

# Prédiction précise des performances des batteries lithium-ion à l'aide d'une approche de modélisation hybride multi-physique et axée sur les données

**Directeur de Thèse :** Christophe LALLEMENT, PR (SMH)

**Co-encadrant(s) éventuel(s) :** Tedjani MESBAHI, McF (SMH), Ahmed SAMET, McF (SDC)

**Unité(s) d'Accueil(s) :** ICube, UMR 7357

**Établissement de rattachement :** UNISTRA & INSA Strasbourg

**Collaboration(s) (s'il y a lieu) :** EDF, Capgemini, Socomec, SnT Luxembourg, IAAPS (University of Bath)

**Rattachement à un programme (s'il y a lieu) :** Financement des équipements sur le projet ENERGETIC Horizon Europe (ICube).

## Résumé (1500 caractères au maximum, espaces compris) :

La dernière décennie a vu de nombreux changements dans l'industrie automobile, avec une évolution vers des véhicules plus respectueux de l'environnement et aux coûts d'exploitation plus faibles. Les véhicules électriques sont devenus une option populaire pour les déplacements de courte et moyenne distance dans les zones urbaines et suburbaines en raison de leurs avantages environnementaux et économiques. Les batteries Lithium-ions sont actuellement la meilleure option pour le stockage d'énergie dans les véhicules électriques. Le système de gestion de la batterie (BMS) joue un rôle crucial pour assurer la sécurité, les performances et la longévité de la batterie. La modélisation multi-physique est une approche utile pour prédire la durée de vie utile restante (RUL) de la batterie, car elle tient compte de diverses variables telles que la chimie, l'électronique, l'électricité, la mécanique et la thermique qui interagissent toutes. Cependant, cette approche nécessite de nombreux paramètres provenant de différents domaines et est gourmande en ressources informatiques.

Cette thèse vise à créer un modèle de batterie lithium-ion qui combine la précision de la modélisation multi-physique avec le temps de calcul rapide et le nombre minimal de paramètres des modèles basées sur les données. Cette approche multimodale permet une prédiction précise des SoX et du RUL et réduit le besoin de grandes quantités de données expérimentales pour l'entraînement du modèle et les études de vieillissement.

## Contexte

L'industrie automobile et le marché des véhicules ont connu des changements importants ces dernières années, les utilisateurs recherchant des véhicules qui émettent moins de polluants, consomment moins de carburant et ont des coûts d'exploitation moins élevés, en grande partie pour des raisons environnementales et économiques. Les véhicules électriques sont devenus la solution la plus efficace pour les déplacements de courte et moyenne distance, en particulier dans les zones urbaines et suburbaines, car ils offrent une alternative durable à ces préoccupations. Cependant, pour que les véhicules électriques deviennent une alternative viable et pratique aux véhicules traditionnels à essence ou diesel, ils ont besoin d'un système de stockage d'énergie hautement efficace et fiable. C'est là qu'interviennent les batteries Lithium-ions, qui ont une capacité de stockage d'énergie spécifique élevée, ce qui les rend aptes à alimenter les véhicules électriques sur des distances acceptables. Les progrès de la technologie des batteries Lithium-ions sont motivés par la pression croissante en faveur de la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la lutte contre le changement climatique, ainsi que par la nécessité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de se tourner vers des sources d'énergie plus durables. L'UE, par exemple, a fixé des objectifs de décarbonisation ambitieux à atteindre d'ici à 2050 grâce au contrat vert européen

et à la stratégie de l'UE pour l'intégration des systèmes énergétiques, qui comprend un objectif visant à porter la part des énergies renouvelables à 40 % d'ici à 2030. En outre, un système de gestion des batteries (*Battery Management System BMS*) joue un rôle crucial pour garantir la sécurité et la longévité des batteries. Le BMS surveille et contrôle les performances des batteries, en veillant à ce qu'elles fonctionnent dans les limites de sécurité et soient utilisées au maximum de leur potentiel. Dans l'ensemble, la demande croissante de solutions de stockage d'énergie et l'évolution vers les véhicules électriques entraînent le besoin d'une technologie de batterie lithium-ion plus efficace, sûre et plus fiable, et c'est sur ce point que l'industrie concentre ses efforts de recherche et de développement.

### **Objectifs scientifiques :**

Aujourd'hui, l'axe principal de progrès pour les applications électrifiées repose incontestablement sur le développement de systèmes de stockage d'énergie embarqués apportant des solutions pour améliorer l'autonomie, la durée de vie des batteries, le volume, la masse, le coût total de possession (TCO) et la sécurité. La batterie Li-ion est de loin la technologie la plus efficace en termes de puissance spécifique et d'énergie. Sa durée de vie est équivalente à celle des autres technologies. C'est pourquoi elle s'est énormément développée ces dernières années. L'un des principaux axes de la recherche actuelle dans le domaine des batteries est de développer un modèle de pronostic pour prédire l'état de charge (SoC), l'état de santé (SoH) et la durée de vie restante (RuL) des batteries lithium-ion dans les applications automobiles. Ceci est essentiel pour déterminer la durée de vie de la batterie et assurer une utilisation sûre et efficace. Le système BMS doit estimer le SoC et mesurer la température des cellules pour s'adapter aux conditions de fonctionnement. Cependant, la prédiction du SoC et du SoH des batteries Lithium-ions est difficile en raison des variations de fabrication intrinsèques et des mécanismes de vieillissement non linéaires. Il est important de noter que la surcharge (ou la surdécharge) peut causer des dommages permanents à la batterie, comme l'emballement thermique. En développant un modèle fiable et léger de la batterie, nous pouvons améliorer la performance globale, la sécurité et le TCO des batteries Lithium-ions utilisées dans les véhicules électriques et autres applications de traction.

Le cadre proposé dans cette thèse est basé sur la combinaison de la modélisation multiphysique et des modèles basés sur les données. Notre approche vise à combiner le meilleur des deux mondes : la précision des modèles multiphysiques, qui tiennent compte de divers phénomènes physiques tels que les processus thermiques, électrochimiques et mécaniques, et l'efficacité des modèles axés sur les données (dit d'apprentissage automatique), qui sont entraînés sur de grandes quantités de données et nécessitent des ressources informatiques importantes. L'objectif est de créer un modèle de batterie Lithium-ion capable de prédire avec précision le SoC, le SoH, ainsi que sa RUL, dans une large gamme de conditions de fonctionnement. L'un des principaux avantages de cette approche est qu'elle réduit la nécessité de disposer de nombreuses données expérimentales pour l'apprentissage du modèle et les études sur le vieillissement de la durée de vie. En utilisant un réseau adversarial génératif (*Generative Adversarial Network GAN*), un réseau neuronal est formé pour imiter le modèle multiphysique, ce qui permet de générer des données synthétiques qui peuvent être utilisées pour former le modèle axé données. Cela permet de développer et de valider le modèle de manière plus efficace et plus rentable. Un autre aspect important de cette approche est qu'elle prend en compte les légères variations entre les différentes cellules du pack. En étendant le modèle cellulaire à un modèle de pack, le modèle peut tenir compte de la distribution de ces variations et fournir des prédictions plus précises du SoC et du SoH de la batterie lithium-ion. La thèse suivra la méthodologie illustrée dans la figure 1.

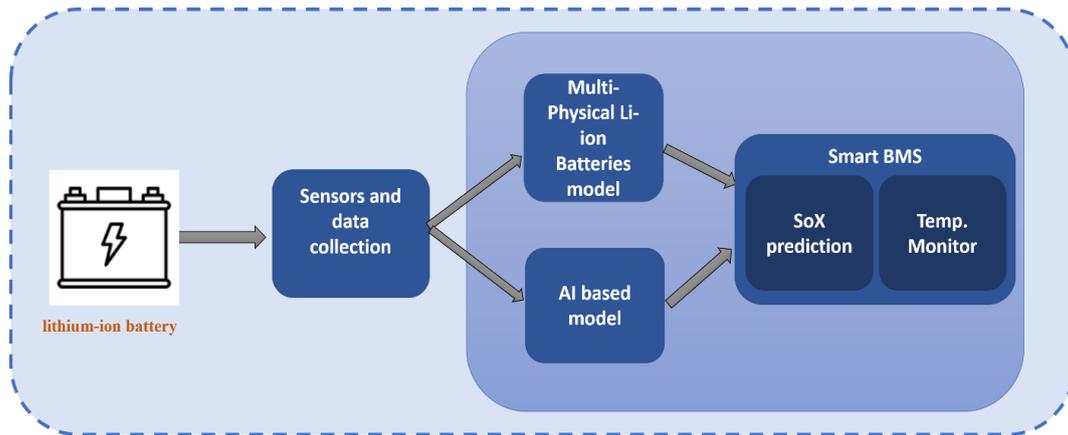


Figure 1: L'APPROCHE GLOBALE DU PROJET.

## Avancement des travaux

La thèse portera sur le développement d'un modèle multimodal pour les batteries Lithium-ions combinant des approches multiphysiques et des modèles d'apprentissage automatique. Le travail commencera par une revue complète de la littérature sur les applications des batteries lithium-ion dans les véhicules électriques, la modélisation multiphysique et les modèles orientés données. L'objectif de cette recherche est de comprendre les forces et les limites des deux approches de modélisation et d'identifier comment elles peuvent être combinées pour créer un modèle plus précis et plus efficace. Une fois l'analyse bibliographique terminée, l'étape suivante consistera à construire le modèle multimodal. Ce modèle combinera la précision des modèles multiphysiques, qui sont exigeants en termes de calcul, avec l'efficacité des modèles basés sur les données, qui peuvent manquer de précision. Un réseau neuronal sera entraîné à l'aide d'un réseau adversatif génératif afin de simplifier le processus de génération de données synthétiques. Le modèle développé sera initialement utilisé au niveau de la cellule, pour évaluer les performances et l'état de charge de la batterie pendant sa durée de vie. L'étape suivante consistera à étendre ce modèle au niveau du pack, en tenant compte des légères variations entre les différentes cellules du pack. Enfin, les résultats de cette modélisation seront utilisés pour évaluer le SoC et le RUL d'une batterie Li-ion tout au long de sa durée de vie. Ces informations seront cruciales pour comprendre les performances et la longévité de la batterie et aideront à la conception et au développement de batteries lithium-ion plus efficaces et plus fiables à l'avenir.

## Compétences du candidat :

**Connaissances spécifiques** : Connaissance des systèmes de batteries, Circuits électroniques, Programmation en Python /Matlab ou tout autres langages de programmation.

**Formation souhaitée** : Étudiant sur le point d'obtenir un Master ou un Ingénieur (Bac + 5) avec une spécialisation en Génie électrique, informatique et industriel.

**Compétences personnelles souhaitées** : Forte motivation pour l'innovation et la recherche de solutions opérationnelles dans un contexte industriel. Motivation pour la combinaison de la simulation et de l'expérimentation.

## References:

1. I.Jorge, T. Mesbahi, A. Samet, R. Boné, " Time Series Feature Extraction for Lithium-Ion Batteries State-Of-Health Prediction," Journal of Energy Storage, Volume 59, 2023, 106436, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106436>,
2. Y. Ghoulam, T. Mesbahi, P. Wilson, S. Durand, A. Lewis, C. Lallement, and C. Vagg. 2022. "Lithium-Ion Battery Parameter Identification for Hybrid and Electric Vehicles Using Drive Cycle Data" Energies 15, no. 11: 4005. <https://doi.org/10.3390/en15114005>,
3. T. Mesbahi, P. Bartholomeus, R. Bendala Sugranes, R. Bakri, " Coupled Electro-Thermal Modeling of Lithium-ion Batteries For Electric Vehicle Application," in Journal of Energy Storage-Elsevier, EST\_102260, 2020. Volume 35, 2021, 102260, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102260>.

4. T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, R. Sadoun, F. Khenfri and P. Le Moigne, "Dynamic Model of Li-Ion Batteries Incorporating Electrothermal and Ageing Aspects for Electric Vehicle Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 2, pp. 12981305, Feb. 2018, doi: [10.1109/TIE.2017.2714118](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2714118)
5. M. Ragone, V. Yurkiv, A. Ramasubramanian, B. Kashir, F. Mashayek, "Data driven estimation of electric vehicle battery state-of-charge informed by automotive simulations and multi-physics modeling", Journal of Power Sources, Volume 483, 2021, 229108, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229108>.
6. W. Guo, Z. Sun, S. Byg Vilsen, J. Meng, D. Ioan Stroe, "Review of "grey box" lifetime modeling for lithium-ion battery: Combining physics and data-driven methods", Journal of Energy Storage, Volume 56, Part A, 2022, 105992, ISSN 2352-152X <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105992>.
7. Z. -Y. Shui, X. -H. Li, Y. Feng, B. -C. Wang and Y. Wang, "Combining Reduced-Order Model With Data-Driven Model for Parameter Estimation of Lithium-Ion Battery," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 2, pp. 1521-1531, Feb. 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3157980.
8. Aykol, M., Gopal, C. B., Anapolsky, A., Herring, P. K., van Vlijmen, B., Berliner, M. D., ... & Storey, B. D. (2021). Perspective—combining physics and machine learning to predict battery lifetime. Journal of The Electrochemical Society, 168(3), 030525.
9. Cheng, Z., Tenny, K. M., Pizzolato, A., Forner-Cuenca, A., Verda, V., Chiang, Y. M., ... & Behrou, R. (2020). Data-driven electrode parameter identification for vanadium redox flow batteries through experimental and numerical methods. Applied Energy, 279, 115530.
10. Wang, B., Zhang, G., Wang, H., Xuan, J., & Jiao, K. (2020). Multi-physics-resolved digital twin of proton exchange membrane fuel cells with a data-driven surrogate model. Energy and AI, 1, 100004.