

Spécialité :

Génie Électrique - EPRM – I3

2025-2026

UE - Projet : Réalisation et synthèse EPRM

Émulation d'un véhicule électrique à stockage
hybride (FCEV HESS)

- Groupe 3 - Emulateur de Pile à combustible et
convertisseur Boost -

1. Groupe 3

- H. Zinedine ABAYAHIA
- Melvyn TOURAILLE VARAMATA
- Aissatou BA

Résumé

Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'étude et de la modélisation d'une chaîne de traction hybride associant une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et une batterie, interfacées par des convertisseurs statiques de puissance. L'objectif principal est la conception et l'implémentation d'un émulateur de pile à combustible capable de reproduire fidèlement le comportement électrique d'une PEMFC réelle, tout en permettant une interaction réaliste avec un bus continu imposé par une batterie.

L'approche retenue repose sur l'utilisation de deux convertisseurs DC/DC distincts : un convertisseur abaisseur, dédié à l'émulation de la pile à combustible au travers de différents modèles disponible sous Simscape (conditions nominales), et un convertisseur élévateur, chargé de contrôler le courant injecté dans le bus continu. Les modèles et lois de commande ont été développés sous l'environnement MATLAB/Simulink, en tenant compte des contraintes de stabilité, de performance dynamique et de simplicité de mise en œuvre en vue d'une future implémentation matérielle.

Les résultats de simulation permettent de valider la structure de commande proposée ainsi que la séparation fonctionnelle entre l'émulation de la pile et la gestion de l'énergie injectée dans le bus continu. Ce travail constitue une base solide pour l'extension vers des modèles dynamiques plus complexes de PEMFC et pour une implémentation expérimentale sur banc de test.

Table des matières

Résumé.....	2
Table des matières	3
Liste des Figures	4
Nomenclature	5
Introduction	6
Chapitre 1. Contexte.....	7
1.1 Structure des véhicules électriques à stockage hybride (FCEV HESS)	7
1.2 Rôle de la pile à combustible vis-à-vis de la batterie.....	8
Chapitre 2. Partie théorique	9
2.1 Modélisation de la pile à combustible PEM (conditions nominales).....	9
2.1.1 Modèle complet, réactions électrochimiques.....	9
2.1.2 Modèle courant–tension (I–V)	11
2.2 Émulateurs de pile à combustible	12
2.2.1 Structure retenue pour l’émulation (Système PAC – Bus DC).....	13
2.2.2 Dimensionnement des composants convertisseur Buck (CCM Seulement)	13
2.2.3 Asservissement du convertisseur Buck – Mode Tension (modèle du premier ordre)	14
2.2.4 Asservissement du convertisseur Buck – Mode Tension (modèle du second ordre)	15
2.2.5 Dimensionnement des composants convertisseur Boost (CCM Seulement).....	17
2.2.6 Asservissement du convertisseur Boost.....	17
2.3 Gestion des flux de puissance.....	18
Chapitre 3. Simulation	19
3.1 Méthode de travail	19
3.1.1 Tests unitaires	19
3.2 Résultats de simulation avec données WLTC	22
3.2.1 Discussion	23
Chapitre 4. Implémentation	23
4.1 Définition des ordres de grandeurs	23
4.2 Présentation de l’alimentation réversible et de l’émulateur physique.....	26
4.3 Problèmes techniques lors de la manipulation	27
4.4 Résultats de la manipulation	27
4.4.1 Discussion	27
Travaux futurs	30
Conclusion	30

References.....	31
Annexe.....	32

Liste des Figures

Figure 1 : Topologie semi-active d'un véhicule FCEV hybride [[4]].	7
Figure 2 : Difference entre la topologie "Full-Active" et Semi-Active[4].	7
Figure 3 Rendement électrique (Li-Ion vs PAC)[5].....	8
Figure 4 : Réaction oxydoréduction d'une PAC MEP [8].	9
Figure 5 : Caractéristique IV d'une PAC MEP [10]......	12
Figure 6 : Simulateur HIL basé sur le modèle du circuit électrique équivalent (Valable en région ohmique seulement) [8].....	12
Figure 7 : Schéma global du système d'émulation [4], [12]	13
Figure 8 : Circuit Buck.	15
Figure 9 : Analyse fréquentielle en boucle ouverte du modèle (Convertisseur + Correcteur) Conception robuste après avoir agi sur Kp.....	17
Figure 10 : Validation du dimensionnement Boost et Buck.....	19
Figure 11 : Validation de l'asservissement de tension et de courant.	20
Figure 12 : Système d'émulation sous Simulink. (Le booléen RealData permet de choisir entre les données fictives (créneaux) ou WLTC).	20
Figure 13 : Validation du système d'émulation en simulation.	21
Figure 14 : Augmentation de la capacité du condensateur Buck.	21
Figure 15 : Modèle PAC prédéfini (133A nom).	22
Figure 16 : Modèle PAC Ifcnom=5A.....	22
Figure 17 : Alimentation reversible en courant (Réseau DC).	26
Figure 18 : Émulateur PAC (vue d'ensemble).....	26
Figure 19 : Écran bleu de l'ordinateur lors de l'exécution en temps réel	27
Figure 20 : Test de l'asservissement de tension.	29

Figure 21 : Modèle PAC 5A.....	29
Figure 22 : Modèle PAC prédéfini	29
Figure 23 : Profiles fictifs.....	29

Nomenclature

PWM/MLI	Pulse With Modulation/ Modulation de largeur d'impulsion
HESS	Hybrid Energy Storage System
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles
PAC	Pile à combustible
MEP	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM en Anglais)

Introduction

La transition vers des systèmes de transport à faibles émissions a conduit à un intérêt croissant pour les véhicules électriques à hydrogène, appelés Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV). Ces architectures reposent généralement sur l'association de plusieurs sources d'énergie au sein d'un système de stockage hybride (Hybrid Energy Storage System – HESS), combinant une pile à combustible et une batterie électrochimique. Cette hybridation permet de tirer parti des caractéristiques complémentaires de chaque source afin de répondre aux contraintes dynamiques de la traction électrique tout en limitant les sollicitations de la pile à combustible.

Dans un contexte de recherche et d'enseignement, l'expérimentation directe sur un véhicule réel ou sur une pile à combustible physique reste complexe et coûteuse. Une solution intermédiaire consiste alors à développer un émulateur de pile à combustible à échelle réduite, permettant de reproduire son comportement électrique sans recourir à un dispositif réel.

Ce projet s'inscrit dans cette démarche et vise la conception et la commande d'un émulateur de pile à combustible destiné à une application de type FCEV, intégré à un environnement simplifié représenté par un bus continu idéal.

Ce projet vise à concevoir un émulateur de PEMFC intégré dans une chaîne de traction hybride, en mettant l'accent sur une modélisation réaliste du comportement électrique et sur une architecture de commande claire et modulaire. L'approche adoptée dissocie l'émulation de la tension de la pile et le contrôle du courant injecté dans le bus continu, ce dernier ayant une tension imposée par la batterie.

L'ensemble des travaux est réalisé sous MATLAB/Simulink, avec une attention particulière portée à la stabilité en boucle fermée, à la robustesse face aux variations de charge et à la compatibilité avec une implémentation matérielle future.

Chapitre 1. Contexte

1.1 Structure des véhicules électriques à stockage hybride (FCEV HESS)

Dans une architecture FCEV hybride semi-active, la batterie est directement connectée au bus continu et assure le maintien de la tension du réseau ainsi que la fourniture de puissance lors des transitoires rapides de courant imposés par le cycle de conduite (voir Figure 1 et la Figure 2). La batterie permet également la récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage régénératif, ce qui impose un fonctionnement bidirectionnel en courant [[1]].

La pile à combustible, alimentée par un réservoir d'hydrogène, est destinée à fournir une puissance moyenne quasi constante et unidirectionnelle en courant. Ce mode de fonctionnement permet d'optimiser le rendement de la pile et de limiter les sollicitations dynamiques susceptibles d'affecter sa durée de vie [[2], [3]]. L'interface entre la pile à combustible et le bus continu est assurée par un convertisseur Boost, dont le rôle est à la fois d'adapter le niveau de tension de la PAC au réseau DC et d'asservir le courant prélevé à la pile [4].

La chaîne de traction consomme l'énergie fournie par la pile à combustible et la batterie conformément à la stratégie de gestion des flux de puissance mise en œuvre. En phase de freinage régénératif, l'énergie récupérée est réinjectée vers la batterie via le bus continu.

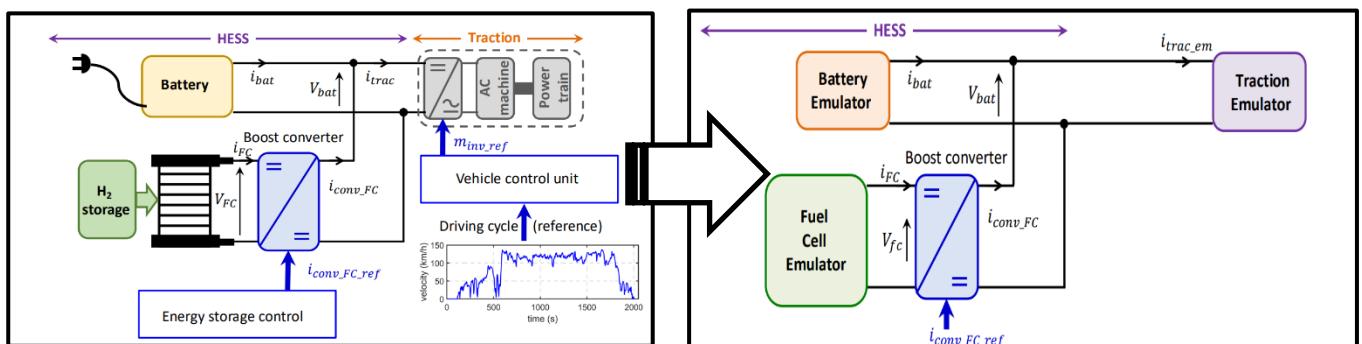


Figure 1 : Topologie semi-active d'un véhicule FCEV hybride [[4]].

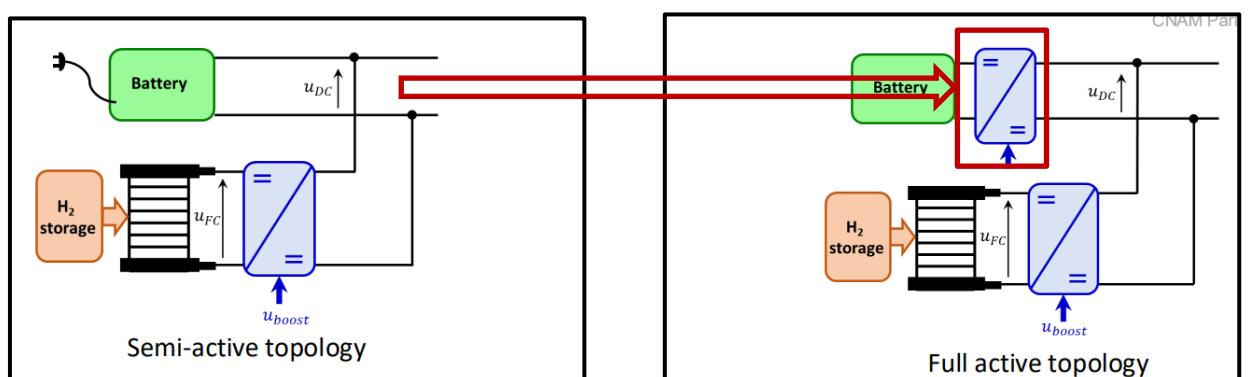


Figure 2 : Différence entre la topologie "Full-Active" et Semi-Active[4].

1.2 Rôle de la pile à combustible vis-à-vis de la batterie

Dans un FCEV HESS, la répartition des rôles entre la pile à combustible et la batterie est dictée par leurs caractéristiques intrinsèques. La batterie Li-Ion présente un très bon rendement énergétique et une capacité à répondre rapidement aux variations de courant, ce qui la rend adaptée à la compensation des pics de puissance liés aux accélérations et aux phases de récupération d'énergie au freinage [5]. En revanche, sa densité énergétique reste limitée (par rapport à la PAC) et son vieillissement est fortement dépendant des cycles de charge et de décharge [5], [6].

Metric	Li-ion Battery	Hydrogen (700 bar)
Gravimetric Energy Density	~250 Wh/kg	~33,000 Wh/kg
Volumetric Energy Density	~500 Wh/L	~1,500 Wh/L
Typical Self-discharge	2–3%/month	~0% over months
Best Use Duration	Hours–Days	Days–Months

Tableau 1 : Comparaison entre la densité de puissance des batteries LI-ION avec les PAC MEP [5].

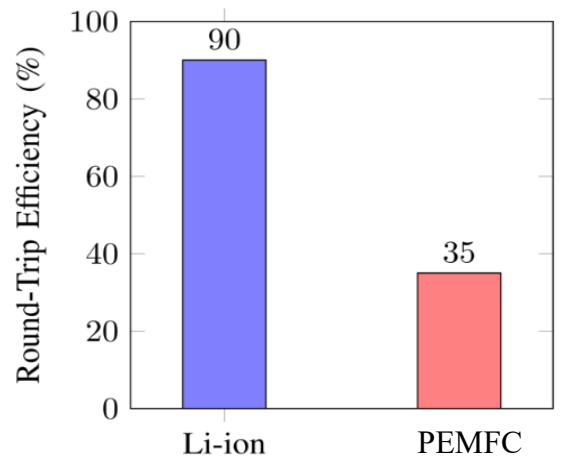


Figure 3 Rendement électrique (Li-Ion vs PAC)[5].

La pile à combustible MEP, quant à elle, offre une densité énergétique élevée grâce à l'hydrogène, mais présente une dynamique lente et une sensibilité marquée aux variations rapides de courant [7]. Pour cette raison, il est généralement admis que la PAC doit fonctionner autour d'un point de fonctionnement relativement stable, fournissant un flux de puissance quasi constant. Toute sollicitation dynamique excessive est susceptible d'entraîner une dégradation accélérée des performances électrochimiques et mécaniques de la pile ce qui est lié majoritairement à la dégradation du catalyseur de la MEP [2], [3].

Dans l'architecture étudiée, la batterie assure donc le maintien du bus continu et la gestion des transitoires, tandis que la pile à combustible alimente le système sur le long terme.

Cette complémentarité justifie le stockage hybride malgré la complexification du groupe motopropulseur.

Chapitre 2. Partie théorique

2.1 Modélisation de la pile à combustible PEM (conditions nominales)

La modélisation de la pile à combustible constitue une étape essentielle pour le développement d'un émulateur réaliste. Dans le cadre de ce projet, la modélisation est réalisée sous conditions nominales de fonctionnement, sans prise en compte explicite des phénomènes de dégradation liés aux ondulations de courant ou au vieillissement à long terme.

2.1.1 Modèle complet, réactions électrochimiques

Une pile à combustible PEM repose sur la réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. À l'anode, l'hydrogène est oxydé selon la réaction (voir la Figure 4). Ces réactions dépendent de la température, de la pression et de l'humidité relative. Pour cette étude, les conditions nominales de la cellule avaient été prises et le combustible étant inépuisable afin d'éviter les problématiques d'approvisionnement et de débit.

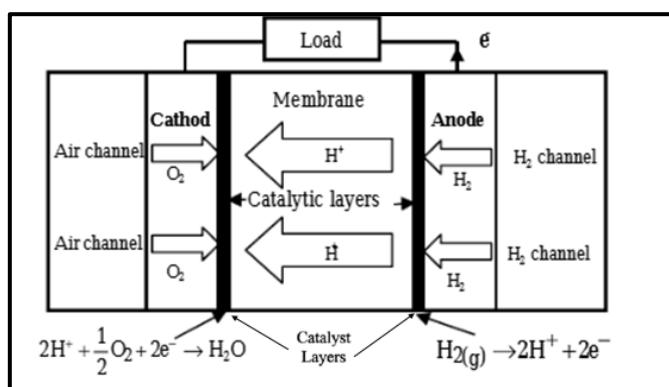


Figure 4 : Réaction oxydoréduction d'une PAC MEP [8].

La tension idéale de la cellule est déterminée par l'équation de Nernst (2.1.1)[9]

$$E_{th} = E_0 + B_1 \cdot (T_0 - T) + B_2 \cdot T \cdot \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right], \quad (2.1.1)$$

Tandis que la tension réelle est affectée par plusieurs chutes de tensions :

Chute d'activation V_{act} , qui représente la tension requise pour lancer les réactions chimiques dans l'anode et la cathode (brisé et créer les liaisons chimiques) (effet prononcé pour des courants faibles) [9]

$$V_{act} = \left(\frac{R \cdot T}{\alpha \cdot z \cdot F} \right) \cdot \ln \left(\frac{I_{fc}}{I_0} \right) : \quad (2.1.2)$$

La chute de concentration V_{con} , qui représente la concentration des gradients créés par la diffusion des canaux d'approvisionnement jusqu'aux électrodes (effet prononcé pour des courants forts) [9].

$$V_{con} = \left(\frac{R \cdot T}{z \cdot F} \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{fc}}{I_{max}} \right), \quad (2.1.3)$$

La chute de tension ohmique V_{ohm} , liée à la résistance série des électrodes et de la membrane MEP[9].

$$V_{ohm} = I_{fc} \cdot R_{ohm} \quad (2.1.4)$$

De plus, la PAC MEP présente un comportement capacitif lié à l'accumulation des charges entre la membrane et les deux électrodes (double-layer charging effect)[9].

$$\frac{d(V_{act} + V_{con})}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_{fc} - \frac{1}{\tau} \cdot (V_{act} + V_{con}), \quad (2.1.5)$$

$$\tau = C \cdot R_a = C \cdot \left(\frac{V_{act} + V_{con}}{I_{fc}} \right) \quad (2.1.6)$$

La tension aux bornes de la PAC est déterminée par l'équation

$$V_{fc} = E_{th} - V_{ohm} - V_{act} - V_{con}, \quad (2.1.7)$$

Paramètres électriques globaux

Paramètre	Symbole	Définition
Tension de la pile	V_{fc}	Tension de sortie de la pile à combustible PEM
Courant de la pile	I_{fc}	Courant délivré par la pile
Courant limite	I_l	Courant maximal atteignable lorsque la réaction est limitée par le transport de matière

Paramètre	Symbol	Définition
Courant d'échange	I_0	Courant électrochimique à l'équilibre

Paramètres thermodynamiques et constants physiques

Paramètre	Symbol	Définition
Constante de Faraday	F	Charge électrique par mole d'électrons (96485 C/mol)
Constante des gaz parfaits	R	Constante universelle des gaz
Température de fonctionnement	T	Température de la pile PEM

Paramètres liés aux pressions et aux gaz réactifs

Paramètre	Symbol	Définition
Pression de l'hydrogène	P_{H_2}	Pression partielle de l'hydrogène à l'anode
Pression de l'oxygène	P_{O_2}	Pression partielle de l'oxygène au cathode
Pression de l'eau	P_{H_2O}	Pression partielle de la vapeur d'eau
Constantes expérimentales	B_1, B_2	

2.1.2 Modèle courant–tension (I–V)

Dans une optique d'émulation temps réel, un modèle simplifié basé sur la caractéristique courant–tension de la pile est souvent privilégié. Cette caractéristique présente trois zones principales :

- La zone d'activation, dominée par les pertes cinétiques aux faibles courants ;
- La zone ohmique, où la tension décroît de manière quasi linéaire avec le courant ;
- La zone de concentration, associée aux limitations de transport de masse à forts courants.

Les zones d'activation et de concentration correspondent à des régimes de fonctionnement à éviter, car elles entraînent une baisse significative du rendement et une sollicitation accrue de la pile [10], [11]. Le comportement global de la PAC peut être assimilé à une simple source idéale avec une résistance série en région ohmique ou un « Look up » 1D entre le courant et la tension sur la totalité de la plage de fonctionnement. Cela dit, les

caractéristiques courant-tension ne suffisent pas pour modéliser la dynamique de la pile [1], [5], [7].

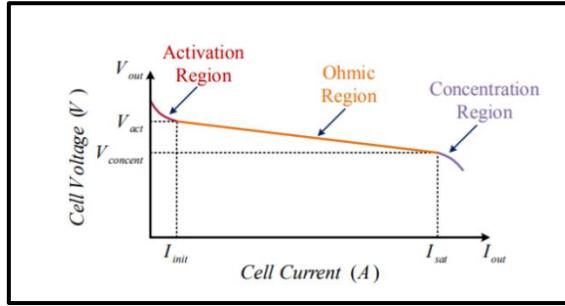


Figure 5 : Caractéristique IV d'une PAC MEP [10].

2.2 Émulateurs de pile à combustible

Un émulateur de pile à combustible vise à reproduire le comportement électrique d'une PAC réelle à l'aide de sources électriques pilotées, des convertisseurs statiques ou des circuits électriques spécialisés. Plusieurs approches sont recensées dans la littérature, allant de modèles purement électriques basés sur des circuits équivalents à des structures plus complexes intégrant des modèles dynamiques avancés.

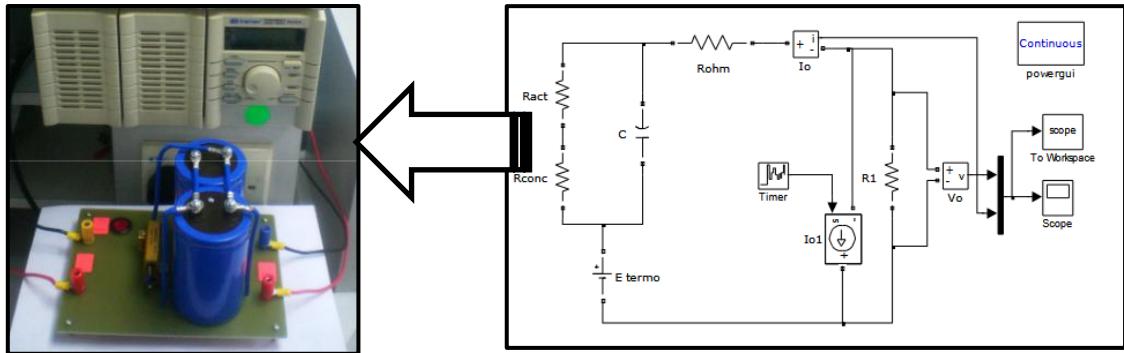


Figure 6 : Simulateur HIL basé sur le modèle du circuit électrique équivalent (Valable en région ohmique seulement) [8].

Afin de modéliser la dynamique de la PAC, et compte tenu du fait que la capacité d'un MEP typique est de l'ordre du farad (environ 1 F [8]), ainsi que de l'indisponibilité de condensateurs de telles valeurs en salle de travaux pratiques, l'émulation est réalisée dans ce projet à l'aide de convertisseurs DC-DC commandés. Ces convertisseurs permettent d'imposer une tension ou un courant conforme au modèle de la PAC, tout en assurant une interface efficace avec le bus continu du HESS.

2.2.1 Structure retenue pour l'émulation (Système PAC – Bus DC)

L'architecture retenue est un convertisseur Buck asservi en tension associé à un boost asservi en courant et connecté au bus DC représenté par une source idéale (voir la Figure 7).

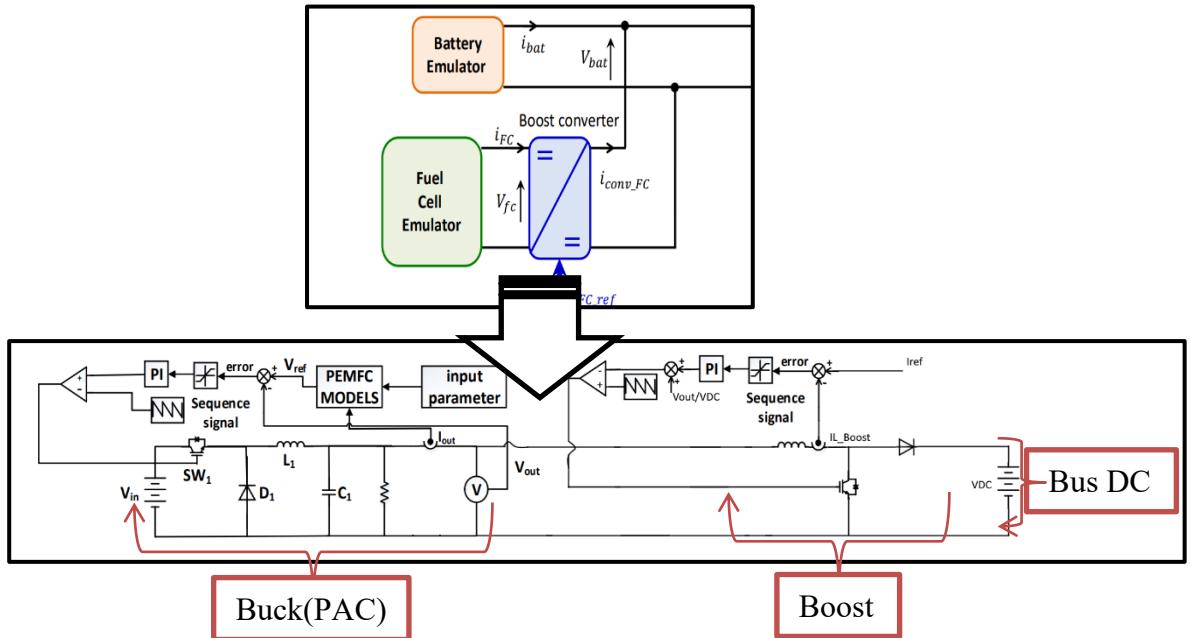


Figure 7 : Schéma global du système d'émulation [4], [12]

Cette structure présente l'avantage de coupler dynamiquement les courants des deux convertisseurs. En effet, le courant absorbé par le convertisseur Boost est directement lié au courant circulant dans l'inductance du convertisseur Buck. Par conséquent, l'asservissement de cette grandeur permet indirectement de contrôler le courant du Buck, ce qui a conduit au choix d'une commande en mode tension afin de simplifier la structure de contrôle globale.

Néanmoins, cette architecture présente un inconvénient majeur : l'absence de protection intrinsèque contre les courts-circuits du côté du condensateur de sortie du convertisseur Buck.

2.2.2 Dimensionnement des composants convertisseur Buck (CCM Seulement)

Le dimensionnement des composants passifs du convertisseur Buck est réalisé à partir des contraintes sur les ondulations de courant dans l'inductance et sur les ondulations de tension aux bornes du condensateur de sortie.

L'expression de l'ondulation de courant dans l'inductance du convertisseur Buck peut être établie à partir du principe d'équilibre volt-seconde appliqué à l'inductance (voir (2.1.8)).

$$\Delta I_{Lbuck} = \frac{(1 - \alpha_{\Delta max})\alpha_{\Delta max}E_{buck}}{L_{buck}f_{dec}} \quad (2.1.8)$$

L'expression de l'ondulation de tension aux bornes du condensateur de sortie peut être obtenue à partir du principe d'équilibre ampère-seconde appliquée au condensateur, en intégrant le courant capacitif sur une demi-période de découpage (voir (2.1.9)).

$$\Delta V_{Sbuck} = \frac{\Delta I_{Lbuck}}{8C_{buck}f_{dec}} \quad (2.1.9)$$

Paramètres

Paramètre	Description
ΔI_{Lbuck}	Ondulation de courant dans l'inductance du convertisseur buck.
$\alpha_{\Delta max}$	Facteur de modulation lié à l'amplitude maximale de l'ondulation du courant.
E_{buck}	Tension d'entrée du convertisseur buck.
L_{buck}	Inductance du convertisseur buck.
f_{dec}	Fréquence de découpage (ou fréquence de commutation) du convertisseur.
ΔV_{Sbuck}	Ondulation de tension aux bornes du condensateur de sortie.
C_{buck}	Capacité du condensateur de sortie du convertisseur buck.

2.2.3 Asservissement du convertisseur Buck – Mode Tension (modèle du premier ordre)

Certaines hypothèses doivent être posées afin de modéliser un circuit Buck comme un système du premier ordre.

Hypothèses et assertions :

1. Modèle au sens des valeurs moyennes (tension aux bornes de la diode vaut $\alpha(t).E$).
2. C_{buck} suffisamment grand afin de pouvoir négliger les ondulations de tension.
3. Dynamique du condensateur négligé durant une période de découpage ($\langle i_c \rangle = i_c = 0$ et $I_l = I_l'$ voir la Figure 8).
4. Le courant tiré par le convertisseur boost est considéré comme une **perturbation**.

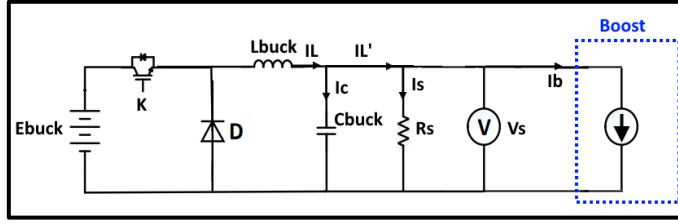


Figure 8 : Circuit Buck.

En prenant en compte les hypothèses ci-dessus, l'expression de la tension peut être établie comme suit

$$V_s(s) = \frac{\frac{ER_s}{R_s + R_L}}{\frac{L}{R_s + R_L}s + 1} \alpha(s) - \frac{\frac{R_L R_s}{R_s + R_L} \left(\frac{L}{R_L} s + 1 \right)}{\frac{L}{R_L + R_s}s + 1} I_b(s) \quad (2.1.10)$$

En négligeant la perturbation, voici la fonction de transfert du système à asservir devient :

$$\frac{V_s(s)}{\alpha(s)}|_{I_b(s)=0} = \frac{\frac{ER_s}{R_s + R_L}}{\frac{L}{R_s + R_L}s + 1} = \frac{K_{buck}}{\tau_{buck}s + 1} \quad (2.1.11)$$

En employant la méthode d'annulation pole-zéro, les gains peuvent être calculés pour un correcteur PI afin d'imposer un temps de réponse $TR5\%$ qui répond au cahier des charges.

$$\begin{cases} Ki_{buck} = \frac{3}{TR5\%_{buck} K_{buck}} \\ Kp_{buck} = \tau_{buck} Ki_{buck} \end{cases} \quad (2.1.12)$$

Cette méthode présente toutefois plusieurs inconvénients. En premier lieu, aucune valeur de la résistance série R_s ne permet de garantir formellement que le convertisseur se comporte strictement comme un système du premier ordre, comme discuté à la section 2.2.4. De plus, il n'existe pas de critère permettant de déterminer une valeur optimale de R_s assurant une réduction significative de l'impact des perturbations sans dégrader le rendement du convertisseur. En pratique, cela conduit à l'utilisation d'une résistance R_s de faible valeur, au prix d'une augmentation des pertes (Courant $I_s > 2I_b$). Enfin, la dynamique de la perturbation observée expérimentalement diffère de celle anticipée lors de l'analyse théorique, comme détaillé à la section 3.1.1.

2.2.4 Asservissement du convertisseur Buck – Mode Tension (modèle du second ordre)

Certaines hypothèses doivent être posées afin de modéliser un circuit Buck comme un système du second ordre **sur-amorti**.

Hypothèses et assertions :

- Modèle au sens des valeurs moyennes (tension aux bornes de la diode vaut $\alpha(t).E$).

A partir des hypothèses précédentes et de la loi des mailles, l'expression de $V_s(s)$ peut être établie.

$$V_s(s) = \frac{E}{LCs^2 + \left(\frac{L}{R_S}s + R_L\right)s + \frac{R_L}{R_S} + 1} \alpha(s) - \frac{\left(\frac{L}{R_L}s + 1\right)R_L}{LCs^2 + \left(\frac{L}{R_S}s + R_L\right)s + \frac{R_L}{R_S} + 1} I_b(s) \quad (2.1.13)$$

Pour $R_L = 0\Omega$:

$$V_s(s) = \frac{E}{LCs^2 + \left(\frac{L}{R_S}s\right)s + 1} \alpha(s) - \frac{(Ls + 1)}{LCs^2 + \left(\frac{L}{R_S}s\right)s + 1} I_b(s) \quad (2.1.14)$$

L'objectif est d'amortir le système en imposant un coefficient $l \geq 10$ afin d'avoir $P_2 = P_1.l$ (pole rapide) et donc un comportement semblable à un 1^{er} ordre.

$$\frac{V_s(s)}{\alpha(s)}|_{I_b(s)=0} = \frac{K_{buck} \omega_n^2}{(s + P_1)(s + P_1.l)} \quad (2.1.15)$$

$$\begin{cases} \zeta_{sur-amortissement} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{l-1}{l+1}\right)^2}} \\ R_{S_{optimal}} = \frac{1}{2\zeta_{sur-amortissement}} \sqrt{\frac{L_{buck}}{C_{buck}}} \end{cases} \quad (2.1.16)$$

Par la suite, le pôle P_1 sera annulé par le pôle $P_i = K_i/K_p$ du correcteur PI (rapport K_i/K_p fixe). Puis le gain K_p sera employé afin d'agir sur la marge de phase pour satisfaire les critères suivants (voir la Figure 9) :

- Marge de gain > 6dB
- Marge de phase > 45°

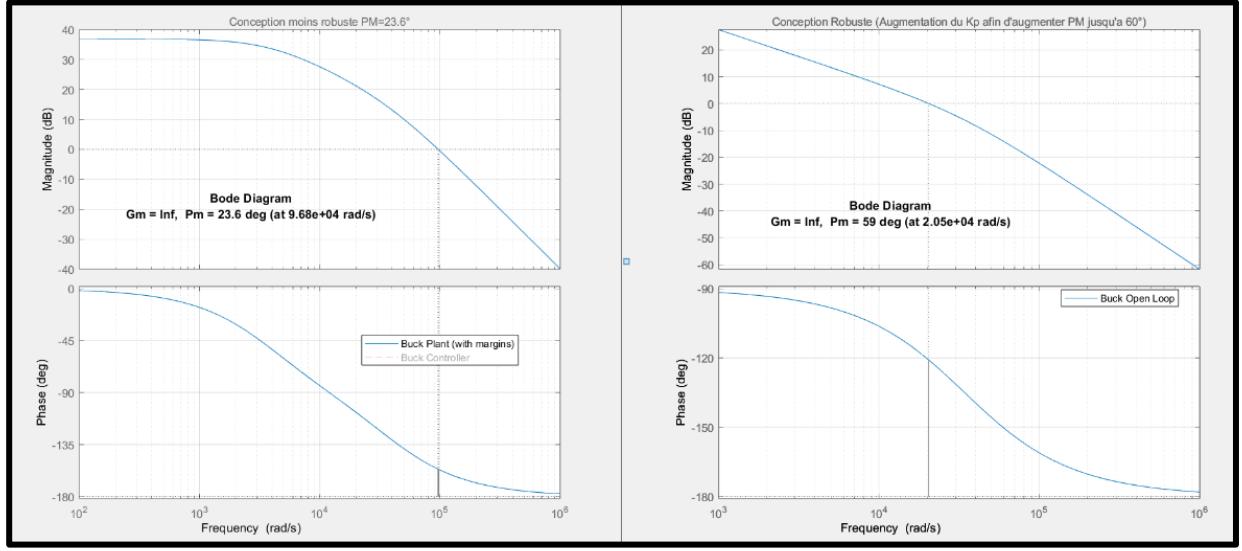


Figure 9 : Analyse fréquentielle en boucle ouverte du modèle (Convertisseur + Correcteur) Conception robuste après avoir agi sur Kp.

De plus, le temps de réponse sera analysé afin de vérifier qu'il correspond à notre cahier de charge.

Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de déterminer une valeur optimale de la résistance R_s et de garantir une commande robuste par l'augmentation de la marge de phase du système. De plus, le modèle représente de manière fidèle la dynamique de la perturbation 3.1.1.

2.2.5 Dimensionnement des composants convertisseur Boost (CCM Seulement)

Le dimensionnement des composants passifs du convertisseur Boost est réalisé à partir des contraintes sur les ondulations de courant dans l'inductance.

L'expression de l'ondulation de courant dans l'inductance du convertisseur Boost peut être établie à partir du principe d'équilibre volt-seconde appliqué à l'inductance

$$\Delta I_b = \frac{\alpha V_{FC}}{L_{boost} f_{dec}} \quad (2.1.17)$$

2.2.6 Asservissement du convertisseur Boost

Certaines hypothèses doivent être posées afin d'asservir le circuit Boost.

Hypothèses et assertions :

- Modèle au sens des valeurs moyennes (tension aux bornes du transistor vaut $\alpha(t) \cdot V_{DC}$).

- La dynamique de V_{DC} peut être considérée comme lente ou négligeable vis-à-vis de la dynamique du courant inductif (système du premier ordre).

En prenant en compte les hypothèses ci-dessus, l'expression de la fonction de transfert du courant peut être établie comme suit

$$\frac{I_b(s)}{-(2\alpha(s) - 1)} = \frac{\frac{V_{DC}}{R_{Lboost}}}{\frac{L}{R_{Lboost}}s + 1} = \frac{K_{boost}}{\tau_{boost}s + 1} \quad (2.1.18)$$

En employant la méthode d'annulation pole-zéro, les gains peuvent être calculés pour un correcteur PI afin d'imposer un temps de réponse $TR5\%$ qui répond au cahier des charges.

$$\begin{cases} Ki_{boost} = \frac{3}{TR5\%_{boost} K_{boost}} \\ Kp_{boost} = \tau_{boost} Ki_{boost} \end{cases} \quad (2.1.19)$$

Afin de contrôler directement la puissance fournie par la pile à combustible, le convertisseur Boost est commandé en courant. La grandeur asservie est le courant inductif i_b , qui correspond au courant prélevé à la PAC. La puissance fournie par la pile est alors donnée par :

$$P_{FC} = V_{FC} \times i_b \quad (2.1.20)$$

Cette approche présente plusieurs avantages majeurs. Elle permet d'imposer directement le point de fonctionnement de la PAC sur sa caractéristique courant-tension ainsi que de limiter les ondulations de courant côté pile.

2.3 Gestion des flux de puissance

La gestion des flux de puissance constitue un prolongement naturel de l'émulateur de FCEV. Une stratégie de type « charge sustaining » est généralement adoptée, visant à maintenir l'état de charge de la batterie autour d'une valeur de consigne tout au long du cycle de conduite [11].

Dans ce cadre, la pile à combustible fournit la puissance moyenne requise par le véhicule, tandis que la batterie absorbe ou fournit la puissance différentielle liée aux transitoires. Cette approche permet de reproduire fidèlement le fonctionnement d'un FCEV réel.

Chapitre 3. Simulation

3.1 Méthode de travail

La démarche adoptée repose principalement sur la simulation de l'ensemble du système afin d'accélérer le prototypage et d'analyser le comportement global avant toute expérimentation. Des tests unitaires ont également été réalisés pour isoler les sous-systèmes, faciliter le débogage et sécuriser l'intégration finale.

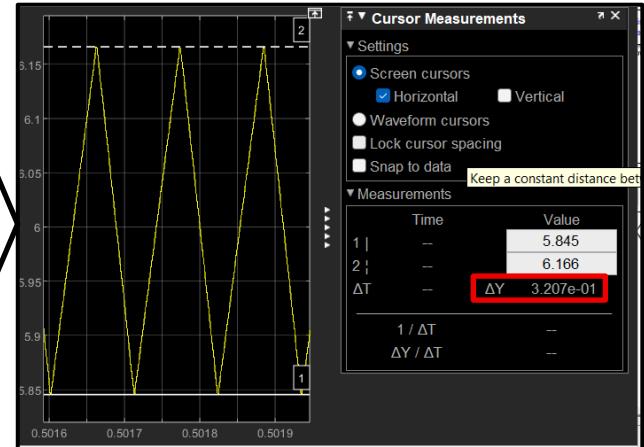
3.1.1 Tests unitaires

Des simulations en boucle ouverte sont réalisées afin de valider le dimensionnement de chaque convertisseur. L'asservissement est ensuite validé en trois étapes successives :

- **Buck – mode tension**
Cahier des charges : dépassement nul, $T_{5\%} \leq 1\text{ms}$.
- **Boost – mode courant**
Cahier des charges : dépassement nul, $T_{5\%} \leq 1\text{ms}$.
- **Système complet**
Validation réalisée avec des profils de puissance fictifs, puis à l'aide d'un cycle WLTC normalisé par rapport au courant nominale de l'émetteur physique (6A).

Validation du dimensionnement

$$\Delta Y(\text{Courant}) = 0.32 \leq \Delta I_{L\text{boost}} \max |_{\alpha=0.55} = 0.33$$



$$\Delta Y(\text{Tension}) = 3.16V \leq \Delta V_{buck} \max = 3.16V$$

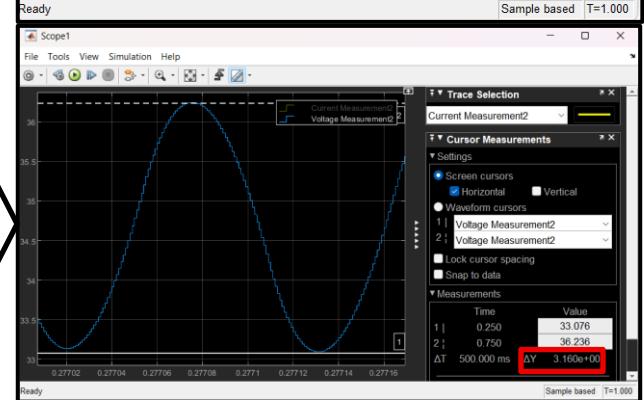


Figure 10 : Validation du dimensionnement Boost et Buck.

Validation de l'asservissement (Boost et Buck)

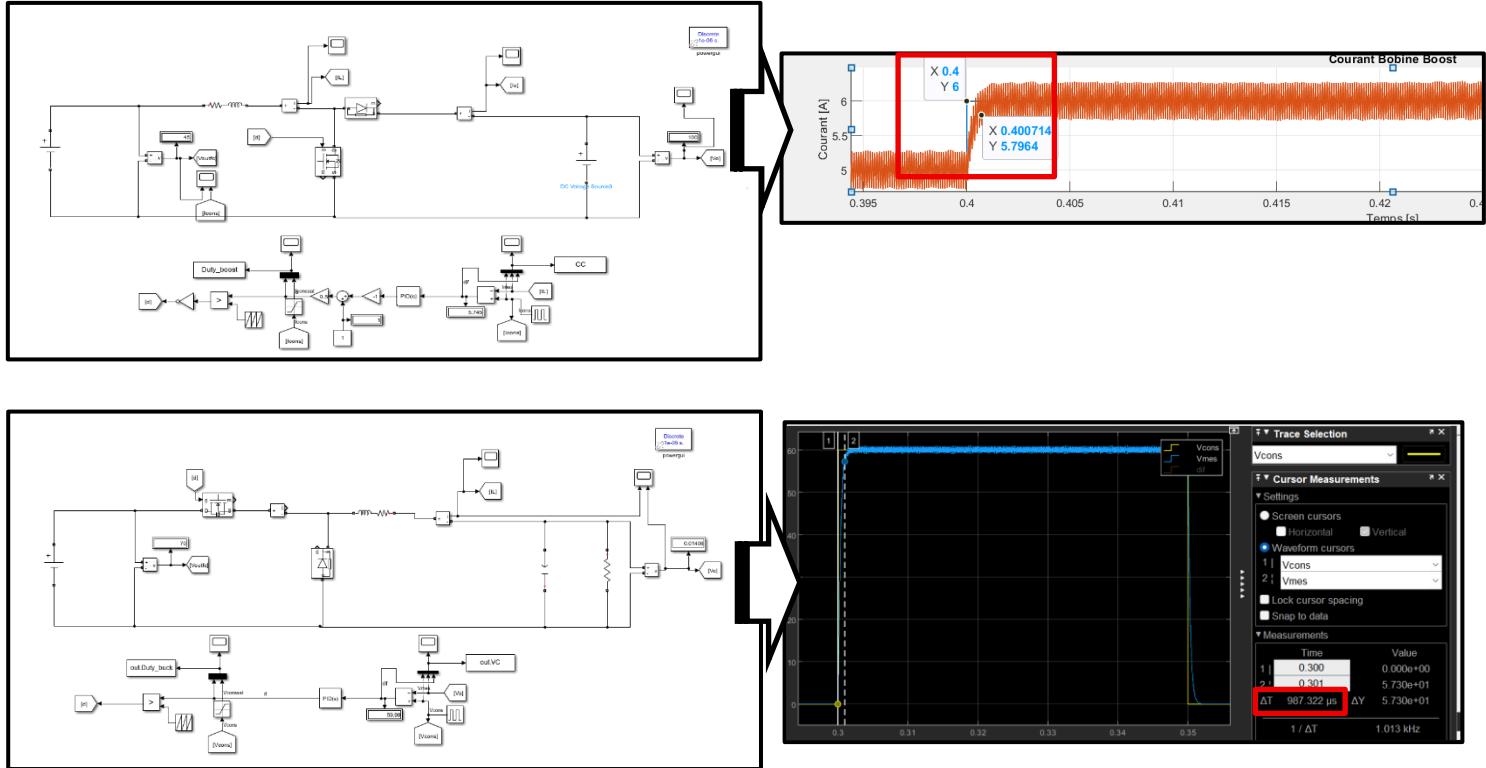


Figure 11 : Validation de l'asservissement de tension et de courant.

$T5\% \leq 1mS$

Validation du système en entier pour des données fictives

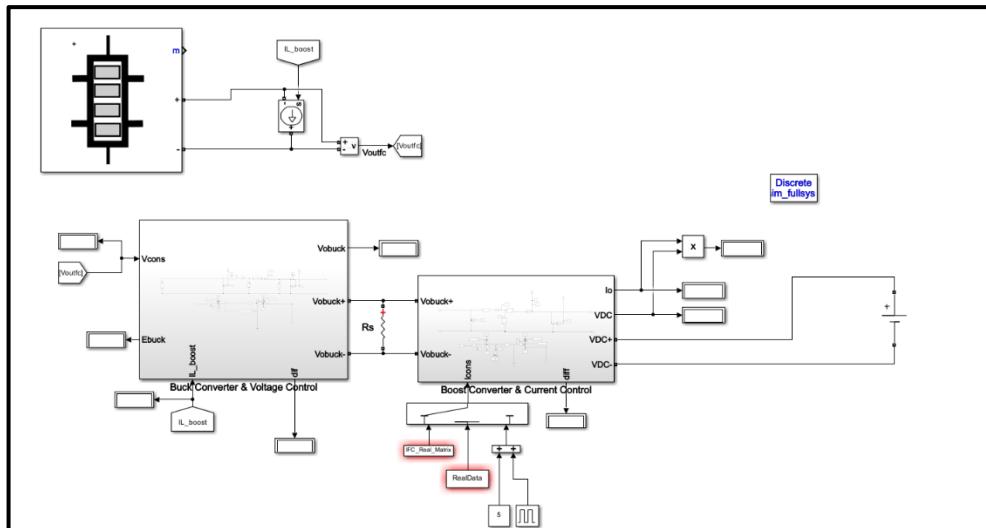


Figure 12 : Système d'émulation sous Simulink. (Le booléen RealData permet de choisir entre les données fictives (créneaux) ou WLTC).

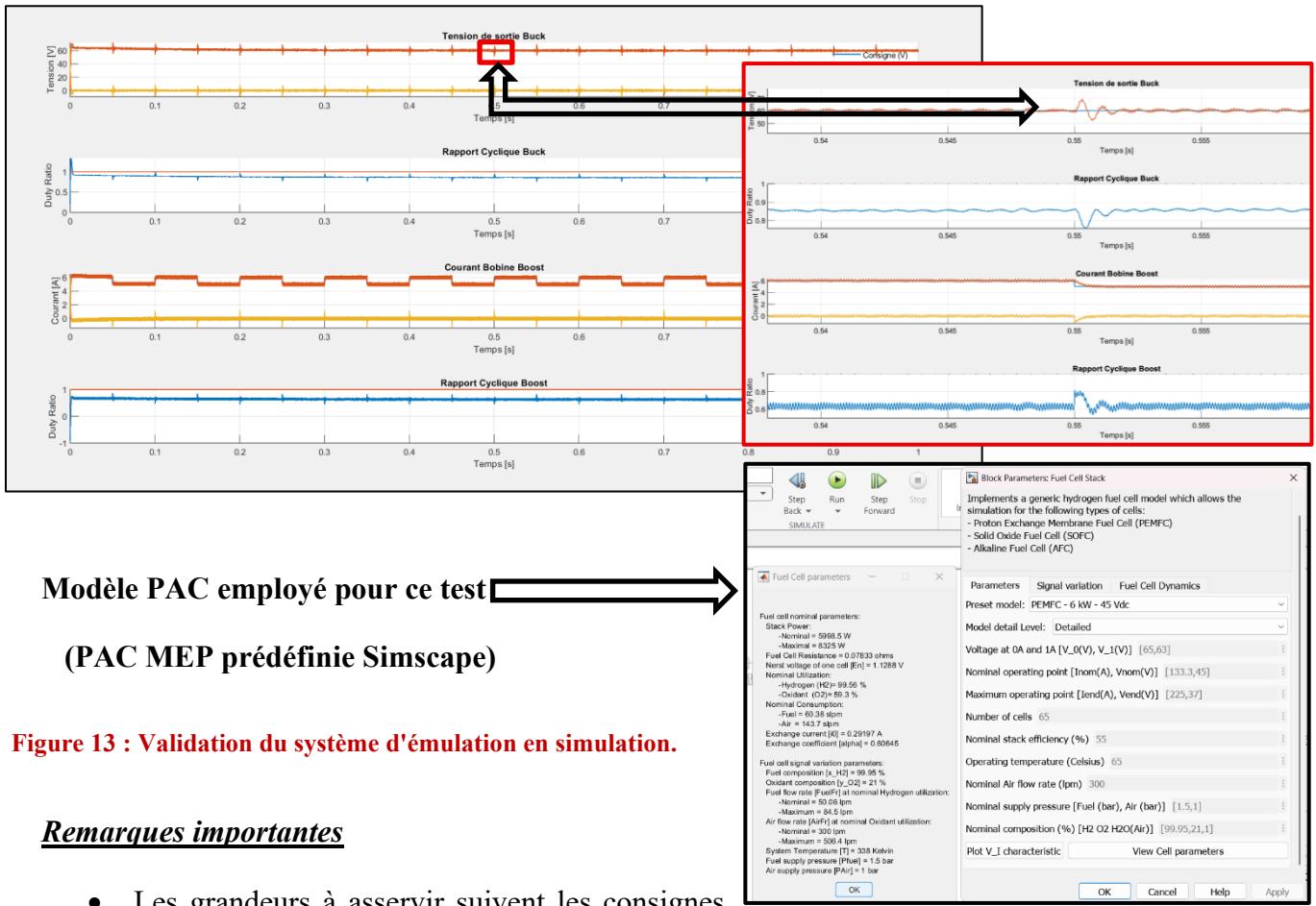


Figure 13 : Validation du système d'émulation en simulation.

Remarques importantes

- Les grandeurs à asservir suivent les consignes selon le cahier des charges.
- La dynamique de la perturbation (ondulation de tension induite par les appels de courants vu sur la Figure 13) est semblable à un système du second ordre avec un zéro. Ce qui confirme que le modèle de la section 2.2.4 est plus réaliste.
- Afin de réduire l'impact de cette perturbation, il suffit d'augmenter la capacité du condensateur Buck (voir la Figure 14).

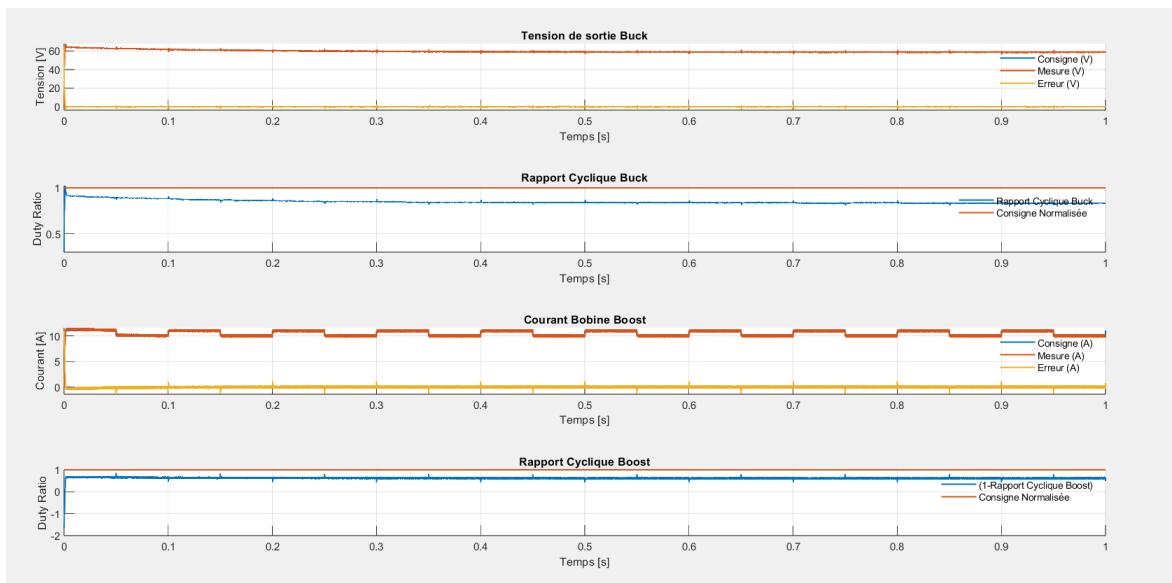


Figure 14 : Augmentation de la capacité du condensateur Buck.

3.2 Résultats de simulation avec données WLTC

Modèle PAC prédéfini avec un courant nominal de 133A



Figure 15 : Modèle PAC prédéfini (133A nom).

Même modèle avec un courant nominal de 5A

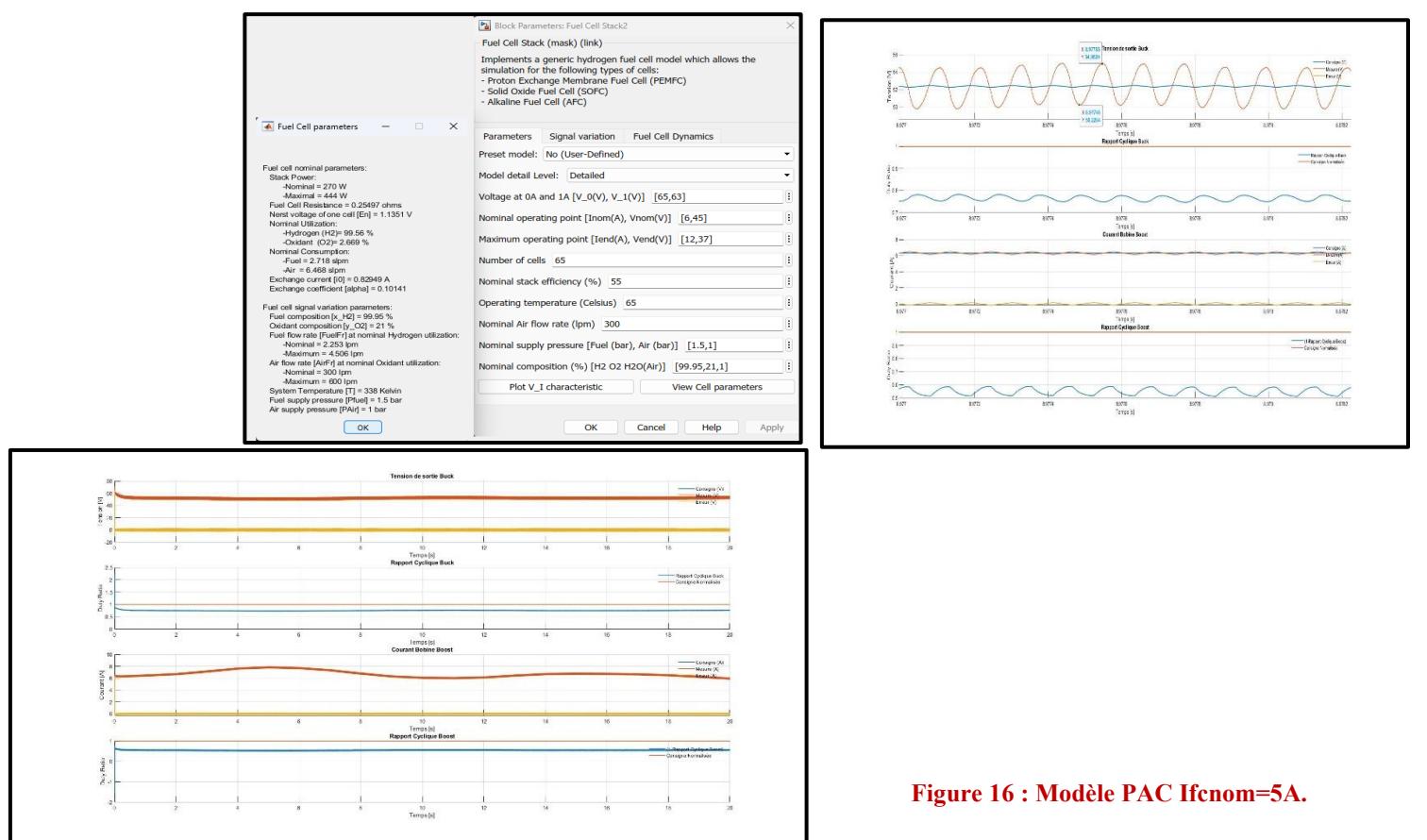


Figure 16 : Modèle PAC Ifcnom=5A.

3.2.1 Discussion

Le système développé est capable de suivre le courant de consigne issu du cycle WLTC ainsi que la consigne générée par le modèle de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM). Les ondulations de courant imposées par le convertisseur Boost sont directement prélevées sur la pile à combustible et se répercutent sur la tension fournie par le modèle PAC, une attention particulière doit être portée à leur amplitude, celles-ci étant susceptibles de contribuer à la dégradation de la pile à combustible, comme indiqué dans la littérature [2], [3]. De plus, il est apparent que plus la résistance série augmente (courant nominal plus bas) l'ondulation de tension induite par l'ondulation du courant boost est plus importante.

La dynamique de perturbation mise en évidence lors des tests avec des profils fictifs n'apparaît pas de manière significative lors des simulations basées sur le cycle WLTC. Ce comportement s'explique par le caractère relativement progressif des variations de courant du cycle WLTC, nettement moins brusques que celles imposées artificiellement lors des phases de validation préliminaire.

Chapitre 4. Implémentation

4.1 Définition des ordres de grandeurs

La définition des ordres de grandeurs constitue une étape essentielle dans la mise en œuvre de l'émulateur de pile à combustible. En effet, elle permet de fixer des valeurs cohérentes de tension, de courant et de puissance afin d'assurer le bon fonctionnement du système.

Dans le cadre de ce projet, l'émulation est effectuée à échelle réduite. Il est donc nécessaire de choisir des ordres de grandeurs réalistes pour une pile à combustible utilisée dans une application de type FCEV. Ces valeurs doivent toutefois rester compatibles avec les limites du matériel disponible en laboratoire. Cela permet de travailler dans des conditions réalistes sans dépasser les limites des convertisseurs et des composants utilisés.

La définition des ordres de grandeurs permet également d'assurer la cohérence entre le modèle de la pile à combustible, les lois de commande et le comportement attendu de l'émulateur. Elle facilite ainsi l'analyse du fonctionnement du système et la validation des convertisseurs Buck et Boost mis en œuvre dans le cadre du projet.

Dans un premier temps, des ordres de grandeurs initiaux ont été définis à partir de valeurs typiques de véhicules électriques à hydrogène réels. Une puissance de référence d'environ 35 kW et une tension de bus de 400 V ont ainsi été considérées, puis ramenées à une échelle de laboratoire selon le support de cours. La puissance a été divisée par un facteur d'environ 100, conduisant à une puissance de l'ordre de 350 W, tandis que la tension du bus a été ramenée à une valeur proche de 48 V, ce qui permet d'estimer un courant maximal de l'ordre de 7 à 8 A. Les paramètres liés à la chute de tension interne, à la rampe de puissance et au rendement ont également été choisis à partir de valeurs typiques de piles à combustible de type PEMFC.

Ces valeurs initiales ont servi de base pour le dimensionnement de l'émulateur et la mise en place des premiers modèles et lois de commande. Cependant, les premières simulations ont montré que ces choix n'étaient pas totalement adaptés en termes de stabilité et de dynamique du convertisseur Buck. Les ordres de grandeurs ont donc été ajustés afin d'obtenir un fonctionnement plus stable et mieux maîtrisé. Les valeurs finales retenues, présentées dans la suite du rapport, permettent ainsi de concilier réalisme du comportement de la pile à combustible, contraintes matérielles et faisabilité expérimentale.

Les ordres de grandeurs ont également été définis de manière à rester cohérents avec les autres sous-systèmes du projet, à savoir les parties Batterie et chaîne de traction étudiées par les autres groupes. La batterie présente une tension de sortie de l'ordre de **40 V** pour un courant maximal de **5 A**, tandis que la chaîne de traction repose sur un convertisseur Boost avec une tension de sortie visée de l'ordre de **60 V**. Dans ce contexte, la tension nominale choisie pour l'émulateur de pile à combustible, d'environ **45 V**, reste cohérente avec l'architecture globale du système.

Les valeurs retenues finalement pour ce projet sont les suivantes :

Paramètres du convertisseur Buck

Paramètre	Valeurs	Unité	Paramètre	Valeur	Unité
$T5_{buck}$	0.001000	s	ε_{buck}	1.739253	—
E_{buck}	70.000000	V	ε_{first_buck}	1.739253	—
V_{nom_buck}	45.000000	V	ω_{n_buck}	10800.00	rad/s

Paramètre	Valeurs	Unité	Paramètre	Valeur	Unité
L_{buck}	0.006481	H	$P1_{buck}$	-34152.598730	rad/s
R_{s_buck}	45.000000	Ω	$P2_{buck}$	-3415.259873	rad/s
C_{buck}	1.322751e-06	F	PPi_{buck}	3415.259873	rad/s
f_{dec_buck}	9000	Hz	$T5_{calc_buck}$	0.000878	s

Marges de stabilité – Convertisseur Buck

Marge	Valeur	Fréquence associée
Marge de gain	Inf dB	Inf rad/s
Marge de phase	59.03°	20498.16 rad/s

Paramètres du convertisseur Boost – Dimensionnement et commande

Paramètre	Valeur	Unité
$T5_{boost}$	0.001000	s
E_{boost}	45.000000	V
V_{DC_boost}	100.000000	V
L_{boost}	0.008333	H
R_{l_boost}	0.100000	Ω
f_{dec_boost}	9000	Hz
K_{p_boost}	0.250000	—
K_{i_boost}	3.000000	—

Spécifications des ondulations de courant et de tension

Grandeur	Expression	Valeur numérique	Grandeur	Expression	Valeur
----------	------------	------------------	----------	------------	--------

Grandeur	Expression	Valeur numérique	Grandeur	Expression	Valeur
V_{DC_boost}	—	100 V	V_{nom_buck}	—	45 V
I_{nom_boost}	—	6 A	I_{nom_buck}	—	6A
ΔI_{boost}	$0.1 \cdot I_{nom_boost}$	0.6 A	ΔI_{buck}	$0.05 \cdot I_{nom_buck}$	0.3A
ΔV_{boost}	$0.1 \cdot V_{DC_boost}$	10 V	ΔV_{buck}	$0.07 \cdot V_{nom_buck}$	3.15 V

4.2 Présentation de l'alimentation réversible et de l'émulateur physique

Dans le cadre de l'émulation de la pile à combustible, une alimentation réversible est utilisée afin de permettre un échange d'énergie bidirectionnel avec le bus continu. Ce type d'alimentation est capable de fonctionner aussi bien en mode source qu'en mode charge, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications de conversion de puissance et d'émission de sources électriques.

Une alimentation réversible permet de fournir une tension contrôlée au système, tout en étant capable d'absorber l'énergie lorsque le fonctionnement l'exige. Elle permet d'adapter facilement les conditions de fonctionnement tout en assurant la sécurité des équipements.

Dans le contexte de ce projet, ce dispositif a été envisagé pour pouvoir représenter l'environnement électrique du système et faciliter les tests des convertisseurs DC–DC dans des conditions contrôlées.



Figure 18 : Émulateur PAC (vue d'ensemble).



Figure 17 : Alimentation reversible en courant (Réseau DC).

4.3 Problèmes techniques lors de la manipulation

Lors de la réalisation du projet, des problèmes de stabilités ont été rencontrés lors des simulations. Ils étaient principalement liés à l'utilisation des blocs *To Workspace* pour sauvegarder les données en temps réel, ce qui sollicitaient fortement le système.

De plus, le temps de calcul imposé ($25\mu\text{S}$) était trop faible par rapport à la complexité du schéma, ce qui ne permettait pas au système d'exécuter l'ensemble des calculs dans le temps imparti.

La carte utilisée en salle de travaux pratiques est une carte d'interfaçage de type **Humusoft**, directement reliée au processeur de l'ordinateur. L'ensemble des calculs étant réalisé par le processeur du PC et non par la carte elle-même, la charge de calcul était donc trop importante, ce qui a entraîné des plantages du PC.

Ces contraintes ont nécessité une adaptation de la méthode de travail, en limitant l'enregistrement des données en temps réel et en ajustant les paramètres de simulation.

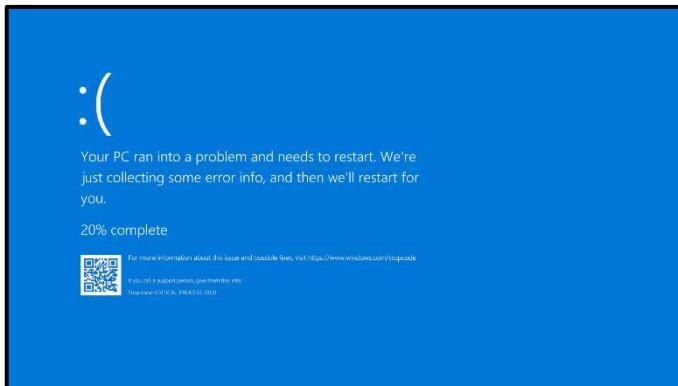


Figure 19 : Écran bleu de l'ordinateur lors de l'exécution en temps réel

4.4 Résultats de la manipulation

4.4.1 Discussion

Les résultats obtenus ont été constatés comme étant globalement en accord avec la simulation (Figure 22 et Figure 21). Sur la Figure 23 cependant, la perturbation liée à l'appel de courant n'a pas été observée, contrairement à ce qui avait été simulé, ce qui pourrait indiquer un niveau d'amortissement plus élevé.

Sur la Figure 20, il a été mis en évidence que la conception intégrant la dynamique du condensateur — modélisée comme un système du second ordre légèrement sous-amorti

pour le Buck — avec une marge de phase appropriée et une valeur optimale de R_s est efficace. Il a également été observé que le choix incorrect de R_s entraîne l'apparition d'oscillations.



Figure 20 : Test de l'asservissement de tension.

Jaune : Tension de sortie de l'émetteur

Bleu : Tension de référence du modèle PAC.

Rouge : Courant de référence.

Vert : Courant Boost asservi.



Figure 22 : Modèle PAC prédéfini

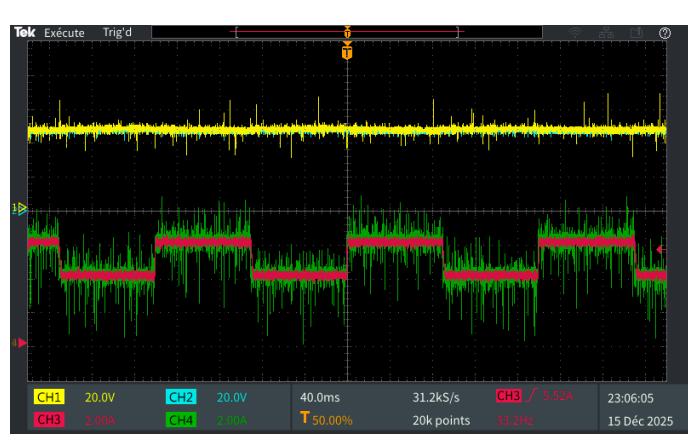


Figure 23 : Profiles fictifs.



Figure 21 : Modèle PAC 5A

Travaux futurs

- Une analyse plus rigoureuse des différentes stratégies de gestion du flux d'énergie.
- Des recherches supplémentaires sur les modèles de dégradation des piles à combustible.
- D'autres topologies HIL pour la pile à combustible seront explorées, par exemple l'approche par schéma électrique, qui présente l'avantage de ne générer aucune ondulation de courant ou de tension, à l'exception de celles induites par le Boost.
- Meilleure analyse quantitative de l'asservissement (Goodness of fit entre le modèle et la sortie de l'émulateur).

Conclusion

Le projet « Fuel Cell Electric Vehicle Emulation » a permis de concevoir et de mettre en œuvre un émulateur de pile à combustible destiné à une application de type FCEV. Le travail réalisé repose sur la modélisation électrique de la pile à combustible sous conditions nominales, ainsi que sur la conception et la commande de convertisseurs DC–DC permettant de reproduire son comportement électrique de manière réaliste.

L'utilisation conjointe des convertisseurs Buck et Boost a permis d'assurer l'émulation de la pile à combustible et son interface avec un bus continu modélisé comme une source de tension idéale. Le système développé constitue ainsi une plateforme pédagogique pertinente pour l'étude du fonctionnement des piles à combustible et des convertisseurs de puissance associés, dans un cadre simple et contrôlé.

Ce projet permet de mieux comprendre le rôle et les contraintes de fonctionnement d'une pile à combustible dans une architecture de type FCEV. Il offre également une base de travail pouvant être enrichie ultérieurement par l'intégration de modèles plus détaillés ou par l'amélioration des lois de commande.

References

- [1] H. Fathabadi, « Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack with a Li-ion battery to supply the power needs of a hybrid electric vehicle », *Renew. Energy*, vol. 130, p. 714-724, janv. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.06.104.
- [2] H. E. Wesseling, « Influence of Current Ripple on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Degradation ».
- [3] E. Pahon, M.-C. Péra, D. Bouquain, et D. Hissel, « Impact of current ripples on the durability of proton exchange membrane fuel cells based on two ageing datasets », *Data Brief*, vol. 45, p. 108601, déc. 2022, doi: 10.1016/j.dib.2022.108601.
- [4] D. A. Desreveaux, « Fuel Cell Electric Vehicle emulation ».
- [5] K. Bikmaz, « Li-ion batteries vs photovoltaic – regenerative hydrogen fuel cell: Comprehensive review », *Int. J. Energy Appl. Technol.*, vol. 11, n° 1, p. 100-107, déc. 2025, doi: 10.31593/ijeat.1730316.
- [6] A. R. Kabi et O. Hari Gupta, « Comparative analysis of Fuel Cell and Battery energy storages for rooftop PV systems », in *2025 IEEE 5th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, Jaipur, India: IEEE, juill. 2025, p. 1-6. doi: 10.1109/SEFET65155.2025.11255533.
- [7] « Proton Exchange Membrane Fuel Cell Transient Load Response ».
- [8] A. S. Samosir, M. Anwari, et A. H. M. Yatim, « A simple PEM fuel cell emulator using electrical circuit model », in *2010 Conference Proceedings IPEC*, Singapore, Singapore: IEEE, oct. 2010, p. 881-885. doi: 10.1109/IPECON.2010.5697090.
- [9] Á. Hernández-Gómez, D. Langarica-Cordoba, P. R. Martinez-Rodriguez, D. Guilbert, V. Ramirez, et B. Saldivar, « PEM Fuel Cell Emulators: A Review », *Electronics*, vol. 12, n° 13, p. 2812, juin 2023, doi: 10.3390/electronics12132812.
- [10] A. Rudra, P. S. Kulkarni, T. Sneha, et S. Ghosh, « Modelling and Analysis of a Fuel Cell Emulator for Integration in a Hybrid Photovoltaic System Using MATLAB-Simulink », in *2024 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, Bangalore, India: IEEE, juill. 2024, p. 1-6. doi: 10.1109/CONECCT62155.2024.10677139.
- [11] A. Desreveaux *et al.*, « Analytical solution for fuel cell electric vehicle energy management including a long-term predefined velocity profile », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 194, p. 152318, déc. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.152318.

Annexe

Lien du répertoire GitHub :

- [PEMFC-Battery-HESS-FCEV-HIL-Simulation-Project](#)