

Plateforme de dimensionnement d'une source hybride de type Batterie Li-ion / Supercondensateurs

Théophile PAUL¹, Tedjani MESBAHI¹, Sylvain DURAND¹, Damien FLIELLER¹, Wilfried UHRING²

¹ICube (UMR CNRS 7357), INSA Strasbourg, France

²ICube (UMR CNRS 7357), Université de Strasbourg, France

RESUME- La batterie Li-ion est le maillon faible des voitures électriques. Elle est la principale raison du manque d'autonomie. Cela peut s'expliquer en partie par les profils de puissance demandés par les véhicules routiers qui ne sont pas adaptés aux batteries utilisées. Une des idées pour résoudre ce problème est l'utilisation d'une deuxième source d'énergie : les supercondensateurs. Ainsi l'apport d'une deuxième source d'énergie permet d'assister la batterie en puissance et d'en améliorer sa durée de vie. Ce papier présente une plateforme de dimensionnement d'une source hybride batterie li-ion / supercondensateurs. Un exemple de dimensionnement est donné pour une Renault Zoé en utilisant le cycle de conduite WLTC.

Mots-clés—source hybride, batterie Li-ion, supercondensateurs, dimensionnement, cycle de conduite WLTC.

1. INTRODUCTION

Suite aux récentes contraintes écologiques et économiques, les constructeurs automobiles tendent peu à peu à abandonner les voitures thermiques au profit des voitures électriques. Ces dernières ne polluent pas à l'utilisation mais ne font pas encore l'unanimité chez les acheteurs en raison de leur trop faible autonomie [1]. A cela s'ajoute, les temps de recharge, la diminution des performances à faible température et le prix. La cause principale est la source d'énergie utilisée : la batterie Li-ion haute puissance qui n'est pas adaptée au profil de puissance demandé par les véhicules routiers [2]. Une des idées est alors d'utiliser des supercondensateurs (SC) pour assister des batteries li-ion hautes énergies et ainsi limiter les pics de courant et par conséquent les pics de chaleurs, responsables de l'accélération du vieillissement des batteries [3][4][5][6]. L'hybridation permet donc l'utilisation de deux sources d'énergies plus adaptées au profil de charge et permet de soulager les contraintes sur les batteries et donc d'améliorer leur durée de vie et leur coût global de possession (*Total Cost of Ownership*) [7].

Ce papier présente une plateforme d'aide au dimensionnement d'une source hybride batterie supercondensateurs. Un exemple est donné mettant en œuvre une Renault Zoé dimensionné pour une autonomie de 140km avec le cycle *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle* (WLTC) [8]. L'algorithme proposé permet d'obtenir le nombre de cellules de batteries et de supercondensateurs en série et en parallèle. On peut alors estimer le poids, le volume et le coût de la source hybride [9]. Il existe de nombreux algorithmes de dimensionnement plus ou moins complexe basé sur des calculs d'optimisation [10][11][12][13]. [14] et [15] seront utilisés car ils proposent des calculs simplifiés facilement implémentables dans un logiciel tout usage.

La suite de ce papier introduit en Section 2 les équations de dimensionnement, Section 3 décrit les plateformes développées et Section 4 présente les résultats de ce dernier. Le papier se termine sur une conclusion et sur les prochains travaux envisagés.

2. DIMENSIONNEMENT

La topologie de notre source hybride est une architecture à un convertisseur au niveau des supercondensateurs (Fig. 1). L'avantage de cette topologie est principalement sa fiabilité. De plus, le simplicité et le faible nombre de composants permettent une réduction du coût, de masse et de volume [2]. Le convertisseur utilisé est un convertisseur DC/DC Boost bidirectionnel en courant.

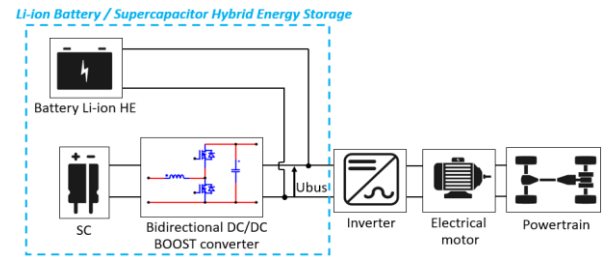


Figure 1: Architecture de la source hybride

2.1. Puissance de la mission

La première étape est de convertir un cycle de conduite en un cycle de puissance grâce aux équations (1-3) liées à la dynamique du véhicule choisi. Il existe différents types de cycle de conduite généralement utilisés pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre des véhicules thermiques. Dans le cas d'un véhicule électrique, ces cycles sont utilisés pour fixer l'autonomie d'un véhicule. Ils sont alors répétés un certain nombre de fois pour correspondre à l'autonomie souhaitée. Pour notre étude nous utiliserons le cycle WLTC, nouveau cycle de conduite entrée en vigueur en Europe en 2018 [8]. Nous choisirons un véhicule dont les paramètres sont similaires à ceux d'une Renault Zoé (Tableau 1).

$$\begin{cases} F_{aero} = 0.5 * \rho * s * C_x * V_{VEH}^2 \\ F_{wheel} = m * g * (C_0 + C_1 * V_{VEH}^2) \\ F_{gx} = m * g * \sin(\alpha) \\ F_{acc} = m * \frac{\partial V_{VEH}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_T = F_{aero} + F_{wheel} + F_{gx} + F_{acc} \quad (2)$$

$$Pv = F_T * V_{VEH} \quad (3)$$

Tableau 1. Paramètre du véhicule [16]

m	Masse du véhicule (kg)	1175
s	Surface frontale (m ²)	2.7
ρ	Densité de l'air (kg/m ³)	1.2
Cx	Coefficient de pénétration dans l'air	0.29
C0	Coefficient de résistance à l'état statique	0.008
C1	Coefficient de résistance à l'état dynamique (s ² /m ²)	1.6*10 ⁻⁶
α	Angle d'inclinaison (%)	2.5

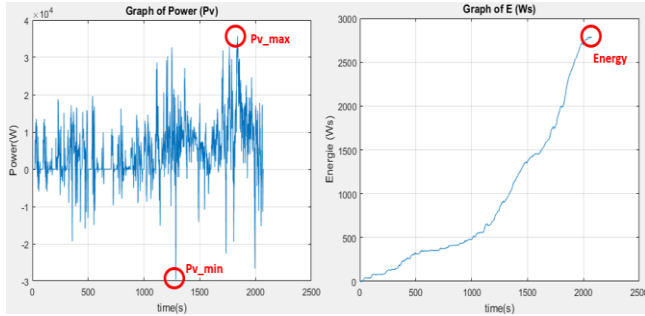


Figure 2: Profil de puissance (gauche) et d'énergie (droite)

2.2. Dimensionnement de la batterie

Dans un premier temps le nombre de cellules de batteries doit être estimé pour assurer l'autonomie du véhicule. Pour ce faire, E_{vcons} est déterminé comme étant l'intégrale de Pv et se trouve être le point « Energy » de la Figure 2. L'énergie de la batterie peut être calculé à l'aide de l'équation (4), avec un DOD (Depth of Discharge) de 80% pour limiter le vieillissement de la batterie [17], E_{elB} l'énergie d'une cellule de batterie, N_{sb} et N_{pb} , le nombre de cellule en série et en parallèle:

$$E_{bat} = N_{sb} * N_{pb} * E_{elB} * DOD \quad (4)$$

Les pertes de la batterie $Loss_B$ peuvent être déterminées grâce aux équations (5-8), avec R_{0elb} la résistance d'une cellule de batterie et U_{bus} la tension du bus continu.

$$Loss_B = \frac{N_{sb}}{N_{pb}} * R_{0elb} * \int_0^t I_{bat}^2 dt \quad (5)$$

$$I_{bat} = \frac{Pv}{U_{bus}} \quad (6)$$

$$Loss_B = \frac{N_{sb}}{N_{pb}} * \frac{R_{0elb}}{U_{bus}^2} * E_L \quad (7)$$

$$E_L = \int_0^t P_v^2 dt \quad (8)$$

Pour finir, la variable ΔE_V est calculée (9). Elle correspond aux pertes d'énergie liées au poids additionnel de la batterie qui n'est pas initialement pris en compte dans le calcul de E_{bat} . En effet, le poids de la batterie n'est pas négligeable et modifie significativement la dynamique du véhicule. La variable ∂E_{vcons} est déterminée en faisant augmenter linéairement le poids du véhicule et en relevant E_{vcons} [14]. Ensuite, en calculant la pente de cette fonction, on obtient cette variable qui correspond à la variation d'énergie de la batterie en fonction du

poids. Une majoration de 40% est ajoutée au poids de la batterie pour prendre en compte le packaging et l'électronique.

$$\Delta E_V = N_{sb} * N_{pb} * 1,4 * \partial E_{vcons} * M_{elB} \quad (9)$$

Le nombre de batterie en série est imposé par la tension du bus continu ainsi en connaissant la tension nominale d'une cellule de batterie, on a: $N_{sb} = U_{bus}/U_{elb}$. Pour déterminer le nombre d'élément en parallèle, il suffit que l'énergie de la batterie soit supérieure à celle requise par la mission en prenant en compte les pertes.

$$E_{bat} - \Delta E_V - Loss_B \geq E_{vcons} \quad (10)$$

En isolant N_{pb} , on obtient finalement l'équation en (11).

$$N_{pb} = \frac{(E_{vcons} + \sqrt{E_{vcons}^2 + 4(E_{elB} * DOD - \partial E_{vcons} * 1,4 * M_{elB}) * \frac{R_{0elb}}{U_{elb}^2} * E_L})}{2 * N_{sb} * (E_{elB} * DOD - \partial E_{vcons} * 1,4 * M_{elB})} \quad (11)$$

Cette dernière équation nous donne une approximation quant au nombre de cellules de batterie en parallèle requises.

2.3. Stratégie de gestion d'énergie

La stratégie de gestion d'énergie va dans un second temps partager la puissance vers la batterie et les supercondensateurs dans le but de réduire les sollicitations de la batterie [8]. Une gestion d'énergie performante peut alors considérablement améliorer la durée de vie de la source batterie tout en minimisant le poids de la source hybride. Ces algorithmes peuvent alors être regroupés en différentes catégories les stratégies à base de règle, d'optimisation ou d'intelligence artificielle [18][19][20][21][22]. En fonction de la stratégie choisie le résultat est alors plus ou moins optimal, robuste et/ou gourmand en ressources. Pour illustrer le principe de la plateforme qui a été développé, nous présenterons une stratégie basée règle qui repose sur la limitation de la batterie [14].

Cette dernière consiste à contraindre la puissance Pv . La puissance se trouvant entre ces limites est envoyée vers les batteries (P_{bat}) et le reste est envoyé vers les supercondensateurs (P_{sc}). Les supercondensateurs sont utilisés comme des buffers capables d'emmagasiner ou de fournir de l'énergie [22]. De ce fait, une boucle de régulation est mise en place pour recharger les SC à une tension de référence. Dans cette étude, les limites de puissances sont définies comme suit :

$$P_{minim} = N_{sb} * N_{pb} * I_{bat_charge} * U_{elb} \quad (12)$$

$$P_{maxi} = N_{sb} * N_{pb} * I_{bat_decharge} * U_{elb} \quad (13)$$

2.4. Dimensionnement des supercondensateurs

A l'aide de P_{sc} , le nombre de cellule de SC peut être déterminés. Le nombre de cellule en série N_{sc} en imposé par la tension U_{bus} , tel que :

$$N_{sc} = \frac{U_{bus}}{U_{elsc}} \quad (14)$$

Avec U_{elsc} , la tension d'un élément de supercondensateur. Seulement $\frac{3}{4}$ de l'énergie des supercondensateurs est utilisé ce qui correspond à une tension qui varie de son maximum à sa moitié. On en déduit alors E_{sc} l'énergie du pack de batterie.

$$E_{sc} = \frac{3}{8} * N_{p_{sc}} * N_{S_{sc}} * C_{el_{sc}} * U_{el_{sc}}^2 \quad (15)$$

Avec $C_{el_{sc}}$ la capacité d'une cellule de SC. Tout comme pour la batterie, le poids additionnel du pack de supercondensateurs ne doit pas être négligé. Pour prendre ce dernier en compte, on

cherche à déterminer les variables $\gamma_{sc}^C, \gamma_{sc}^D$ qui correspondent respectivement à l'énergie minimale et maximale envoyé aux SC en fonction du poids. La somme de ces variables correspond au delta d'énergie fonction du poids et sont obtenues tout comme $\partial_{Ev_{cons}}$. Un ratio de 40% est ajouté pour prendre en compte le packaging et l'électronique associé aux packs SC. On obtient alors l'équation suivante, avec $M_{el_{sc}}$ la masse d'une cellule de SC :

$$\Delta Esc^W = N_{psc} * N_{ssc} * (\gamma_{sc}^C + \gamma_{sc}^D) * 1.4 * M_{el_{sc}} \quad (16)$$

On peut alors établir l'équation en (17) en stipulant que l'énergie du pack de supercondensateurs doit être supérieure au delta d'énergie envoyé vers les SC. En isolant N_{psc} , on obtient l'équation (18) où ΔEsc est la différence entre l'énergie maximale et minimale requise par P_{sc} . On notera que les pertes liées à la résistance interne des supercondensateurs ne sont pas prises en compte.

$$Esc - \Delta Esc^W \geq \Delta Esc \quad (17)$$

$$N_{psc} = \frac{\Delta Esc}{\left(\frac{3}{8} * \frac{1}{N_{ssc}} * C_{el_{sc}} U_{el_{sc}}^2 - (\gamma_{sc}^C + \gamma_{sc}^D) * 1.4 * N_{ssc} * M_{el_{sc}}\right)} \quad (18)$$

2.5. Dimensionnement du convertisseur

Pour terminer, le poids du convertisseur ne peut pas être négligé. On peut estimer ce dernier grâce aux poids de l'inductance, en déterminant le produit $Ae * Sb$ de ce dernier (voir équations (19-21)). Les courants I_{sc_max} et I_{sc_rms} sont obtenus à partir de P_{sc} et la tension nominale des supercondensateurs.

$$Ae * Sb = \frac{L * I_{sc_max} * I_{sc_rms}}{B_{max} * J * K_B} \quad (19)$$

$$Weigh_{converter} = Ae * Sb * k_1 \quad (20)$$

$$Volume_{converter} = Ae * Sb * k_1 * k_2 \quad (21)$$

Les données du convertisseur peuvent être trouvées en [8].

2.6. Ajustement

Pour terminer, le dimensionnement il faut que les conditions suivantes soient respectées :

- L'énergie de la batterie doit être supérieure à l'énergie demandée Ev_{cons} .
- L'énergie des SC doit assurer le delta d'énergie envoyé par la stratégie de gestion d'énergie ΔEsc [23].

Les calculs réalisés précédemment permettent de s'approcher du résultat optimal. Mais il se peut que les calculs ne soient pas assez précis et ne respectent pas les conditions citées plus haut. Il est alors nécessaire d'ajouter respectivement des cellules en parallèle pour la batterie ou pour les supercondensateurs. L'algorithme est alors généré en prenant en compte le poids des éléments qui ont été ajoutés jusqu'à ce que la source hybride calculée permette d'assurer la mission du véhicule [8].

3. PLATEFORME DE DIMENSIONNEMENT

Une plateforme de dimensionnement a été conçue à partir de l'algorithme de dimensionnement cité dans la section II. Deux interfaces utilisateurs ont été réalisées avec Matlab/ Simulink.

3.1. 1ère interface

La première interface permet à l'utilisateur de choisir entre un dimensionnement hybride ou mono-source Fig. 3. Le dimensionnement mono source reprend les sections 2.1 et 2.2 et déterminent le nombre de cellule de batterie afin d'assurer l'autonomie, la puissance de traction et/ou la puissance de freinage. Le raisonnement est relativement similaire à la section 2.2. Le point de dimensionnement est respectivement relatif à Ev_{cons} , Pv_{max} ou Pv_{min} (voir Fig. 2). Pour cette première interface, le dimensionnement mono source cherche à respecter les trois conditions.

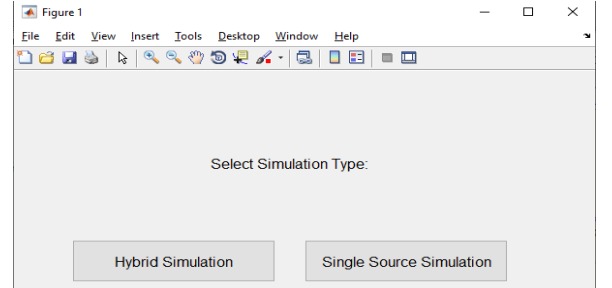


Figure 3 : Sélection du dimensionnement

Pour les deux types de dimensionnement l'utilisateur peut alors choisir un véhicule pr- enregistré : Renault Zoé, Bluecar de Bolloré et Tesla Model S. Un cycle de vitesse doit être spécifié ainsi que le nombre de fois le cycle doit être répété. La technologie de batterie doit également être renseigné. Le dimensionnement de la source hybride quant à lui précise en plus la technologie de supercondensateurs et les paramètres du convertisseur (Fig. 4).

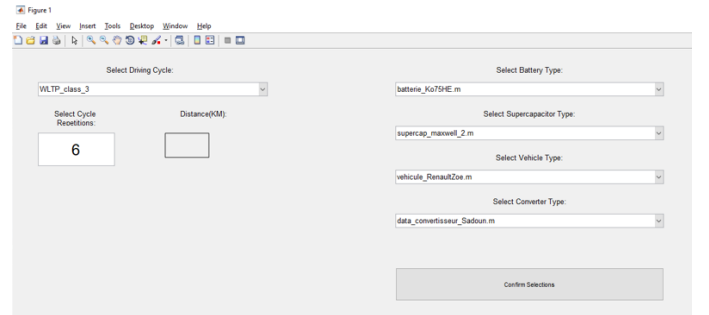


Figure 4: Interface source hybride

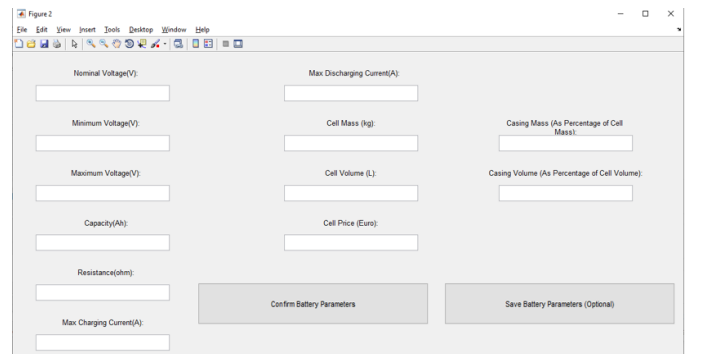


Figure 5: Interface "nouveau élément de batterie"

Se voulant modulable, l'interface permet à son utilisateur de créer ses propres paramètres vis-à-vis du véhicule, de la batterie, des supercondensateurs et du convertisseur. Ses nouvelles informations peuvent alors être enregistrés et ainsi alimenter une base de données. Un exemple d'interface de batterie sur mesure est donné sur la Fig. 5. L'utilisateur peut ainsi spécifier des données telles que la tension, la masse et la capacité. Une fois tous les paramètres validés, une fenêtre s'ouvre avec le résultat

de masse, volume et nombre de cellule de chaque élément de la source hybride et seront présentés dans la section 4.

3.2. 2^{ème} interface

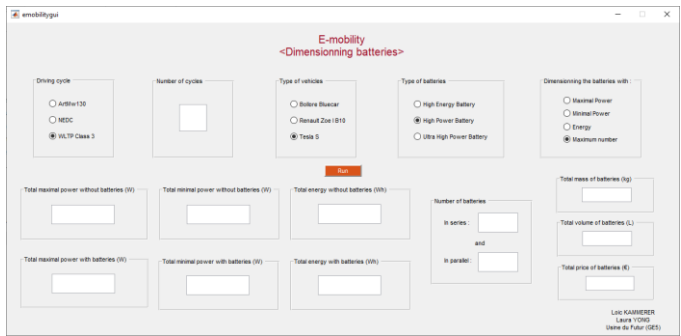


Figure 6 : Interface mono source

La deuxième interface est quant à elle destinée au dimensionnement mono source. Elle n’est pas modulable et ne propose que 3 cycles de vitesse (Artemis, NEDC, WLTP), 3 véhicules (Renault Zoe, Bluecar et la Tesla S) et 3 types de batteries (Kokam 53Ah High Energy SLPB120216216, Kokam 45Ah High Power SLPB100216216H, Ultra High Power 341440 NCA 7.5Ah de EAS). L’utilisateur peut alors choisir de dimensionner son véhicule en fonction de l’autonomie, la puissance de traction ou de freinage (Fig. 7). Il peut également prendre en compte ces 3 conditions au risque d’un surdimensionnement. *Ubus* est cependant fixé à 200V. Une fois l’algorithme lancé, le nombre de cellules ainsi que la masse, le volume et le prix des batteries sont affichés.

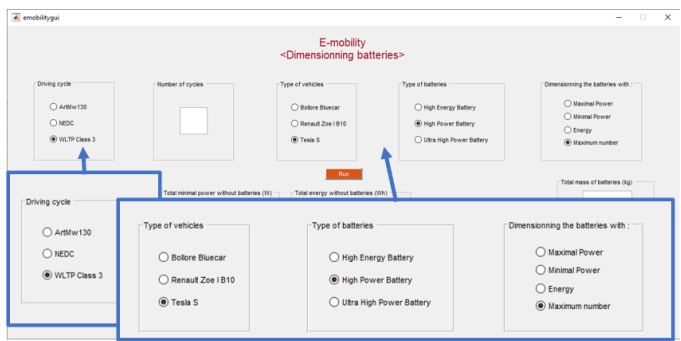


Figure 7: Paramètre à spécifier 2^{ème} interface

4. RÉSULTATS ET ANALYSES

Pour montrer le fonctionnement de nos plateformes, nous avons choisi un cycle WLTC, répété 6 fois, pour correspondre à une autonomie d’environ 140km. Des batteries Kokam de 75Ah (SLPB125255255H hautes puissances et SLPB120255255 hautes énergies) ont été utilisées ainsi que des supercondensateurs Maxwell de 450F (BCAP0450 P270 S18). La tension du bus continu a été fixée à 300V. Les résultats nous ont montrés que la masse de la source hybride était d’environ 370.6 kg (351.28kg batterie, 11.76kg SC, 7.5kg convertisseur) (Fig. 8) contre 381kg pour une solution mono source. Le tout pour un total de 84 cellules de batterie et 113 cellules de supercondensateur. L’interface nous affiche graphiquement la masse, le volume et le nombre de cellules pour la batterie, les SC et le convertisseur. Le prix des batteries et des SC peut également être visualisés.

Les résultats sont discutables et sont directement liés aux différentes technologies utilisées. Cependant la stratégie de gestion joue un rôle très important sur la masse et le volume de la solution finale. Dans notre cas, les limites P_{minim} et P_{maxi}

sont imposés en fonction de la capacité nominal de la batterie (1C). Or cette dernière est très élevée pour un élément de batterie (75Ah). Ce qui explique le faible nombre de supercondensateurs ($N_{sp} = 1$).

On notera la masse importante de la solution mono source pour la faible autonomie proposée. Le dimensionnement a été réalisé de telle manière à satisfaire l’autonomie, la puissance de traction et la puissance de freinage. Avec un système hybride de type batterie / supercondensateurs, on peut obtenir une source d’énergie aussi lourde voire moins lourde qu’une solution mono source composée uniquement d’une batterie. Cependant pour une masse semblable, la source hybride présente des avantages non négligeables comme la diminution de stress sur la batterie et l’amélioration de la durée de vie de cette dernière [4].

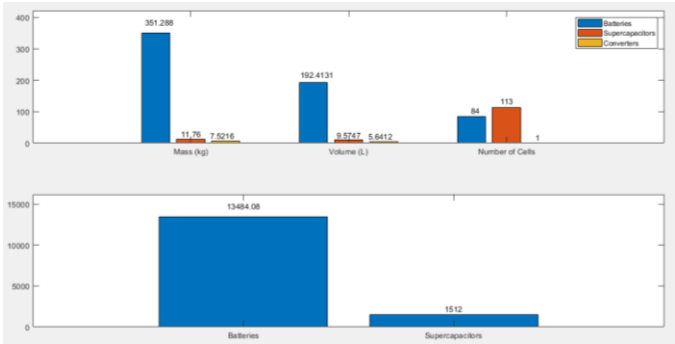


Figure 8: Affichage des résultats

5. CONCLUSION

Une plateforme de dimensionnement d’une source hybride batterie supercondensateurs est présentée. Les équations de bases sont détaillées et un exemple simple est donné avec une stratégie de gestion d’énergie dite basée règle. La plateforme peut être améliorée en intégrant de nouvelles technologies de batterie et de supercondensateurs et en améliorant les stratégies de gestion d’énergie, en introduisant par exemple, des concepts d’optimalité.

6. PERSPECTIVES

Les prochains travaux porteront sur les stratégies de gestion d’énergie qui pourront être proposées aux utilisateurs sous forme de boîte de décision à cocher avec la possibilité de spécifier les paramètres (les limites pour la méthode de limitation, la fréquence de coupure pour la stratégie fréquentielle). De plus, la possibilité d’utiliser de l’intelligence artificielle et le datamining pour proposer aux utilisateurs le couple batterie / SC en fonction d’un cycle de vitesse est également envisagée. Une base de données devra alors être construite et enrichie.

Une fusion des deux interfaces devrait être réalisée. Des ajouts mineurs peuvent améliorer l’utilisation du logiciel, comme la possibilité d’imposer la tension du bus continu, afficher le bilan de puissance, la visualisation des différentes grandeurs physiques pour des études avancées. Des travaux complémentaires sont également réalisés sur le convertisseur, pour prendre en compte la masse et le volume du radiateur thermique, les pertes et l’architecture du convertisseur.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail est issu du projet VEHICLE, financé dans le cadre du programme INTERREG V A Rhin Supérieur : Dépasser les frontières, projet après projet avec FEDER : Fonds Européen de Développement Régional. Un remerciement particulier est adressé à Steven Moniz, étudiant de l’Université de Syracuse,

8. REFERENCES

- [1] M. Kebriaei, A. H. Niasar, and B. Asaei, "Hybrid electric vehicles: An overview," *2015 Int. Conf. Connect. Veh. Expo*, pp. 299–305, 2015.
- [2] A. Kuperman and I. Aharon, "Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 981–992, 2011.
- [3] S. V. Rajani and V. J. Pandya, "Ultracapacitor-battery hybrid energy storage for pulsed, cyclic and intermittent loads," *2016 IEEE 6th Int. Conf. Power Syst. ICPS 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [4] M. Fleischhammer, T. Waldmann, G. Bisle, B. I. Hogg, and M. Wohlfahrt-Mehrens, "Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperatures and safety in lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, 2015.
- [5] F. C. Dezza, V. Musolino, L. Piegari, and R. Rizzo, "Hybrid battery-supercapacitor system for full electric forklifts," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 9, no. 1, pp. 16–23, Mar. 2019.
- [6] W. Li and G. Joós, "A power electronic interface for a battery supercapacitor hybrid energy storage system for wind applications," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1762–1768, 2008.
- [7] T. Mesbahi, "Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique," *Thèse préparée dans les Lab. S2ET Estac. L2EP-Lille*, 2016.
- [8] T. Paul, T. Mesbahi, S. Durand, D. Flieller, and W. Uhring, "Study and Influence of Standardized Driving Cycles on the Sizing of Li-Ion Battery / Supercapacitor Hybrid Energy Storage," in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2019, pp. 1–6.
- [9] N. Rizoug, R. Sadoun, T. Mesbahi, P. Bartholomeus, and P. Lemoigne, "Aging of high power Li-ion cells during real use of electric vehicles," vol. 7, no. Vppc 2015, pp. 14–22, 2017.
- [10] V. Herrera, A. Milo, H. Gaztañaga, I. Etxeberria-otadui, and I. Villarreal, "Adaptive energy management strategy and optimal sizing applied on a battery-supercapacitor based tramway," *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 831–845, 2016.
- [11] A. Ostadi and M. Kazerani, "A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4449–4460, Oct. 2015.
- [12] D. Feroldi and D. Zumoffen, "Sizing methodology for hybrid systems based on multiple renewable power sources integrated to the energy management strategy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 16, pp. 8609–8620, 2014.
- [13] R. E. Araújo, R. De Castro, C. Pinto, P. Melo, and D. Freitas, "Combined sizing and energy management in EVs with batteries and supercapacitors," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 7, pp. 3062–3076, 2014.
- [14] A. Hammani, R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Barbedette, and P. Le Moigne, "Influence of the management strategies on the sizing of hybrid supply composed with battery and supercapacitor," *2012 1st Int. Conf. Renew. Energies Veh. Technol. REVET 2012*, pp. 1–7, 2012.
- [15] R. Sadoun, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Barbedette, and P. Lemoigne, "Sizing of hybrid supply (battery-supercapacitor) for electric vehicle taking into account the weight of the additional Buck-Boost chopper," *2012 1st Int. Conf. Renew. Energies Veh. Technol. REVET 2012*, pp. 8–14, 2012.
- [16] "2017 Renault Zoe R90 - Specifications." [Online]. Available: <https://www.evsSpecifications.com/en/model/3d3688>. [Accessed: 17-May-2020].
- [17] N. Omar *et al.*, "Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1575–1585, Jan. 2014.
- [18] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Han, and M. Ouyang, "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system," *Appl. Energy*, 2014.
- [19] C. Zheng, W. Li, and Q. Liang, "An Energy Management Strategy of Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1880–1888, 2018.
- [20] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, and A. Bouscayrol, "Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints," *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 190–200, Feb. 2016.
- [21] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, Jan-2011.
- [22] L. Sun, K. Feng, C. Chapman, and N. Zhang, "An adaptive power-split strategy for battery-supercapacitor powertrain-design, simulation, and experiment," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 12, pp. 9364–9375, Dec. 2017.
- [23] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, P. Bartholome, and P. Le Moigne, "Combined Optimal Sizing and Control of Li-Ion Battery / Supercapacitor Embedded Power Supply Using Hybrid Particle Swarm – Nelder – Mead Algorithm," vol. 8, no. 1, pp. 59–73, 2017.