Accélérée en fiabilité, l'accélération agit sur la courbe de dégradation par un simple facteur d'échelle. La loi d'accroissement  $Z(t+h) - Z(t)$  devient alors une loi gamma  $\Gamma(m(FA \cdot (t+h)) - m(FA \cdot t), \beta)$  avec  $FA$  le facteur d'accélération.

Le facteur d'accélération se calcule à partir de modèles plus ou moins spécifiques au type de stress. Pour la température, le facteur d'Arrhenius référencé à 20°C peut être utilisé :

$$FA_{Temp} = \exp\left(\frac{Ea}{K} \left(\frac{1}{273+20} - \frac{1}{273+T^{\circ}C}\right)\right)$$

Avec  $Ea$  l'énergie d'activation (inconnue) et  $K$  la constante de Boltzmann  $\left(\frac{1}{11605} = 8,6171 \cdot 10^{-5} \text{ eV}/^{\circ}K\right)$ .

Pour la profondeur de décharge on peut utiliser un facteur d'accélération de type puissance inverse :

$$FA_{D\acute{e}ch} = (1 - DOD)^{\alpha} = SOC^{\alpha} \text{ avec } \alpha < 0 \text{ et } FA_{D\acute{e}ch}(DOD = 0\%) = 1$$

On notera que le DOD (Depth Of Discharge) est égal à  $1 - SOC$  (State Of Charge) tant que l'on ne dépasse pas la valeur de la capacité nominale.

## Ajustement du modèle de dégradation

Afin de valider la technique d'ajustement d'un tel modèle, celui-ci a tout d'abord été ajusté à partir de données simulées par le modèle lui-même, en tentant de retrouver, par ce moyen, le paramétrage initial ayant servi à la simulation.

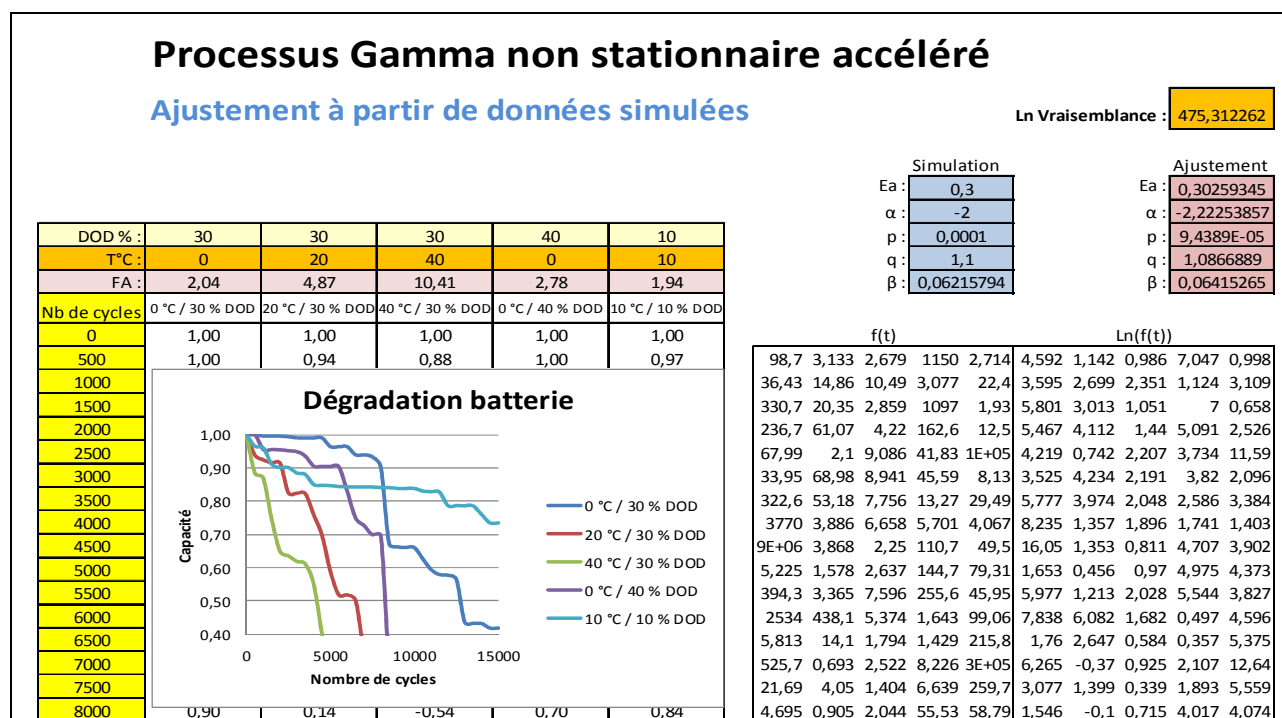


Figure 3. Ajustement à partir de données simulées

Les résultats présentés en figure 3, montrent que les cinq paramètres du modèle ( $Ea, \alpha, p, q, \beta$ ) obtenus à l'issue de l'ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance sont très proches de ceux utilisés initialement pour simuler les données.

On notera à ce sujet que le suivi d'une batterie permet d'obtenir une trajectoire de dégradation et donc un nombre de données statistiques conséquent. Le suivi d'un certain nombre de batteries reste cependant nécessaire pour caractériser la variabilité au sein de cette famille d'équipements.

Par ailleurs, des intervalles de confiance peuvent être établis pour chacun des paramètres (figure 4), ou pour des fonctions calculées à partir de ces derniers (la durée moyenne de la vie restante par exemple), au moyen d'une méthode générique d'estimation par inversion de la matrice de Fisher [3].

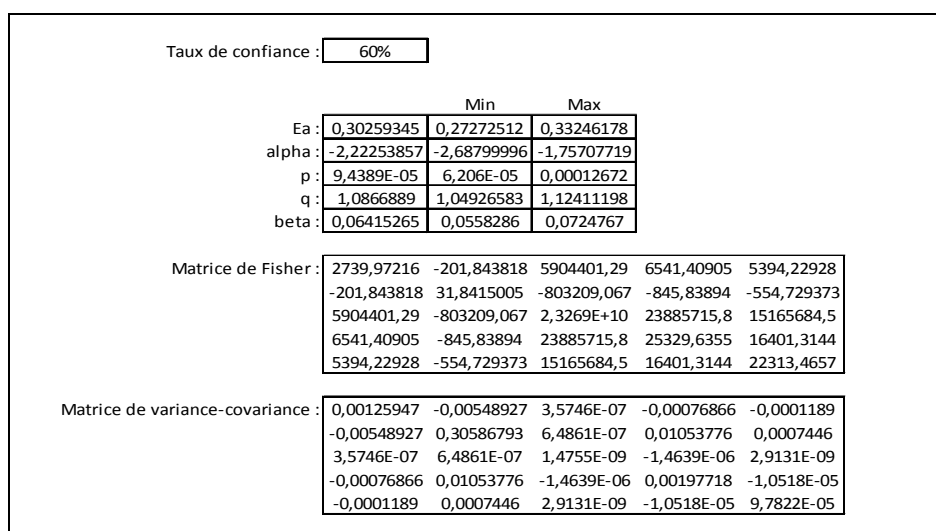


Figure 4. Intervalles de confiance des paramètres

On notera par ailleurs que l'ajustement d'un modèle relativement complexe, tel que celui-ci, n'est réellement possible que si l'on utilise un outil d'optimisation globale pouvant s'affranchir des multiples optima de la fonction du logarithme de la vraisemblance. Ce modèle de dégradation a été ajusté ici au moyen de l'outil GEN CAB de CAB INNOVATION.

Après cette phase de validation du modèle et de sa mise en œuvre, un ajustement a été réalisé à partir de données hétérogènes issues de différentes batteries utilisées dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées. Issues de résultats d'essais de vieillissement effectués par le CNES sur des batteries au Lithium-ion, ces données statistiques réelles étaient malheureusement trop parcellaires pour rendre compte de l'influence des covariables dans l'ensemble de leurs plages de variation. Aussi ont-elles été complétées par des données simulées en s'appuyant sur le jugement d'un expert du domaine.

### Estimation de la durée de vie restante

La durée de vie restante aussi appelée RUL (*Remaining Useful Life*) est une variable aléatoire conditionnelle qui correspond à la durée de vie résiduelle sachant l'état de dégradation observé. Selon le type de dégradation, accumulative ou non, la durée de vie résiduelle peut être définie de différentes manières.

- Dans le cas d'une dégradation croissante (modélisé par exemple par un processus gamma), il s'agit alors du temps d'atteinte du seuil fixé.
- Dans le cas d'une dégradation non monotone, la RUL peut correspondre au premier temps d'atteinte du seuil ou au premier temps durant lequel la dégradation est restée pendant une certaine durée au-dessus du seuil.

Dans le cas d'un processus gamma non stationnaire, il est possible de calculer de manière analytique la RUL.

Soient  $(X_t)_{t \geq 0}$  un processus Gamma non homogène, avec  $X_t$  de loi  $\Gamma(m(t), \beta)$  et  $z_0$  le seuil de panne. On s'intéresse à la RUL à un certain instant fixé  $t_0$  sachant qu'à cet instant, le niveau de dégradation est  $X_{t_0} = x_0$  avec  $x_0 < z_0$ .

La fonction de survie de la RUL à l'instant  $t_0$  sachant que  $X_{t_0} = x_0$  est donnée par :

$$\begin{aligned} P(RUL(t_0) > t | X_{t_0} = x_0) &= P(X_t < z_0 | X_{t_0} = x_0) \\ &= P(X_t - X_{t_0} < z_0 - x_0 | X_{t_0} = x_0) \\ &= F_{X_t - X_{t_0}}(z_0 - x_0) \end{aligned}$$

où  $X_t - X_{t_0}$  suit la loi gamma  $\Gamma(m(t) - m(t_0), \beta)$ .

Une alternative aux calculs analytiques est l'utilisation de simulations de Monte-Carlo. Une fois les paramètres du processus Gamma estimés, on peut simuler le processus gamma  $\Gamma(\hat{p} \cdot (FA \cdot t)^{\hat{q}} - \hat{p} \cdot (FA \cdot (t-1))^{\hat{q}}; \hat{\beta})$  un grand nombre de fois puis en prendre les valeurs moyennes. Ces simulations permettent d'obtenir pour chaque instant d'observation la valeur de la dégradation moyenne ainsi que ses différents quantiles et par suite la RUL en comparant le niveau de dégradation moyen au seuil de défaillance.

A titre d'exemple, une batterie utilisée à 30°C et 50% de DOD peut être considérée défaillante dans un système lorsque sa capacité est inférieure ou égale à 50% de sa capacité initiale ( $z_0 = 0.5$ ). Sachant que sa capacité est de 70% au temps  $t_0 = 300$ , quel est son potentiel restant ?

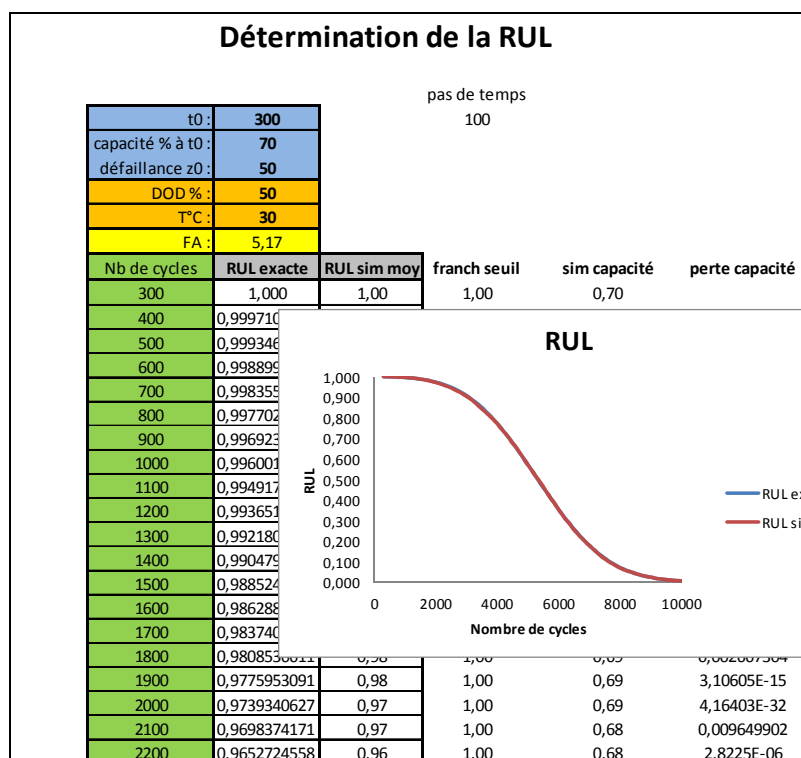


Figure 5. Détermination de la RUL

Pour 10000 simulations les deux courbes sont difficilement dissociables malgré les faiblesses d'Excel (la fonction LOI.GAMMA.INVERSE renvoie une erreur quand son premier argument est proche de 1 et le niveau de dégradation est alors inchangé par rapport à la date d'observation précédente). L'utilisation du logiciel libre R a permis de vérifier qu'en l'absence de cette erreur, les deux courbes sont également quasi identiques.

Une autre grandeur intéressante est la MRL. La MRL (*Mean Residual Life*) correspond à la durée moyenne de vie restante soit, en termes mathématiques, l'espérance de la RUL à l'instant  $t_0$  sachant que  $X_{t_0} = x_0$ . On obtient alors :

$$\begin{aligned} MRL_{x_0}(t_0) &= E(RUL(t_0) > t | X_{t_0} = x_0) \\ &= \int_0^{+\infty} F_{X_t - X_{t_0}}(z_0 - x_0) dt \end{aligned}$$

Il n'existe pas de formule explicite pour calculer cette expression qui peut cependant se calculer de manière approchée à l'aide d'une méthode numérique d'approximation des intégrales.

L'utilisation d'une telle méthode conduit à une durée moyenne de vie restante approximative de 5052 cycles de charge/décharge pour la batterie fonctionnant à 30°C et 50% de DOD, entre 30 et 50% de perte de capacité.

Comme pour la RUL, il est possible d'estimer la MRL à l'aide de simulations de Monte-Carlo, en faisant la moyenne des RUL simulées (durée avant perte de 50% de capacité).

On notera que dans le cas d'un processus de Wiener homogène la RUL peut également être donnée de manière analytique et suit une loi inverse gaussienne. En revanche, il n'existe pas de formule explicite dans le cas non homogène, mais des travaux de recherche à ce sujet sont actuellement en cours [2].

## Conclusion

Outre les périodes de garantie et contraintes d'utilisation, les fabricants de batterie d'accumulateurs fournissent parfois à leurs clients quelques caractéristiques de vieillissement de leur produit. Mais ils gagneraient à proposer des modèles plus élaborés permettant aux concepteurs d'optimiser le dimensionnement et l'exploitation des systèmes comprenant des batteries.

Ainsi, le modèle proposé dans cet article mériterait d'être ajusté à partir de données statistiques de vieillissement plus nombreuses, même si l'obtention de ces dernières nécessite des essais relativement longs et difficiles à accélérer.

Un tel modèle permettrait de connaître la durée de vie d'une batterie pour un besoin (capacité) et des conditions données ou d'estimer sa durée de vie moyenne restante (MRL) selon son état courant.

L'impact économique ou scientifique d'une telle amélioration de la connaissance de l'état de dégradation d'un composant clé de très nombreux systèmes peut être significatif en permettant par exemple de moduler la sollicitation d'un satellite d'observation de la Terre, en termes de nombre de prises d'image journalières, selon son état réel tout au long de sa vie, ou de prendre au bon moment les dispositions nécessaires au renouvellement d'un satellite assurant un service à pérenniser.

## Références

- [1] Nikulin M., Gerville-Reache L., Couallier V., Statistique des essais accélérés, Hermes science, Lavoisier, 2007.
- [2] Paroissin C., Non-homogeneous degradation models: A review and some new results, *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon – Steenbergen et al. (Eds) © 2014 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00123-7*
- [3] Cabarbaye A, Tanguy A, Bosse S (2012), Adjustment of complex probabilistic models and estimation of confidence intervals in a discrete manner, ESREL, Helsinki.
- [4] Couallier V, Gerville-Reache L, Denis I, Guide sur le Health Monitoring et les modèles de dégradation, StatXpert (2013)