

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Modélisation de batteries intelligentes pour la réalisation d'un jumeau numérique prototype

FATEMEH TAEI<sup>1</sup>, MOHAMMED HAMZAOU<sup>2</sup>, NATHALIE JULIEN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>University of Bretagne Sud  
56100, France

Fatemeh.Taei@univ-ubs.fr

<sup>2</sup> University of Bretagne Sud  
56100, France

Mohammed.Hamzaoui@univ-ubs.fr

<sup>3</sup> University of Bretagne Sud  
56100, France

Nathalie.Julien@univ-ubs.fr

---

### *Résumé –*

Le Jumeau Numérique (JN) est l'une des principales tendances technologiques qui a attiré de nombreuses industries. La sécurité et la fiabilité des batteries lithium-ion est un problème critique aussi bien pour leur conception que leur exploitation afin de qualifier leur dégradation due au vieillissement. Le jumeau numérique offre un nouveau concept qui peut fournir une solution efficace pour évaluer la dégradation de la batterie lithium-ion car il fournit une solution efficace pour intégrer le système physique et le système numérique. Il reflète le comportement de l'équipement en construisant une représentation numérique virtuelle qui prend en charge la fiabilité, le temps réel et la stabilité. Dans ce papier, les démarches vers la digitalisation de batterie sont étudiées afin de donner une solution générique pour développer des jumeaux numériques de batterie.

### *Abstract –*

Digital Twin (DT) is one of the major technology trends that has attracted many industries. The safety and reliability of lithium-ion batteries is a critical issue for both their design and operation to qualify their degradation due to aging. The digital twin offers a new concept that can provide an effective solution to evaluate the degradation of the lithium-ion battery as it provides an efficient solution to integrate the physical system and the digital system. It reflects the behavior of the equipment by building a virtual digital representation that supports reliability, real time, and stability. In this paper, the steps towards battery digitization are studied to give a generic solution for developing digital battery twins.

*Mots clés –* Jumeau numérique, batterie, Modélisation, État de charge.

*Keywords –* Digital twins, Battery, Digital transformation.

---

## 1 INTRODUCTION

Depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle et l'avènement de l'Industrie 4.0, le monde connaît un changement fondamental dans la conception et l'utilisation des produits et moyens de production. Ce changement de paradigme ne concerne pas uniquement le secteur de l'industrie, mais aussi beaucoup d'autres domaines, tel que l'énergie, la logistique, le bâtiment, la santé, et cela dans le cadre de ce que l'on appelle communément la révolution digitale.

Les technologies phare qui servent de locomotive à cette révolution, sont celles qui permettent de capter de la donnée, de la traiter, d'en extraire de l'information, d'établir des modèles, ainsi que de fournir des services adaptés aux besoins et usages tels que : Internet of Things, Data mining, Intelligence Artificielle, et surtout le Jumeau Numérique.

En plus du secteur industriel qui connaît certainement la digitalisation la plus rapide grâce notamment au Smart Manufacturing, le domaine de l'énergie n'est pas en reste principalement du fait du développement des Smart Grids. Ces réseaux électriques intelligents qui permettent le recueil et la gestion de données entre les fournisseurs et les consommateurs afin d'ajuster le flux d'électricité en temps réel (Jixuan Zheng et al., 2013). Ces nouveaux systèmes intelligents permettent maintenant de mieux gérer un réseau électrique alimenté par des sources d'énergies intermittentes (énergie éolienne, énergie solaire, énergie marémotrice). Cependant, même si cette technologie permet d'outrepasser les contraintes liées au contrôle et pilotage de ce type d'énergie dans le réseau, la nécessité de disposer de ressources de stockage de cette énergie au sein du réseau reste primordiale.

C'est l'une des raisons qui poussent les industriels à développer des batteries de plus en plus perfectionnées, que ce soit au niveau de la capacité de stockage ou de leurs fonctionnalités (Li et al., 2018) (Wei et al., 2020) (Huang et al., 2021) (Geng et al., 2022). Afin de s'intégrer dans des structures intelligentes, les batteries doivent donc elles aussi comporter une composante intelligente ou du moins être capables de s'interfacer avec des systèmes de ce type.

S'il devait exister une technologie incontournable pour une intégration de tout objet physique (en l'occurrence la batterie) dans un processus de digitalisation globale, ça serait le « Jumeau Numérique ». Ce dernier permet non seulement de garder un flux digital tout au long du processus de conception et de validation du produit (ou de l'objet physique) en amont de sa production, mais également pendant la phase d'exploitation.

Disposer d'un jumeau numérique prototype qui est un ensemble de modèles permettant de mimer le comportement de l'objet physique avant l'existence (existence complète et exploitation) pour la conception, le développement, et l'utilisation d'une nouvelle génération de batteries, ne peut que fournir un avantage compétitif considérable. Alors que le modèle de simulation n'est pas directement relié à l'objet qu'il simule, le JN prototype est une modélisation intermédiaire conçue pour évoluer en un JN instance qui sera, lui, connecté à l'objet physique et le suivra durant son cycle de vie en garantissant la continuité numérique. Ceci offre la possibilité de valider et d'améliorer les différentes versions du produit avant sa fabrication et mise sur le marché, mais également d'améliorer ses performances et d'optimiser son fonctionnement en exploitation, en plus d'avoir un feedback et de disposer d'une continuité numérique permettant le perfectionnement du produit pour les versions futures. C'est

par ailleurs dans l'objectif d'investiguer la faisabilité d'une telle démarche que nous avons conduit l'étude dont fait l'objet ce papier.

## 2 ETAT DE L'ART :

### 2.1 Le jumeau numérique :

Le jumeau numérique est devenu un sujet de recherche populaire ces dernières années en raison de son potentiel pour améliorer la prise de décision dans de nombreux secteurs, tels que la production industrielle, la construction, la maintenance et la planification urbaine.

Le jumeau numérique est utilisé dans l'industrie pour simuler des processus de production et améliorer l'efficacité, notamment pour la surveillance en temps réel ; le contrôle de la production ; la prédiction de la performance des pièces ; la collaboration et l'interaction homme-robot ; l'évaluation et l'optimisation des processus ; la gestion des actifs ; la planification de la production (Liu et al., 2021). On le trouve également dans le domaine de la construction et du développement des villes intelligentes (Kaewunruen et al., 2018) (Lu et al., 2020) (White et al., 2021) (Shahat et al., 2021). Par ailleurs, même des applications liées à la logistique et le transport (S. Wang et al., 2021), l'énergie (Saad et al., 2020), voire la santé (Erol et al., 2020), voient de plus en plus l'apparition d'outils basés sur des technologies de jumeau numérique.

D'autres travaux se sont intéressés à des problématiques en lien avec la définition des concepts et la proposition de formalismes qui permettent à cette technologie d'être mieux appréhendée étant donnée son utilisation grandissante et la diversité des domaines d'application. (Tao et al., 2019) ont proposé l'un des modèles les plus robustes de la littérature, permettant de définir un jumeau numérique comme une entité composée de 5 dimensions distinctes (Physical Element, Virtual Element, Data, Services, Connexions). (Julien & Martin, 2021) ont quant à eux proposé une typologie composée de 11 éléments, permettant de dresser le profil du jumeau numérique à développer dans les premières étapes de ce processus, ceci a été validé par la suite par (Blanchet et al., 2022) sur des applications de maintenance. Quant aux interactions que cette technologie pourrait avoir avec son environnement, (Hamzaoui & Julien, 2022) se sont penchés sur les différents environnements avec lesquels le JN viendrait à interagir, ainsi que les effets que cela pourrait avoir sur son évolution en exploitation. Alors que (Kamoise et al., 2022) se sont focalisés sur les aspects humains de cette interaction.

De leur côté, (Julien & Hamzaoui, 2022) se sont plutôt intéressés aux modes d'utilisation de cette technologie du point de vue de la précision et complexité des modèles ainsi que de celui du taux de synchronisation, cela en fonction des besoins et usages. Bien que le jumeau numérique soit considéré comme un outil puissant pour améliorer la prise de décision, il existe encore des défis à surmonter pour en tirer le meilleur parti. Un défi clé est la réconciliation de la précision des données utilisées pour créer le jumeau numérique avec la quantité de données disponibles (Yu et al., 2022). En outre, il est nécessaire de développer des méthodes pour gérer les données en temps réel et s'assurer de leur qualité. Enfin, il est important de développer des solutions pour intégrer les jumeaux numériques dans les systèmes existants de manière transparente et efficace (Qian et al., 2022).

## 2.2 La batterie au lithium :

L'état de l'art de la conception et du développement de nouvelles batteries au lithium a fait l'objet d'une grande quantité de recherche ces dernières années, en raison de la croissance rapide de l'industrie des technologies portables et électriques. Les batteries au lithium sont considérées comme les plus prometteuses pour les applications mobiles et les véhicules électriques en raison de leur densité d'énergie élevée et de leur faible coût.

La première étape de la conception de nouvelles batteries au lithium est d'optimiser le matériau anode. Les matériaux anodes classiques utilisés pour les batteries au lithium comprennent le graphite et les composites de graphite, mais ces matériaux ont des limitations en termes de densité d'énergie et de stabilité (C. Wang et al., 2022). Les nouveaux matériaux anodes en développement incluent les métaux tels que le lithium métallique, le silicium et les alliages de silicium (Sun & Peng, 2021).

La deuxième étape de la conception de nouvelles batteries au lithium est d'optimiser le matériau cathode. Les matériaux cathodes classiques utilisés pour les batteries au lithium comprennent les oxydes de lithium, tels que le  $\text{LiCoO}_2$  et le  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , mais ces matériaux ont également des limitations en termes de densité d'énergie et de durabilité (Shen et al., 2021). Les nouveaux matériaux cathodes en développement incluent les sulfures de lithium et les phosphates de lithium (Vernardou, 2022).

Enfin, il est important de développer de nouveaux électrolytes pour améliorer la stabilité et la durabilité des batteries au lithium. Les électrolytes classiques utilisés pour les batteries au lithium comprennent les solvants organiques tels que l'acétonitrile et le propylène carbonate, mais ces solvants présentent des limitations en termes de sécurité et de stabilité (Niu et al., 2021). Les nouveaux électrolytes en développement incluent les électrolytes solides et les membranes de protection (Xu et al., 2022).

Cependant, notre partenaire dans cette étude (l'entreprise Otonohm), vise à développer une batterie nouvelle génération, qui soit innovante non pas du point de vue des matériaux utilisés, mais plutôt du point de vue de l'architecture interne même de cette dernière. De ce fait, la possession d'un Jumeau Numérique Prototype permettrait de disposer de modèles offrant la possibilité d'appréhender la conduite de l'objet physique, de simuler son comportement, ainsi que d'évaluer ses performances futures suivant différents scénarios et modes de fonctionnement. De plus, ce jumeau prototype, pourra être amené à évoluer en un jumeau instance, qui pourra être utilisé lors de l'exploitation de la batterie chez le client afin de fournir des services encore plus avancés.

Dans ce papier nous présentons l'essentiel du travail que nous avons mené dans cette optique-là. Dans ce qui va suivre, nous présenterons la batterie en cours de développement chez notre partenaire, les différents tests effectués sur cette dernière, ainsi que les différents modèles développés servant de base d'appui du jumeau numérique.

## 3 ÉTUDE DE CAS :

### 3.1. Technologie d'Otonohm

OTONOHM est une société d'ingénierie qui développe des solutions innovantes pour des batteries lithium. Elle dispose d'une technologie de rupture, le BMS commuté, dont le but est

la minimisation des pertes dans la chaîne d'alimentation. Les batteries traditionnelles utilisent une architecture série/parallèle où toutes les cellules de la batterie sont déjà connectées dans le circuit, alors que dans la technologie de BMS commuté, les cellules ne sont pas connectées en configuration série/parallèle, mais sont isolées individuellement et sont mises en série/parallèle au moyen d'interrupteurs en fonction des commandes de contrôle fournies par les microcontrôleurs. Actuellement, cette technologie permet aux batteries de délivrer tout type de signaux et de tensions en ajoutant ou en supprimant les cellules en série sans utiliser de convertisseur ou d'onduleur. Dans cette étude nous avons choisi l'un des prototypes d'Otonohm pour déployer le jumeau numérique.

### 3.2. Pack batterie 48V

Un pack batterie de 48V a été développé avec un carte esclave divisée en 4 blocs esclaves chacun composé de 4 cellules Sony VTC6 (Figure 1). Il existe également un bloc pour l'alimentation et un bloc master. Le pack est capable de charger et décharger en 48V. La tension de cellules varie entre 4,1V et 2,8V. Pour avoir la possibilité de gestion intelligente de la batterie et d'optimiser sa fonctionnalité, nous avons étudié le déploiement d'un jumeau numérique du pack.



Figure 1. Le pack 48V avec 16 cellules

### 3.3. La modélisation de batterie

L'une des étapes principales pour un jumeau numérique est d'avoir un modèle qui correspond bien à son objet physique. La stratégie adoptée ici est de modéliser d'abord la cellule et ensuite construire un modèle du pack à l'aide de MATLAB/Simulink. Il existe une grande variété de modèles de cellules, qui ont été développés avec des complexités différentes pouvant être utilisés dans divers domaines d'application. Un facteur important dans la modélisation d'une cellule est l'estimation des paramètres. Différentes stratégies de modélisation pour extraire les paramètres de la batterie sont électrochimiques, mathématiques, orientées circuit et pilotées par les données. Dans les applications du monde réel, les modèles de batterie sont utilisés pour prédire la tension de fonctionnement, la puissance et la capacité énergétique afin de garantir des performances et une sécurité fiable. Les modèles de batterie sont essentiels au développement d'algorithmes précis pour l'estimation de l'état de la batterie, tels que l'état de santé (SOH) et l'état de charge (SOC). Considérant l'objectif de recherche et l'application, le modèle ECM (Equivalent Circuit Model) a été choisi.

### 3.3.1. Le modèle ECM

A l'heure actuelle, le modèle de circuit équivalent (ECM) est largement utilisé en raison de sa simplicité. Dans le cas d'un pack de batteries commuté, une nouvelle étude visant à modéliser la fonctionnalité du pack, où toutes les cellules ne sont pas toujours connectées dans le circuit est proposée. L'objectif est de vérifier si le modèle de circuit équivalent (ECM) convient à cette nouvelle technologie. Cette approche est novatrice car les études précédentes ont généralement supposé que toutes les cellules d'un pack de batteries soient toujours connectées, ce qui peut entraîner une incertitude quant à la précision du modèle ECM dans ce nouveau contexte. Lors de la modélisation du comportement dynamique d'une cellule, la précision et la complexité sont deux facteurs importants. L'ECM satisfait efficacement ces deux facteurs. L'ECM utilise différentes combinaisons de composants électriques tels que la résistance, la capacité, la source de tension pour simuler les caractéristiques de charge et de décharge des cellules lithium-ion. Le modèle est simple mais représente très précisément la non-linéarité de la cellule. Le modèle est composé d'une résistance  $R_0$  et des résistances  $R_n$  chacune en parallèle avec une capacité  $C_n$ . La précision du modèle n-RC augmente avec le nombre de résistances et des capacités en parallèle (Lai et al, 2018) (He et al, 2011). Cependant, la précision du modèle avec 2 résistances-capacités en parallèle est suffisante compte tenu de la précision et de la complexité du modèle qui augmente très grandement lorsque le nombre de résistances-capacités en parallèle augmente (Lai et al, 2019) (Figure 2). Dans cet article, le modèle 2-RC est finalement choisi comme modèle de circuit équivalent de batterie.

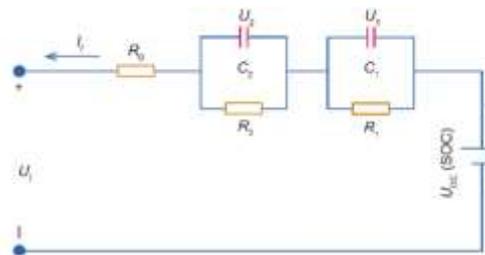


Figure 2. Modèle de circuit équivalent 2-RC

Dans le modèle de circuit,  $U_{oc}$  représente la tension en circuit ouvert ;  $R_0$  est la résistance interne de la cellule ; les circuits  $R_1$  et  $C_1$  sont utilisés pour simuler le processus de montée rapide de la tension de la cellule ; les circuits  $R_2$  et  $C_2$  sont utilisés pour simuler le processus de stabilisation lente de la tension ;  $R_1$  et  $R_2$  sont les résistances internes polarisées de la cellule, et  $C_1$  et  $C_2$  sont les capacités polarisées de la cellule. Dans ce modèle, l'état stable et les caractéristiques transitoires de la cellule peuvent être mieux simulés par les deux circuits RC (Johnson, 2002).

### 3.4. Protocole expérimental

Afin de capturer les caractéristiques dynamiques de la cellule avec précision, un test a été réalisé. Le test est divisé en trois étapes : (1) Test capacité, (2) Test SOC-OCV et (3) Test "Hybrid Pulse Power Characterization" (HPPC) (Figure 4).



Figure 3. Les tests sur les 4 cellules de Sony VTC6

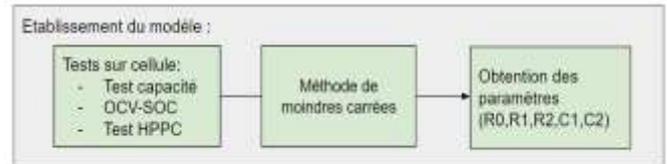


Figure 4. Le protocole expérimental attention moindres carrés

#### 3.4.1. Test Capacité

Ce test mesure la capacité des cellules en ampères-heures en utilisant un courant constant égal à 1C. La décharge se termine sur une limite de tension de décharge spécifiée par le fabricant. Le taux d'une heure (1C) est utilisé comme une référence pour la mesure de la capacité statique et comme « standard » pour les étapes suivantes du test. La mesure de la capacité est effectuée pour confirmer la capacité nominale de la cellule et d'assurer que le courant 1C est précis. Pour réaliser ces tests, les cellules ont été mises dans une chambre environnementale à 25°C pendant 2h, et après elles ont été chargées en courant constant (CC) à 1C jusqu'à 4,2V puis la tension est maintenue constante (CV) jusqu'à un courant égal à  $C/10$ . Ensuite, elles ont été déchargées en CC à 1C jusqu'à 2,5V. Entre chaque étape une pause de 30 minutes a été réalisée (Figure 5).

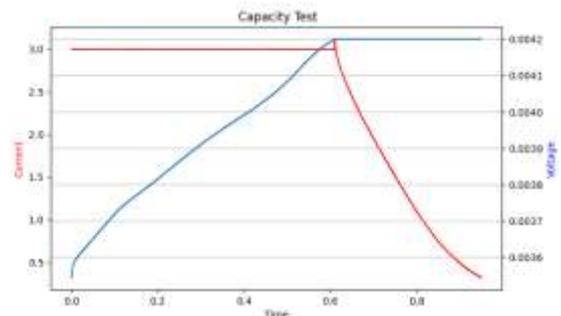


Figure 5. Le test de capacité

#### 3.4.2. Test OCV-SOC

La caractérisation de la tension en circuit ouvert (OCV pour l'anglais "Open circuit voltage") revient à déterminer expérimentalement sa corrélation avec l'état de charge. Pour mesurer l'OCV une méthode consiste à décharger la cellule initialement chargée avec un courant très faible par rapport à sa capacité jusqu'à 0%. Comme la cellule peut être considérée

en état quasi stationnaire pendant la sollicitation à un faible courant, sa tension pendant la sollicitation peut donc être considérée comme l'OCV. Dans cette étude le test a été réalisé à 25°C. Pour cela une décharge a été faite en CC à C/25 jusqu'à 2,5V et après une charge a été réalisée en CC à C/25 jusqu'à 4,2V puis CV jusqu'à un courant égal à C/250. Entre chaque étape une pause de 30 minutes a été réalisée (Figure 6).

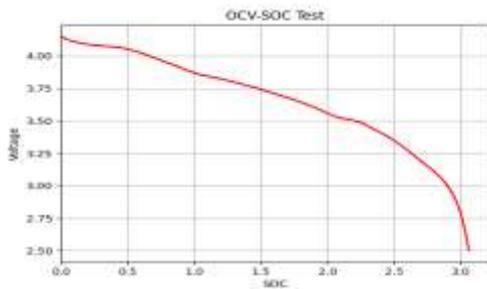


Figure 6. Le test OCV-SOC

### 3.4.3. Test HPPC

Protocole expérimental de test HPPC a été proposé dans des normes internationales. Il s'agit d'appliquer un train d'impulsions de courant en charge et en décharge puis mesurer la réponse en tension, les paramètres du modèle peuvent être extraits. Dans l'objectif d'établir les paramètres du circuit électrique équivalent, il faut balayer toute la plage du SOC. Les impulsions doivent être appliquées en charge et en décharge afin d'étudier l'effet du sens de courant sur l'évolution des paramètres. Et finalement, le test entier est à répéter à différentes températures en vue de l'intégration de son effet sur le comportement de la batterie. Dans cette étude nous avons fait le test à 25°C (Figure 7).

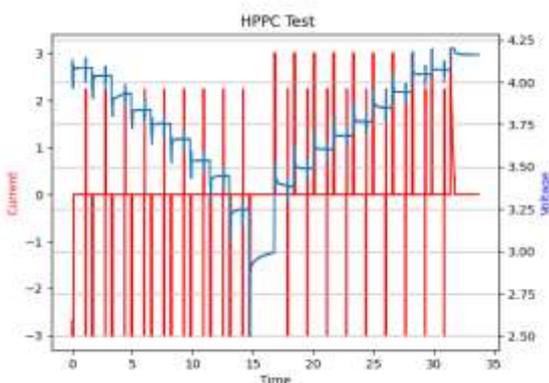


Figure 7. Le Test HPPC

### 3.4.4. Le modèle de cellule

Les tests réalisés permettent de retrouver les paramètres de la cellule ainsi que de modéliser la cellule. La Figure 8 montre le modèle de cellule sur Simulink. Dans ce modèle de circuit équivalent, la tension est la sortie, et le courant est l'entrée, tandis que OCV, R0, R1, C1, R2 et C2 sont les paramètres du modèle et sont en fonction du SOC de la cellule.

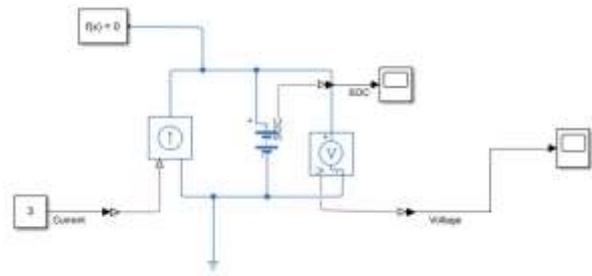


Figure 8. Le modèle de cellule

### 3.4.5. Le modèle de Pack

Grâce au modèle de cellule, le bloc composé de 4 cellules a été construit (Figure 9). Une fois que le modèle de bloc est complet, le modèle du pack avec les 4 blocs connectés est construit.

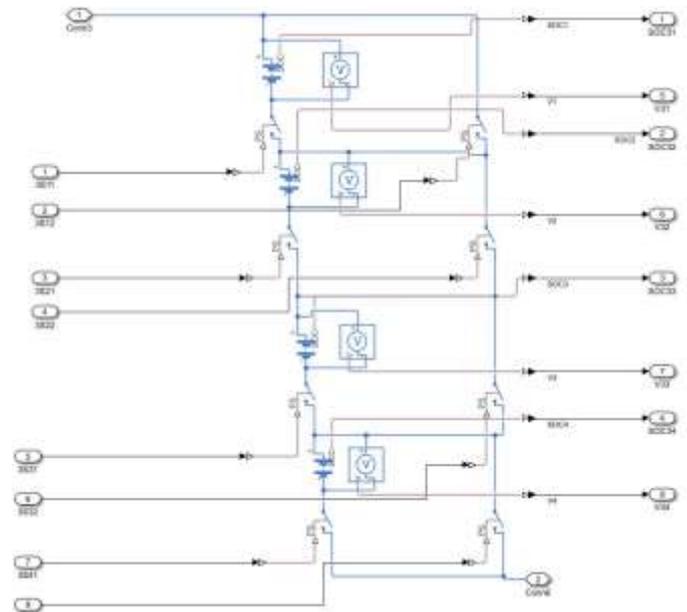


Figure 9. Le modèle de bloc

## 4. RESULTATS

Pour tenter de valider les modèles, deux comparaisons ont été faites. Premièrement, le modèle de la cellule a été comparé aux résultats du test de validation. Ensuite, le modèle de pack a été comparé au résultat du cyclage du pack 48V.

### 4.1.1. Expériences de validation de modèle de la cellule

Afin de valider les modèles, des cellules complètement chargées ont été déchargées à 1C pendant 5 minutes puis elles ont été mises au repos pendant 30 minutes. Cette étape a été répétée 3 fois. Ensuite elles ont été déchargées avec un courant égal à 1C jusqu'à 2.5V. Les données expérimentales de courant ont été utilisées comme entrée pour le modèle de cellule, et la tension du modèle a ensuite été calculée comme la sortie à l'aide de MATLAB/Simulink. La tension prédite à partir de modèle était alors comparée à la tension expérimentale pour

évaluer la performance du modèle (Figure 10).

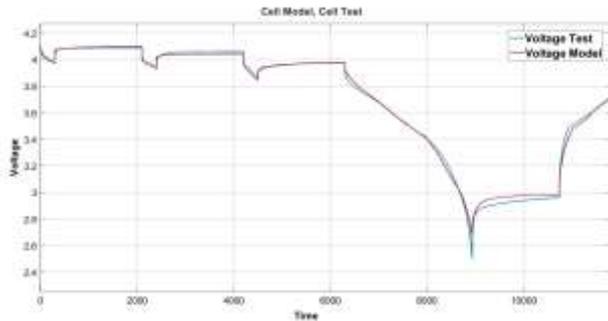


Figure 10. Test de validation du modèle de cellule

Il est possible d'affirmer que le modèle de cellule a relativement bien fonctionné pour prédire la tension, étant donné que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est relativement faible, à 0.0252V. Cependant, il est important de noter que même une petite erreur peut avoir un impact significatif sur la performance du système. Ce modèle de cellule a été utilisé pour construire le modèle du pack 48V.

#### 4.1.2. Expériences de validation de modèle du pack

Concernant l'architecture du pack batterie, le modèle du pack a été élaboré sur Simulink. Pour vérifier le modèle du pack un test de validation a été réalisé en utilisant le pack 48V (Figure 11s). Le test consistait en un cyclage du pack. La commutation des cellules se faisait toutes les 30 ms. Cela signifie que toutes les 30 ms, le logiciel trie les cellules par tension. Si le pack est chargé, le logiciel déconnecte les trois cellules ayant la tension la plus élevée, si le pack est en décharge, le logiciel déconnecte les trois cellules ayant la tension la plus basse. Ainsi, à tout moment, seules 13 cellules sont connectées, et 3 cellules sont mises de côté. Le test a été réalisé dans une chambre d'essai avec une température ambiante contrôlée de 25°C. Pour charger le pack, un courant constant de 3A (équivalent à une charge de 1C) a été appliqué et pour décharger le pack, un courant constant de 10A a été appliqué. Pour comparer avec le modèle réalisé sur MATLAB, uniquement les trois premiers cycles ont été utilisés car le modèle ne prend pas en compte le vieillissement des cellules.

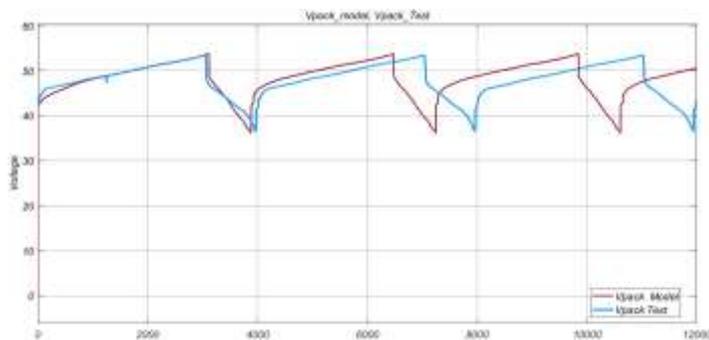


Figure 11. Test de validation du modèle du pack

Le résultat montre qu'il y a une différence entre la tension sortie du vrai pack et la tension sortie du modèle. Il y a des raisons qui peuvent expliquer cette différence.

1. Notre modèle ne prend pas en compte la température interne des cellules qui peut varier à cause de leur résistance interne et qui provoque des changements dans la tension des cellules.
2. Les composants utilisés dans le vrai pack tels que transistor MOSFET (meta-oxide-semiconductor field-effect transistor) ou les amplificateurs opérationnels n'ont pas été modélisés sur Simulink due à la complexité nécessaire à la simulation de ces composants.
3. La tension de la cellule modélisée n'est pas une représentation parfaite et l'erreur cumulée des 16 cellules dans le modèle font qu'il y a une erreur plus prononcée dans le modèle du pack.

## 5. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons traité d'une problématique d'actualité, qui est le développement de batteries lithium-ion nouvelle génération, technologie importante de la transition écologique. Cela, en utilisant une technologie tout aussi d'actualité, qui est le Jumeau Numérique (JN). À travers un jumeau numérique de type « prototype » nous avons pu modéliser notre objet physique d'intérêt (la batterie), cela en vue de procéder à des simulations diverses, permettant d'appréhender au mieux le comportement de cette technologie avant de passer à sa fabrication physique.

Par ailleurs, bien que ce modèle soit relativement précis, il ne représente pas complètement le fonctionnement du pack réel, il est donc nécessaire de continuer à améliorer sa précision et sa fiabilité. Pour ce faire, nous visons à agir conjointement sur les modèles et sur les données, d'une part en utilisant d'autres modèles plus précis ou d'autres approches de modélisations (modèle physico-chimique, des modèles issus de l'apprentissage automatique), et d'autre part en alimentant le jumeau numérique avec de nouveaux tests, et de nouveaux jeux de données.

Enfin, une fois les premières versions physiques de la batterie fabriquées, il sera question de faire évoluer ce jumeau numérique « prototype » en un jumeau numérique « instance », en mettant en place des mécanismes de communication bidirectionnelle entre le jumeau numérique et sa contrepartie physique (la batterie) afin d'assurer un certain niveau de synchronisation. Cela permettra au JN de proposer des services variés en fonction de l'usage que sera fait de la batterie en exploitation.

## 6. REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier, pour l'aide et les informations qu'ils m'ont généreusement apporté l'équipe d'ingénieur d'Otonohm.

## 7. REFERENCES

- Blanchet, A., Julien, N., & Hamzaoui, M. A. (2022). *Typology as a Deployment Tool for Digital Twins: Application to Maintenance in Industry*. 8.
- Erol, T., Mendi, A. F., & Dogan, D. (2020). The Digital Twin Revolution in Healthcare. *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.925524>.
- Geng, Y., Pan, L., Peng, Z., Sun, Z., Lin, H., Mao, C., Wang, L., Dai, L., Liu, H., Pan, K., Wu, X., Zhang, Q., & He, Z. (2022). Electrolyte additive engineering for aqueous Zn ion batteries. *Energy Storage Materials*, 51, 733–755. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.07.017>
- Hamzaoui, M. A., & Julien, N. (2022). *Social Cyber-Physical Systems and Digital Twins Networks: A perspective about the future digital twin ecosystems*. 6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.006>
- He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *energies*, 4(4), 582–598.
- Huang, S., Huixiang, E., Yang, Y., Zhang, Y., Ye, M., & Li, C. C. (2021). Transition metal phosphides: New generation cathode host/separators modifier for Li-S batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(12), 7458–7480. <https://doi.org/10.1039/D0TA11919A>.
- Jixuan Zheng, Gao, D. W., & Li Lin. (2013). Smart Meters in Smart Grid: An Overview. *2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 57–64. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2013.17>
- Johnson, V. H. (2002). Battery performance models in ADVISOR. *Journal of power sources*, 110(2), 321–329.
- Julien, N., & Hamzaoui, M. A. (2022). *Integrating Lean Data and Digital Sobriety in Digital Twins through Dynamic Accuracy Management*. 12.
- Julien, N., & Martin, E. (2021). *Typology of Manufacturing Digital Twins: A First Step Towards a Deployment Methodology*. 12.
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P., & Welsh, J. (2018). A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings. *Sustainability*, 11(1), 159. <https://doi.org/10.3390/su11010159>.
- Kamoise, N., Guerin, C., Hamzaoui, M., & Julien, N. (2022). *Using Cognitive Work Analysis to deploy collaborative digital twin*. 6.
- Lai, X., Zheng, Y., & Sun, T. (2018). A comparative study of different equivalent circuit models for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 259, 566–577.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Lu, Q., Parlikad, A. K., Woodall, P., Don Ranasinghe, G., Xie, X., Liang, Z., Konstantinou, E., Heaton, J., & Schooling, J. (2020). Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. *Journal of Management in Engineering*, 36(3), 05020004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763).
- Niu, H., Wang, L., Guan, P., Zhang, N., Yan, C., Ding, M., Guo, X., Huang, T., & Hu, X. (2021). Recent Advances in Application of Ionic Liquids in Electrolyte of Lithium-Ion Batteries. *Journal of Energy Storage*, 40, 102659. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102659>
- Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F., & Yu, W. (2022). Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions. *Future Internet*, 14(2), 64. <https://doi.org/10.3390/fi14020064>
- Saad, A., Faddel, S., & Mohammed, O. (2020). IoT-Based Digital Twin for Energy Cyber-Physical Systems: Design and Implementation. *Energies*, 13(18), 4762. <https://doi.org/10.3390/en13184762>
- Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability*, 13(6), 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>
- Shen, X., Zhang, X.-Q., Ding, F., Huang, J.-Q., Xu, R., Chen, X., Yan, C., Su, F.-Y., Chen, C.-M., Liu, X., & Zhang, Q. (2021). Advanced Electrode Materials in Lithium Batteries: Retrospect and Prospect. *Energy Material Advances*, 2021, 2021/1205324. <https://doi.org/10.34133/2021/1205324>.
- Sun, K., & Peng, Z. (2021). Intermetallic interphases in lithium metal and lithium-ion batteries. *InfoMat*, 3(10), 1083–1109. <https://doi.org/10.1002/inf2.12216>
- Tao, F., Zhang, M., & Nee, A. Y. C. (2019). *Digital twin driven smart manufacturing*. Academic press.
- Vernardou, D. (2022). Recent Report on the Hydrothermal Growth of LiFePO<sub>4</sub> as a Cathode Material. *Coatings*, 12(10), 1543. <https://doi.org/10.3390/coatings12101543>
- Wang, C., Yang, C., & Zheng, Z. (2022). Toward Practical High-Energy and High-Power Lithium Battery Anodes: Present and Future. *Advanced Science*, 9(9), 2105213. <https://doi.org/10.1002/advs.202105213>
- Wang, S., Zhang, F., & Qin, T. (2021). Research on the Construction of Highway Traffic Digital Twin System Based on 3D GIS Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1802(4), 042045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1802/4/042045>
- Wei, J.-S., Song, T.-B., Zhang, P., Niu, X.-Q., Chen, X.-B., & Xiong, H.-M. (2020). A new generation of energy storage electrode materials constructed from carbon dots. *Materials Chemistry Frontiers*, 4(3), 729–749. <https://doi.org/10.1039/C9QM00554D>
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>
- Xu, J., Li, Y., Lu, P., Yan, W., Yang, M., Li, H., Chen, L., & Wu, F. (2022). Water-Stable Sulfide Solid Electrolyte Membranes Directly Applicable in All-Solid-State Batteries Enabled by Superhydrophobic Li+-Conducting Protection Layer. *Advanced Energy Materials*, 12(2), 2102348. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102348>
- Yu, J., Liu, P., & Li, Z. (2022). Data reconciliation-based simulation of thermal power plants for performance estimation and digital twin development. *Computers & Chemical Engineering*, 168, 108063. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.1080>