

Minimisation des Coûts et des Émissions de CO₂ dans le ESS des Véhicules Électrifiés Durables

Ahmad Eid EL IALI
IREENA Lab UR 4642, France

Moustapha DOUMIATI
ESEO, 10 Bd Jeanneteau, Angers
IREENA Lab UR 4642, France

Mohamed MACHMOUM
IREENA Lab UR 4642, France

RESUME – Cette recherche analyse et compare la taille optimale du Système de Stockage d'Énergie (ESS) pour les Véhicules Électriques à Batterie (BEV), les Véhicules Électriques à Pile à Combustible (FCEV) et les Véhicules Électriques à Pile à Combustible Rechargeable (PFCEV) à l'aide d'une stratégie multi-objectifs en boucle double connectée. Les simulations, basées sur la procédure WLTP, utilisent la vitesse maximale et l'autonomie comme critères de performance. Un modèle de vieillissement de batterie évalue l'impact du dimensionnement sur la durée de vie, les émissions de CO₂ et les coûts. Le SuperCondensateur (SC) est intégré pour protéger les sources des courants élevés et fournir l'énergie nécessaire lors des accélérations. Un algorithme EMS basé sur la Programmation Quadratique (QP) minimise les coûts de conduite et le vieillissement de la batterie et de la pile à combustible, tandis qu'un Algorithme Génétique (GA) identifie les solutions optimales. Les résultats montrent que l'hybridation de l'ESS réduit efficacement les coûts et les émissions, tout en soulignant la nécessité de méthodes de production d'hydrogène plus écologiques et économiques.

Mots-clés – Véhicule Électrique, Dimensionnement du ESS, Émissions de CO₂, Hybridation ESS

1. INTRODUCTION

Le secteur des transports, principal contributeur au réchauffement climatique, est responsable d'environ un cinquième des émissions mondiales de CO₂, dont la majorité provient du transport routier (45,1 % pour les voitures particulières et 29,4 % pour les camions) [1]. Les véhicules électriques (EV) apparaissent comme une solution prometteuse pour réduire les émissions. Fonctionnant à l'électricité, ils n'émettent aucun gaz à effet de serre direct et leur empreinte carbone globale reste bien inférieure à celle des véhicules thermiques, même en tenant compte de la production d'électricité.

Parmi les EV, les véhicules électriques à batterie (BEV) dominent. Ils stockent l'électricité dans des batteries rechargeables, mais leur autonomie limitée et les recharges fréquentes restent des défis [2]. Les véhicules à pile à combustible (FCEV) offrent une autonomie accrue et un ravitaillement rapide grâce à l'utilisation de l'hydrogène, mais leur coût élevé et le manque d'infrastructures freinent leur adoption [3]. Les véhicules hybrides à pile à combustible rechargeable (PFCEV) combinent les avantages des BEV et des FCEV grâce à une architecture hybride utilisant à la fois une batterie rechargeable et une pile à combustible. Certains systèmes incluent des supercondensateurs (SC) pour gérer les pics de puissance pendant l'accélération et la décélération, réduisant ainsi la contrainte sur les autres sources d'énergie [4, 5]. Cependant, l'optimisation du dimensionnement et de la gestion énergétique dans ces systèmes hybrides reste un défi clé. Une gestion intelligente des sources d'énergie garantit une efficacité maximale en limitant l'usure des composants tout en minimisant les coûts d'utilisation [6].

Les travaux antérieurs ont exploré l'optimisation du dimensionnement des systèmes ESS dans les EV et PFCEV, comme l'étude de [5] qui a utilisé une méthode d'optimisation multi-objectifs basée sur un modèle pour le dimensionnement d'un

ESS composé de batteries et de SC, tout en prenant en compte des facteurs tels que le coût, le poids et le vieillissement de la batterie. Une autre étude [7] a examiné le dimensionnement optimal d'un PFCEV pour minimiser les coûts du système et de l'opération, en utilisant un FC et une batterie. Par ailleurs, une étude [8] a analysé l'impact de la taille du système FC et de la batterie sur la consommation d'hydrogène dans un camion à pile à combustible.

Cette étude se distingue par la conception et la comparaison des BEV, FCEV et PFCEV sous différents critères de performance (coût, émissions et durabilité). Elle utilise une optimisation multi-objective intégrant un algorithme génétique (GA) pour le dimensionnement optimal des ESS et une programmation quadratique (QP) pour la gestion énergétique. Les recherches antérieures ont exploré l'optimisation du dimensionnement des EV et PFCEV, mais peu d'études comparent directement ces technologies tout en évaluant leurs émissions de CO₂, incluant la production de batteries et d'hydrogène [9]. Ce travail comble cette lacune en proposant une approche unifiée et moins contraignante pour la modélisation et la gestion énergétique.

L'organisation de cet article est la suivante : la modélisation des composants EV est présentée en Section II, la méthodologie en Section III, les résultats en Section IV, et la conclusion en Section V.

2. MODÉLISATION DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

2.1. Vue d'ensemble du VE

Les configurations du groupe motopropulseur, présentées dans la Fig. 1, offrent une méthode écologique et efficace pour alimenter les VE avec des sources d'énergie renouvelables. L'étude se concentre sur des systèmes combinant pile à combustible (FC) et batterie comme sources d'énergie principales. La FC convertit l'hydrogène en électricité, ne produisant que de l'eau comme sous-produit. Certains systèmes incluent également un supercondensateur (SC), qui peut se décharger rapidement pour fournir de la puissance lors de l'accélération ou capter l'énergie du freinage régénératif.

La FC est connectée à un convertisseur DC/DC unidirectionnel, tandis que le SC utilise un convertisseur bidirectionnel pour ajuster la tension et améliorer l'efficacité de l'énergie. La batterie est connectée directement au bus DC, fournissant instantanément l'énergie nécessaire aux moteurs. Le système peut recharger la batterie via un chargeur externe pour les BEV et PFCEV, ou via la FC pour les FCEV et PFCEV.

Le système comprend deux moteurs à courant continu PD18 dans les roues [10], reliés à des convertisseurs DC/DC, qui servent à fournir le couple nécessaire en mode propulsion et à capter l'énergie en mode freinage pour recharger la batterie et le SC. La Fig. 2 montre la carte d'efficacité et les limites de couple pendant la conduite et le freinage [11].

2.2. Modèle de batterie

Le système de gestion de l'énergie (EMS) utilise un modèle de batterie pour gérer la distribution d'énergie selon les condi-

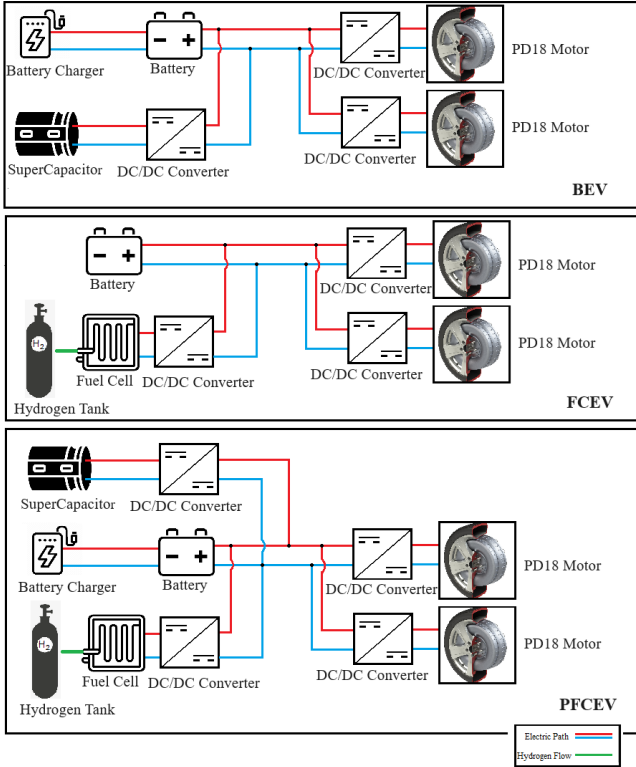


FIG. 1. Architectures des groupes motopropulseurs pour BEV, FCEV et PFCEV

tions de conduite et les besoins en puissance. Cela permet d'éviter la surcharge ou la décharge excessive de la batterie, préservant ainsi sa stabilité chimique et sa longévité.

Le modèle équivalent R_{int} de Thevenin simule les performances de la batterie Li-ion [12]. La tension à vide (OCV) est considérée constante dans la plage de SoC de 20% à 80%. Le courant I_B et la variation du SoC sont modélisés par les équations suivantes, en fonction de la puissance batterie P_B et de sa capacité Q_B :

$$I_B = \frac{V_{OCV} - \sqrt{V_{OCV}^2 - 4R_{int} \cdot P_B}}{2R_{int}} \quad (1)$$

$$\frac{dSoC}{dt} = -\frac{I_B}{3600Q_B} \quad (2)$$

$$\frac{dSoC}{dt} = a_B \cdot P_B \quad (3)$$

où a_B est un coefficient d'ajustement obtenu en déterminant la meilleure correspondance pour le modèle.

Le vieillissement de la batterie durant une durée t_{end} est modélisé pour évaluer l'impact des cycles de charge/décharge, relatif au courant nominal I_{nom} , et des températures élevées sur sa capacité et sa fonctionnalité, en utilisant un facteur de vieillissement Δ_B [13] :

$$\Delta_B = \frac{1}{Q_B} \int_0^{t_{end}} f(SoC) \cdot g(I_B) \cdot |I_B| dt, \quad (4)$$

$$g(I_B) = 1 + \frac{0.5|I_B| - 0.05I_B}{I_{nom}},$$

$$f(SoC) = 1 + 3.25(1 - SoC)^2.$$

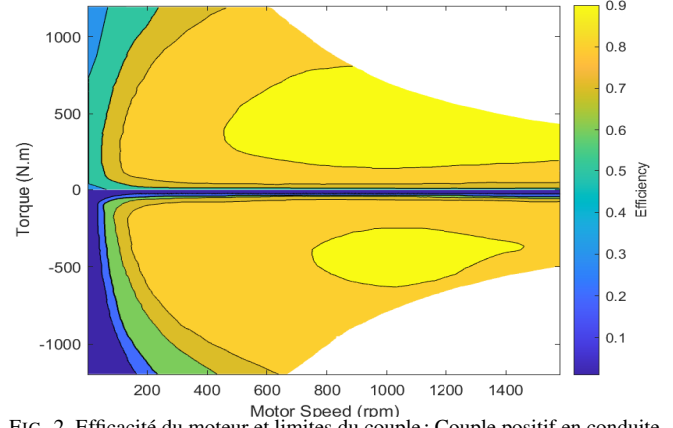


FIG. 2. Efficacité du moteur et limites du couple ; Couple positif en conduite, négatif en freinage

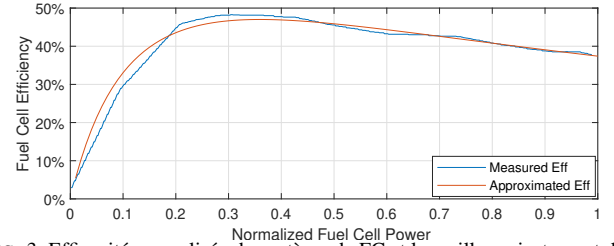


FIG. 3. Efficacité normalisée du système de FC et le meilleur ajustement du modèle

2.3. Modèle de la pile à combustible (FC)

Le modèle de la FC gère efficacement la consommation d'hydrogène et l'usure de la batterie. La consommation totale d'hydrogène M_{H_2} est fonction de la puissance électrique produite P_{FC} , des pertes P_{loss} et du pouvoir calorifique inférieur (LHV) de l'hydrogène. Elle est calculée selon l'équation suivante [8] :

$$M_{H_2} = \int_0^{t_{end}} \frac{P_{FC} + P_{loss}}{3.6 \cdot 10^6 \cdot LHV} dt. \quad (5)$$

L'efficacité de la FC, η_{FC} , est déterminée par :

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{P_{FC} + P_{loss}} \quad (6)$$

Le modèle de perte de la FC est donné par :

$$P_{loss} = P_{FCmax} \left[a_1 \left(\frac{P_{FC}}{P_{FCmax}} \right)^2 + a_2 \frac{P_{FC}}{P_{FCmax}} + a_3 \right] \quad (7)$$

Les coefficients a_1 , a_2 et a_3 sont des paramètres d'ajustement obtenus par un modèle de régression sur les données expérimentales. La Fig. 3 montre l'efficacité normalisée du système de FC et le meilleur ajustement du modèle.

Le vieillissement est principalement affecté par des conditions telles que les cycles de démarrage/arrêt, le fonctionnement au ralenti, les fortes puissances, ainsi que les variations rapides de puissance. Ces conditions seront évitées grâce à l'intégration de contraintes spécifiques dans la méthodologie proposée [14].

2.4. Modèle de Supercondensateur (SC)

Les SC sont utilisés pour fournir de la puissance supplémentaire pendant les périodes de forte demande. Leur densité énergétique élevée les rend efficaces pour soulager les batteries et les FC.

L'état de tension (SoV) du SC est calculé à partir de la puissance de décharge P_{SCdis} , de charge P_{SCcha} , l'efficacité η_{SC} et

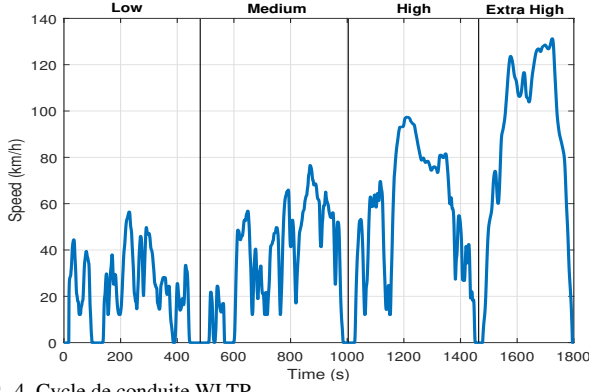


FIG. 4. Cycle de conduite WLTP

l'énergie maximale stockable E_{SC} , selon l'équation suivante :

$$SoV_k = SoV_{k-1} - \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left(\frac{P_{SCdis}}{\eta_{SC} \cdot E_{SC}} + \frac{\eta_{SC} \cdot P_{SCcha}}{E_{SC}} \right) dt. \quad (8)$$

Le vieillissement des SC est négligé dans cette étude en raison de leur nombre de cycles élevé et de leur coût plus bas comparé aux autres sources d'énergie [13].

2.5. Modèle dynamique du véhicule

L'équation dynamique du véhicule est essentielle pour estimer les besoins en puissance en fonction du cycle de conduite et déterminer la vitesse maximale et l'autonomie.

$$P_m \eta_T \eta_{md} = mgF_r u \cos(\theta) + 0.5 \rho C_d A u^3 + mg \sin(\theta) u + m u \frac{du}{dt}, \quad (9)$$

où P_m est la puissance requise du véhicule en Watts, η_T représente l'efficacité de la transmission, et η_{md} l'efficacité du moteur, comme montré dans la Fig. 2. ρ est la densité de l'air, tandis que C_d et A sont respectivement le coefficient de traînée et la surface frontale du véhicule. La vitesse du véhicule u est en m/s, la masse totale du véhicule est m , g est l'accélération gravitationnelle, F_r est le coefficient de résistance au roulement, et θ est l'angle de pente.

Le cycle de conduite WLTP, montré dans la Fig. 4, est divisé en quatre sections avec des vitesses moyennes variées : faible, moyenne, élevée et extra-élevée. Bien qu'il soit plus court et couvre une distance moindre, il atteint une vitesse maximale plus élevée que d'autres cycles. Ce cycle suppose un terrain plat ($\theta = 0$, $F_r = 0.02$ [15]). Dans cette étude, le véhicule autonome dispose d'une connaissance préalable du profil de vitesse, permettant une optimisation hors ligne du cycle.

Cette étude se concentre uniquement sur la puissance spécifiée pour la propulsion du véhicule, excluant les besoins énergétiques des systèmes auxiliaires et de refroidissement.

La puissance nécessaire pour atteindre une certaine vitesse maximale u_{max} peut être obtenue à partir de l'équation (9) en posant $\frac{du}{dt} = 0$ et $\theta = 0$ [7].

$$P_{Bmax} + P_{FCmax} + P_{SCmax} \geq \frac{mgF_r u_{max} + 0.5 \rho C_d A u_{max}^3}{\eta_T \eta_{md}}. \quad (10)$$

Cette étude utilise une méthode simplifiée en supposant une route plate et une vitesse constante de 60 km/h pour calculer l'énergie nécessaire dans le ESS pour une autonomie L spécifique.

$$L = \frac{(SoC_{max} - SoC_{min})E_B + E_{FC} + E_{SC}}{mgF + 0.5 \rho C_d A u_0^2}, \quad (11)$$

où E_B est la capacité énergétique de la batterie et E_{FC} l'énergie du réservoir d'hydrogène, calculée avec M_{H_2max} (limite de

stockage de l'hydrogène en kg) et η_{avgFC} (efficacité moyenne de la FC).

3. MÉTHODOLOGIE

Cette étude utilise une méthode d'optimisation multi-objectifs pour créer un modèle de dimensionnement et de gestion de l'énergie (EMS) détaillé dans nos travaux précédents [16, 17]. Elle se compose de deux boucles connectées : une boucle extérieure utilisant un algorithme génétique (GA) et une boucle intérieure avec une programmation quadratique (QP). La boucle extérieure basée sur GA cherche à trouver le vecteur de dimensionnement optimal de l'ESS, prenant en compte des variables comme la capacité de la batterie, la puissance du système FC, la capacité des SC et la limite d'hydrogène. Contrairement aux méthodes ajustant un paramètre tout en gardant les autres constants [18], cette approche optimise simultanément ces paramètres pour une exploration plus large et des configurations ESS potentiellement plus efficaces.

3.1. Boucle intérieure - programmation quadratique

3.1.1. Fonction de coût - BEV

Comme mentionné précédemment, le BEV dépend uniquement d'une batterie, complétée par un SC, comme source d'énergie principale. Le coût opérationnel de ce véhicule est l'énergie électrique nécessaire pour recharger la batterie et le SC à leurs états initiaux. Pour limiter l'effet du vieillissement dû aux courants élevés, un élément est ajouté à la fonction de coût, minimisant ainsi le facteur $g(I_B)$ dans l'équation (4).

$$Cost_B = \frac{(SoC_0 - SoC_{end}) \cdot E_B \cdot \sigma_{ChaP}}{3.6 \cdot 10^6 \cdot \eta_B}$$

$$Cost_{SC} = \frac{(SoV_0 - SoV_{end}) \cdot E_{SC} \cdot \sigma_{ChaP}}{3.6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{SC}}$$

$$Cost_{B-Age} = \int_0^{t_{end}} \frac{Price_B \cdot I_B^2}{3600 Q_B \cdot N_{Cycles} \cdot I_{nom}} dt$$

$$CFQP_{BEV} = Cost_B + Cost_{SC} + Cost_{B-age}. \quad (12)$$

La fonction de coût $CFQP_{BEV}$ comprend trois parties : les coûts énergétiques pour la batterie, $Cost_B$, et le SC, $Cost_{SC}$, en utilisant σ_{ChaP} pour le prix de l'électricité par kWh, et l'effet économique du vieillissement de la batterie, $Cost_{B-age}$.

3.1.2. Fonction de coût - FCEV

Le FCEV utilise une pile à combustible (FC) comme source principale d'énergie, avec une batterie en secours. Le coût opérationnel est lié à l'hydrogène nécessaire à la propulsion. Comme pour le BEV, la fonction de coût $CFQP_{FCEV}$ minimise l'effet de vieillissement de la batterie, tandis que le vieillissement de la FC est pris en compte dans les contraintes.

$$Cost_{FC} = \sigma_{H_2P} \cdot M_{H_2}$$

$$CFQP_{FCEV} = Cost_{FC} + Cost_{B-age}, \quad (13)$$

où σ_{H_2P} représente le coût par kg d'hydrogène.

3.1.3. Fonction de coût - PFCEV

Le PFCEV utilise à la fois une batterie rechargeable et une FC, avec un supercondensateur (SC) comme source secondaire. La fonction de coût interne $CFQP_{PFCEV}$ combine les coûts précédents comme suit :

$$CFQP_{PFCEV} = Cost_B + Cost_{SC} + Cost_{FC} + Cost_{B-age}. \quad (14)$$

3.1.4. Contraintes - BEV

Pour assurer un fonctionnement sûr des composants et une distribution équilibrée de l'énergie entre la source et la charge, les contraintes suivantes sont appliquées :

$$SoC_{min} \leq SoC \leq SoC_{max} \quad (15)$$

$$-P_{Bmax} \leq P_B \leq P_{Bmax} \quad (16)$$

$$SoV_{min} \leq SoV \leq SoV_{max} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{SCdis} \leq P_{SCmax} \quad (18)$$

$$-P_{SCmax} \leq P_{SCcha} \leq 0 \quad (19)$$

$$P_B + P_{SCdis} + P_{SCcha} = P_m \quad (20)$$

$$P_{SCdis} \cdot P_m \geq 0 \quad (21)$$

$$P_{SCcha} \cdot P_m \geq 0. \quad (22)$$

Les contraintes (21) et (22) garantissent que le SC ne se décharge que lorsque l'énergie est requise et se recharge lors du freinage régénératif.

3.1.5. Contraintes - FCEV

Pour la batterie, les contraintes (15) et (16) restent inchangées. Les contraintes suivantes sont ajoutées pour la pile à combustible :

$$0.05P_{FCmax} \leq P_{FC} \leq 0.95P_{FCmax} \quad (23)$$

$$-0.1P_{FCmax} \leq \Delta P_{FC} \leq 0.1P_{FCmax} \quad (24)$$

$$SoC_{end} \geq 50\% \quad (25)$$

$$P_B + P_{FC} = P_m. \quad (26)$$

Les contraintes (23) et (24) protègent la FC contre les demandes excessives de puissance et les démarrages/arrêts fréquents, et la contrainte (25) garantit que la batterie n'est pas complètement déchargée à la fin du trajet.

3.1.6. Contraintes - PFCEV

Le PFCEV, combinant les caractéristiques du BEV et du FCEV, applique leurs contraintes respectives. Les contraintes (15) à (19), (23) et (24) sont maintenues, et les contraintes suivantes sont ajoutées :

$$P_B + P_{SCdis} + P_{SCcha} + P_{FC} = P_m \quad (27)$$

$$P_{SCdis} \cdot (P_m - 0.05P_{FCmax}) \geq 0 \quad (28)$$

$$P_{SCcha} \cdot (P_m - 0.05P_{FCmax}) \geq 0, \quad (29)$$

avec les contraintes (28) et (29) utilisées pour les mêmes raisons que les contraintes (21) et (22).

3.2. Boucle externe - algorithme génétique

Le GA multi-objectifs utilise l'allocation de puissance du QP pour évaluer chaque objectif. Le premier objectif, Obj_1 , calcule le coût économique total du véhicule, incluant les coûts d'investissement et opérationnels. Le deuxième objectif, Obj_2 , mesure l'effet du vieillissement de la batterie. Le troisième objectif, Obj_3 , estime les émissions totales de CO₂ du véhicule, en prenant en compte les émissions de son cycle de vie et opérationnelles. Ces calculs supposent une distance totale de conduite de 150 000 km basée sur le cycle de conduite utilisé. Pour les BEV et PFCEV, où la batterie est la source principale d'énergie, il est nécessaire de considérer différents états initiaux de la batterie, car cela influence les résultats d'optimisation et l'évaluation des objectifs. Par conséquent, ces véhicules subissent une optimisation et une évaluation des objectifs deux fois, une fois à un SoC initial élevé ($SoC^{high} = 70\%$) et une autre fois à un SoC initial bas ($SoC^{low} = 30\%$). Cette étape est omise pour les FCEV, où la batterie sert de source d'énergie secondaire et aura un SoC initial de 50 %.

3.2.1. Fonction de coût - BEV

$$Obj_{1_{BEV}} = \frac{15 \cdot 10^4}{2Dist_{WLTP}} \cdot (CFQP_{BEV}^{high} + CFQP_{BEV}^{low}) + Price_B + Price_{SC} \quad (30)$$

$$Obj_{2_{BEV}} = \frac{\Delta_{B_{BEV}}^{high} + \Delta_{B_{BEV}}^{low}}{2} \quad (31)$$

$$Obj_{3_{BEV}} = \frac{15 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{ChaE}}{2Dist_{WLTP}} \cdot (Cost_B + Cost_{SC})^{high} + \frac{15 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{ChaE}}{2Dist_{WLTP}} \cdot (Cost_B + Cost_{SC})^{low} + CFP_B + CFP_{SC}, \quad (32)$$

où σ_{ChaE} représente les émissions de carbone par kWh. Les termes CFP_B et CFP_{SC} désignent l'empreinte carbone associée à la production de la batterie et du SC, respectivement. Enfin, $Dist_{WLTP}$ représente la distance totale parcourue selon le cycle de conduite WLTP.

3.2.2. Fonction de coût - FCEV

$$Obj_{1_{FCEV}} = \frac{15 \cdot 10^4}{Dist_{WLTP}} \cdot CFQP_{FCEV} + Price_B + Price_{FC} + Price_{Tnk} \quad (33)$$

$$Obj_{2_{FCEV}} = \Delta_{B_{FCEV}} \quad (34)$$

$$Obj_{3_{FCEV}} = \frac{15 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{H_2P} \cdot M_{H_2}}{Dist_{WLTP}} + CFP_B + CFP_{FC}. \quad (35)$$

Ici, σ_{H_2P} représente les émissions de carbone provenant de la production de 1 kg d'hydrogène par reformage à la vapeur de méthane. $Price_{FC}$ et CFP_{FC} désignent le coût et l'empreinte carbone de la production du système FC, respectivement. Le coût du réservoir de stockage d'hydrogène est noté $Price_{Tnk}$.

3.2.3. Fonction de coût - PFCEV

Tout comme dans la boucle interne, le PFCEV combine le BEV et le FCEV. Par conséquent, les objectifs sont une combinaison des équations précédentes.

$$Obj_{1_{PFCEV}} = \frac{15 \cdot 10^4}{Dist_{WLTP}} \cdot (CFQP_{PFCEV}) \quad (36)$$

$$Obj_{2_{PFCEV}} = \frac{\Delta_{B_{PFCEV}}^{high} + \Delta_{B_{PFCEV}}^{low}}{2} \quad (37)$$

$$Obj_{3_{PFCEV}} = \frac{15 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{ChaE}}{2Dist_{WLTP}} \cdot (Cost_B + Cost_{SC})^{high} + \frac{15 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{ChaE}}{2Dist_{WLTP}} \cdot (Cost_B + Cost_{SC})^{low} + \frac{15 \cdot 10^4 \cdot \sigma_{H_2P} \cdot M_{H_2}}{Dist_{WLTP}} + CFP_B + CFP_{FC} + CFP_{SC}. \quad (38)$$

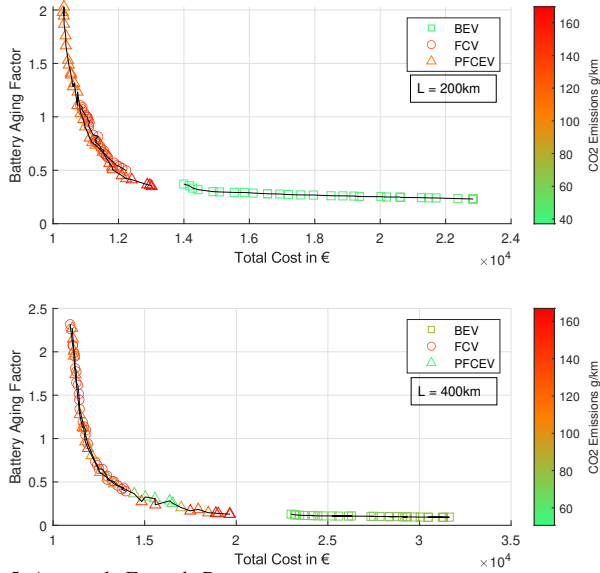


FIG. 5. Aperçu du Front de Pareto

3.2.4. Contraintes

Lors de la recherche de la taille optimale d'un ESS, il est essentiel de respecter des critères de performance, comme la vitesse maximale (u_{max}) et l'autonomie (L), assurés par les équations (10) et (11). Cette étude compare plusieurs types de véhicules avec des objectifs d'autonomie de 200 km et 400 km, tout en maintenant une vitesse maximale d'au moins 150 km/h.

4. RÉSULTATS DE SIMULATION

La méthode d'optimisation décrite en Section 3 est utilisée pour dimensionner l'ESS des différents véhicules. La simulation, réalisée sous MATLAB avec un pas de temps de $T_s = 1$ s, utilise la fonction *quadprog* pour le QP, étant donné la fonction de coût quadratique dérivée des modèles de vieillissement de la batterie et de la pile à combustible (FC). Les paramètres techniques et économiques sont présentés dans les Tables 1 et 2.

Après optimisation, 30 solutions sont présentées sur des fronts de Pareto distincts (Fig. 5), répondant aux exigences d'autonomie. Chaque point représente le coût total en €, le facteur de vieillissement de la batterie, et les émissions de CO2 par km pour chaque solution.

Les solutions pour les BEV présentent des coûts plus élevés, environ 63% de plus que pour les PFCEV pour 200 km et 85% pour 400 km, en raison de la taille plus grande de la batterie nécessaire pour répondre aux exigences d'autonomie. Les FCEV, quant à eux, ont des coûts similaires aux PFCEV mais des émissions plus élevées (environ 19% de plus pour 200 km et 32% de plus pour 400 km). Les PFCEV ont des émissions réduites grâce à l'énergie de la batterie, qui émet moins que l'hydrogène conventionnel.

Une solution PFCEV de 400 km, choisie pour son coût faible et son facteur de vieillissement modéré de la batterie, comprend une batterie de 41 Ah, une FC de 10 kW, un SC de 3,5 Farad, et un stockage de 4,6 kg d'hydrogène. Le coût total de cette solution est de 12 102 €, avec un coût d'investissement initial de 5 110 € et un coût de fonctionnement de 4,66 €/100 km. Elle émet 103 gCO2/km et a un facteur de vieillissement de la batterie de 0,8 par cycle de conduite. La Fig. 6 montre la distribution optimale de la puissance au sein de l'ESS.

La Fig. 7 montre la contribution de chaque composant au coût et aux émissions. Malgré une sortie de puissance plus faible de la FC par rapport à la batterie, la consommation d'hydrogène conventionnel représente environ 36% du coût total et 83% des émissions, surpassant celles de l'électricité.

TABLEAU 1. Paramètres techniques [17]

	Variable	Valeur
Batterie	Rendement de la batterie	0,97
	V_B	400 V
	Densité énergétique	150 Wh/kg
	Densité de puissance	1 000 W/kg
	I_{nom}	1 C-rate
	N_{Cycles}	3 000 cycles
	SoC_{minBEV}	0,1
	SoC_{maxBEV}	0,9
	$SoC_{minPFCEV}, SoC_{minFCEV}$	0,2
	$SoC_{maxPFCEV}, SoC_{maxFCEV}$	0,8
FC	Rendement moyen de la FC	0,4
	Densité de puissance	1 600 W/kg
	Masse du réservoir H_2	20 kg/kgH2
	LHV	33,33 kWh/kg
SC	Rendement du SC	0,98
	V_{SC}	200 V
	Densité énergétique	6 Wh/kg
	Densité de puissance	3 500 W/kg
	SoV_{init}	1
Véhicule	ρ	1,29 kg/m ³
	C_d	0,335
	F_r	0,02
	A	2 m ²
	m	1 480 kg
	g	9,81 m/s ²
	η_T	0,9

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude examine la taille optimale des ESS pour différents types de véhicules électriques, visant à réduire le vieillissement des batteries, les émissions de CO2, et les coûts. Un algorithme QP pour la gestion de l'énergie (EMS) est utilisé pour distribuer la puissance entre les sources, minimisant le coût de conduite et le vieillissement des composants. Le GA est également utilisé pour trouver une solution optimale répondant aux contraintes. Les résultats montrent que l'utilisation d'une FC améliore l'autonomie et réduit les coûts pour les FCEV et PFCEV par rapport aux BEV. L'intégration d'une batterie rechargeable dans les PFCEV permet d'obtenir de meilleures performances et moins d'émissions que les FCEV.

Les travaux futurs incluent l'intégration de stratégies de gestion thermique et la mise en place d'un EMS en temps réel, nécessitant la prédiction de trajectoires ou la planification pour une distribution efficace de la puissance.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet V3EA "Véhicule Électrique, Énergétiquement Efficace et Autonome" (2021-2025), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) du gouvernement français.

6. RÉFÉRENCES

- [1] H. Ritchie, "Cars, planes, trains : where do co2 emissions from transport come from?," *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>.
- [2] Z. S. Gelmanova, G. G. Zhabalova, G. A. Sivyakova, O. N. Lelikova, O. N. Onishchenko, A. A. Smailova, and S. N. Kamarova, "Electric cars. advantages and disadvantages," *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 1015, p. 052029, may 2018.
- [3] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, and D. Hissel, "Hy-

TABLEAU 2. Paramètres économiques [17]

	Variable	Valeur
Batterie	Coût de la batterie	158 €/kWh
	Empreinte carbone batterie	80 kgCO ₂ /kWh
	Coût de l'électricité	0,22 €/kWh
	Émissions liées à l'électricité	58 gCO ₂ /kWh
FC	Coût de la FC	75 €/kW
	Empreinte carbone FC	57 gCO ₂ /kW
	Coût du réservoir H ₂	10 €/kWh
	Coût de l'hydrogène	4 €/kg
	Émissions de l'hydrogène	8 900 gCO ₂ /kg
SC	Coût du SC	10 €/Wh
	Empreinte carbone SC	2 000 gCO ₂ /Wh

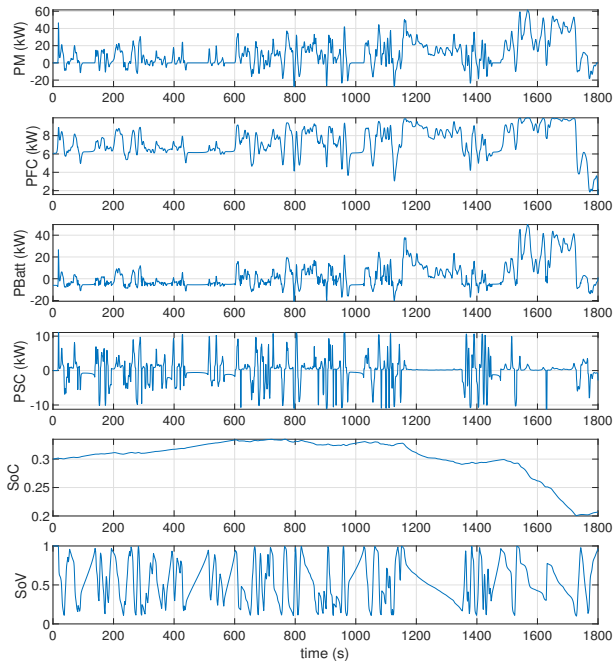


FIG. 6. Répartition optimale de la puissance pour le cas PFCEV choisi

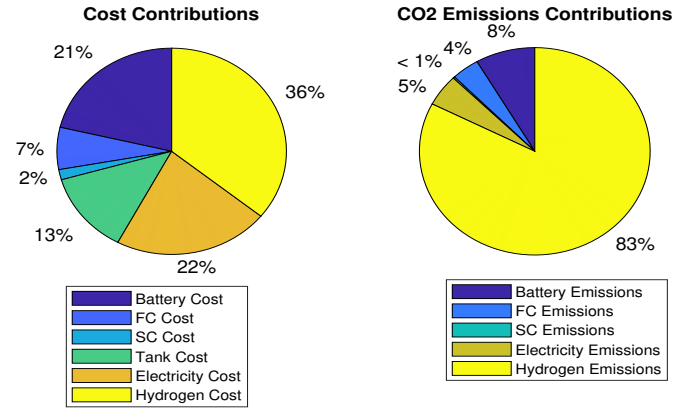


FIG. 7. Contributions au Coût et aux Émissions des Composants

[2018/05/Pd18-Datasheet-Master.pdf](https://www.proteanelectric.com/f/2018/05/Pd18-Datasheet-Master.pdf).

drogen energy systems : A critical review of technologies, applications, trends and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, vol. 146, p. 111180, 2021.

- [4] H. Chen, R. Xiong, C. Lin, and W. Shen, “Model predictive control based real-time energy management for hybrid energy storage system,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 862–874, 2021.
- [5] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, J. Deng, and D. G. Dorrell, “Multiobjective optimal sizing of hybrid energy storage system for electric vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1027–1035, 2018.
- [6] Yanjun Huang, H. Wang, A. Khajepour, B. Li, J. Ji, K. Zhao, and C. Hu, “A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 132–144, 2018.
- [7] L. Xu, M. Ouyang, J. Li, F. Yang, L. Lu, and J. Hua, “Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost,” *Applied Energy, Elsevier*, vol. 103, pp. 477–487, 2013.
- [8] E. Tazelaar, Y. Shen, P. A. Veenhuizen, T. Hofman, and P. P. J. van den Bosch, “Sizing stack and battery of a fuel cell hybrid distribution truck,” *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 67, pp. 563–573, Aug. 2012.
- [9] G. Kakoulaki, I. Kougias, N. Taylor, F. Dolci, J. Moya, and A. Jäger-Waldau, “Green hydrogen in europe – a regional assessment : Substituting existing production with electrolysis powered by renewables,” *Energy Conversion and Management, Elsevier*, vol. 228, p. 113649, 2021.
- [10] P. Electric, “Pd18 in-wheel electric motor datasheet,” 2018. [Online]. Available : [https://www.proteanelectric.com/f/](https://www.proteanelectric.com/f/2018/05/Pd18-Datasheet-Master.pdf)

- [11] F. Tarhini, R. Talj, and M. Doumiati, “Driving towards energy efficiency : A novel torque allocation strategy for in-wheel electric vehicles,” in *IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (Bilbao, Spain), September 2023.
- [12] R. Jibrin, S. Hillmansen, C. Roberts, N. Zhao, and Z. Tian, “Convex optimization of speed and energy management system for fuel cell hybrid trains,” in *2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–6, 2021.
- [13] M. Mroueh, S. Kassir, M. Doumiati, C. Francis, and M. Machmoum, “A new time scale based energy management strategy for a hybrid energy storage system in electrical microgrids,” in *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1–6, 2021.
- [14] H. Chen, P. Pei, and M. Song, “Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells,” *Applied Energy, Elsevier*, vol. 142, pp. 154–163, 2015.
- [15] W. Chen, H. Xiao, Q. Wang, L. Zhao, and M. Zhu, *Integrated Vehicle Dynamics and Control*. Hoboken : Wiley, 2016.
- [16] A. E. El-Iali, M. Doumiati, and M. Machmoum, “Optimal sizing of the energy storage system for a plug-in fuel cell electric vehicle : A multi-objective approach,” in *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1–7, 2023.
- [17] A. E. El-Iali, M. Doumiati, and M. Machmoum, “Optimal sizing of the energy storage system for plug-in fuel cell electric vehicles, balancing costs, emissions and aging,” *Journal of Energy Storage*, vol. 92, p. 112095, 2024.
- [18] Jiahao Huang, Z. Huang, Y. Wu, Y. Liu, H. Li, F. Jiang, and J. Peng, “Sizing optimization research considering mass effect of hybrid energy storage system in electric vehicles,” *Journal of Energy Storage*, vol. 48, p. 103892, 2022.