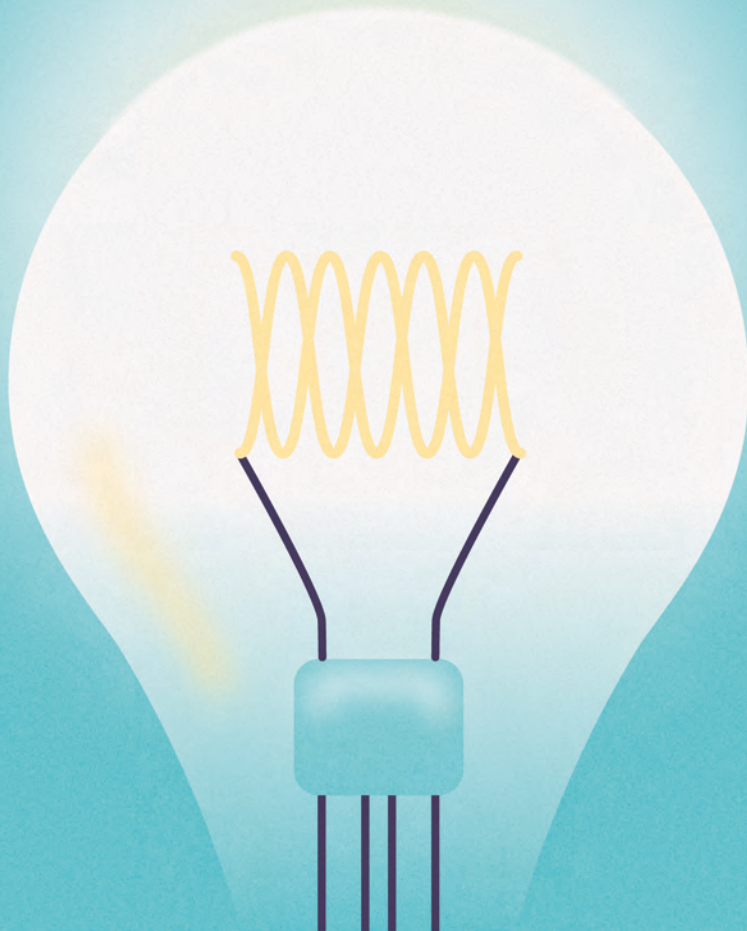




ÉNERGIES « NOUVELLES » ET SOCIÉTÉ

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE

À LA CROISÉE DES CHEMINS ET DES SAVOIRS



DIRECTION

Patrick Schembri & Hynd Remita

WORKSHOP MOMENTOM

21 novembre 2019
MSH Paris-Saclay



8

ÉNERGIES « NOUVELLES » ET SOCIÉTÉ

*La transition énergétique actuelle
à la croisée des chemins et des savoirs*

WORKSHOP MOMENTOM

21 novembre 2019

MSH Paris-Saclay

DIRECTION

Patrick Schembri

Hynd Remita



©MSH Paris-Saclay Éditions, 2021.

4, avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

www.msh-paris-saclay.fr

ISBN 978-2-490369-07-2

Le stockage de l'énergie électrique dans les batteries à ions lithium

Une histoire d'interfaces

Loïc ASSAUD

RÉSUMÉ

Le stockage de l'énergie constitue un défi sociétal majeur qui nécessite la mise en œuvre de batteries de plus en plus performantes. Une étude fine des mécanismes et des matériaux constitutifs de tels systèmes permet une meilleure compréhension des phénomènes conduisant à des limitations de performances et permet ainsi de les améliorer notablement. Couplée à des modèles comportementaux de vieillissement, cette approche permet de garantir des systèmes optimisés pour un stockage de l'énergie performant, sûr et durable, ainsi qu'une amélioration sensible de la durée de vie de ces dispositifs. Après une présentation succincte du principe de fonctionnement d'une batterie à ions lithium, cet article s'intéresse à la composition interne de ces systèmes et présente un modèle permettant de suivre l'état de dégradation et de vieillissement de ce type de dispositifs au cours de leur utilisation.

Le stockage de l'énergie

Dans un contexte où la demande d'énergie ne cesse de croître et où les énergies renouvelables font face au problème lié à l'intermittence¹ (photovoltaïque, éolien...), le stockage devient un enjeu majeur. Les batteries devraient pouvoir répondre à cette demande, aujourd'hui et dans les

¹ L'intermittence d'une énergie renouvelable désigne son incapacité à assurer une production constante d'électricité. S'agissant par exemple de l'éolien et du solaire, leurs productions cessent respectivement en l'absence de vent et la nuit.

années à venir. Parmi les technologies disponibles sur le marché à l'heure actuelle, la technologie Li-ion (ions lithium) semble être la plus prometteuse, comme le montre l'augmentation importante de la production du lithium depuis ces vingt dernières années, tout en révélant cependant des limites, s'agissant notamment des ressources inégalement réparties à la surface de la planète (Figure 1). Les batteries Li-ion commencent ainsi à se démocratiser, assurant un stockage efficace de l'énergie, pour une utilisation dans des dispositifs électroniques portables, tels que nos téléphones mobiles ou encore des véhicules hybrides ou tout électriques, faisant l'objet d'une attention toute particulière en termes de recherche universitaire et industrielle (Larcher & Tarascon, 2015 ; Zubi *et al.*, 2018). La plupart des efforts portent aujourd'hui sur l'étude de nouveaux matériaux ou de nouvelles technologies (lithium-air, lithium-soufre... ; Nayak *et al.*, 2018). Cependant, l'intégration du matériau actif² en termes de formulation des électrodes composites a peu été étudiée jusqu'à présent, alors que les performances des batteries en dépendent directement. Ainsi, la capacité réelle des batteries commercialisées aujourd'hui atteint péniblement en moyenne la moitié de la capacité théorique du matériau actif employé, à cause des limitations liées au transport de charges (ions et électrons) au sein de l'électrode composite, en particulier au niveau des interfaces.

Les modes de sollicitation des cellules de batteries ont également un impact majeur sur leur durée de vie. À l'heure actuelle, le cahier des charges fixé pour répondre à la demande du marché doit permettre d'élaborer des batteries assurant une recharge rapide (en quelques minutes ou quelques dizaines de minutes), un stockage d'énergie optimisé, afin d'assurer une autonomie suffisante, et enfin une durée de vie de la cellule la plus longue possible, permettant un nombre de cycles charge/décharge important (plusieurs centaines ; Thackeray, Wolverton & Isaacs, 2012).

² Au sein d'une batterie Li-ion, le matériau actif (ou matière active) désigne le matériau constitutif des électrodes positive et négative de la batterie permettant l'intercalation des ions lithium au sein de sa structure.

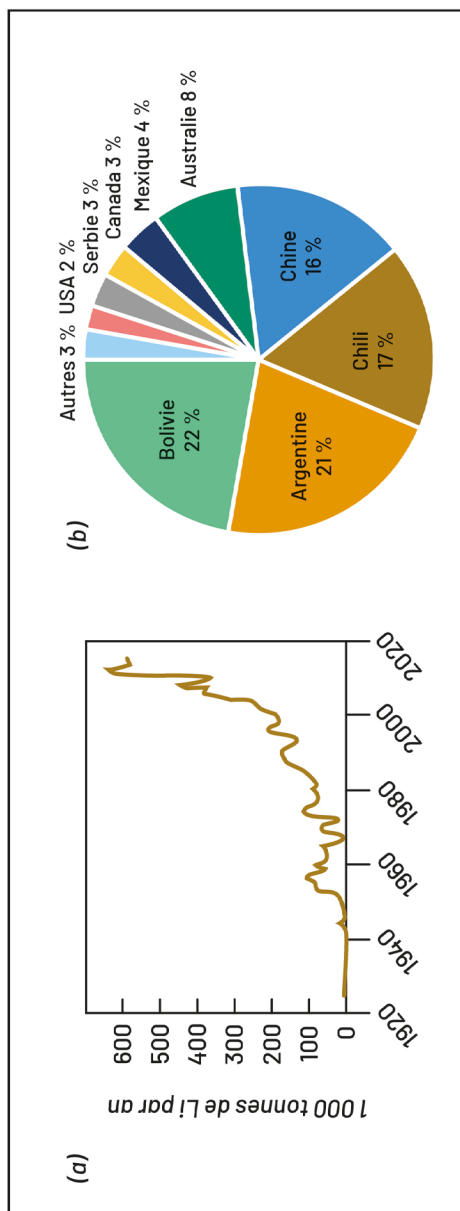


Figure 1 – Production et ressources en lithium.

- a. Production de lithium au cours du temps. /
b. Répartition des ressources en lithium à la surface de la Terre.

Pour répondre à ces trois critères, une compréhension fine des mécanismes se produisant au sein des cellules de batteries, en particulier au niveau des interfaces, ainsi qu'une meilleure compréhension des mécanismes de vieillissement des batteries, sont donc primordiales. Les chiffres montrent que les ressources en lithium sont limitées et qu'il est essentiel de travailler à la fois sur le design de nouveaux matériaux permettant un stockage efficace et durable de l'énergie, mais également sur la durée de vie des systèmes et leur vieillissement, afin de leur assurer une longévité maximale, sans perte de performances.

Dans cet article, nous nous intéressons à plusieurs réactions chimiques et électrochimiques à fort intérêt sociétal, permettant la mise en œuvre d'un stockage efficace de l'énergie électrique, tout en montrant leurs limitations.

Les batteries à ions lithium : principe de fonctionnement

Les batteries à ions lithium présentent aujourd'hui les meilleures performances en tant que dispositif de stockage électrochimique de l'énergie, pour diverses applications. En particulier, elles équipent à l'heure actuelle nos téléphones portables, nos ordinateurs ou encore les véhicules électriques. Cependant, les ressources disponibles en lithium étant limitées, de nouvelles technologies de batteries émergent déjà dans les laboratoires de recherche, en particulier les systèmes Na-ion ; le sodium est en effet environ 1 000 fois plus abondant que le lithium sur Terre (Sharma *et al.*, 2018). Les matériaux d'électrode négative et d'électrode positive des batteries à ions lithium et sodium souffrent de limitations en termes de vitesse de charge, de cyclabilité (cycle charge/décharge) et de capacité à restituer de manière réversible les ions échangés lors du processus d'intercalation. C'est précisément à ces limitations que de nombreux travaux de recherche s'intéressent.

L'intérêt pour le lithium provient de ses propriétés physico-chimiques. Il s'agit du plus léger des métaux (sa masse molaire étant de 6,9 g/mol), sa densité est faible ($0,53 \text{ g/cm}^3$) et sa capacité énergétique massique théorique importante (3,86 Ah/g). De plus, c'est un élément très électropositif. Cela signifie qu'il possède les propriétés d'un élément réducteur fort, avec peu d'affinité pour les électrons et donc une tendance particulière à s'oxyder pour fournir des ions lithium (Li^+). Dans le cas des batteries, c'est précisément l'ion Li^+ qui nous intéresse pour le stockage de l'énergie.

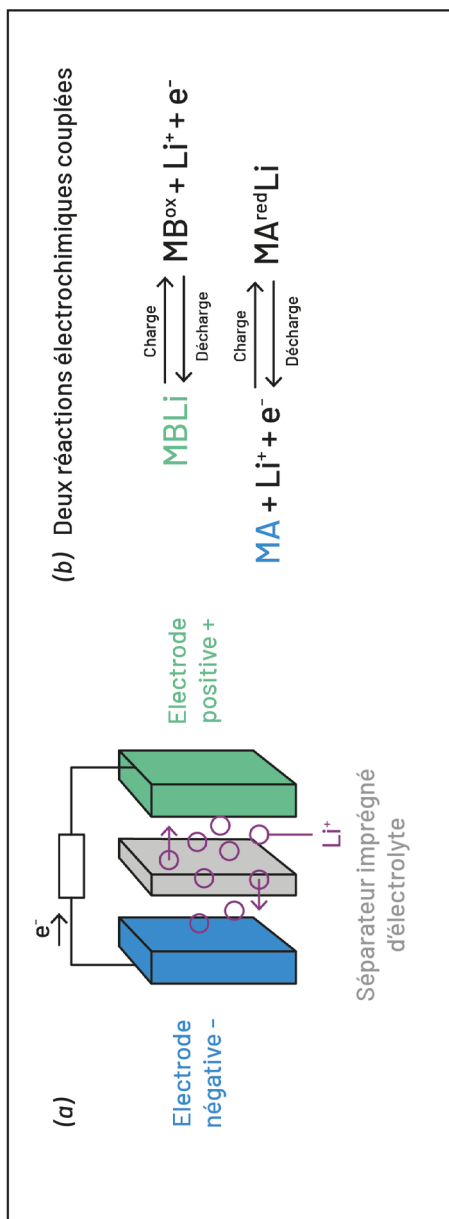


Figure 2 – Réactions (électro)chimiques régissant le fonctionnement d'une batterie Li-ion.

- a. Représentation schématique d'une batterie Li-ion. /
- b. Représentation schématique des réactions électrochimiques se produisant au sein de chacune des électrodes constituant ce système de stockage de l'énergie.

Source : L. Assaud.

Une batterie à ions lithium permet la conversion réversible d'énergie chimique en énergie électrique au moyen d'un système constitué d'un empilement de deux électrodes (une positive et une négative), séparées par un séparateur imprégné d'un électrolyte contenant un sel de lithium. Il s'agit d'un dispositif électrochimique. Les électrodes sont constituées de matériaux dits d'insertion dans lesquels s'intercalent des ions Li^+ lors des phases de charge ou de décharge de la batterie. Le processus mis en jeu est donc une réaction d'intercalation/désintercalation des ions Li^+ dans les structures cristallographiques des matériaux constitutifs de chacune des deux électrodes. L'intercalation des ions Li^+ conduit à la variation du potentiel des électrodes *via* une réaction d'oxydoréduction. Pendant la décharge, les ions Li^+ s'insèrent à l'électrode négative, tandis qu'ils se désinsèrent de l'électrode positive. Le processus inverse intervient lors de la charge de la batterie. Le stockage réversible de l'énergie électrique en énergie chimique fait ainsi intervenir deux réactions électrochimiques couplées, conduisant à un échange (interne) d'ions et un échange (externe) d'électrons vers un circuit extérieur. Un schéma explicatif des réactions mises en jeu est présenté sur la Figure 2.

Matériaux d'électrodes et rôle des interfaces

Une électrode de batterie est constituée de matière active (s'appuyant notamment sur des métaux de transition tels que le cobalt, le nickel, le fer ou le manganèse), qui permet l'intercalation des ions lithium, d'un agent conducteur électronique (généralement du noir de carbone) et d'un liant polymérique conférant une certaine cohésion et tenue mécanique du matériau qui est déposé sur un collecteur de courant métallique (généralement du cuivre ou de l'aluminium). Dès lors, tous ces éléments additionnés les uns aux autres constituent une électrode composite complexe, au sein de laquelle des éléments de tailles différentes et de natures chimiques différentes coexistent. Autant d'interfaces entre ces différents éléments peuvent être dénombrées. Il s'agit d'interfaces entre des matériaux solides (matière active/noir de carbone, matière active/liant polymérique, noir de carbone/liant polymérique, matière active/collecteur de courant...), auxquelles s'ajoutent des interfaces à l'intérieur même de la matière active (particules, agglomérats de particules, clusters...). Une fois les

électrodes mises en contact avec l'électrolyte, le plus souvent liquide, le nombre d'interfaces augmente encore. Il s'agit d'interfaces solide/liquide (matière active/électrolyte, noir de carbone/électrolyte...). Le système devient ainsi particulièrement complexe, comme l'illustre la Figure 3 (Zhou *et al.*, 2018).

Chacune de ces interfaces est susceptible d'être le siège de réactions chimiques interfaciales, conduisant à la formation de couches de passivation à la surface des électrodes (*Solid Electrolyte Interphase* [SEI] ; Lin, Liu & Cui, 2017), ou encore à la génération de résistances de contact. Il faut ici rappeler la fameuse loi d'Ohm ($U = R i$) qui montre la relation de proportionnalité entre la tension U , correspondant à la différence de potentiel entre les deux électrodes, et le courant i débité par la batterie. Le coefficient de proportionnalité R (résistance) permet de traduire les pertes de performances engendrées. Ces résistances, ou polarisations, peuvent s'avérer être de différentes natures (résistance au transfert de charge, résistance de l'électrolyte, résistances de contact, limitation diffusionnelle...). La qualité industrielle de production des matériaux actifs d'électrodes commercialisés aujourd'hui, tels que le graphite, LiFePO_4 (LFP) ou $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (NMC), permet de les rendre intrinsèquement capables d'une (dés)insertion très rapide des ions lithium. Cependant, plusieurs facteurs limitent leurs performances en termes de vitesse (puissance). Ces facteurs, qui influent sur la quantité d'ions lithium et l'apport d'électrons à la matière active, dépendent de l'architecture (nano- et microstructure) de l'électrode à travers les zones interfaciales, la percolation des matériaux, les échelles de longueur et de temps de transport des porteurs de charge (ions et électrons). Une nouvelle possibilité de progresser dans cette direction et d'explorer les relations entre l'architecture des électrodes et les procédés électrochimiques, caractéristiques des performances finales du dispositif de stockage de l'énergie. De nombreuses études sont rapportées dans la littérature à ce sujet (Besnard *et al.*, 2017 ; Seid *et al.*, 2012).

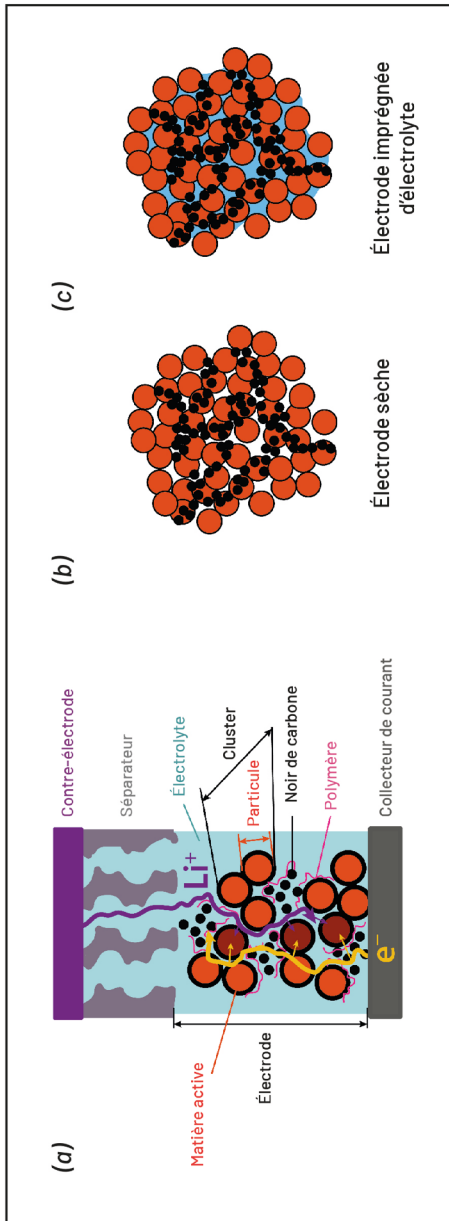


Figure 3 – Architecture d'une électrode de batterie Li-ion.

a. Représentation schématique d'une électrode composite de batterie Li-ion. /
b. Visualisation de l'interface solide/solide. / c. Visualisation de l'interface solide/liquide.

Source : L. Assaud.

Dégradation et vieillissement des batteries

Tout système utilisant des cellules Li-ion doit être informé de la quantité d'énergie qui peut être stockée et de l'énergie qui peut être fournie par la batterie à tout moment. Par conséquent, des développements fiables doivent être corrélés avec des études de vieillissement précises.

Le vieillissement des batteries entraîne principalement une perte de capacité, une perte de puissance et une augmentation de la résistance interne. La compréhension des mécanismes sous-jacents est fondamentale, afin de fournir une prédiction de vieillissement précise et fiable dans les modèles. Cependant, il n'est pas toujours facile de construire un modèle, car la cellule est un système complexe comprenant des interactions entre plusieurs domaines : physique, électrochimie, thermique... Le vieillissement qualitatif de la batterie a été étudié dans tous ces domaines, qu'il s'agisse de la dégradation de l'électrolyte ou de la formation de SEI ou de déformations mécaniques. La Figure 4 permet de visualiser, par une représentation schématique, les différents paramètres et phénomènes de dégradation pouvant intervenir au sein d'une batterie (Birkl *et al.*, 2017 ; Vetter *et al.*, 2005 ; Broussely *et al.*, 2005).

Plusieurs travaux portant sur la modélisation du vieillissement des batteries ont également été entrepris ces dernières années, tenant compte en particulier de différents paramètres tels que la température, l'intensité du courant appliqué et l'état de charge (*State of Charge* [SOC]). Ainsi, en particulier, un modèle prédictif et reparamétrable du vieillissement a été élaboré. Il repose sur une approche fatigue. Une campagne de tests expérimentaux, menée à l'Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay (ICMMO) dans le cadre des travaux de thèse de T. Plattard (2019), a été conduite afin de quantifier l'impact unitaire des paramètres de vieillissement sur la perte de capacité de chaque batterie. Plusieurs techniques expérimentales, que nous ne détaillerons pas ici, telles que la spectroscopie d'impédance électrochimique et l'analyse de capacité incrémentale (*Incremental Capacity Analysis* [ICA]) ont été utilisées. Ces mesures permettent d'effectuer un recalibrage du modèle. Elles sont couplées au modèle de fatigue (Plattard *et al.*, 2019 ; Berecibar *et al.*, 2016).

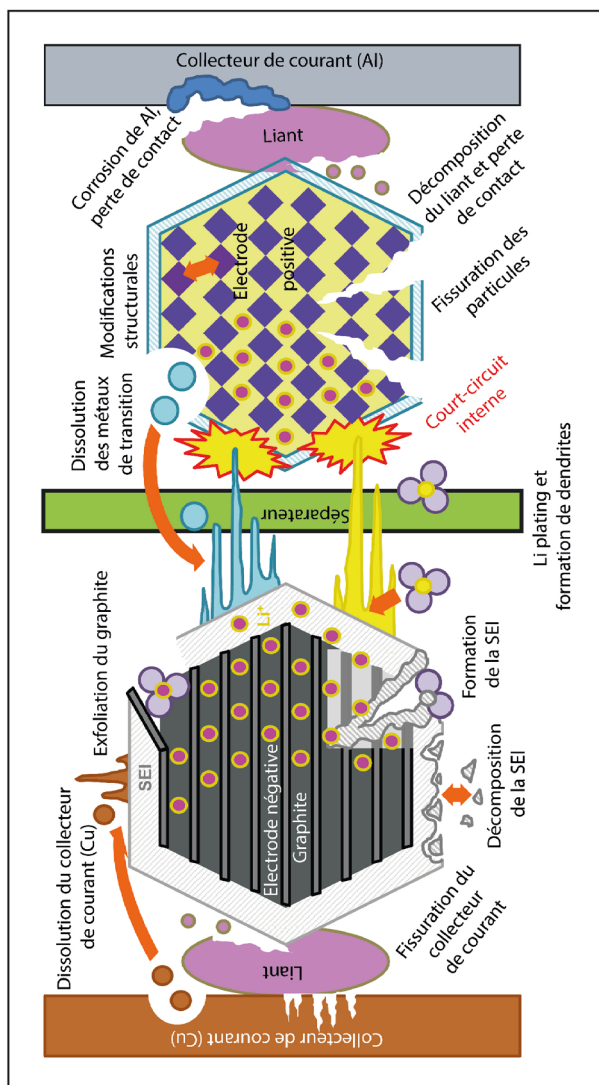


Figure 4 – Représentation schématique illustrant les principaux mécanismes de dégradation et de vieillissement d'une batterie Li-ion.

Source : L. Assaud, adapté d'après Birkel et al., 2017.

Les phénomènes physiques conduisant à l'échauffement des cellules, unités élémentaires constitutives de la batterie, ont également été étudiés. Ces facteurs, dont dépend la génération de chaleur, sont de deux natures :

- intrinsèque à la cellule : la chimie, les composants, la géométrie de la cellule et l'état de charge ;
- extrinsèque à la cellule : la température de la cellule, le courant et la tension de sollicitation de la cellule, l'environnement thermique.

Un modèle thermo-électrique générique peut ainsi être proposé. Il passe par une étude préliminaire visant à mettre en regard les modèles physiques de vieillissement existants avec les modèles construits à partir de données empiriques, permettant d'étayer la liste des paramètres électrothermiques influençant le comportement de la batterie. Il s'agit de mesurer expérimentalement le comportement thermique au cœur de la batterie et d'évaluer l'état de santé de celle-ci en mettant en œuvre des techniques innovantes de diagnostic, comme la spectroscopie d'impédance électrochimique. Dès lors, on cherche, par le biais de campagnes d'essais, à ordonner l'influence de ces différentes grandeurs sur l'évolution de la température au sein de la batterie, et, *in fine*, sur le vieillissement de la batterie, selon le mode d'utilisation de celle-ci pour des applications mobilités (véhicule électrique) ou stationnaires (alimentation d'un réseau électrique).

De manière pratique, une batterie Li-ion peut espérer avoir une durée de vie d'une dizaine d'années. Par conséquent, le modèle développé devrait permettre de prédire le vieillissement de la batterie sur le long terme et d'avoir ainsi un temps de calcul rapide. Afin de produire une estimation quantitative du vieillissement, la dégradation des cellules doit être étudiée dans diverses conditions de vieillissement et les modèles consolidés avec des données et des mesures sur le terrain, afin de générer des prévisions sur la capacité de stockage d'énergie et la capacité de production d'énergie. Plusieurs générations et chimies de batteries au lithium sont testées, en utilisant des protocoles spécifiques et en surveillant les dégradations dues au vieillissement. De nombreux modèles ont déjà été développés pour simuler le comportement électrochimique des batteries (Fuller, Doyle & Newman, 1994 ; Ramadass *et al.*, 2004 ; Ning & Popov, 2004) :

- modèles fondamentaux, ou modèles physiques ;
- modèles phénoménologiques, ou modèles empiriques ;
- modèles mathématiques.

Lorsqu'un modèle de type « fatigue » est choisi, celui-ci présente l'inconvénient de dériver avec des sollicitations répétées, de sorte que ses paramètres doivent être régulièrement réévalués. C'est ce que la technique d'ICA permet d'établir. Ainsi, l'objectif est de faire le lien entre les pics observés sur les courbes d'ICA et la perte de capacité. De manière pratique, cette méthode consiste à tracer la dérivée dQ/dV en fonction de la tension de la cellule. Typiquement, cela traduit l'évolution de la tension de la cellule pendant une décharge complète, montrant des variations en fonction de la charge déplacée lors de la réaction électrochimique. Lorsque la batterie vieillie, les courbes obtenues deviennent non superposables, ce qui montre donc qu'elles sont une évidence du vieillissement. Le modèle proposé peut ensuite être reparamétré grâce à cette mesure. Dans cet exemple (Plattard *et al.*, 2019 ; Plattard, 2019), précisons que la chimie des cellules étudiées est de type $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (NMC) à l'électrode positive et de type graphite à l'électrode négative ; étant entendu que ce modèle pourrait être généralisé à d'autres types de chimies. Seul l'aspect des courbes d'ICA correspondantes serait différent.

Lors du cyclage (charge-décharge) de la batterie, le vieillissement peut être dû à trois causes principales (Dubarry *et al.*, 2011 ; Dubarry, Nan & Brooker, 2018 ; De Hoog *et al.*, 2017) :

- La perte de lithium : de moins en moins d'ions lithium sont disponibles pour faire des allers-retours entre les deux électrodes, car certains d'entre eux sont utilisés lors de la formation d'une couche de passivation, la SEI. Les ions sont utilisés dans des réactions parasites et conduisent à des sous-produits générés au sein de l'électrolyte. Cette cause de vieillissement peut souvent expliquer le début du vieillissement.
- La perte de matière active : la matière active se retrouve isolée, avec perte de contacts avec la matrice conductrice, dissolution du métal de transition constituant le matériau actif dans l'électrolyte, modification de la structure cristalline de l'anode et de la cathode due à des insertions/désinsertions répétées. Typiquement, dans une courbe $V(Q)$ (tension en

fonction de la charge Q), la perte de matière active peut être vue comme une contraction de la courbe de tension par rapport à son état initial.

- La perte de conductivité : elle correspond à une augmentation de la résistance faradique due au ralentissement du transport de masse ou de la conduction ionique au sein de l'électrode, associée à une augmentation de la résistance ohmique due aux dégradations des contacts dans les électrodes ou de la conductivité de l'électrolyte.

De manière pratique, ces mécanismes sont le plus souvent couplés au cours du processus de vieillissement. Il faut également noter qu'en plus du vieillissement en cyclage, la batterie est également sollicitée (elle vieillit) lorsqu'elle est simplement stockée ou inutilisée (Grolleau *et al.*, 2014 ; Kassen & Delacourt, 2013). En effet, les conditions de température et d'état de charge lors du stockage ont un impact majeur sur le vieillissement des cellules. On parle alors de vieillissement calendaire. Afin de rendre compte de ces deux aspects, le modèle de fatigue utilisé met en jeu un ensemble de fonctions de pondérations, chacune afférente à un paramètre de sollicitation de la cellule, à savoir la température (T), le courant (I) ou le SOC. La perte de capacité de la cellule peut alors être exprimée de la manière suivante :

$$\Delta Q = K^{\text{cyc}} f_1(T) f_2(I) f_3(\text{SOC}). Ah + K^{\text{cal}} g_1(T) g_2(I) g_3(\text{SOC}). \sqrt{t}$$

Les fonctions f_i sont associées à la partie cyclage du vieillissement, tandis que les fonctions g_i sont associées à la partie calendaire du vieillissement, K^{cyc} et K^{cal} étant des constantes propres à la chimie de la batterie considérée (Badey, 2012 ; Plattard, 2019). La partie « cyclage » dépend donc des ampères-heures³ (Ah) échangés, tandis que le vieillissement calendaire évolue en \sqrt{t} . Les fonctions de pondération f_i et g_i sont multipliées entre elles car elles sont interdépendantes. Elles permettent de caractériser l'impact de chaque paramètre (I , T , SOC) sur les mécanismes de dégradation de la batterie.

³ L'ampère-heure désigne l'intensité du courant électrique qui passe à travers les bornes d'une batterie fournissant un courant d'un ampère (A) pendant une heure (h).

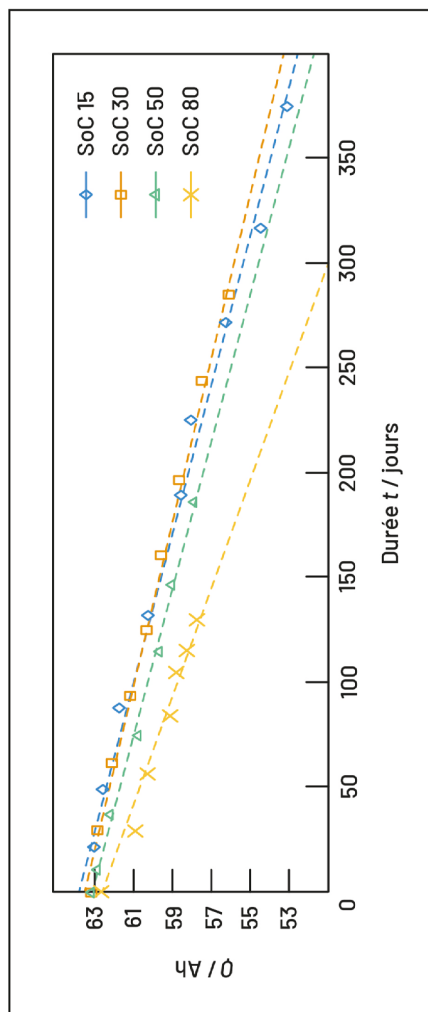


Figure 5 – Évolution de la capacité restante de la batterie vieillie à 45°C à différents états de charge (SOC, en %).

Source : L. Assaud, adapté d'après Plattard *et al.*, 2019.

La Figure 5 montre un exemple de la capacité restante d'une cellule Li-ion pour différentes conditions de sollicitation. Nous pouvons observer ici une perte de la capacité restituée au cours de l'utilisation, influencée par les paramètres et les conditions de sollicitation.

Une utilisation et un stockage des batteries dans des conditions pas trop extrêmes (état de charge modéré, entre 50 et 80 %, température proche de l'ambiante, courant modéré) seront donc à privilégier pour assurer une longévité maximale à la cellule lors de son stockage.

Conclusion

Ce court article permet d'illustrer la complexité d'une batterie à ions lithium, comme système de stockage électrochimique de l'énergie. Il s'agit de systèmes constitués d'électrodes composites, à structures hiérarchiques, qui contiennent une multitude d'interfaces susceptibles de conduire à des pertes de performances relativement importantes. Une fine compréhension de ces interfaces et des mécanismes s'y produisant s'avère ainsi nécessaire pour espérer améliorer les performances de ces systèmes de stockage dans les années à venir. Par ailleurs, la prédiction du vieillissement, par des techniques non intrusives, mettant en œuvre une approche modèle, constitue également un enjeu majeur pour le développement des systèmes de stockage et de conversion de l'énergie performants.

Références bibliographiques

- BADEY Quentin, 2012. *Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile*, thèse de doctorat, sous la dir. de S. Franger, Université Paris-Sud.
- BERECIBAR Maitane, DUBARRY Matthieu, OMAR Noshin, VILLARREAL Igor & VAN MIERLO Joeri, 2016. « Degradation Mechanism Detection for NMC Batteries based on Incremental Capacity curves », *World Electric Vehicle Journal* [En ligne], 8 (2), p. 350-361. Mis en ligne le 24/06/2016 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.3390/wevj8020350
- BESNARD Nicolas, ETIEMBLE Aurélien, DOUILLARD Thierry, DUBRUNFAUT Olivier, TRAN-VAN Pierre, GAUTIER Laurent, FRANGER Sylvain, BADOT Jean-Claude,

- MAIRE Eric & LESTRIEZ Bernard, 2017. « Multiscale Morphological and Electrical Characterization of Charge Transport Limitations to the Power Performance of Positive Electrode Blends for Lithium-Ion Batteries », *Advanced Energy Materials* [En ligne], 7 (8), 1602239. Mis en ligne le 21/12/2016 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1002/aenm.201602239
- BIRKL Christoph R., ROBERTS Matthew R., McTURK Euan, BRUCE Peter G. & HOWEY David A., 2017. « Degradation Diagnostics for Lithium Ion Cells », *Journal of Power Sources* [En ligne], 341, p. 373-386. Mis en ligne le 12/12/2016 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011
- BROUSSELY Michel, BIENSAN Philippe, BONHOMME Frederic, BLANCHARD Philippe, HERREYRE Sylvie, NECHEV Kamen & STANIEWICZ Robert J., 2005. « Main Aging Mechanisms in Li Ion Batteries », *Journal of Power Sources* [En ligne], 146 (1-2), p. 90-96. Mis en ligne le 31/03/2005 (consulté le 19/03/2021). DOI : 10.1016/j.jpowsour.2005.03.172
- DE HOOG Joris, TIMMERMANS Jean-Marc, IOAN-STROE Daniel, SWIERCZYNSKI Maciej, JAGUEMONT Joris, GOUTAM Shovon, OMAR Noshin, VAN MIERLO Joeri & VAN DEN BOSSCHE Peter, 2017. « Combined Cycling and Calendar Capacity Fade Modelling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with Real-Life Profile Validation », *Applied Energy* [En ligne], 200, p. 47-61. Mis en ligne le 12/05/2017 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.apenergy.2017.05.018
- DUBARRY Matthieu, TRUCHOT Cyril, CUGNET Mikaël, LIAW Bor Yann, GERING Kevin, SAZHIN Sergiy, JAMISON David & MICHELbacher Christopher, 2011. « Evaluation of Commercial Lithium-Ion Cells Based on Composite Positive Electrode for Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Applications. Part I: Initial Characterizations », *Journal of Power Sources* [En ligne], 196 (23), p. 10328-10335. Mis en ligne le 25/08/2011 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.jpowsour.2011.08.077
- DUBARRY Matthieu, NAN Qin & BROOKER Paul, 2018. « Calendar Aging of Commercial Li-ion cells of different chemistries-A review », *Current Opinion in Electrochemistry*, 9, p. 106-113. DOI : 10.1016/j.coelec.2018.05.023
- FULLER Thomas F., DOYLE Marc, NEWMAN John, 1994. « Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell », *Journal of the Electrochemical Society*, 141, 1, p. 1-10. DOI : 10.1149/1.2054684
- GROLLEAU Sébastien, DELAILLE Arnaud, GUALOUS Hamid, GYAN Philippe, REVEL Renaud, BERNARD Julien, REDONDO-IGLESIAS Eduardo & PETER Jérémy, 2014. « Calendar Aging of Commercial Graphite/LiFePO₄ Cell: Predicting Capacity Fade under Time Dependent Storage Conditions »,

- Journal of Power Sources* [En ligne], 255, p. 450-458. Mis en ligne le 11/12/2013 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.jpowsour.2013.11.098
- KASSEN Mohammad & DELACOURT Charles, 2013. « Postmortem Analysis of Calendar-Aged Graphite LiFePO₄ Cells », *Journal of Power Sources* [En ligne], 235, p. 159-171. Mis en ligne le 13/02/2013 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.jpowsour.2013.01.147
- LARCHER Dominique & TARASCON Jean-Marie, 2015. « Towards Greener and More Sustainable Batteries for Electrical Energy Storage », *Nature Chemistry* [En ligne], 7, p. 19-29. Mis en ligne le 17/11/2014 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1038/NCHEM.2085
- LIN Dingchang, LIU Yayuan & CUI Yi, 2017. « Reviving the Lithium Metal Anode for High-Energy Batteries », *Nature Nanotechnology* [En ligne], 12, p. 194-2016. Mis en ligne le 07/03/2017 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1038/NNANO.2017.16
- NAYAK Prasant Kumar, YANG Liangtao, BREHM Wolfgang & ADELHELM Philipp, 2018. « From Lithium-Ion to Sodium-Ion Batteries: Advantages, Challenges, and Surprises », *Angewandte Chemie – International Edition* [En ligne], 57 (1), p. 102-120. Mis en ligne le 19/06/2017 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1002/anie.201703772
- NING Gang & POPOV Branko N., 2004. « Cycle Life Modeling of Lithium-Ion Batteries », *Journal of the Electrochemical Society* [En ligne], 151 (10), p. A1584-A1591. Mis en ligne le 21/09/2004 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1149/1.1787631
- PLATTARD Tiphaine, 2019. *Modélisation du vieillissement d'une batterie Lithium-ion. Couplage d'un modèle de fatigue avec un modèle comportemental*, thèse de doctorat, sous la dir. de S. Franger et le co-encadrement de L. Assaud & N. Barnel, Université Paris-Saclay.
- PLATTARD Tiphaine, BARNEL Nathalie, ASSAUD Loïc, FRANGER Sylvain & DUFFAULT Jean-Marc, 2019. « Combining a Fatigue Model and an Incremental Capacity Analysis on a Commercial NMC/Graphite Cell under Constant Current Cycling with and without Calendar Aging », *Batteries* [En ligne], 5 (1), 36. Mis en ligne le 21/03/2019 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.3390/batteries5010036
- RAMADASS Prem, HARAN Bala, GOMADAM Parthasarathy M., WHITE Ralph & POPOV Branko N., 2004. « Development of First Principles Capacity Fade Model for Li-Ion Cells », *Journal of the Electrochemical Society* [En ligne], 151 (2), p. A196-A203. Mis en ligne le 08/01/2004 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1149/1.1634273

- SEID Khalid A., BADOT Jean-Claude, DUBRUNFAUT Olivier, LEVASSEUR Stéphane, GUYOMARD Dominique & LESTRIEZ Bernard, 2012. « Multiscale Electronic Transport Mechanism and True Conductivities in Amorphous Carbon-LiFePO₄ Nanocomposites », *Journal of Materials Chemistry* [En ligne], 22 (6), p. 2641-2649. Mis en ligne le 20/12/2011 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1039/c2jm13429b
- SHARMA Lalit, BHATIA Ankush, ASSAUD Loïc, FRANGER Sylvain & BARPANDA Prabeer, 2018. « Ultra-Rapid Combustion Synthesis of Na₂FePO₄F Fluorophosphate Host for Li-Ion and Na-Ion Insertion », *Ionics* [En ligne], 24, p. 2187-2192. Mis en ligne le 07/12/2017 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1007/s11581-017-2376-3
- THACKERAY Michael M., WOLVERTON Christopher, ISAACS Eric D., 2012. « Electrical Energy Storage for Transportation: Approaching the Limits of, and Going Beyond, Lithium-Ion Batteries », *Energy & Environmental Science* [En ligne], 5 (7), p. 7854-7863. Mis en ligne le 31/05/2012 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1039/c2ee21892e
- VETTER Jens, NOVÁK Petr M., WAGNER Markus R., VEIT Claudia, MÖLLER Kai-Christian, BESENHARD Jürgen Otto M., WINTER Martin, WOHLFAHRT-MEHRENS Margret, VOGLER Christian & HAMMOUCHE Abderrezak, 2005. « Ageing Mechanisms in Lithium-Ion Batteries », *Journal of Power Sources* [En ligne], 147 (1-2), p. 269-281. Mis en ligne le 14/03/2005 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006
- ZHOU Limin, ZHANG Kai, HU Zhe, TAO Zhanliang, MAI Liqiang, KANG Yong-Mook, CHOU Shu-Lei & Chen Jun, 2018. « Recent Developments on and Prospects for Electrode Materials with Hierarchical Structures for Lithium-Ion Batteries », *Advanced Energy Materials* [En ligne], 8 (6), 1701415. Mis en ligne le 16/11/2017 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1002/aenm.201701415
- ZUBI Ghassan, DUFO-LÓPEZ Rodolfo, CARVALHO Monica & PASAOGU Guzey, 2018. « The Lithium-Ion Battery: State of the Art and Future Perspectives », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [En ligne], 89, p. 292-308. Mis en ligne le 11/04/2018 (consulté le 19/04/2021). DOI : 10.1016/j.rser.2018.03.002

ÉNERGIES « NOUVELLES » ET SOCIÉTÉ

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ACTUELLE

À LA CROISÉE DES CHEMINS ET DES SAVOIRS

Les mutations importantes imposées par l'urgence climatique, la digitalisation accélérée des activités économiques et la crise sanitaire interrogent la manière dont on comprend le monde et ses évolutions. À ce titre, l'énergie demeure au centre des débats sur l'avenir des sociétés. Les deux derniers siècles ont été marqués par des progrès considérables, qui ont reposé sur un usage intensif des ressources énergétiques à l'origine de problèmes d'ordres écologique et technologique. Les réponses actuelles proposées reposent à la fois sur la pleine maîtrise de la consommation d'énergie et la forte pénétration des sources renouvelables dans les mélanges énergétiques utilisés. Or, ces réponses sont sources de défis pour les acteurs des filières énergétiques, les usagers et les décideurs politiques. En effet, la transition énergétique actuelle doit promouvoir la sobriété énergétique requise pour préserver la stabilité du climat, tout en garantissant le droit d'accès à une énergie bon marché.

Comment pareille transition rencontre-t-elle le droit par référence à la protection des libertés individuelles et à la garantie de la sécurité de chacun ? Sous quelles conditions les innovations technologiques, telles que la solution hydrogène pour la mobilité et la batterie pour le stockage de l'énergie électrique, peuvent-elles être déployées à grande échelle ? Quels sont les obstacles à l'appropriation par les usagers des technologies contribuant à la maîtrise de leur consommation d'énergie ? Telles sont les questions traitées dans cet ouvrage qui rassemble des contributions présentées lors du workshop MOMENTOM (*MOleculas and Materials for the ENergy of TOMorrow*) du 21 novembre 2019 à la Maison des Sciences de l'Homme Paris-Saclay. S'inscrivant dans le cadre de l'Initiative de Recherche Stratégique du même nom, l'approche originale adoptée dans ces pages vise à croiser les regards de chimistes, économistes et juristes sur les modèles de référence et autres systèmes de représentation de la transition énergétique actuelle.

