

**THÈSE DE DOCTORAT EN COTUTELLE**

**GESTION D'ÉNERGIE DES SYSTÈMES MULTI-PILES À COMBUSTIBLE BASÉE SUR LES  
PRONOSTICS DE DURÉES DE VIE RESTANTES POUR UNE APPLICATION AU TRANSPORT  
AUTOMOBILE**

**THÈSE PRÉSENTÉE À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES  
ET  
L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DU  
DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE**

**PAR  
RÉNÉ BANKATI**

**MOIS ANNÉE  
(MAI 2024)**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (PH.D.)

**Direction de recherche :**

---

Loïc Boulon directeur de recherche

---

Samir Jemei codirecteur de recherche

**Jury d'évaluation**

---

Maude Blondin, Université Sherbrooke Présidente

---

Catherine Cadet, Université Grenoble Alpes Évaluatrice

---

Hamid Gualous, Université Caen Basse-Normandie Évaluateur

---

Loïc Boulon, UQTR Directeur

---

Samir Jemei, Université Franche-Comté Codirecteur

Thèse soutenue le 30 avril 2024 à Belfort



**UNIVERSITÉ DE  
FRANCHE-COMTÉ**



**THESE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE  
FRANCHE-COMTE**

**PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ ET L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À  
TROIS-RIVIÈRES**

Ecole doctorale n°37

École doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Doctorat en Génie Électrique

Par

M. Wabi René BANKATI

**Gestion d'énergie des systèmes multi-piles à combustible basée sur les pronostics de durées de vie  
restantes pour une application au transport automobile**

Thèse présentée et soutenue à Belfort, le 30 avril 2024

Composition du Jury :

Mme. BLONDIN Maude	Professeure, Université de Sherbrooke	Présidente
Mme. CADET Catherine	Maîtresse de conférences, Université Grenoble Alpes	Rapporteuse
M. GUALOUS Hamid	Professeur, Université de Caen Basse-Normandie	Rapporteur
M. JEMEI Samir	Professeur, Université de Franche-Comté	Directeur de thèse
M. BOULON Loïc	Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières	Codirecteur de thèse



**Titre:** Gestion d'énergie des systèmes multi-piles à combustible basée sur les pronostics de durées de vie restantes pour une application au transport automobile.

**Mots clés:** Système multi-piles à combustible, pronostic, durée de vie restante, gestion d'énergie, véhicule à hydrogène.

**Résumé:** Les effets du réchauffement climatique tels que l'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre, l'éloignement progressif des extrêmes climatiques, l'élévation du niveau moyen des mers et océans, etc., sont en grande partie liés à l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine dans l'atmosphère. À l'échelle mondiale, certains secteurs d'activités économiques contribuent à ce fléau de manière plus importante que d'autres. C'est notamment le cas du secteur des transports qui est responsable à lui tout seul de 25% des émissions mondiales de GES, d'après le rapport publié en 2020 par l'AIE. Avec ce pourcentage, le transport représente le second secteur économique le plus polluant après la production de l'énergie électrique. Une étude statistique plus poussée a révélé que le transport routier serait le mode de transport qui émet le plus de GES dans ce secteur. En France et au Canada par exemple, 94% et 70% des émissions provenant des transports sont respectivement attribuées au trafic routier d'après le rapport publié en 2020 par « l'INSEE, France » et d'après le rapport d'inventaire national 1990-2019 d'« Environnement et changement climatique, Canada ».

Pour réduire l'empreinte carbone du transport routier, l'utilisation des véhicules à hydrogène semble être une idée très captivante et complémentaire des véhicules électriques. Cependant, certains verrous technologiques tels que la courte durée de vie des piles à combustible (PAC), principale source de puissance des véhicules à hydrogène, s'ajoutent au problème de faible niveau de développement du réseau de distribution de l'hydrogène qui freine la commercialisation des véhicules à hydrogène.

Le concept de système de puissance modulaire appliqué aux PAC et qui a été introduit dans la littérature il y'a de cela dix ans, se révèle être

particulièrement intéressant à étudier pour améliorer non seulement le critère de durabilité, mais aussi ceux de la tolérance aux pannes et du rendement énergétique des systèmes PAC. L'idée globale autour de ce concept consiste à associer plusieurs petits modules de PAC (la PAC et ses auxiliaires) de puissances modérées au lieu d'utiliser un seul et unique gros module de PAC de très forte puissance. Le cas échéant, un système multi-PAC est obtenu et le défis principal ainsi mis en jeu est celui de la gestion d'énergie. En effet, la gestion d'énergie est un élément essentiel dont dépendent toutes les performances qu'un système multi-PAC peut offrir.

De grandes avancées ont été réalisées au cours de cette dernière décennie dans certains domaines de recherche tels que celui du PHM « *prognostic and Health Management* » pour permettre aux SGE de systèmes multi-PAC de prendre les décisions de gestion d'énergie convenables quant à la durabilité de ces systèmes. Cependant, à ce jour, très peu de SGE basées sur le pronostic apparaissent dans la littérature. Pour cela, une SGE basée sur les pronostics de durées de vie restantes (RUL - « *Remaining Useful Life* ») des PAC est proposée dans cette thèse pour les systèmes multi-PAC, dans le cadre d'une application automobile.

La SGE proposée a été validée sur la base de simulations numériques réalisées dans l'environnement Matlab/ Simulink, sur un système multi-PAC composé de quatre PAC de 500 W en utilisant le cycle de classe 3 de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers (WLTP). Une étude comparative des performances du système multi-PAC sous la SGE proposée et sous les SGE conventionnelles a montré que la SGE proposée est capable de faire atteindre au système multi-PAC une durée de vie qui est plus de 2,35 fois supérieure à celle qu'il aurait sous les SGE conventionnelles.

**Title:** Remaining useful life prognostic-based energy management for multi-fuel cell stacks systems in automotive applications.

**Keywords:** multi-fuel cell stacks system, prognostic, remaining useful life, energy management, fuel cell hybrid electric vehicle.

**Abstract:** The global warming's effects, such as the increase in the earth's surface average temperature, the progressive remoteness of climatic extremes, the increase in the average water level of seas and oceans, etc., are mainly attributed to human-induced accumulation of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere. Some economic sectors contribute more to this phenomenon than others, around the world. The transport sector, in particular, is responsible for 25% of global GHG emissions, according to the IEA 2020 report. This percentage makes the transport sector the most polluting economic sector after electric generation. A more detailed statistical analysis of transportation emissions shows that road transport is the most GHG-emitting transportation mode. According to the report published in 2020 by « *INSEE, France* » and the national inventory report 1990-2019 of « *Environment and Climate Change, Canada* », 94% and 70% of transportation emissions are respectively attributed to road traffic in France and in Canada.

To reduce the carbon footprint of road transport, using hydrogen-powered vehicles, also known as fuel cell hybrid electric vehicles (FCHEV) seems to be a very attractive idea and a complement to electric vehicles. However, besides the lack of hydrogen refueling infrastructures, there are some technological barriers such as the short lifetime of fuel cells, the main power sources of FCHEV, that slow down the commercialization of these vehicles.

The concept of modular power system for fuel cells, which was introduced in the literature ten years ago, is particularly interesting because it can improve the lifetime, fault tolerance, and energy efficiency of fuel

cell systems. The basic idea of this concept is to combine several low power fuel cell modules (short stack + auxiliary units) instead of using a single high power fuel cell module. In this case, a multi-fuel cell stacks (MFCS) system is obtained and the main challenge to overcome is the development of an appropriate energy management strategy (EMS). In fact, energy management is an essential element on which all the performances that an MFCS system can offer depend.

Some great achievements have been made over the past decade in certain research areas, such as PHM « *prognostic and health management* », to enable EMSs for MFCS systems to make appropriate energy management decisions regarding the lifetime of these systems. However, to date, very few prognostic-based EMSs are developed in the literature. To this end, a remaining useful life (RUL) prediction-based EMS is proposed in this thesis for MFCS systems in the context of an automotive application.

The proposed EMS was validated by simulations in Matlab/Simulink environment on an MFCS system consisting of four 500-W using the class 3 of the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). A comparative study of the MFCS system performance under the proposed EMS and the conventional EMSs showed that the proposed EMS can achieve a lifetime for the MFCS system that is more than 2.35 times greater than the one that could be reached under conventional EMSs. All this while keeping its hydrogen consumption at a very reasonable level compared to the amount of hydrogen consumed with the conventional EMS.



THÈSE PRÉPARÉE EN COTUTELLE ET PRÉSENTÉE CONJOINTEMENT À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À  
TROIS-RIVIÈRES

ET À

L'UNIVERSITÉ DE  
BOURGOGNE  
FRANCHE-COMTÉ

INSTITUT DE RECHERCHE SUR  
L'HYDROGÈNE

INSTITUT DE RECHERCHE  
FEMTO-ST (UMR CNRS 6174)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE  
ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE  
INFORMATIQUE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES  
POUR L'INGÉNIEUR ET  
MICROTECHNIQUES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

WABI RÉNÉ BANKATI

**GESTION D'ÉNERGIE DES SYSTÈMES MULTI-PILES À COMBUSTIBLE BASÉE SUR  
LES PRONOSTICS DE DURÉES DE VIE RESTANTES POUR UNE APPLICATION AU  
TRANSPORT AUTOMOBILE**

Avril 2024



# Remerciements

J'aimerais commencer par bénir Dieu pour la vie de mes directeurs de thèse, Pr. Loïc Boulon et Pr. Samir Jemei grâce à qui cette aventure de quatre ans a été possible. Je leur suis sincèrement reconnaissant pour leur confiance, leur patience, leur soutien administratif tout au long de cette thèse sans oublier leurs partages d'expériences et de connaissances.

Je profite également de cette occasion pour dire un grand merci :

- À tous mes collègues de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) à Trois-Rivières au Canada (Alvaro, Ahmad, Nassim, Mohsen, Emna, Danté, Arash, Farshad, Massi, Nelson, Kha Nsa, Ali, Ashkan, Mersedeh, Maziar, Moussa, ...) pour l'accueil que j'ai reçu de leur part, les échanges et les quelques bons moments que nous avons eu à partager ensemble dans le contexte particulier de la pandémie.
- À tous mes collègues du laboratoire FEMTO-ST au FCLAB à Belfort en France (Miguel, Meryem, Baptiste, Rusber, Agnès *la Prési*, Méziane, Raphaël, Santiago, Clotilde, Jérémie, Xinyang, Jack, Gauthier, Iqbal, Clément, Yacoub, Abderazek, Elissa *la tutrice*, Sofia, Julien, Flavie, Corey, Damien, Fabian, Fatimatou, Mattéo, Sarad, Sudnya, ..., la liste est en effet très longue). Leur accueil chaleureux et leur amitié qui se traduisait souvent par des petits plans de divertissement en dehors du travail m'ont très rapidement permis de m'intégrer au sein du laboratoire.
- À mes interlocutrices administratives du côté de l'IRH / UQTR (Anik Surprenant, Marie-France Bolduc, Nathalie Tourigny) et du côté de FEMTO-ST / UBFC (Isabelle Christen, Alike Rosseti, Laurence Mary, Silviya Nikolova) pour leur suivi administratif qui a été très précieux pour moi dans ce programme de cotutelle entre l'UQTR et l'UBFC.

Je ne passerai pas sans remercier certains de mes supérieurs à l'IRH et au FCLAB. Je pense notamment au Pr. Mehdi Soleymani avec qui la collaboration a été très fructueuse dans cette thèse, à Benjamin Angers de l'IRH, à Xavier Francois et à Violaine Hell du FCLAB qui n'ont jamais hésité à m'aider lorsque j'avais quelques problèmes techniques avec mes matériels de travail.

Je rends continuellement grâce à Dieu pour toutes les amitiés et relations qui se sont créées durant ces quatre années, que ce soit à Trois-Rivières ou à Belfort. Mine de rien, c'est aussi dans cette aventure que j'ai rencontré Lydia, une amie qui est devenue pour moi une réelle source de motivation pendant cette thèse et à qui je dois toute ma reconnaissance.

Finalement, j'exprime ma gratitude à ma famille qui n'a jamais cessé de me témoigner son soutien et son amour durant ces neuf dernières années passées loin d'elle.





# Nomenclature

$I_{PAC}$	Courant de la PAC	[A]
$i_{PAC}$	Densité de courant de la PAC	[A. $cm^{-2}$ ]
$V_{PAC}$	Tension de la PAC	[V]
$I_{max}$	Courant maximal de la PAC	[A]
$I_{min}$	Courant minimal de test de polarisation	[A]
$P_{max}$	Puissance maximale de la PAC	[W]
$I_{P_{max}}$	Courant correspondant à la puissance maximale de la PAC	[A]
$\eta_{max}$	Rendement maximal de la PAC	
$P_{\eta_{max}}$	Puissance correspondant au rendement maximal de la PAC	[W]
$E_{rev}$	Potentiel réversible de Nernst	[V]
$\Delta E_{act}$	Pertes due aux phénomènes d'activation	[V]
$\Delta E_{conc}$	Pertes due aux phénomènes de concentration	[V]
$\Delta E_{ohm}$	Pertes ohmiques	[V]
$\Delta_{PAC}$	Fonction de dégradation de la PAC	
$\Delta_{switch}$	Coefficient de dégradation lié à cycle de démarrage-arrêt	
$N_{switch}$	Nombre de démarrages-arrêts de la PAC	
$\delta$	Fonction de dégradation liée au point de fonctionnement de la PAC	
$S_{PAC}$	Aire de la surface active électrochimique de la PAC	[ $cm^2$ ]
$S_{PAC_{deg}}$	Aire de la surface active électrochimique sous l'effet de la dégradation en cyclage	[ $cm^2$ ]
$T_{PAC}$	Température de fonctionnement de la PAC	[°K]
$P_{O_2}$	Pression du dioxygène	[Pa]
$P_{H_2}$	Pression du dihydrogène	[Pa]

$\Delta S$	Variation de l'entropie	$[J. K^{-1}]$
$\Delta H$	Energie dégagée par la réaction qui a lieu au sein de la PAC	$[J]$
$F$	Constante de Faraday	$[C. mol^{-1}]$
$R$	Constante des gaz parfaits	$[J. K^{-1}. mol^{-1}]$
$i_n$	Densité de courant interne	$[A. cm^{-2}]$
$i_0$	Densité de courant d'échange	$[A. cm^{-2}]$
$i_l$	Densité de courant limite	$[A. cm^{-2}]$
$R_{PAC}$	Résistance ohmique équivalente de la PAC	$[\Omega]$
$R_{elec}$	Résistance électronique de la PAC	$[\Omega]$
$R_{cr}$	Résistance de contact de la PAC	$[\Omega]$
$R_{ion}$	Résistance ionique de la PAC	$[\Omega]$
$N$	Nombre de cellules de la PAC	
$\tau_{dyn}$	Constante de temps de la PAC	$[s]$
$\Delta_{bat}$	Fonction de dégradation de la batterie	
$Q_{bat}$	Capacité de la batterie	$[A. h]$
$Q_{bat-max}$	Capacité maximale de la batterie	$[A. h]$
$i_{bat-nom}$	Courant nominal de la batterie	$[A]$
$V_{bat}$	Tension de la batterie	$[V]$
$i_{bat}$	Courant de la batterie	$[A]$
$SOC_{bat}$	État de charge de la batterie	
$L_{boost}$	Inductance du convertisseur DC-DC	$[H]$
$V_{boost}$	Tension de sortie du convertisseur DC-DC	$[V]$
$I_{boost}$	Courant de sortie du convertisseur DC-DC	$[A]$
$\alpha_{boost}$	Rapport de modulation du convertisseur DC-DC	
$\eta_{boost}$	Rendement du convertisseur DC-DC	
$P_{dem-multi-PAC}$	Puissance demandée au système multi-PAC	$[W]$
$I_{basses\ fréquences}$	Composante basses fréquences du profil de mission	$[A]$



# Acronymes

GES	Gaz à Effet de Serre
PAC	Pile À Combustible
ASAE	Aire de la Surface Active Électrochimique
SGE	Stratégie de Gestion d'Énergie
IA	Intelligence Artificielle
RNR	Réseau de Neurones de Rétropropagation
IEA	International Energy Agency
EEA	European Environment Agency
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
U.S DoE	Department of Energy of United States
PHM	Prognostic and Health Management
PF	Particle Filtering
EKF	Extended Kalman Filter
UKF	Unscented Kalman Filter
DP	Dynamic Programming
PSO	Particle Swarm Optimization
GA	Genetic Algorithm
BA	Bee Algorithm
SA	Simulated Annealing
HIL	Hardware-In-the-Loop
MLPA	Minimum Loss Power Algorithm
SSA	Salp Swarm Algorithm
DCO	Decentralized Convex Optimization
APP	Auxiliary Problem Principle
HI	Health Indicator
BPNN	Back-Propagation Neural Network
MEA	Mind Evolutionary Algorithm

WNN	Wavelet Neural Network
CSA	Cuckoo Search Algorithm
LSTM	Long Short-Term Memory
G-LSTM	Grid Long Short-Term Memory
S-LSTM	Stacked Long Short-Term Memory
ESN	Echo State Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NARX	Nonlinear Autoregressive Exogenous neural network
RUL	Remaining Useful Life
EoL	End of Life
OCV	Output Circuit Voltage



# Sommaire

Introduction générale.....	23
1. Mise en contexte.....	24
1.1 Contexte écologique et économique .....	24
1.2 Le secteur du transport et l'environnement .....	25
1.3 L'électrification des transports : point clé de la transition énergétique en vue du développement durable.....	26
2. La technologie des piles à combustible : vers une propulsion propre avec l'hydrogène décarboné.....	28
2.1 La pile à combustible .....	28
2.1.1 Principe de fonctionnement d'une PEMFC .....	30
2.2 Le système pile à combustible .....	31
2.3 Le système multi-piles à combustible ou système multi-PAC .....	33
I- État de l'art, problématique et objectifs de recherche.....	37
1. La PEMFC comme une grande alliée de la mobilité verte malgré ses défis.....	39
2. Le système à PEMFC multiples ou système multi-PAC : un concept prometteur sous différents angles.....	40
2.1 Les différentes architectures fluidiques des systèmes multi-PAC.....	40
2.2 Les différentes architectures électriques des systèmes multi-PAC.....	41
2.3 Les atouts potentiels des systèmes multi-PAC .....	43
2.3.1 Du point de vue de la durabilité.....	43
2.3.2 Du point de vue du rendement énergétique .....	45
2.3.3 Du point de vue de la tolérance aux pannes.....	46
2.3.4 Du point de vue du coût.....	47

## Sommaire

2.4	Gestion d'énergie des systèmes multi-PAC.....	49
2.4.1	Revue des SGE des systèmes multi-PAC.....	51
2.4.1.1	SGE basées sur une approche déterministe .....	51
2.4.1.2	SGE basées sur une approche d'optimisation.....	55
3.	Problématique générale, objectif général et objectifs spécifiques de recherche .....	58
3.1	Les SGE basées sur le diagnostic pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC	59
3.1.1	Le diagnostic.....	60
3.1.2	Les SGE basées sur le diagnostic .....	61
3.2	Les SGE basées sur le pronostic pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC	62
3.2.1	Le pronostic .....	64
3.2.1.1	Estimation instantanée de l'état de santé d'une PAC .....	64
3.2.1.2	Prédiction de l'évolution temporelle de l'indicateur de santé sur un long horizon en vue d'estimer la durée de vie restante d'une PAC .....	65
3.2.1.3	Estimation de la durée de vie restante ou RUL d'une PAC.....	70
3.2.2	Les SGE basées sur le pronostic .....	71
3.3	Les objectifs spécifiques de recherche.....	73
3.4	Organisation de la thèse et présentation des laboratoires d'accueil.....	75
II-	Méthodologie : vers la mise en œuvre d'une gestion d'énergie basée sur le pronostic .....	77
1.	Modélisation d'une PAC avec prise en compte du vieillissement .....	78
1.1	Modèles statique et dynamique d'un système PAC.....	79
1.1.1	Hybridation d'un système PAC par une batterie dans une application transport.....	81
1.2	Modèle de vieillissement calendaire d'une PAC .....	83
1.3	Modèle de vieillissement en cyclage d'une PAC .....	85
2.	Estimation en ligne des performances maximales d'une PAC.....	89
2.1	Choix d'un indicateur de santé de PAC.....	90



## Sommaire

2.2 Tests de polarisation réguliers en vue de l'estimation de la puissance maximale des PAC .....	90
3. Pronostic de la durée de vie restante ou RUL d'une PAC .....	95
3.1 Choix de l'approche de pronostic .....	95
3.2 Développement d'un algorithme de pronostic en usage réel basé sur le réseau de neurones artificiel de rétropropagation.....	96
III- Mise en place d'un système hybride multi-PAC/ batterie et gestion d'énergie basée sur le pronostic de RUL des PAC .....	103
1. Introduction .....	105
2. Choix des architectures fluide et électrique du système multi-PAC dans le cadre d'une application automobile .....	106
3. Dimensionnement du système hybride multi-PAC/ batterie dans le cadre d'une application automobile .....	109
3.1 Dimensionnement du système multi-PAC.....	111
3.2 Dimensionnement de la batterie.....	113
4. Stratégie de gestion d'énergie de la batterie ou « Battery Management Strategy – BMS » .....	115
5. Stratégie de gestion d'énergie du système multi-PAC basée sur les pronostics de RULs des PAC.....	118
5.1 Choix de l'approche de la SGE du système multi-PAC .....	121
5.2 Proposition de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC .....	122
5.2.1 Principe de la SGE du Daisy-Chain.....	122
5.2.2 Principe de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC.....	123
IV- Résultats de simulations : SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs vs SGE conventionnelles des systèmes multi-PAC .....	127

## Sommaire

1. Validation du fonctionnement des modules du concept étudié.....	130
1.1 Simulation des modèles statique et dynamique de la PAC.....	130
1.2 Simulation du modèle de vieillissement des PAC et validation de l’algorithme de pronostic de RUL proposé.....	133
1.2.1 Impact du point de fonctionnement sur le vieillissement en cyclage du modèle de PAC.....	134
1.2.2 Impact de la fréquence des cycles de démarrages-arrêts sur le vieillissement en cyclage du modèle de PAC.....	141
2. Résultats de simulations du concept : performances du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs vs performances obtenues sous les SGE conventionnelles.....	147
2.1 Résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs.....	149
2.2 Résultats de simulations du système hybride multi-PAC/ batterie sous les SGE conventionnelles.....	159
2.2.1 SGE de distribution équitable.....	159
2.2.2 SGE du Daisy-Chain.....	164
2.3 Résultats de simulations du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations instantanées de puissance maximale.....	169
3. Perspectives.....	175
Conclusion générale.....	180
Bibliographie.....	184
Table des figures.....	206
Liste des tables.....	211
Annexe.....	213

## *Sommaire*

1. Algorithme de gestion d'énergie du système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état chargé .....	214
2. Algorithme de gestion d'énergie du système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état déchargé.....	215
3. Autres résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée.....	216
4. Exemples de véhicules alimentés par des systèmes multi-PAC.....	228
Résumé .....	230
Abstract .....	232





# Introduction générale

1. Mise en contexte .....	24
1.1 Contexte écologique et économique .....	24
1.2 Le secteur du transport et l'environnement .....	25
1.3 L'électrification des transports : point clé de la transition énergétique en vue du développement durable .....	26
2. La technologie des piles à combustible : vers une propulsion propre avec l'hydrogène décarboné .....	28
2.1 La pile à combustible.....	28
2.1.1 Principe de fonctionnement d'une PEMFC.....	30
2.2 Le système pile à combustible.....	31
2.3 Le système multi-piles à combustible ou système multi-PAC.....	33

# 1. Mise en contexte

Moteur de tous les phénomènes naturels et artificiels, l'énergie apparaît sous différentes formes (mécanique, gravitationnelle, thermique, radiative ou lumineuse, chimique, électrique et nucléaire). Dotée d'une forte propriété à être convertie d'une forme à une autre, elle est très souvent utilisée par l'Homme sous forme électrique depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Seulement, depuis son développement, l'énergie électrique subsiste au détriment de l'équilibre qui régnait auparavant au sein de l'écosystème car elle est essentiellement produite via l'exploitation des ressources d'énergie fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz. En effet, ces trois combustibles sont des ressources épuisables dont la combustion génère des gaz à effet de serre qui créent un certain déséquilibre au sein de l'atmosphère.

## 1.1 Contexte écologique et économique

L'effet de serre est un phénomène naturel au cours duquel certains gaz présents naturellement dans l'atmosphère (la vapeur d'eau  $H_2O$ , le dioxyde de carbone  $CO_2$ , le méthane  $CH_4$ , l'oxyde nitreux  $N_2O$  et l'ozone  $O_3$ ) permettent de chauffer la surface de la terre et ainsi d'y rendre la vie humaine possible, d'où leur nom « gaz à effet de serre (GES) ». Depuis l'ère préindustrielle, leur concentration dans l'atmosphère augmente sans cesse à cause des émissions excessives de GES issues d'activités humaines. Ceci conduit à un effet de serre additionnel qui se manifeste par le problème de réchauffement et d'instabilité climatiques.

Outre le problème de pollution environnementale, le besoin énergétique mondial qui augmente avec les croissances démographique et économique mondiales impose une exploitation de plus en plus accrue des ressources fossiles épuisables. De ce fait, la réglementation des secteurs économiques qui reposent sur l'exploitation des énergies fossiles est retenue par les gouvernements comme une approche fondamentale pour limiter les émissions de GES et par la même occasion éviter l'épuisement des ressources d'énergies fossiles. Ces secteurs économiques sont : la production d'électricité, le transport, l'industrie, l'habitat, le changement d'affectation des terres (urbanisation, réseau routier). Parmi eux, le transport demeure le seul secteur qui n'a pas réduit ses

## Introduction

émissions depuis 1990 selon l'Agence européenne pour l'environnement (EEA – *European Environment Agency*) [EEA, 2016]. Ce qui en fait un secteur particulièrement visé par la transition énergétique d'autant plus qu'il représente le second secteur le plus polluant après la production de l'énergie électrique.

### 1.2 Le secteur du transport et l'environnement

D'après le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (IEA – *International Energy Agency*) publié en 2020, le transport constitue le second secteur économique le plus polluant au vu de ses émissions qui représentent environ 25% des émissions mondiales de GES d'origine humaine. D'autres études réalisées antérieurement par l'IEA ont montré que tous les modes de transport ne contribuent pas de la même manière à cette répartition. Par exemple en 2018, environ 76% des émissions mondiales de GES du secteur du transport étaient attribuées au trafic routier alors que les 24% restantes étaient réparties presque équitablement entre les autres modes de transport (maritime, ferroviaire et aérien) [IEA, 2019]. Les émissions importantes de GES du transport routier constitueraient le facteur majeur qui fait du transport le seul secteur économique n'ayant pas réduit ses émissions depuis 1990. La réduction de l'empreinte carbone des transports routiers devient ainsi un véritable enjeu et la sensibilisation des populations à privilégier les moyens de transports écologiques nécessite des solutions complémentaires telles que l'électrification des transports.

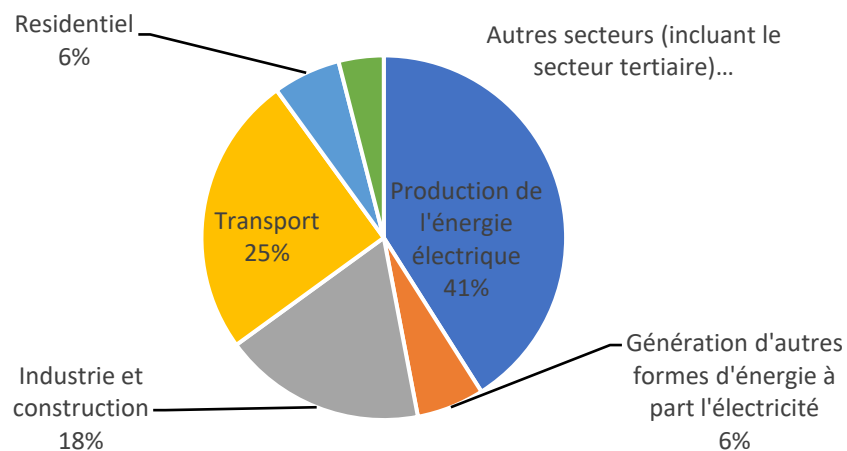


Figure 1: Répartition des émissions mondiales de GES entre les différents secteurs économiques [rapport 2020 de l'Agence Internationale de l'Énergie]



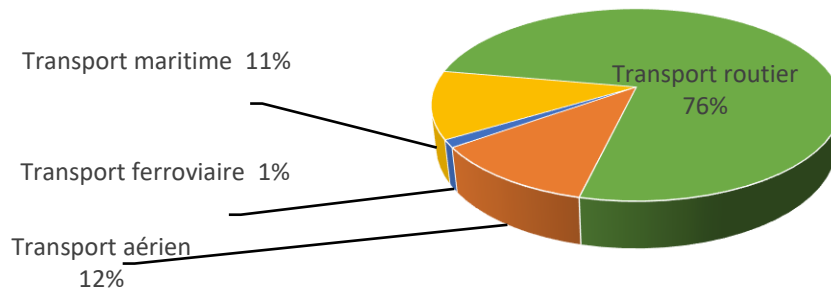


Figure 2: Répartition des émissions mondiales de GES du secteur du transport entre les différents modes de transport [rapport 2019 de l'Agence Internationale de l'Énergie]

### **1.3 L'électrification des transports : point clé de la transition énergétique en vue du développement durable**

Le système énergétique actuel des transports repose sur l'utilisation des sources d'énergies fossiles. Les scénarios envisagés par les gouvernements dans le concept de transition énergétique consistent à réduire la consommation de ces énergies en adoptant un mix énergétique pour solliciter principalement les énergies renouvelables. L'usage des énergies renouvelables dans le secteur des transports pourrait considérablement y faciliter le respect des normes de développement durable.

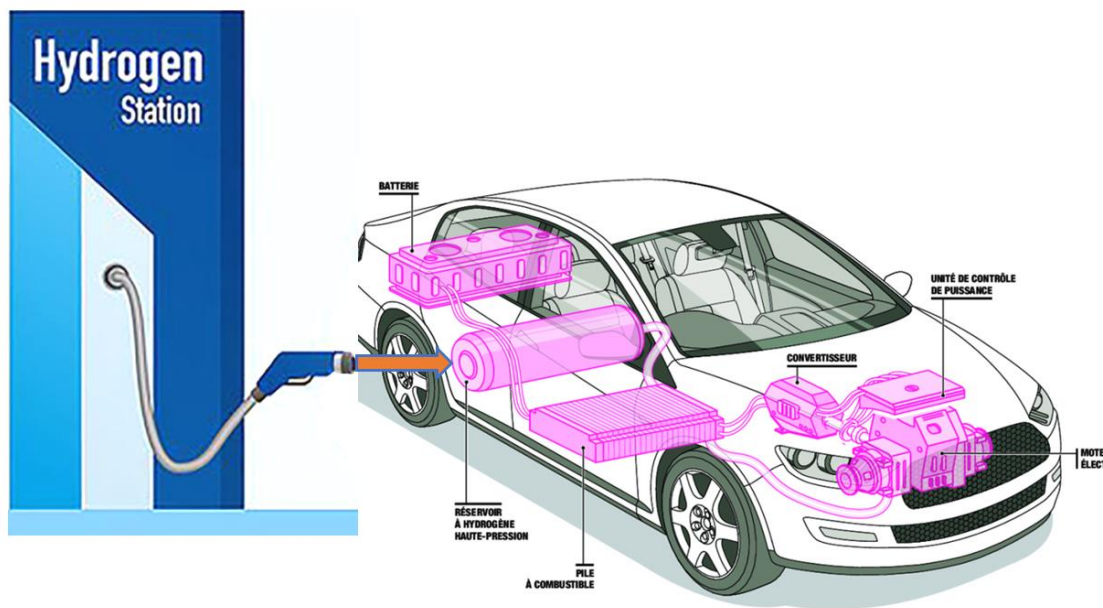
Parmi les cinq principales énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermique) qui existent, la biomasse est la seule qui peut être directement utilisée sous forme de biocarburant avec la configuration du système énergétique actuel des transports. Transformées de nos jours en énergie électrique, les quatre autres sources renouvelables pourraient également être exploitées dans les transports avec l'utilisation des véhicules électriques. Pour favoriser cela, le marché des véhicules électriques déjà existant doit être davantage développé pour atteindre un certain niveau de compétitivité avec celui des véhicules à moteur thermique.

À ce jour, les véhicules électriques les plus répandus sont les véhicules à batterie. Cependant, leur autonomie qui reste conditionnée par l'état de charge des batteries, leur temps de recharge qui peut être contraignant et l'épuisement des ressources minières nécessaires à la fabrication des batteries, constituent autant de raisons qui incitent les scientifiques à explorer

## *Introduction*

également d'autres technologies pour électrifier les transports. C'est dans ce contexte que les véhicules électriques à piles à combustible aussi connus sous le nom de véhicules à hydrogène se positionnent parmi les solutions complémentaires à l'usage des batteries comme sources d'alimentation des véhicules électriques.

## 2. La technologie des piles à combustible : vers une propulsion propre avec l'hydrogène décarboné



### 2.1 La pile à combustible

La pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique contenue dans un combustible en énergie électrique, en chaleur et en eau. Elle est constituée d'un empilement de cellules. Une cellule de PAC est composée de deux plaques bipolaires, deux couches de diffusion de gaz, deux électrodes et un électrolyte comme le montre la Fig.3 dans laquelle le dihydrogène ( $H_2$ ) représente le combustible utilisé.

## Introduction

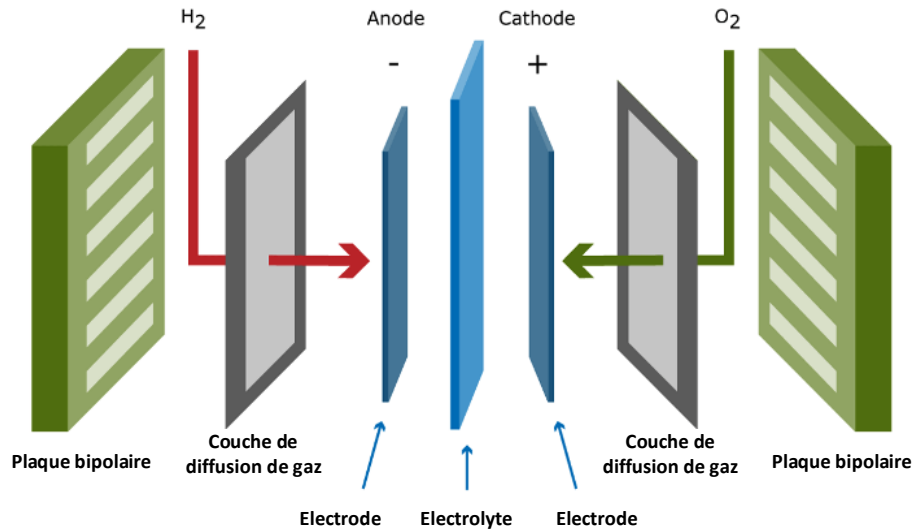


Figure 3: Composants d'une cellule élémentaire de pile à combustible [ *H<sub>2</sub> Today* ]

Telles qu'elles apparaissent dans le tableau 1, six familles de PAC peuvent être distinguées.

Tableau 1: Les différentes familles de piles à combustible et leurs propriétés [U.S DoE]

Famille de PAC	Électrolyte	Combustible	Température
PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC)	Membrane polymère solide (acide)	Dihydrogène ( $H_2$ )	[60°C, 90°C] : BT-PEMFC [100°C, 200°C] : HT-PEMFC
PAC à méthanol direct (DMFC)	Membrane polymère solide (acide)	Méthanol ( $CH_3OH$ )	[30°C, 130°C]
PAC à acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique liquide ( $H_3PO_4$ )	Dihydrogène ( $H_2$ )	[150°C, 200°C]
PAC alcaline (AFC)	Hydroxyde de potassium liquide ( $KOH$ ), basique	Dihydrogène ( $H_2$ )	< 100°C
PAC à carbonates fondus (MCFC)	Carbonates de lithium ( $Li_2CO_3$ ) et de potassium ( $K_2CO_3$ ) fondus, basique	Dihydrogène ( $H_2$ )	[600°C, 700°C]
PAC à oxyde solide (SOFC)	Électrolyte solide à base d'oxyde de zirconium ( $ZrO_2$ ), basique	Dihydrogène ( $H_2$ ) ou méthane ( $CH_4$ ), etc.	[500°C, 1000°C]

## Introduction

Elles se distinguent l'une de l'autre par la nature de l'électrolyte utilisé, du type de combustible mis en jeu et de leur température de fonctionnement. Parmi elles, une seule arrive à gagner l'attention des applications de transports en raison de sa technologie plus ou moins mature et de ses propriétés plutôt favorables. Il s'agit de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons fonctionnant à basse température (BT-PEMFC). Elle possède un électrolyte solide (membrane polymère) et elle fonctionne dans des conditions propices aux applications de transport : sa température de fonctionnement [60°C, 90°C] relativement simple à atteindre, sa capacité de démarrage rapide, sa densité de puissance qui est plus élevée que celle des HT-PEMFC.

### 2.1.1 Principe de fonctionnement d'une PEMFC

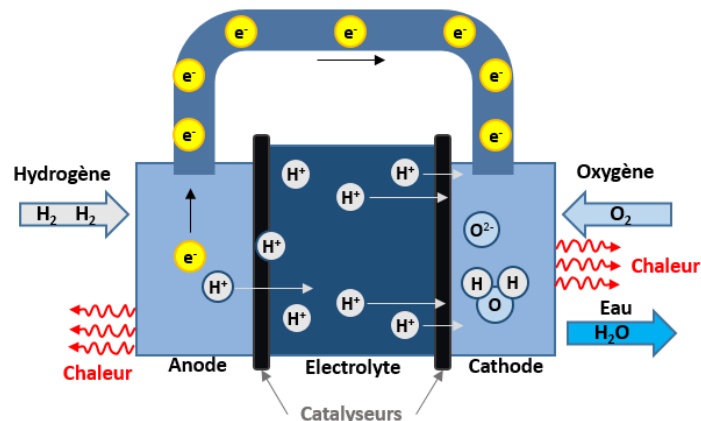


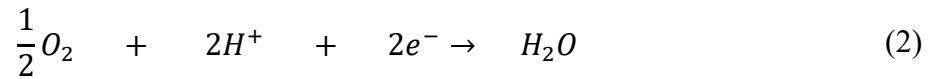
Figure 4: Schéma illustratif du principe de fonctionnement d'une PEMFC [H2SYS]

Chaque molécule de dihydrogène présente à l'anode subit une réaction d'oxydation pour libérer deux électrons et des protons  $H^+$  comme décrit par la demi-équation (1).



Par son caractère non-conducteur d'électrons, l'électrolyte polymère force indirectement les électrons à se déplacer de l'anode vers la cathode à travers un circuit extérieur; d'où l'apparition d'un courant électrique. Les ions  $H^+$  passent à travers la membrane polymère et se retrouvent à la cathode. Finalement la présence des ions  $H^+$  et des électrons à la cathode donne lieu à une réaction de réduction de l'oxygène suivant la demi-équation (2).

## Introduction



La réaction globale d'oxydo-réduction peut alors s'écrire comme suit :



Dans une application automobile, l'électricité générée par les BT-PEMFC sert à alimenter un moteur électrique pour assurer la propulsion du véhicule. Quant à eux, les autres produits de la réaction à savoir l'eau et la chaleur doivent voir leur niveau être convenablement et respectivement gérés au sein de la pile par un système de gestion d'eau et un système de gestion thermique pour éviter d'éventuels défauts de fonctionnement. À ces différents systèmes, s'ajoutent un certain nombre d'auxiliaires d'alimentation en réactifs pour approvisionner la PEMFC en hydrogène et en oxygène à des valeurs de pressions spécifiques. Avec tous ces auxiliaires, les PEMFC forment un système pile à combustible.

## 2.2 Le système pile à combustible

Tel qu'il a été décrit, le principe de fonctionnement des PEMFC fait ressortir leur comportement multi-physiques (électrique, chimique, thermique et pneumatique) et multi-échelles (constantes de temps très différentes selon les phénomènes mis en jeu). Elles ne fonctionnent donc qu'en interagissant avec d'autres auxiliaires. Comme l'illustre la Fig.5, leur utilisation nécessite un système de gestion thermique pour contrôler la température, un circuit électrique avec une stratégie de contrôle-commande pour gérer le flux d'énergie électrique en sortie et un procédé d'alimentation en gaz et d'évacuation d'eau.

Pour alimenter un système électrique, la PEMFC et tous ses auxiliaires doivent être dimensionnés d'une façon adéquate pour permettre au système PAC de répondre convenablement aux besoins de puissance. Dans une application automobile, selon que le système PAC soit entièrement responsable de la traction du véhicule (configuration « full-power ») ou que celle-ci soit conjointement assurée par le système PAC et une batterie (configuration « mid-power » ou « mild-hybrid ») ou carrément que le système PAC soit utilisé pour étendre l'autonomie d'une batterie destinée à l'alimentation du moteur électrique du véhicule (configuration « range-extender »), le

## Introduction

dimensionnement du système PAC ne sera pas le même. Avec la configuration « range-extend », une batterie de grosse capacité ( $> 20$  kWh) est nécessaire comme c'est le cas dans les voitures électriques et un système PAC de faible puissance ( $\sim 5$  kW) suffit pour accroître son autonomie [Stellantis, 2021]. La Renault Kangoo Z.E Hydrogen et la Master Z.E Hydrogen sont des exemples de véhicules à hydrogène de type « range-extend » et ils embarquent une batterie d'environ 33 kWh et une PAC de 5 kW. Dans une configuration « mid-power » ou « mild-hybrid », la charge électrique est répartie entre une PAC d'une puissance d'environ 30% à 50% de la puissance maximale du moteur et une batterie de 10 kWh à 15 kWh [Bethoux et al., 2020]. Sur le marché automobile, la Mercedes GLC F-cell SUV possède une configuration « mid-power » avec sa PAC de quelques dizaines de kW ( $\sim 30$  kW - 80 kW) et sa batterie de 13,5 kWh pour un moteur de 147 kW. Quant à elle, la configuration « full-power » se traduit par l'utilisation d'un système PAC de forte puissance ( $> 100$  kW) qui joue constamment le rôle de la principale source d'énergie du véhicule [Stellantis, 2021][Lohse-Bush et al., 2020]. Une batterie de faible capacité ( $< 2$  kWh) est également présente dans la chaîne de traction pour permettre le freinage régénératif et pour assister le système PAC pendant les transitoires rapides et les phases de démarrages à froid. La Toyota Mirai, la Hyundai Nexa SUV et la Honda Clarity sont quelques exemples de véhicules à hydrogène avec une configuration « full-power ». Le niveau de puissance élevé mis en jeu dans cette dernière configuration permet d'envisager l'utilisation de plusieurs petits modules de PAC (systèmes PAC de puissances modérées  $\sim 25$  kW) pour satisfaire la demande tout en bénéficiant des nombreux avantages qu'offrent les systèmes de puissance modulaires. Le système de puissance modulaire formé dans le cas précis des PAC est communément appelé système multi-piles à combustible.

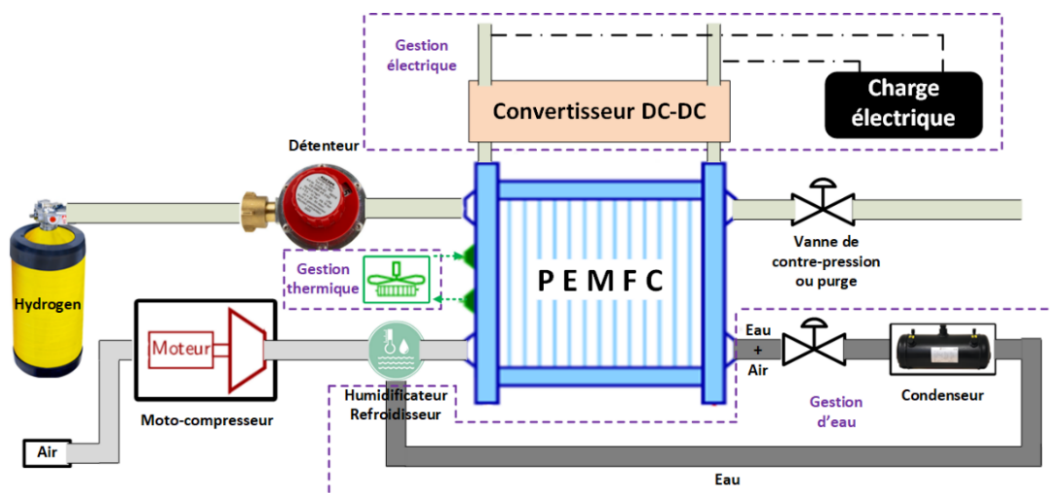


Figure 5: Schéma illustratif d'un système pile à combustible

## **2.3 Le système multi-piles à combustible ou système multi-PAC**

L'idée globale autour du concept de systèmes multi-PAC consiste à associer plusieurs PAC ou plusieurs systèmes PAC de puissances modérées au lieu d'utiliser un seul système PAC de forte puissance pour alimenter une charge électrique. Les avantages qui s'y attachent peuvent contribuer à lever les verrous de durabilité, de tolérance aux pannes<sup>1</sup>, de rendement énergétique et de coût des PAC lorsque celles-ci opèrent dans des systèmes à pile unique appelés encore système mono-PAC. En effet, la multiplicité des piles au sein des systèmes multi-PAC peut apporter une certaine flexibilité aux stratégies de gestion d'énergie (SGE) dans la sélection des piles à activer et la répartition de la demande entre elles. De plus, elle leur donne la possibilité de solliciter le nombre minimum de piles nécessaire pour répondre à la puissance demandée. Tout ceci permet de préserver les temps de vie restants des piles non activées et d'optimiser les temps d'opération des piles activées conduisant ainsi à l'amélioration de la durabilité des systèmes multi-PAC. D'un autre côté, la redondance des piles rend les systèmes multi-PAC capables de fonctionner en mode dégradé; ce qui fait ressortir leur propriété de tolérance aux pannes. En termes de rendement énergétique, lorsqu'ils sont gérés par une SGE efficace, les systèmes multi-PAC peuvent fournir un bon rendement énergétique sur une plage de puissances très étendue car ils disposent d'autant de points de fonctionnement optimaux que de PAC. Finalement, l'adoption du concept de systèmes multi-PAC pourrait permettre de réduire le coût unitaire des PAC grâce à des économies d'échelle. En effet, elle encouragerait l'achat d'un grand nombre de PAC identiques qu'il sera ensuite possible d'utiliser peu importe le niveau de puissance requis dans une application donnée, ce qui favoriserait davantage l'application des remises sur quantités.

En résumé, les potentielles performances des systèmes multi-PAC pourraient « booster » le déploiement à grande échelle de la technologie des PAC au sein des systèmes électriques notamment dans les transports. Cependant, celles-ci reposent entièrement sur l'efficacité des SGE. En effet, sans une bonne SGE, un système multi-PAC n'est pas forcément plus performant qu'un système mono-PAC. Pourtant, la mise en place d'une SGE efficace pour un système multi-PAC

---

<sup>1</sup> Qualité d'un système qui lui permet de continuer par fonctionner, éventuellement de manière réduite, au lieu de tomber complètement en panne, lorsque l'un de ses composants ne fonctionne plus correctement.



## Introduction

n'est pas chose aisée car la complexité de la gestion d'énergie au sein d'un système électrique augmente avec le nombre de sources d'énergie. Par ailleurs, l'intégration d'un système multi-PAC dans la chaîne de traction ou de propulsion d'un véhicule électrique mérite également une attention particulière. Dans le cas spécifique des applications automobiles par exemple, l'influence du système multi-PAC sur les phénomènes de transfert de charge<sup>2</sup> et de masse<sup>3</sup> doit être nécessairement être pris en compte pendant la phase de conception des véhicules.

Ces raisons expliquent en partie pourquoi à ce jour, dans le domaine automobile, une seule et unique grosse PAC est embarquée dans les véhicules à hydrogène qui roulent sur les routes. Toutefois, il est aussi important de savoir que les systèmes multi-PAC ont déjà été utilisés par le passé dans d'autres applications de transport notamment dans le domaine maritime avec un véhicule sous-marin Todaro de classe U212A [De-Troya et al., 2016] (Fig.85 en annexe), etc., dans l'aéronautique avec l'avion HY4 à quatre places [J. Kalló, 2015] (Fig.86 en annexe), etc. Aujourd'hui, que les systèmes mono-PAC ou que les systèmes multi-PAC soient utilisés pour alimenter les véhicules à hydrogène, ils doivent répondre à certains critères pour favoriser l'introduction massive de ces véhicules sur le marché. La cible de durée de vie de 8 000 heures fixée pour les PAC par le Département de l'énergie des États-Unis (U.S DoE – *Department of Energy of United States*) en est un. Dans cette thèse, les possibilités d'amélioration de la durabilité qu'offrent les systèmes multi-PAC seront mises en avant à travers la gestion d'énergie pour essayer d'étendre leur durée de vie tout en maintenant leur consommation d'hydrogène à un niveau raisonnable.

Pour parvenir à la contribution scientifique définie ci-dessus, cette thèse a uni les forces de deux communautés de chercheurs : l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) de l'Université du Québec à Trois-Rivières au Canada et l'Institut FEMTO-ST de l'Université de Bourgogne Franche-Comté en France, dans le cadre du consortium international hydrogène-énergie signé en novembre 2021 entre les deux universités. Ainsi, il aura fallu fréquenter les locaux de l'IRH pendant 24 mois à Trois-Rivières au Canada et les locaux du département énergie de FEMTO-ST

---

<sup>2</sup> Le transfert de charge s'effectue durant les différentes manœuvres (freinage, virage, accélération, etc.) et il est dû aux forces appliquées à la surface des pneus parallèlement au revêtement.

<sup>3</sup> Le transfert de masse se rapporte à la redistribution du poids soutenu par chaque pneu pendant les manœuvres. Il se produit lorsque le centre de gravité du véhicule se déplace pendant ces manœuvres.

## *Introduction*

pendant 22 mois à Belfort en France pour bénéficier des expertises dont disposent ces deux instituts de recherche sur les différentes approches de gestion d'énergie des systèmes PAC ou multi-PAC.

Avant de présenter le fruit de cette coopération inter-universitaires dans cette thèse, le projet de thèse sera clairement défini dans le chapitre I de ce manuscrit à travers une revue bibliographique. Celle-ci partira de la description du fonctionnement des piles à hydrogène ou PAC adaptées aux transports, aux SGE des systèmes PAC ou multi-PAC en passant par une exposition détaillée du concept de systèmes multi-PAC. Le but de ce chapitre sera de dégager la problématique de recherche et de formuler les objectifs de recherches. Le chapitre II sera dédié à la méthodologie. Elle consistera principalement à relever de la littérature les différents outils scientifiques qui seront nécessaires à l'atteinte des objectifs de recherche. Dans le chapitre III, un système hybride multi-PAC/ batterie sera mis en place dans le cadre particulier d'une application automobile et une SGE sera proposée pour régir le fonctionnement du système d'alimentation de manière à étendre sa durabilité. Le dernier chapitre (chapitre IV) sera consacré à la validation numérique du concept global étudié dans cette thèse. La validation numérique désigne l'ensemble des travaux de simulation réalisés, en partant de la modélisation du concept dans l'environnement Matlab/Simulink à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats de simulation. À la lumière de cette étude, un certain nombre de perspectives seront proposées comme des ouvertures sur d'autres pistes de recherche qui pourraient être explorées dans la continuité de cette thèse.



# I- État de l’art, problématique et objectifs de recherche

1. La PEMFC comme une grande alliée de la mobilité verte malgré ses défis.....	39
2. Le système à PEMFC multiples ou système multi-PAC : un concept prometteur sous différents angles.....	40
2.1 Les différentes architectures fluidiques des systèmes multi-PAC.....	40
2.2 Les différentes architectures électriques des systèmes multi-PAC .....	41
2.3 Les atouts potentiels des systèmes multi-PAC .....	43
2.3.1 Du point de vue de la durabilité.....	43
2.3.2 Du point de vue du rendement énergétique .....	45
2.3.3 Du point de vue de la tolérance aux pannes .....	46
2.3.4 Du point de vue du coût.....	47
2.4 Gestion d’énergie des systèmes multi-PAC .....	49
2.4.1 Revue des SGE des systèmes multi-PAC.....	51
2.4.1.1 SGE basées sur une approche déterministe .....	51
2.4.1.2 SGE basées sur une approche d’optimisation.....	55
3. Problématique générale, objectif général et objectifs spécifiques de recherche.....	58
3.1 Les SGE basées sur le diagnostic pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC...59	
3.1.1 Le diagnostic.....	60
3.1.2 Les SGE basées sur le diagnostic .....	61
3.2 Les SGE basées sur le pronostic pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC ....	62

3.2.1	Le pronostic .....	64
3.2.1.1	Estimation instantanée de l'état de santé d'une PAC .....	64
3.2.1.2	Prédiction de l'évolution temporelle de l'indicateur de santé sur un long horizon en vue d'estimer la durée de vie restante d'une PAC .....	65
3.2.1.3	Estimation de la durée de vie restante ou RUL d'une PAC .....	70
3.2.2	Les SGE basées sur le pronostic.....	71
3.3	Les objectifs spécifiques de recherche .....	73
3.4	Organisation de la thèse et présentation des laboratoires d'accueil .....	75

# 1. La PEMFC comme une grande alliée de la mobilité verte malgré ses défis

Les PEMFC convertissent directement l'énergie chimique du dihydrogène ( $H_2$ ) en électricité en rejetant de l'eau pure et de la chaleur qui peuvent être aussi bien exploitées dans certaines applications. Selon le DoE des États-Unis, elles peuvent jouer un rôle particulièrement important dans les transports en permettant le remplacement progressif des carburants polluants (essence et diesel) utilisés aujourd'hui dans les véhicules par du  $H_2$ . Sans compter l'avantage de n'émettre aucun GES, les PEMFC génèrent de l'énergie électrique avec un rendement d'environ 60% donc trois fois plus élevé que celui des moteurs thermiques conventionnels qui est inférieur à 20% [U.S DoE, 2015]. De plus, en raison de leur température de fonctionnement qui est relativement basse ( $<90$  °C), de leur capacité de démarrage rapide et de leur faible signature acoustique comparée à celle des moteurs thermiques, les PEMFC conviennent parfaitement aux applications de transport [Maiti et al., 2022]. Cependant, leur coût élevé et leur durée de vie ( $\sim 5$  000 heures en contexte véhiculaire) qui n'atteint pas encore la cible de 8 000 heures fixée par le DoE freinent considérablement leur commercialisation [Ahmad et al., 2022][M. Xie et al., 2022]. Toutefois, l'identification des matériaux moins onéreux dans le processus de fabrication des PEMFC ainsi que leur déploiement à grande échelle pourraient favoriser la baisse du coût unitaire mais encore faut-il développer les infrastructures de recharge en  $H_2$  [Gittleman et al., 2019][Greene et al., 2020]. Pour ce qui est de la durabilité, des solutions complémentaires au développement d'un assemblage membrane-électrodes plus robuste aux phénomènes de dégradation des PEMFC sont nécessaires pour étendre leur durée de vie [D. Shi et al., 2022].

## **2. Le système à PEMFC multiples ou système multi-PAC : un concept prometteur sous différents angles**

Depuis un peu plus d'une décennie, le concept des systèmes multi-PAC fait de plus en plus l'objet de plusieurs travaux de recherche qui tentent de relever les défis liés à la durabilité, au coût, au rendement énergétique et à la tolérance aux pannes des systèmes mono-PAC [W. Shi et al., 2022][Qiu et al., 2023][S. Zhou et al., 2021]. Il consiste à associer plusieurs PAC de puissances modérées soit avec des auxiliaires en commun pour former un système multi-PAC dans lequel les PAC sont dépendantes les unes des autres, ou soit avec des auxiliaires propres à chaque PAC pour constituer un système multi-PAC complet. Les systèmes multi-PAC sont ainsi dotés d'une importante flexibilité en termes d'architectures fluidiques et électriques. Mais, selon que le système multi-PAC soit complet ou composé de PAC partageant les mêmes auxiliaires, certaines architectures fluidiques ou électriques peuvent ou ne pas être adoptées.

### **2.1 Les différentes architectures fluidiques des systèmes multi-PAC**

L'architecture fluidique d'un système multi-PAC désigne la manière dont les PAC qui le composent sont approvisionnées en  $H_2$  et en  $O_2$ . L'approvisionnement peut se faire en série (Fig.6a) de sorte que le canal de sortie d'hydrogène d'une PAC soit relié à l'entrée d'hydrogène d'une autre PAC. Cependant, une chute de pression de gaz peut facilement subvenir entre deux PAC successives et entraîner une baisse de performance de la PAC qui est reliée à la sortie de l'autre. L'architecture en série à compression renforcée (Fig.6b) permet d'éviter une telle éventualité grâce à la présence des compresseurs entre les PAC successives. Cependant, il faut

noter que l'ajout de compresseurs diminue le rendement énergétique du système multi-PAC car les compresseurs peuvent être très énergivores [Marx et al., 2014]. De plus, il n'apporte aucun avantage significatif en termes de modularité car les PAC demeurent fortement dépendantes les unes des autres. En adoptant l'architecture parallèle (Fig.6c), les PAC peuvent être indépendamment alimentées en réactifs, ce qui augmente la modularité du système multi-PAC et facilite ainsi le contrôle des PAC d'un point de vue fluïdique [S. Zhou et al., 2022].

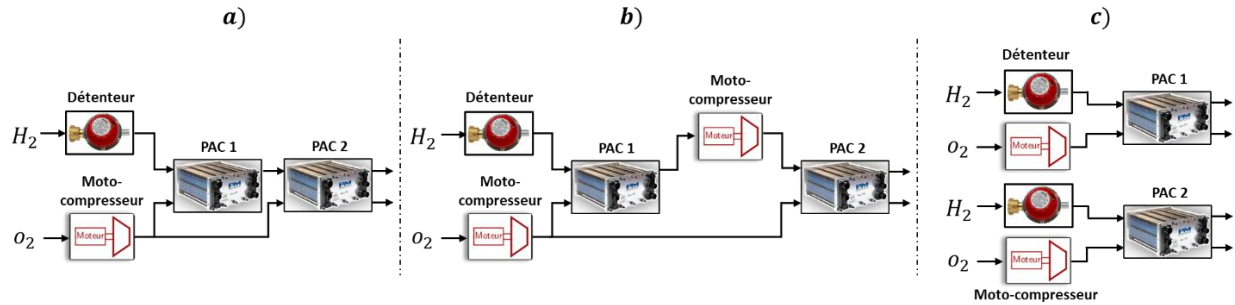


Figure 6: Architectures fluidiques des systèmes multi-PAC

## 2.2 Les différentes architectures électriques des systèmes multi-PAC

Dans un système multi-PAC, les PAC peuvent être électriquement associées les unes aux autres suivant différentes architectures telles que l'architecture parallèle (Fig.7a), l'architecture en cascade (Fig.7b), l'architecture série-parallèle (Fig.7c) et l'architecture en série (Fig.7d).

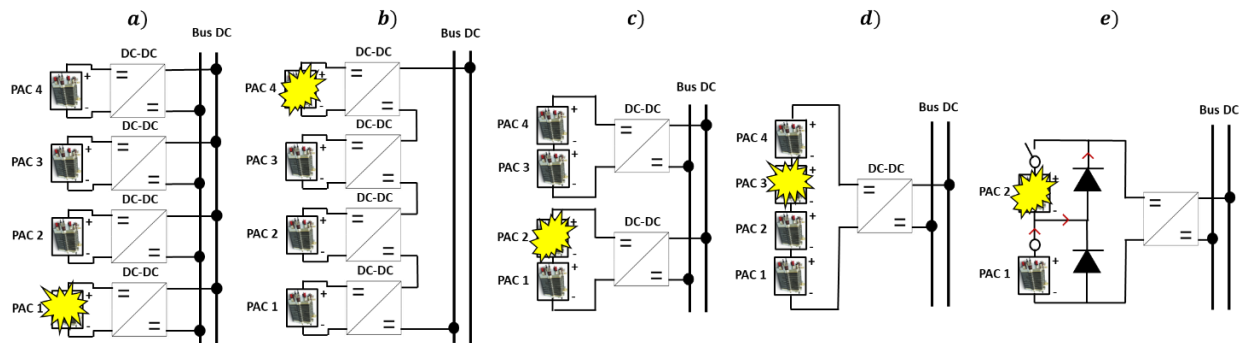


Figure 7: Architectures électriques des systèmes multi-PAC avec apparition de défauts



## Chapitre I

L'architecture électrique parallèle consiste à relier individuellement chaque PAC au bus continu à travers un convertisseur DC-DC et à la contrôler indépendamment des autres. Elle permet de bénéficier du plus haut niveau de modularité du système multi-PAC [De Bernardinis et al., 2008] car en cas de dysfonctionnement d'un des modules {PAC, convertisseur} comme illustré à la Fig.7a, le système multi-PAC peut continuer de répondre aux besoins essentiels de puissances grâce aux autres modules. Ainsi, la maintenance du module en panne peut être plus simple et planifiée avec plus de souplesse. Toutefois, cette architecture peut être plus coûteuse car elle exige l'utilisation d'un grand nombre de convertisseurs. De plus, si un gain important est nécessaire pour élever la tension de sortie des PAC, le contrôle des convertisseurs risque de créer un stress considérable sur les composants de puissance. Ces deux aspects représentent les principaux inconvénients de l'architecture électrique parallèle mais ils font ressortir les avantages de l'architecture en série.

En effet, telle qu'elle apparaît sur la Fig.7d, l'architecture électrique en série consiste à associer les PAC en cascade pour élever le niveau de tension avant de relier l'ensemble à un convertisseur DC-DC. Cependant, même si elle est simple à mettre en œuvre par rapport à l'architecture parallèle, elle n'offre aucune possibilité de contrôler chaque PAC individuellement car elle leur impose d'emblée le même courant de fonctionnement. En outre, le dysfonctionnement d'une PAC entraîne généralement un arrêt total de fonctionnement de tout le système multi-PAC. D'après [Marx et al., 2015], le système multi-PAC pourrait fonctionner en mode dégradé avec l'architecture en série si un circuit de dérivation ou d'isolation est relié à chaque PAC (Fig.7e) mais encore faut-il éviter que les pics de courant pouvant provenir de la reconnexion des PAC isolées endommagent le système.

Les architectures électriques en série et en parallèle possèdent ainsi chacune leurs points forts et leurs points faibles. Le choix de l'une ou de l'autre dans une application de système multi-PAC est donc très subjectif. Toutefois, il est aussi possible de bénéficier respectivement d'un avantage propre à l'architecture parallèle et d'un avantage propre à l'architecture en série en adoptant l'architecture en cascade illustrée à la Fig.7b. Il s'agit de la possibilité de contrôler individuellement chaque PAC et de répartir la tension globale du système multi-PAC entre les PAC pour éviter de solliciter un gain trop important de la part des convertisseurs et ainsi atténuer le stress des composants de puissance.

Tout comme l'architecture en cascade, l'architecture série-parallèle (Fig.7c) permet de faire un bon compromis entre les architectures en série et parallèle car l'association en série des PAC permet d'élever le niveau de tension et la mise en parallèle des modules {PAC, convertisseur} génère de la redondance qui rend possible le fonctionnement en mode dégradé.

Dans une application, le choix entre les différentes architectures fluidiques et électriques dépendra des atouts de systèmes multi-PAC que le concepteur souhaite mettre le plus en avant et exploiter pour améliorer leur durée de vie, leur rendement énergétique, leur tolérance aux pannes ou leur coût.

### **2.3 Les atouts potentiels des systèmes multi-PAC**

La durabilité, le rendement énergétique, la tolérance aux pannes et le coût des PAC représentent les quatre critères d'évaluation des systèmes PAC dans la littérature [Marx et al., 2017]. Il faut impérativement les améliorer pour favoriser l'introduction des technologies de PAC notamment des véhicules à hydrogène au détriment des véhicules à moteur thermique sur le marché automobile [Garcia et al., 2014]. L'usage des systèmes multi-PAC révèle un intérêt particulier pour chacun des critères évoqués.

#### **2.3.1 Du point de vue de la durabilité**

Dans un système mono-PAC en configuration « full-power » tel qu'il est décrit dans la sous-section 2.2 de l'introduction générale, l'unique pile du système est souvent sollicitée peu importe le niveau de puissance demandée par la charge [H. Chen et al., 2022]. Il est possible que celle-ci se retrouve parfois en train d'opérer dans une plage de puissance qui accélère sa dégradation [Lorenzo et al., 2021]; ce qui peut réduire sa durée de vie. En réalité, lorsqu'une PAC est en utilisation, elle est soumise à différents mécanismes de dégradation : l'impact des cycles de démarrages-arrêts fréquents sur son état de santé, l'influence du point de puissance de fonctionnement car certaines zones d'opération peuvent être plus dégradantes que d'autres pour la PAC, l'effet de la dynamique du profil imposé à la PAC, etc.

- **Lien entre les cycles de démarrages-arrêts fréquents et le vieillissement des PAC :**

Les cycles de démarrages-arrêts fréquents entraînent la corrosion du support carboné du catalyseur et l'augmentation de la résistance ohmique équivalente de la PAC [Lin et al., 2015]. En effet, au cours d'une expérimentation qui consistait à répéter un cycle de démarrage-arrêt 1800 fois sur une PAC, les auteurs ont remarqué qu'à chaque phase d'arrêt de la PAC, le phénomène d'inversion de cellules avait lieu au sein de la PAC. Ce phénomène accélère généralement la corrosion de la couche carbonée du catalyseur et conduit à une perte de performances de l'assemblage membrane-électrodes [Travassos et al., 2011].

- **L'influence du point de puissance de fonctionnement sur le vieillissement des PAC :**

Grâce à des tests de vieillissement réalisés sur une PAC, [Garcia-Sanchez et al., 2019] ont remarqué que l'utilisation de la PAC à faible densité de courant entraîne la dégradation de la membrane polymère et la dissolution du platine. Dans leurs expériences, ces phénomènes de dégradation se traduisaient par une augmentation significative des résistances à hautes et basses fréquences qui étaient mesurées grâce à la spectroscopie d'impédance électrochimique. Selon [Jouin et al., 2015], les phases d'utilisation des PAC à faible densité de courant représenteraient environ 28% de leur temps de vie dans le cadre d'une application automobile. Ces phases correspondent notamment aux situations d'arrêts du véhicule aux feux de circulation ou toute autre situation dans laquelle la PAC fournirait une puissance relativement faible uniquement pour alimenter les auxiliaires. Lorsque la PAC fonctionne à des densités de courant trop élevées également, les plaques bipolaires peuvent se déformer et présenter des fissures.

- **L'effet de la dynamique du profil sur le vieillissement des PAC :**

Pendant les phases transitoires d'un cycle de conduite, il est difficile de maintenir les conditions d'opération des PAC à leur valeur nominale. Plusieurs défauts tels que le noyage ou l'assèchement de la membrane peuvent en résulter et même conduire à des dégradations irréversibles de l'assemblage membrane-électrodes [Shan et al., 2016]. De plus, les conditions d'opération dynamiques sont souvent à l'origine de la formation d'impuretés au

## Chapitre I

sein de la PAC [Patil et al., 2023]. Ce qui entraîne l’empoisonnement et la dégradation chimique des cellules de la PAC.

Tous ces facteurs de dégradation montrent que la gestion d’énergie des PAC est une tâche cruciale car c’est à travers elle que peuvent être définies les modes d’opérations des PAC de sorte à limiter l’apparition des mécanismes de dégradation. Ainsi, en adoptant un concept comme celui des systèmes multi-PAC qui est susceptible de générer plus de degrés de liberté ou une plus grande marge de manœuvre dans la gestion d’énergie, de grands progrès pourraient être réalisés par rapport à la durabilité des PAC.

L’un des avantages évidents que les systèmes multi-PAC apporteraient par exemple, est la possibilité d’activer uniquement le minimum de PAC nécessaire pour répondre à une demande comme le montre l’exemple considéré à la Fig.8 avec des PAC de 500 W. Une telle gestion d’énergie dispose d’une flexibilité importante quant au choix des PAC à activer mais elle permet aussi de préserver le temps de vie des PAC non activées et d’étendre la durée de vie globale du système multi-PAC [Khalatbarisoltani et al., 2019]. Cet avantage peut être particulièrement intéressant dans les applications où le courant demandé par la charge n’est pas constant mais varie comme c’est souvent le cas dans les applications automobiles.



Figure 8: Répartition d’une demande entre des PAC identiques de 500 W en n’activant que le minimum PAC nécessaire

### 2.3.2 Du point de vue du rendement énergétique

Une PAC est caractérisée par sa courbe de rendement énergétique en fonction de la puissance ( $\eta = f(P)$ ). Dans le cadre d’un système mono-PAC, la caractéristique  $\eta = f(P)$  du système présente une seule région de fonctionnement optimal encore appelé zone de meilleur rendement comme le montre la Fig.9 pour une PAC de 70 kW [Truong et al., 2020]. Cependant,

## Chapitre I

en associant plusieurs PAC de puissances modérées, le système multi-PAC ainsi obtenu, a la possibilité de fonctionner sur une plage de puissances optimales beaucoup plus étendue [Dépature et al., 2013]. En d'autres termes, l'application d'une stratégie de gestion d'énergie adéquate peut permettre d'élargir la zone de meilleur rendement du système multi-PAC. La Fig.10 en montre un exemple dans lequel un système multi-PAC de 75 kW composé de trois PAC de 25 kW serait utilisé au lieu d'une grosse PAC de 70 kW. Il convient d'y remarquer que contrairement au système mono-PAC de 70 kW, le système multi-PAC possède autant de régions de fonctionnement optimal que de PAC. Ce point positif permet aux systèmes multi-PAC de se démarquer des systèmes mono-PAC et de mieux convenir aux applications de transport où la puissance demandée varie parfois sur une large plage.

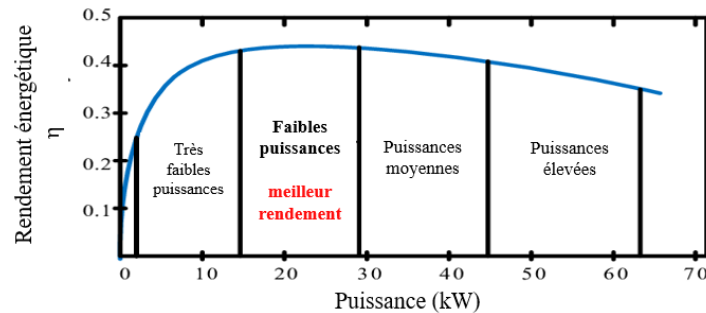


Figure 9: Caractéristique rendement =  $f(\text{Puissance})$  d'un système mono-PAC de 70 kW [Truong et al., 2020]

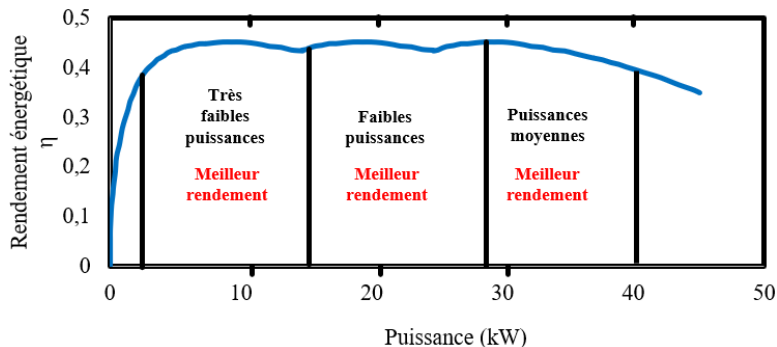


Figure 10: Courbe du rendement =  $f(\text{Puissance})$  d'un système multi-PAC de 75 kW (~70kW) composé de trois PAC de 25 kW, sous l'hypothèse d'une gestion d'énergie adéquate

### 2.3.3 Du point de vue de la tolérance aux pannes

Les systèmes multi-PAC sont qualifiés de systèmes redondants à cause de la multiplicité des PAC et de leur compatibilité avec différentes architectures fluidiques et électriques qui leur permettent d'opérer en mode dégradé. Ce mode d'opération peut s'avérer nécessaire lorsqu'au

## Chapitre I

cours du fonctionnement du système multi-PAC, l'un des modules tombe brusquement en panne tel qu'il est illustré à la Fig.11. Certes, dans ce cas, le système multi-PAC présenterait des performances réduites mais grâce aux autres modules, les besoins essentiels de puissance peuvent être satisfaits en attendant la planification des travaux de maintenance sur le module défectueux [Bahrami et al., 2020][Moghadari et al., 2022]. Ainsi, en termes de tolérance aux pannes, les systèmes multi-PAC possèdent une bonne longueur d'avance sur les systèmes mono-PAC avec lesquels toute intervention de défaut est synonyme d'arrêt d'alimentation de la charge.

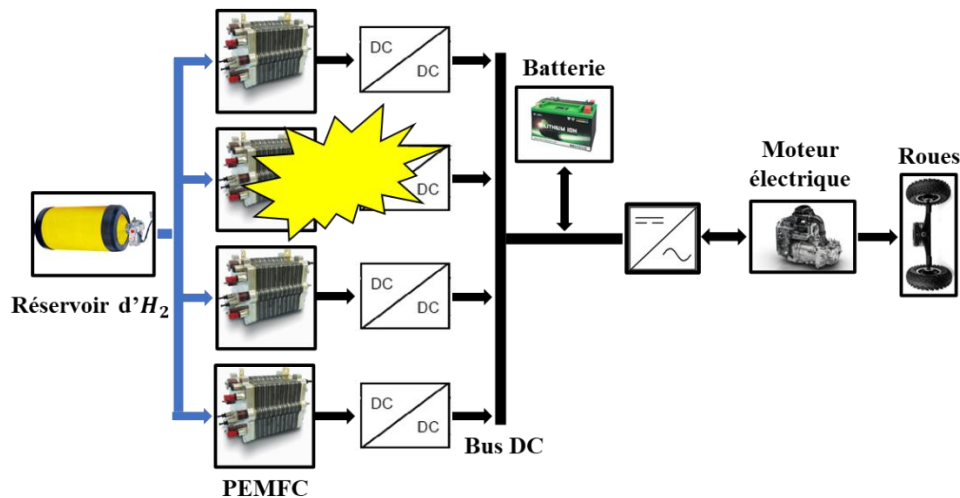


Figure 11: Illustration d'un cas de figure permettant de mettre en évidence l'importante tolérance aux pannes des systèmes multi-PAC

### 2.3.4 Du point de vue du coût

Avec le lancement de la production de masse des PAC, le concept de systèmes multi-PAC pourrait permettre de réduire le coût unitaire des PAC grâce à des économies d'échelle. En effet, l'adoption de ce concept encouragerait l'achat d'un grand nombre de piles, favorisant ainsi l'application des remises sur quantités et par conséquent une baisse du coût unitaire. Un rapport portant sur l'analyse des coûts de fabrication des PAC a été établi et fourni au DoE des États-Unis en 2017 par « *Battelle, USA* » une organisation mondiale de recherche et développement dont la mission est de mettre la science et la technologie au service de la société. Les tableaux 2 à 3 et la Fig.12 tirés de ce rapport illustrent la manière dont le coût de fabrication unitaire des PAC englobant le coût des matériaux, de la main d'œuvre, des machines, des résidus et d'outillage diminue en fonction de la quantité d'unités produites par an et ce, pour des PAC de 1 kW, 5 kW,

## Chapitre I

10 kW, et 25 kW. Les gammes de puissance considérées dans ce rapport entre en cohérence avec le concept de systèmes multi-PAC puisque celui-ci repose sur l'utilisation des PAC de puissance modérées. Toutefois, si l'économie d'échelle représente un bon moyen pour baisser le coût de production unitaire des PAC, elle ne garantit pas pour autant la réduction du coût de production unitaire des systèmes PAC qui composent les systèmes multi-PAC complets. Cela est dû à la multiplication des équipements auxiliaires (sous-système d'alimentation en gaz, convertisseurs de puissance, système de gestion thermique, etc.) qui constituent une grande partie du coût global [Battelle Memorial Institute, 2017]. Néanmoins, l'avantage de pouvoir utiliser le même système PAC (par exemple un système PAC élémentaire de 25 kW) de façon modulaire dans les applications de puissances différentes, éviterait de produire une grande diversité de gammes de puissance des PAC et des convertisseurs au profit de quelques-unes seulement. Ce qui contribuerait au lancement d'une production de masse des systèmes PAC élémentaires de manière artificielle et ainsi à la réduction du coût de production unitaire des systèmes PAC. Quoi qu'il en soit, le gain sur le coût d'exploitation des systèmes multi-PAC lorsqu'ils sont gérés par une SGE efficace, pourrait compenser les éventuels coûts supplémentaires liés à la multiplication des auxiliaires.

Tableau 2: Coût unitaire de fabrication des PEMFC de 1 kW et de 5 kW en fonction de la quantité d'unités produites par an [Battelle Memorial Institute, 2017]

Tailles de PAC de type PEM	1 kW				5 kW			
	100	1000	10000	50000	100	1000	10000	50000
Coût unitaire de fabrication	\$3 930,86	\$1 052,35	\$554,32	\$460,09	\$6 659,30	\$2 696,76	\$1 642,50	\$1 406,62

Tableau 3: Coût unitaire de fabrication des PEMFC de 10 kW et de 25 kW en fonction de la quantité d'unités produites par an [Battelle Memorial Institute, 2017]

Tailles de PAC de type PEM	10 kW				25 kW			
	100	1000	10000	50000	100	1000	10000	50000
Coût unitaire de fabrication	\$9 702,41	\$4 348,84	\$2 849,06	\$2 600,63	\$16 674,07	\$8 527,49	\$6 354,37	\$6 217,04

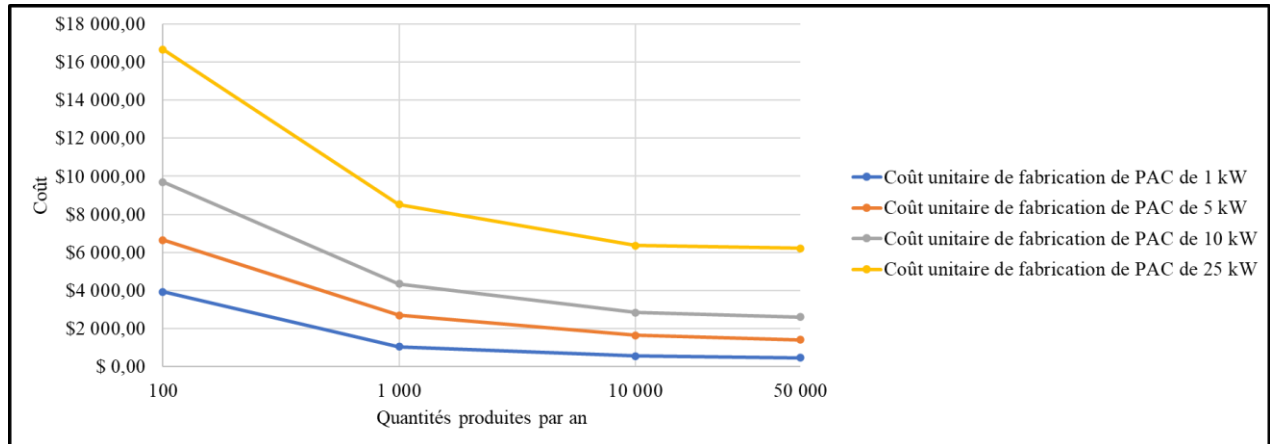


Figure 12: Réduction du coût unitaire de fabrication des PEMFC de 1 kW, 5 kW, 10 kW, 25 kW en fonction de la quantité d'unités produites par an [Battelle Memorial Institute, 2017]

## 2.4 Gestion d'énergie des systèmes multi-PAC

Pour gérer l'énergie des systèmes multi-PAC, deux différentes approches sont généralement utilisées dans la littérature: l'approche déterministe et l'approche basée sur l'optimisation [Suresh et al., 2018][ Khalatbarisoltani et al., 2019][ Khalatbarisoltani et al., 2022][X. Li et al., 2021]. La première consiste à mettre en place une série de règles « si, ..., alors » qui régissent le fonctionnement du système multi-PAC. Elle présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre en ligne car elle dépend essentiellement de la maîtrise que le concepteur a du problème posé par la gestion d'énergie c'est-à-dire comment répartir la puissance demandée entre les PAC afin d'optimiser les performances du système multi-PAC. D'un autre côté, elle permet de concevoir des stratégies de gestion d'énergies (SGE) moins complexes et par conséquent moins gourmandes en temps de calcul. Cependant, comme elle ne repose que sur une analyse experte du problème par le concepteur, elle peut conduire à des solutions de gestion d'énergie non optimales du point de vue du rendement énergétique et de la durée de vie du système multi-PAC.

L'approche basée sur l'optimisation se distingue de l'approche déterministe en se servant des méthodes d'optimisation hors-ligne comme le « Dynamic Programming (DP) » ou des méthodes d'optimisation en ligne telles que « Particle Swarm Optimization (PSO) », « Genetic Algorithm (GA) », « Bee Algorithm (BA) », « Simulated Annealing (SA) », etc., pour résoudre de manière optimale un problème d'optimisation défini au préalable [C. Zhang et al., 2021]. La



## Chapitre I

définition du problème consiste à construire une « fonction objectif » ou fonction de coût en considérant les performances à optimiser et ensuite à formuler les contraintes d'optimisation. La résolution revient ainsi à trouver le vecteur de répartition de puissance qui minimise au mieux cette fonction. Les SGE basées sur l'optimisation imposent généralement une lourde charge de calcul faisant d'elles des stratégies difficilement implémentables en ligne [J. Zhou et al., 2021]. Néanmoins, en raison de leurs performances élevées, elles peuvent être employées hors-ligne pour servir de références aux SGE basées sur l'approche déterministe.

Il existe une autre catégorie de SGE qui attire de plus en plus l'attention dans le domaine de la gestion d'énergie. Cependant, à ce jour, elle est principalement traitée dans le cadre des véhicules électriques et des véhicules hybrides électriques [Xiong et al., 2017]. Il s'agit des SGE basées sur l'intelligence artificielle (IA) qui utilisent des techniques d'IA comme « Support Vector Machine », « Reinforcement Learning », « Deep Reinforcement Learning », etc., pour apprendre les habitudes du conducteur pendant les cycles de conduites et pour prédire ou optimiser à court terme le profil de mission de sorte à minimiser la consommation d'énergie [Y. Zhou et al., 2018][Hu et al., 2018][Lian et al., 2020]. Ces stratégies pourraient renforcer les performances des SGE basées sur les approches déterministe et d'optimisation résumées à la Fig.13 et qui restent jusqu'à présent les plus répandues en termes de gestion d'énergie des systèmes multi-PAC.

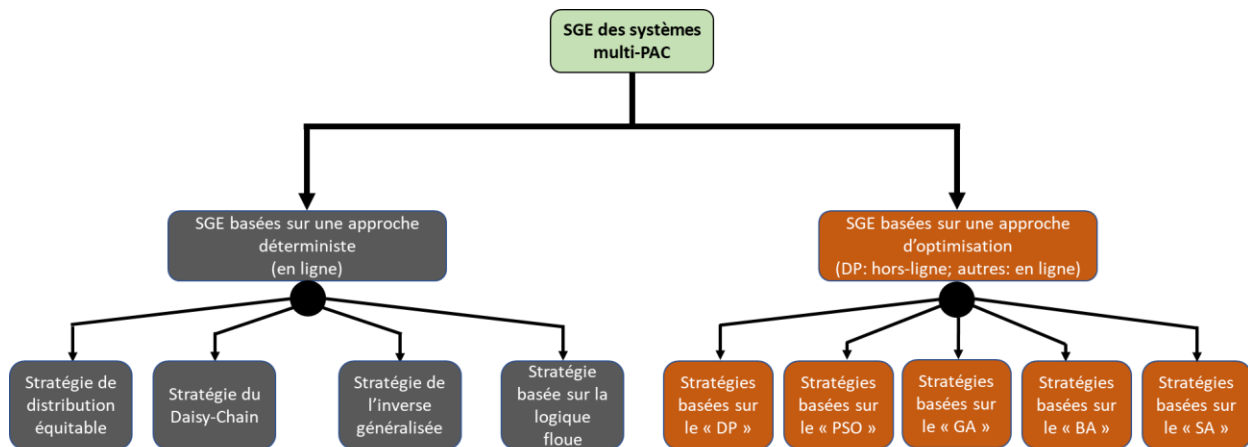


Figure 13: Les différentes approches de gestion d'énergie des systèmes multi-PAC et quelques exemples de stratégies de gestion d'énergie basées sur ces approches

## 2.4.1 Revue des SGE des systèmes multi-PAC

### 2.4.1.1 SGE basées sur une approche déterministe

Les SGE basées sur une approche déterministe sont des stratégies qui répartissent la demande entre les PAC du système multi-PAC via des règles. Elles reposent sur des principes relativement simples qui facilitent leur exécution en ligne et par conséquent leur utilisation en industrie sur les systèmes multi-sources ou les systèmes redondants en général. La stratégie de distribution équitable est la plus triviale car elle consiste à répartir la puissance demandée par la charge de façon égale entre les PAC (Fig.14). Cependant, une étude expérimentale menée par [Garcia et al., 2014], a montré qu'elle ne permet pas d'exploiter les nombreux degrés de liberté offerts par les systèmes multi-PAC. En effet, avec elle, ceux-ci présentent des performances similaires à celles des systèmes mono-PAC; ce qui n'est pas le cas pour la stratégie en guirlande encore appelée stratégie du Daisy-Chain [Marx et al., 2017].

Comme l'illustre la Fig.15, la stratégie du Daisy-Chain consiste à solliciter les PAC de manière séquentielle suivant un ordre fixe. La première PAC de la file se voit attribuer la totalité de la demande et si en fournissant sa puissance maximale, elle n'arrive toujours pas à répondre à la puissance demandée, la seconde pile est sollicitée. Le processus évolue ainsi jusqu'à ce que toutes les PAC soient utilisées ou jusqu'à ce que la demande soit complètement satisfaite. Bien que ce principe fasse intervenir le minimum de PAC pour répondre au besoin et permette ainsi de préserver temporairement, les durées de vie restantes de certaines PAC, il accélère souvent la dégradation des premières PAC de la file en les faisant fonctionner à leur puissance maximale. Pour éviter de solliciter les PAC jusqu'à leur puissance maximale, [Liang et al., 2022] déterminent les puissances limites d'utilisation des PAC qui minimisent la consommation d' $H_2$  du système multi-PAC. Cette forme améliorée de la stratégie du Daisy-Chain a permis de réduire de 9,42% la consommation d' $H_2$  d'un système multi-PAC composé de 4 PAC de 1 kW, par rapport à la stratégie du Daisy-Chain original. Cependant, l'aspect de la durabilité n'a pas été traité par l'auteur. Au lieu de déterminer les puissances limites d'utilisation des PAC qui ne minimisent que la consommation d' $H_2$  du système multi-PAC, il pourrait être intéressant de trouver celles qui minimisent à la fois sa consommation d' $H_2$  et sa dégradation.

## Chapitre I

Une autre variante de la stratégie du Daisy-Chain basée sur une machine d'états adaptative a été proposée par [Macias et al., 2019], pour résoudre le problème de surexploitation de certaines PAC par rapport à d'autres, observé avec le Daisy-Chain original. Pour ce faire, la stratégie proposée utilise les PAC suivant un ordre qui est mis à jour en fonction de leurs performances énergétiques estimées en temps réel par un algorithme d'identification de modèle (Fig.16). Une simulation « *Hardware-In-the-Loop (HIL)* » a montré qu'elle est capable de réduire la consommation d' $H_2$  du système multi-PAC de plus de 14% et de plus de 7%, respectivement, par rapport à la stratégie de distribution équitable et la stratégie du Daisy-Chain original. En termes de dégradation, bien que la durée de vie du système multi-PAC n'ait été évaluée par l'auteur, la capacité de la stratégie proposée à égaliser les niveaux de dégradation des PAC a néanmoins été soulignée.

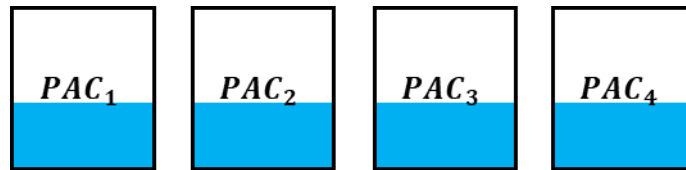


Figure 14: Illustration de la stratégie de distribution équitable

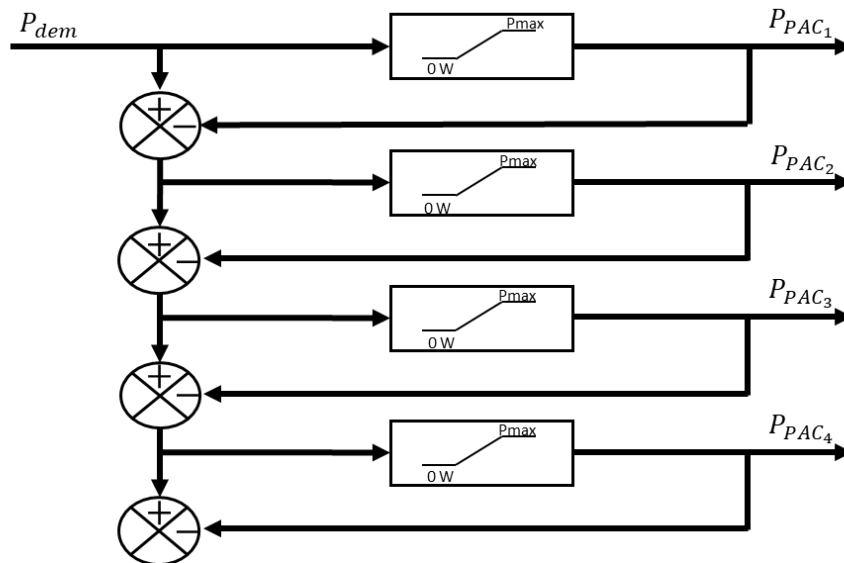


Figure 15: Illustration du principe de la stratégie du Daisy-Chain

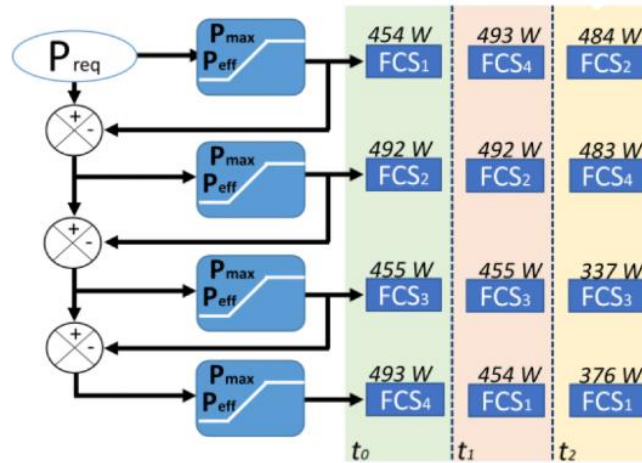


Figure 16: Illustration du principe de la stratégie du Daisy-Chain basée sur une machine d'états adaptative [Macias et al., 2019]

À l'instar des stratégies de distribution équitable et du Daisy-Chain original, les deux formes améliorées de la stratégie du Daisy-Chain peuvent être appliquées aux systèmes multi-PAC composés de PAC de même taille ou de PAC de différentes tailles. Lorsque le système multi-PAC comporte des PAC de différentes tailles, il peut également être géré par la stratégie de l'inverse généralisée [Marx et al., 2017]. Celle-ci consiste tout simplement à distribuer la demande entre les PAC en accordance avec leur taille  $P_{max}$  comme l'indique la Fig.17. Ainsi, la plus grosse PAC du système multi-PAC se voit attribuer une part de contribution plus importante que celles des autres PAC.

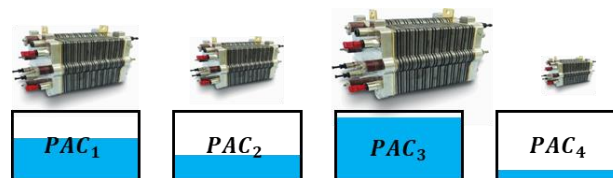


Figure 17: Illustration du principe de la stratégie de l'inverse généralisée

Outre ces SGE basiques, d'autres stratégies basées sur les règles ont été proposées dans la littérature et celles-ci relèvent de l'analyse subjective du problème étudié par chaque auteur. Par exemple, pour étudier l'impact du taux d'hybridation sur les performances énergétiques d'un système multi-PAC, [Marx et al., 2016] ont défini plusieurs modes d'opération pour gérer l'énergie d'un système hybride multi-PAC/batterie utilisé à différents taux d'hybridation ( $Taux\ d'hyb = \frac{P_{maxBat}}{P_{maxsys\ multi-PAC} + P_{maxBat}}$ ). Les résultats obtenus sous la même SGE leur ont permis de conclure qu'en considérant un système multi-PAC avec un taux d'hybridation élevé, il est possible

## *Chapitre I*

d'optimiser sa consommation d' $H_2$  ainsi que les temps d'utilisation des PAC. [Jian et al., 2021] ont également mis en place une SGE en définissant six modes d'opération d'un système hybride multi-PAC/batterie pour valider, via une simulation HIL en temps réel, tout le système d'alimentation d'un véhicule hybride électrique à hydrogène. Grâce à la SGE proposée, le rendement énergétique des PAC a pu être maintenu entre 53% et 56% à chaque fois qu'elles fonctionnaient et l'état de charge de la batterie était toujours compris entre 63% et 70%. Cela a conduit à une réduction importante de la consommation d' $H_2$  du système multi-PAC et de la dégradation de la batterie. Cependant l'aspect de durabilité du système multi-PAC n'a pas été abordée dans cette étude car le vieillissement des PAC n'y a pas été modélisé. En cherchant à préserver les durées de vie d'un système multi-PAC et d'une batterie au sein d'un micro-réseaux, [Vivas et al., 2022] ont proposé une SGE basée sur la logique floue pour y assurer l'équilibre de puissance. Par rapport à une SGE basée sur le contrôle prédictif, le contrôleur floue proposé a permis de réduire la dégradation du système multi-PAC ainsi que celle de la batterie d'environ 60%. Cependant, la consommation d' $H_2$  n'a pas été évaluée par les auteurs. [Ghaderi et al., 2021] ont proposé une SGE à deux étages pour gérer l'énergie d'un système hybride multi-PAC/batterie composé de trois PAC de 7,3 kW de sorte à minimiser son coût d'opération (coût de dégradation + coût de consommation d' $H_2$ ). Dans un premier temps, des règles prédéfinis assuraient l'égalisation des niveaux de dégradation des PAC et dans un second temps, la programmation quadratique était utilisée pour optimiser la contribution en puissance de chaque PAC dans l'optique de satisfaire la demande. En combinant ainsi l'approche déterministe et l'approche de l'optimisation, la stratégie a conduit à une baisse d'environ 12,3% du coût d'opération par rapport à la stratégie du Daisy-Chain basée sur la machine d'états adaptative. L'utilisation du coût d'opération comme fonction objectif a donc permis d'aborder un problème de gestion d'énergie multi-objectifs dont il devrait être toujours question lorsqu'il s'agit de concevoir des SGE de systèmes multi-PAC. En effet, il est important de considérer à la fois les critères de durabilité et de consommation d' $H_2$  (ou rendement énergétique) dans la gestion d'énergie des systèmes multi-PAC pour promouvoir le développement de la technologie des PAC dans des secteurs comme le transport [Fletcher et al., 2016]. La possibilité de résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs en adoptant l'approche de l'optimisation incite les chercheurs à davantage s'orienter vers la conception des SGE basées sur l'optimisation.

### 2.4.1.2 SGE basées sur une approche d'optimisation

La conception des SGE basées sur une approche d'optimisation revient à construire une fonction de coût, puis à déterminer le vecteur de répartition de puissance qui la minimise à l'aide des algorithmes d'optimisation tels que GA, DP, PSO, SO, etc. [Han et al., 2017] ont géré l'énergie d'un système multi-PAC composé de 2 PAC de 35 kW à partir d'une SGE basée sur le « Minimum Loss Power Algorithm (MLPA) » qui optimisait le rendement énergétique et les pertes de puissance. Ils se sont servis de cette stratégie pour comparer les performances énergétiques du système multi-PAC à celles d'un système mono-PAC de 70 kW. Son application sur le système multi-PAC a permis d'économiser environ 35,9% d' $H_2$  par rapport au système mono-PAC qui a pourtant également été géré par la même stratégie. En effet, avec ses deux PAC de 35 kW, le système multi-PAC disposait d'une plage de puissances optimales (puissances correspondant à un bon rendement énergétique) plus importante que celle du système mono-PAC de 70 kW. En s'assurant d'utiliser les PAC dans cette large plage, la SGE maximisait le rendement énergétique global du système multi-PAC d'où la faible consommation d' $H_2$  du système multi-PAC par rapport au système mono-PAC. [Liang et al., 2022] ont proposé une SGE qui utilise l'algorithme de descente du gradient pour déterminer la répartition de puissance qui maximise le rendement énergétique d'un système multi-PAC. La stratégie a conduit à une baisse de la consommation d' $H_2$  d'environ 1,18% par rapport à la stratégie de distribution équitable. En trouvant également la distribution de puissance qui maximise le rendement énergétique d'un système multi-PAC, les SGE proposées par [Garcia et al., 2014] et [S. Zhou et al., 2021] ont montré qu'il est possible d'obtenir un bon rendement énergétique sur une plus large plage de puissance avec un système multi-PAC qu'avec un système mono-PAC. En plus du rendement énergétique, la dégradation du système multi-PAC a été traitée par [S. Zhou et al., 2021] et il a été conclu que sous la stratégie proposée, plus il y a de PAC dans le système multi-PAC, plus son temps de vie restant peut être amélioré. Une autre SGE basée sur l'optimisation a été proposée par [Y. Yan et al., 2021] et celle-ci a été trouvée capable de réduire la consommation d' $H_2$  du système peu importe le nombre de PAC composant le système multi-PAC. En utilisant la programmation quadratique séquentielle comme algorithme d'optimisation, [G. Zhang et al., 2022] ont conçu une SGE basée sur l'optimisation multi-objectifs pour minimiser simultanément le coût de la consommation d' $H_2$  et le coût de la dégradation d'un système multi-PAC de 240 kW alimentant un véhicule poids-lourd. Celle-ci a permis d'économiser environ 60 g d' $H_2$  sur 100 km de conduite. Cependant, les états de santé

## Chapitre I

initiaux et finaux des PAC n'ayant pas été évalués par les auteurs, il serait difficile de conclure sur la capacité de la SGE à améliorer la durabilité du système multi-PAC. [Q. Li et al., 2022] ont aussi proposé une SGE basée sur l'optimisation multi-objectifs pour répartir la demande entre les PAC d'un système hybride multi-PAC/batterie de sorte à minimiser le coût d'opération (coût de la dégradation + coût de la consommation d' $H_2$ ). Grâce à l'algorithme d'essaim des salpes ou « Salp Swarm Algorithm (SSA) » la stratégie proposée a permis de réduire le coût d'opération d'environ 15,85% par rapport à la stratégie de distribution équitable.

L'approche basée sur l'optimisation peut aussi être adoptée pour améliorer les performances d'une SGE basée sur une approche déterministe. C'est le cas de la SGE d'un système hybride multi-PAC/batterie proposée par [Khalatbarisoltani et al., 2018]. Elle se base d'un côté sur la logique floue pour répartir la demande entre le système multi-PAC et la batterie et d'un autre côté sur la résolution d'un problème d'optimisation pour distribuer la puissance qui revient au système multi-PAC entre les PAC de manière à minimiser la consommation d' $H_2$ . Elle a permis de réduire la consommation d' $H_2$  d'environ 15,79% par rapport aux stratégies de distribution équitable et du Daisy-Chain. Cependant, la dégradation du système multi-PAC n'a pas été étudiée par les auteurs. [Moghadari et al., 2022] ont appliqué une stratégie similaire à un système hybride multi-PAC/batterie. L'approche basée sur les règles a été utilisée pour trouver premièrement le nombre de PAC à solliciter en fonction de la puissance demandée, de l'état de charge de la batterie et du niveau de dégradation des PAC. Ensuite, la résolution d'un problème d'optimisation par la programmation quadratique séquentielle permettait de déterminer à chaque fois la part de contribution de chaque PAC qui optimiserait le coût d'opération. Les résultats de cette stratégie ont montré qu'environ 3,85% d' $H_2$  peuvent être économisés sur un système multi-PAC par rapport à un système mono-PAC. Pour montrer que les systèmes multi-PAC pourraient davantage avoir de meilleures performances que les systèmes mono-PAC, [Khalatbarisoltani et al., 2020] ont proposé une SGE basée sur le « Decentralized Convex Optimization (DCO) » et sur l'« Auxiliary Problem Principle (APP) » afin d'exploiter la modularité des systèmes multi-PAC aussi bien d'un point de vue logiciel que matériel. Cette SGE basée sur l'optimisation décentralisée a été appliquée à un système multi-PAC composé de deux PAC de 500 W et les résultats y ont révélé qu'elle est capable de réduire le coût d'opération et le temps de calcul, respectivement, de 27,74% et de 71,31% par rapport à une SGE d'optimisation centralisée basée sur la programmation quadratique séquentielle.

## *Chapitre I*

L'analyse globale de cette revue des SGE de systèmes multi-PAC met en avant la capacité de la plupart des stratégies à optimiser la consommation d' $H_2$  des systèmes multi-PAC. Cependant, la majorité de ces stratégies n'ont pu être évaluées sur l'aspect de la durabilité des systèmes. En effet, s'il est plus facile de minimiser la consommation d' $H_2$  d'un système multi-PAC en contrôlant une grandeur physique comme le rendement énergétique, ce n'est pas le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer sa durée de vie. La section suivante de ce chapitre consistera à positionner cette thèse au vu du manque de SGE destinées à étendre la durabilité des systèmes multi-PAC.



### 3. Problématique générale, objectif général et objectifs spécifiques de recherche

Plusieurs SGE de systèmes multi-PAC peuvent être identifiées dans la littérature et quelles que soient les approches sur lesquelles elles se basent, elles visent plus la réduction de la consommation d' $H_2$  du système que l'amélioration de sa durée de vie. De nombreuses raisons pourraient expliquer la difficulté qu'éprouvent les chercheurs à intégrer le critère de la durabilité parmi les objectifs de gestion d'énergie des systèmes multi-PAC. Premièrement, la prise en compte de la durabilité dans la conception d'une SGE de systèmes multi-PAC passe souvent par la mise en place d'un modèle de vieillissement des PAC. Cependant, il est très difficile de modéliser les mécanismes de dégradation et leurs interactions au sein d'une PAC et ce, en raison de la complexité liée à la nature multi-physiques et multi-échelles des PAC [Sorrentino et al., 2020][Blal et al., 2018][H. Chen et al., 2018]. De plus, au niveau expérimental, sans compter le fait que les essais de vieillissement des PAC sont beaucoup plus complexes que les tests d'évaluation du rendement énergétique, la réalisation des tests de vieillissement sur la durée de vie complète des PAC exige la mobilisation d'une plateforme expérimentale pendant plusieurs milliers d'heures [Pahon et al., 2021][Vichard et al., 2021][Dyanty et al., 2019]. Cela nécessite un investissement financier important, ne serait-ce que pour prendre en charge les coûts d'approvisionnement en  $H_2$ . Deuxièmement, à l'inverse de la consommation d' $H_2$  qui peut être évaluée et contrôlée à travers le rendement énergétique quand le système multi-PAC fonctionne, les durées de vie restantes des PAC ne sont pas facilement accessibles. En effet, le vieillissement des PAC provient de la dégradation individuelle de différents composants internes (résistance ionique, couche catalytique, résistance de contact, couche de diffusion de gaz, résistance électronique, etc.) qui ne sont pas tous accessibles [Yuan et al., 2020][Dhimish et al., 2021][B. Li et al., 2022][Meng et al., 2021][Mohammadi et al., 2017]. Finalement, dans la gestion d'énergie des systèmes multi-PAC,

un compromis doit être effectué entre le rendement énergétique et la durée de vie car les points de meilleur rendement énergétique des PAC ne sont pas forcément ceux qui minimisent leur vitesse de dégradation [Hahn et al., 2020][Luna et al., 2016][Kölbl et al., 2022].

D’après le DoE des États-Unis, la durée de vie des PAC dans les transports doit atteindre au moins 8 000 heures pour que les véhicules à hydrogène puissent être compétitifs sur le marché de l’automobile par rapport aux véhicules à moteur thermique [Whiston et al., 2019][Yue et al., 2021]. Bien que les atouts potentiels des systèmes multi-PAC (décrits à la sous-section 2.3 de ce chapitre) soient favorables à l’atteinte de cette cible, ils reposent entièrement sur la gestion d’énergie. Cependant, à ce jour, les SGE capables d’améliorer la durée de vie des systèmes multi-PAC manquent encore dans la littérature, ce qui nous incite à définir et à traiter la problématique suivante dans cette thèse :

**« Comment la gestion d’énergie peut-elle permettre d’étendre la durée de vie d’un système multi-PAC tout en maintenant sa consommation d’hydrogène à un niveau raisonnable, dans le cadre d’une application automobile ? ».**

Pour tenter de répondre à cette problématique, il serait judicieux de relever les différents moyens proposés dans la littérature pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC via la gestion d’énergie.

Deux types de SGE susceptibles d’améliorer la durée de vie des systèmes multi-PAC peuvent être répertoriés dans la littérature. Il s’agit des SGE basées sur le diagnostic et des SGE basées sur le pronostic [Kandidayeni et al., 2022].

### **3.1 Les SGE basées sur le diagnostic pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC**

Encore connues sous le nom de stratégies de contrôle actif tolérant aux pannes « *Active Fault Tolerance Control (AFTC)* », les SGE basées sur le diagnostic prennent des décisions de gestion d’énergie à la suite de la détection d’un ou de plusieurs défauts à l’intérieur des PAC pour éviter leur dégradation effective [Dijoux et al., 2017]. Quelques défauts ou anomalies de

## Chapitre I

fonctionnement les plus courants au sein des PAC sont par exemple le manque de réactifs [Meng et al., 2022][Qin et al., 2016], le noyage [Khanafari et al., 2022][Shen et al., 2020] et l'assèchement de la membrane [X. Li et al., 2022][Laribi et al., 2021]. Si aucune action corrective n'est effectuée après leur apparition, la PAC peut subir des dégradations irréversibles telles que la déformation ou la fissure de la membrane et des plaques bipolaires, la perte de surface active des électrodes, etc., qui réduisent finalement sa durée de vie [Jemei, 2018]. Sans compter les conditions environnementales, les défauts qui surviennent pendant l'opération des PAC sont généralement liés à la manière dont elles sont utilisées d'où l'importance des SGE basées sur le diagnostic.

Le fonctionnement des SGE basées sur le diagnostic met en jeu deux différentes tâches à savoir le diagnostic du défaut et la prise de décision ou la SGE proprement dite.

### 3.1.1 Le diagnostic

Il consiste à analyser instantanément le comportement des PAC via les grandeurs mesurables, puis à détecter et identifier à partir de cette analyse en temps réel une éventuelle anomalie pendant leur opération. Par exemple, une approche innovante de diagnostic de défauts des PAC basée sur la transformée en ondelettes de la tension de sortie et sur l'extraction de l'entropie a été proposée par [Pahon et al., 2021]. La transformée en ondelettes a permis de décomposer la tension de sortie en différentes bandes de fréquences pour y obtenir les informations sur la dégradation. Utilisée comme indicateur de santé grâce à sa capacité à mesurer l'homogénéité des distributions spectrales provenant de la transformée en ondelettes, l'entropie a été évaluée sur des PAC soumises à différents défauts (faible et forte stœchiométrie de l'air, défaut de refroidissement thermique, empoisonnement de réactifs). Ce travail a permis aux auteurs de dresser une table de correspondance de caractérisation des défauts en fonction de la valeur de l'entropie. Des études d'incertitudes devraient néanmoins être réalisées pour permettre de comparer l'approche proposée à d'autres méthodes de diagnostic, notamment du point de vue de la précision. Dans le but de mettre en place une approche de diagnostic de faible complexité pour faciliter son utilisation en temps réel, [Z. Liu et al., 2022] ont proposé un réseau de neurones densément connecté (un type de réseaux de neurones convolutifs). Celui-ci est capable d'identifier les défauts de noyage et d'assèchement de la membrane ainsi que la faible stœchiométrie en air et ce, avec une précision d'environ 95,3%. Néanmoins, une étude supplémentaire pourrait être menée par les

## *Chapitre I*

auteurs pour permettre à cette méthode de diagnostic de relever également l'ampleur des défauts détectés. La considération de cet aspect pourrait davantage l'améliorer et faire d'elle une méthode de référence dans le domaine du diagnostic.

Plusieurs autres méthodes de diagnostic apparaissent dans la littérature [Lu et al., 2022][Aubry et al., 2022][Shangwei Zhou et al., 2022][J. Wang et al., 2021] et bien qu'elles portent quasiment sur les mêmes types de défauts, elles adoptent différentes approches (approches basées sur les modèles ou sur les données ou encore sur les signaux). Selon les approches, de nombreux outils tels que les systèmes d'inférence neuro-floue adaptatifs [Ao et al., 2022], les modèles d'impédance d'ordre fractionnaire [Laribi et al., 2021], l'analyse discriminante de Fisher [Z. Li et al., 2018], etc., sont exploités par les auteurs. Toutefois, pour mettre en avant de manière exhaustive l'impact de toutes ces méthodologies sur la durabilité des systèmes PAC, il est nécessaire d'avoir des SGE capables de prendre des décisions convenables basées sur les résultats de diagnostic.

### **3.1.2 Les SGE basées sur le diagnostic**

Lorsqu'un défaut est identifié, il revient à la SGE de déterminer les nouvelles références ou consignes des conditions d'opérations (courant délivré par la PAC, température, pressions des gaz, humidité relative, etc.) de sorte à éviter la dégradation que pourrait entraîner le défaut si aucune action corrective n'était effectuée. Grâce à des techniques de régulation, les conditions d'opération des PAC peuvent ensuite être maintenues sur les consignes fixées par la SGE. L'approche systémique de gestion d'énergie proposée par [Bahrami et al., 2021 ] illustre plus ou moins le fonctionnement des SGE basées sur le diagnostic. En effet, les auteurs ont réalisé une modélisation mathématique des conditions d'opérations des cellules d'une PAC. Le contrôle du modèle permet de détecter la déviation de chaque paramètre clé de chacun des groupes de cellules par rapport à sa valeur moyenne (correspondant à tous les groupes les cellules). Le cas échéant, une SGE basée sur la logique floue ajuste la puissance de référence du groupe de cellules présentant le défaut et permet ainsi de rétablir son fonctionnement. Les résultats de simulation ont montré que l'approche proposée est capable de détecter les instabilités pouvant conduire au noyage et à l'assèchement de la membrane polymère. Grâce à la SGE, l'apparition effective de ces défauts peut être évitée et la durée de vie des PAC peut ainsi être améliorée. Une SGE pour la gestion de défauts d'une PAC embarquée dans la chaîne de traction d'un véhicule hybride électrique à hydrogène a été proposée

## Chapitre I

par [Xu et al., 2010]. Six modes d'opérations ont été définis pour permettre à la SGE de prendre une décision convenable à la suite de la détection de défauts tels qu'une température de PAC trop élevée ou trop faible, une fuite d'hydrogène au sein de la PAC, etc. [Dijoux et al., 2022] ont proposé une SGE basée sur le diagnostic des défauts relatifs au noyage et à l'assèchement de la membrane. La détection et l'identification des défauts sont réalisées à l'aide d'un réseau de neurones artificiel et l'algorithme de la SGE se charge d'ajuster le point de fonctionnement des PAC dans le but de corriger le défaut identifié sans en générer d'autres. Étant donné les deux types de défauts considérés dans leur étude, la SGE proposée peut être perçue comme une contribution relative à la gestion de l'eau au sein des PAC.

D'autres SGE des systèmes PAC basées sur le diagnostic telles que celles proposées par [C. Yan et al., 2020], [Aubry et al., 2020] ou celles qui apparaissent dans les revues publiées par [Dijoux et al., 2017] et [T. Pan et al., 2022], contribuent d'une certaine manière à l'amélioration de la durabilité des PAC. Cependant, cette contribution reste occasionnelle car l'intervention des SGE basées sur le diagnostic est à priori conditionnée par celle des défauts. Pourtant, le vieillissement des PAC ne provient pas uniquement de la dégradation due aux défauts non corrigés mais aussi de la manière dont elles sont utilisées [Pei et al., 2014]. Par exemple, la sollicitation des PAC à des points de fonctionnement qui accélèrent leur dégradation n'étant pas perçue comme un défaut par les méthodes de diagnostic, elle échappe à la détection des phénomènes susceptibles de réduire la durée de vie des PAC. Par conséquent, il est important de concevoir des SGE complémentaires aux stratégies basées sur le diagnostic afin d'étendre autant que possible la durée de vie des systèmes PAC. C'est dans cet ordre d'idées que le concept de gestion d'énergie des systèmes PAC à partir du pronostic a été introduit dans la littérature il y'a de cela dix ans.

### **3.2 Les SGE basées sur le pronostic pour améliorer la durée de vie des systèmes PAC**

Les SGE basées sur le pronostic s'inscrivent dans le cadre de la discipline du « *Prognostic and Health Management (PHM)* » [Yue et al., 2020]. En effet, la discipline du PHM est composée de 7 tâches [Jouin et al., 2013][P. Wang et al., 2021], qui peuvent être énumérées comme suit : l'acquisition de données, le traitement de données, la surveillance, le diagnostic, le pronostic, la

## Chapitre I

prise de décision et le contrôle. Une définition synthétique de chacune de ces tâches peut être trouvée à la Fig.18.

Le fonctionnement des SGE basées sur le pronostic concerne principalement les trois dernières tâches à savoir le pronostic, la prise de décision et le contrôle. Le contrôle est l'étape commune aux SGE basées sur le pronostic et aux SGE basées sur le diagnostic puisqu'il consiste à réguler les conditions d'opérations des PAC après la prise de décisions. Cependant, à l'inverse des SGE basées sur le diagnostic qui se contentent uniquement d'une interprétation du comportement instantané des PAC et qui ne prennent des décisions qu'en cas de défaut, les SGE basées sur le pronostic disposent d'une information complémentaire. En effet, elles n'attendent pas l'intervention des défauts avant d'ajuster les règles de gestion d'énergie car elles exploitent les informations de durées de vie restantes des PAC qui peuvent être obtenues grâce aux algorithmes de pronostic (tâche N°5) et ce, même si aucune anomalie de fonctionnement n'est détectée. Toutefois, de la même manière que les SGE basées sur le diagnostic dépendent des méthodes de diagnostic, les SGE basées sur le pronostic reposent aussi sur les méthodes de pronostic.

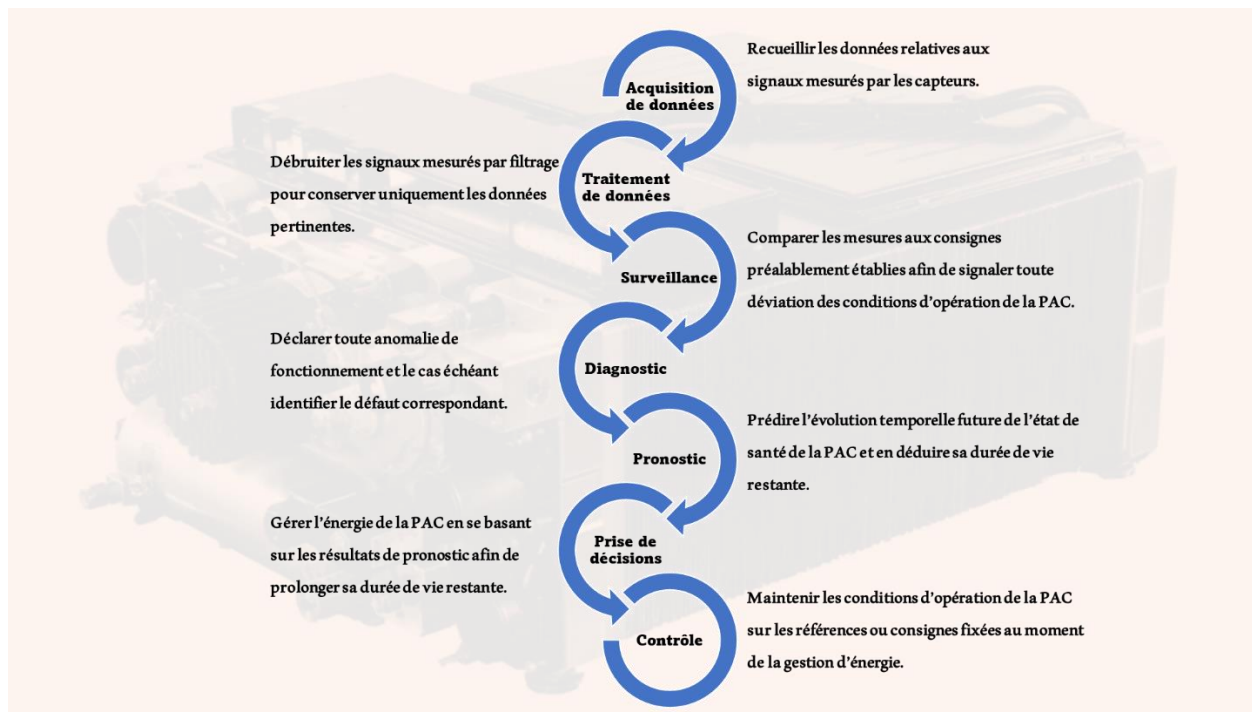


Figure 18: Les différentes tâches du PHM et leur définition respective.

### 3.2.1 Le pronostic

Réaliser le pronostic sur une PAC à un instant présent  $t$  revient à évaluer son état de vieillissement à cet instant puis, à se projeter sur un horizon futur pour savoir comment elle continuerait de s'user si elle devait être utilisée comme elle a été utilisée par le passé jusqu'à l'instant  $t$ . Le pronostic comprend donc une phase d'estimation instantanée de l'état de vieillissement encore appelé état de santé, une phase de prédiction de l'évolution temporelle future de l'état de santé et une phase d'estimation ou de calcul de la durée de vie restante de la PAC [K. Chen et al., 2018].

#### 3.2.1.1 Estimation instantanée de l'état de santé d'une PAC

L'état de santé d'une PAC peut être connu en estimant un de ses indicateurs de santé. Cependant, le choix de l'indicateur de santé doit se faire de manière judicieuse car le vieillissement des PAC provient d'un ensemble de mécanismes de dégradation qui ne se produisent pas tous sur le même composant. Par exemple, [J. Chen et al., 2017] ont tenté d'évaluer l'état de santé d'une PAC en estimant la résistance ohmique équivalente mais les résistances ne sont pas les seuls éléments qui subissent une dégradation irréversible dans une PAC. En effet, d'autres composants des PAC tels que la couche catalytique de la membrane polymère, la couche de diffusion de gaz, etc., s'usent tout autant que les résistances [X. Zhang et al., 2020]. Par conséquent l'estimation de la résistance équivalente n'est pas suffisante pour connaître l'état de santé d'une PAC. En cherchant à faire une estimation plus fiable de l'état de vieillissement d'une PAC, [B. Li et al., 2022] ont considéré la tension de sortie d'une PAC comme indicateur de santé car celle-ci est obtenue en retranchant les pertes par activation, les pertes de concentration et les pertes ohmiques qui concernent plus ou moins l'ensemble de tous les composants de la PAC. Cependant, bien que l'évolution temporelle de la tension de sortie de la PAC reflète effectivement l'évolution de son vieillissement dans une application de courant constant, elle n'est néanmoins pas fiable dans une application de courant dynamique. En effet, la tension de sortie d'une PAC dépend étroitement du courant qu'elle délivre [H. Liu et al., 2020]. C'est pour cette raison que les PAC sont considérées comme des sources de tension commandées en courant.

Pour connaître l'état de vieillissement d'une PAC de façon fiable dans n'importe quel type d'application, il serait plus convenable de suivre l'évolution d'un de ses points de fonctionnement

caractéristiques tels que le point de puissance maximale ( $P_{max}, I_{P_{max}}$ ) [Jouin et al., 2016] par exemple ou le point de rendement maximal ( $\eta_{max}, I_{\eta_{max}}$ ). La variation temporelle de ces points de fonctionnement n'est rien d'autre que la conséquence de toutes les dégradations irréversibles subies par les composants de la PAC. Leur estimation pourrait donc permettre de mieux évaluer l'état de vieillissement global des PAC. Après quoi, l'évolution de la puissance maximale  $P_{max}$  ou du rendement maximal  $\eta_{max}$  peut être prédite sur un horizon de prédiction donné pour permettre d'estimer le temps de vie restant « *Remaining Useful Life (RUL)* » de la PAC.

### 3.2.1.2 Prédiction de l'évolution temporelle de l'indicateur de santé sur un long horizon en vue d'estimer la durée de vie restante d'une PAC

La prédiction de l'évolution temporelle de l'indicateur de santé d'une PAC est le rôle des méthodes de pronostic. Celles-ci peuvent être mises en œuvre en utilisant différentes approches appelées approches de pronostic. Quatre approches de pronostic apparaissent dans la littérature : l'approche basée sur les modèles, l'approche basée sur les données, l'approche hybride et l'approche basée sur l'expérience [Meraghni et al., 2020][D. Zhou et al., 2018][Jemei, 2018].

- **L'approche de pronostic basée sur les modèles**

Elle consiste à utiliser des modèles de dégradation physiques de PAC et des algorithmes de pronostic spécifiques tels que « Particle Filter (PF) », « Extended Kalman Filter (EKF) », « Unscented Kalman Filter (UKF) », etc., pour prédire le vieillissement des PAC [D. Zhang et al., 2019]. La dégradation de la PAC est souvent modélisée par une expression mathématique de l'indicateur de santé ou « Health Indicator ( $HI(t)$ ) » en fonction du coefficient de dégradation  $\alpha_t$ . Les algorithmes de pronostic interviennent pendant l'opération des PAC pour estimer le coefficient et la vitesse de dégradation. Finalement, le coefficient et la vitesse de dégradation estimés sont utilisés pour prédire l'indicateur de santé sur un horizon de longueur  $p$  donnée. La Fig.19 illustre le principe de l'approche de pronostic basée sur les modèles.



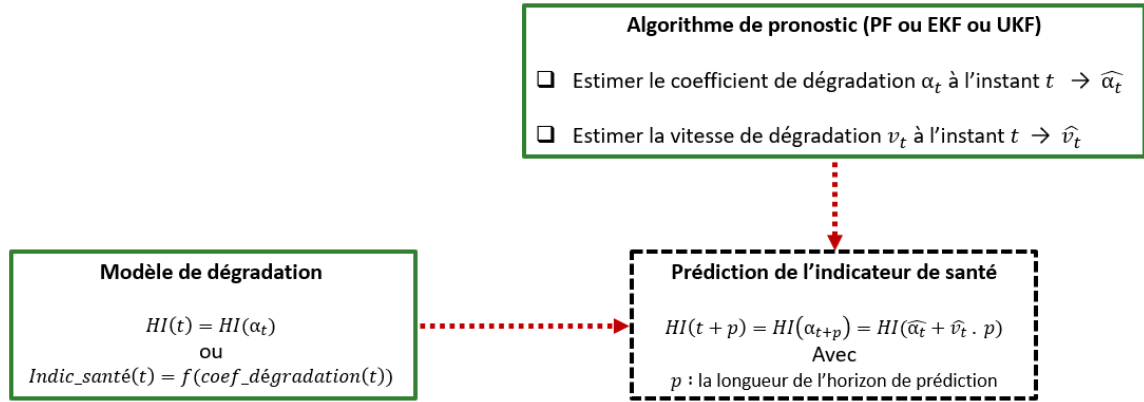


Figure 19: Illustration du principe de l'approche de pronostic basée sur les modèles

Étant donné le caractère multi-physiques et multi-échelles des PAC, la construction d'un modèle capable de reproduire tous les mécanismes de vieillissement d'une PAC est une tâche très difficile [K. Chen et al., 2018] [Morando et al., 2016]. Ceci représente le plus gros inconvénient de l'approche de pronostic basée sur les modèles car la qualité de prédiction d'une méthode de pronostic basée sur un modèle de dégradation de PAC dépend fortement de la qualité du modèle lui-même [Hua et al., 2020]. Par exemple, bien que [P. Wang et al., 2021] et [Jouin et al., 2013] aient utilisé le PF comme algorithme de pronostic dans leur méthode de pronostic, ils n'ont pas obtenu la même précision de prédiction. En effet, [P. Wang et al., 2021] ont modélisé la dégradation de la PAC par une fonction linéaire de la résistance de polarisation qui représente la somme des pertes de polarisation au sein de la PAC. En revanche, [Jouin et al., 2013] ont trouvé qu'une modélisation logarithmique de la dégradation de tension de PAC permettrait d'avoir une prédiction plus précise que le modèle linéaire. Toutefois, le modèle logarithmique conduit à des incertitudes plus élevées que le modèle linéaire. Un modèle logarithmique de dégradation de tension de PAC a été également utilisée par [K. Chen et al., 2018] mais l'estimation des paramètres a été réalisée avec l'UKF au lieu du PF. La méthode de pronostic a été validée sur des données expérimentales provenant de quelques véhicules postaux hybrides électriques à hydrogène. Les résultats ont montré qu'elle est capable de prédire la dégradation de tension de la PAC avec une erreur relative maximale de 2,03%. Cependant, le choix d'un indicateur de santé autre que la tension de la PAC aurait été plus convenable dans une telle application où le profil de courant est plutôt dynamique.

Contrairement aux méthodes de pronostic basées sur d'autres approches, les méthodes basées sur les modèles ne nécessitent pas une grande quantité de données historiques de fonctionnement des PAC. Cependant, puisqu'elles reposent essentiellement sur les modèles de PAC, elles possèdent une faible applicabilité parce qu'elles sont difficilement transposables d'un modèle à un autre [Jemei, 2018].

- **L'approche de pronostic basée sur les données**

L'approche de pronostic basée sur les données apparaît dans la littérature comme une alternative à l'approche de pronostic basée sur les modèles vis-à-vis de la complexité des phénomènes ayant lieu au sein d'une PAC [Y. Wang et al., 2018]. En effet, elle ne nécessite pas la connaissance des paramètres internes des PAC pour prédire leur vieillissement. Les méthodes de pronostic basées sur les données peuvent être perçues comme des modèles « boîtes noires » qui n'ont besoin que des données historiques de dégradation des PAC pour prédire leur vieillissement. Elles reçoivent en entrée les données historiques de dégradation de l'indicateur de santé et ensuite grâce à des outils d'intelligence artificielle qu'elles intègrent, la tendance de dégradation peut être apprise. Après cette phase d'apprentissage, elles sont capables de prédire toutes seules, la dégradation temporelle future de l'indicateur de santé. Ce principe qui reste commun à toutes les méthodes de pronostic basées sur les données est illustré à la Fig.20 et il montre qu'elles sont facilement applicables d'une PAC à une autre mais leur qualité de prédiction reste déterminée par la quantité de données historiques disponibles [H. Li et al., 2020].

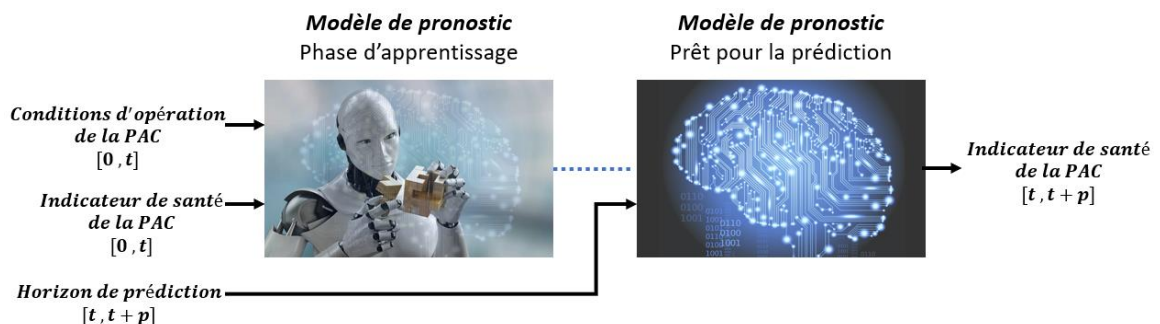


Figure 20: Illustration du principe de l'approche de pronostic basée sur les données

Les progrès réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle favorisent l'apparition d'un nombre croissant de méthodes de pronostic basées sur les données. [K. Chen et al., 2020] ont proposé deux modèles de pronostic basés sur les données. Le premier est un

## Chapitre I

réseau de neurones de rétropropagation « Back-propagation Neural Network (BPNN) » dont les poids synaptiques et les seuils de neurones initiaux sont optimisés par le « Mind Evolutionary Algorithm (MEA) ». Le second est un réseau de neurones en ondelettes « Wavelet Neural Network (WNN) » dont le nombre de neurones de la couche cachée, les paramètres de la fonction d'activation ainsi que les poids synaptiques sont optimisés par le « Cuckoo Search Algorithm (CSA) ». Ces deux modèles de pronostic ont été utilisés pour prédire la dégradation de la tension d'une PAC soumise à un profil de courant constant et d'une autre PAC soumise à un profil de courant dynamique. Un modèle de pronostic basée sur le « Grid Long Short-Term Memory (G-LSTM) » qui est un type de réseaux de neurones récurrents a été proposé par [R. Ma et al., 2018] pour prédire le vieillissement des PAC. Un autre type de réseaux de neurones récurrents à savoir le « Stacked Long Short-Term Memory (SLSTM) » a été utilisé par [J. Ma et al., 2020] pour mettre en place un modèle de prédiction de dégradation des PAC. Pour réduire le temps d'apprentissage et éviter le problème de disparition du gradient souvent observé avec les réseaux de neurones récurrents, [Benaggoune et al., 2022] ont proposé un modèle de pronostic basé sur un réseau de neurones convolutif. Pour prédire le RUL des PAC, [Hua et al., 2020] ont mis en place un modèle de pronostic basé sur le « Multiple Inputs and Multiple Outputs-Echo State Network (MIMO-ESN) » qui est également une forme améliorée des réseaux de neurones récurrents. Quant à eux, [K. Chen et al., 2021] ont décomposé le signal de dégradation de la tension d'une PAC en ondelettes puis, grâce au « Nonlinear Autoregressive Exogenous Neural Network (NARX) » la dégradation future relative à chacune des ondelettes a été prédite. Les prédictions de dégradation des ondelettes ont ensuite été combinées pour obtenir la prédiction globale de la dégradation de tension de la PAC.

Afin de pouvoir évaluer la précision de prédiction des méthodes de pronostic basées sur les données, les auteurs ont souvent tendance à supposer que les conditions d'opérations futures des PAC sont connues sur l'horizon de prédiction [Y. Xie et al., 2020][J. Liu et al., 2018][J. Liu et al., 2019]. Cette hypothèse n'étant pas réaliste dans une application automobile réelle, des études supplémentaires devraient être envisagées quant à l'application en usage réel des modèles de pronostic basés sur les données, conformément au principe illustré à la Fig.20.

- **L'approche de pronostic hybride**

Comme son nom l'indique l'approche de pronostic hybride consiste à combiner l'approche basée sur les modèles et l'approche basée sur les données (Fig.21) [Cheng et al., 2018]. Un modèle de pronostic basé sur les données historiques d'opérations de la PAC ajuste le modèle de dégradation physique initialement construit en intégrant les phénomènes de dégradation difficilement modélisables au fur et à mesure que la PAC s'use. Une fois que le coefficient et la vitesse de dégradation sont estimés par les algorithmes de pronostic (PF ou EKF ou UKF, etc.), l'évolution future de l'indicateur de santé peut être prédite sur l'horizon de prédiction. L'hybridation des deux approches de pronostic évite ainsi d'utiliser un modèle de dégradation fixe de la PAC. Cependant, une quantité importante de données historiques et un temps de calcul conséquent sont nécessaires en raison de la complexité de l'approche.

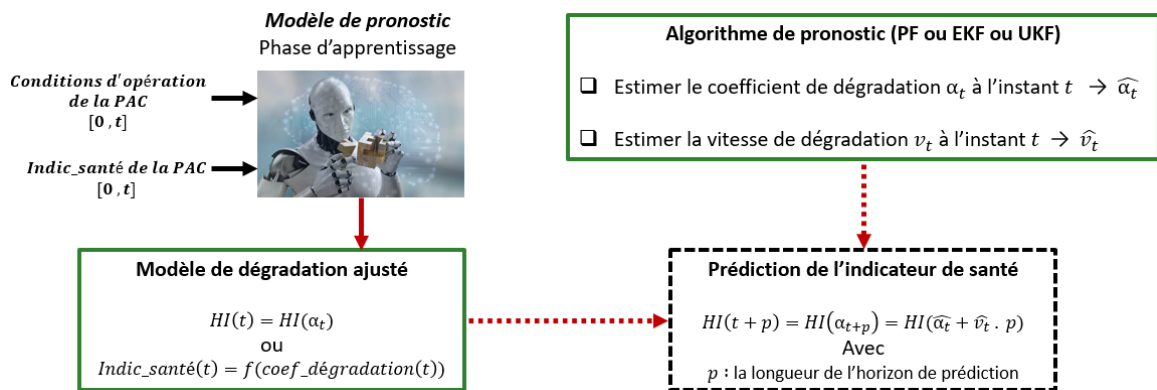


Figure 21: Illustration du principe de l'approche de pronostic hybride

Quelques méthodes de pronostic basées sur l'approche hybride peuvent être trouvées dans la littérature. Par exemple, [Yang et al., 2017] et [R. Xie et al., 2020] ont proposé une méthode de pronostic basée sur le PF et le LSTM pour prédire la dégradation des PAC. Au lieu du PF et du LSTM, [R. Pan et al., 2020] ont utilisé le filtre de Kalman adaptatif et le NARX pour mettre en place une méthode de pronostic de dégradation des PAC. Les méthodes de pronostic basées sur l'approche hybride peuvent réaliser des prédictions plus précises que les méthodes basées sur les modèles et les méthodes basées sur les données mais l'un des objectifs majeurs visés par les auteurs est de réduire leur complexité afin de faciliter leur implémentation en ligne.

- **L'approche de pronostic basée sur l'expérience**

Cette dernière approche est la moins répandue car elle repose sur une analyse experte des données historiques de fonctionnement des PAC pour prédire leur dégradation or, cela nécessite énormément de retours d'expériences qu'il n'est pas évident d'acquérir [Jemei, 2018]. En effet, à ce jour, il existe encore trop peu de flottes automobiles qui roulent à l'hydrogène sur les routes. Il faut aussi noter que le temps nécessaire pour comprendre et caractériser la dégradation des PAC dans différentes conditions de fonctionnement peut être très significatif.

Finalement, que l'approche de pronostic basée sur l'expérience ou que l'une des trois autres approches de pronostic soit adoptée pour prédire l'indicateur de santé des PAC, il est important de générer des résultats de pronostic sous une forme facilement exploitable par les stratégies de gestion d'énergie. L'idée la plus répandue dans la littérature est de communiquer les résultats de pronostic aux SGE sous forme de durées de vie restantes « Remaining Useful Life (RUL) » des PAC.

### 3.2.1.3 Estimation de la durée de vie restante ou RUL d'une PAC

L'estimation du RUL est le but ultime des méthodes de pronostic qui prédisent l'évolution temporelle future de l'indicateur de santé des PAC. Le critère de fin de vie défini par le DoE des États-Unis permet de le déduire directement de la prédiction effectuée. D'après ce critère, l'instant correspondant à une baisse de 10% des performances maximales initiales d'une PAC est considéré comme l'instant de fin de vie de la PAC [Hua et al., 2019]. Par conséquent, le RUL d'une PAC à un instant  $t$  n'est que le temps qui s'écoule entre cet instant et l'instant de fin de vie estimé « End of Life (EoL) », comme l'illustre la Fig.22.

$$\widehat{RUL}(t) = \widehat{t_{EoL}} - t \quad (4)$$

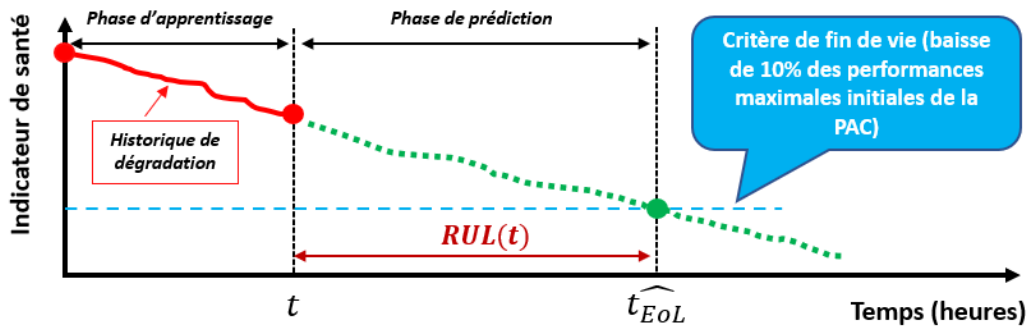


Figure 22: Illustration du calcul de RUL à partir de la prédiction de l'indicateur de santé

### 3.2.2 Les SGE basées sur le pronostic

En exploitant les RULs, les SGE basées sur le pronostic pourraient avoir un impact très positif sur la durabilité des systèmes PAC car en procédant ainsi, elles tiennent non seulement compte de l'état de santé instantané des PAC mais aussi et surtout de leur vieillissement futur [Zuo et al., 2022][Dirkes et al., 2022]. En effet, dans les applications où le profil de mission n'est pas constant mais plutôt dynamique comme c'est souvent le cas dans les applications automobiles, le comportement instantané des PAC ne peut nullement refléter leur vieillissement futur [Zuo et al., 2021]. Et pourtant, la connaissance du vieillissement futur ou encore du RUL d'une PAC permet à la SGE d'être plus pragmatique vis-à-vis de l'objectif qui est de prolonger autant que possible ce RUL et vis-à-vis des préférences de l'utilisateur du véhicule. Par exemple dans le cas particulier d'un véhicule à système multi-PAC, la connaissance des durées de vie restantes des PAC peut être d'une importance capitale lorsque l'utilisateur a des préférences précises quant à la manière dont il souhaiterait renouveler les PAC en fin de vie ou l'ordre suivant lequel il voudrait le faire. Certes, la considération de l'état de santé instantané des PAC dans la gestion d'énergie est un bon pas vers l'amélioration de leur durée de vie mais les utiliser en connaissant à chaque fois leur durée de vie restante serait encore mieux.

[Yue et al., 2019] ont proposé une SGE basée sur le pronostic de RUL d'une PAC et d'une batterie dans un véhicule hybride électrique à hydrogène en configuration « range-extend » c'est-à-dire où la PAC est utilisée uniquement pour étendre l'autonomie de la batterie. Les modes d'opération du système hybride PAC/ batterie ont été traduits par des règles d'appartenance dans un contrôleur flou. En fonction des RULs de la PAC et de la batterie, les fonctions d'appartenance du contrôleur flou sont optimisées hors-ligne par l'algorithme génétique de sorte à minimiser

## Chapitre I

équitablement les vitesses de dégradation de la PAC et de la batterie. Les résultats de simulation ont montré que la SGE proposée basée sur la logique floue et le pronostic de RUL permet de prolonger la durée de vie de la PAC de 56% par rapport à la SGE basée uniquement sur la logique floue. Cependant seule la médiane de la distribution de RUL a été considérée dans cette étude. En tenant compte plus tard de toute la distribution de RUL [Yue et al., 2021], les auteurs ont intégré les incertitudes de RUL dans la prise de décisions de gestion d'énergie et un gain supplémentaire de 28,6% sur la durée de vie de la PAC a été obtenu. Si la durabilité des systèmes mono-PAC peut autant être améliorée grâce à la combinaison du pronostic et de la gestion d'énergie, à combien plus forte raison celle des systèmes multi-PAC qui offrent généralement une plus grande marge de manœuvre et plus de possibilités aux SGE de prolonger leur durée de vie tout en améliorant leur rendement énergétique ?

[Bankati et al., 2022] ont appliqué une SGE basée les pronostics de RUL à un système hybride multi-PAC/ batterie composé de quatre PAC de 500 W. En optimisant le temps d'utilisation des PAC pour égaliser leur niveau de dégradation, la SGE proposée a permis de repousser la fin de vie du système multi-PAC d'environ 30% et 12%, respectivement, par rapport à la stratégie de distribution équitable et la stratégie du Daisy-Chain. Les résultats de simulation y ont également montré qu'à l'inverse de ces stratégies conventionnelles, la SGE proposée fait fonctionner le système multi-PAC à un bon rendement énergétique et ce, indépendamment du profil de mission. Une autre SGE basée sur le pronostic des instants de fin de vie (EoL) de trois PAC composant un système multi-PAC, a été proposée par [Zuo et al., 2022]. À travers la résolution d'un problème d'optimisation multi-objectifs la SGE a sollicité les PAC conformément au vecteur de répartition de puissance qui minimise au mieux le ratio  $\frac{\text{Quantité de } H_2 \text{ consommé}}{\text{Durée de vie}}$  du système multi-PAC. Les auteurs ont montré que la stratégie proposée est capable de prolonger la durée de vie du système multi-PAC d'environ 25% par rapport à la stratégie du Daisy-Chain sans désavantager sa consommation d' $H_2$ . [Herr et al., 2017] qui sont les premiers chercheurs à avoir appliqué le pronostic au concept de systèmes multi-PAC, avaient conçu une SGE pour gérer l'énergie d'un système multi-PAC de vingt PAC à partir du pronostic de RUL. En comparant les résultats de cette SGE à ceux des SGE plus conventionnelles, ils ont démontré que la SGE basée sur le pronostic présente de meilleures performances en termes de durabilité du système multi-PAC.

Les performances des SGE basées sur le pronostic telles que celles qui ont été mises en évidence dans tous ces travaux passés en revue devraient être de plus en plus mises en avant. Cependant, contrairement aux méthodes de pronostic qui abondent dans la littérature, très peu de SGE basées sur le pronostic y sont proposées [Yue et al., 2019][Yue et al., 2021].

Étant donné le défi actuel qui est d'améliorer la durée de vie des systèmes PAC; au vu de l'intérêt d'adopter le concept de systèmes multi-PAC et compte tenu des avantages prometteurs que révèle la combinaison « pronostic – gestion d'énergie », **l'objectif général de cette thèse sera de concevoir une SGE basée sur les pronostics de RUL pour étendre la durée de vie des systèmes multi-PAC et maintenir leur consommation d' $H_2$  à un niveau raisonnable dans le cadre d'une application automobile.**

### 3.3 Les objectifs spécifiques de recherche

Pour concevoir des SGE basées sur le pronostic en vue de gérer l'énergie d'un système multi-PAC utilisé comme source d'énergie d'un véhicule, il est important de disposer d'une méthode de pronostic implémentable en usage réel pour estimer les RUL des PAC. Cependant, la revue des méthodes de pronostic effectuée à la sous-section 3.2.1.2 de ce chapitre a révélé que pour des fins d'évaluation de la précision des méthodes de pronostic, les auteurs font une hypothèse qui ne peut être acceptée dans le cadre d'une application automobile. En effet, pour prédire l'état de santé des PAC sur un horizon donné, les auteurs supposent généralement que les conditions d'opération futures des PAC sont connues sur tout l'horizon. Cette hypothèse peut être très contraignante dans une application automobile, d'autant plus que l'estimation du RUL d'une PAC impose de prédire son état de santé sur un long horizon.

Pour cette raison, **le premier objectif de cette thèse sera de proposer une méthodologie de pronostic de RUL en usage réel**, sachant que dans ce manuscrit, une méthode de pronostic de RUL est qualifiée de méthode en usage réel si son utilisation dans une SGE de systèmes PAC ou multi-PAC ne présente aucune contrainte dans un contexte véhiculaire. En effet, l'absence de méthodes de pronostic de RUL des PAC en usage réel dans la littérature expliquerait le très faible



## Chapitre I

nombre de travaux publiés sur l'intégration du pronostic dans la gestion d'énergie des systèmes PAC dans le cadre des applications automobiles.

Tel qu'il a été conclu après la revue des SGE basées sur le pronostic (sous-section 3.2.2) très peu de SGE de systèmes PAC basées sur le pronostic sont proposées dans la littérature. Pourtant le nombre de méthodes de pronostic publiées ne cesse de croître même s'il est vrai que celles-ci nécessitent des études supplémentaires quant à leur utilisation en usage réel. Par exemple, comme le montre la Fig.23, dans les cinq dernières années, environ 84 articles ont été publiés sur les méthodes de pronostic appliquées aux PAC contre seulement 10 articles sur l'utilisation du pronostic dans la gestion d'énergie des systèmes PAC. Ce grand déséquilibre s'explique non seulement pas le fait que les méthodes de pronostic présentes dans la littérature ne peuvent directement être intégrées aux SGE telles qu'elles sont proposées mais aussi parce que le pronostic et la gestion d'énergie ne relèvent pas du même domaine d'expertise. En effet, le pronostic exige des compétences en traitement du signal et en analyse de données tandis que la gestion d'énergie fait appel à des compétences en systémique<sup>4</sup>. Afin de contribuer au développement du concept de la gestion d'énergie des systèmes PAC basée sur le pronostic, **le second objectif de cette thèse sera d'identifier une approche qui permettrait d'intégrer les résultats de pronostic dans la gestion d'énergie des systèmes multi-PAC.**

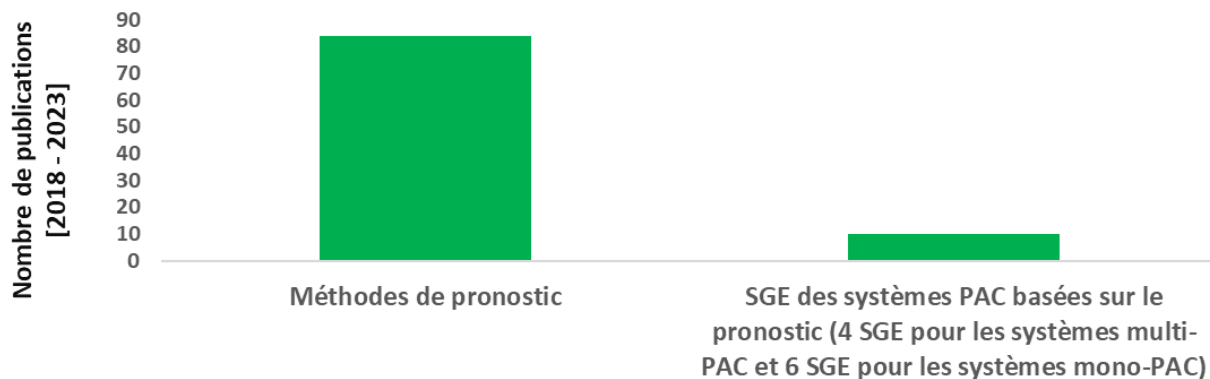


Figure 23: Nombre de publications sur les méthodes de pronostic vs nombre de publications sur les SGE des systèmes PAC basées sur le pronostic, sur les cinq dernières années

<sup>4</sup> La systémique est une manière d'étudier un système complexe en ayant une vision globale de celui-ci. Elle se base sur des modèles plutôt que sur une analyse complète et simplifie la communication de la complexité du système.

### **3.4 Organisation de la thèse et présentation des laboratoires d'accueil**

Les objectifs spécifiques de recherche définie dans la sous-section 3.3 de ce chapitre font apparaître deux domaines d'expertise différents. Le premier domaine est celui du pronostic où des outils de traitement de données et de signal basés sur des algorithmes ou sur l'intelligence artificielle sont nécessaires pour prédire l'état de santé des PAC et estimer leur RUL. Le second domaine concerne la gestion d'énergie où il est plus question de concevoir des SGE pour les systèmes multi-PAC afin de répartir convenablement la demande entre les PAC.

Pour atteindre ces objectifs, l'un des atouts phares de cette thèse sera exploité. En effet, cette thèse offerte en cotutelle par l'université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) et l'Université de Bourgogne Franche-Comté (UBFC), présente la possibilité et l'avantage de joindre les efforts de deux communautés spécialisées dans des champs différents. La première, du côté de l'UBFC, est l'institut de recherche FEMTO-ST qui, par sa forte réputation dans les travaux de pronostic et de gestion de l'état de santé des PAC, possède l'expertise dont nous aurons besoin pour atteindre le premier objectif de cette thèse. Afin de faciliter la réalisation de cette étape, la thèse sera codirigée par le Pr. Samir JEMEI, professeur des universités à l'Université de Franche-Comté (membre de la ComUE UBFC). Du côté de l'UQTR, l'expertise en matière de gestion d'énergie que possède la communauté des chercheurs de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) nous permettra d'aborder le deuxième volet de cette thèse c'est-à-dire la conception d'une SGE de systèmes multi-PAC. Les travaux en lien avec cet objectif seront dirigés par le Pr. Loïc BOULON, professeur à l'UQTR et titulaire de la chaire de recherche UQTR senior sur les sources énergie véhicules du futur.



# II- Méthodologie : vers la mise en œuvre d'une gestion d'énergie basée sur le pronostic

1. Modélisation d'une PAC avec prise en compte du vieillissement.....	78
1.1 Modèles statique et dynamique d'un système PAC .....	79
1.1.1 Hybridation d'un système PAC par une batterie dans une application transport ...	81
1.2 Modèle de vieillissement calendaire d'une PAC .....	83
1.3 Modèle de vieillissement en cyclage d'une PAC .....	85
2. Estimation en ligne des performances maximales d'une PAC .....	89
2.1 Choix d'un indicateur de santé de PAC.....	90
2.2 Tests de polarisation réguliers en vue de l'estimation de la puissance maximale des PAC	90
3. Pronostic de la durée de vie restante ou RUL d'une PAC .....	95
3.1 Choix de l'approche de pronostic .....	95
3.2 Développement d'un algorithme de pronostic en usage réel basé sur le réseau de neurones artificiel de rétropropagation .....	96

# 1. Modélisation d'une PAC avec prise en compte du vieillissement

Tout comme les batteries [Redondo-Iglesias, 2017], les PAC subissent deux types de vieillissement : le vieillissement calendaire et le vieillissement en cyclage. Étant plus ou moins influencé par les conditions ambiantes, le vieillissement calendaire peut être observé sur une PAC en ne l'utilisant pas pendant un long moment dans des conditions ambiantes spécifiques. Pour ralentir ce vieillissement, les PAC doivent être maintenues dans des conditions ambiantes conformes aux recommandations du fabricant. En revanche, le vieillissement en cyclage résulte des dégradations irréversibles subies par les composants des PAC et il est lié à la manière dont les PAC sont utilisées. [Lorenzo et al., 2021] ont montré cela en estimant le taux de dégradation des PAC suivant différents modes d'opérations (arrêts-démarrage fréquents, dynamique du profil de courant, fonctionnement à des points de puissance proches de l'« Output Circuit Voltage (OCV) » ou proches de la puissance maximale, fonctionnement en mode galvanostatique<sup>5</sup>). Cette étude de quantification de la dégradation des PAC en fonction des modes d'opération a été proposée dans le but de contribuer à la mise en place d'un modèle de vieillissement des PAC à des fins de gestion d'énergie. En effet, il est indispensable d'avoir un modèle de vieillissement de PAC pour concevoir une SGE basée sur le pronostic de RUL et pour procéder à sa validation numérique. Mais il convient de noter que la mise en œuvre réelle de ce genre de SGE ne nécessite pas forcément l'utilisation de modèle de PAC car à ce stade, le pronostic de RUL peut être directement effectué sur les piles elles-mêmes. Ainsi, la précision du modèle de PAC n'est pas très importante. Ce qui est plutôt rassurant dans ces travaux puisqu'à ce jour, il n'existe toujours pas de modèle de vieillissement exhaustif de PAC dans la littérature [Tang et al., 2023]. De plus, la configuration des modèles de PAC présents dans la littérature diffère d'un modèle à un autre, à tel point que le choix d'en utiliser un impliquerait la réalisation de nombreuses expériences pour réussir son paramétrage.

---

<sup>5</sup> Mode d'opération dans laquelle la PAC fournit une puissance quasiment constante comprise dans sa plage de puissance de sécurité c'est-à-dire la zone de puissance où sa dégradation est la plus lente possible.

Dans cette thèse, un modèle de vieillissement de PAC sera mis en place en réunissant certains travaux de modélisation de PAC proposés dans la littérature. [Dépature et al., 2013] ont assemblé un modèle électrochimique, un modèle thermique et un modèle du système d’approvisionnement en réactifs des PAC pour simuler les comportements statique et dynamique d’un système PAC. [Jouin et al., 2015] ont proposé un modèle de vieillissement calendaire des PAC. Quant à eux, [Dépature et al., 2017] et [Lorenzo et al., 2021] ont plus abordé le vieillissement en cyclage des PAC. Le but de cette thèse étant d’améliorer la durée de vie des systèmes multi-PAC via la gestion d’énergie, l’accent sera plus mis sur le vieillissement en cyclage des PAC que sur leur vieillissement calendaire.

### 1.1 Modèles statique et dynamique d’un système PAC

Les comportements statique et dynamique d’un système PAC mettent en jeu des phénomènes électrochimiques, thermiques, et fluidiques qui interagissent entre eux. En adoptant une approche systémique, [Boulon et al., 2010] ont modélisé ces trois aspects de sorte que les interactions qui ont lieu entre eux soient aussi pris en compte. Le modèle de système PAC établi par les auteurs a été validé expérimentalement et a été utilisé par d’autres chercheurs tels que [Dépature et al., 2013] et [Marx et al., 2017].

Dans ces travaux, un modèle capable de simuler les comportements statique et dynamique du système PAC sera nécessaire pour reproduire, respectivement, le phénomène de polarisation des PAC et la dynamique lente des phénomènes thermiques au sein des PAC. À cet effet, le modèle proposé par [Boulon et al., 2010] sera utilisé dans cette étude car à notre connaissance, il demeure encore le seul à ce jour qui englobe tous ces phénomènes dans le cadre d’une approche systémique.

- Le modèle électrochimique statique

Le modèle électrochimique est basé sur l’équation de polarisation statique d’une PAC de  $N$  cellules.

$$\begin{aligned} V(i_{PAC}, T_{PAC}, P_{O_2}, P_{H_2}) \\ = N[E_{rev}(T_{PAC}, P_{O_2}, P_{H_2}) - \Delta E_{act}(i_{PAC}, T_{PAC}) - \Delta E_{conc}(i_{PAC}, T_{PAC}) - \Delta E_{ohm}(i_{PAC})] \end{aligned} \quad (5)$$

Avec :

$$E_{rev}(T_{PAC}, P_{O_2}, P_{H_2}) = \frac{T_{PAC} \cdot \Delta S - \Delta H}{2F} + \frac{R \cdot T_{PAC}}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{O_2}^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta E_{act}(i_{PAC}, T_{PAC}) = A \cdot T_{PAC} \ln \left( \frac{i_{PAC} + i_n}{i_0} \right) \quad (7)$$

$$\Delta E_{conc}(i_{PAC}, T_{PAC}) = -B \cdot T_{PAC} \ln \left( 1 - \frac{i_{PAC}}{i_l} \right) \quad (8)$$

$$\Delta E_{ohm}(i_{PAC}) = R_{PAC} \cdot i_{PAC} \quad (9)$$

- Modèle dynamique

Lorsqu'il s'agit de répondre à un profil de puissance dont les variations peuvent être parfois très brusques (de l'ordre de la seconde) comme c'est souvent le cas dans les applications transports, la question qui se pose généralement est celle de savoir si la source d'alimentation est capable de suivre ou pas de telles dynamiques. Les PAC sont capables de suivre la dynamique mise en jeu dans les applications transports mais cela accélère leur vieillissement. Pour cela, il est plus recommandé de les solliciter suivant une dynamique qui entre en cohérence avec la constante de temps la plus grande parmi les différentes constantes de temps physiques qui interviennent dans le fonctionnement des systèmes PAC (constantes de temps chimique, fluidique, électrique, thermique). À chaque variation de puissance, le phénomène physique le plus lent qui se produit au sein des PAC est l'évolution transitoire de la température avant sa stabilisation en régime permanent. Par conséquent, seule la dynamique thermique sera modélisée dans cette étude.

L'effet de la dynamique lente des phénomènes thermiques au sein de la PAC sur la tension  $V$  peut être considéré comme une tension additionnelle  $N \cdot V_{dyn}(t)$  caractérisée par un régime transitoire et un régime permanent [Truong et al., 2020]. En d'autres termes, la tension de sortie  $V_{PAC}$  de la PAC peut s'écrire comme suit :

$$V_{PAC}(t) = V + N \cdot V_{dyn}(t) \quad (10)$$

Tel que :

$$\frac{i_{PAC}(t)}{\tau_{dyn}} = \frac{dV_{dyn}(t)}{dt} + \frac{V_{dyn}(t)}{\tau_{dyn}} \quad (11)$$

Dans cette étude, afin de se rapprocher de la dynamique d'un système PAC réel, la constante de temps  $\tau_{dyn}$  sera fixée de sorte que le régime permanent de  $V_{PAC}(t)$  s'établisse au bout de

300 secondes (5 minutes). Cela signifie également que pour préserver l'état de santé des PAC dans les applications transports, il est important de filtrer la dynamique du profil qui leur est imposé. Dans ce cas, l'utilisation d'une source de puissance telle qu'une batterie en complémentarité avec le système PAC est nécessaire: on parle alors d'hybridation de système PAC par une batterie.

### 1.1.1 Hybridation d'un système PAC par une batterie dans une application transport

Dans les applications transports, les sollicitations en puissance sont généralement très dynamiques et ce, en raison des phases d'accélération, de décélération et de freinage qui interviennent régulièrement dans la conduite. Dans le cas d'un véhicule à hydrogène, il est nécessaire d'hybrider le système PAC par une batterie car contrairement aux PAC qui se dégradent plus rapidement lorsqu'elles font face à des profils trop dynamiques, les batteries supportent mieux les phases de transitoires rapides du profil. Par ailleurs, les batteries sont également des dispositifs de stockage d'énergie électrique qui rendent la récupération d'énergie possible pendant les phases de décélération et de freinage du véhicule. En effet, à l'inverse des batteries, les PAC ne sont pas réversibles en courant.

Pour attribuer la composante des basses fréquences du profil de mission du véhicule au système PAC, la solution la plus simple et la plus classique est d'utiliser un filtre passe-bas. D'après la revue de littérature, une fréquence de coupure d'environ 10 *mHz* serait convenable pour filtrer la dynamique du profil et pour dimensionner le système PAC ou multi-PAC ainsi que la batterie dans une application transport.

- **Modèle de batterie et du convertisseur DC-DC associé à une PAC**

Le modèle de batterie utilisé dans cette étude comme dispositif de stockage en vue d'hybrider les systèmes PAC est un modèle empirique qui a été proposé par [Dépature et al., 2017] dans le cadre du « IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 – Energy Management of a Fuel Cell/ Battery Vehicle ». Tel qu'il apparaît à la Fig.24, il est composé d'une source de tension à vide  $V_0$  en série avec une résistance  $R_{S_{bat}}$  et un circuit parallèle  $R_{C_{bat}}C_{C_{bat}}$ . Les valeurs de  $V_0$ ,  $R_{S_{bat}}$ ,



## Chapitre II

$R_{c_{bat}}$  et  $C_{c_{bat}}$  peuvent être estimées expérimentalement sur la batterie réelle correspondant au dimensionnement qui sera retenu pour l'ensemble du système d'alimentation.

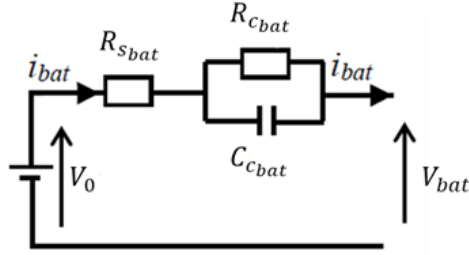


Figure 24: Modèle de batterie [Dépature et al., 2017]

A partir du circuit électrique équivalent présenté à la Fig.24, le courant  $i_{bat}$  de la batterie peut être exprimé comme suit :

$$i_{bat} = \frac{V_0 - R_{s_{bat}} i_{bat} - V_{bat}}{R_{c_{bat}}} + C_{c_{bat}} \frac{d}{dt} (V_0 - R_{s_{bat}} i_{bat} - V_{bat}) \quad (12)$$

Quant à l'état de charge instantané  $SOC_{bat}(t)$  de la batterie, il peut être calculé à partir de l'état de charge initial  $SOC_{bat_{init}}$ , de la capacité  $Q_{bat}$  et du courant  $i_{bat}$  de la batterie comme le montre l'équation (13). Dans les travaux de simulation, l'état de charge initial  $SOC_{bat_{init}}$  sera fixé de manière arbitraire avant tout début d'opération du système.

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat_{init}} - \frac{100}{3600Q_{bat}} \int i_{bat} dt \quad (13)$$

Bien que le vieillissement des batteries soit négligeable par rapport à celui des PAC en raison de la durée de vie plus élevée du côté des batteries que des PAC ( plus de 45000 heures contre 5000 heures environ), une fonction de dégradation empirique proposée par [Dépature et al., 2017] dans le cadre du « IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 » sera utilisée pour évaluer la dégradation de la batterie. Celle-ci dépend du  $SOC_{bat}(t)$  et du point de fonctionnement de la batterie.

$$\Delta_{bat}(t) = \frac{1}{Q_{bat-max}} \int_0^t |f(SOC_{bat}(t)) \cdot g(i_{bat}(t)) \cdot i_{bat}(t)| dt \quad (14)$$

$$f(SOC_{bat}(t)) = 1 + 3,25(1 - SOC_{bat}(t))^2 \quad (15)$$

$$\begin{cases} g(i_{bat}(t)) = 1 + 0,45 \frac{i_{bat}(t)}{i_{bat-nom}} & \text{if } i_{bat}(t) \geq 0 \\ g(i_{bat}(t)) = 1 + 0,55 \frac{|i_{bat}(t)|}{i_{bat-nom}} & \text{if } i_{bat}(t) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

Étant donnée la faible tension de sortie des PAC, un convertisseur boost DC-DC est nécessaire pour élever leur niveau de tension avant de les relier au bus continu et par la même occasion réguler le courant qu'elles fournissent. Si  $L_{boost}$  et  $V_{boost}$  représentent respectivement l'inductance de lissage et la tension de sortie du convertisseur, le courant  $i_{L_{boost}}$  traversant l'inductance peut être obtenu à travers l'équation (17) dans laquelle l'effet de la résistance interne de l'inductance est négligé.

$$i_{L_{boost}} = \frac{1}{L_{boost}} \int (V_{bat} - V_{boost}) dt \quad (17)$$

La tension de sortie  $V_{boost}$  et le courant de sortie  $I_{boost}$  du convertisseur dépendent de son rapport de modulation  $\alpha_{boost}$  et de son rendement  $\eta_{boost}$  comme l'indique l'équation (18).

$$\begin{cases} V_{boost} = \alpha_{boost} V_{bat} \\ i_{boost} = \alpha_{boost} I_{PAC} \eta_{boost} \end{cases} \quad (18)$$

Les modèles du convertisseur et de la batterie sont importants dans cette étude qui vise à prouver le concept novateur d'amélioration de la durée de vie des systèmes multi-PAC par la gestion d'énergie basée sur le pronostic de RUL des PAC. En effet, alors que l'utilisation de la batterie permet une gestion plus souple de l'énergie, le convertisseur est indispensable pour le contrôle commande une fois que les décisions de gestion d'énergie sont prises par la SGE. La performance d'une SGE étant notamment évaluée par rapport à sa capacité à étendre la durée de vie du système multi-PAC, il est également nécessaire de modéliser le vieillissement des PAC.

## 1.2 Modèle de vieillissement calendaire d'une PAC

Grâce à une revue des travaux de modélisation des PAC et l'analyse des résultats d'un test de vieillissement de longues durées menées sur une PAC sous un profil de courant constant, [Jouin et al., 2015] ont répertorié les différents paramètres qui varient en fonction de l'état de vieillissement des PAC, dans l'équation de polarisation (5). Ces paramètres sont les suivants :

## Chapitre II

- $i_n$  : le courant interne de la PAC.
- $B$  : le paramètre empirique permettant de prendre en compte l'effet des accumulations d'eau et de gaz qui conduit à des densités de courant non-uniformes sur les électrodes.
- $i_l$  : le courant limite à la cathode.
- $R_{PAC} = R_{elec} + R_{cr} + R_{ion}$  : la résistance ohmique équivalente composée de la résistance électronique  $R_{elec}$ , la résistance de contact  $R_{cr}$  et la résistance ionique  $R_{ion}$ .
- $S_{PAC}$  : l'aire de la surface active électrochimique du catalyseur. Elle permet de déterminer la densité de courant  $i_{PAC} = \frac{I_{PAC}}{S_{PAC}}$  où  $I_{PAC}$  est le courant que délivre la PAC.

L'évolution temporelle de chacun de ces paramètres a été approchée par une fonction mathématique temporelle qui apparaît dans le tableau 4. Ainsi, en remplaçant les paramètres par leur expression temporelle dans les équations (7), (8), (9), (5), puis (10), le modèle qui englobe les comportements statique, dynamique et qui intègre le vieillissement calendaire des PAC peut être obtenu.

Ce modèle établi en considérant le vieillissement calendaire des PAC sera utilisé dans cette étude car il pourrait faciliter l'intégration de leur vieillissement en cyclage dont la modélisation est indispensable pour évaluer la durabilité des systèmes multi-PAC sous une SGE, pendant les simulations.

Tableau 4: Les paramètres qui varient en fonction de l'état de vieillissement calendaire des PAC / [Jouin et al., 2015]

Paramètres	Descriptions	Expressions temporelles	Valeurs estimées des paramètres
$i_n(t)$	Courant interne au sein de l'empilement	$i_n(t) = i_{n_0} \cdot \exp(b_n \cdot t)$	$i_{n_0} \in \text{à } [0,001 \ 0,1]$ $b_n \in \text{à } [0,001 \ 0,009]$
$R(t) = R_{elec}(t) + R_{cr}(t)$	$R_{elec}$ : résistance électronique $R_{cr}$ : résistance de contact	$R(t) = R_0 + b_R \cdot t$	$R_0 \in \text{à } [0 \ 0,09]$ $b_R \in \text{à } [0 \ 0,001]$
$R_{ion}(t)$	Résistance ionique	$R_{ion}(t) = R_{ion_0} \cdot \exp(b_{ion} \cdot t)$	$R_{ion_0} \in \text{à } [0 \ 0,09]$ $b_{ion} \in \text{à } [0 \ 0,001]$

$B(t)$	Paramètre traduisant l'effet des accumulations d'eau et de gaz	$B(t) = B_0 + b_B \cdot t$	$B_0 \in \text{à } [0 \ 5]$ $b_B \in \text{à } [0 \ 0,1]$
$i_l(t)$	Courant limite à la cathode	$i_l(t) = \frac{4 \cdot F}{R \cdot T_{FC}} \left( \frac{D_{O_2}(t)}{L_{GDL}} \right) P_{O_2}$	$L_{GDL}$ : épaisseur de la GDL.
$D_{O_2}(t)$	Diffusivité de l'oxygène	$D_{O_2}(t) = D_{O_{2,0}} + b_D \cdot t$	$D_{O_{2,0}} \in \text{à } [0,1 \ 0,9]$ $b_D \in \text{à } [0,0001 \ 0,01]$
$S_{PAC}(t)$	Aire de la surface active électrochimique du catalyseur (ASAE)	$S_{PAC}(t) = S_0 \cdot \exp(b_0 \cdot t) + S_1 \cdot \exp(b_1 \cdot t)$	$S_0$ : ASAE initial $S_1 \in \text{à } [-1 \ 1]$ $b_0 \in \text{à } [0 \ \text{Inf}]$ $b_1 \in \text{à } [-1 \ 1]$

### 1.3 Modèle de vieillissement en cyclage d'une PAC

À l'instar du vieillissement en cyclage des batteries, le vieillissement en cyclage des PAC désigne la dégradation liée à la manière dont elles sont utilisées et cela fait référence à la gestion d'énergie [Arora, 2019][Redondo-Iglesias, 2017]. Selon [Lorenzo et al., 2021] dans le cadre de la gestion d'énergie, les facteurs qui dégradent l'état de santé des PAC peuvent être résumés en quatre modes d'opération : le fonctionnement avec des cycles de démarrages-arrêts fréquents, le fonctionnement à des points de puissances proches de l'OCV, le fonctionnement à des points de puissances proches de la puissance maximale et le fonctionnement sous un profil de mission dynamique. Toutefois, comme l'indique le tableau 5, les modes d'opération énumérés impactent l'état de santé des PAC à des degrés différents.

Pour modéliser le vieillissement en cyclage des PAC, un modèle de dégradation  $\Delta_{PAC}(t)$  doit être construit et évalué en fonction du nombre de cycle de démarrages-arrêts  $N_{switch}(t)$ , du point de puissance de fonctionnement  $P_{PAC}(t)$  et de la dynamique du profil de mission  $\frac{dP(t)}{dt}$ . Le terme de dégradation obtenu après l'évaluation de la fonction de dégradation  $\Delta_{PAC}(t)$  peut ensuite être appliqué sur les performances maximales de la PAC pour reproduire sa perte de puissance au fur et à mesure qu'elle se dégrade. La Fig.25 illustre ce raisonnement.

## Chapitre II

Tableau 5: Estimation, à partir de la littérature, des taux de dégradation relatifs aux différents modes d'opération des PAC / [Lorenzo et al., 2021]

Modes d'opération	Taux de dégradation de $V_{PAC}$
Fonctionnement avec des cycles de démarrages-arrêts fréquents	$25 \mu V/cellule/cycle$
Fonctionnement à des points de puissances proches de la puissance maximale	$11 \mu V/cellule/heure$
Fonctionnement à des densités de courant proches de l'OCV	$10 \mu V/cellule/heure$
Fonctionnement sous un profil de mission dynamique	$1 \mu V/cellule/\Delta kW/s$

Dans cette étude, le modèle de dégradation de PAC proposé par [Dépature et al., 2017] dans le cadre du « IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 – Energy Management of a fuel cell/Battery Vehicle » sera utilisé. En effet, ce modèle tient compte de la dégradation provenant de l'augmentation du nombre de cycles de démarrages-arrêts et de la dégradation liée au point de fonctionnement des PAC. L'impact de la dynamique du profil de mission sur l'état de santé des PAC ne sera pas considéré dans cette étude car seule la partie basse fréquence du profil de mission leur sera imposée.

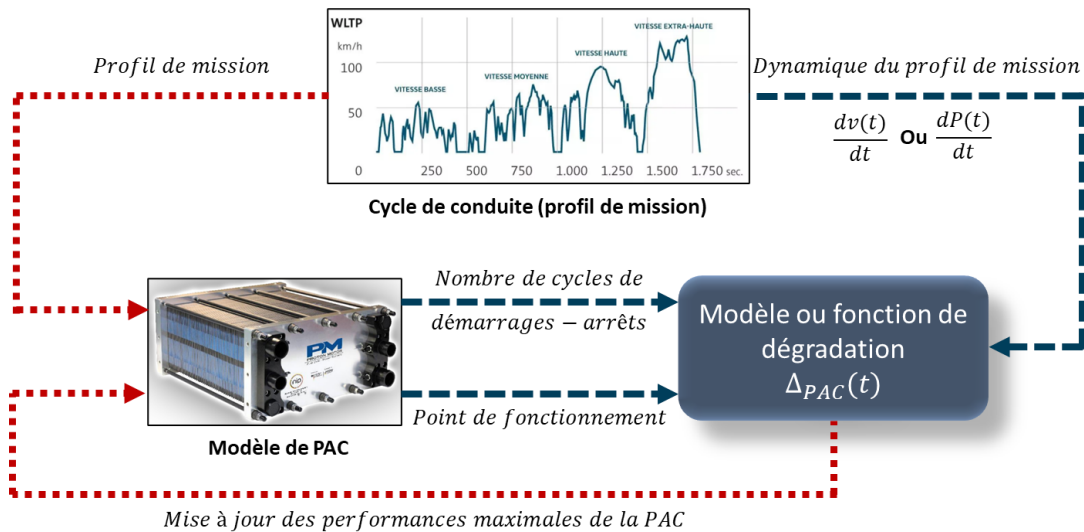


Figure 25: Illustration de la méthodologie d'intégration du vieillissement en cyclage dans le modèle de PAC

## Chapitre II

Pour mettre à jour les performances maximales des PAC donc leur état de santé, le terme de dégradation sera appliqué à l'aire de la surface active électrochimique (ASAE)  $S_{PAC}(t)$ . En effet, la diminution de l'ASAE représente plus ou moins la cause directe de la perte de puissance des PAC en fonction de leur vieillissement. Par conséquent, sous l'effet du vieillissement global (calendaire et en cyclage), l'ASAE d'une PAC peut être exprimée en fonction du terme de dégradation  $\Delta_{PAC}(t)$  et de l'ASAE  $S_{PAC}(t)$  de la PAC qui évolue uniquement en fonction du vieillissement calendaire.

$$S_{PAC\_deg}(t) = [1 - \Delta_{PAC}(t)] \cdot S_{PAC}(t) \quad (19)$$

Avec :

$$\Delta_{PAC}(t) = \int_0^t \delta(t) dt + N_{switch}(t) \cdot \Delta_{switch} \quad (20)$$

Où :

$$\delta(t) = \frac{\delta_0}{3600} \left[ 1 + \frac{\alpha}{P_{PAC_{nom}}^2} (P_{PAC}(t) - P_{PAC_{nom}})^2 \right] \quad (21)$$

$$Avec \quad P_{PAC_{nom}} = \begin{cases} 25\%P_{PAC_{max}} & si \quad P_{PAC}(t) < 25\%P_{PAC_{max}} \\ P_{PAC}(t) & si \quad 25\%P_{PAC_{max}} \leq P_{PAC}(t) \leq 95\%P_{PAC_{max}} \\ 95\%P_{PAC_{max}} & si \quad P_{PAC}(t) > 95\%P_{PAC_{max}} \end{cases}$$

$\delta(t)$  désigne le taux de la dégradation liée au point de fonctionnement de la PAC. Dans cette étude, la PAC sera considérée en mode galvanostatique si elle délivre une puissance  $P_{PAC}(t)$  comprise dans l'intervalle  $[25\%P_{PAC_{max}} ; 95\%P_{PAC_{max}}]$ . En d'autres termes, cet intervalle représentera la plage de puissance sécuritaire de la PAC ou encore la plage de puissance qui correspond au taux de dégradation le plus faible ( $\delta(t) = \frac{\delta_0}{3600}$ ) car il délimite plus ou moins la zone de pertes ohmiques. En effet, l'utilisation des PAC dans la zone des pertes ohmiques permet d'éviter les phénomènes d'activation et de concentration qui ont tendance à accélérer leur vieillissement. Lorsque la PAC fonctionne à des densités de courant faibles (point de fonctionnement proche de l'OCV) elle est soumise aux pertes d'activation et le taux de dégradation est déterminé par l'écart relatif entre la puissance qu'elle fournit et la puissance sécuritaire la plus proche ( $25\%P_{PAC_{max}}$ ). De même, si elle fournit une puissance très proche de sa puissance maximale  $P_{PAC_{max}}$ , elle subit des pertes de concentration et le taux de dégradation est déterminé

## Chapitre II

par l'écart relatif entre la puissance qu'elle délivre et la puissance sécuritaire la plus proche ( $95\%P_{PAC_{max}}$ ).

$\Delta_{switch}$  est la dégradation provenant d'un cycle de démarrage-arrêt.  $N_{switch}(t)$  représente le nombre de cycles de démarrages-arrêts subis par la PAC depuis son début d'utilisation jusqu'à l'instant présent  $t$ .  $\delta_0$ ,  $\alpha$ , et  $\Delta_{switch}$  sont des paramètres empiriques. Dans cette étude, les valeurs de  $\delta_0$  et de  $\Delta_{switch}$  seront fixées respectivement à  $4,4 \times 10^{-5}$  et  $1 \times 10^{-4}$  de sorte à accélérer le vieillissement des PAC afin de réaliser les simulations dans un temps raisonnable.

Grâce aux différentes contributions apportées par d'autres chercheurs dans la littérature, le modèle mis en place et qui englobe les comportements statique et dynamique ainsi que le vieillissement, sera utilisé dans toute la suite de la méthodologie de cette thèse, notamment dans l'étape suivante où il sera question d'estimer en ligne les performances maximales des PAC pour évaluer instantanément leur état de santé.

## 2. Estimation en ligne des performances

### maximales d'une PAC

Le vieillissement des PAC se traduit manifestement par une perte de puissance. Pour estimer les performances maximales d'une PAC en opération sans être contraint d'interrompre l'alimentation de la charge électrique (le moteur électrique du véhicule à hydrogène, dans cette thèse), la solution la plus simple et la plus réaliste proposée dans la littérature consiste à faire de l'identification de modèle. Le principe est de mettre à jour, au fur et à mesure que la PAC réelle fonctionne, les paramètres d'un modèle de PAC sur lequel des tests de polarisation réguliers peuvent être effectués pour estimer les performances maximales de la PAC réelle et en déduire son état de santé. En effet, cette idée permet non seulement d'éviter tout scénario d'intermittence dans l'alimentation de la charge par la PAC réelle mais aussi de ne consommer aucune quantité d'hydrogène supplémentaire durant les tests de polarisation. Cependant, elle reste intéressante uniquement dans la mesure où la méthode d'identification de modèle employée est précise car la fiabilité des estimations des performances maximales de la PAC dépend étroitement de la qualité du modèle. Ceci explique pourquoi la thématique d'identification en ligne de modèle des PAC est de plus en plus abordée dans la littérature. Plusieurs méthodes d'identification basées sur différentes approches telles que « Kalman Filter (KF) » [Kandidayeni et al., 2022], « Extended Kalman Filter (EKF) » [Diab et al., 2022][C. Li et al., 2020], « Lyapunov-based adaptation law » [Chaoui et al., 2020], « Forgetting Factor Recursive Least Square (FFRLS) » [T. Wang et al., 2019], etc., y sont proposées à cet effet.

L'identification de modèle ne faisant pas partie des objectifs de cette thèse, les tests de polarisation réguliers seront directement effectués sur la PAC réelle pour estimer ses performances maximales et en déduire son état santé. Il convient néanmoins de rappeler que le modèle de PAC établi dans la section 1 de ce chapitre et qui englobe les comportements statique et dynamique ainsi que le vieillissement, représentera la PAC réelle pendant la phase de validation numérique du concept étudié dans cette thèse.



## 2.1 Choix d'un indicateur de santé de PAC

Tel qu'il a été mentionné dans la sous-section 3.2.1.1 du chapitre I et comme il a déjà été évoqué dans le chapitre actuel, il serait judicieux de suivre l'évolution des performances maximales des PAC pour estimer leur état de santé. Celles-ci sont représentées par le point de puissance maximale ( $P_{max}, I_{P_{max}}$ ) de la PAC et le point de rendement maximal ( $\eta_{max}, I_{\eta_{max}}$ ) du système PAC [Jouin et al., 2016]. En effet, contrairement au point de meilleur rendement de la PAC, le point de meilleur rendement du système PAC est plus éloigné de la zone de très faible puissance ( $\sim [OW; 20\%P_{max}]$ ) où la dégradation des PAC est a priori plus importante.

Dans cette étude, la puissance maximale  $P_{max}$  sera choisie comme l'indicateur de santé de la PAC car son estimation permettra par la même occasion de situer la plage de puissance sécuritaire des PAC qui est définie vis-à-vis de la puissance maximale de la PAC et non du rendement maximal du système PAC (cf. sous-section 1.3 de ce chapitre). En effet, la connaissance de la plage de puissance sécuritaire des PAC est importante dans la résolution des problèmes de gestion d'énergie dans lesquels la durabilité est un enjeu essentiel.

## 2.2 Tests de polarisation réguliers en vue de l'estimation de la puissance maximale des PAC

Les tests de polarisation réguliers sont réalisés pour tracer régulièrement la courbe de polarisation  $V_{PAC} = f(I_{PAC})$  d'une PAC. Plus concrètement, une séance de test de polarisation consiste à faire varier le courant délivré par la PAC à partir d'une certaine valeur  $I_{min}$  à  $I_{max}$  où  $I_{max}$  désigne le courant maximal de la PAC. Les PAC considérées dans cette étude sont des PAC de 500 W du fournisseur Horizon, composées de 36 cellules et pour lesquelles  $I_{max} = 27 A$ . Elles sont supposées être identiques et leur courbe de polarisation à l'état neuf apparaît à la Fig.26. De chaque courbe de polarisation peut être déduite une caractéristique  $P_{PAC} = f(I_{PAC})$ . Par exemple, la caractéristique  $P_{PAC} = f(I_{PAC})$  correspondant à la courbe de polarisation des PAC à l'état neuf est présentée à la Fig.27.

## Chapitre II

Comme l'indique la Fig.27, le point de puissance maximale ( $P_{max}, I_{P_{max}}$ ) se trouve sur la caractéristique  $P_{PAC} = f(I_{PAC})$ . Ainsi, en traçant régulièrement cette caractéristique à partir des tests de polarisation réguliers, la puissance maximale de chacune des PAC peut être estimée en fonction du vieillissement. Cependant, pour réaliser les tests de polarisation réguliers, trois différents paramètres doivent être définis au préalable : la fréquence des tests, la durée d'un test ainsi que la valeur du courant  $I_{min}$ .

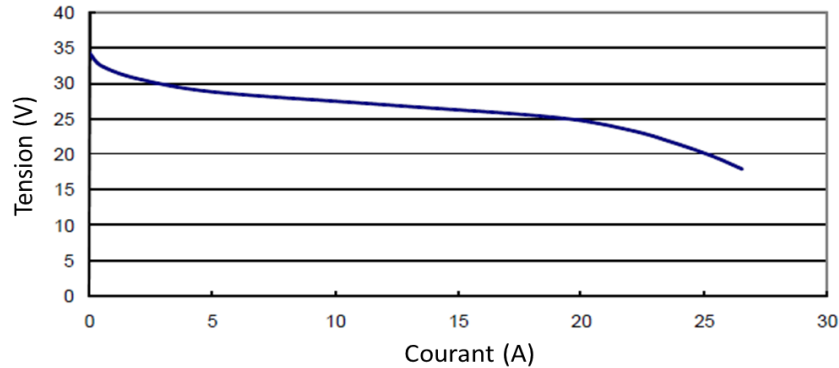


Figure 26: Caractéristique  $V = f(I)$  d'une PAC de 500 W composée de 36 cellules et dont le courant maximal est 27 A

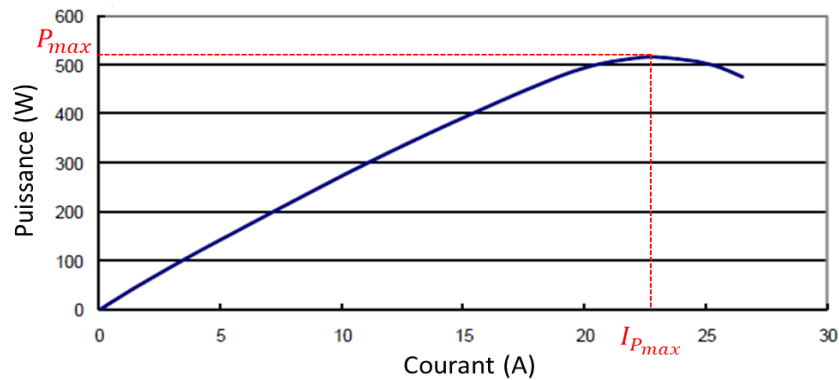


Figure 27: Caractéristique  $P = f(I)$  d'une PAC de 500 W composée de 36 cellules et dont le courant maximal est 27 A

- **La fréquence des tests de polarisation :**

L'objectif de l'estimation instantanée de la puissance maximale  $P_{max}$  des PAC étant de construire une série temporelle qui servira de données d'apprentissage à l'algorithme de pronostic, la fréquence des tests de polarisation doit être choisie de manière adéquate. Elle doit être définie de sorte à assurer bon compromis entre la quantité de données nécessaire au pronostic et l'intervalle de temps nécessaire pour observer une dégradation de  $P_{max}$ . Par exemple, dans les applications automobiles où la durée de vie actuelle des PAC est estimée

## Chapitre II

entre 4 000 heures et 5 000 heures, les tests de polarisation peuvent être réalisés avec un pas de temps de 100 heures. En effet, en supposant une durée de vie de 5 000 heures, un pas de temps de 100 heures ne serait pas trop court pour observer une dégradation de  $P_{max}$  mais il est assez court pour permettre de collecter assez de données pertinentes sur le vieillissement, facilitant ainsi l'apprentissage de l'algorithme de pronostic. De manière générale, la fréquence des tests de polarisation peut être fonction du taux de dégradation de la PAC. Ainsi, les tests de polarisation pourraient être plus fréquents si le taux de dégradation est important et moins fréquents si le taux de dégradation est faible.

Pour des raisons de capacités de mémoire limitées des ressources matérielles informatiques, le vieillissement en cyclage des PAC sera accéléré dans cette étude de sorte qu'elles atteignent leur fin de vie au bout de quelques dizaines d'heures dépendamment de comment elles seraient utilisées. Par conséquent, les tests de polarisation seront effectués à une fréquence d'une heure.

- **Le courant  $I_{min}$  :**

Faire un test de polarisation dans le but d'estimer le point de puissance maximale ( $P_{max}, I_{P_{max}}$ ) d'une PAC revient à faire varier le courant délivré par la PAC de façon croissante sur un intervalle  $[I_{min}; I_{max}]$  avec un pas de courant fixe (1A, par exemple). Le point de puissance maximale des PAC se situe à priori dans la zone de fortes densités de courant. Pour cette raison,  $I_{max}$  devrait être le courant maximal de la PAC et  $I_{min}$  devrait être choisi de sorte que la probabilité que le point de puissance maximale soit compris dans la zone  $[I_{min}; I_{max}]$  sur toute la durée de vie de la PAC, soit la plus élevée possible. Dans une application automobile, en partant du principe que les tests de polarisation réguliers seraient effectués sur un modèle de PAC (identifié en ligne) au lieu de la PAC réelle, prendre  $I_{min} = \frac{I_{max}}{2}$  pourrait être un choix raisonnable. En effet, l'instant de fin de vie des PAC étant défini comme l'instant qui correspond à une baisse de 10% de leurs performances maximales initiales, la probabilité que le point de puissance maximale soit compris dans la zone  $[\frac{I_{max}}{2}; I_{max}]$  sur toute la durée de vie de la PAC est à posteriori égale à 1.

Dans cette étude, l'identification en ligne de modèle n'étant pas abordée, nous admettons que les tests de polarisation soient menés sur la PAC réelle qui sera représentée dans les travaux de simulations par le modèle qui englobe les comportements statique et dynamique de PAC et qui intègre le vieillissement. Pour cela, il faudrait que l'intervalle  $[I_{min}; I_{max}]$  soit le plus restreint possible afin que les PAC soient mises à la disposition de la charge électrique la majorité du temps. Sachant que  $I_{max} = 27A$ , le courant  $I_{min}$  sera fixé à  $24A$ . En fait, il a été vérifié que sur toute la durée de vie des PAC, le courant  $I_{P_{max}}$  correspondant à la puissance maximale  $P_{max}$  sera toujours compris dans l'intervalle  $[24A; 27A]$ , la durée de vie des PAC étant définie comme le temps au bout duquel leur puissance maximale se dégrade de 10% par rapport à sa valeur initiale.

- **La durée d'un test de polarisation :**

Dès que le courant  $I_{min}$  est fixé, la durée du test de polarisation peut être définie.

Dans le cas où les tests de polarisation réguliers doivent être directement réalisés sur des PAC réelles comme dans cette étude, la durée du test de polarisation doit être définie en considérant à la fois la constante de temps thermique des PAC et l'intervalle de temps qui garantit la stationnarité de leur puissance maximale. En effet, la constante de temps thermique des PAC détermine le temps au bout duquel le régime permanent s'établit à la suite d'un changement de niveau de courant. En raison de la dynamique lente des phénomènes thermiques au sein des PAC, cette constante de temps est relativement élevée (de l'ordre de quelques minutes). Cependant, pour que les performances maximales des PAC ne se détériorent pendant le test de polarisation, la durée du test doit être la plus courte possible.

Dans la présente étude, nous supposons que le régime permanent s'établit au bout de cinq minutes (cf. section 1.1 de ce chapitre). Par conséquent, l'application de quatre niveaux de courant ( $24A$ ,  $25A$ ,  $26A$ , et  $27A$ ) implique une durée de vingt (20) minutes pour chaque test de polarisation.

La procédure complète de réalisation des tests de polarisation réguliers dans cette étude est illustrée à la Fig.28.

## Chapitre II

L'échantillon de puissance maximale de chaque PAC, obtenu à l'issue de toute séance de test de polarisation s'ajoute à la série temporelle qui permettra d'entraîner un algorithme de pronostic pour prédire l'évolution temporelle future de la puissance maximale de la PAC.

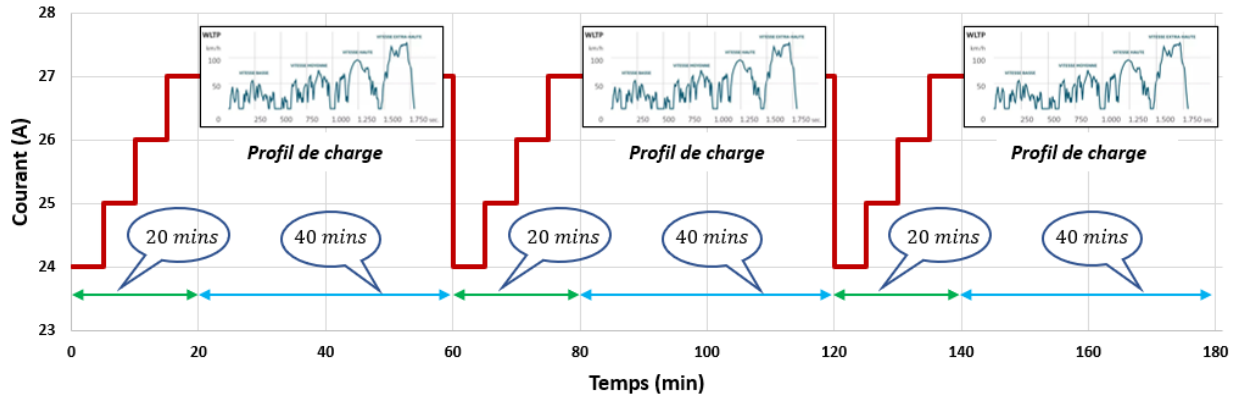


Figure 28: Illustration de la procédure de réalisation des tests de polarisation réguliers (exemple de trois séances de test)

## 3. Pronostic de la durée de vie restante

### ou RUL d'une PAC

Le pronostic du RUL d'une PAC se fait au moyen de la prédiction de l'évolution temporelle future de son état de santé. Dans la section précédente de ce chapitre, la puissance maximale a été choisie comme l'indicateur de santé des PAC car son évolution en fonction du temps reflète bien leur vieillissement et une méthodologie d'estimation instantanée de cette grandeur caractéristique des PAC y a également été décrite. Dans la section présente, une méthodologie de prédiction de l'évolution temporelle future de la puissance maximale d'une PAC en usage réel sera proposée.

#### 3.1 Choix de l'approche de pronostic

Tel qu'il a été vu dans la sous-section 3.2.1.2 du chapitre I, différentes approches de pronostic peuvent être adoptées pour prédire l'évolution temporelle de l'indicateur de santé des PAC. Il en existe quatre et elles peuvent être énumérées comme suit : l'approche basée sur les modèles, l'approche basée sur les données, l'approche hybride et l'approche basée sur l'expérience. Chacune de ces approches possède ses avantages et ses inconvénients qui peuvent être résumés à l'aide de trois critères : la précision, la complexité et l'applicabilité, comme le montre la Fig.29.

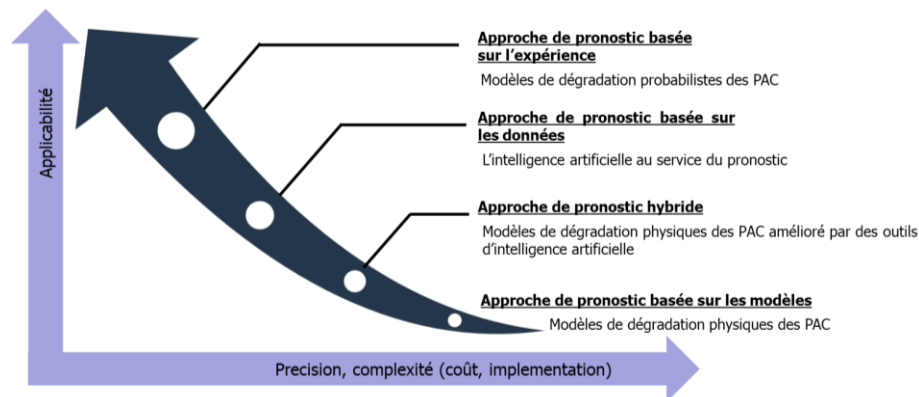


Figure 29: Classification des différentes approches de pronostic suivant les critères de précision, de complexité et d'applicabilité / [Jemei, 2018]

La classification des approches de pronostic suivant les trois critères énoncés apparaît également à la Fig.29. Sur cette figure, les critères de précision et de complexité sont regroupés sur un même axe car ils vont de pair. En effet, plus une méthode de pronostic est complexe, plus elle serait précise. Dans cette étude, pour faire un bon compromis entre la précision, la complexité et l'applicabilité, une méthode de pronostic basée sur les données et l'intelligence artificielle sera utilisée pour prédire l'évolution temporelle des puissances maximales des PAC et estimer leur RUL.

### 3.2 Développement d'un algorithme de pronostic en usage réel basé sur le réseau de neurones artificiel de rétropropagation

Le réseau de neurones de rétropropagation (RNR) ou encore « Back-Propagation Neural Network (BPNN) » est un outil d'apprentissage automatique capable de prendre l'information sur la tendance de dégradation de la puissance maximale d'une PAC pour prédire son évolution temporelle future, un peu comme le ferait un cerveau humain.

Le RNR dont l'architecture de base apparaît à la Fig.30 est généralement constitué d'une couche d'entrée, d'une ou de plusieurs couches intermédiaires appelées communément couches cachées et d'une couche de sortie. Chacune de ces couches est formée d'un certain nombre de neurones qui réalisent une fonction déterminante dans les phases d'apprentissage et de prédiction du réseau.

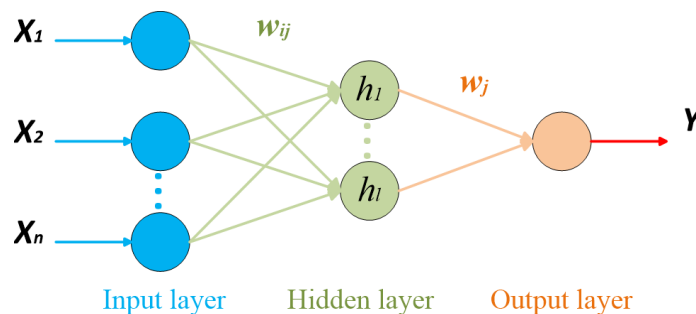


Figure 30: Architecture de base d'un réseau de neurones de rétropropagation

## Chapitre II

Dans la littérature, le RNR a déjà été utilisé, notamment par [K. Chen et al., 2020] pour proposer des algorithmes de pronostic de RUL des PAC. Cependant, à l'instar de la majorité des méthodes de pronostic de RUL basées sur les données, les algorithmes de pronostic basés sur le RNR proposés par les auteurs sont développés et testés avec l'hypothèse qu'en dehors du vecteur temps  $X_1$ , les conditions d'opérations  $\{X_2, X_3, \dots, X_n\}$  futures des PAC (courant, humidité relative, pression des gaz, température, etc.), relatives à un horizon de prédiction donné seraient connues. Cette hypothèse ne peut être admise dans une application transport et ce, d'autant plus que le pronostic de RUL requiert une prédiction de l'indicateur de santé sur un très long horizon (~ plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'heures). Pour cela, un algorithme de pronostic de RUL des PAC en usage réel basé sur le RNR sera développé dans cette thèse. L'aspect de l'usage réel sera pris en compte afin que le vecteur temps soit le seul argument nécessaire pour prédire sur un horizon donné après la phase d'apprentissage du réseau.

Pendant la phase d'apprentissage, le réseau se sert des données historiques c'est à dire de la série temporelle de puissance maximale des PAC pour ajuster ses paramètres (poids synaptiques et seuils de neurones) de sorte qu'ils caractérisent la tendance de dégradation des PAC. Pour ce faire, la phase d'apprentissage est composée de deux étapes.

- ***Une phase de propagation vers l'avant :***

L'échantillon d'indice  $k$  du signal d'entrée (série temporelle de puissance maximale de la PAC) se propage depuis la couche d'entrée vers la couche de sortie sous l'action des poids synaptiques ( $w_{ij}$  et  $w_j$ ) et des seuils de neurones ( $a_j$  et  $b$ ) de la couche cachée et de la couche de sortie. Une seule couche cachée composée de deux neurones, sera considérée dans cette étude pour minimiser le nombre de paramètres du réseau et ainsi minimiser le nombre d'échantillons du signal d'entrée nécessaires pour l'entraîner. En effet, le nombre d'échantillons requis pour bien entraîner un RNR augmente exponentiellement en fonction du nombre de neurones présents dans le réseau [Hodas et al., 2018].

La propagation de l'échantillon du signal d'entrée commence par le calcul des sorties  $H_j$  ( $j = 1, 2, \dots, l$ ) des neurones de la couche cachée et ce, via la fonction sigmoïde  $g(x)$  choisie comme fonction d'activation car elle est simplement différentiable et capable de représenter les phénomènes linaires et non-linéaires. En effet, la tendance de dégradation de la



puissance maximale est susceptible de changer d'un intervalle de temps à un autre à cause des décisions de gestion d'énergie post-pronostics.

$$H_j = g \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} X_i - a_j \right) \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (22)$$

Ensuite, la sortie  $\hat{Y}$  et l'erreur notée *Erreur* du réseau, correspondant à l'échantillon du signal d'entrée, peuvent être respectivement calculées suivant les équations (23) et (24). Une fonction d'activation linéaire a été utilisée pour la couche de sortie afin de conserver la représentation apportée par la fonction sigmoïde de la couche cachée.

$$\hat{Y} = \sum_{j=1}^l w_j H_j - b \quad (23)$$

$$Erreur = Y_{réel} - \hat{Y} \quad (24)$$

- **La phase de rétropropagation de l'erreur :**

L'erreur correspondant à l'échantillon considéré du signal d'entrée se propage de la couche de sortie vers la couche d'entrée en ajustant les poids synaptiques ainsi que les seuils de neurones suivant les équations (25), (26), (27) et (28). Dans ces équations,  $\tau$  désigne le coefficient d'apprentissage.

$$b = b + \tau \cdot Erreur \quad (25)$$

$$w_j = w_j + \tau \cdot H_j \cdot Erreur \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (26)$$

$$a_j = a_j + \tau \cdot H_j \cdot (1 - H_j) \cdot w_j \cdot Erreur \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (27)$$

$$w_{ij} = w_{ij} + \tau \cdot X_i \cdot H_j \cdot (1 - H_j) \cdot w_j \cdot Erreur \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l \quad (28)$$

Les paramètres ajustés à la phase de rétropropagation sont ensuite appliqués à l'échantillon suivant du signal d'entrée pour calculer la sortie correspondante. Ce processus se répète jusqu'à ce que les sorties correspondant à tous les échantillons du signal d'entrée soient calculés et jusqu'à ce

## Chapitre II

que le nombre d'itérations  $N_{max}$  fixé pour bien entraîner le réseau soit atteint. La Fig.31 présente l'organigramme de la phase d'apprentissage de l'algorithme de pronostic.

Finalement, comme l'indique la Fig.32, la phase de prédiction consiste à utiliser les paramètres obtenus à l'issue de la phase d'apprentissage du réseau ainsi que le vecteur temps qui représente l'horizon de prédiction pour prédire l'évolution temporelle des puissances maximales des PAC et en déduire leur RUL.

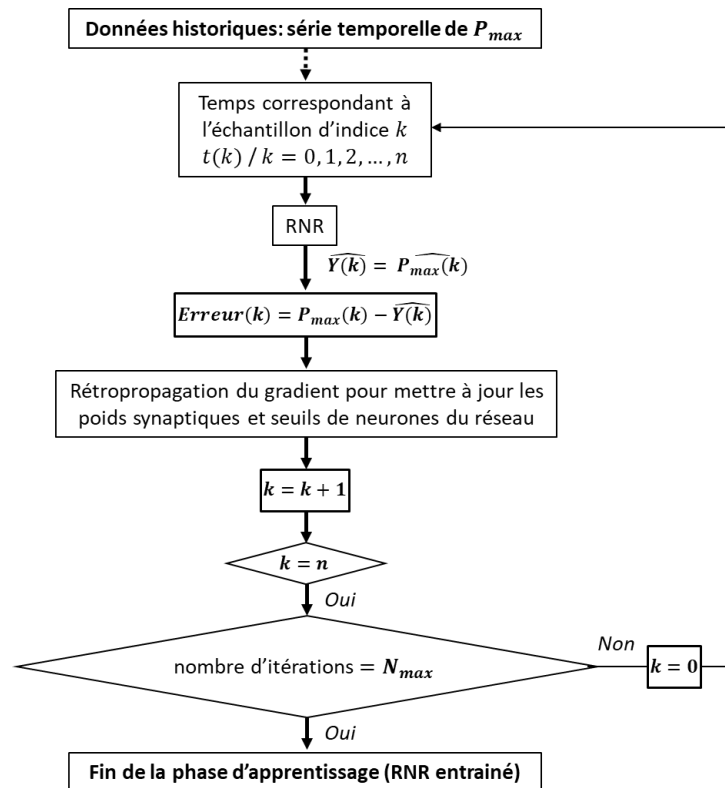


Figure 31: Organigramme de la phase d'apprentissage de l'algorithme de pronostic

Pour estimer le RUL d'une PAC, la prédiction de sa puissance maximale doit être réalisée sur un horizon suffisamment long. Cependant, il a été remarqué qu'avec l'algorithme de pronostic de RUL en usage réel développé dans ces travaux, il n'est pas possible de prédire l'indicateur de santé sur un très long horizon de prédiction en un seul temps tant que le RNR n'a pas été entraîné sur une série temporelle de même longueur que l'horizon en question. En d'autres termes, pour prédire sur un horizon de  $n$  heures, l'algorithme de pronostic doit au préalable être entraîné sur une base de données historiques de  $n$  heures. En effet, pendant la phase de prédiction, les poids synaptiques et seuils de neurones ajustés à la phase d'apprentissage doivent être appliqués sur un

## Chapitre II

vecteur temps normalisé ayant un pas identique à celui du vecteur temps normalisé pour réaliser l'apprentissage. Il convient de noter que les données d'entrées du RNR sont systématiquement normalisées pour une meilleure optimisation des poids synaptiques et seuils de neurones du réseau.

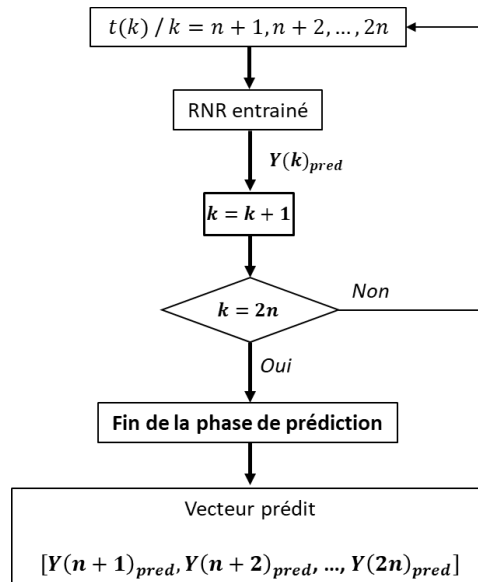


Figure 32: Organigramme de la phase de prédiction de l'algorithme de pronostic

Afin d'obtenir une prédiction sur un très long horizon à partir d'une base de données historiques n'ayant pas forcément la même longueur que l'horizon de prédiction, il est possible de réaliser des prédictions par morceaux intercalées de séances d'apprentissage comme l'illustre la Fig.33. L'idée est de concaténer, après chaque séance de prédiction, la série temporelle prédite à la série temporelle utilisée pour entrainer le réseau; tout ceci pour former une base de données d'apprentissage plus longue. Finalement, la prédiction globale est obtenue en concaténant les séries temporelles prédites par morceaux. Par exemple, dans la Fig.33, à partir de  $n$  heures de données historiques,  $(7 \times n)$  heures de données sont prédites. Toutefois, cette technique n'échappe pas au problème de propagation de l'erreur de prédiction qui est inévitable lorsqu'il s'agit de prédire le RUL d'une PAC.

De la même manière qu'il est important de choisir la fréquence des tests de polarisation qui permettent d'estimer instantanément l'état de santé des PAC, il est également nécessaire de choisir la fréquence de réalisation du pronostic de RULs des PAC. Dans une application réelle, en considérant un pas de temps de 100 heures entre les séances de test de polarisation, le pronostic de RULs peut être réalisé chaque 200 heures, c'est-à-dire après chaque ajout de deux échantillons de

## Chapitre II

$P_{max}$ . En effet, une telle fréquence permettrait à la SGE d'ajuster assez rapidement les éventuelles décisions post-pronostics, tout en minimisant le nombre de cycles de démarrages-arrêts qui proviendraient de ces décisions.

Dans ces travaux, comme il a été spécifié dans la sous-section 2.2 de ce chapitre, en raison des capacités de mémoire limitées des ordinateurs qui déterminent la longueur maximale des simulations, les tests de polarisation se feront suivant une fréquence d'une heure. Sur ce, le pronostic de RULs des PAC pourrait se faire chaque cinq heures c'est-à-dire après chaque ajout de cinq échantillons de  $P_{max}$  dans la série temporelle qui est utilisée pour entraîner le réseau de neurones. Les décisions de gestion d'énergie post-pronostic de la SGE seront ainsi mises à jour chaque cinq heures en fonction de la manière dont l'algorithme de pronostic interprète l'historique de vieillissement des PAC et de l'objectif visé par la SGE.

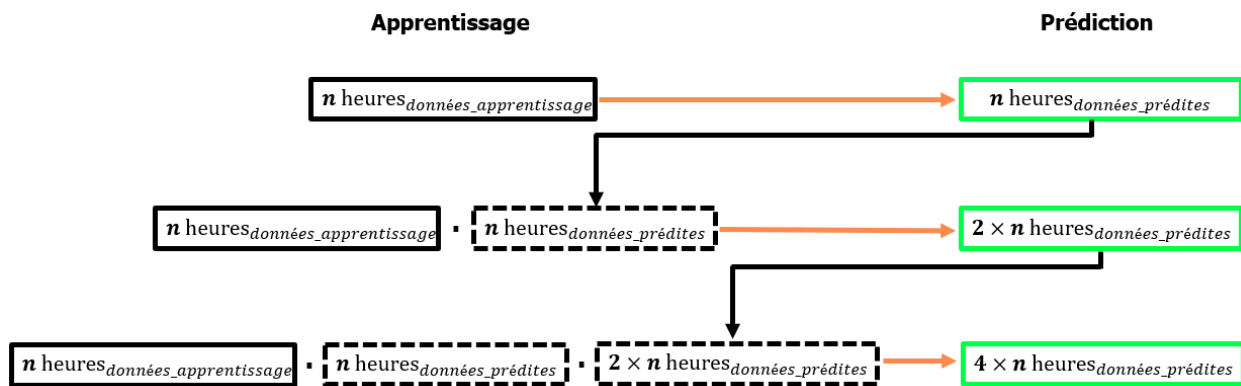


Figure 33: Illustration de la technique associée à l'algorithme de pronostic proposé pour prédire la puissance maximale des PAC sur de très long horizon de prédiction afin d'estimer leur RUL.

Pour simuler ce concept et procéder à sa validation numérique, les différents modules (modélisation, estimation en ligne de l'état de santé des PAC, pronostic de RUL des PAC) qui ont été décrits dans ce chapitre seront tous assemblés dans le chapitre suivant pour mettre en place un système hybride multi-PAC/ batterie et pour gérer son énergie via une SGE basée sur les pronostics de RUL.



# **III-Mise en place d'un système hybride multi-PAC/ batterie et gestion d'énergie basée sur le pronostic de RUL des PAC**

1. Introduction.....	105
2. Choix des architectures fluidique et électrique du système multi-PAC dans le cadre d'une application automobile.....	106
3. Dimensionnement du système hybride multi-PAC/ batterie dans le cadre d'une application automobile.....	109
3.1 Dimensionnement du système multi-PAC.....	111
3.2 Dimensionnement de la batterie.....	113
4. Stratégie de gestion d'énergie de la batterie ou « Battery Management Strategy – BMS ».	115
5. Stratégie de gestion d'énergie du système multi-PAC basée sur les pronostics de RULs des PAC.....	118
5.1 Choix de l'approche de la SGE du système multi-PAC.....	121
5.2 Proposition de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC.....	122
5.2.1 Principe de la SGE du Daisy-Chain.....	122

5.2.2 Principe de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC..... 123

# 1. Introduction

Le concept étudié dans cette thèse consiste à joindre les atouts prometteurs des systèmes multi-PAC et les avantages du pronostic pour étendre la durabilité des systèmes multi-PAC. Que ce soit en termes de durabilité, de rendement énergétique ou même de tolérance aux pannes, les performances des systèmes multi-PAC reposent largement sur la SGE qui régit leur fonctionnement. Depuis une dizaine d'années, le pronostic est présenté dans la littérature comme un outil potentiel d'amélioration de la durée de vie des systèmes PAC car il permet d'estimer les RUL des PAC et d'en faire des données d'entrées des SGE pour gérer convenablement l'énergie de ces systèmes. Cependant, jusqu'à ce jour, très peu de SGE basées sur le pronostic sont proposées pour la gestion d'énergie des systèmes PAC ou des systèmes multi-PAC.

L'étude menée dans cette thèse s'inscrit donc parmi les premiers travaux visant à proposer une SGE des systèmes multi-PAC basée sur les pronostics de RUL des PAC. Pour mettre en place un système hybride multi-PAC/ batterie et développer une telle SGE, les modules tels que la modélisation des PAC et de leur vieillissement, l'estimation en ligne de leur état de santé, le pronostic de RUL, décrits dans le chapitre précédent, seront tous essentiels.

Comme pour tout système d'alimentation, les deux premières étapes importantes dans la mise en place d'un système hybride multi-PAC/ batterie sont respectivement celle du choix des architectures fluide et électrique puis celle du dimensionnement vis-à-vis de l'application visée. Dans cette thèse, l'attention sera plus portée vers les applications automobiles où l'enjeu sera principalement de gérer l'énergie du système hybride multi-PAC/ batterie pour simultanément répondre à la demande d'un moteur électrique, minimiser la consommation d' $H_2$  et étendre autant que possible la durée de vie globale du système multi-PAC.



## 2. Choix des architectures fluide et électrique du système multi-PAC dans le cadre d'une application automobile

L'étude des différentes architectures fluidiques et électriques des systèmes multi-PAC, présentées dans les sous-section 2.1 et 2.2 du chapitre I, a montré que chaque architecture possède ses avantages et ses inconvénients. Toutefois, le choix de l'architecture fluide s'avère plus simple que celui de l'architecture électrique. En effet, parmi les trois architectures fluidiques qui existent (architecture en série, architecture en série à compression renforcée et architecture parallèle), l'architecture parallèle se démarque plutôt bien du lot. Certes, l'architecture en série représente l'architecture la plus simple et la moins coûteuse mais les performances non-optimales des PAC dues aux chutes de pression de gaz entre les PAC font d'elle l'architecture fluide la moins intéressante. L'architecture en série à compression renforcée permet de limiter le problème de chutes de pression de gaz entre les PAC. Cependant, la forte dépendance qui existe toujours entre les PAC fait d'elle une architecture qui reste moins bénéfique que l'architecture parallèle avec laquelle le système multi-PAC présente son plus haut niveau de modularité et pourtant ces deux architectures nécessitent le même nombre de compresseurs. En effet, comme il peut être remarqué sur la Figure 6, pour  $n$  PAC, il faudrait  $n$  compresseurs pour associer les PAC suivant l'architecture en série à compression renforcée ou suivant l'architecture parallèle. Ainsi, du point de vue du rendement énergétique du système, ces deux architectures fluidiques ne représentent pas les meilleurs choix en raison du caractère très énergivore des compresseurs. Cependant, la forte modularité qu'offre le système multi-PAC avec l'architecture parallèle peut toujours être exploitée pour améliorer le rendement énergétique. Compte tenu de cette analyse, les PAC du système multi-PAC seront alimentées en réactifs suivant l'architecture parallèle dans cette étude.

Du point de vue électrique, si l'association en série des PAC permet de réduire la complexité et les coûts de mise en place du système multi-PAC, elle ne permet pas pour autant de tirer parti

### Chapitre III

de la modularité des systèmes multi-PAC qui se traduit par le contrôle individuel des PAC et la possibilité de voir ces systèmes fonctionner en mode dégradé. Les points qui mettent en lumière les inconvénients de l'architecture en série sont en réalité ceux qui font ressortir les avantages de l'architecture parallèle et vice-versa. Même en adoptant des architectures mixtes telles que l'architecture en cascade ou l'architecture série-parallèle (cf. Figure 7), il est difficile de conserver à la fois tous les avantages des architectures en série et parallèle et de contourner tous leurs inconvénients. Pour cela, le choix de l'architecture électrique d'un système multi-PAC devrait plutôt dépendre des atouts de systèmes multi-PAC que le concepteur souhaite mettre le plus en avant. Dans cette thèse, étant donné l'objectif d'améliorer, via la gestion d'énergie, la durabilité des systèmes multi-PAC tout en faisant attention à leur consommation d' $H_2$ , la modularité des systèmes multi-PAC constitue un critère très important. De ce fait, l'architecture électrique parallèle y sera adoptée. À travers un schéma synoptique de système hybride multi-PAC/ batterie, la Fig. 34 illustre l'architecture fluïdique et l'architecture électrique choisies dans cette étude.

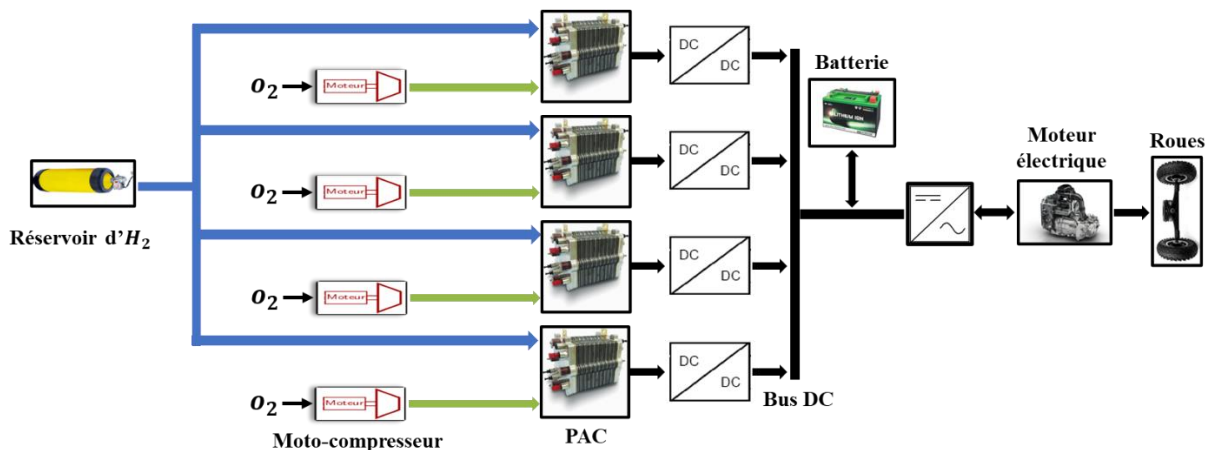


Figure 34: Synoptique d'un système hybride multi-PAC/ batterie considéré dans une application automobile

Le choix de l'architecture électrique parallèle implique l'utilisation d'un convertisseur DC-DC pour chaque PAC comme le montre la Fig.34. Pour limiter le nombre de convertisseurs et ainsi réduire le volume, le poids et le coût du système, la batterie sera quant à elle reliée directement au bus DC dans cette étude. Cette topologie sera prise en considération dans l'étape de dimensionnement de la batterie car la tension de la batterie devra être compatible avec la tension d'entrée du sous-système de traction c'est-à-dire la tension d'entrée de l'onduleur relié au moteur. En nous inspirant de l'architecture de véhicule hybride électrique à hydrogène proposé par

### *Chapitre III*

[Dépature et al., 2017] dans le cadre du IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017, la tension admise à l'entrée du sous-système de traction sera prise à 72 V dans cette étude.

### **3. Dimensionnement du système hybride multi-PAC/ batterie dans le cadre d'une application automobile**

Dans une application automobile, le dimensionnement des sources d'énergie s'effectue en fonction de l'autonomie, de la puissance maximale continue que peut demander le moteur en vitesse de croisière sur autoroute, de la dynamique ou encore de la puissance maximale instantanée que peut demander ou générer le moteur respectivement pendant les phases d'accélération ou de freinage. Alors que l'autonomie est liée à la densité énergétique de l'ensemble des sources d'énergie, la dynamique du profil de conduite sollicite leur capacité à fournir ou absorber les pics de puissance qui pourraient être demandés ou générés par le moteur respectivement pendant les phases d'accélération, et de freinage/décélération du véhicule. Pour un véhicule à hydrogène alimenté par un système hybride multi-PAC/ batterie, l'attention sera plus portée vers le réservoir d'hydrogène par rapport à la question d'autonomie et vers la batterie pour les appels de puissance liés à la dynamique. En effet, l'ensemble formé par le système multi-PAC et le réservoir d'hydrogène possède une densité énergétique plus élevée et une densité de puissance plus faible que celles des batteries. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il est important de choisir la configuration du système d'alimentation du véhicule à hydrogène avant de procéder à son dimensionnement. Les véhicules à hydrogène déjà existantes sur le marché automobile font ressortir trois configurations principales: la configuration « full-power » où le système PAC est dimensionné sur une puissance proche de la puissance maximale du moteur, la configuration « mid-power » ou « mild-hybrid » où le système PAC et la batterie sont conjointement sollicités pour assurer la traction du véhicule et la configuration « range-extender » où un petit système PAC prolonge l'autonomie d'une batterie qui alimente la chaîne de propulsion du véhicule.

Avec la configuration « full-power », l'ensemble formé par le réservoir d' $H_2$  et le système multi-PAC serait à lui tout seul responsable de la traction du véhicule dans presque toutes les

### *Chapitre III*

conditions. Cette configuration est adoptée dans la Toyota Mirai, la Hyundai Nexo SUV et la Honda Clarity qui embarquent respectivement des systèmes mono-PAC de 114 kW pour un moteur de 113 kW, de 135 kW pour un moteur de 120 kW et de 100 kW pour un moteur de 130 kW. Par conséquent, si un système multi-PAC devait être utilisé pour assurer la traction d'un véhicule à hydrogène de type « full-power », sa puissance de dimensionnement devrait être supérieure à la puissance maximale du moteur. En revanche pour un véhicule de type « range-extend » où généralement un système PAC de quelques kilowatts suffit pour accroître l'autonomie d'une grosse batterie (> 20 kWh), l'intégration d'un système multi-PAC dans la chaîne de propulsion ne s'avère pas nécessaire. La Renault Kangoo Z.E Hydrogen et la Master Z.E Hydrogen qui sont déjà commercialisés sur le marché sont de type « range-extend » et elles embarquent un système PAC de 5 kW et une batterie d'environ 33 kWh. Pour mieux exploiter les points forts des batteries (forte densité de puissance) et des systèmes PAC (forte densité énergétique) dans les véhicules à hydrogènes, les constructeurs automobiles s'intéressent également à une configuration intermédiaire entre le « full-power » et le « range-extend ». Il s'agit du « mid-power » ou « mild-hybrid » qui permet d'embarquer une batterie de plus petite taille que celle des véhicules de type « range-extend » pour fonctionner en complémentarité avec un système PAC ou un système multi-PAC également moins imposant que celui des véhicules de type « full-power ». Par exemple, dans la Mercedes GLC F-cell SUV, un système PAC de 50 kW et une batterie de 13,5 kWh fonctionnent de concert pour répondre aux besoins en puissance d'un moteur de 147 kW. Ainsi, contrairement à la configuration « full-power » qui implique des sollicitations trop dynamiques des systèmes PAC et donc une gestion non-optimale de l'état de santé des PAC, la configuration « mild-hybrid » donne la possibilité de filtrer la dynamique du profil soumis aux systèmes PAC et par conséquent de faire un bon pas vers l'amélioration de la durabilité des PAC. Pour cela, le système hybride multi-PAC/ batterie sera pris sous la configuration « mild-hybrid » dans cette étude et sera dimensionné à partir d'une répartition fréquentielle d'un profil de mission réel de véhicule en deux composantes : une composante basses fréquences pour le système multi-PAC et une composante hautes fréquences pour la batterie.

### 3.1 Dimensionnement du système multi-PAC

Le profil de mission des véhicules électriques fait généralement apparaître des puissances de l'ordre de plusieurs dizaines de kilowatts. Par exemple, le moteur R135 de la nouvelle ZOE de Renault délivre une puissance pouvant atteindre 100 kW, soit 135 chevaux. Dans cette thèse, pour avoir, pendant les simulations, des niveaux de puissance cohérents avec ceux du banc d'essai, le profil de mission réel qui sera considéré sera remis à échelle afin de permettre la réalisation de l'étude avec des systèmes PAC de faibles puissances comme ceux de 500 W. Les PAC de 500 W seront privilégiées ici car nous disposons d'un modèle de système PAC de 500 W construit à partir d'essais expérimentaux réalisés sur une PAC de 500 W du fournisseur Horizon « H-500 fuel cell stack ».

Le cycle de classe 3 de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers « *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure – WLTP* » conçu pour reproduire les conditions de conduite rencontrées sur les routes, sera utilisé dans cette étude pour dimensionner le système hybride multi-PAC/ batterie et pour évaluer les performances des SGE. En effet, comme le montre la Fig.35, les nombreuses phases d'accélération, de décélération et de conduite à vitesse quasiment constante font de ce cycle un profil assez dynamique pour valider le concept étudié dans cette thèse vis-à-vis d'une application automobile.

L'application du principe fondamental de la dynamique à une voiture à hydrogène de taille classique permet d'obtenir le profil de puissance (Fig.36) correspondant au cycle de conduite WLTP de classe 3. Pour simplifier l'étude, ce profil sera remis à échelle tout en conservant la dynamique du profil initial du véhicule.

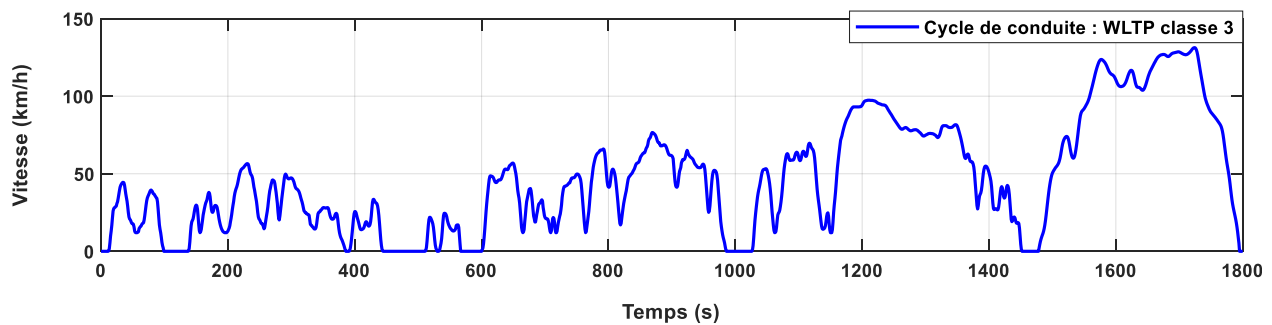


Figure 35: Cycle de classe 3 de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers (WLTP-3)

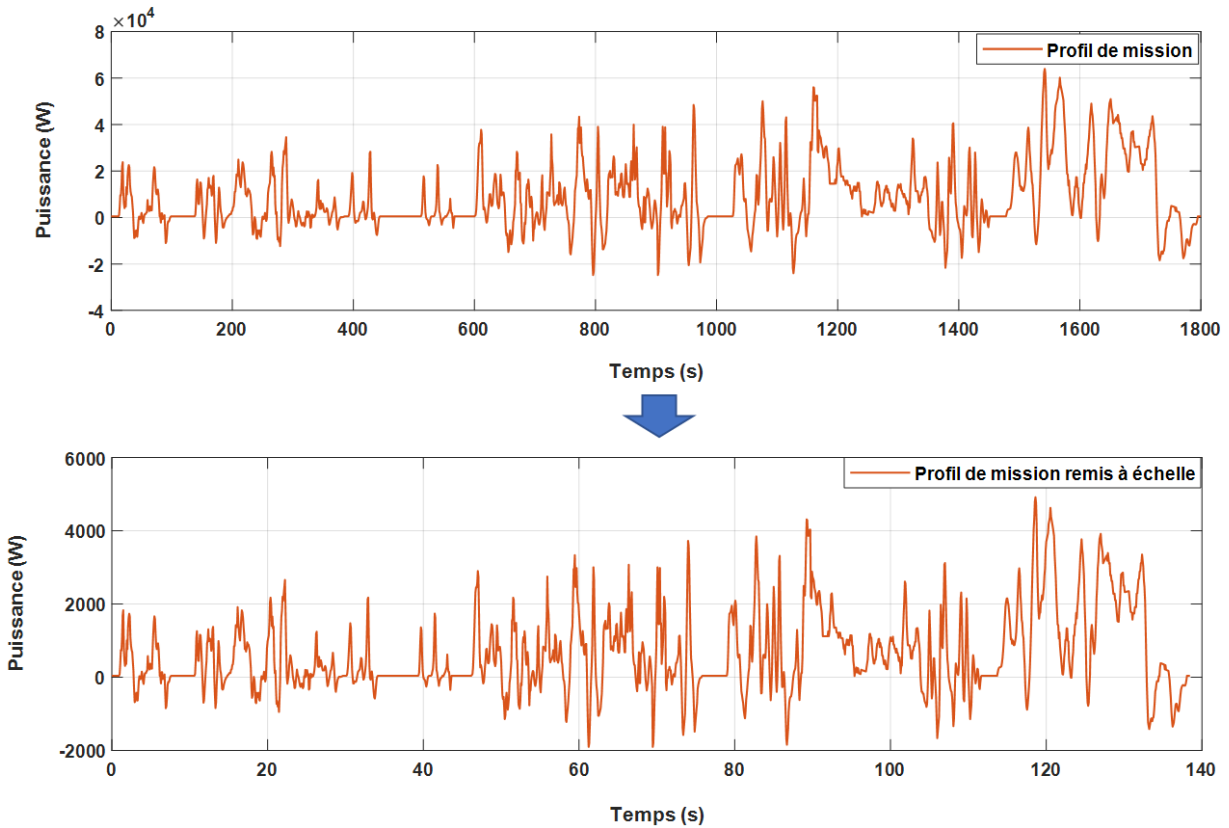


Figure 36: Profil de puissance réel d'un véhicule suivant la norme WLTP, profil de puissance remis à échelle en amplitude

Dans la suite de cette thèse, le profil de puissance réel remis à échelle qui apparaît à la Fig.36 sera considéré comme le profil de mission imposé par la charge au système hybride multi-PAC/ batterie. Le dimensionnement du système multi-PAC revient à déterminer le nombre de PAC de 500 W à associer pour répondre à ce genre de profil. Pour ce faire, tel qu'il a été décrit dans la sous-section 1.1.1 du chapitre II, le profil de mission peut être réparti en deux composantes : une composante basses fréquences et une composante hautes fréquences, à l'aide d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure serait d'environ 10 *mHz* (Fig.37). Cette fréquence de coupure a été choisie sur base d'une revue de littérature [Dépature et al., 2020][Xun et al., 2022][Snoussi et al., 2018].

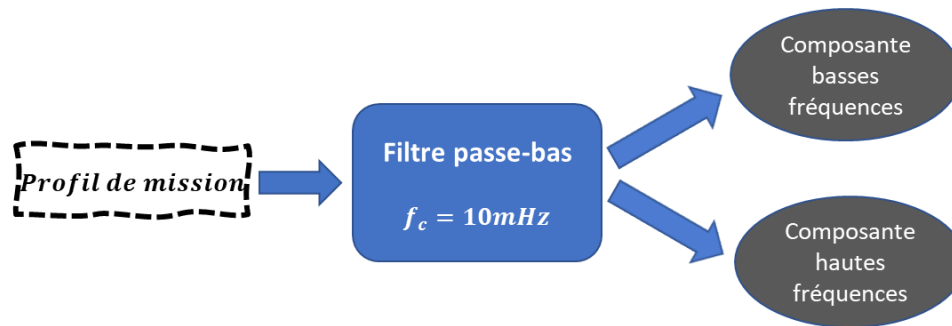


Figure 37: Technique de décomposition d'un profil de mission en partie basses fréquences et hautes fréquences

Sur la Fig.38, il convient de remarquer que la puissance maximale de la composante basses fréquences du profil est d'environ 1600 W. Par conséquent, l'utilisation d'au moins quatre PAC de 500 W est nécessaire pour satisfaire la demande.

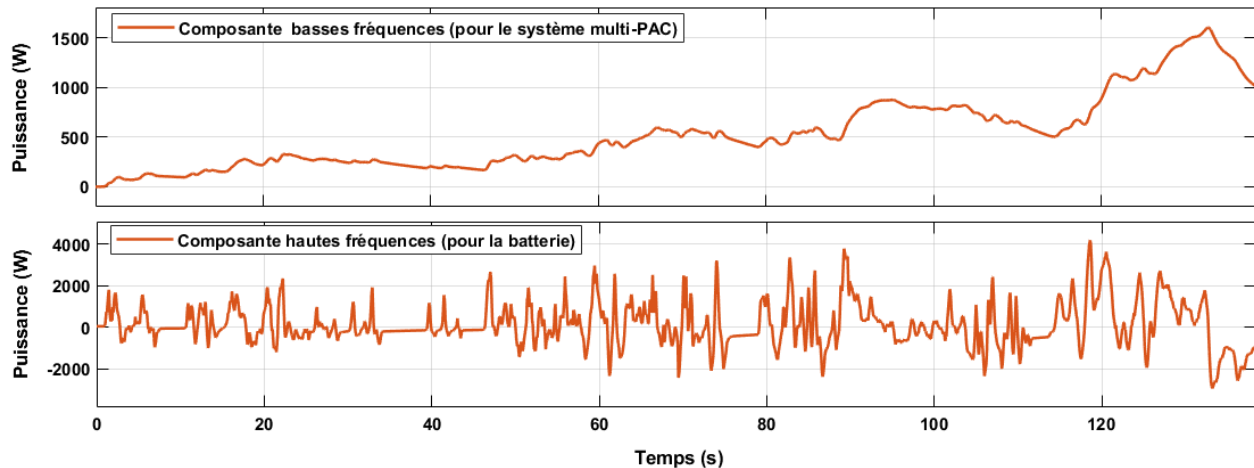


Figure 38: Les composantes basses fréquences et hautes fréquences du profil de mission, attribuables respectivement au système multi-PAC et à la batterie

### 3.2 Dimensionnement de la batterie

Le dimensionnement de la batterie vis-à-vis de la composante hautes fréquences du profil est dominé par ses capacités de tenue en puissance. Comme il peut être remarqué sur la Fig.38, la composante hautes fréquences fait apparaître une puissance maximale de 4191 W. En adoptant la topologie dans laquelle la batterie serait reliée au bus DC sans passer par un convertisseur DC-DC (pour réduire le volume, le poids et le coût du système), et en faisant l'hypothèse que la tension d'entrée du sous-système de traction est d'environ 72 V, la batterie devra délivrer une tension de



### Chapitre III

72 V. Par conséquent, elle devra être en mesure de fournir un courant de décharge instantanée d'au moins 58,2 A ( $\frac{4191 W}{72 V}$ ). De manière générale, le courant de décharge instantané maximal recommandé pour les batteries est d'environ  $3 \times Q_{bat}$  donc un module de batterie d'environ 20 Ah serait nécessaire pour répondre à la dynamique du profil de mission.

En définitive, face au profil de mission remis à échelle et pour une tension de bus DC de 72 V, le système d'alimentation devrait être composé d'un système multi-PAC d'au moins 1,6 kW et d'une batterie de 1,44 kWh environ. Si le système hybride devait être dimensionné vis-à-vis du profil de mission réel du véhicule par la technique de décomposition fréquentielle utilisée dans cette étude, il serait composé d'un système multi-PAC d'au moins 45 kW et d'une batterie d'environ 14,7 kWh. Ces gammes de puissance de PAC et de capacité de batterie sont bien connues dans les véhicules à hydrogène de type « mild-hybrid » comme la Mercedes GLC F-cell SUV qui embarque un système PAC de 50 kW et une batterie de 13,5 kWh pour un moteur de 147 kW.

Dans les véhicules hybrides électriques à hydrogène, la tension de bus DC doit être maintenue à un niveau optimal afin d'éviter tout dysfonctionnement du moteur ou des auxiliaires électriques à bord. Dans la présente étude, en raison de la topologie adoptée où la batterie impose directement sa tension sur le bus DC, l'énergie de la batterie devra être scrupuleusement gérée pour maintenir son état de charge dans un intervalle précis et ainsi restreindre la plage de variation de la tension.

## 4. Stratégie de gestion d'énergie de la batterie ou « Battery Management Strategy – BMS »

Le premier rôle de la stratégie de gestion d'énergie (SGE) de la batterie est de s'assurer que l'état de charge (SOC) de la batterie soit toujours compris dans un intervalle donné qui respecte, entre autres, les contraintes d'usage des batteries telles que la plage de SOC de [20%; 80%] recommandée par les fabricants pour éviter le vieillissement rapide des batteries. Dans la section précédente, la batterie a été dimensionnée de sorte qu'elle soit utilisée à seulement 20% de sa capacité afin de limiter la plage de variation de la tension de bus DC. Par conséquent, le SOC de la batterie sera généralement maintenu entre 40% et 60%. Les modes définissant l'état chargé et l'état déchargé de la batterie peuvent être traduits par un cycle d'hystérésis, comme l'indique la Fig.39.

*Batterie à l'état chargé*  $\Leftrightarrow SOC_{bat} \geq 60\%$  ou  $40\% < SOC_{bat} < 60\%$  et  $SOC_{bat}$  décroît

*Batterie à l'état déchargé*  $\Leftrightarrow SOC_{bat} \leq 40\%$  ou  $40\% < SOC_{bat} < 60\%$  et  $SOC_{bat}$  croît

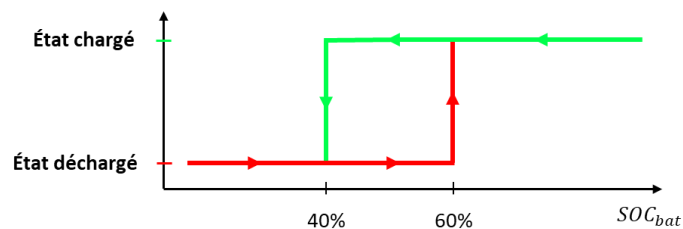


Figure 39: Cycle d'hystérésis définissant l'état chargé et l'état déchargé de la batterie

Le second rôle de la SGE de la batterie est de définir les actions qui doivent être exécutées lorsque la batterie est à l'état chargé ou à l'état déchargé. Si  $I_{basses\ fréquences}$  et  $I_{dem\_multi-PAC}$  désignent respectivement la composante basses fréquences du profil de mission et le courant que le système multi-PAC devrait réellement fournir, l'objectif de la SGE de la batterie est de définir

### Chapitre III

$I_{dem\_multi-PAC}$  en fonction de  $I_{basses\ fréquences}$  et ce, pour différents niveaux de charge de la batterie comme le montre la Fig.40.

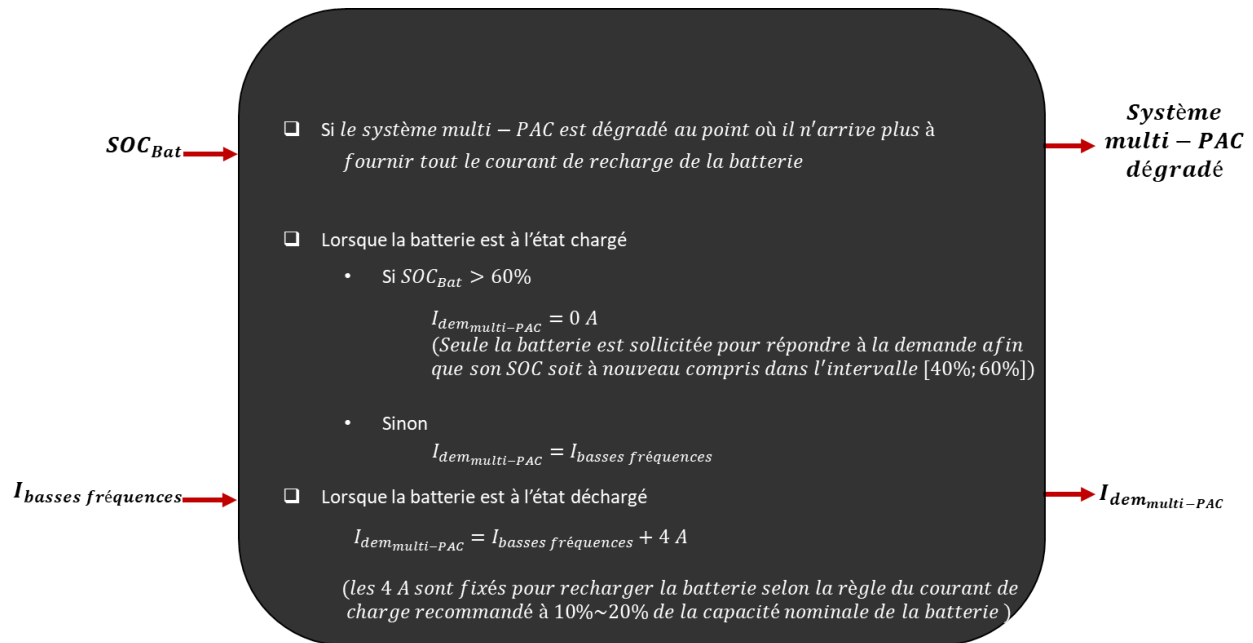


Figure 40: Les différentes actions exécutées par la SGE de la batterie pour respecter les contraintes d'usage de la batterie

Lorsque la batterie est à l'état déchargé, un courant supplémentaire de 4 A est demandé au système multi-PAC pour la recharger. Ce courant de charge est fixé conformément à la règle empirique du courant de charge recommandé entre 10% et 20% de la capacité nominale de la batterie, sachant que la batterie utilisée dans cette étude possède une capacité de 20 Ah (d'après le dimensionnement du système).

Par ailleurs, la batterie se recharge dans d'autres situations notamment pendant les phases de décélération et de freinage grâce à la récupération et la conversion de l'énergie cinétique du véhicule. De plus, la puissance produite par le système multi-PAC pendant les tests de polarisation permet de répondre directement à la demande de la charge et en cas de surplus de puissance, la puissance restante est envoyée à la batterie pour la recharger si elle est à l'état déchargé. Autrement, le surplus de puissance est plutôt dissipé en chaleur pour limiter la hausse du niveau de tension qui proviendrait de l'augmentation du SOC au-delà de 60 %.

Le courant  $I_{dem\_multi-PAC}$  imposé par la SGE de la batterie au système multi-PAC doit être ensuite communiquée à une SGE du système multi-PAC qui aura pour rôle de le répartir entre les PAC en exploitant leur durées de vie restantes et ce, dans le but d'étendre la durée de vie globale

### *Chapitre III*

du système multi-PAC. La section suivante de ce chapitre portera sur la conception d'une telle SGE.

## **5. Stratégie de gestion d'énergie du système multi-PAC basée sur les pronostics de RULs des PAC**

La redondance offerte par la multiplicité des PAC au sein des systèmes multi-PAC représente le facteur essentiel qui permettrait à ces systèmes de relever les défis tels que la courte durée de vie des systèmes mono-PAC, leur plage restreinte de puissances optimales (puissances correspondant à un bon rendement énergétique) ainsi que leur faible tolérance aux pannes. Toutefois, les performances relatives au rendement énergétique, à la durabilité et à la tolérance aux pannes des systèmes multi-PAC dépendent entièrement des SGE qui y sont appliquées. Par exemple, en termes de rendement énergétique, une SGE qui s'assure que toutes les PAC du système multi-PAC fonctionnent dans leur zone de meilleur rendement énergétique lorsqu'elles sont sollicitées, est en quelque sorte en train de mettre à profit l'importante plage de puissances optimales que pourrait présenter le système multi-PAC. De même, en ce qui concerne la durabilité et la tolérance aux pannes, une SGE qui active le minimum de PAC pour répondre à la demande et qui prend en compte les préférences de l'utilisateur quant à l'ordre suivant lequel il souhaiterait faire la maintenance ou le renouvellement des PAC, est bien plus convenable et plus performante que la SGE classique de distribution équitable par exemple. Tout ceci montre que la conception des SGE mérite une attention particulière dans l'étude des systèmes multi-PAC en l'occurrence lorsqu'il s'agit d'améliorer ou du moins de prendre en compte tous ces critères.

Bien que le pronostic de RUL des PAC ne soit pas nécessaire pour étendre la zone de meilleur rendement énergétique d'un système multi-PAC, il représente néanmoins un outil prometteur sur lequel les SGE peuvent se baser pour étendre la durée de vie du système multi-PAC et mettre en valeur leur caractère tolérant aux pannes. Pour cela, dans cette section, une SGE basée sur le pronostic de RUL des PAC sera proposée pour gérer l'énergie du système multi-PAC considéré dans cette étude. Pour mieux décrire ce concept, le synoptique présenté à la Fig.41 fait

### Chapitre III

apparaître les interactions entre les différents modules mis en jeu et dont la majorité ont été détaillés dans le chapitre II de ce manuscrit.

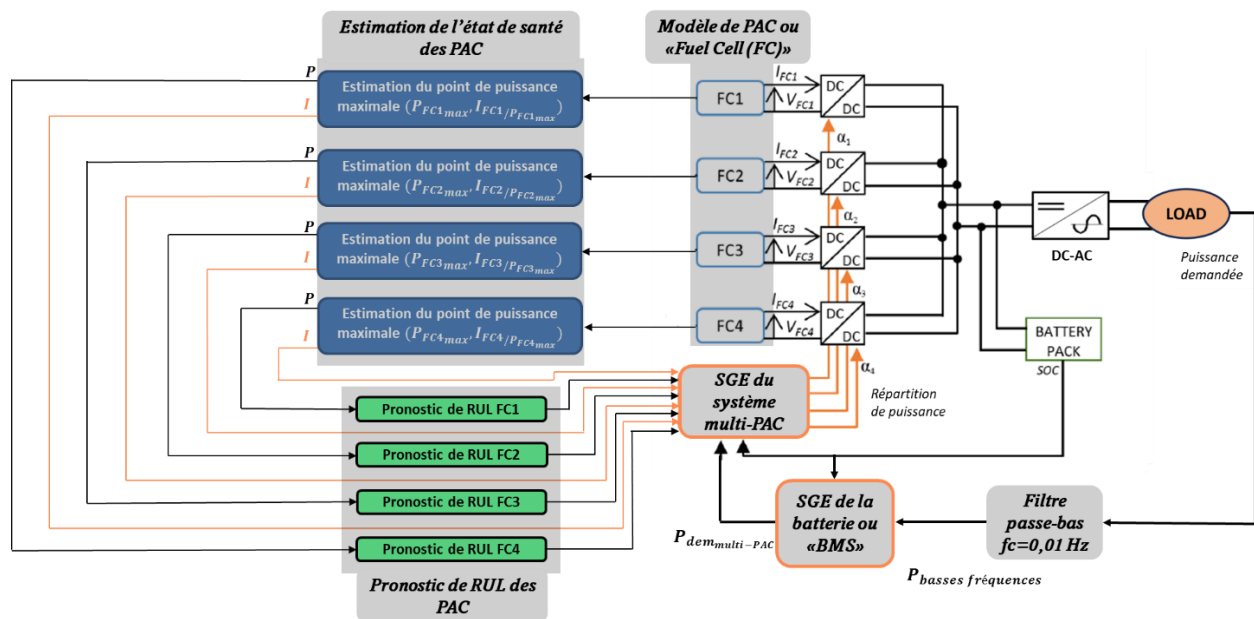


Figure 41: Synoptique descriptif du concept étudié dans cette thèse

La charge électrique « load » représente le moteur électrique du véhicule hybride électrique à hydrogène. Dans ce schéma synoptique, elle simule le profil de mission imposé par le moteur électrique du véhicule sous le cycle de conduite de classe 3 de la norme WLTP. Le système multi-PAC est composé de quatre systèmes PAC car les PAC de 500 W sont privilégiées dans cette étude où un modèle de PAC de 500 W (22V, 36 cellules) construit et validé dans les années antérieures grâce à des essais expérimentaux, a été mis à notre disposition pour cette thèse. Chaque PAC est reliée à un convertisseur DC-DC qui permettra de contrôler le flux de puissance entre la sortie de la PAC et le bus continu. Son rôle sera également d'élever la tension à la sortie du système PAC afin que celle-ci soit compatible avec la tension de bus DC, soit 72 V, la tension admise par le sous-système de traction (tension d'entrée de l'onduleur). La tension de bus sera directement imposée par le module de batterie sans passer par un convertisseur d'où l'importance d'utiliser un module de batterie de 72 V. Cette topologie est adoptée dans cette étude pour limiter le nombre de convertisseurs au sein du système et ainsi réduire son volume, son poids et son coût.

L'énergie du système hybride multi-PAC/ batterie ainsi mis en place et présenté à la Fig.41 est gérée par une SGE à deux étages. Le premier étage consiste à répartir la demande de la charge

### Chapitre III

entre le système multi-PAC et la batterie par la technique classique de filtrage de dynamique, l'idée étant d'attribuer la composante basses fréquences du profil au système multi-PAC et la composante hautes fréquences à la batterie. Un bloc de gestion d'énergie de la batterie ajuste la composante attribuée au système multi-PAC en fonction de l'état de charge (SOC) de la batterie avant qu'elle ne soit communiquée au second étage de la SGE. Ce dernier a pour rôle de gérer l'énergie du système multi-PAC c'est-à-dire de répartir la composante attribuée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC de sorte à étendre le temps de vie du système multi-PAC tout en maintenant sa consommation d' $H_2$  à un niveau raisonnable. L'instant de fin de vie du système multi-PAC est défini comme l'instant à partir duquel il n'arrive plus à répondre à la part de profil qui lui est imposée, lorsque la batterie est à l'état déchargé. Cela signifie que le système multi-PAC peut fonctionner en mode dégradé (si une ou plusieurs PAC s'usent, par exemple) tant que ce mode d'opération ne compromet pas le respect des contraintes d'usage de la batterie.

Pour étendre la durée de vie du système multi-PAC, le second étage de la SGE se servira des résultats de pronostic de durées de vie restantes (RUL) des PAC pour déterminer la manière dont elle devrait solliciter les PAC. Ainsi une catégorie des données d'entrées de cet étage de gestion d'énergie provient du bloc de pronostic qui prédit le RUL des PAC. En effet, un algorithme de pronostic prédit le vieillissement futur des PAC à partir de leurs données de vieillissement historiques. Les données de vieillissement des PAC sont collectées au fur et à mesure que celles-ci se dégradent pendant leur opération. Pour ce faire, leur état de santé est estimé périodiquement en estimant leur puissance maximale. La puissance maximale des PAC constitue en réalité un bon indicateur de santé car contrairement à la tension des PAC qui varie instantanément en fonction du courant qu'elles délivrent, elle n'évolue qu'en fonction des dégradations irréversibles subies par les PAC. Ce qui en fait un indicateur de santé fiable aussi bien dans les applications où la puissance demandée par la charge est constante que dans les applications où le niveau de puissance demandé par la charge peut changer d'un moment à l'autre (applications automobiles).

La seconde catégorie de données d'entrées du bloc de gestion d'énergie du système multi-PAC est composé des courants  $I_{P_{max}}$  correspondant aux puissances maximales des PAC. En effet, la connaissance du point de puissance maximale de chaque PAC est nécessaire pour faire fonctionner les PAC dans leur plage de puissances sécuritaires.

Le dernier module qui apparaît sur le synoptique descriptif du système concerne la modélisation des PAC où un modèle de vieillissement simule la perte de puissance des PAC en fonction de la manière dont elles sont utilisées.

La section présente aborde la conception de la SGE du système multi-PAC c'est-à-dire du second étage de la SGE du système hybride multi-PAC/ batterie. La première étape de ce travail de conception consiste à choisir l'approche sur laquelle cette SGE sera basée.

## **5.1 Choix de l'approche de la SGE du système multi-PAC**

Tel qu'il a été spécifié dans la sous-section 2.4 du chapitre I, le paramétrage des SGE des systèmes multi-PAC peut être basé soit sur une approche déterministe ou soit sur une approche d'optimisation. L'approche déterministe consiste à définir des règles pour gérer l'énergie du système. Étant moins complexe que l'approche d'optimisation, elle présente l'avantage d'être simple à comprendre et à implémenter en ligne mais généralement, elle ne conduit pas à une gestion d'énergie optimale car elle repose uniquement sur une analyse experte du problème par le concepteur. En revanche, à travers la résolution d'un problème d'optimisation, l'approche de l'optimisation mène à des solutions de gestion d'énergie qui minimisent une fonction de coût. Toutefois en raison de la complexité des méthodes de résolution du problème d'optimisation, il est difficile d'analyser, de comprendre et d'interpréter les résultats de simulation. Par ailleurs, cette complexité génère souvent une charge de calcul assez importante qui ne facilite pas l'implémentation en ligne de l'approche d'optimisation dans les applications automobiles.

Dans cette thèse, vu le concept novateur proposé qui consiste à associer le pronostic avec la gestion d'énergie des systèmes multi-PAC dans le but d'améliorer la durabilité de ces systèmes, il est important de pouvoir analyser les résultats et de comprendre le fonctionnement du système multi-PAC considéré dans cette étude. Pour cela, l'approche déterministe sera adoptée dans cette thèse pour proposer une SGE de systèmes multi-PAC basée sur les pronostics de RULs des PAC.



## **5.2 Proposition de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC**

La stratégie proposée dans ce manuscrit pour gérer l'énergie du système multi-PAC repose sur le principe de la SGE du Daisy-Chain qui fait partie des SGE de systèmes multi-PAC basées sur une approche déterministe passées en revues dans la sous-section 2.4.1.1 du chapitre I de ce manuscrit.

### **5.2.1 Principe de la SGE du Daisy-Chain**

La SGE du Daisy-Chain encore appelée stratégie en guirlande consiste à solliciter les PAC du système multi-PAC une par une jusqu'à ce que toute la puissance demandée soit fournie ou jusqu'à ce qu'elles soient toutes utilisées. Lorsqu'une PAC est activée, elle se voit attribuer tout le reste de la puissance demandée et elle peut fonctionner jusqu'à sa puissance maximale s'il le faut pour répondre à cette demande. Malgré cela, si elle n'y arrive pas, la PAC suivante est activée puis utilisée suivant le même principe et ainsi de suite.

Avec un tel principe de fonctionnement, la SGE du Daisy-Chain exploite l'un des atouts des systèmes multi-PAC qui est la possibilité d'utiliser le minimum de PAC pour répondre à un appel de puissance. Cependant, la non-délimitation de la plage de puissance de fonctionnement des PAC accélère leur dégradation et l'invariabilité de l'ordre d'utilisation des PAC entraîne la surexploitation et l'usure rapide de certaines PAC par rapport à d'autres. Il convient d'en déduire que la SGE du Daisy-Chain ne peut être appliquée que dans les situations où l'utilisateur préfère que les PAC s'usent l'une après l'autre. Le cas échéant, le dimensionnement du système multi-PAC doit être réalisé au préalable de manière adéquate pour éviter le problème de sous-dimensionnement en puissance qui pourrait survenir à partir d'un moment donné.

Lorsque des systèmes d'énergies aussi modulaires que les systèmes multi-PAC sont utilisés, l'idéal serait d'avoir la possibilité de choisir l'ordre d'usure des PAC au moyen de la gestion d'énergie. L'usage des pronostics de RULs des PAC représente notamment un bon moyen pour y parvenir car elle permet de mettre à jour l'ordre d'utilisation des PAC conformément aux préférences de l'utilisateur ou du concepteur. Dans ce manuscrit, la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC sera conçue de sorte que toutes les PAC du

Le système multi-PAC s'use presque simultanément. Le but de cette approche est de repousser autant que possible l'instant de début d'opération du système multi-PAC en mode dégradé afin d'étendre sa durée de vie.

#### **5.2.2 Principe de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC**

Pour que les PAC du système multi-PAC s'usent quasiment au même moment, il est nécessaire d'égaliser leur niveau de dégradation tout au long de leur utilisation. Pour ce faire, comme le montre la Fig.42, le classement des PAC sera mis à jour dans un premier temps par ordre décroissant de RULs à chaque fois que les pronostics de RULs seront réalisés. Un autre classement devra être effectué dans un second temps en fonction du premier classement obtenu et des modes d'opération précédents des PAC afin de garantir l'équilibre des niveaux de dégradation des PAC.

Étant donné le principe du Daisy-Chain, ce second classement est nécessaire car l'unique classement des PAC par ordre décroissant de RULs ne suffit pas forcément pour résoudre le problème de surexploitation de certaines PAC par rapport à d'autres. Cela peut être remarqué dans les situations où la puissance demandée au système multi-PAC serait supérieure à 0 W la plupart du temps comme c'est souvent le cas lorsqu'une batterie est intégrée à la chaîne de traction pour filtrer la dynamique du profil de mission du véhicule (cf. Figure 38). En effet, dans ces situations, si les PAC devaient être sollicitées uniquement par ordre décroissant de RULs, la première PAC de la file (la PAC de meilleur RUL) subirait systématiquement moins de cycles de démarrages-arrêts que les PAC suivantes car la puissance demandée au système multi-PAC est toujours attribuée à la première PAC de la file d'après le principe du Daisy-Chain. Par conséquent, au prochain pronostic de RULs, la PAC qui était la première de la file garderait sa position car elle aurait à nouveau le RUL le plus élevé. Les autres PAC seraient ainsi surexploitées par rapport à elle et finiraient par s'user beaucoup plus tôt qu'elle.

Pour éviter cela, après le classement des PAC par ordre décroissant de RULs, la PAC de meilleur RUL qui est la première PAC de la file doit être classée au rang qu'occupait précédemment la PAC dont le RUL est le plus faible. Ensuite cette dernière devra passer au premier rang de la file pour voir son vieillissement être ralenti. Au cas où elle aurait occupé le premier rang dans le classement précédent, toutes les PAC devront être utilisées suivant le même ordre que

### Chapitre III

précédemment. En effet, puisque le premier rang est synonyme d'une plus faible vitesse de dégradation des PAC, si la PAC dont le RUL est le plus faible occupait pourtant le premier rang précédemment, cela signifie qu'elle est toujours dans un état plus dégradé que les autres PAC.

La réalisation du second classement des PAC de cette manière à la suite du classement par ordre décroissant de RULs permettra d'équilibrer les niveaux de dégradation des PAC et ainsi d'éviter que le système multi-PAC se retrouve trop tôt en mode dégradé. Néanmoins, il convient d'en déduire que le second classement ne sera vraiment nécessaire que si les RULs des PAC ne sont pas tous identiques. La Fig.42 illustre un cas de figure dans lequel la PAC dont le RUL est le plus faible aurait occupé le troisième rang dans le classement définitif précédent.

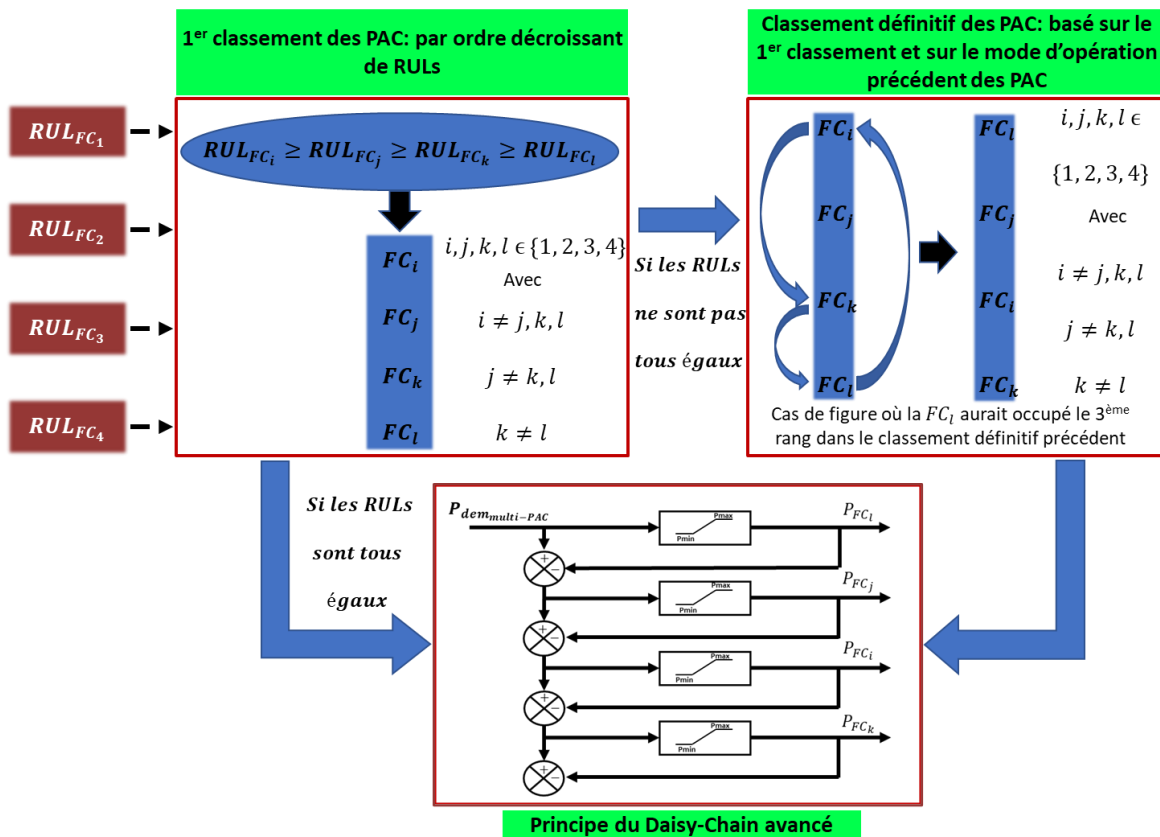


Figure 42: Principe de fonctionnement de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC

Pour limiter la dégradation que pourrait engendrer le fonctionnement des PAC sur toute la plage de puissance  $[0 W; 500 W]$ , lorsqu'une PAC est sollicitée, la SGE lui demande uniquement de fournir une puissance comprise dans la plage  $[P_{min}; P_{max}] = [26\%P_{max}; 94\%P_{max}]$  qui est incluse dans l'intervalle délimité par les puissances sécuritaires limites ( $25\%P_{max}$  et  $95\%P_{max}$ ).

### Chapitre III

Comme il a été précisé dans la sous-section 1.3 du chapitre II, cet intervalle est considéré dans cette étude comme la plage de puissances sécuritaires des PAC. En effet, elle permettrait d'utiliser les PAC dans leur zone de pertes ohmiques et ainsi d'éviter les phénomènes de concentration et d'activation qui accélèrent le vieillissement des PAC.

Plus concrètement, si la puissance demandée restante est comprise dans l'intervalle  $[P_{min}; P_{max}]$ , la PAC la fournit tout simplement; mais si elle est supérieure à  $94\%P_{max}$ , la PAC fonctionne à  $94\%P_{max}$ .

Le principe qui permet de minimiser le nombre de cycles de démarrages-arrêts des PAC dans la SGE proposée, est mis en jeu lorsque la puissance demandée restante est inférieure à  $26\%P_{max}$ . Le cas échéant si la PAC à solliciter est à l'arrêt, il n'est pas nécessaire de l'activer. En revanche, si elle était déjà en utilisation, elle est maintenue à l'état activée et fournit  $26\%P_{max}$  dont une partie irait à la charge et le supplément serait absorbé par la batterie. Finalement, lorsqu'aucune PAC ne peut être sollicitée pour répondre à un niveau de puissance donné, la batterie complète la demande, à condition qu'elle soit chargée. Au cas où elle serait à l'état déchargé, si aucune des trois premières PAC n'est activée, il est demandé à la dernière PAC de fournir  $26\%P_{max}$  et ce, qu'elle soit déjà en utilisation ou pas.

L'algorithme détaillé de la gestion d'énergie du système multi-PAC suivant le principe du Daisy-Chain avancé apparaît en annexe de ce manuscrit. Le chapitre suivant portera sur la validation numérique du concept proposé et étudié dans cette thèse. A partir des simulations qui seront réalisées dans l'environnement Matlab/ Simulink, les performances de la stratégie proposée seront évaluées sur le système multi-PAC considéré dans cette étude et ses résultats seront comparés à ceux des SGE conventionnelles de systèmes multi-PAC.



# **IV-Résultats de simulations :**

## **SGE du Daisy-Chain rotatif**

### **avancé basée sur les**

#### **pronostics de RULs vs SGE**

##### **conventionnelles des systèmes**

###### **multi-PAC**

1. Validation du fonctionnement des modules du concept étudié.....	130
1.1 Simulation des modèles statique et dynamique de la PAC.....	130
1.2 Simulation du modèle de vieillissement des PAC et validation de l’algorithme de pronostic de RUL proposé .....	133
1.2.1 Impact du point de fonctionnement sur le vieillissement en cyclage du modèle de PAC	134
1.2.2 Impact de la fréquence des cycles de démarrages-arrêts sur le vieillissement en cyclage du modèle de PAC.....	141

2. Résultats de simulations du concept : performances du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs vs performances obtenues sous les SGE conventionnelles .....	147
2.1 Résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs .....	149
2.2 Résultats de simulations du système hybride multi-PAC/ batterie sous les SGE conventionnelles.....	159
2.2.1 SGE de distribution équitable.....	159
2.2.2 SGE du Daisy-Chain .....	164
2.3 Résultats de simulations du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations instantanées de puissance maximale .....	169
3. Perspectives.....	175

## *Chapitre IV*

Il a été souligné tout au long de cette thèse que la conception et la validation d'une SGE basée sur les pronostics de RULs des PAC passent d'abord par la mise en place et l'association de plusieurs modules tels que la modélisation des comportements statique et dynamique des PAC, la modélisation du vieillissement des PAC, l'estimation en ligne de l'état de santé des PAC et le pronostic de RUL des PAC. Pour cela, avant d'évaluer les performances de la SGE proposée dans ce manuscrit pour gérer l'énergie du système hybride multi-PAC/ batterie, il est important de valider le fonctionnement de chacun de ces modules.



# 1. Validation du fonctionnement des modules du concept étudié

## 1.1 Simulation des modèles statique et dynamique de la PAC

Le scénario envisagé pour valider le fonctionnement du modèle de PAC utilisé dans cette étude est de relever sa réponse en tension à un appel de courant variable dont le profil apparaît à la Fig.43. Comme il peut y être remarqué, ce profil présente non seulement des phases de niveaux de courant constants mais aussi des changements de niveaux de courant inférieurs vers les niveaux supérieurs et vice versa. En effet, la variation du courant pourrait permettre de voir les limites des modèles statique et dynamique de la PAC afin de remettre en lumière les hypothèses faites dans cette étude par rapport à la modélisation des PAC.

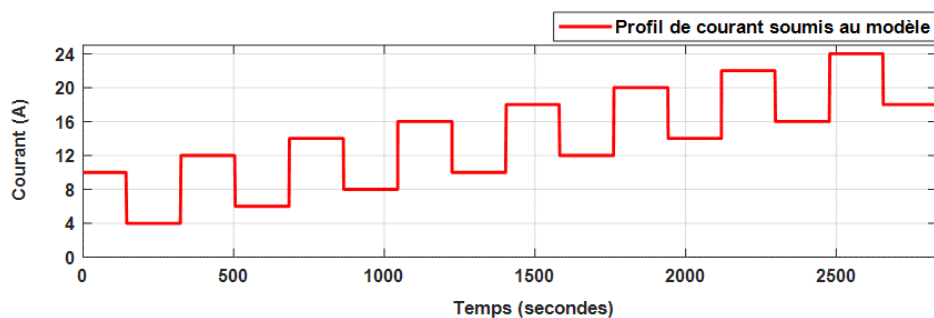


Figure 43: Profil de courant soumis au modèle de PAC

Pour mieux identifier les limites du modèle, sa réponse au profil de courant sera observée relativement à celle d'une PAC réelle de 500 W caractérisée à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH). Toutefois, l'objectif de cette comparaison n'est pas de valider le modèle de PAC vis-à-vis de la pile réelle de 500 W considérée mais plutôt de le valider par rapport aux comportements qui sont généralement observés sur les PEMFC. En effet, bien que la PAC réelle de comparaison et la PAC utilisée pour construire le modèle soient toutes les deux d'une puissance de 500 W, elles ne sont pas identiques pour autant car la première est composée de 25 cellules

## Chapitre IV

tandis que la PAC modélisée était constituée de 36 cellules. Les tests n'ont pu être réalisés directement sur cette dernière car elle n'était plus disponible au sein du laboratoire.

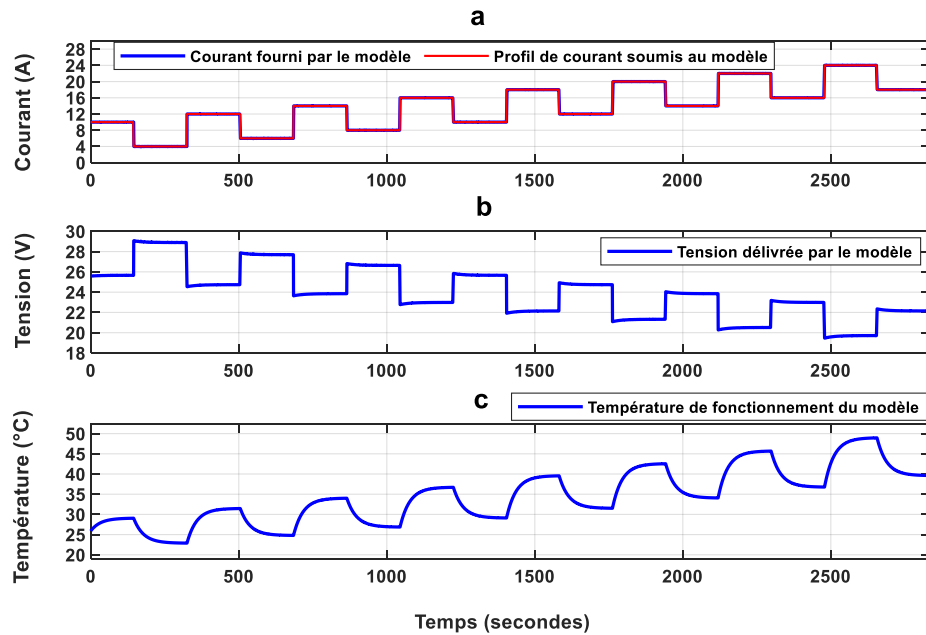


Figure 44: Réponses du modèle de PAC au profil de courant appliqué

D'après la Fig.44a et la Fig.45a, l'application du profil de courant respectivement au modèle et à la PAC réelle de comparaison montre que le modèle est capable de fournir exactement, à l'image de la pile réelle, le courant demandé. Cependant, comme l'indiquent les figures 44b et 45b, du point de vue de la tension, le modèle réagit différemment aux changements de niveaux de courant par rapport à la pile réelle. En réalité, lorsque le courant demandé à une PAC passe d'un niveau inférieur à un niveau supérieur ou vice versa, la température augmente ou diminue respectivement, suivant un régime transitoire, comme il peut être remarqué sur les Fig.44c et Fig.45c. Ce phénomène thermique est amplifié ici car les PAC considérées dans cette étude sont des PAC à cathode ouverte. En effet, il est plus difficile de stabiliser la température au sein des PAC à cathode ouverte où le refroidissement se fait uniquement à partir de l'air que dans les PAC à cathode fermée où le refroidissement s'effectue plus efficacement par changement de phase liquide-vapeur, certes au détriment de la complexité du système [Q. Li et al., 2021]. D'après [Kim et al., 2010][Hou et al., 2010], l'importante variation de température est l'une des raisons qui expliquent les régimes transitoires observés sur la tension de la PAC réelle (Fig.45b) et sur la tension délivrée par le modèle (Fig.44b), après chaque variation du niveau de courant. Toutefois,

## Chapitre IV

l'absence des pics de tension sur la tension de sortie du modèle explique la faible apparition du phénomène de régime transitoire comparée à celui qui est observé sur la tension de la PAC réelle. En effet, comme il peut être remarqué à la Fig.45b, les pics de tension intensifient le régime transitoire de la tension de sortie des PAC.

Dans leurs essais de caractérisation du comportement dynamique des PAC, [Z. Zhang et al., 2010] ont démontré que les pics de tension présents à la suite d'un changement de niveau de courant sont essentiellement dus à un rapport stœchiométrique faible des réactifs en entrée. Selon les auteurs, ce rapport doit être toujours supérieur ou égal à 2 pour éviter les pics de tension à la sortie des PAC. En réalité, il est difficile d'éviter ce phénomène lorsque le courant varie brusquement. Cela peut s'expliquer par le fait que les nouvelles conditions stœchiométriques ne s'établissent pas à la même vitesse que le taux de variation de courant lorsque le courant varie brusquement. Ici, dans cette étude, grâce à l'hybridation du système multi-PAC par une batterie, les changements brusques de courant seront plutôt assurés par la batterie et non les PAC. Il n'est donc pas forcément nécessaire d'intégrer les phénomènes de pics de tension dans le modèle, d'où son comportement plus stable (Fig.47b) que celui de la pile réelle (Fig.48b) vis-à-vis du profil de courant appliqué.

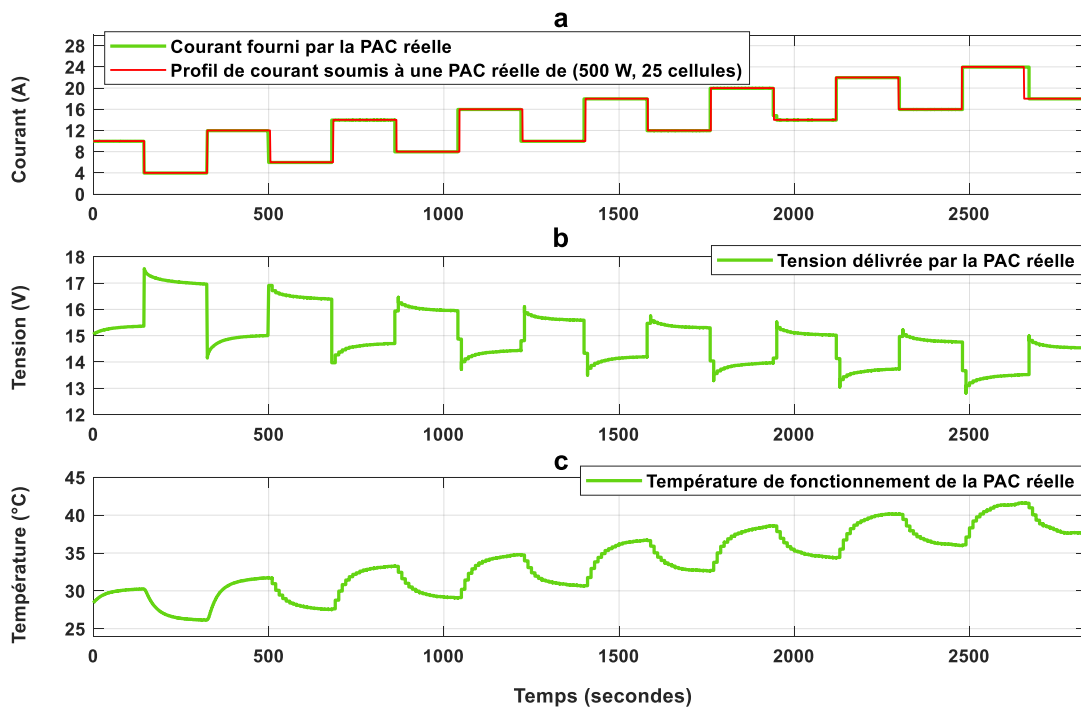


Figure 45: Réponses d'une PAC réelle de (500 W, 25 cellules) au profil de courant soumis au modèle

Les hypothèses qui ont été faites dans la modélisation des comportements statique et dynamique des PAC ont été explicitées et justifiées grâce au scénario considéré dans cette sous-section. Mais surtout, le scénario a permis de montrer que ces hypothèses n'empêchent pas le modèle de refléter les PAC d'un point de vue énergétique. Cependant, pour prouver le concept étudié dans cette thèse, la dégradation des performances énergétiques ou encore le vieillissement des PAC doit également être prise en compte. Pour valider le fonctionnement du modèle de vieillissement établi dans cette étude et intégré au modèle statique et dynamique des PAC, d'autres scénarios seront simulés dans la sous-section suivante.

### **1.2 Simulation du modèle de vieillissement des PAC et validation de l'algorithme de pronostic de RUL proposé**

Dans la sous-section 1.3 du chapitre II, grâce à une revue des travaux de modélisation du vieillissement des PAC, il a été admis que le vieillissement en cyclage des PAC n'est que le résultat d'un ensemble de dégradations provenant de la fréquence des cycles de démarrages-arrêts, du fonctionnement à des points de puissances trop proches de la puissance maximale ou de l'OCV et de la dynamique du profil. Dans cette étude, l'impact de la dynamique du profil sur la dégradation des PAC a été négligé car seule la composante basses fréquences du profil sera imposée au système multi-PAC. Par ailleurs, la dégradation due à l'utilisation des PAC au repos (état « *idle* ») qui consiste à alimenter les PAC en réactifs sans qu'elles ne délivrent aucune puissance ne sera pas considérée car nous supposons qu'une PAC est à l'état activé uniquement si le courant qui lui est demandé est supérieur à 1 A. Autrement, elle est éteinte c'est-à-dire à l'état désactivé et n'est donc pas soumise au vieillissement en cyclage mais uniquement à son vieillissement calendaire.

Sur la base de ces hypothèses, seules les dégradations liées à la fréquence des cycles de démarrages-arrêts et au point de fonctionnement des PAC seront évaluées dans cette étude et considérées comme les causes du vieillissement en cyclage des PAC. Il convient de noter que la dégradation qui provient du point de fonctionnement des PAC sera à chaque fois évaluée en fonction de l'écart relatif entre la puissance de fonctionnement et la puissance sécuritaire limite la plus proche ( $25\%P_{max}$  ou  $95\%P_{max}$ ) conformément aux explications apportées à la sous-section 1.3 du chapitre II de ce manuscrit. Ainsi, pour caractériser le comportement du modèle de

vieillessement uniquement sur l'aspect de la dégradation due au point de fonctionnement, cinq niveaux de puissance quasiment constants seront soumis au modèle de PAC sur une longue durée. Pour chacun de ces niveaux de puissance, les tests de polarisation réguliers seront effectués en ligne pour évaluer l'état de santé du modèle et vérifier la fiabilité de cette méthode d'estimation de l'état de santé des PAC. Par ailleurs, la fidélité de la méthode de pronostic de RUL en usage réel proposée dans cette étude sera relevée à travers un dernier scénario qui prendra simultanément en compte la dégradation liée au point de fonctionnement du modèle et la dégradation provenant de l'augmentation du nombre de cycles de démarrages-arrêts.

### 1.2.1 Impact du point de fonctionnement sur le vieillissement en cyclage du modèle de PAC

Pour vérifier l'impact du point de fonctionnement sur le vieillissement en cyclage du modèle, celui-ci sera soumis à des profils de puissance quasi constants respectivement de  $0W$ ;  $25\%P_{max}$ ;  $60\%P_{max}$ ;  $95\%P_{max}$ ;  $20\%P_{max}$  pendant 50 heures. Le scénario dans lequel la puissance demandée est nulle (scénario N°0) servira de référence car le modèle de PAC serait dans ce cas en arrêt de fonctionnement pendant 50 heures et ne serait donc soumis qu'au vieillissement calendaire. Les scénarios N°1, N°2 et N°3 dans lesquels des puissances de  $25\%P_{max}$ ,  $60\%P_{max}$ , et  $95\%P_{max}$  seront demandées au modèle de PAC, sont proposés pour valider l'aspect sécuritaire de la plage de puissance [ $25\%P_{max}$ ;  $95\%P_{max}$ ]. La dégradation que subirait le modèle s'il fonctionnait en dehors de cette plage de puissance sécuritaire, sera évaluée à travers le scénario N°4 dans lequel il sera demandé au modèle de PAC de fournir 20% de sa puissance maximale.

Comme le montre la Fig.46a, le modèle est soumis à un test de polarisation (Fig.46c) à chaque heure (Fig.46b) conformément à la méthodologie décrite à la sous-section 2.2 du chapitre II de ce manuscrit. À l'issue de chaque test de polarisation, le point de puissance maximale ( $P_{max}$ ,  $I_{P_{max}}$ ) du modèle de PAC peut être connu comme l'indiquent les figures 46d et 46e. Il convient alors de remarquer que la puissance maximale du modèle se dégrade suivant une allure constante et dans le scénario N°0, cette dégradation provient uniquement du vieillissement calendaire car le modèle ne subit aucun phénomène de vieillissement en cyclage. En effet, comme le montrent les figures 47a, 47b et 47c, la dégradation en cyclage que pourraient engendrer les tests de polarisation réguliers et les regains de performances qu'ils pourraient causer ne sont pas pris en

## Chapitre IV

compte car au moment de l'implémentation réelle du concept étudié dans cette thèse, les tests de polarisation ne seront pas réalisés sur une PAC réelle mais plutôt sur un modèle de PAC identifié en ligne. Finalement l'indice d'état de santé de 0,99935 apparaissant sur la Fig.47d après les 50 heures signifie que dans cette étude, le vieillissement calendaire n'est responsable que de la perte de 0,065% des performances maximales du modèle après 50 heures de non-opération.

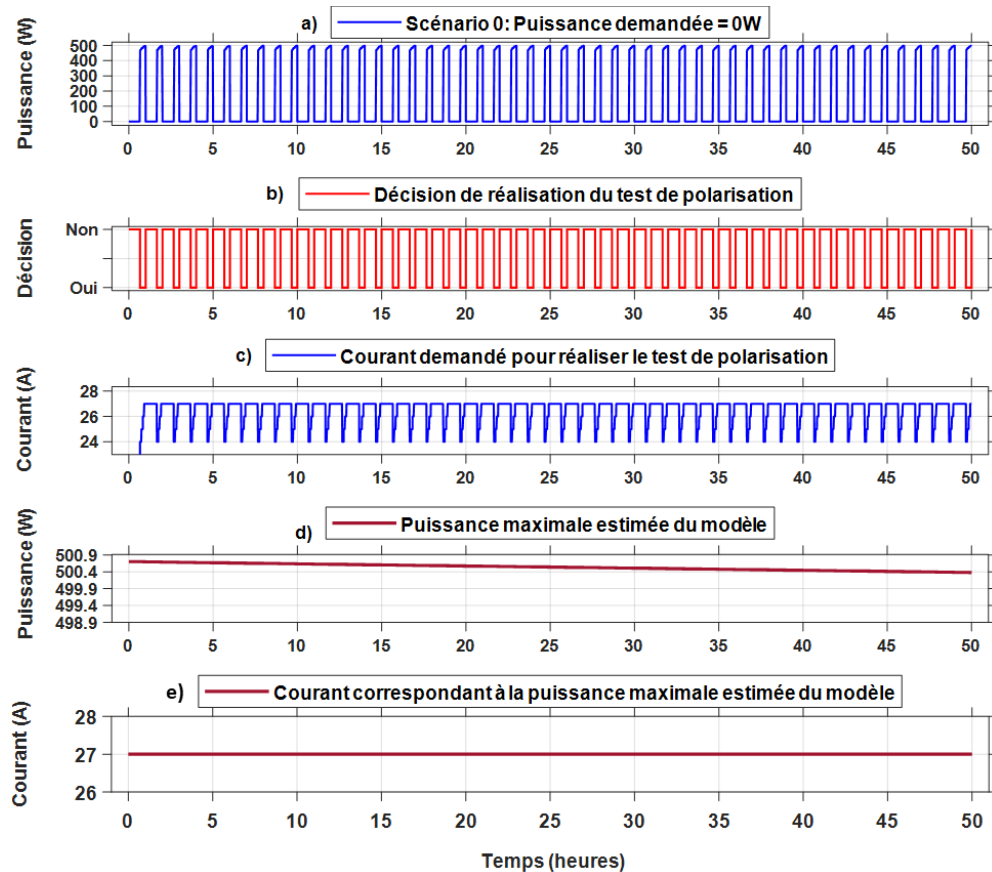


Figure 46: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance constant de 0 W pendant 50 heures

Dans le scénario N°1 où la puissance demandée est cette fois-ci de  $25\%P_{max} \approx 125 W$  (Fig.48a), le vieillissement en cyclage du modèle provenant de la dégradation due à un cycle de démarrage-arrêt (Fig.49a et Fig.49b) et de la dégradation liée au point de fonctionnement (Fig.49c) du modèle, entraîne une perte supplémentaire de 0,086% de performances maximales (d'après la Fig.49d) par rapport au scénario N°0 (vieillessement calendaire). Dans le scénario N°2 et le scénario N°3 où des puissances d'environ  $60\%P_{max} \approx 300 W$  (Fig.50a) et  $95\%P_{max} \approx 475 W$  (Fig.52a) sont respectivement demandées au modèle, ce pourcentage supplémentaire est d'environ 0,088% (Fig.51d et Fig.53d) qui est presque identique à celui obtenu dans scénario N°1 où le modèle

## Chapitre IV

fournissait  $25\%P_{max}$ . Le modèle de PAC s'est dégradé de la même manière en fonctionnant dans l'intervalle  $[25\%P_{max} ; 95\%P_{max}]$  car celui-ci est considéré dans cette étude comme la plage de puissance sécuritaire du modèle. En faisant fonctionner le modèle en dehors de cet intervalle comme c'est par exemple le cas dans le scénario N°4 où il lui est demandé de fournir  $20\%P_{max}$  (Fig.54a), la perte supplémentaire de performances maximales est cette fois-ci d'environ 0,1% (Fig.55d) par rapport au scénario N°0; soit une perte supplémentaire de 0,012% par rapport aux scénarios N°1, N°2 et N°3. En effet, d'après la fonction de dégradation liée au point de fonctionnement du modèle (sous-section 1.3 du chapitre II de ce manuscrit), lorsque le modèle fonctionne en dehors de la plage de puissance sécuritaire, son taux de dégradation augmente avec le carré de l'écart relatif entre la puissance qu'il délivre et la puissance sécuritaire la plus proche. Le tableau 6 récapitule les principales observations de cette phase de caractérisation de comportements du modèle de vieillissement vis-à-vis de l'impact du point de fonctionnement sur l'état de santé des PAC.

Tableau 6 : caractérisation de comportements du modèle de vieillissement vis-à-vis de l'impact du point de fonctionnement sur l'état de santé des PAC

Scénarios	Perte de $P_{max}$	Perte de $P_{max}$ après 50 heures de simulation continue du modèle	Perte supplémentaire de $P_{max}$ observée par rapport au scénario N°0
Scénario N°0 (pas de vieillissement en cyclage) Puissance demandée = 0 W		0,065%	–
Scénario N°1 Puissance demandée = $25\%P_{max}$		$0,151\% \approx 0,153\%$	$0,086\% \approx 0,088\%$
Scénario N°2 Puissance demandée = $60\%P_{max}$		0,153%	0,088%
Scénario N°3 Puissance demandée = $95\%P_{max}$		0,153%	0,088%
Scénario N°4 Puissance demandée = $20\%P_{max}$ (en dehors de la plage sécuritaire)		0,165%	0,1%

## Chapitre IV

Dans les quatre scénarios précédents, le modèle n'a subi qu'un seul cycle de démarrages-arrêts car l'objectif était d'évaluer la dégradation relative au point de fonctionnement. Pour montrer l'impact que peuvent avoir les cycles de démarrages-arrêts fréquents sur le vieillissement du modèle, un dernier scénario sera proposé dans la sous-section suivante.

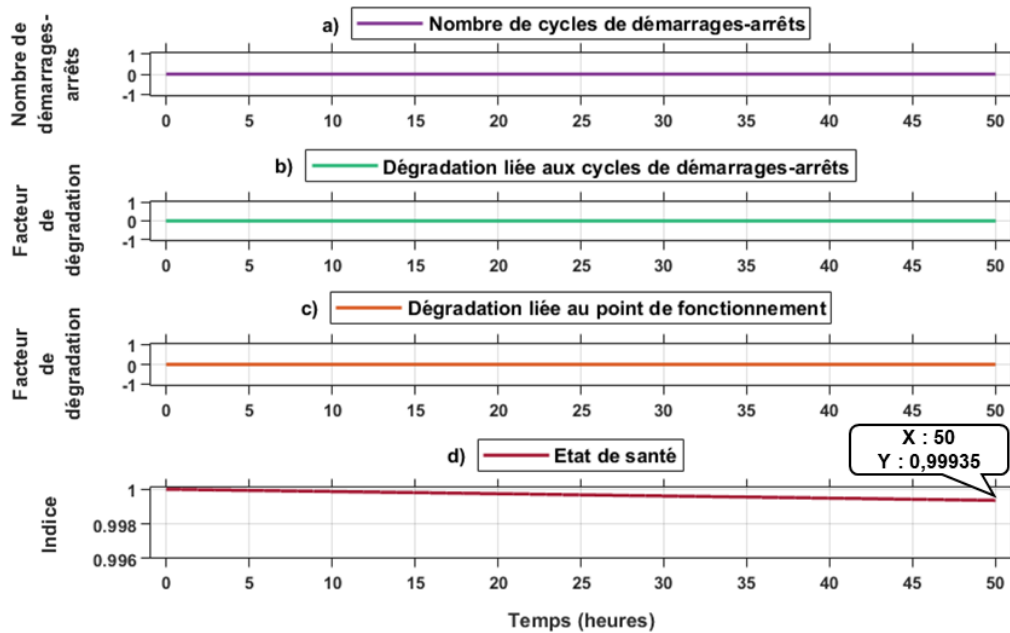


Figure 47: Degradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance constante de 0 W pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global

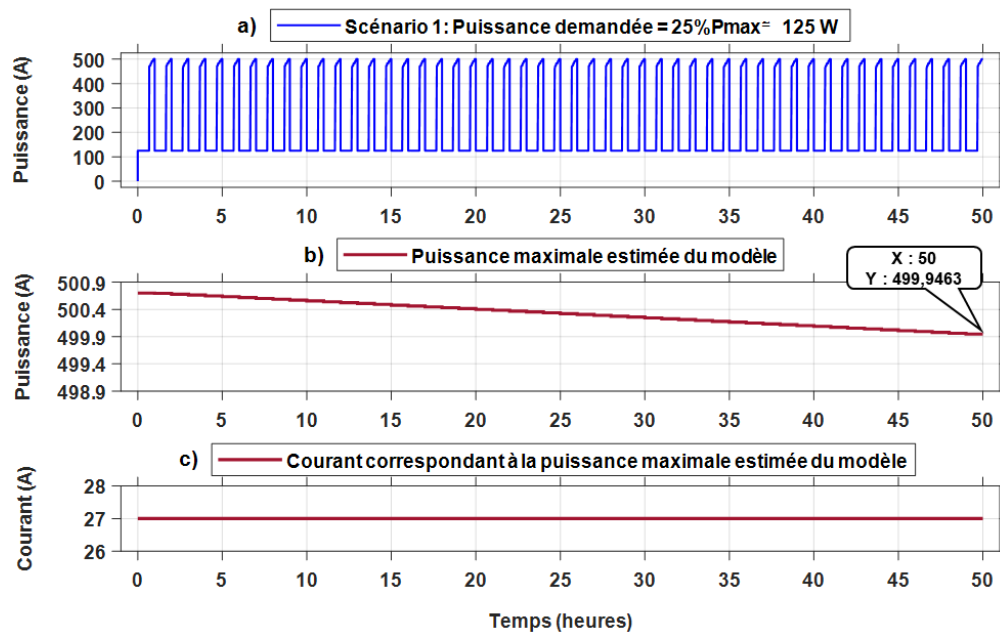


Figure 48: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 25%Pmax pendant 50 heures



## Chapitre IV

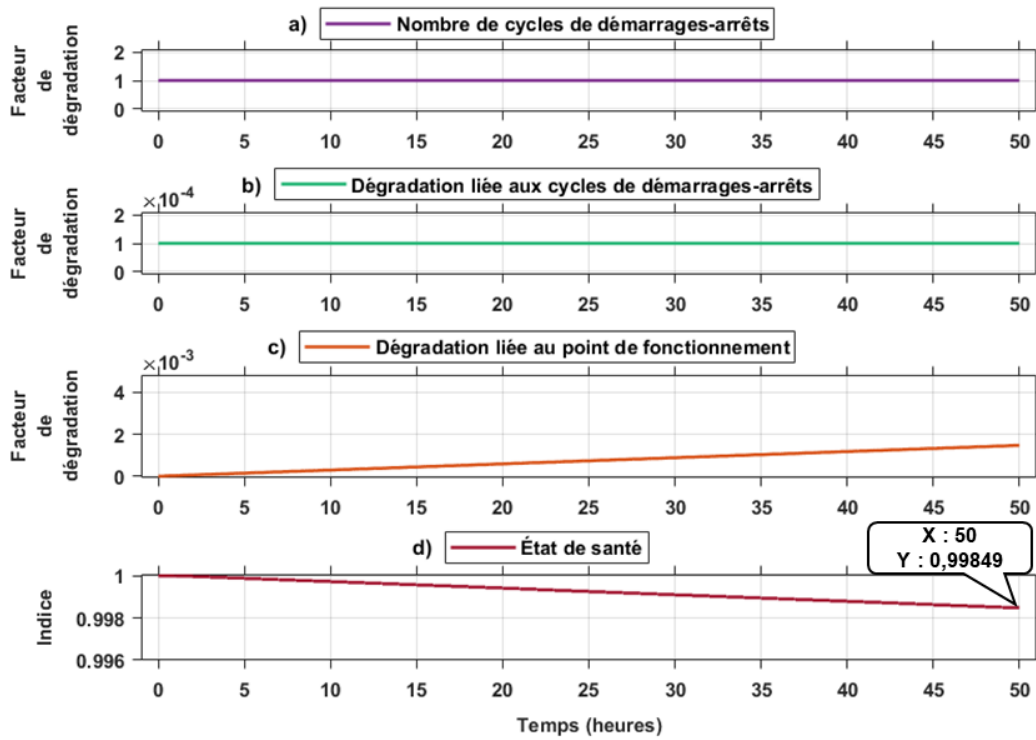


Figure 49: Degradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 25%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global

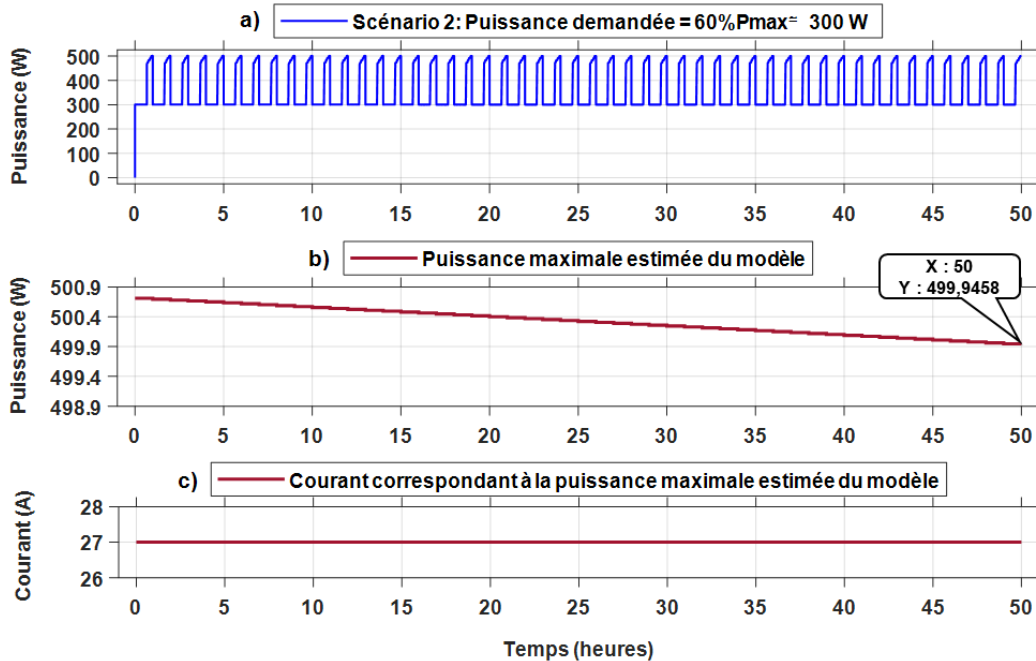


Figure 50: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 60%Pmax pendant 50 heures

## Chapitre IV

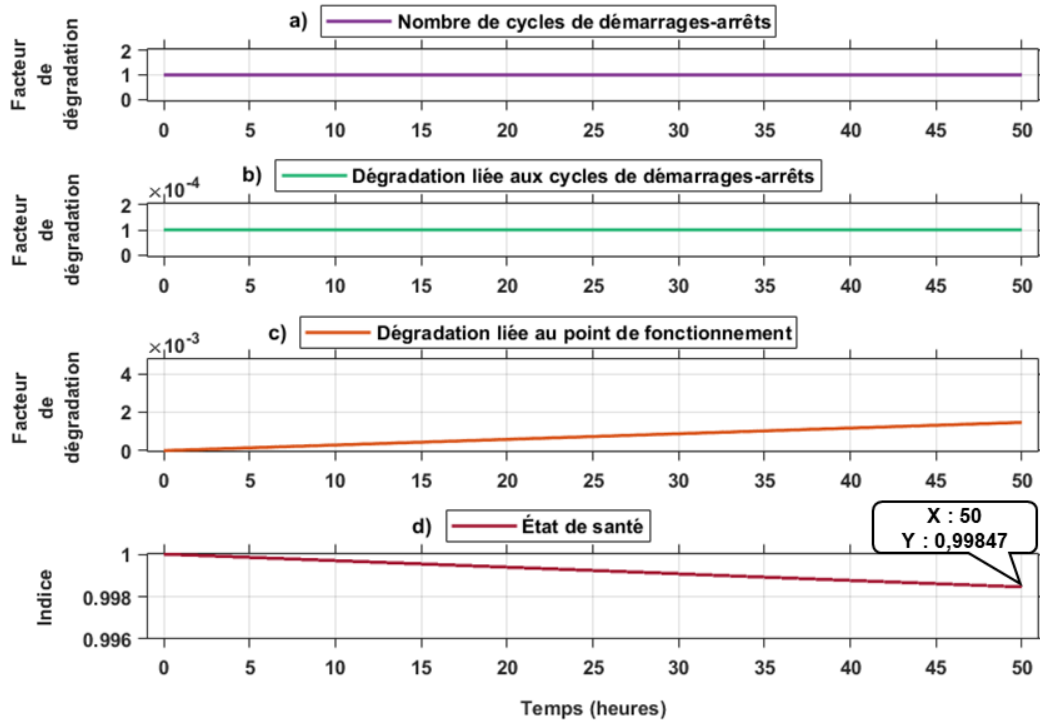


Figure 51: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 60%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global

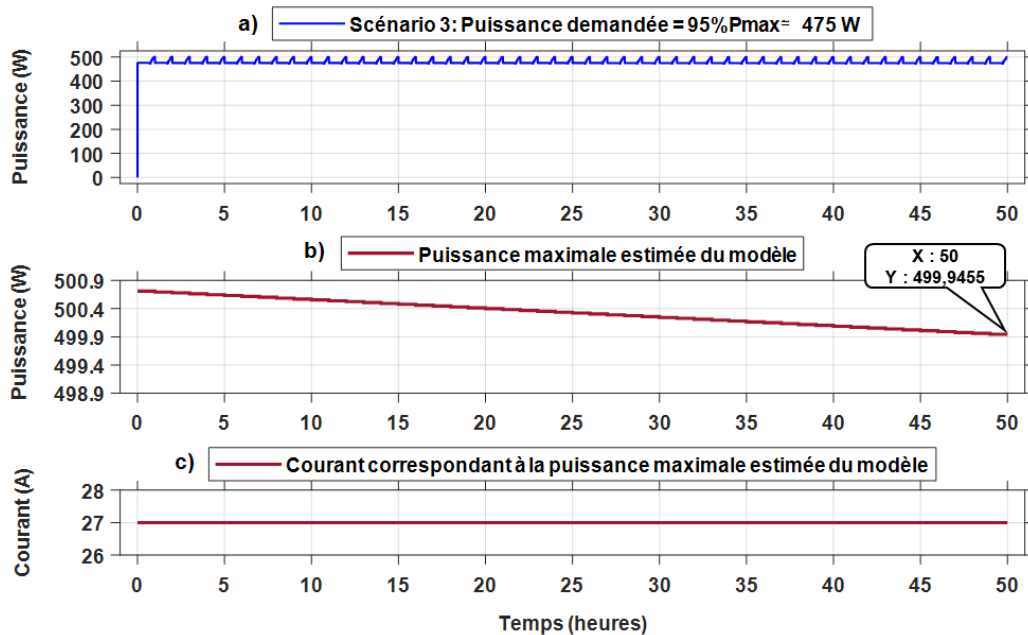


Figure 52: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 95%Pmax pendant 50 heures

## Chapitre IV

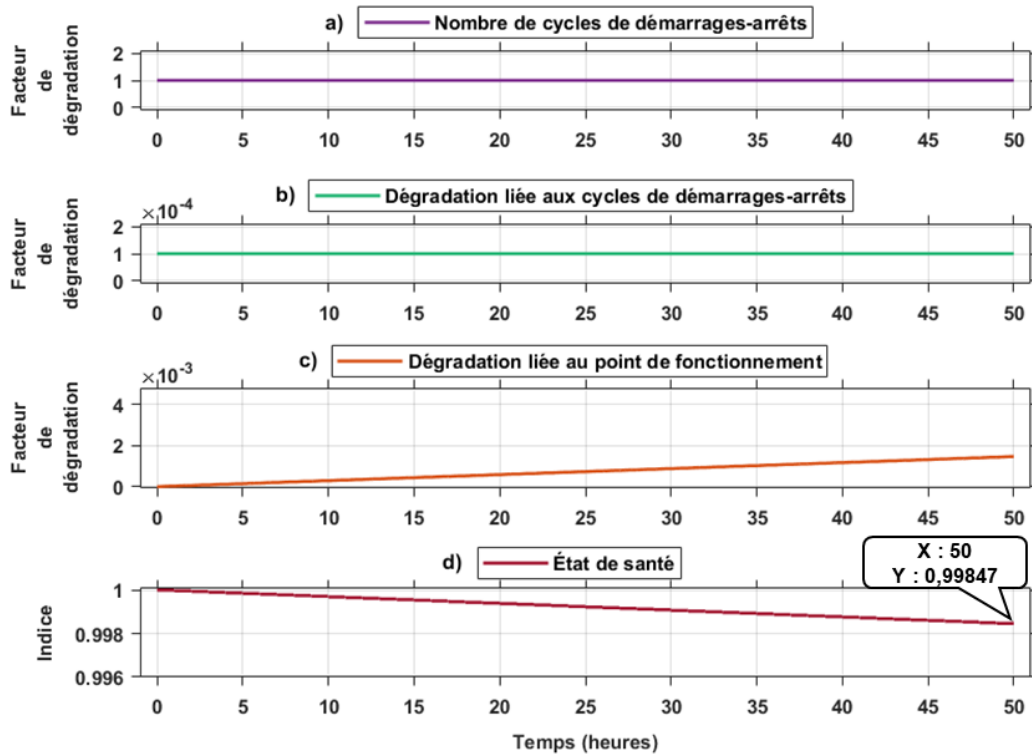


Figure 53: Degradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 95%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global

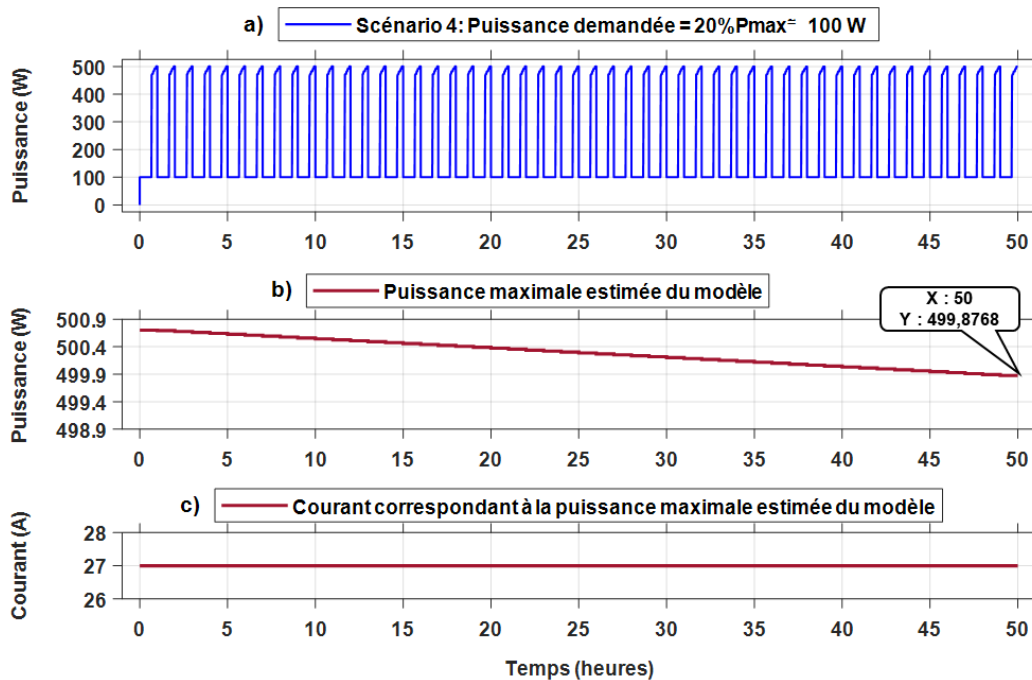


Figure 54: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 20%Pmax pendant 50 heures

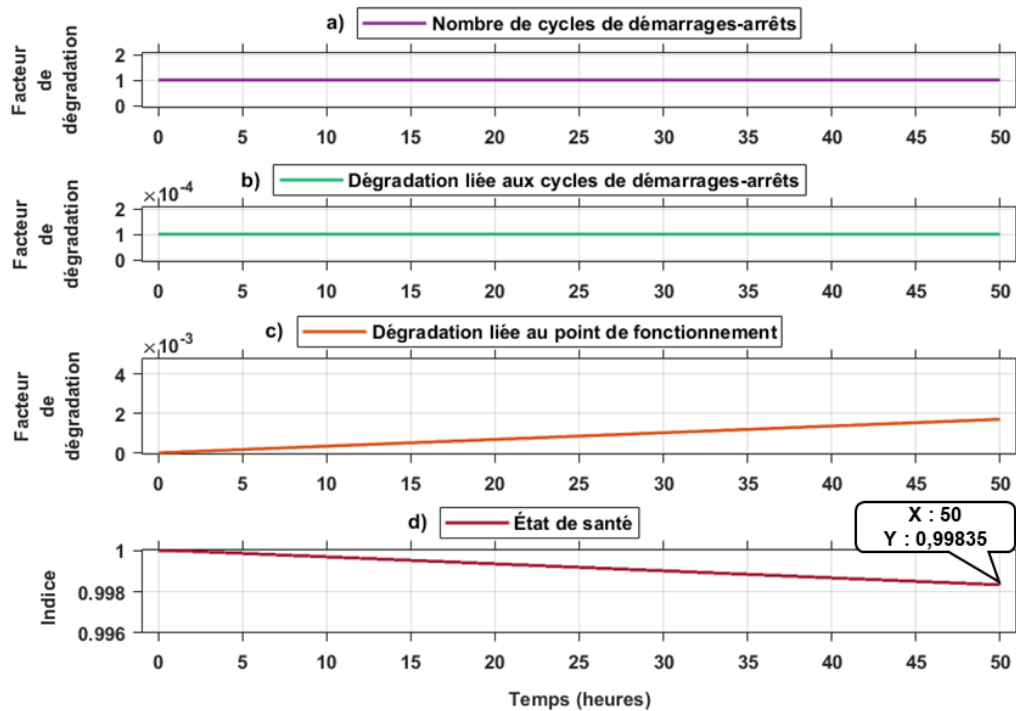


Figure 55: Degradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 20% $P_{max}$  pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global

## 1.2.2 Impact de la fréquence des cycles de démarrages-arrêts sur le vieillissement en cyclage du modèle de PAC

Pour faire apparaître l'effet de l'augmentation du nombre de cycles de démarrages-arrêts sur le vieillissement du modèle, un profil de puissance évoluant en créneau entre 0 W et 20% $P_{max}$  (Fig.56a) lui est soumis. Ce dernier scénario (scénario N°5) oblige ainsi le modèle à démarrer et à s'arrêter fréquemment d'où l'incrémentation du nombre de cycles de démarrages-arrêts à la Fig.57a. Il en résulte une augmentation de la dégradation liée aux cycles de démarrages-arrêts (Fig.57b) qui explique finalement la perte supplémentaire de 1,158% des performances maximales (d'après la Fig.57d), par rapport au scénario N°4 où le modèle fournissait une puissance quasi constante d'environ 20% $P_{max}$ . En effet, la dégradation liée au point de fonctionnement observée à l'issue des 50 heures d'opération du modèle dans le scénario N°4 est deux fois plus importante que celle observée dans ce dernier scénario (Fig.57c). Ceci est due aux nombreuses phases de non-opération du modèle de PAC dans le dernier scénario puisque la puissance demandée au modèle variait suivant un profil en créneau entre 0 W et 20% $P_{max}$ .

## Chapitre IV

Par ailleurs, le fonctionnement de l'algorithme de pronostic de RUL en usage réel proposé dans ce manuscrit peut être validé à travers ce dernier scénario qui fait ressortir l'effet combiné des deux phénomènes de dégradations en cyclage considérés dans cette étude sur le vieillissement du modèle. Pour permettre au réseau de neurones de bien apprendre la tendance de dégradation du modèle, le pronostic de RUL est effectué à une fréquence de cinq heures comme le montre la Fig.57e. En effet, chaque cinq heures, l'évolution temporelle de la puissance maximale du modèle de PAC est prédite (Fig.58) à partir de son historique de dégradation pour permettre l'estimation du RUL.

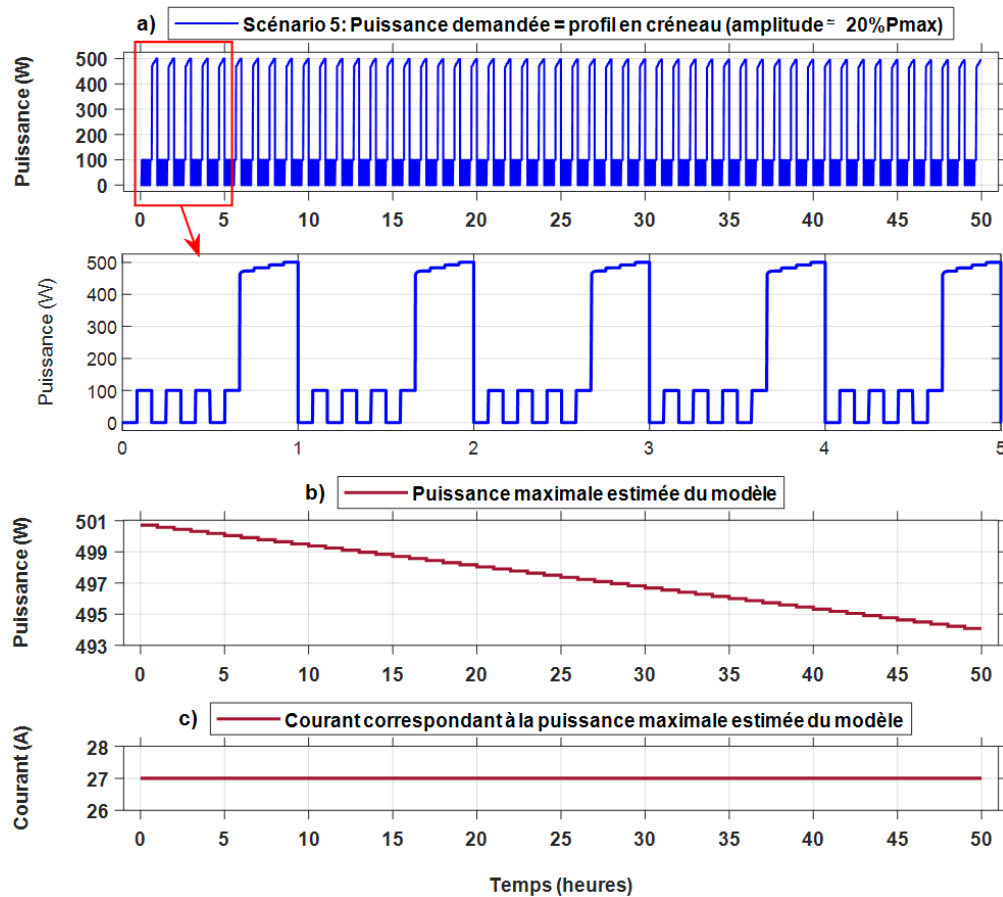


Figure 56: Résultats d'estimation de l'état de santé du modèle soumis à un profil de puissance en créneau d'amplitude 20%Pmax pendant 50 heures

Il convient de remarquer sur la Fig.57e que le RUL du modèle décroît de façon linéaire. Ce qui démontre une certaine cohérence entre les prédictions réalisées par l'algorithme de pronostic. En effet, le modèle étant sollicité de la même manière tout au long de la simulation, il est tout à fait normal qu'il s'y dégrade suivant la même tendance et que la pente suivant laquelle son RUL

## Chapitre IV

diminue soit quasiment constante. Toutefois, il est difficile de vérifier l'exactitude de cette pente tant que la fin de vie effective du modèle n'est pas atteinte. En d'autres termes, pour évaluer la précision de l'algorithme de pronostic, il faudrait que l'indice de l'état de santé instantané du modèle atteigne réellement 0,90; ce qui correspond à une perte de performances maximales de 10% par rapport aux performances maximales initiales. Ce critère de fin de vie des PAC est défini par convention dans la littérature pour que les travaux de recherche qui y sont proposés et qui s'inscrivent dans une perspective d'amélioration de la durabilité des PAC, soient évalués sur la même base.

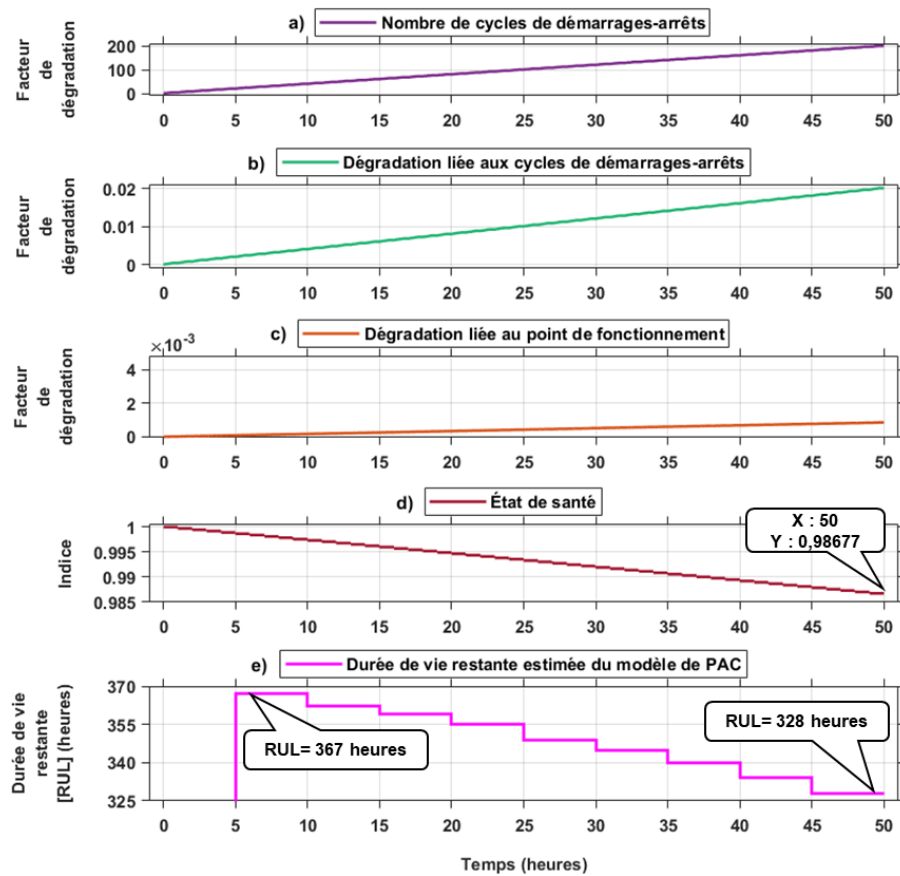


Figure 57: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance en créneau d'amplitude 20%Pmax pendant 50 heures; l'évolution temporelle de son état de santé global et de sa durée de vie restante (RUL)

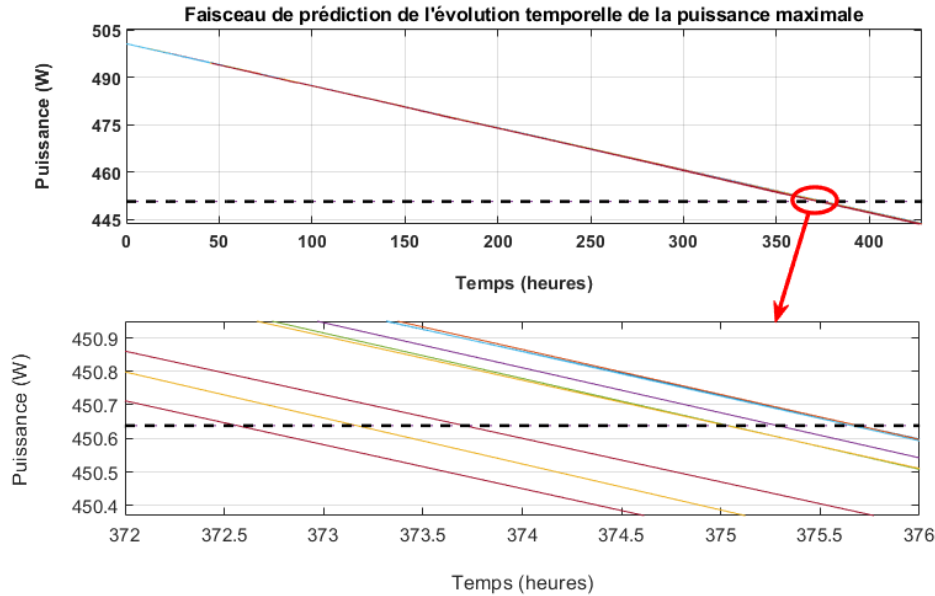


Figure 58: Faisceau de prédictions de l'évolution temporelle de la puissance maximale du modèle quand il est soumis au profil de puissance en créneau d'amplitude 20%Pmax pendant 50 heures

D'après [J. Shi et al., 2011], le manque de méthodes d'évaluation de la précision des algorithmes de pronostic de RUL dans la littérature est dû au fait qu'il est difficile de quantifier la précision de ces algorithmes tant que le seuil de fin de vie réel n'est pas atteint. Pour tenter de résoudre cette problématique, ces auteurs ont proposé une alternative en développant une méthode d'évaluation des performances de prédiction de RUL basée sur la pseudo durée de vie. Celle-ci a été élaborée pour comparer, en termes de fidélité, deux modèles de pronostic de RUL d'une batterie pour avions, utilisée souvent comme système d'alimentation au sol ou de secours ou encore pour améliorer la stabilité du bus continu et éliminer les défauts.

La pseudo durée de vie d'un système peut être vue comme sa durée de vie estimée c'est-à-dire la somme de la durée de vie restante estimée (le RUL) et du temps de vie écoulé.

$$Pseudo\ durée\ de\ vie = durée\ de\ vie\ restante\ estimée + temps\ de\ vie\ écoulé \quad (29)$$

Cela signifie qu'à chaque valeur de RUL prédite correspond une valeur de la pseudo durée de vie. Par exemple, dans le scénario N°5 étudié, d'après la Fig.57e, la pseudo durée de vie à l'instant  $t = 5 h$  est égale à 372 heures (367 heures + 5 heures), la pseudo durée de vie à l'instant  $t = 10 h$  est égale à 372 heures (362 heures + 10 heures), ..., la pseudo durée de vie à l'instant  $t = 45 h$  est égale à 373 heures (328 heures + 45 heures).

## Chapitre IV

La série de pseudo durées de vie obtenue peut être caractérisée par sa moyenne appelée la pseudo durée de vie moyenne et par son étendue c'est-à-dire l'écart entre la pseudo durée de vie maximale  $PDV_{max}$  et la pseudo durée de vie minimale  $PDV_{min}$ . L'étendue de la série de pseudo durées de vie et la pseudo durée de vie moyenne seront respectivement notées  $PDV_{étendue}$  et  $PDV_{moyenne}$ , dans ce manuscrit. Le rapport entre  $PDV_{étendue}$  et  $PDV_{moyenne}$  représente le coefficient de fluctuation de la pseudo durée de vie qui sera noté  $cf_{PDV}$  et qui désigne l'indicateur de fidélité de la méthode de pronostic de RUL. Selon les auteurs, plus ce coefficient est faible, plus la fidélité de la méthode de pronostic de RUL est bonne sachant que la fidélité mesure le degré de cohérence entre les prédictions de RUL réalisées avec la méthode de pronostic au fur et à mesure que la simulation progresse.

$$cf_{PDV} = \frac{PDV_{étendue}}{PDV_{moyenne}} \quad (30)$$

Dans l'étude réalisée par les auteurs, un  $cf_{PDV}$  de 0,039 et de 0,334 ont été respectivement obtenus avec le premier modèle et le second modèle de pronostic. Pour permettre de faire le lien entre ces ordres de grandeur et la qualité de prédiction des deux modèles, les figures 59a et 59b font apparaître la superposition de l'évolution du RUL prédit à celle du RUL réel pour chacun des modèles de pronostic. L'évolution du RUL réel a été déduite de l'instant de fin de vie réel de la batterie. L'analyse de ces figures démontre qu'un faible  $cf_{PDV}$  est effectivement synonyme d'une bonne qualité de prédiction.

D'après le tableau 7 qui présente les trois caractéristiques ( $PDV_{étendue}$ ,  $PDV_{moyenne}$ ,  $cf_{PDV}$ ) de la série de pseudo durées de vie obtenue dans le scénario N°5, le  $cf_{PDV}$  est égal à 0,008 qui est cinq fois plus faible que 0,039 le  $cf_{PDV}$  obtenu par les auteurs avec le modèle de pronostic le plus précis dans leurs travaux. Sur cette base, la méthode de pronostic de RUL en usage réel proposée dans ce manuscrit peut être considérée comme étant suffisamment fiable pour être associée à une stratégie de gestion d'énergie de systèmes multi-PAC.



## Chapitre IV

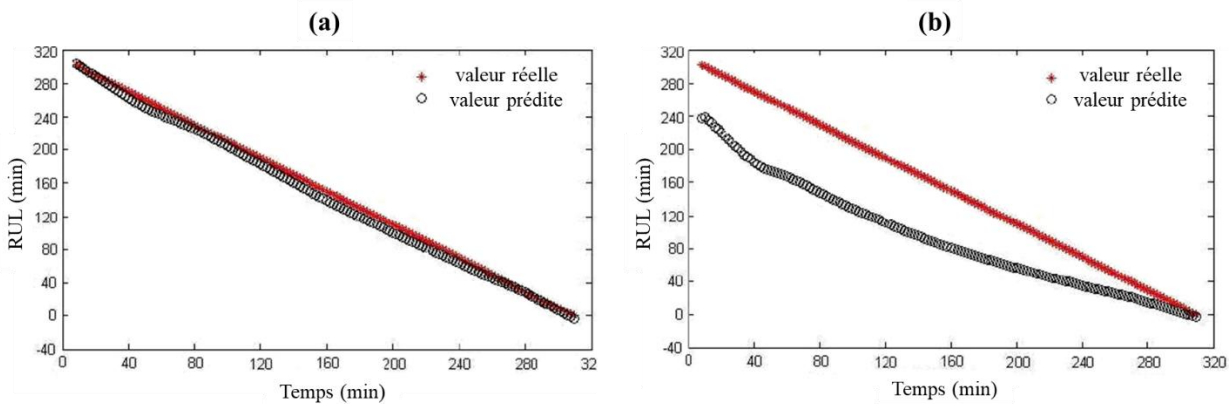


Figure 59: (a) superposition de l'évolution du RUL prédit par le modèle de pronostic le plus précis (le premier modèle) à celle du RUL réel; (b) superposition de l'évolution du RUL prédit par le second modèle à celle du RUL réel / [J. Shi et al., 2011]

Tableau 7: la série de pseudo durées de vie correspondant à la série de prédictions de RULs et les trois grandeurs caractéristiques de la série de pseudo durées de vie

Instant de prédiction	5h	10h	15h	20h	25h	30h	35h	40h	45h
RUL [heures]	367	362	359	355	349	345	340	334	328
Pseudo durée de vie [heures]	372	372	374	375	374	375	375	374	373
$PDV_{étendue}$ [heures]	3								
$PDV_{moyenne}$	373,78								
$cf_{PDV}$	0,008								

## **2. Résultats de simulations du concept : performances du système hybride multi- PAC/ batterie sous la SGE du Daisy- Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs vs performances obtenues sous les SGE conventionnelles**

Dans cette section, il sera question de présenter, d'analyser et d'interpréter les résultats de simulation du système hybride multi-PAC/batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC, proposée dans ce manuscrit. Ces résultats seront comparés à ceux des SGE conventionnelles de systèmes multi-PAC telles que les SGE de distribution équitable et du Daisy-Chain. Finalement, les performances de la SGE proposée seront également comparées à celles de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations instantanées de puissance maximale ( $P_{max}$ ) des PAC, qui peut être vue dans cette thèse comme la SGE de référence. En effet, le principe du Daisy-Chain rotatif avancé proposé dans ce manuscrit peut aussi bien être appliqué dans le cadre de l'approche de gestion d'énergie basée sur les estimations instantanées de l'état de santé des PAC que dans le cadre de l'approche de gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs des PAC. Plus concrètement, la SGE proposée devrait aboutir aux mêmes résultats (durée de vie et consommation d' $H_2$  du système multi-PAC) que la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations instantanées de  $P_{max}$  car la seule

## Chapitre IV

différence entre ces deux SGE est que, dans la première, l'ordre d'utilisation des PAC serait mis à jour en fonction des pronostics de RULs tandis que dans la seconde SGE, il serait mis à jour en fonction des  $P_{max}$  estimées. L'objectif de cette comparaison sera donc de vérifier la fiabilité de l'utilisation des pronostics de RULs des PAC dans la gestion d'énergie par rapport à l'utilisation des estimations instantanées de  $P_{max}$ . Cela permettrait de vérifier si le concept de la gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs est au moins à la hauteur du concept de la gestion d'énergie basée sur les estimations instantanées d'un indicateur de santé. Le cas échéant, la conception des SGE capables de mettre en avant les avantages de la combinaison « pronostic de RUL - gestion d'énergie » par rapport à la combinaison « estimation d'indicateur de santé – gestion d'énergie », peut faire l'objet des travaux de recherches futurs en lien avec cette thèse.

Le profil de mission réel présenté à la Figure 36 au chapitre III de ce manuscrit sera répété sur toute la durée des simulations. Il convient de noter que la longueur de chaque simulation du système sous une SGE donnée représentera la durée de vie du système multi-PAC sous cette SGE. En effet, l'instant à partir duquel le système multi-PAC ne sera plus capable de fournir la composante basses fréquences du profil de mission dans une période où la batterie est à l'état déchargé, sera considéré comme l'instant de fin de vie du système multi-PAC. Cela signifie qu'en cas d'usure d'une ou de plusieurs PAC, le système multi-PAC pourrait continuer de fonctionner en mode dégradé, mais à condition que la batterie soit à l'état chargé afin d'être en mesure de compléter éventuellement la demande. Autrement, les contraintes d'usage de la batterie risquent de ne pas être respectées.

Pour toute simulation du système sous une SGE, la puissance demandée au système multi-PAC ( $P_{dem_{multi-PAC}}$ ) sera équitablement répartie entre les PAC pendant les cinq premières heures de fonctionnement. Cela permettra de collecter les données d'apprentissage de l'algorithme de pronostic pour la première prédiction de  $P_{max}$  de chaque PAC et l'estimation du RUL de chaque PAC pour la première fois.

## 2.1 Résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs

Le rôle de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs est de répartir entre les PAC, la puissance qui est réellement demandée au système multi-PAC ( $P_{dem\_multi-PAC}$ ) et qui est imposée par la SGE de la batterie. La Fig.60 fait apparaître cette puissance sur toute la durée de vie du système sous la SGE proposée. Comme il peut être remarqué sur cette figure, lorsque la batterie est à l'état chargé (Fig.61),  $P_{dem\_multi-PAC}$  n'est que la composante basses fréquences du profil de mission (cf. Figure 38). En raison des 4 A fixés comme courant de charge (à 2C) de la batterie lorsque celle-ci est déchargée, une puissance plus importante est demandée au système multi-PAC d'où les phases où  $P_{dem\_multi-PAC}$  est comprise entre 490 W et 1878 W au lieu de 222 W et 1615 W, sur la Fig.60.

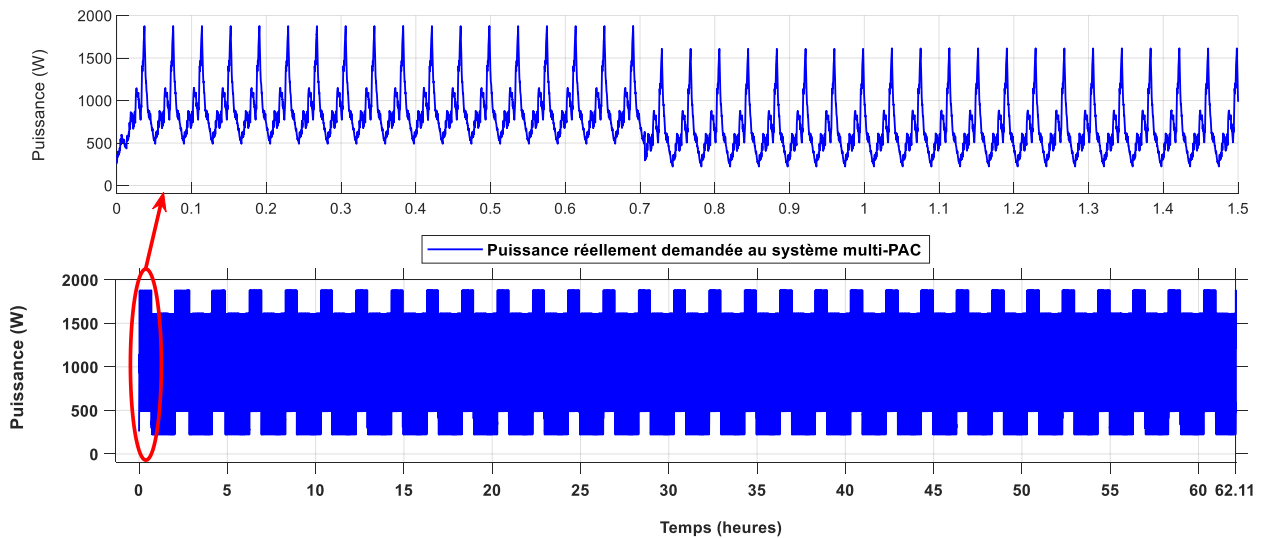


Figure 60: Puissance réellement demandée au système multi-PAC, imposée par la SGE de la batterie à partir de la composante basses fréquences du profil de mission / SGE proposée

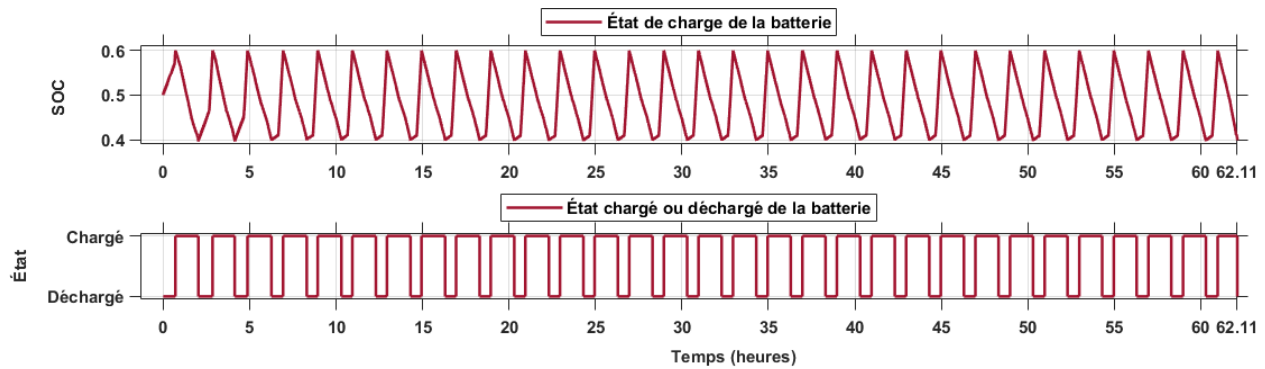


Figure 61: État de charge de la batterie / SGE proposée

La répartition de  $P_{dem_{multi-PAC}}$  entre les quatre systèmes PAC par la SGE proposée apparaît à la Fig.62. Pour mieux analyser le fonctionnement du système vis-à-vis du principe de la SGE proposée, la Fig.63 sera plus utilisée car elle fait plutôt apparaître les puissances de sortie des PAC avec lesquelles il pourrait être plus simple d'identifier les événements qui sont à l'origine de l'activation ou de la désactivation des PAC. En effet, la plage de puissance sécuritaire dans laquelle les PAC sont utilisables est définie relativement à la puissance maximale des PAC et non à celle des systèmes PAC. Sur ce, l'analyse de la Fig.63 montre que :

- De 0 h à 5 h, toutes les PAC fonctionnaient de manière identique car  $P_{dem_{multi-PAC}}$  était répartie équitablement entre les PAC, le temps de collecter les premières données d'apprentissage de l'algorithme de pronostic et réaliser la première prédiction de RUL. Le fonctionnement identique des PAC de 0 h à 5 h explique d'ailleurs l'obtention d'un même RUL égal à 185 heures à l'instant  $t = 5 h$  pour toutes les PAC ( $RUL(t = 5 h) = 185 heures$ ), d'après la Fig.64. Il est important de bien comprendre le sens de l'expression mathématique  $RUL(t = A) = B heures$  pour une meilleure appréhension de la notion du pronostic de RUL dans cette thèse. En effet, cette expression signifie que si les PAC devaient être prochainement utilisées d'une façon similaire à la façon dont elles l'ont été depuis leur mise en service jusqu'à l'instant présent  $t = A$ , elles atteindraient leur fin de vie dans  $B$  heures. Ainsi, il convient d'en déduire que, dépendamment de la manière dont l'algorithme de pronostic interprète l'historique de dégradation d'une PAC, le RUL de la PAC peut augmenter, diminuer ou même rester constant entre deux séances de pronostic consécutives.

## Chapitre IV

- De 5 h à 10 h, les PAC ont été sollicitées suivant l'ordre par défaut c'est-à-dire PAC N°1, PAC N°2, PAC N°3, PAC N°4 car à  $t = 5 h$  les RULs des PAC étaient tous égaux et le second classement n'était donc pas nécessaire. L'analyse détaillée de la répartition de  $P_{dem_{multi-PAC}}$  entre les quatre PAC par le principe du Daisy-Chain avancé de la SGE proposée, sur l'intervalle  $[5 h ; 6,264 h]$  où la batterie est à l'état chargé (Fig.61) et sur l'intervalle  $[6,264 h ; 6,934 h]$  où la batterie est à l'état déchargé apparait en annexe de ce manuscrit.
- De 10 h à 15 h, les PAC ont été sollicitées suivant l'ordre PAC N°4, PAC N°3, PAC N°2 et PAC N°1. En effet, en raison des modes d'opération des PAC de 5 h à 10 h, la PAC N°4 avait subi plus de dégradation que la PAC N°2 qui elle-même s'était plus dégradée que la PAC N°3 (d'après la Fig.65). La PAC N°1 qui était la première PAC de la file de 5 h à 10 h, possédait le meilleur RUL à  $t = 10 h$  (Fig.64) car sur cet intervalle, elle n'était jamais désactivée (Fig.63). Cela est dû au fait que la puissance demandée au système multi-PAC est toujours attribuée à la première PAC de la file sous le principe du Daisy-Chain avancé, sachant qu'ici elle est toujours supérieure à 0W en raison du filtrage de la dynamique du profil. Par conséquent à  $t = 10 h$ , le classement des PAC par ordre décroissant de RUL était PAC N°1, PAC N°3, PAC N°2 et PAC N°4. Étant donné que les PAC n'avaient pas le même RUL, le second classement devait être réalisé conformément à la procédure proposée dans la sous-section 5.2.2 du chapitre III. La PAC N°4 qui avait le RUL le plus faible devait passer à la première position puis la PAC N°1 qui avait le meilleur RUL devait quant à elle passer au rang qu'occupait la PAC N°4 de 5 h à 10 h, c'est-à-dire la quatrième position. Ainsi le classement définitif suivant lequel les PAC devaient être sollicitées de 10 h à 15 h se présente comme suit : PAC N°4, PAC N°3, PAC N°2 et PAC N°1.
- De 15 h à 20 h, le classement définitif suivant lequel les PAC furent sollicitées était PAC N°1, PAC N°4, PAC N°2 et PAC N°3 car le classement obtenu à  $t = 15 h$  par ordre décroissant de RULs était PAC N°3, PAC N°4, PAC N°2 et PAC N°1. En effet, la première position qu'occupait la PAC N°4 de 10 h à 15 h lui a permis de voir son vieillissement être ralenti comme l'indique la Fig.65. L'algorithme de pronostic de RUL avait donc bien pris connaissance du changement de tendance de la dégradation de la PAC N°4 car celle-ci

## Chapitre IV

n'était plus la dernière de la file mais la deuxième. Toutefois, en raison de la faible quantité de données d'apprentissage disponibles à  $t = 15 h$ , l'importante variation de pente observée à partir de  $t = 10 h$  dans son historique de dégradation n'a pu être précisément capturée par l'algorithme de pronostic. Ceci explique pourquoi le RUL de la PAC N°3 était plus élevé que celui de la PAC N°4 à  $t = 15 h$  car en principe, la PAC N°4 devrait avoir le meilleur RUL à cet instant (d'après la Fig.65). Mais ce biais fut corrigé à la séance de pronostic suivante (à  $t = 20 h$ ) grâce aux nouveaux échantillons de  $P_{max}$  qui se seraient ajoutés à la série temporelle de  $t = 15 h$  à  $t = 20 h$ .

- De 20 h à 25 h, les PAC furent définitivement sollicitées suivant le classement PAC N°3, PAC N°4, PAC N°2 et PAC N°1. En effet, le classement obtenu à  $t = 20 h$  par ordre décroissant de RULs était PAC N°1, PAC N°4, PAC N°2 et PAC N°3. Comme il peut être remarqué, le biais obtenu dans le classement des PAC à  $t = 15 h$  n'était plus présent à  $t = 20 h$  car le classement obtenu par ordre décroissant de RULs à  $t = 20 h$  était tout à fait cohérent avec l'état de vieillissement des différentes PAC à cet instant (d'après la Fig.65).
- De 25 h à 30 h, l'ordre d'utilisation des PAC était PAC N°1, PAC N°4, PAC N°2 et PAC N°3 car leur classement par ordre décroissant de RULs était PAC N°3, PAC N°4, PAC N°2 et PAC N°1 à  $t = 25 h$ . Il convient de remarquer encore une fois la cohérence entre l'état de vieillissement des PAC à cet instant et le classement par ordre décroissant de RULs qui y est obtenu.
- À  $t = 30 h; t = 35 h; t = 40 h; \dots; t = 65 h$ , comme le montre le Tableau 11 en annexe, l'ordre de sollicitation des PAC était mis à jour en fonction du classement par ordre décroissant de RULs et de leur mode d'opération depuis la dernière mise à jour de l'ordonnancement. À l'issue de chaque mise à jour du classement des PAC, l'énergie du système multi-PAC était gérée suivant le principe du Daisy-Chain avancé proposé dans ce manuscrit jusqu'à ce que le système multi-PAC atteigne sa fin de vie à l'instant  $t = 62,11 h$  (Fig.63). En effet, à partir de cet instant, le système multi-PAC n'était plus capable de fournir la composante basses fréquences du profil de mission à cause de l'usure de la PAC N°1. En réalité la PAC N°1 a été déclarée en fin de vie à l'instant  $t = 61 h$  comme cela

## Chapitre IV

peut être remarqué à la Fig.63. Cependant, à  $t = 61 h$ , la batterie était à l'état chargé (Fig.61) donc le système multi-PAC fonctionnait en mode dégradé à partir de cet instant. Ce n'est qu'à l'instant  $t = 62,11 h$  que la batterie se retrouvait à l'état déchargé. Finalement, cet instant marquait la fin de vie du système multi-PAC car comme le montrent la Fig.66 et la Fig.67, l'utilisation des PAC N°2, N°4 et N°3 à plein régime (c'est-à-dire à  $94\%P_{max}$ ) ne suffisait pas pour répondre à  $P_{dem_{multi-PAC}}(t \simeq 62,11 h)$ . La durée de vie obtenue pour le système multi-PAC est de l'ordre de quelques dizaines d'heures car tel qu'il a été mentionné dans le chapitre II de ce manuscrit, en raison de la capacité de mémoire limitée des ordinateurs, le vieillissement des PAC a été accéléré dans cette étude en multipliant les taux de dégradation des PAC par un facteur (200 environ).

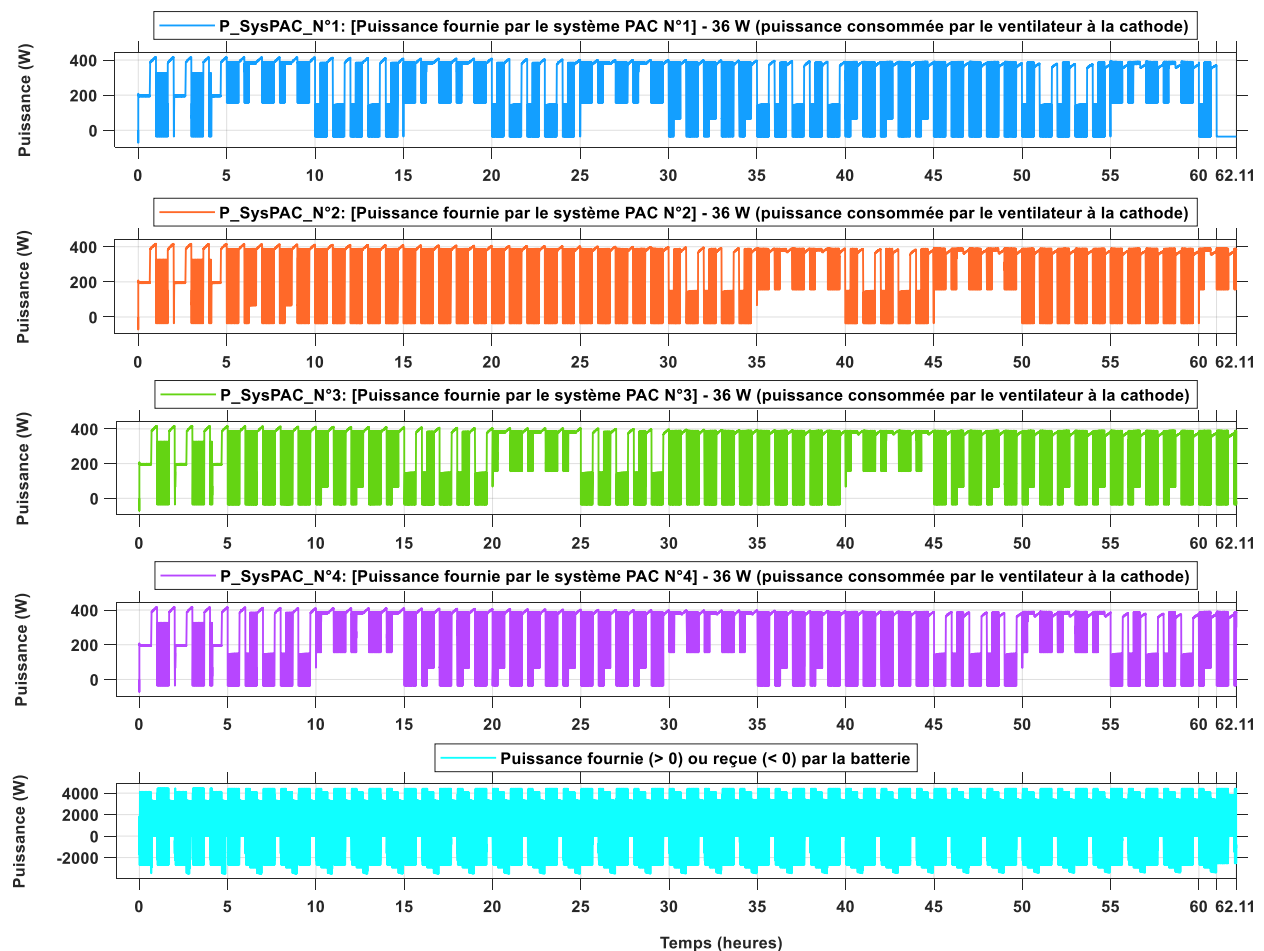


Figure 62: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE proposée



## Chapitre IV

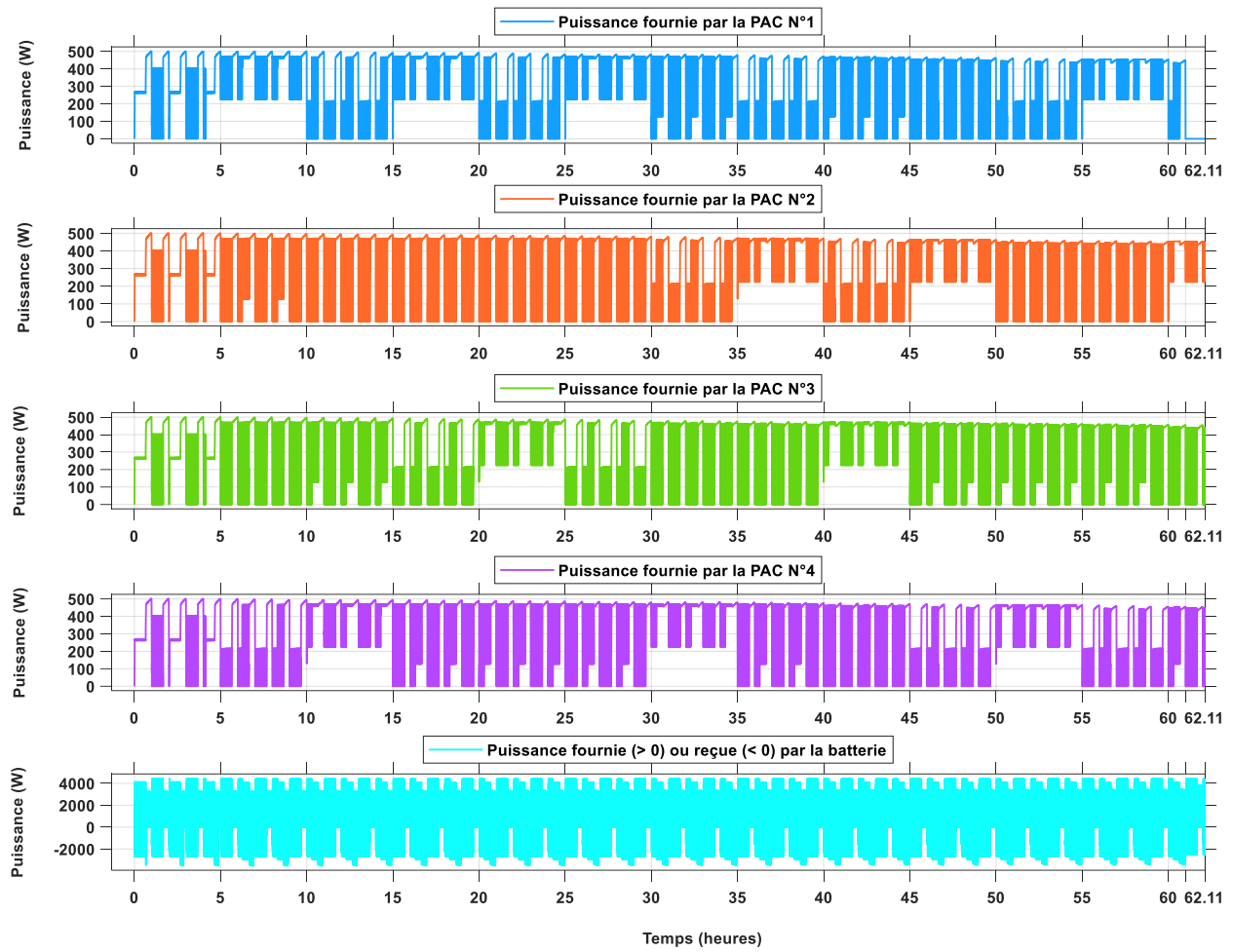


Figure 63: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE proposée

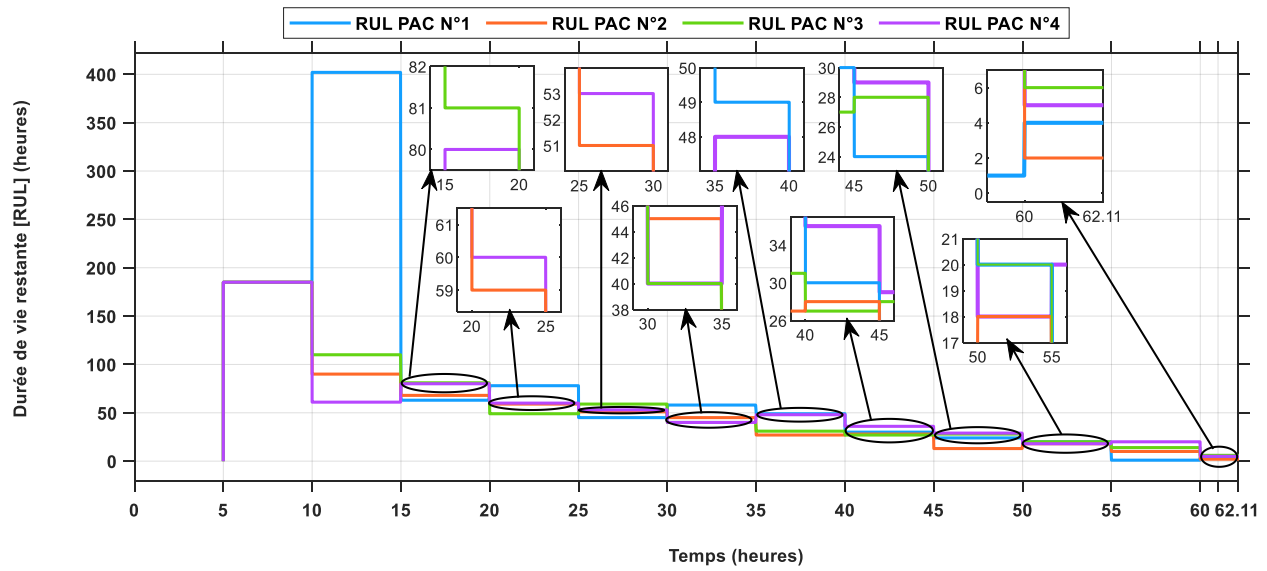


Figure 64: Prédiction des durées de vie restantes (RUL) des PAC chaque cinq heures / SGE proposée

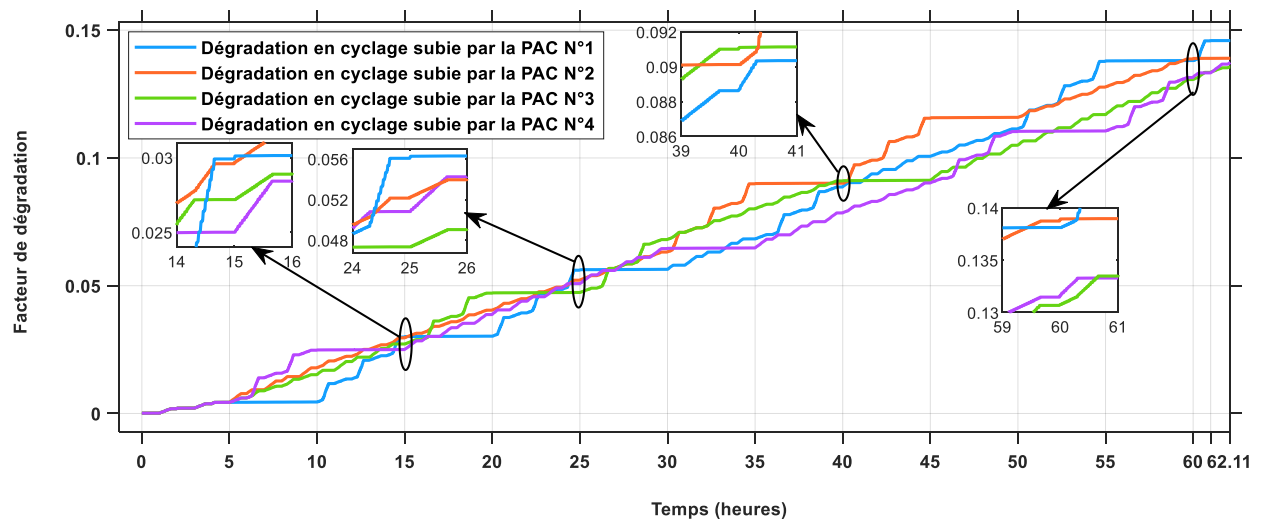


Figure 65: Dégradation en cyclage subie par chaque PAC / SGE proposée

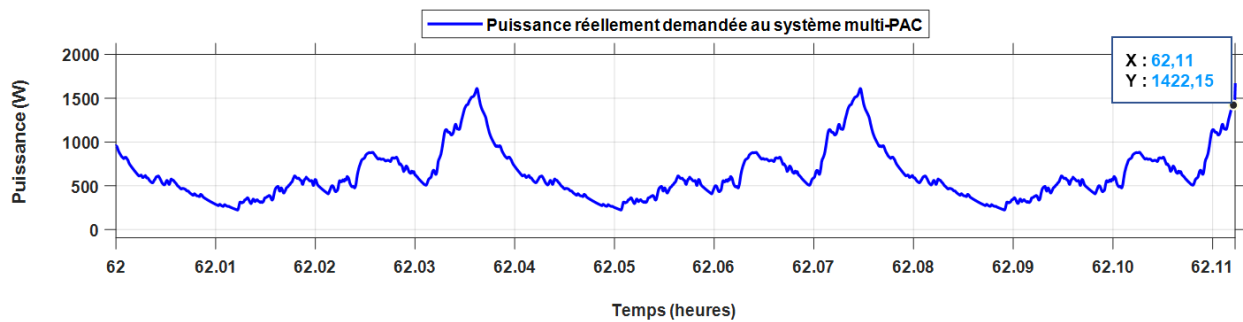


Figure 66: Puissance réellement demandée au système multi-PAC sur l'intervalle de temps [62 h ; 62,11 h] / SGE proposée

## Chapitre IV

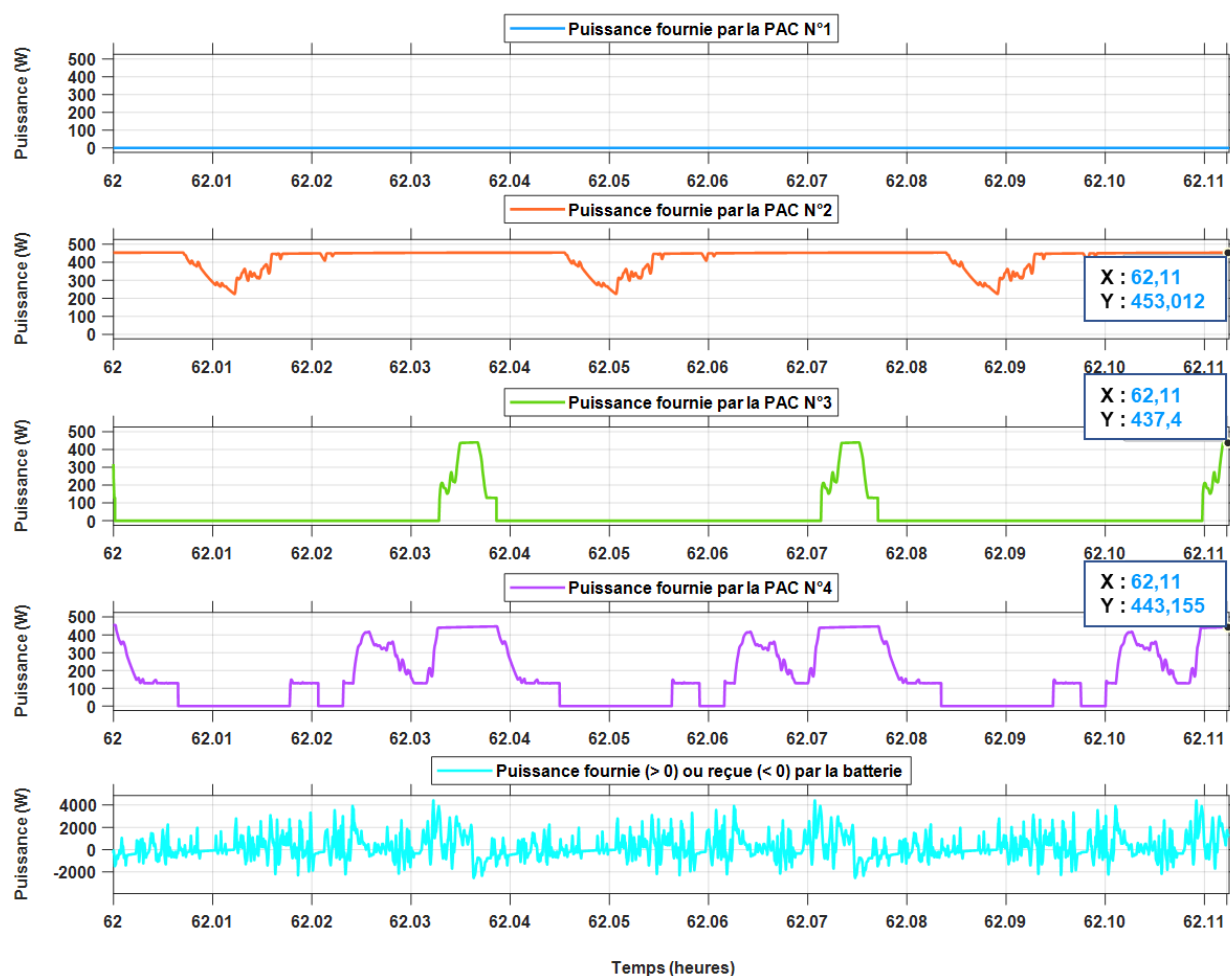


Figure 67: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PA et puissance fournie ou reçue par la batterie, sur l'intervalle [62 h ; 62,11 h] / SGE proposée

Par ailleurs, comme l'indique la Fig.68, pendant sa durée de vie de 62,11 heures, le système hybride multi-PAC/ batterie aurait consommé 4,912 kg d'hydrogène pour répondre à la demande de la charge. Le rendement énergétique du système multi-PAC pendant tout ce temps d'utilisation peut être visualisé à la Fig.69. Cette figure fait apparaître une dégradation progressive du rendement énergétique du système multi-PAC au fur et à mesure que celui-ci se dégrade. Cela est dû au fait que la dégradation que subit chaque PAC pendant son cyclage est appliquée sur l'aire de la surface active électrochimique du catalyseur dans cette étude pour traduire le vieillissement de la PAC en une perte de puissance (cf. sous-section 1.3 du chapitre II de ce manuscrit).

## Chapitre IV

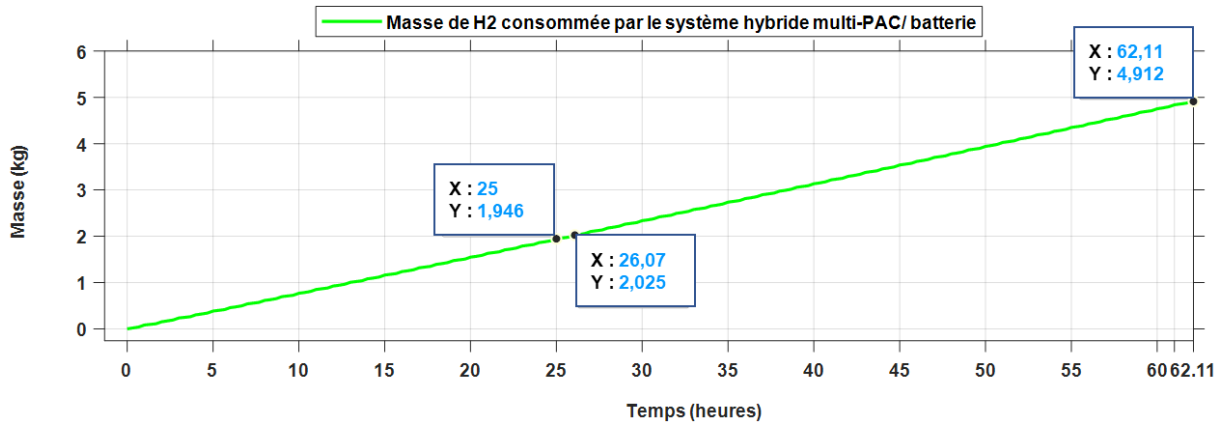


Figure 68: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC\_batterie / SGE proposée

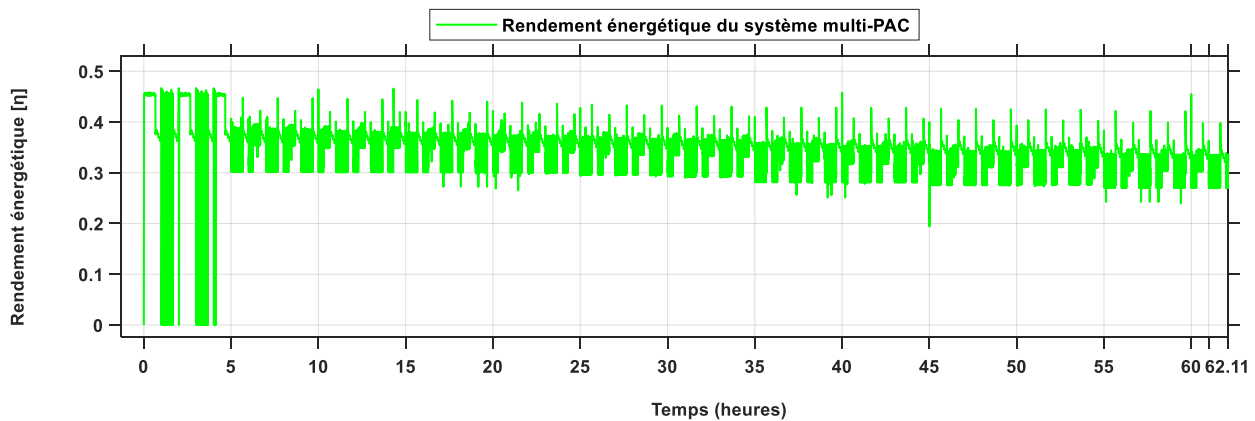


Figure 69: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE proposée

En négligeant la dégradation de la batterie, le coût d'exploitation du système hybride (coût d'hydrogène consommé + coût de dégradation du système multi-PAC) a été évalué pendant la durée de fonctionnement du système multi-PAC (Fig.70) afin de servir de critère de comparaison global entre la SGE proposée dans cette étude et les SGE conventionnelles. Ce coût a été évalué sur la base d'une projection sur le prix d'une PAC de 500 W à environ 25 \$ U.S et sur le prix d'un kilogramme d'hydrogène à environ 2 \$ U.S. Ainsi, après 62,11 heures d'opération, le coût d'exploitation total de 19,587 \$ obtenu provient de la consommation de 4,912 kg d'hydrogène, de la perte de 10,29 %, de 9,742%, de 9,444% et de 9,558% de puissance maximale de la PAC N°1, de la PAC N°2, de la PAC N°3 et de la PAC N°4, respectivement.

## Chapitre IV

$$\begin{aligned} \text{Coût total} &= (4,912 \text{ kg} \times 2) + (10,29\% \times 25) + (9,742\% \times 25) + (9,444\% \times 25) \\ &+ (9,558\% \times 25) \approx 19,587 \$ \end{aligned}$$

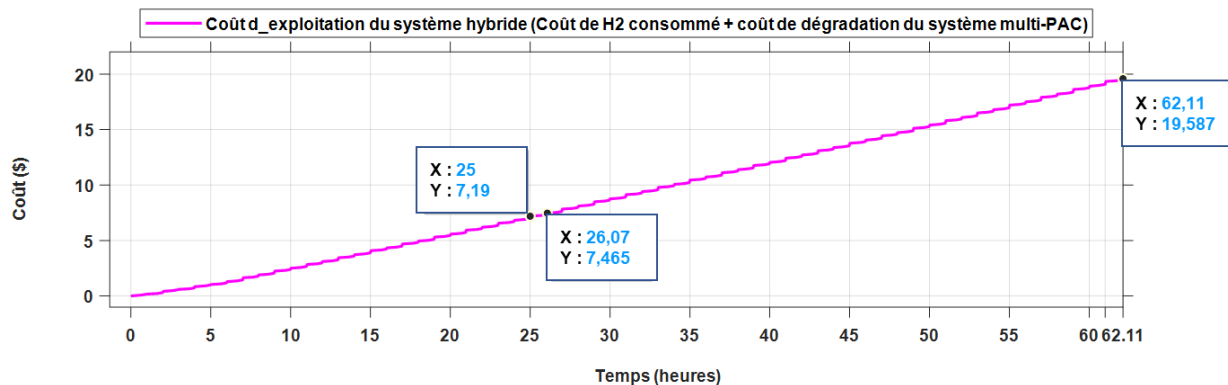


Figure 70: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE proposée

Les points phares qu'il convient de retenir des résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée peuvent être résumés comme suit :

- Grâce à la mise à jour du classement des PAC en deux temps c'est-à-dire premièrement par ordre décroissant des RULs et deuxièmement en considérant les modes d'opération des PAC depuis la dernière mise à jour de l'ordre d'utilisation des PAC, la SGE proposée sollicite les PAC de sorte à équilibrer leur niveau de dégradation. En effet, il convient de remarquer à travers la Fig.65 que chaque cinq heures, la PAC dont la dégradation en cyclage était la plus importante bénéficiait ensuite de l'avantage d'être utilisée en première position afin de voir son vieillissement être ralenti. Cela permettait de réduire la dispersion entre les niveaux de dégradation des PAC et finalement d'étendre la durée de vie du système multi-PAC.
- Grâce au principe de réduction de la fréquence des cycles de démarrages-arrêts, la SGE proposée sollicite les PAC de manière à éviter autant que possible les arrêts-démarrages fréquents qui accélèrent considérablement le vieillissement des PAC. L'optimisation des cycles de démarrages-arrêts des PAC est l'une des raisons qui auraient permis d'aboutir finalement à une durée de vie de 62,11 heures pour le système multi-PAC.
- En s'assurant de solliciter les PAC uniquement dans leur plage de puissances sécuritaire, la SGE proposée limite la dégradation qui pourrait provenir d'une part de l'utilisation des

PAC à l'état « *idle* » (densités de courant très faibles) et d'autre part du fonctionnement des PAC à des points de puissance très proches de leur puissance maximale (très fortes densités de courant). Cela permet de ralentir le vieillissement des PAC et ainsi de repousser la fin de vie du système multi-PAC. En outre, ce mode d'utilisation des PAC fait de la SGE proposée une stratégie capable de toujours faire fonctionner le système multi-PAC à un bon rendement énergétique et ce indépendamment de la forme du profil de mission (Fig.69).

Pour davantage faire ressortir certains de ces points phares et mieux situer la SGE proposée par rapport aux SGE conventionnelles de systèmes multi-PAC, les résultats du système hybride multi-PAC/ batterie sous les SGE conventionnelles seront présentés et analysés dans la sous-section suivante. Pour une meilleure comparaison des performances de la SGE proposée à celles des SGE conventionnelles, le mode d'utilisation qui consiste à solliciter les PAC du système multi-PAC uniquement dans leur plage de puissances sécuritaires sera également appliqué sous les SGE conventionnelles.

## 2.2 Résultats de simulations du système hybride multi-PAC/ batterie sous les SGE conventionnelles

### 2.2.1 SGE de distribution équitable

Après les cinq premières heures de fonctionnement du système multi-PAC, en continuant de répartir équitablement la puissance demandée  $P_{dem_{multi-PAC}}$  entre les PAC, le système multi-PAC s'use au bout de 25 heures, comme le montre la Fig.71.

L'évolution temporelle de la puissance maximale des PAC à la Fig.72 illustre le caractère non-adaptatif de la SGE de distribution équitable. En effet, d'après une analyse conjointe de la Fig.72 et de la Fig.73, en faisant dans un premier temps abstraction des phases de recharge de la batterie, il peut être remarqué que la puissance maximale des PAC se dégrade de façon linéaire. La vitesse de dégradation des PAC est plus faible lorsque le système multi-PAC recharge la batterie car la demande d'une puissance supplémentaire d'environ 265 W au système multi-PAC empêche l'arrêt fréquent des PAC et limite ainsi leur dégradation. La puissance supplémentaire d'environ

## Chapitre IV

265 W provient du courant de charge de 4 A (2C) de la batterie demandé au système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état déchargé.

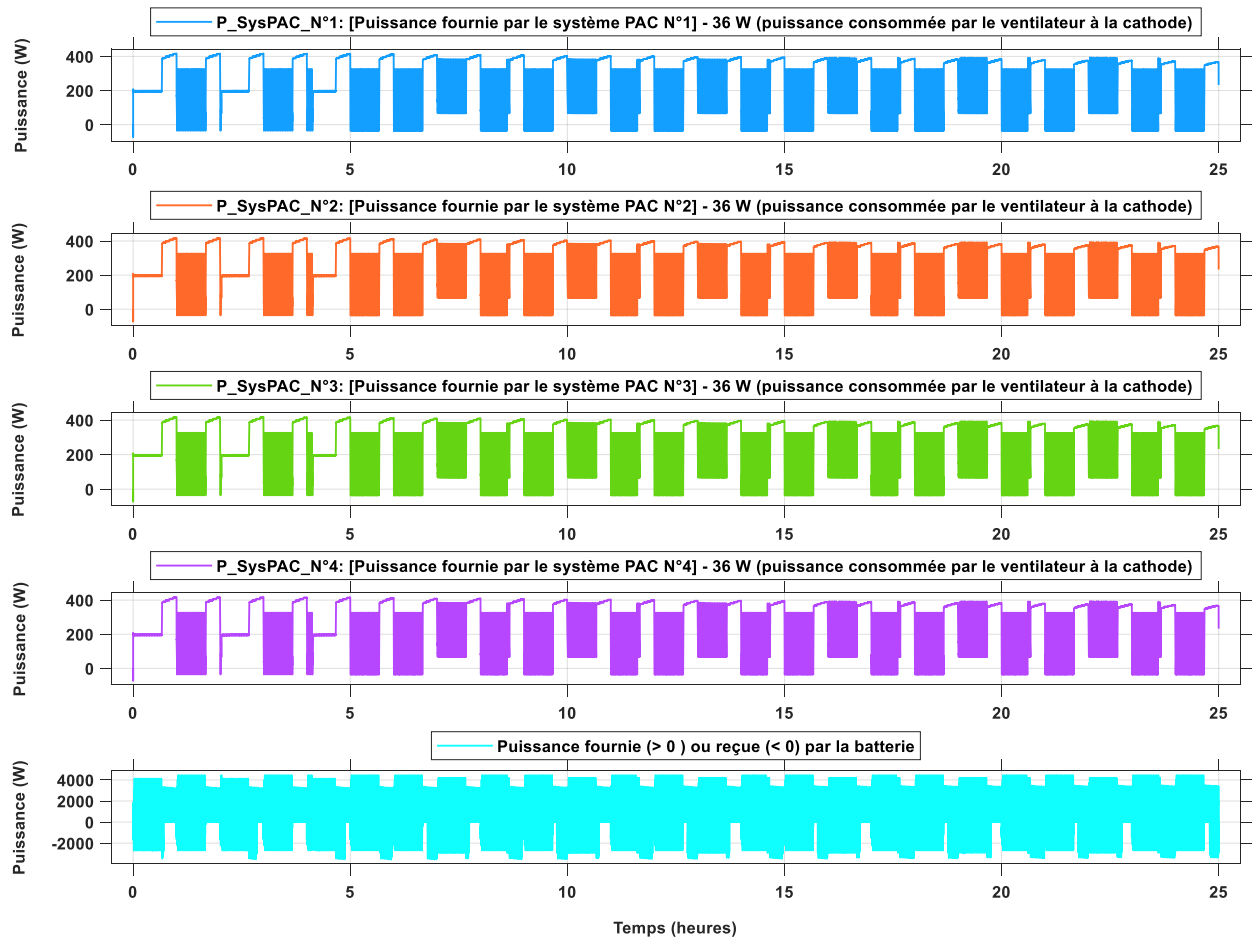


Figure 71: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE de distribution équitable

Trois raisons expliquent la courte durée de vie du système multi-PAC sous la SGE de distribution équitable par rapport à celle qui a été obtenue sous la SGE proposée.

- Premièrement, le principe du Daisy-Chain lui-même sur lequel repose la SGE proposée. En effet, l'attribution de la puissance  $P_{dem_{multi-PAC}}$  demandée au système multi-PAC à la première PAC de la file permettait d'ores et déjà à l'une des PAC du système multi-PAC de subir le moins de cycles de démarrages-arrêts possible.
- Deuxièmement, en mettant à jour l'ordre d'utilisation des PAC de manière à équilibrer leur niveau de dégradation, la SGE proposée faisait bénéficier à chacune des PAC l'avantage

## Chapitre IV

qui est rattaché au premier rang de la file c'est-à-dire la réduction de la fréquence des cycles de démarrages-arrêts.

- Finalement, lorsque la puissance restante à fournir n'était pas comprise dans la plage de puissance sécuritaire de la PAC à solliciter, le fait de vérifier son état actuel (activé ou désactivé) avant de décider de l'utiliser ou de l'arrêter permettait à la SGE d'optimiser davantage la fréquence des cycles de démarrages-arrêts des PAC.

Par ailleurs, il convient de remarquer à travers les figures 63 et 69 que l'utilisation permanente d'au moins une PAC du système multi-PAC à une puissance non nulle sous la SGE proposée faisait maintenir le rendement énergétique du système multi-PAC dans la plage [20% ; 47%] donc bien au-delà de 0. En revanche, sous la SGE de distribution équitable, le rendement énergétique du système multi-PAC s'annulait fréquemment en raison des arrêts-démarrages que les PAC subissaient simultanément (Fig.74). D'ailleurs, il peut être remarqué via cette figure qu'à chaque fois que la batterie était déchargée et que toutes les PAC étaient maintenues en opération en raison de la puissance supplémentaire demandée au système multi-PAC (Fig.71), le rendement énergétique variait dans la plage [31,5% ; 47%] (au-delà de 0). La limite inférieure ( $\approx 31,5\%$ ) est supérieure à celle de la plage dans laquelle le rendement énergétique était maintenu sous la SGE proposée ( $\approx 20\%$ ) car sous la SGE de distribution équitable, le point de fonctionnement des PAC était plus proche du point de meilleur rendement que sous la SGE proposée. En effet, généralement, le point de meilleur rendement des PAC tend plus vers la zone de faibles densités de courant que vers la zone de fortes densités de courant. En raison de la répartition équitable de la puissance demandée entre les PAC sous la SGE de distribution équitable, les PAC fonctionnaient rarement vers la zone de fortes densités de courant. Mais, sous la SGE proposée, la plupart du temps, les PAC fonctionnaient plutôt vers cette zone afin que le minimum de PAC soient utilisées pour répondre aux différents niveaux de puissance demandés. Cela explique d'ailleurs la faible consommation d' $H_2$  du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE de distribution équitable que sous la SGE proposée. En effet, comme l'indique la Fig.75, la masse d'hydrogène consommée par le système hybride durant le temps de vie du système multi-PAC serait d'environ 1,781 kg sous la SGE de distribution équitable. Pourtant, sous la SGE proposée, le système hybride avait consommé environ 1,946 kg d' $H_2$  entre  $t = 0 h$  et  $t = 25 h$ , soit une augmentation de 9,26% de la masse d' $H_2$  consommée sous la SGE de distribution équitable. Toutefois, l'importante perte de 59,75% de la durée de vie du système multi-PAC sous la SGE de



## Chapitre IV

distribution équitable par rapport à la durée de vie obtenue sous la SGE proposée (62,11 heures) rend presque insignifiant ce gain sur la consommation d'hydrogène obtenu avec la SGE de distribution équitable. En effet, comme l'indique la Fig.76, le coût d'exploitation total du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE de distribution équitable serait de 14,454 \$ tandis que 25 heures d'opération du système sous la SGE proposée ne coûtaient que 7,19 \$ (Fig.70), soit une réduction de 50,26% du coût obtenu sous la SGE de distribution équitable.

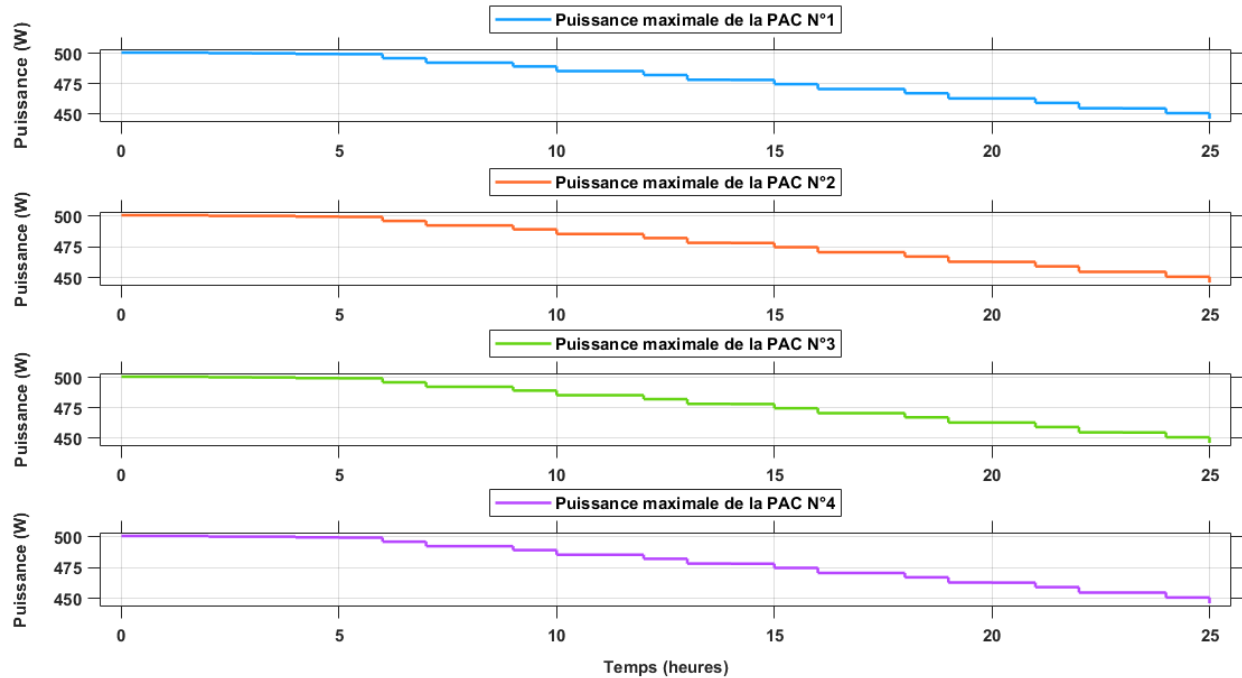


Figure 72: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC / SGE de distribution équitable

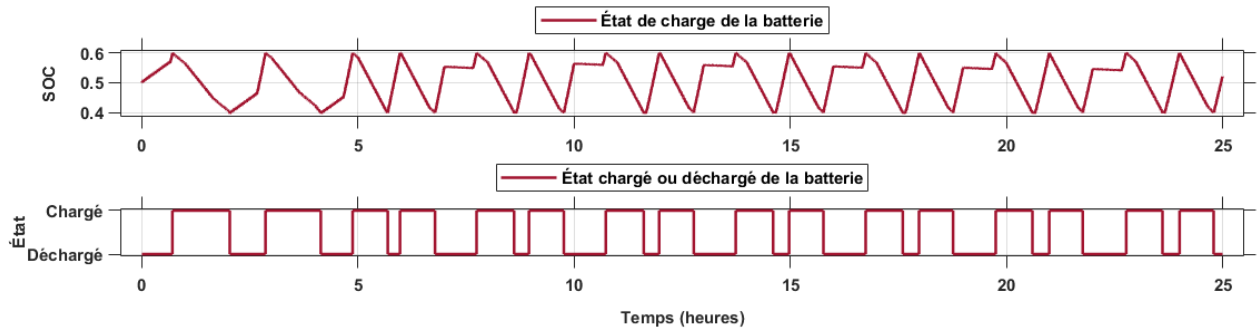


Figure 73: État de charge de la batterie / SGE de distribution équitable

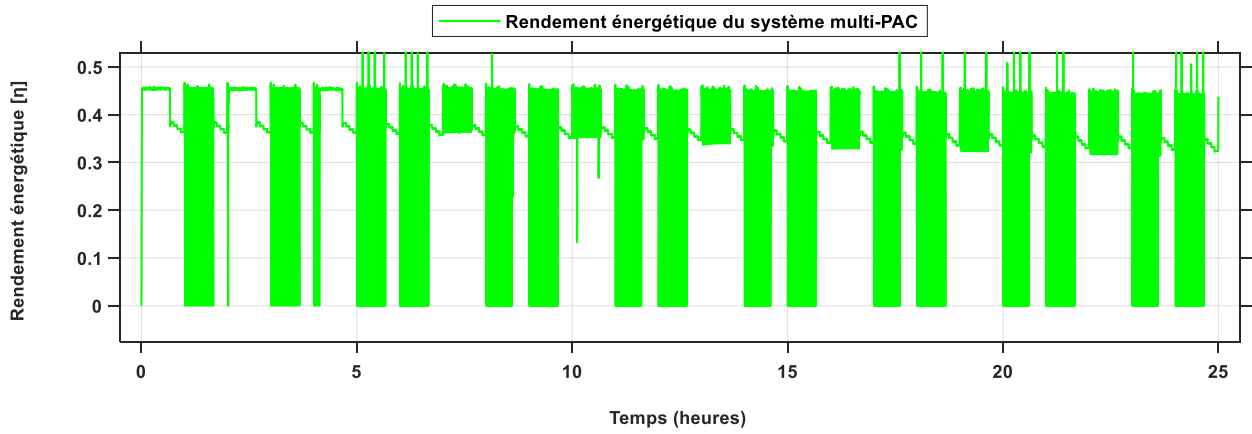


Figure 74: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE de distribution équitable

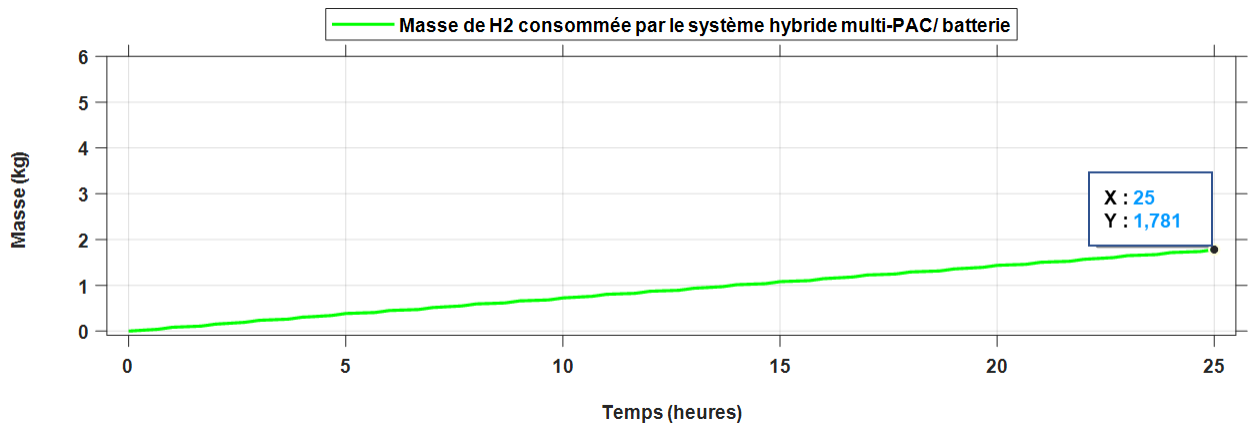


Figure 75: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC\_batterie / SGE de distribution équitable

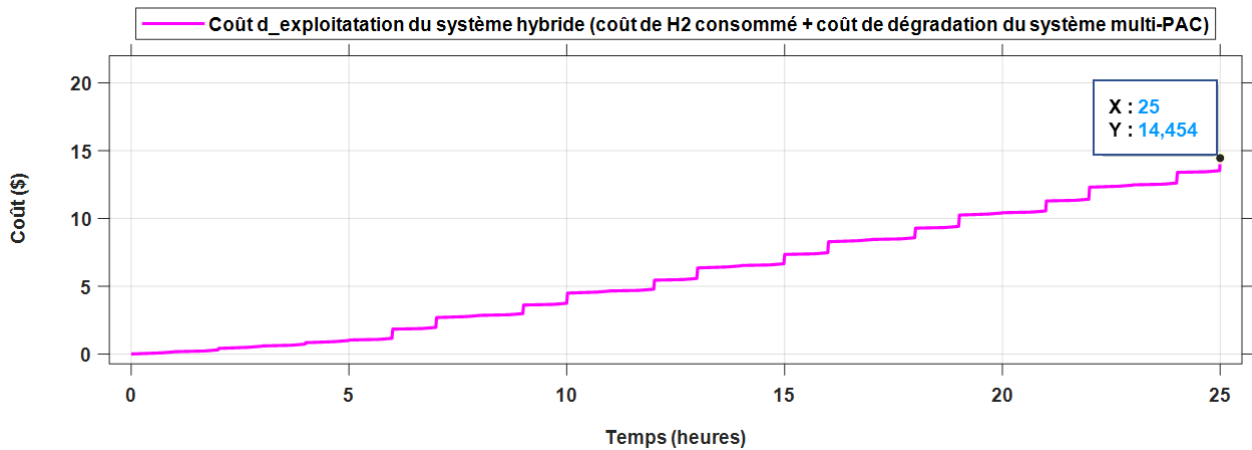


Figure 76: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE de distribution équitable

### 2.2.2 SGE du Daisy-Chain

Si le fonctionnement du système multi-PAC était plutôt régi par la stratégie du Daisy-Chain qui sollicite les PAC de manière séquentielle tout comme la SGE proposée mais sans aucune gestion de l'ordre de sollicitation des PAC, sa durée de vie ne serait que de 26,07 heures comme l'indiquent la Fig.77 et la Fig.78. Ce qui signifie que l'utilisation de la SGE du Daisy-Chain pour gérer l'énergie du système multi-PAC conduirait à une perte de 58,03% de la durée de vie obtenue sous la SGE proposée. La courte durée de vie du système multi-PAC sous la SGE du Daisy-Chain est due au caractère non-adaptatif de cette stratégie. En effet, comme le montre la Fig.78, les vitesses de dégradation des PAC étaient différentes cependant aucune action corrective ne pouvait être effectuée par la SGE en ce qui concerne les modes d'opération des PAC. Par conséquent, la PAC N°2 qui subissait le plus de cycles de démarrages-arrêts continuait de se dégrader plus rapidement que les trois autres PAC jusqu'à atteindre sa fin de vie à l'instant  $t = 25 h$ . À partir de l'instant  $t = 26,07 h$ , la batterie était à l'état déchargé et l'utilisation des trois PAC restantes à  $94\%P_{max}$  ne suffisait pas pour que le système multi-PAC réponde à la puissance demandée d'où la fin de vie du système multi-PAC.

Finalement, en plus de l'invariabilité de l'ordre d'utilisation des PAC, le principe basique du Daisy-Chain n'intègre en lui-même aucun aspect d'optimisation des cycles de démarrages-arrêts, contrairement à la SGE proposée dans ce manuscrit. Cependant, pour ce qui est de la consommation d' $H_2$ , d'après la Fig.79 et la Fig.68, quasiment la même quantité d' $H_2$  a été consommée par le système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain que sous la SGE proposée entre  $t = 0 h$  et  $t = 26,07 h$  (soit respectivement 2,022 kg contre 2,025 kg). Il convient, en effet, de remarquer à travers la Fig.80 que le rendement énergétique du système multi-PAC sous la SGE du Daisy-Chain évolue d'une façon similaire au rendement énergétique obtenu sous la SGE proposée de  $t = 0 h$  à  $t = 26,07 h$  (Fig.69). Cela est dû au fait que la SGE du Daisy-Chain et la SGE proposée repose toutes les deux sur le même principe qui consiste à solliciter le minimum de PAC pour répondre à la demande. Toutefois, en raison du caractère non-adaptatif de la SGE du Daisy-Chain, le système multi-PAC aurait subi une dégradation plus importante que celle qu'elle a dû subir entre  $t = 0 h$  et  $t = 26,07 h$  sous la SGE proposée. Cela se traduit par un coût d'exploitation total de 9,173 \$ du côté de la SGE du Daisy-Chain (Fig.81) contre 7,465 \$ du côté de la SGE proposée pour une utilisation du système hybride multi-PAC/ batterie de  $t = 0 h$  à

## Chapitre IV

$t = 26,07 \text{ h}$  (Fig.70); soit une réduction d'environ 18,62% du coût d'exploitation total obtenu sous la SGE du Daisy-Chain.

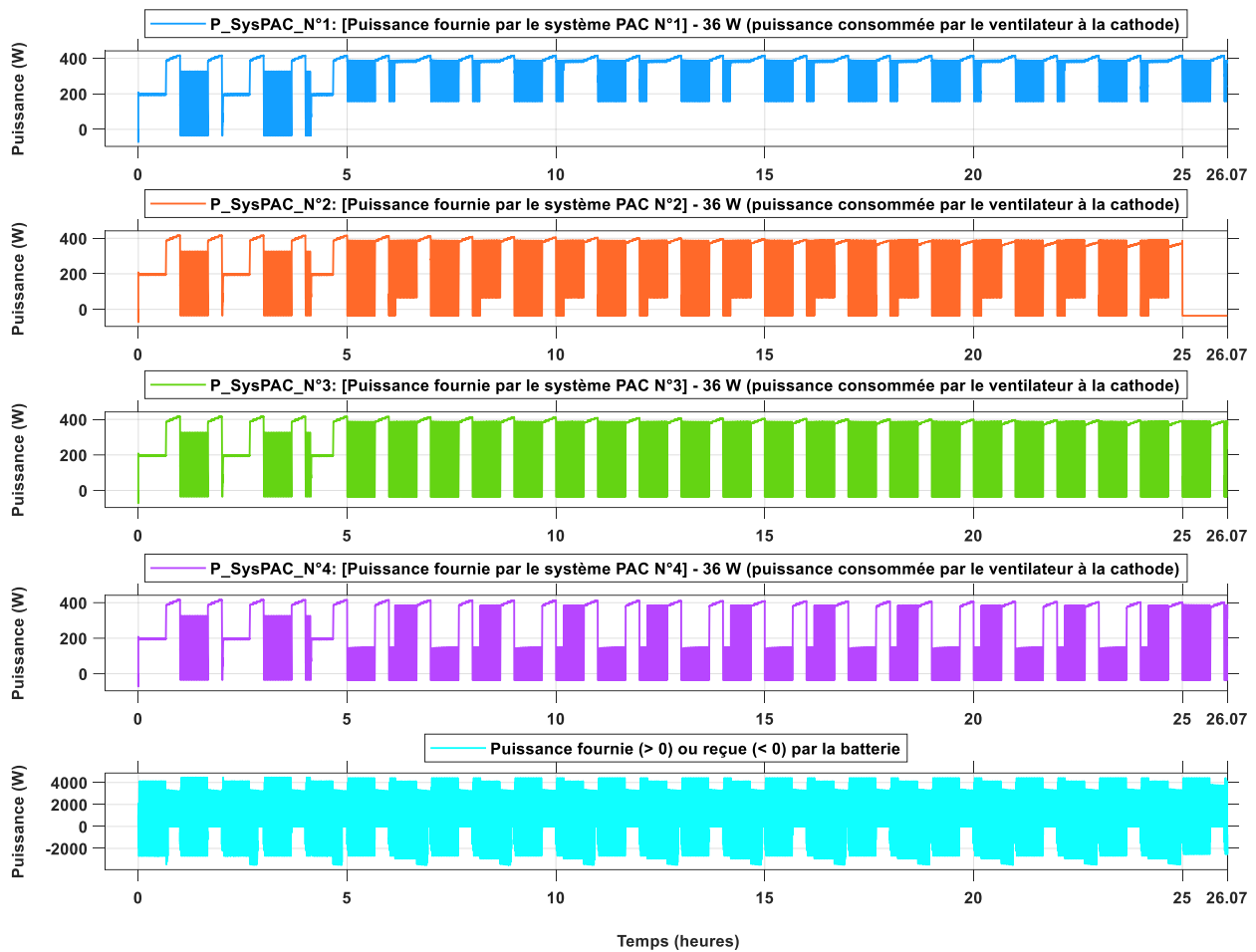


Figure 77: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE du Daisy-Chain

En conclusion, l'analyse comparative des résultats de la SGE proposée et des résultats des SGE conventionnelles a permis de montrer que la durée de vie du système multi-PAC pourrait être multipliée par 2,48 et par 2,38 en passant respectivement de la SGE de distribution équitable et de la SGE du Daisy-Chain à la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs, proposée dans ce manuscrit. Certes, l'utilisation de la SGE de distribution équitable pourrait permettre d'économiser environ 8,48% de la masse d' $H_2$  par rapport à la SGE proposée pour une même durée d'opération du système hybride multi-PAC/ batterie. Cependant, le gain significatif qui pourrait être obtenu en termes de vieillissement du système multi-PAC en adoptant la SGE proposée pourrait permettre de réduire le coût d'exploitation total du système hybride d'environ

## Chapitre IV

50,26% par rapport à la SGE de distribution équitable, sur une même durée d'utilisation du système sous les deux SGE. De même en appliquant la SGE proposée au lieu de la SGE du Daisy-Chain au système hybride multi-PAC/ batterie pendant une même durée, le coût d'exploitation total peut être réduit de 18,62% grâce à la réduction du coût de dégradation du système multi-PAC. En réalité, sous la SGE du Daisy-Chain et sous la SGE proposée, le système hybride consomme à peu près la même quantité d'hydrogène car ces deux SGE sollicitent toujours le minimum de PAC pour répondre à la demande.

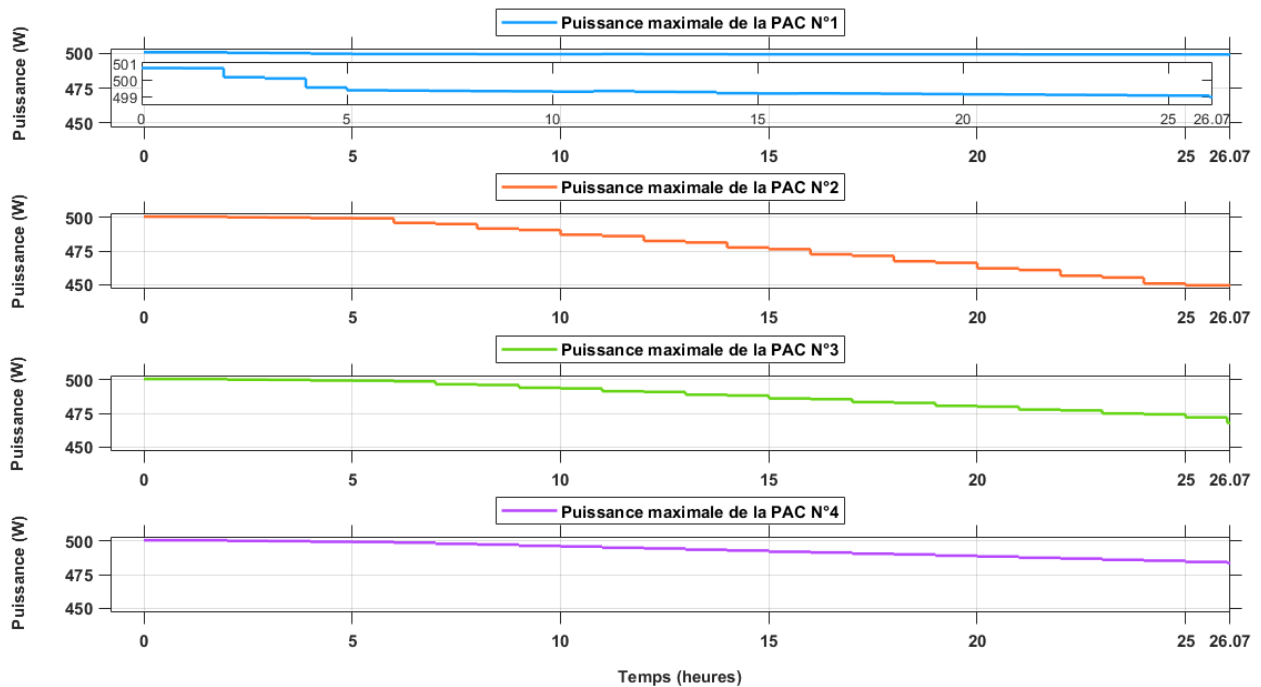


Figure 78: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC / SGE du Daisy-Chain

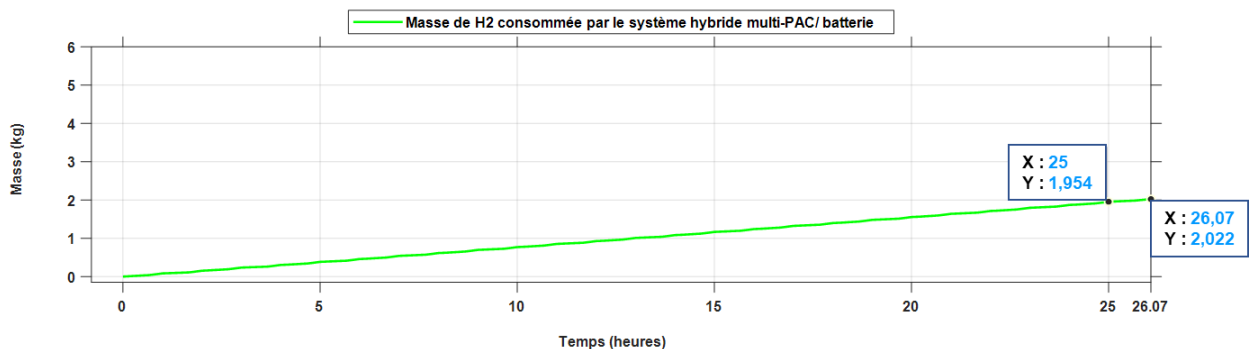


Figure 79: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC\_batterie / SGE du Daisy-Chain

Il convient de remarquer qu'en passant de la SGE du Daisy-Chain à la SGE proposée, le coût d'exploitation du système hybride entre 0 h et t = 26,07 h n'est pas réduit autant qu'il l'est

## Chapitre IV

lorsque l'énergie du système multi-PAC est gérée par la SGE proposée plutôt que par la SGE de distribution équitable. Cela est dû au fait que sous la SGE de distribution équitable, à l'instant  $t = 25 \text{ h}$  donc à l'instant  $t = 26,07 \text{ h}$ , toutes les PAC du système multi-PAC s'étaient déjà dégradées à plus de 10% par rapport à leur état de santé initial. En revanche, sous la SGE du Daisy-Chain, seule la PAC N°2 avait perdu plus de 10% de son état de santé initial. Les PAC N°1, N°3 et N°4 ne s'étaient quant à elle dégradées respectivement qu'à 0,34%, 6,56% et 3,38% par rapport à leur état de santé initial.

Finalement, que ce soit par rapport à la SGE de distribution équitable ou à la SGE du Daisy-Chain, la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs est capable de faire atteindre au système multi-PAC, une durée de vie plus de 2,35 fois supérieure à celle qu'il aurait atteinte sous ces deux SGE conventionnelles. Le tableau 8, le tableau 9 et le tableau 10 résument respectivement l'analyse comparative de la durée de vie, de la consommation d' $H_2$  et du coût d'exploitation du système multi-PAC sous la SGE proposée versus les deux SGE conventionnelles. La section suivante permettra de positionner la SGE proposée par rapport à la SGE de référence.

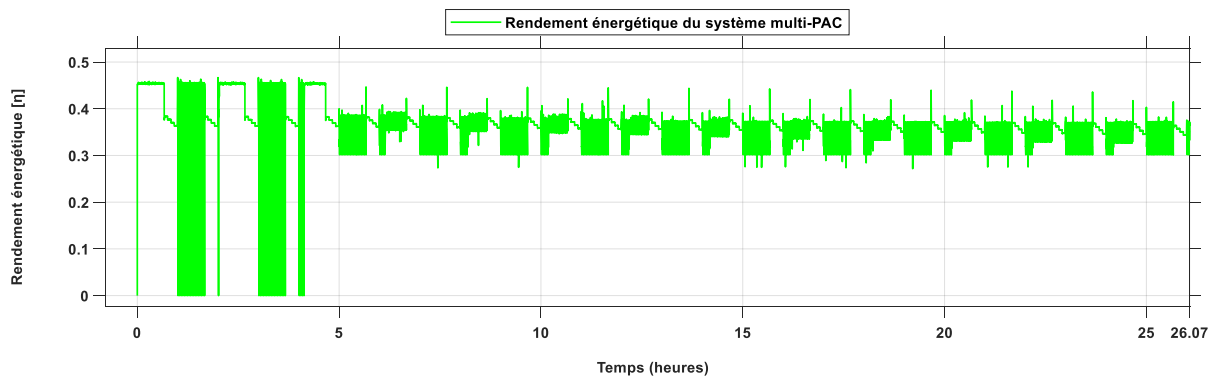


Figure 80: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE du Daisy-Chain

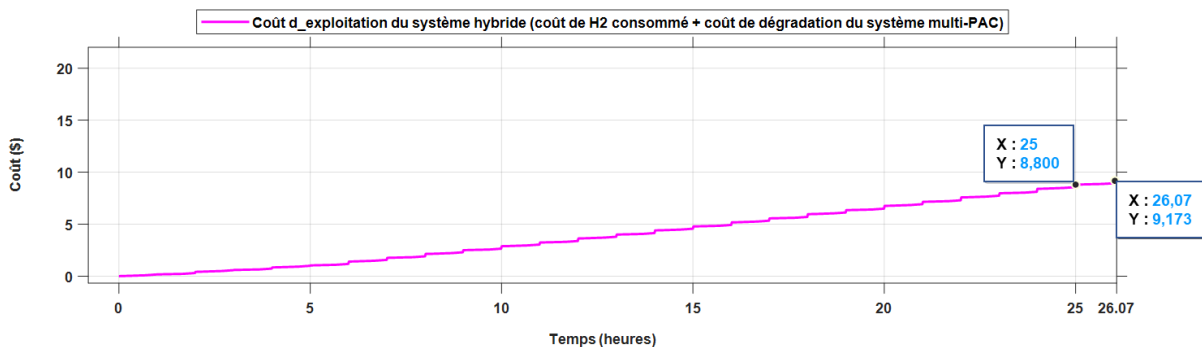


Figure 81: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE du Daisy-Chain

## Chapitre IV

Tableau 8: Durée de vie du système multi-PAC obtenue sous la SGE proposée vs les SGE conventionnelles

<b>Critères</b> \ <b>SGE</b>	<b>SGE proposée (SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs)</b>	<b>SGE de distribution équitable</b>	<b>SGE du Daisy-Chain</b>
<b>Durée de vie du système multi-PAC</b>	62,11 heures	25 heures	26,07 heures
<b>Gain</b>	–	2,48	2,38

Tableau 9: Consommation d'hydrogène du système multi-PAC sous la SGE proposée vs les SGE conventionnelles

<b>Critères</b> \ <b>SGE</b>	<b>SGE proposée (SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs)</b>		<b>SGE de distribution équitable</b>	<b>SGE du Daisy-Chain</b>
<b>Masse d'<math>H_2</math> consommée par le système multi-PAC</b>	$t = 25 h$	1,946 kg	1,781 kg	2,022 kg
	$t = 26,07 h$	2,025 kg		
	$t = 62,11 h$	4,912 kg		
<b>Réduction par rapport à la SGE proposée</b>	–		8,48%	0,15%

Tableau 10: Coût d'exploitation total du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée vs les SGE conventionnelles

<b>Critères</b> \ <b>SGE</b>	<b>SGE proposée (SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs)</b>		<b>SGE de distribution équitable</b>	<b>SGE du Daisy-Chain</b>
<b>Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC/ batterie</b>	$t = 25 h$	7,19 \$	14,454 \$	9,173 \$
	$t = 26,07 h$	7,465 \$		
	$t = 62,11 h$	19,587 \$		
<b>Réduction par rapport aux SGE conventionnelles</b>	–		50,26%	18,62%

## 2.3 Résultats de simulations du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations instantanées de puissance maximale

La SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations instantanées de  $P_{max}$  n'est qu'une variante de la SGE proposée car chaque cinq heures, au lieu que les PAC soient remises en ordre en fonction de leur RUL, elles le sont en fonction de leur puissance maximale. Elle peut être considérée dans cette étude comme la SGE de référence car les estimations de  $P_{max}$  des PAC sont de toute évidence plus précises que les pronostics de RULs. Malgré cela, le système multi-PAC présentera-t-il finalement les mêmes performances (durée de vie et consommation d' $H_2$ ) sous la SGE proposée que sous la SGE de référence ? Pour découvrir cela, les résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE de référence seront présentés et analysés dans cette sous-section.

Les figures 82 et 83 font apparaître respectivement l'évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC rééchantillonnée à un pas de temps de cinq heures et la répartition de la puissance demandée  $P_{dem\_multi-PAC}$  entre les quatre systèmes PAC. La puissance maximale est rééchantillonnée à ce pas de temps afin que l'ordre d'utilisation des PAC soit mis à jour à la même fréquence que celle à laquelle il était mis à jour dans la SGE proposée. En analysant conjointement ces deux figures, il peut être remarqué que :

- De 5 h à 10 h, les PAC ont été sollicitées suivant l'ordre définitif : PAC N°3, PAC N°4, PAC N°2, PAC N°1 car le classement des PAC par ordre décroissant de  $P_{max}$  obtenu à  $t = 5 h$  était PAC N°2, PAC N°4, PAC N°1, PAC N°3, d'après la Fig.82, bien que la différence entre les puissances maximales soit de l'ordre de  $10^{-8} W$ . En effet, la PAC N°3 qui avait la puissance maximale la plus faible devait occuper le 1<sup>er</sup> rang dans le classement définitif et la PAC N°2 qui avait la puissance maximale la plus importante devait occuper le rang qu'occupait la PAC N°3 dans le classement définitif précédent, soit le 3<sup>ième</sup> rang. Finalement, la PAC N°1 qui occupait le 3<sup>ième</sup> rang devait alors passer au dernier rang d'où le classement définitif obtenu.



## Chapitre IV

- En raison de ses plus nombreux cycles de démarrages-arrêts sur l'intervalle [5 h ; 10 h], la PAC N°1 s'est plus dégradée que toutes les autres PAC comme l'indique la Fig.84 qui présente l'évolution temporelle de la dégradation en cyclage de chacune des PAC. Quant à elle, la PAC N°4 y a subi plus de dégradations que les PAC N°2 et N°3 (Fig.84). La PAC N°3 n'ayant jamais été désactivée sur cet intervalle de temps, elle avait ainsi la puissance maximale la plus importante à  $t = 10 h$  comme le montre la Fig.82. Sur ce, le classement définitif suivant lequel les PAC devaient être utilisées de 10 h à 15 h est PAC N°1, PAC N°2, PAC N°4, PAC N°3 et il convient de remarquer via la Fig.83 que c'est effectivement dans cet ordre que les PAC furent sollicitées de 10 h à 15 h.
- L'ordre d'utilisation des PAC était à chaque fois mis à jour à  $t = 15 h; t = 20 h; \dots; t = 60 h$  après comparaison de leur puissance maximale et la prise en compte des modes d'opération des PAC depuis la dernière mise à jour de l'ordre d'utilisation. La PAC N°4 fut déclarée en fin de vie à  $t = 62 h$ , d'après la Fig.83. Cependant la batterie était à l'état chargé comme l'indique la Fig.85. Ce n'est qu'à l'instant  $t = 62,3 h$  que la batterie se retrouvait à l'état déchargé (Fig.85). C'est également à partir de cet instant que le système multi-PAC n'arrivait plus à fournir toute la puissance qui lui était demandée d'où sa fin de vie. Ainsi, la durée de vie du système multi-PAC sous la SGE de référence serait de 62,3 heures, soit 0,19 heures ou encore 11,4 minutes de plus que la durée de vie obtenue sous la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs. La différence étant négligeable, il est tout à fait acceptable de conclure en disant que la SGE proposée basée sur les pronostics de RULs prolonge autant la durée de vie du système multi-PAC que la SGE de référence, bien que les pronostics de RULs ne soient pas aussi précis que les estimations de  $P_{max}$ .

Pour ce qui est de la consommation d' $H_2$  du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE de référence, la Fig.86 indique que durant ce temps de vie de 62,3 heures, 4,933 kg d' $H_2$  y ont été consommés par le système pour répondre à la demande de la charge. Cette figure montre également que la masse d' $H_2$  consommée par le système sous la SGE de référence de  $t = 0 h$  à  $t = 62,11 h$  serait d'environ 4,923 kg, soit 0,011 kg de plus que la masse d' $H_2$  qu'il aurait consommée sous la SGE proposée. La différence très négligeable entre la quantité d' $H_2$  consommée par le système sous la SGE de référence et celle qui aurait été consommée sous la SGE proposée se reflète également à travers l'obtention d'une même courbe de rendement énergétique

## Chapitre IV

sous les deux SGE (Fig.87 et Fig.69). En somme, elle montre qu'à l'instar de la durée de vie, la consommation d' $H_2$  du système multi-PAC ne changent quasiment pas lorsqu'on passe de l'approche de la gestion d'énergie basée sur les estimations de  $P_{max}$  à celle de la gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs, dans le cadre d'une même SGE (même principe, même fréquence de mise à jour des RULs ou des  $P_{max}$ ). Le très faible écart entre le coût d'exploitation total (19,587 \$) obtenu sous la SGE proposée (Fig.70) et celui qui aurait été obtenu sous la SGE de référence (19,645 \$ d'après la Fig.88) entre  $t = 0 h$  et  $t = 62,11 h$ , souligne la fiabilité de l'approche de gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs.

Cette dernière conclusion encourage à privilégier le concept de la gestion d'énergie des systèmes multi-PAC basée sur les pronostics de RULs par rapport à celui de la gestion d'énergie basée sur les estimations de  $P_{max}$ . En effet, comparé à l'approche de la gestion d'énergie basée sur les estimations de  $P_{max}$ , l'intégration des pronostics de RULs dans la gestion d'énergie pourrait offrir plus d'ouvertures en matière de conception de SGE adaptatives pour les systèmes multi-PAC. Dans la section suivante, quelques perspectives seront proposées dans ce sens pour montrer qu'en ce qui concerne la gestion d'énergie des systèmes multi-PAC, l'usage des pronostics de RULs pourrait conduire à certaines avancées prometteuses qu'il serait plus difficile d'atteindre avec l'utilisation des estimations de  $P_{max}$ , vis-à-vis de la durabilité des systèmes multi-PAC.

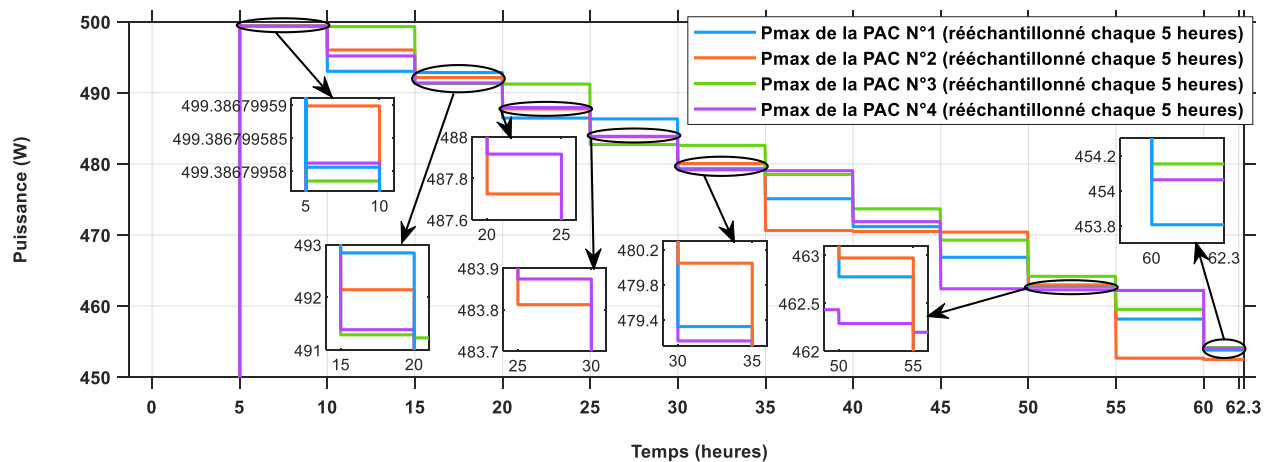


Figure 82: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC rééchantillonnée toutes les cinq heures / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de  $P_{max}$  ou SGE de référence

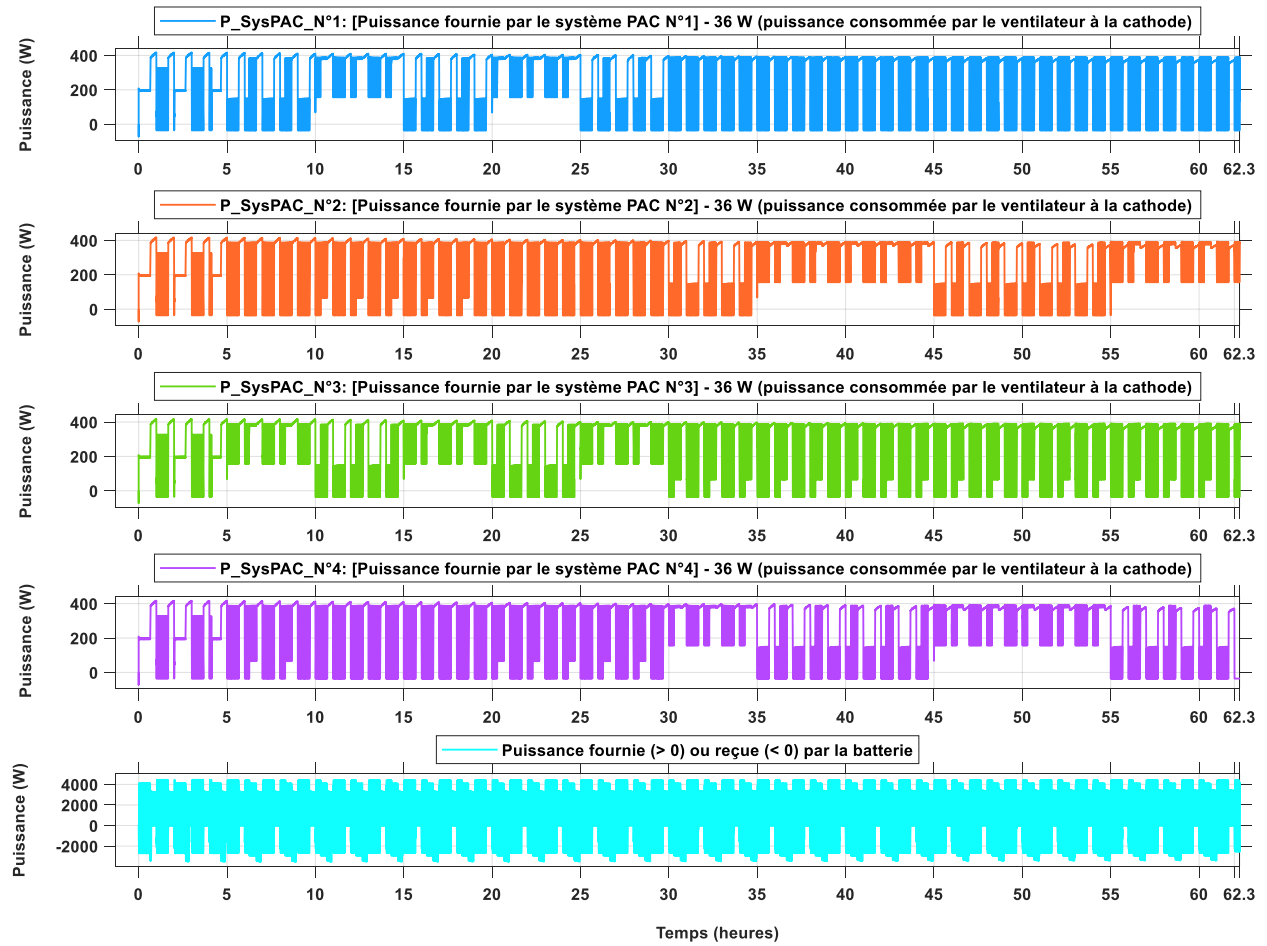


Figure 83: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence

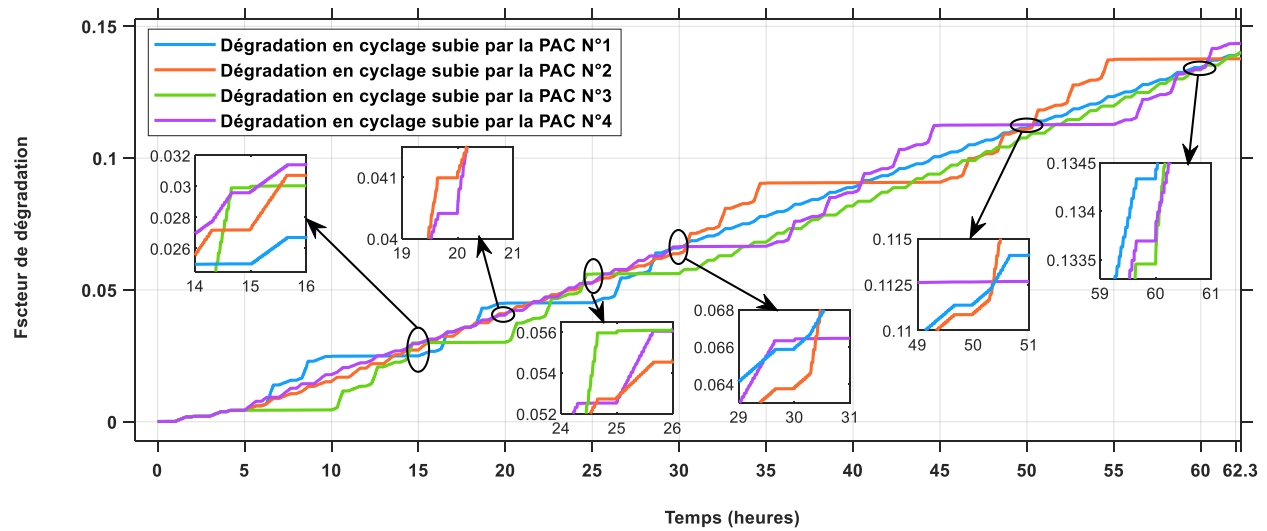


Figure 84: Dégradation en cyclage subie par chaque PAC / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence

## Chapitre IV

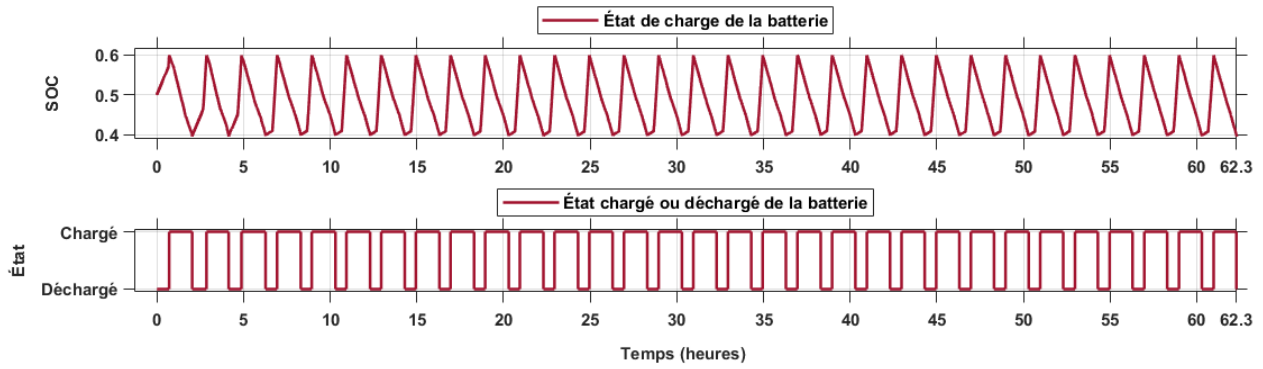


Figure 85: État de charge de la batterie / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence

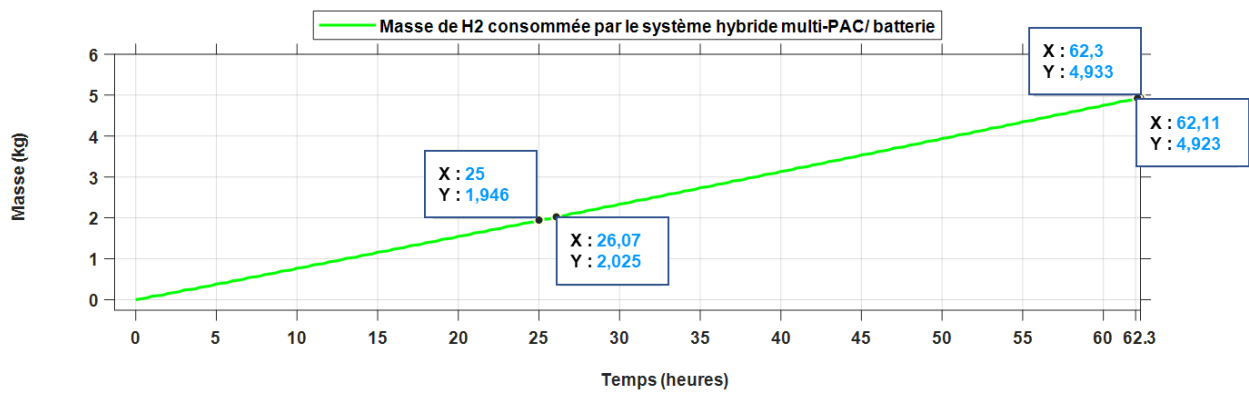


Figure 86: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC\_batterie / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence

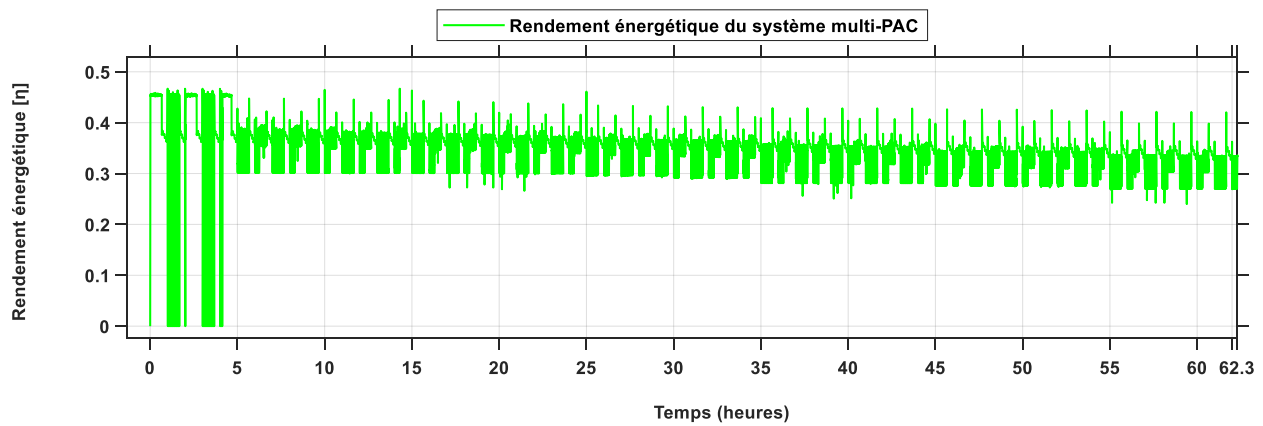


Figure 87: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence

## Chapitre IV

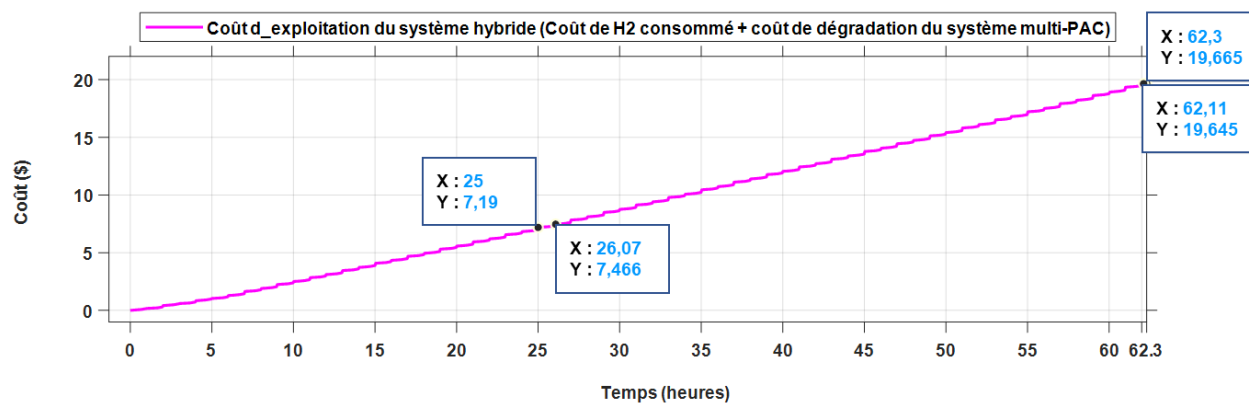


Figure 88: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence

### 3. Perspectives

- Dans la SGE de systèmes multi-PAC proposée dans cette thèse, les pronostics de RULs des PAC ont permis uniquement de mettre à jour l'ordre de sollicitation des PAC et par conséquent de déterminer à chaque fois, les PAC qui devaient être utilisées en priorité à certains rangs de la file afin d'équilibrer les niveaux de dégradation de toutes les PAC. Cela explique pourquoi quasiment les mêmes performances (durée de vie et consommation d' $H_2$  du système multi-PAC) ont été obtenues lorsque la SGE se basait sur les estimations de  $P_{max}$  des PAC plutôt que sur les pronostics de RULs des PAC pour prendre des décisions. Pour montrer que les pronostics de RULs peuvent être plus pertinents que les estimations de  $P_{max}$  dans le cadre d'une SGE adaptative de systèmes multi-PAC, les décisions de gestion d'énergie à un instant  $t$  donné ne doivent pas seulement dépendre d'une comparaison relative des RULs des PAC à cet instant mais aussi d'une analyse individuelle de l'évolution temporelle du RUL de chaque PAC jusqu'à cet instant. En effet, contrairement à la puissance maximale des PAC qui ne peut que décroître en fonction du temps, le RUL peut augmenter entre deux séances de pronostic consécutives. Le cas échéant, cela signifie que le mode d'opération suivant lequel la PAC aurait fonctionné dernièrement pourrait être favorable à l'amélioration de la durabilité. Ainsi, l'une des décisions de gestion d'énergie qu'il serait convenable de prendre à l'instant  $t$  serait de maintenir la PAC dans ce mode d'opération, par exemple. Si le même raisonnement devait être appliqué avec les estimations de  $P_{max}$ , il faudrait comparer la variation de  $P_{max}$  entre les deux derniers échantillons de  $P_{max}$  à la variation précédente de  $P_{max}$  (entre les deux avant-derniers échantillons). Ce qui semble être plus complexe qu'une simple comparaison des deux dernières prédictions de RULs. En définitive, la prise en considération de l'évolution temporelle du RUL de chaque PAC dans une SGE de systèmes multi-PAC pourrait être une piste de recherche intéressante à explorer dans les travaux futurs de cette thèse.
- L'étude comparative des performances du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée et sous les SGE conventionnelles de systèmes multi-PAC ont montré que la

## *Perspectives*

SGE proposée est capable d'améliorer la durée de vie du système multi-PAC par un gain d'environ 2,48 par rapport à la SGE de distribution équitable. Cependant, l'utilisation des PAC dans leur région de faibles densités de courant sous la SGE de distribution équitable permet de réduire la consommation d' $H_2$  du système hybride d'environ 8,48% par rapport à la quantité d' $H_2$  consommée sous la SGE proposée. Il convient de noter que la région de faibles densités de courant des PAC se situe généralement près de leur zone de meilleur rendement énergétique. La SGE proposée quant à elle sollicite les PAC dans leur zone de fortes densités de courant afin de minimiser le nombre de PAC nécessaire pour répondre à la demande de la charge. Bien que le gain obtenu en termes de durabilité du système multi-PAC avec la SGE proposée soit très significatif par rapport au gain obtenu en termes de réduction de consommation d' $H_2$  avec la SGE conventionnelle de distribution équitable, il serait intéressant d'adopter une approche de gestion d'énergie basée sur de l'optimisation multi objectif dans les travaux futurs pour assurer un compromis entre ces deux critères.

- Dans l'étude réalisée dans cette thèse, avant de faire entrer en jeu les SGE évaluées, le fonctionnement du système multi-PAC était régi par la SGE de distribution équitable pendant les cinq premières heures pour notamment collecter les premiers échantillons de puissance maximale des PAC, nécessaires pour la première séance de pronostic de RUL. En réalité, ce scénario était important pour éviter que la SGE proposée basée sur les pronostics de RULs s'applique au système multi-PAC composé de PAC neuves. En d'autres termes, si les PAC étaient neuves lorsque la SGE proposée entrait en jeu, il aurait fallu réaliser les premières prédictions de puissance maximale sur de très long horizons pour estimer le RUL des PAC, ce qui nécessiterait des temps de calcul extrêmement longs. Là-dessus, la détermination du bon niveau de complexité des algorithmes de pronostic de RUL des PAC pour une utilisation fiable et bénéfique du pronostic dans la gestion d'énergie pourrait faire l'objet d'une prochaine étude.
- Les RULs des PAC ont été estimés dans cette étude en adoptant une approche de pronostic basée sur les données. La technique de prédictions par morceaux intercalées de phase d'apprentissage fut utilisée pour prédire l'indicateur de santé lorsque l'horizon de prédiction était plus long que la base de données d'apprentissage. En effet, les données

## *Perspectives*

d'entrées du réseau de neurones étant systématiquement normalisées pour une meilleure optimisation des poids synaptiques pendant la phase d'apprentissage, cette technique permettait d'avoir un pas en phase de prédiction identique à celui avec lequel le réseau de neurones aurait été entraîné. Dans les travaux futurs, il pourrait être intéressant d'adopter une approche de pronostic hybride pour être en mesure de prédire l'indicateur de santé des PAC sur un horizon plus long que la base de données historiques. En effet, la présence de la variable temporelle dans le modèle de dégradation de PAC sous l'approche de pronostic hybride permettrait de prédire l'indicateur de santé sur un horizon n'ayant pas forcément la même longueur que la base de données d'apprentissage de l'algorithme de pronostic.

- Dans cette thèse, pour estimer les puissances maximales des PAC, les tests de polarisation ont été réalisés directement sur les PAC plutôt que sur un modèle de PAC identifié en ligne. L'intégration d'un module d'identification en ligne de modèle de PAC dans l'environnement de simulation sera nécessaire dans la phase de validation expérimentale du concept proposé et étudié dans cette thèse car cela permettrait d'éviter tout scénario d'intermittence dans l'alimentation de la charge et toute consommation supplémentaire d' $H_2$  pendant les tests de polarisation.
- L'intégration de l'approche de gestion d'énergie basée sur l'intelligence artificielle (IA) dans la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs peut être prometteuse en ce qui concerne l'amélioration des performances des systèmes multi-PAC. En effet, l'approche de gestion d'énergie basée sur l'IA repose sur des prédictions ou sur l'optimisation à court terme du profil de mission en fonction des habitudes du conducteur du véhicule. De telles prédictions pourraient permettre de gérer encore plus intelligemment les cycles de démarrages-arrêts des PAC et par conséquent de ralentir davantage leur vieillissement. En effet, l'optimisation des cycles de démarrages-arrêts permet de limiter la dégradation des PAC en réduisant l'impact des régimes transitoires sur le vieillissement des PAC sans oublier leur rendement énergétique.
- Finalement, bien que les systèmes multi-PAC soient étudiés dans cette thèse dans le cadre général d'une application automobile, il convient de préciser qu'ils sont propices à une



## *Perspectives*

application à court terme aux véhicules poids lourds. Le gros gabarit de ces véhicules donne la possibilité de disposer convenablement les PAC vis-à-vis des phénomènes de transfert de masse et de charge. De plus, les véhicules poids lourds (à l'exception des autobus) sont généralement utilisés suivant le mode de conduite rural ou autoroutier. Ces modes de conduites favorisent l'obtention de bonnes performances de durabilité et de rendement énergétique des PAC car la dynamique des profils de mission mis en jeu est généralement plus faible que celle des profils urbains.



# Conclusion générale

Outre le manque d'infrastructures de recharge en hydrogène, les verrous scientifiques et technologiques tels que la courte durée de vie des PAC et la faible tolérance aux pannes auxquels sont confrontés les systèmes mono-PAC, freinent l'introduction et la promotion des véhicules à hydrogène sur le marché de l'automobile. D'après le département de l'énergie des États-Unis (U.S DoE), une durée de vie de PAC d'au moins 8000 heures serait attendue pour que les véhicules à hydrogène puissent être compétitifs sur le marché de l'automobile, au vu des multiples avantages qu'ils présentent déjà (aucune émission de gaz polluants, rendement énergétique plus élevé que celui des véhicules à essence/diesel, faible signature acoustique, etc.).

Le concept de systèmes multi-PAC qui consiste à associer plusieurs systèmes PAC de puissances modérées au lieu d'utiliser un seul et unique gros système PAC de forte puissance, se révèle être très prometteur parmi les différentes solutions proposées dans la littérature pour améliorer les critères de durabilité, de tolérance aux pannes et de rendement énergétique des systèmes à piles à combustible. En effet, la redondance offerte par la multiplicité des PAC dans les systèmes multi-PAC est un atout potentiel qui peut être exploité au moyen de la gestion d'énergie pour étendre leur durée de vie, augmenter leur tolérance aux pannes et élargir leur plage de puissances optimales (zone de meilleur rendement énergétique). Cependant, toutes ces performances prometteuses qu'un système multi-PAC pourrait offrir repose entièrement sur la qualité de la SGE qui régit son fonctionnement.

Dans cette thèse, l'idée novatrice proposée et étudiée pour concevoir une SGE capable de mettre en évidence les performances des systèmes multi-PAC est de se servir du pronostic, l'une des composantes de la discipline du PHM « *Prognostic and Health Management* », pour prendre des décisions de gestion d'énergie des systèmes multi-PAC. L'avantage du pronostic est qu'il permet d'estimer régulièrement la durée de vie restante (« *Remaining Useful Life – RUL* ») des PAC, une donnée concrète capable d'éclairer la gestion d'énergie future des PAC en vue d'une meilleure durabilité du système multi-PAC.

## *Conclusion*

L'étude réalisée dans cette thèse a abouti à deux différentes contributions. La première a été la mise en place d'un algorithme de pronostic de RUL de PAC en usage réel basé sur le réseau de neurones de rétropropagation. La seconde a été le développement d'une SGE de système multi-PAC appelée SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC. Par ailleurs, la réalisation de plusieurs autres travaux tels que l'assemblage des modèles statique, dynamique et de vieillissement des PAC, l'élaboration d'une méthodologie d'estimation en ligne de l'état de santé des PAC et la mise en œuvre d'une SGE de la batterie utilisée pour hybrider le système multi-PAC, a été essentielle dans la phase de validation numérique du concept.

Par ses capacités à équilibrer les niveaux de dégradation des PAC grâce aux résultats de pronostic et à solliciter le minimum de PAC pour répondre aux besoins de puissance tout en optimisant leurs cycles de démarrages-arrêts, la SGE proposée se démarque des SGE conventionnelles de systèmes multi-PAC. En effet, des travaux de simulations ont été réalisés sur un système multi-PAC de 2000 W composé de quatre PAC de 500 W, sous différentes SGE. D'après les résultats de ces simulations, la SGE proposée serait capable de faire atteindre au système multi-PAC une durée de vie qui est 2,48 fois ou 2,38 fois plus importante que celle qu'il aurait respectivement sous la SGE de distribution équitable ou la SGE du Daisy-Chain. En ce qui concerne le critère de consommation d' $H_2$ , si le système multi-PAC consomme quasiment la même quantité d' $H_2$  sous la SGE proposée que sous la SGE du Daisy-Chain, la SGE de distribution équitable quant à elle permet de réduire la consommation d' $H_2$  du système multi-PAC d'environ 8,48% par rapport à la SGE proposée. En effet, la répartition équitable de la puissance demandée entre les PAC sous la SGE de distribution équitable favorise souvent l'utilisation des PAC dans leur zone de meilleur rendement énergétique située vers la région de faibles densités de courant. Toutefois, le coût d'exploitation global du système hybride multi-PAC/ batterie peut être réduit d'environ 50,26% en passant de la SGE de distribution équitable à la SGE proposée. En effet, l'important gain obtenu en termes de vieillissement du système multi-PAC sous la SGE proposée l'emporte sur la quantité supplémentaire d' $H_2$  consommée par le système et ce, d'autant plus que le coût de la dégradation du système multi-PAC prédomine sur le coût de la consommation d' $H_2$ . Par rapport à la SGE du Daisy-Chain, la SGE proposée permet de réduire le coût d'exploitation global du système multi-PAC d'environ 18,62 %. Ce pourcentage est plus faible que celui qui a été obtenu à l'issue de la comparaison entre la SGE proposée et la SGE de distribution équitable car sous la SGE du Daisy-Chain, certaines PAC ne s'étaient pas encore usées avant la fin de vie du

## *Conclusion*

ystème multi-PAC. En revanche, sous la SGE de distribution équitable, l'instant de fin de vie d'une PAC représente également l'instant de fin de vie de toutes les autres PAC puisqu'elles sont toutes utilisées de la même manière .

Une autre étude comparative a été réalisée dans cette thèse entre la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs (la SGE proposée) et sa variante qui se base plutôt sur les estimations de puissance maximale ( $P_{max}$ ) des PAC. L'objectif de cette dernière étude était de s'assurer que l'approche de la gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs est au moins à la hauteur de l'approche de la gestion d'énergie basée sur les estimations de  $P_{max}$  car les pronostics de RULs sont de toute évidence moins précis que les estimations de  $P_{max}$ . Les résultats de cette analyse comparative ont été convaincants quant à la fiabilité du concept de gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs. Par ailleurs, ils ont permis d'identifier une perspective qu'il serait intéressant de prendre en compte dans les travaux futurs de cette thèse.

En effet, l'un des objectifs des travaux futurs de cette thèse pourrait être de mettre en évidence les limites de l'approche de la gestion basée sur les estimations de  $P_{max}$  par rapport à l'approche de la gestion d'énergie basée sur les pronostics de RULs, en matière d'amélioration de la durabilité des systèmes multi-PAC. Pour ce faire, il sera nécessaire de concevoir des SGE basées non seulement sur une comparaison statique des RULs des PAC comme ce qui a été fait dans cette thèse mais aussi sur l'évolution temporelle historique du RUL de chaque PAC du système multi-PAC.



# Bibliographie

[EEA, 2016] European Environment Agency. **Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2014 and inventory report 2016**. EEA report, No 15/2016.

[IEA, 2019] International Energy Agency. **Transport sector CO<sub>2</sub> emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030**. IEA, Paris.

[U.S DoE, 2015] Fuel Cell Technologies Office, Energy Efficiency and Renewable Energy. **Fuel cells fact sheet**. US DoE, 2015.

[Ahmad et al., 2022] Shahbaz Ahmad, Tahir Nawaz, Asghar Ali, Mehmet Fatih Orhan, Ayesha Samreen, Arunachala M. Kannan. **An overview of proton exchange membranes for fuel cells: Materials and manufacturing**. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 44, 2022, Pages 19086-19131, ISSN 0360-3199.

[Ao et al., 2022] Yunjin Ao, Salah Laghrouche, Daniel Depernet. **Diagnosis of proton exchange membrane fuel cell system based on adaptive neural fuzzy inference system and electrochemical impedance spectroscopy**. *Energy Conversion and Management*, Volume 256, 2022, 115391, ISSN 0196-8904.

[Arora et al., 2019] Divyesh Arora. **Hybridation directe d'une pile à combustible PEM et d'un organe supercapacitif de stockage : étude comparative du vieillissement en cyclage urbain, et gestion optimale de la consommation d'hydrogène**. 2019.

[Aubry et al., 2022] J. Aubry, N. Yousfi Steiner, S. Morando, N. Zerhouni, D. Hissel. **Fuel cell diagnosis methods for embedded automotive applications**. *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 6687-6706, ISSN 2352-4847.

[Aubry et al., 2020] J. AUBRY, N. Y. Steiner, S. Morando, N. Zerhouni and D. Hissel. **Fault tolerant control of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell based on a Modified Failure Mode and Effect Analysis**. *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Gijon, Spain, 2020, pp. 1-5.

## *Bibliographie*

[Bahrami et al., 2020] Bahrami M, Martin J-P, Maranzana G, Pierfederici S, Weber M, Meibody-Tabar F, Zandi M. **Multi-Stack Lifetime Improvement through Adapted Power Electronic Architecture in a Fuel Cell Hybrid System.** *Mathematics*, 2020; 8(5):739.

[Bahrami et al., 2021] Milad Bahrami, Jean-Philippe Martin, Gaël Maranzana, Serge Pierfederici, Mathieu Weber, Sophie Didierjean. **Fuel cell management system: An approach to increase its durability.** *Applied Energy*, Volume 306, Part B, 2022, 118070, ISSN 0306-2619.

[Bankati et al., 2022] W. R. Bankati, A. Macias, M. Soleymani, L. Boulon and S. Jemei. **An Online Energy Management Strategy For Multi-Fuel Cell Stacks Systems Using Remaining Useful Life Prognostic.** *2022 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Merced, CA, USA, 2022, pp. 1-6.

[Battelle Memorial Institute, 2017] Rapport rédigé par Battelle, USA et fourni au U.S DoE. **Manufacturing Cost Analysis of 1-, 5-, 10- and 25-kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications.** 2017.

[Benagoune et al., 2022] Khaled Benagoune, Meiling Yue, Samir Jemei, Noureddine Zerhouni. **A data-driven method for multi-step-ahead prediction and long-term prognostics of proton exchange membrane fuel cell.** *Applied Energy*, Volume 313, 2022, 118835, ISSN 0306-2619.

[Bethoux et al., 2020] Olivier Bethoux. **Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives.** *Energies* 2020, 13, 5843.

[Blal et al., 2018] Mohamed Blal, Ali Benatiallah, Ammar NeÇaibia, Salah Lachtar, Nordine Sahouane, Ahmed Belasri. **Contribution and investigation to compare models parameters of (PEMFC), comprehensives review of fuel cell models and their degradation.** *Energy*, Volume 168, 2019, Pages 182-199, ISSN 0360-5442.

[Boulon et al., 2010] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol and M. -C. Pera. **From Modeling to Control of a PEM Fuel Cell Using Energetic Macroscopic Representation.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 6, pp. 1882-1891, June 2010.

[Chaoui et al., 2020] H. Chaoui, M. Kandidayeni, L. Boulon, S. Kelouwani and H. Gualous. **Real-Time Parameter Estimation of a Fuel Cell for Remaining Useful Life Assessment.** *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 7, pp. 7470-7479, July 2021.



## *Bibliographie*

[H. Chen et al., 2022] Huicui Chen, Yihao Liu, Chenghao Deng, Jinrui Chen. **Research on improving dynamic response ability of 30kW real fuel cell system based on operating parameter optimization.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 3, 2023, Pages 1075-1089, ISSN 0360-3199.

[H. Chen et al., 2018] Huicui Chen, Zhen Song, Xin Zhao, Tong Zhang, Pucheng Pei, Chen Liang. **A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle.** *Applied Energy*, Volume 224, 2018, Pages 289-299, ISSN 0306-2619.

[J. Chen et al., 2017] Jiayu Chen, Dong Zhou, Chuan Lyu, Chen Lu. **A novel health indicator for PEMFC state of health estimation and remaining useful life prediction.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 31, 2017, Pages 20230-20238, ISSN 0360-3199.

[K. Chen et al., 2018] Kui Chen, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. **Fuel cell health prognosis using Unscented Kalman Filter: Postal fuel cell electric vehicles case study.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 3, 2019, Pages 1930-1939, ISSN 0360-3199.

[K. Chen et al., 2018] Kui Chen, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. **Degradation model of proton exchange membrane fuel cell based on a novel hybrid method.** *Applied Energy*, Volume 252, 2019, 113439, ISSN 0306-2619.

[K. Chen et al., 2020] Kui Chen, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. **Aging prognosis model of proton exchange membrane fuel cell in different operating conditions.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 20, 2020, Pages 11761-11772, ISSN 0360-3199.

[K. Chen et al., 2021] Kui Chen, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. **Prognosis of fuel cell degradation under different applications using wavelet analysis and nonlinear autoregressive exogenous neural network.** *Renewable Energy*, Volume 179, 2021, Pages 802-814, ISSN 0960-1481.

[K. Chen et al., 2020] Kui Chen, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. **Health state prognostic of fuel cell based on wavelet neural network and cuckoo search algorithm.** *ISA Transactions*, Volume 113, 2021, Pages 175-184, ISSN 0019-0578.

## *Bibliographie*

[Cheng et al., 2018] Yujie Cheng, Noureddine Zerhouni, Chen Lu. **A hybrid remaining useful life prognostic method for proton exchange membrane fuel cell.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 27, 2018, Pages 12314-12327, ISSN 0360-3199.

[De Bernardinis et al., 2008] Alexandre De Bernardinis, Marie-Cécile Péra, James Garnier, Daniel Hissel, Gérard Coquery, Jean-Marie Kauffmann. **Fuel cells multi-stack power architectures and experimental validation of 1kW parallel twin stack PEFC generator based on high frequency magnetic coupling dedicated to on board power unit.** *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 8, 2008, Pages 2367-2383, ISSN 0196-8904.

[Dépature et al., 2013] C. Dépature, L. Boulon, P. Sicard and M. Fournier. **Simulation model of a multi-stack fuel cell system.** *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 2013, pp. 1-10.

[Dépature et al., 2017] C. Departure, S. Jemei, L. Boulon, A. Bouscayrol, N. Marx, S. Morando, A. Castaings. **IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 - Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle.** *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hangzhou, China, 2016, pp. 1-6.

[Dépature et al., 2020] C. Dépature, A. Macías, A. Jácome, L. Boulon, J. Solano, J. P. Trovão. **Fuel cell/supercapacitor passive configuration sizing approach for vehicular applications.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 50, 2020, Pages 26501-26512, ISSN 0360-3199.

[De-Troya et al., 2016] José J. de-Troya, Carlos Álvarez, Carlos Fernández-Garrido, Luis Carral. **Analysing the possibilities of using fuel cells in ships.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 4, 2016, Pages 2853-2866, ISSN 0360-3199.

[Dhimish et al., 2021] Mahmoud Dhimish, Romênia G. Vieira, Ghadeer Badran. **Investigating the stability and degradation of hydrogen PEM fuel cell.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 74, 2021, Pages 37017-37028, ISSN 0360-3199.

[Diab et al., 2022] Y. Diab, F. Auger, E. Schaeffer, S. Chevalier, and A. Allahham. **Real-Time Estimation of PEMFC Parameters Using a Continuous-Discrete Extended Kalman Filter Derived from a Pseudo Two-Dimensional Model.** *Energies* 15, no. 7: 2337, 2022.

## *Bibliographie*

[Dijoux et al., 2017] Etienne Dijoux, Nadia Yousfi Steiner, Michel Benne, Marie-Cécile Péra, Brigitte Grondin Pérez. **A review of fault tolerant control strategies applied to proton exchange membrane fuel cell systems.** *Journal of Power Sources*, Volume 359, 2017, Pages 119-133, ISSN 0378-7753.

[Dijoux et al., 2022] Dijoux E, Steiner NY, Benne M, Péra M-C, Grondin-Perez B. **Experimental Validation of an Active Fault Tolerant Control Strategy Applied to a Proton Exchange Membrane Fuel Cell.** *Electrochem*, 2022; 3(4):633-652.

[Dirkes et al., 2022] Steffen Dirkes, Julian Leidig, Philipp Fisch, Stefan Pischinger. **Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part I: State of the art and conceptual design.** *Energy Conversion and Management*, Volume 277, 2023, 116598, ISSN 0196-8904.

[Dyanty et al., 2019] Noluntu Dyanty, Adrian Parsons, Piotr Bujlo, Sivakumar Pasupathi. **Behavioural study of PEMFC during start-up/shutdown cycling for aeronautic applications.** *Mater Renew Sustain Energy* 8, 2019.

[Fletcher et al., 2016] Tom Fletcher, Rob Thring, Martin Watkinson. **An Energy Management Strategy to concurrently optimise fuel consumption & PEM fuel cell lifetime in a hybrid vehicle.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 46, 2016, Pages 21503-21515, ISSN 0360-3199.

[Garcia et al., 2014] J. E. Garcia, D. F. Herrera, L. Boulon, P. Sicard and A. Hernandez. **Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system.** *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Istanbul, Turkey, 2014, pp. 218-223.

[Garcia-Sanchez et al., 2019] D. Garcia-Sanchez, T. Morawietz, P. Gama da Rocha, R. Hiesgen, P. Gazdzicki, K.A. Friedrich. **Local impact of load cycling on degradation in polymer electrolyte fuel cells.** *Applied Energy*, Volume 259, 2020, 114210, ISSN 0306-2619.

[Ghaderi et al., 2021] R. Ghaderi, M. Kandidayeni, L. Boulon and J. P. Trovão. **Quadratic Programming based Energy Management in a Multi-Stack Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle.** *2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Gijon, Spain, 2021, pp. 1-6.

## *Bibliographie*

[Gittleman et al., 2019] Craig S. Gittleman, Anusorn Kongkanand, David Masten, Wenbin Gu. **Materials research and development focus areas for low cost automotive proton-exchange membrane fuel cells.** *Current Opinion in Electrochemistry*, Volume 18, 2019, Pages 81-89, ISSN 2451-9103.

[Greene et al., 2020] David L. Greene, Joan M. Ogden, Zhenhong Lin. **Challenges in the designing, planning and deployment of hydrogen refueling infrastructure for fuel cell electric vehicles.** *eTransportation*, Volume 6, 2020, 100086, ISSN 2590-1168.

[Hahn et al., 2020] Sergei Hahn, Jochen Braun, Helerson Kemmer, Hans-Christian Reuss. **Optimization of the efficiency and degradation rate of an automotive fuel cell system.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 57, 2021, Pages 29459-29477, ISSN 0360-3199.

[Han et al., 2017] Xu Han, Feiqiang Li, Tao Zhang, Tong Zhang, Ke Song. **Economic energy management strategy design and simulation for a dual-stack fuel cell electric vehicle.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 16, 2017, Pages 11584-11595, ISSN 0360-3199.

[Herr et al., 2017] Nathalie Herr, Jean-Marc Nicod, Christophe Varnier, Louise Jardin, Antonella Sorrentino, Daniel Hissel, Marie-Cécile Péra. **Decision process to manage useful life of multi-stacks fuel cell systems under service constraint.** *Renewable Energy*, Volume 105, 2017, Pages 590-600, ISSN 0960-1481.

[Hodas et al., 2018] Hodas Nathan O., Stinis Panos. **Doing the Impossible: Why Neural Networks Can Be Trained at All.** *Frontiers in Psychology*, Volume 9, 2018, ISSN 1664-1078.

[Hou et al., 2010] Yongping Hou, Zhihua Yang, Gang Wan. **An improved dynamic voltage model of PEM fuel cell stack.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 20, 2010, Pages 11154-11160, ISSN 0360-3199.

[Hu et al., 2018] Hu Y, Li W, Xu K, Zahid T, Qin F, Li C. **Energy Management Strategy for a Hybrid Electric Vehicle Based on Deep Reinforcement Learning.** *Applied Sciences*, 2018; 8(2):187.

## *Bibliographie*

[Hua et al., 2020] Z. Hua, Z. Zheng, E. Pahon, M. -C. Péra and F. Gao. **Health Indicators for PEMFC Systems Life Prediction Under Both Static and Dynamic Operating Conditions.** *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2020, pp. 3963-3968.

[Hua et al., 2020] Zhiguang Hua, Zhixue Zheng, Marie-Cécile Péra, Fei Gao. **Remaining useful life prediction of PEMFC systems based on the multi-input echo state network.** *Applied Energy*, Volume 265, 2020, 114791, ISSN 0306-2619.

[Hua et al., 2019] Z. Hua, Z. Zheng, F. Gao, and M. -C. Péra. **Challenges of the Remaining Useful Life Prediction for Proton Exchange Membrane Fuel Cells.** *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 6382-6387.

[Jemei, 2018] Samir Jemei. **Hybridization, Diagnostic and Prognostic of Proton Exchange Membrane Fuel Cells.** *ISTE Ltd*, London, 2018.

[Jian et al., 2021] Bingcong Jian, Hanqing Wang. **Hardware-in-the-loop real-time validation of fuel cell electric vehicle power system based on multi-stack fuel cell construction.** *Journal of Cleaner Production*, Volume 331, 2022, 129807, ISSN 0959-6526.

[Jouin et al., 2013] Marine Jouin, Rafael Gouriveau, Daniel Hissel, Marie-Cécile Péra, Nouredine Zerhouni. **Prognostics and Health Management of PEMFC – State of the art and remaining challenges.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 38, Issue 35, 2013, Pages 15307-15317, ISSN 0360-3199.

[Jouin et al., 2016] Marine Jouin. **Contribution au pronostic d'une pile à combustible de type PEMFC-approche par filtrage particulaire.** *Sciences de l'ingénieur [Physics]*. Université de Bourgogne Franche-Comté, 2016. Français. Tel-01264824

[Jouin et al., 2013] Marine Jouin, Rafael Gouriveau, Daniel Hissel, Marie-Cécile Péra, Nouredine Zerhouni. **Prognostics of PEM fuel cell in a particle filtering framework.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 39, Issue 1, 2014, Pages 481-494, ISSN 0360-3199.

[Jouin et al., 2015] Marine Jouin, Rafael Gouriveau, Daniel Hissel, Marie-Cécile Péra, Nouredine Zerhouni. **Degradations analysis and aging modeling for health assessment and**

## *Bibliographie*

**prognostics of PEMFC.** *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 148, 2016, Pages 78-95, ISSN 0951-8320.

**[Kallo, 2015]** Josef Kallo. **DLR leads HY4 project for four-seater fuel cell aircraft.** *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2015, Issue 11, 2015, Page 13, ISSN 1464-2859.

**[Kandidayeni et al., 2022]** Mohsen Kandidayeni, Mehdi Soleymani, Alvaro Macias, João P. Trovão, Loïc Boulon. **Online power and efficiency estimation of a fuel cell system for adaptive energy management designs.** *Energy Conversion and Management*, Volume 255, 2022, 115324, ISSN 0196-8904.

**[Kandidayeni et al., 2022]** M. Kandidayeni, J.P. Trovão, M. Soleymani, L. Boulon. **Towards health-aware energy management strategies in fuel cell hybrid electric vehicles: A review.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 17, 2022, Pages 10021-10043, ISSN 0360-3199.

**[Khalatbarisoltani et al., 2019]** Arash Khalatbari Soltani, Mohsen Kandidayeni, Loïc Boulon, David Lupien St-Pierre. **Modular Energy Systems in Vehicular Applications.** *Energy Procedia*, Volume 162, 2019, Pages 14-23, ISSN 1876-6102.

**[Khalatbarisoltani et al., 2019]** A. Khalatbarisoltani, L. Boulon, D. L. St-Pierre and X. Hu. **Decentralized Implementation of an Optimal Energy Management Strategy in Interconnected Modular Fuel Cell Systems.** *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 1-5.

**[Khalatbarisoltani et al., 2022]** A. Khalatbarisoltani, M. Kandidayeni, L. Boulon and X. Hu. **Comparison of Decentralized ADMM Optimization Algorithms for Power Allocation in Modular Fuel Cell Vehicles.** *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 27, no. 5, pp. 3297-3308, Oct. 2022.

**[Khalatbarisoltani et al., 2018]** A. Khalatbarisoltani, J. C. Oviedo Cepeda, L. Boulon, D. Lupien St-Pierre, J. Solano, and C. Duarte. **A New Real-Time Centralized Energy Management Strategy for Modular Electric Vehicles.** *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1-5.

## *Bibliographie*

**[Khalatbarisoltani et al., 2020]** A. Khalatbarisoltani, M. Kandidayeni, L. Boulon and X. Hu. **Power Allocation Strategy Based on Decentralized Convex Optimization in Modular Fuel Cell Systems for Vehicular Applications.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 12, pp. 14563-14574, Dec. 2020.

**[Khanafari et al., 2022]** Ali Khanafari, Aria Alasty, Mohammad Jafar Kermani, Saeed Asghari. **Flooding and dehydration diagnosis in a polymer electrolyte membrane fuel cell stack using an experimental adaptive neuro-fuzzy inference system.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 81, 2022, Pages 34628-34639, ISSN 0360-3199.

**[Kim et al., 2010]** Hyun-il Kim, Chan Young Cho, Jin Hyun Nam, Donghoon Shin, Tae-Yong Chung. **A simple dynamic model for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) power modules: Parameter estimation and model prediction.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 8, 2010, Pages 3656-3663, ISSN 0360-3199.

**[Kölbl et al., 2022]** Julian Kölbl, Alessandro Ferrara, Christoph Hametner. **Impact of Energy Management Strategy Calibration on Component Degradation and Fuel Economy of Heavy-Duty Fuel Cell Vehicles.** *IFAC-PapersOnLine*, Volume 55, Issue 24, 2022, Pages 317-322, ISSN 2405-8963.

**[Laribi et al., 2021]** Slimane Laribi, Khaled Mammam, Fatima Zohra Arama, Touhami Ghaitaoui. **Fractional order model for diagnosis of flooding and drying of the proton exchange membrane fuel cell.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 66, 2021, Pages 33287-33299, ISSN 0360-3199.

**[B. Li et al., 2022]** Bing Li, Kechuang Wan, Meng Xie, Tiankuo Chu, Xiaolei Wang, Xiang Li, Daijun Yang, Pingwen Ming, Cunman Zhang. **Durability degradation mechanism and consistency analysis for proton exchange membrane fuel cell stack.** *Applied Energy*, Volume 314, 2022, 119020, ISSN 0306-2619.

**[C. Li et al., 2020]** C. Li and Y. Hu. **On-line Degradation Estimation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell based on IMM-EKF.** *Chinese Automation Congress (CAC)*, Shanghai, China, 2020, pp. 6668-6672, 2020.



## *Bibliographie*

[H. Li et al., 2020] Han Li, Wei Zhao, Yuxi Zhang, Enrico Zio. **Remaining useful life prediction using multi-scale deep convolutional neural network.** *Applied Soft Computing*, Volume 89, 2020, 106113, ISSN 1568-4946.

[Q. Li et al., 2022] Qi Li, Liangdong Cai, Liangzhen Yin, Tianhong Wang, Luoyi Li, Shuqi Xie, Weirong Chen. **An Energy Management Strategy Considering the Economy and Lifetime of Multi-Stack Fuel Cell Hybrid System.** *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022.

[Q. Li et al., 2021] Qinghe Li, Liu Zhiqiang, Sun Yi, Yang Sheng, Deng Chengwei. **A Review on Temperature Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cells.** *Processes* 2021, 9, 235.

[X. Li et al., 2021] Xin Li, Zhiyu Shang, Fei Peng, Liwei Li, Yuanzhe Zhao, Zhixiang Liu. **Increment-oriented online power distribution strategy for multi-stack proton exchange membrane fuel cell systems aimed at collaborative performance enhancement.** *Journal of Power Sources*, Volume 512, 2021, 230512, ISSN 0378-7753.

[X. Li et al., 2022] Xin Li, Ruiliang Liu, Ming Yao, Jianbo Zhang, Yong Liu. **Performance of polymer electrolyte fuel cell under wet/dry conditions with hydrophilic and hydrophobic electrospun microporous layers.** *Journal of Power Sources*, Volume 545, 2022, 231896, ISSN 0378-7753.

[Z. Li et al., 2018] Zhongliang Li, Rachid Outbib, Stefan Giurgea, Daniel Hissel, Alain Giraud, Pascal Couderc. **Fault diagnosis for fuel cell systems: A data-driven approach using high-precise voltage sensors.** *Renewable Energy*, Volume 135, 2019, Pages 1435-1444, ISSN 0960-1481.

[Lian et al., 2020] R. Lian, H. Tan, J. Peng, Q. Li, and Y. Wu. **Cross-Type Transfer for Deep Reinforcement Learning Based Hybrid Electric Vehicle Energy Management.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 8, pp. 8367-8380, Aug. 2020.

[Liang et al., 2022] YiFan Liang, QianChao Liang, JianFeng Zhao, JunNeng He. **Downgrade power allocation for multi-fuel cell system (MFCS) based on minimum hydrogen consumption.** *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 15574-15583, ISSN 2352-4847.



## *Bibliographie*

[Liang et al., 2022] YiFan Liang, QianChao Liang, JianFeng Zhao, MengJie Li, JinYi Hu, Yang Chen. **Online identification of optimal efficiency of multi-stack fuel cells (MFCS).** *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 4, 2022, Pages 979-989, ISSN 2352-4847.

[Lin et al., 2015] R. Lin, X. Cui, J. Shan, L. Técher, F. Xiong, Q. Zhang. **Investigating the effect of start-up and shut-down cycles on the performance of the proton exchange membrane fuel cell by segmented cell technology.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 40, Issue 43, 2015, Pages 14952-14962, ISSN 0360-3199.

[H. Liu et al., 2020] Hao Liu, Jian Chen, Daniel Hissel, Jianguo Lu, Ming Hou, Zhigang Shao. **Prognostics methods and degradation indexes of proton exchange membrane fuel cells: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 123, 2020, 109721, ISSN 1364-0321.

[J. Liu et al., 2018] Jiawei Liu, Qi Li, Weirong Chen, Yu Yan, Yibin Qiu, Taiqiang Cao. **Remaining useful life prediction of PEMFC based on long short-term memory recurrent neural networks.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 11, 2019, Pages 5470-5480, ISSN 0360-3199.

[J. Liu et al., 2019] Jiawei Liu, Qi Li, Ying Han, Guorui Zhang, Xiang Meng, Jiayi Yu, Weirong Chen. **PEMFC Residual Life Prediction Using Sparse Autoencoder-Based Deep Neural Network.** *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 1279-1293, Dec. 2019.

[Z. Liu et al., 2022] Zhongyong Liu, Lei Mao, Zhiyong Hu, Weiguo Huang, Qiang Wu, Lisa Jackson. **A novel densely connected neural network for proton exchange membrane fuel cell fault diagnosis.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 94, 2022, Pages 40041-40053, ISSN 0360-3199.

[Lorenzo et al., 2021] Charles Lorenzo, David Bouquain, Samuel Hibon, Daniel Hissel. **Synthesis of degradation mechanisms and of their impacts on degradation rates on proton-exchange membrane fuel cells and lithium-ion nickel–manganese–cobalt batteries in hybrid transport applications.** *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 212, 2021, 107369, ISSN 0951-8320.

## *Bibliographie*

[Lohse-Bush et al., 2020] Henning Lohse-Busch, Kevin Stutenberg, Michael Duoba, Xinyu Liu, Amgad Elgowainy, Michael Wang, Thomas Wallner, Brad Richard, Martha Christenson. **Automotive fuel cell stack and system efficiency and fuel consumption based on vehicle testing on a chassis dynamometer at minus 18 °C to positive 35 °C temperatures.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 1, 2020, Pages 861-872, ISSN 0360-3199.

[Lu et al., 2022] Yanda Lu, Su Zhou, Ding Yin, Lei Fan, Gang Zhang, Jianhua Gao. **Simultaneous fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell systems based on an Incremental Multi-label Classification Network.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 59, 2022, Pages 24963-24977, ISSN 0360-3199.

[Luna et al., 2016] Julio Luna, Samir Jemei, Nadia Yousfi-Steiner, Attila Husar, Maria Serra, Daniel Hissel. **Nonlinear predictive control for durability enhancement and efficiency improvement in a fuel cell power system.** *Journal of Power Sources*, Volume 328, 2016, Pages 250-261, ISSN 0378-7753.

[J. Ma et al., 2020] Jian Ma, Xue Liu, Xinyu Zou, Meiling Yue, Pengchao Shang, Liyuan Kang, Samir Jemei, Chen Lu, Yu Ding, Noureddine Zerhouni, Yujie Cheng. **Degradation prognosis for proton exchange membrane fuel cell based on hybrid transfer learning and intercell differences.** *ISA Transactions*, Volume 113, 2021, Pages 149-165, ISSN 0019-0578.

[R. Ma et al., 2018] Rui Ma, Tao Yang, Elena Breaz, Zhongliang Li, Pascal Briois, Fei Gao. **Data-driven proton exchange membrane fuel cell degradation predication through deep learning method.** *Applied Energy*, Volume 231, 2018, Pages 102-115, ISSN 0306-2619.

[Macias et al., 2019] A. Macias Fernandez, M. Kandidayeni, L. Boulon and H. Chaoui. **An Adaptive State Machine Based Energy Management Strategy for a Multi-Stack Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 220-234, Jan. 2020.

[Maiti et al., 2022] Tushar Kanti Maiti, Jitendra Singh, Prakhar Dixit, Jagannath Majhi, Sakchi Bhushan, Anasuya Bandyopadhyay, Sujay Chattopadhyay. **Advances in perfluorosulfonic acid-based proton exchange membranes for fuel cell applications: A review.** *Chemical Engineering Journal Advances*, Volume 12, 2022, 100372, ISSN 2666-8211.

## *Bibliographie*

[Marx et al., 2014] N. Marx, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel, K. Agbossou. **A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 39, Issue 23, 2014, Pages 12101-12111, ISSN 0360-3199.

[Marx et al., 2015] N. Marx, J. Cardozo, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel and K. Agbossou. **Comparison of the Series and Parallel Architectures for Hybrid Multi-Stack Fuel Cell - Battery Systems.** *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 1-6.

[Marx et al., 2017] N. Marx. **Gestion énergétique et dimensionnement des systèmes hybrides multi-piles à combustible et batterie pour application au transport automobile.** Université du Québec à Trois-Rivières et Université de Bourgogne Franche-Comté, 2017.

[Marx et al., 2016] Neigel Marx, Daniel Hissel, Frédéric Gustin, Loïc Boulon, Kodjo Agbossou. **On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell – Battery system for automotive applications.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 2, 2017, Pages 1518-1526, ISSN 0360-3199.

[Meng et al., 2021] Kai Meng, Haoran Zhou, Ben Chen, Zhengkai Tu. **Dynamic current cycles effect on the degradation characteristic of a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> proton exchange membrane fuel cell.** *Energy*, Volume 224, 2021, 120168, ISSN 0360-5442.

[Meng et al., 2022] Kai Meng, Ben Chen, Haoran Zhou, Jun Shen, Zhengkai Tu. **Experimental investigation on voltage response characteristics of hydrogen-oxygen proton exchange membrane fuel cells under gas starvation.** *Energy Conversion and Management*, Volume 268, 2022, 115973, ISSN 0196-8904.

[Meraghni et al., 2020] Safa Meraghni, Labib Sadek Terrissa, Meiling Yue, Jian Ma, Samir Jemei, Nouredine Zerhouni. **A data-driven digital-twin prognostics method for proton exchange membrane fuel cell remaining useful life prediction.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 2, 2021, Pages 2555-2564, ISSN 0360-3199.

[Moghadari et al., 2022] M. Moghadari, M. Kandidayeni, L. Boulon and H. Chaoui. **Operating Cost Comparison of a Single-Stack and a Multi-Stack Hybrid Fuel Cell Vehicle Through an**

## *Bibliographie*

**Online Hierarchical Strategy.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 1, pp. 267-279, Jan. 2023.

[**Mohammadi et al., 2017**] A. Mohammadi, G. Cirrincione, A. Djerdir, D. Khaburi. **A novel approach for modeling the internal behavior of a PEMFC by using electrical circuits.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 25, 2018, Pages 11539-11549, ISSN 0360-3199.

[**Morando et al., 2016**] Simon Morando, Samir Jemei, Daniel Hissel, Rafael Gouriveau, Nouredine Zerhouni. **Proton exchange membrane fuel cell ageing forecasting algorithm based on Echo State Network.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 2, 2017, Pages 1472-1480, ISSN 0360-3199.

[**Pahon et al., 2021**] Elodie Pahon, David Bouquain, Daniel Hissel, Alexandre Rouet, Christophe Vacquier. **Performance analysis of proton exchange membrane fuel cell in automotive applications.** *Journal of Power Sources*, Elsevier, 2021, 510, pp.230385 (7), hal-03359956.

[**Pahon et al., 2021**] E. Pahon, D. Hissel, S. Jemei, N. Yousfi Steiner. **Signal-based diagnostic approach to enhance fuel cell durability.** *Journal of Power Sources*, Volume 506, 2021, 230223, ISSN 0378-7753.

[**R. Pan et al., 2020**] Rui Pan, Duo Yang, Yujie Wang, Zonghai Chen. **Performance degradation prediction of proton exchange membrane fuel cell using a hybrid prognostic approach.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 55, 2020, Pages 30994-31008, ISSN 0360-3199.

[**T. Pan et al., 2022**] Tongyu Pan, Pei Zhang, Changqing DU, Dongmei Wu. **A review of fault diagnosis and fault-tolerant control of vehicular polymer electrolyte membrane fuel cell power system.** *J. Phys.: Conf. Ser.* 2206 012015, 2022.

[**Patil et al., 2023**] Veeresh Patil, P.V. Reshmi, S. Prajna, Yashaswi, Yashaswini, D. Haleshappa, A. Jayarama, Richard Pinto. **Degradation mechanisms in PEM fuel cells: A brief review.** *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853.

## *Bibliographie*

[Pei et al., 2014] Pucheng Pei, Huicui Chen. **Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review.** *Applied Energy*, Volume 125, 2014, Pages 60-75, ISSN 0306-2619.

[Qin et al., 2016] Qin C, Wang J, Yang D, Li B, Zhang C. **Proton Exchange Membrane Fuel Cell Reversal: A Review.** *Catalysts*, 2016; 6(12):197.

[Qiu et al., 2023] Qiu Y, Zeng T, Zhang C, Wang G, Wang Y, Hu Z, Meng Y, Wei Z. **Progress, and challenges in multi-stack fuel cell system for high power applications: architecture and energy management.** *Green Energy, and Intelligent Transportation*, 2023.

[Redondo-Iglesias et al., 2017] Redondo-Iglesias Eduardo. **Étude du vieillissement des batteries lithium-ion dans les applications "véhicule électrique" : Combinaison des effets de vieillissement calendaire et en cyclage.** 2017.

[Shan et al., 2016] Jing Shan, Rui Lin, Shixiang Xia, Dengcheng Liu, Qian Zhang. **Local resolved investigation of PEMFC performance degradation mechanism during dynamic driving cycle.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 7, 2016, Pages 4239-4250, ISSN 0360-3199.

[Shen et al., 2020] Jun Shen, Liang Xu, Huawei Chang, Zhengkai Tu, Siew Hwa Chan. **Partial flooding and its effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell.** *Energy Conversion and Management*, Volume 207, 2020, 112537, ISSN 0196-8904.

[D. Shi et al., 2022] Dongcai Shi, Lang Cai, Caizhi Zhang, Dongfang Chen, Zehua Pan, Zhe Kang, Yang Liu, Jiujun Zhang. **Fabrication methods, structure design and durability analysis of advanced sealing materials in proton exchange membrane fuel cells.** *Chemical Engineering Journal*, Volume 454, Part 1, 2023, 139995, ISSN 1385-8947.

[J. Shi et al., 2011] J. -y. Shi, M. Shi, L. Wang, and J. -z. Li. **Performance evaluation method of remaining useful life prediction based on pseudo life.** *2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Changchun, China, 2011, pp. 1118-1122.

[W. Shi et al., 2022] Wenzhuo Shi, Yigeng Huangfu, Liangcai Xu, Shengzhao Pang. **Online energy management strategy considering fuel cell fault for multi-stack fuel cell hybrid vehicle**

## *Bibliographie*

**based on multi-agent reinforcement learning.** *Applied Energy*, Volume 328, 2022, 120234, ISSN 0306-2619.

[Snoussi et al., 2018] J. Snoussi, S. B. Elghali, M. Benbouzid and M. F. Mimouni. **Optimal Sizing of Energy Storage Systems Using Frequency-Separation-Based Energy Management for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 10, pp. 9337-9346, Oct. 2018.

[Sorrentino et al., 2020] Sorrentino A, Sundmacher K, Vidakovic-Koch T. **Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation Mechanisms and Their Diagnosis by Frequency Response Analysis Methods: A Review.** *Energies*, 2020; 13(21):5825.

[Suresh et al., 2018] Resmi Suresh, Ganesh Sankaran, Sreeram Joopudi, Suman Roy Choudhury, Shankar Narasimhan, Raghunathan Rengaswamy. **Optimal power distribution control for a network of fuel cell stacks.** *Journal of Process Control*, Volume 74, 2019, Pages 88-98, ISSN 0959-1524.

[Stellantis, 2021] Stellantis. **Hydrogen Fuel Cell Zero Emission.** Press Kit, March 2021.

[Tang et al., 2023] Xingwang Tang, Xiaojin Qin, Kai Wei, Sichuan Xu. **A novel online degradation model for proton exchange membrane fuel cell based on online transfer learning.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 36, 2023, Pages 13617-13632, ISSN 0360-3199.

[Travassos et al., 2011] Travassos, Maria & Rangel, Carmen. (2011). **Polarity Reversal in PEM Fuel Cells by Fuel Starvation.** *Ciência e Tecnologia dos Materiais*. 23. 25-29.

[Truong et al., 2020] Truong HVA, Dao HV, Do TC, Ho CM, To XD, Dang TD, Ahn KK. **Mapping Fuzzy Energy Management Strategy for PEM Fuel Cell–Battery–Supercapacitor Hybrid Excavator.** *Energies*, 2020 ; 13(13) : 3387.

[Vichard et al., 2021] L. Vichard, N. Yousfi Steiner, N. Zerhouni, D. Hissel. **Hybrid fuel cell system degradation modeling methods: A comprehensive review.** *Journal of Power Sources*, Volume 506, 2021, 230071, ISSN 0378-7753.

[Vivas et al., 2022] F.J. Vivas, F. Segura, J.M. Andújar. **Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected residential DC microgrids with multi-stack fuel cell systems: A**

## *Bibliographie*

**multi-objective approach.** *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 32, 2022, 100909, ISSN 2352-4677.

[**J. Wang et al., 2021**] Jingbo Wang, Bo Yang, Chunyuan Zeng, Yijun Chen, Zhengxun Guo, Danyang Li, Haoyin Ye, Ruining Shao, Hongchun Shu, Tao Yu. **Recent advances and summarization of fault diagnosis techniques for proton exchange membrane fuel cell systems: A critical overview.** *Journal of Power Sources*, Volume 500, 2021, 229932, ISSN 0378-7753.

[**P. Wang et al., 2021**] Penghao Wang, Hao Liu, Jian Chen, Xiaoping Qin, Werner Lehnert, Zhigang Shao, Ruiyu Li. **A novel degradation model of proton exchange membrane fuel cells for state of health estimation and prognostics.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 61, 2021, Pages 31353-31361, ISSN 0360-3199.

[**T. Wang et al., 2019**] T. Wang, Q. Li, Y. Qiu, L. Yin, L. Liu, W. Chen. **Efficiency Extreme Point Tracking Strategy Based on FFRLS Online Identification for PEMFC System.** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 952-963, June 2019.

[**Y. Wang et al., 2018**] Yaqing Wang, Yanyan Hu, Changyin Sun. **Remaining Useful Life Prediction for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Stochastic Fusion Filtering.** *IFAC-PapersOnLine*, Volume 51, Issue 21, 2018, Pages 158-162, ISSN 2405-8963.

[**Whiston et al., 2019**] Whiston MM, Azevedo IL, Litster S, Whitefoot KS, Samaras C, Whitacre JF. **Expert assessments of the cost and expected future performance of proton exchange membrane fuel cells for vehicles.** *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2019 Mar 12;116(11):4899-4904.

[**M. Xie et al., 2022**] Meng Xie, Tiankuo Chu, Xiaolei Wang, Bing Li, Daijun Yang, Pingwen Ming, Cunman Zhang. **Study on durability of proton exchange membrane fuel cell stack based on mesoporous carbon supported platinum catalysts under dynamic cycles conditions.** *Journal of Power Sources*, Volume 553, 2023, 232277, ISSN 0378-7753.

[**R. Xie et al., 2020**] Renyou Xie, Rui Ma, Sicheng Pu, Liangcai Xu, Dongdong Zhao, Yigeng Huangfu. **Prognostic for fuel cell based on particle filter and recurrent neural network fusion structure.** *Energy and AI*, Volume 2, 2020, 100017, ISSN 2666-5468.



## *Bibliographie*

[Y. Xie et al., 2020] Yucen Xie, Jianxiao Zou, Chao Peng, Yun Zhu, Fei Gao. **A novel PEM fuel cell remaining useful life prediction method based on singular spectrum analysis and deep Gaussian processes.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 55, 2020, Pages 30942-30956, ISSN 0360-3199.

[Xiong et al., 2017] Rui Xiong, Jiayi Cao, Quanqing Yu. **Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle.** *Applied Energy*, Volume 211, 2018, Pages 538-548, ISSN 0306-2619.

[Xu et al., 2010] Liangfei Xu, Jianqiu Li, Minggao Ouyang, Jianfeng Hua, Xiangjun Li. **Active fault tolerance control system of fuel cell hybrid city bus.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 22, 2010, Pages 12510-12520, ISSN 0360-3199.

[Xun et al., 2022] Qian Xun. **Control and Optimization of Fuel Cell Based Powertrains for Automotive Applications.** Department of Electrical Engineering. Chalmers University of Technology, 2022. ISBN 978-91-7905-639-1.

[C. Yan et al., 2020] C. Yan, J. Chen, H. Liu, L. Kumar, and H. Lu. **Health Management for PEM Fuel Cells Based on an Active Fault Tolerant Control Strategy.** *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 1311-1320, April 2021.

[Y. Yan et al., 2021] Y. Yan, Q. Li, W. Chen, W. Huang, J. Liu, and J. Liu. **Online Control and Power Coordination Method for Multi-stack Fuel Cells System Based on Optimal Power Allocation.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, pp. 8158-8168, Sept. 2021.

[Yang et al., 2017] C. Yang, Z. Li, B. Liang, W. Lu, X. Wang, and H. Liu. **A particle filter and long short-term memory fusion algorithm for failure prognostic of proton exchange membrane fuel cells.** *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Chongqing, China, 2017, pp. 5646-5651.

[Yuan et al., 2020] Hao Yuan, Haifeng Dai, Xuezhe Wei, Pingwen Ming. **Model-based observers for internal states estimation and control of proton exchange membrane fuel cell system: A review.** *Journal of Power Sources*, Volume 468, 2020, 228376, ISSN 0378-7753.

[Yue et al., 2021] Meiling Yue, Zeina Al Masry, Samir Jemei, Noureddine Zerhouni. **An online prognostics-based health management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles.**



## *Bibliographie*

*International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 24, 2021, Pages 13206-13218, ISSN 0360-3199.

[Yue et al., 2020] M. Yue, S. Jemei and N. Zerhouni. **Prognostics-based Energy Management in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Considering RUL Uncertainty.** *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Gijon, Spain, 2020, pp. 1-6.

[Yue et al., 2019] M. Yue, S. Jemei and N. Zerhouni. **Health-Conscious Energy Management for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Based on Prognostics-Enabled Decision-Making.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 11483-11491, Dec. 2019.

[Yue et al., 2019] Meiling Yue, Samir Jemei, Rafael Gouriveau, Noureddine Zerhouni. **Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 13, 2019, Pages 6844-6861, ISSN 0360-3199.

[Yue et al., 2021] Meiling Yue, Samir Jemei, Noureddine Zerhouni, Rafael Gouriveau. **Proton exchange membrane fuel cell system prognostics and decision-making: Current status and perspectives.** *Renewable Energy*, Volume 179, 2021, Pages 2277-2294, ISSN 0960-1481.

[C. Zhang et al., 2021] Caizhi Zhang, Tao Zeng, Qi Wu, Chenghao Deng, Siew Hwa Chan, Zhixiang Liu. **Improved efficiency maximization strategy for vehicular dual-stack fuel cell system considering load state of sub-stacks through predictive soft-loading.** *Renewable Energy*, Volume 179, 2021, Pages 929-944, ISSN 0960-1481.

[D. Zhang et al., 2019] D. Zhang, P. Baraldi, C. Cadet, N. Yousfi-Steiner, C. Bérenguer, E. Zio. **An ensemble of models for integrating dependent sources of information for the prognosis of the remaining useful life of Proton Exchange Membrane Fuel Cells.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 124, 2019, Pages 479-501, ISSN 0888-3270.

[G. Zhang et al., 2022] Gang Zhang, Su Zhou, Jianhua Gao, Lei Fan, Yanda Lu. **Stacks multi-objective allocation optimization for multi-stack fuel cell systems.** *Applied Energy*, Volume 331, 2023, 120370, ISSN 0306-2619.

## *Bibliographie*

[X. Zhang et al., 2020] Xu Zhang, Yupeng Yang, Xuyang Zhang, Hongtan Liu. **Identification of performance degradations in catalyst layer and gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells.** *Journal of Power Sources*, Volume 449, 2020, 227580, ISSN 0378-7753.

[Z. Zhang et al., 2010] Zhuqian Zhang, Li Jia, Haiting He, Xia Wang, Lixin Yang. **Modeling dynamic behaviors of a single cell proton exchange membrane fuel cell under different operating conditions.** *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 41, Issue 6, 2010, Pages 689-698, ISSN 1876-1070.

[D. Zhou et al., 2018] Daming Zhou, Ahmed Al-Durra, Ke Zhang, Alexandre Ravey, Fei Gao. **Online remaining useful lifetime prediction of proton exchange membrane fuel cells using a novel robust methodology.** *Journal of Power Sources*, Volume 399, 2018, Pages 314-328, ISSN 0378-7753.

[J. Zhou et al., 2021] Jianhao Zhou, Jun Liu, Yuan Xue, Yuhui Liao. **Total travel costs minimization strategy of a dual-stack fuel cell logistics truck enhanced with artificial potential field and deep reinforcement learning.** *Energy*, Volume 239, Part A, 2022, 121866, ISSN 0360-5442.

[S. Zhou et al., 2022] Shangwei Zhou, Paul R. Shearing, Dan J.L. Brett, Rhodri Jervis. **Machine learning as an online diagnostic tool for proton exchange membrane fuel cells.** *Current Opinion in Electrochemistry*, Volume 31, 2022, 100867, ISSN 2451-9103.

[S. Zhou et al., 2021] Su Zhou, Gang Zhang, Lei Fan, Jianhua Gao, Fenglai Pei. **Scenario-oriented stacks allocation optimization for multi-stack fuel cell systems.** *Applied Energy*, Volume 308, 2022, 118328, ISSN 0306-2619.

[S. Zhou et al., 2022] Su Zhou, Lei Fan, Gang Zhang, Jianhua Gao, Yanda Lu, Peng Zhao, Chaokai Wen, Lin Shi, Zhe Hu. **A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management.** *Applied Energy*, Volume 310, 2022, 118555, ISSN 0306-2619.

[Y. Zhou et al., 2018] Yang Zhou, Alexandre Ravey, Marie-Cécile Péra, **A survey on driving prediction techniques for predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicles.** *Journal of Power Sources*, Volume 412, 2019, Pages 480-495, ISSN 0378-7753.

## *Bibliographie*

[Zuo et al., 2022] Jian Zuo. **Development of Joint Deterioration and Energy Management Strategies for a Multi-Stack PEM Fuel Cell System.** Automatic. Université Grenoble Alpes, 2022. English, NNT, tel-03865568.

[Zuo et al., 2021] J. Zuo, C. Cadet, Z. Li, C. Bérenguer and R. Outbib. **Post-Prognostics Decision Making Strategy to Manage the Economic Lifetime of a Two-Stack PEMFC System.** *2021 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Orlando, FL, USA, 2021, pp. 1-7.

[Zuo et al., 2022] J. Zuo, C. Cadet, Z. Li, C. Bérenguer and R. Outbib. **Post-prognostics decision-making strategy for load allocation on a stochastically deteriorating multi-stack fuel cell system.** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2022, volume 237, Pages 40 – 57.



# Table des figures

Figure 1: Répartition des émissions mondiales de GES entre les différents secteurs économiques [rapport 2020 de l'Agence Internationale de l'Énergie] .....	25
Figure 2: Répartition des émissions mondiales de GES du secteur du transport entre les différents modes de transport [rapport 2019 de l'Agence Internationale de l'Énergie].....	26
Figure 3: Composants d'une cellule élémentaire de pile à combustible [ H2 Today] .....	29
Figure 4: Schéma illustratif du principe de fonctionnement d'une PEMFC [H2SYS] .....	30
Figure 5: Schéma illustratif d'un système pile à combustible .....	32
Figure 6: Architectures fluidiques des systèmes multi-PAC.....	41
Figure 7: Architectures électriques des systèmes multi-PAC avec apparition de défauts.....	41
Figure 8: Répartition d'une demande entre des PAC identiques de 500 W en n'activant que le minimum PAC nécessaire .....	45
Figure 9: Caractéristique rendement = f(Puissance) d'un système mono-PAC de 70 kW [Truong et al., 2020] .....	46
Figure 10: Courbe du rendement = f(Puissance) d'un système multi-PAC de 75 kW (~70kW) composé de trois PAC de 25 kW, sous l'hypothèse d'une gestion d'énergie adéquate .....	46
Figure 11: Illustration d'un cas de figure permettant de mettre en évidence l'importante tolérance aux pannes des systèmes multi-PAC.....	47
Figure 12: Réduction du coût unitaire de fabrication des PEMFC de 1 kW, 5 kW, 10 kW, 25 kW en fonction de la quantité d'unités produites par an [Battelle Memorial Institute, 2017] .....	49
Figure 13: Les différentes approches de gestion d'énergie des systèmes multi-PAC et quelques exemples de stratégies de gestion d'énergie basées sur ces approches .....	50
Figure 14: Illustration de la stratégie de distribution équitable .....	52
Figure 15: Illustration du principe de la stratégie du Daisy-Chain.....	52
Figure 16: Illustration du principe de la stratégie du Daisy-Chain basée sur une machine d'états adaptative [Macias et al., 2019] .....	53
Figure 17: Illustration du principe de la stratégie de l'inverse généralisée.....	53
Figure 18: Les différentes tâches du PHM et leur définition respective. ....	63
Figure 19: Illustration du principe de l'approche de pronostic basée sur les modèles.....	66
Figure 20: Illustration du principe de l'approche de pronostic basée sur les données .....	67
Figure 21: Illustration du principe de l'approche de pronostic hybride .....	69
Figure 22: Illustration du calcul de RUL à partir de la prédiction de l'indicateur de santé .....	71
Figure 23: Nombre de publications sur les méthodes de pronostic vs nombre de publications sur les SGE des systèmes PAC basées sur le pronostic, sur les cinq dernières années .....	74
Figure 24: Modèle de batterie [Dépature et al., 2017] .....	82

## Table des figures

Figure 25: Illustration de la méthodologie d'intégration du vieillissement en cyclage dans le modèle de PAC .....	86
Figure 26: Caractéristique $V = f(I)$ d'une PAC de 500 W composée de 36 cellules et dont le courant maximal est 27 A.....	91
Figure 27: Caractéristique $P = f(I)$ d'une PAC de 500 W composée de 36 cellules et dont le courant maximal est 27 A.....	91
Figure 28: Illustration de la procédure de réalisation des tests de polarisation réguliers (exemple de trois séances de test).....	94
Figure 29: Classification des différentes approches de pronostic suivant les critères de précision, de complexité et d'applicabilité / [Jemei, 2018] .....	95
Figure 30: Architecture de base d'un réseau de neurones de rétropropagation .....	96
Figure 31: Organigramme de la phase d'apprentissage de l'algorithme de pronostic .....	99
Figure 32: Organigramme de la phase de prédiction de l'algorithme de pronostic .....	100
Figure 33: Illustration de la technique associée à l'algorithme de pronostic proposé pour prédire la puissance maximale des PAC sur de très long horizon de prédiction afin d'estimer leur RUL. ....	101
Figure 34: Synoptique d'un système hybride multi-PAC/ batterie considéré dans une application automobile.....	107
Figure 35: Cycle de classe 3 de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers (WLTP-3) ....	111
Figure 36: Profil de puissance réel d'un véhicule suivant la norme WLTP, profil de puissance remis à échelle en amplitude.....	112
Figure 37: Technique de décomposition d'un profil de mission en partie basses fréquences et hautes fréquences ...	113
Figure 38: Les composantes basses fréquences et hautes fréquences du profil de mission, attribuables respectivement au système multi-PAC et à la batterie .....	113
Figure 39: Cycle d'hystérésis définissant l'état chargé et l'état déchargé de la batterie.....	115
Figure 40: Les différentes actions exécutées par la SGE de la batterie pour respecter les contraintes d'usage de la batterie .....	116
Figure 41: Synoptique descriptif du concept étudié dans cette thèse .....	119
Figure 42: Principe de fonctionnement de la SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les pronostics de RULs des PAC .....	124
Figure 43: Profil de courant soumis au modèle de PAC .....	130
Figure 44: Réponses du modèle de PAC au profil de courant appliqué.....	131
Figure 45: Réponses d'une PAC réelle de (500 W, 25 cellules) au profil de courant soumis au modèle.....	132
Figure 46: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance constant de 0 W pendant 50 heures.....	135
Figure 47: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance constante de 0 W pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global .....	137
Figure 48: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 25%Pmax pendant 50 heures .....	137
Figure 49: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 25%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global .....	138

## Table des figures

Figure 50: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 60%Pmax pendant 50 heures .....	138
Figure 51: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 60%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global .....	139
Figure 52: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 95%Pmax pendant 50 heures .....	139
Figure 53: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 95%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global .....	140
Figure 54: Résultats d'estimation de la puissance maximale du modèle soumis à un profil de puissance quasi constant de 20%Pmax pendant 50 heures .....	140
Figure 55: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance quasi constant de 20%Pmax pendant 50 heures et l'évolution temporelle de son état de santé global .....	141
Figure 56: Résultats d'estimation de l'état de santé du modèle soumis à un profil de puissance en créneau d'amplitude 20%Pmax pendant 50 heures .....	142
Figure 57: Dégradations en cyclage subies par le modèle quand il est soumis au profil de puissance en créneau d'amplitude 20%Pmax pendant 50 heures; l'évolution temporelle de son état de santé global et de sa durée de vie restante (RUL) .....	143
Figure 58: Faisceau de prédictions de l'évolution temporelle de la puissance maximale du modèle quand il est soumis au profil de puissance en créneau d'amplitude 20%Pmax pendant 50 heures .....	144
Figure 59: (a) superposition de l'évolution du RUL prédit par le modèle de pronostic le plus précis (le premier modèle) à celle du RUL réel; (b) superposition de l'évolution du RUL prédit par le second modèle à celle du RUL réel / [J. Shi et al., 2011] .....	146
Figure 60: Puissance réellement demandée au système multi-PAC, imposée par la SGE de la batterie à partir de la composante basses fréquences du profil de mission / SGE proposée .....	149
Figure 61: État de charge de la batterie / SGE proposée .....	150
Figure 62: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE proposée .....	153
Figure 63: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE proposée .....	154
Figure 64: Prédiction des durées de vie restantes (RUL) des PAC chaque cinq heures / SGE proposée .....	155
Figure 65: Dégradation en cyclage subie par chaque PAC / SGE proposée .....	155
Figure 66: Puissance réellement demandée au système multi-PAC sur l'intervalle de temps [62 h ; 62,11 h] / SGE proposée .....	155
Figure 67: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PA et puissance fournie ou reçue par la batterie, sur l'intervalle [62 h ; 62,11 h] / SGE proposée .....	156
Figure 68: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC_batterie / SGE proposée .....	157
Figure 69: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE proposée .....	157

## Table des figures

Figure 70: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE proposée .....	158
Figure 71: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE de distribution équitable .....	160
Figure 72: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC / SGE de distribution équitable.....	162
Figure 73: État de charge de la batterie / SGE de distribution équitable.....	162
Figure 74: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE de distribution équitable .....	163
Figure 75: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC_batterie / SGE de distribution équitable.....	163
Figure 76: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE de distribution équitable .....	163
Figure 77: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE du Daisy-Chain.....	165
Figure 78: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC / SGE du Daisy-Chain .....	166
Figure 79: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC_batterie / SGE du Daisy-Chain.....	166
Figure 80: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE du Daisy-Chain.....	167
Figure 81: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE du Daisy-Chain.....	167
Figure 82: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC rééchantillonnée toutes les cinq heures / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence .....	171
Figure 83: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre systèmes PAC; puissance fournie ou reçue par la batterie / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence .....	172
Figure 84: Dégradation en cyclage subie par chaque PAC / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence.....	172
Figure 85: État de charge de la batterie / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence .....	173
Figure 86: Masse d'hydrogène consommée par le système hybride multi-PAC_batterie / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence.....	173
Figure 87: Rendement énergétique du système multi-PAC / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence.....	173
Figure 88: Coût d'exploitation du système hybride multi-PAC / batterie en supposant qu'une PAC de 500 W et qu'un kilogramme d'hydrogène coûtent respectivement 25 \$ U.S et 2 \$ U.S / SGE du Daisy-Chain rotatif avancé basée sur les estimations de Pmax ou SGE de référence .....	174
Figure 89: État de charge de la batterie et tension du bus continu / SGE proposée .....	216
Figure 90: Puissance réellement demandée au système multi-PAC sur l'intervalle de temps $[a ; m] = [18000 \text{ s} ; 18140,4 \text{ s}]$ où la batterie est à l'état chargé / SGE proposée.....	217



## Table des figures

Figure 91: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC et puissance fournie ou reçue par la batterie, sur l'intervalle de temps [a ; m] = [18000 s ; 18140,4 s] / SGE proposée .....	217
Figure 92: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC / SGE proposée .....	218
Figure 93: Puissance réellement demandée au système multi-PAC sur l'intervalle de temps [a ; r] = [22550.4 s ; 22688,2 s] où la batterie est à l'état déchargé / SGE proposée .....	224
Figure 94: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC et puissance fournie ou reçue par la batterie, sur l'intervalle de temps [a ; r] = [22550.4 s ; 22688.2 s] / SGE proposée .....	225
Figure 95: État de santé de batterie / SGE proposée .....	226
Figure 96: Superposition de la puissance fournie par le système hybride multi-PAC/ Batterie au profil de mission du véhicule (Zoom de 0 s à 140 s, soit l'intervalle de temps qui délimite un cycle du profil) / SGE proposée .....	226
Figure 97: Synoptique du véhicule sous-marin Todaro de classe U212A, alimenté par neuf (9) modules de PAC de 30 kW- 50 kW / [De-Troya et al., 2016].....	228
Figure 98: Avion HY4 à quatre places alimenté par quatre (4) PAC de 11 kW, développé par le centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique « DLR German Aerospace Center » / [Kallo, 2015].....	228

# Liste des tables

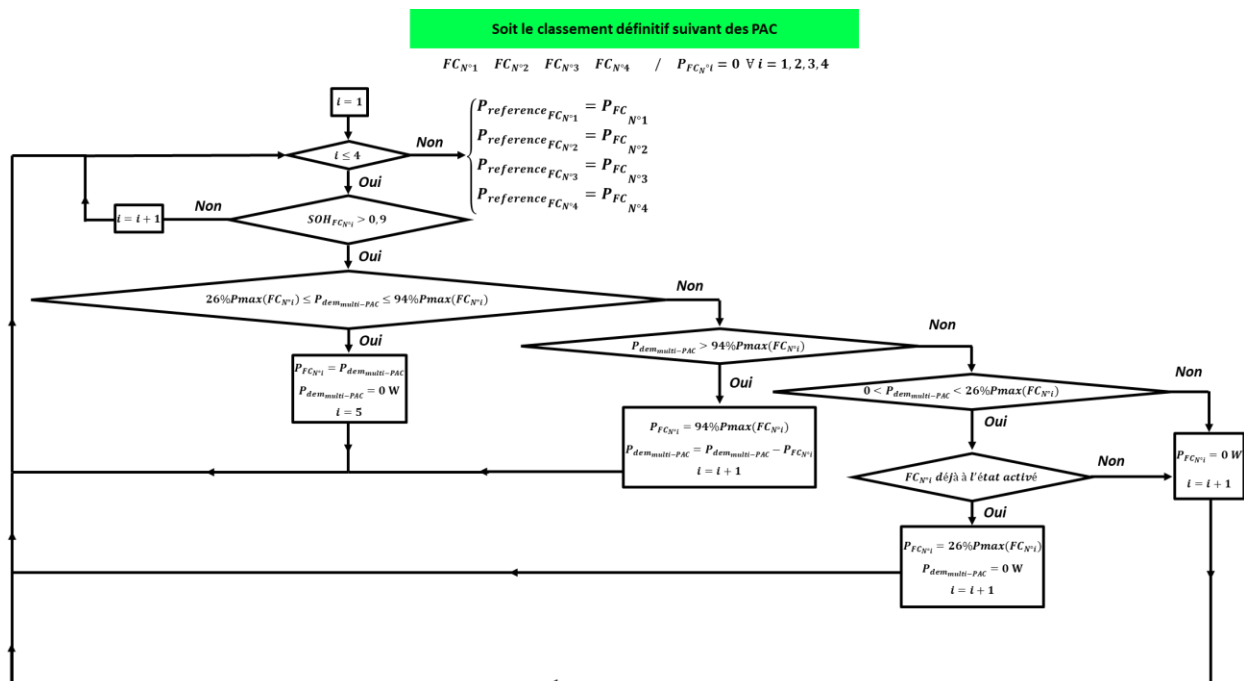
Tableau 1: Les différentes familles de piles à combustible et leurs propriétés [U.S DoE] .....	29
Tableau 2: Coût unitaire de fabrication des PEMFC de 1 kW et de 5 kW en fonction de la quantité d'unités produites par an [Battelle Memorial Institute, 2017] .....	48
Tableau 3: Coût unitaire de fabrication des PEMFC de 10 kW et de 25 kW en fonction de la quantité d'unités produites par an [Battelle Memorial Institute, 2017] .....	48
Tableau 4: Les paramètres qui varient en fonction de l'état de vieillissement calendaire des PAC / [Jouin et al., 2015] .....	84
Tableau 5: Estimation, à partir de la littérature, des taux de dégradation relatifs aux différents modes d'opération des PAC / [Lorenzo et al., 2021] .....	86
Tableau 6 : caractérisation de comportements du modèle de vieillissement vis-à-vis de l'impact du point de fonctionnement sur l'état de santé des PAC.....	136
Tableau 7: l'ensemble des pseudo durées de vie associées à chaque instant de prédiction et ses trois grandeurs caractéristiques.....	146
Tableau 8: Durée de vie du système multi-PAC obtenue sous la SGE proposée vs les SGE conventionnelles.....	168
Tableau 9: Consommation d'hydrogène du système multi-PAC sous la SGE proposée vs les SGE conventionnelles .....	168
Tableau 10: Coût d'exploitation total du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée vs les SGE conventionnelles .....	168
Tableau 11: Mise à jour du 1er classement et du classement définitif des PAC à chaque séance de pronostic de RULs / SGE proposée .....	227



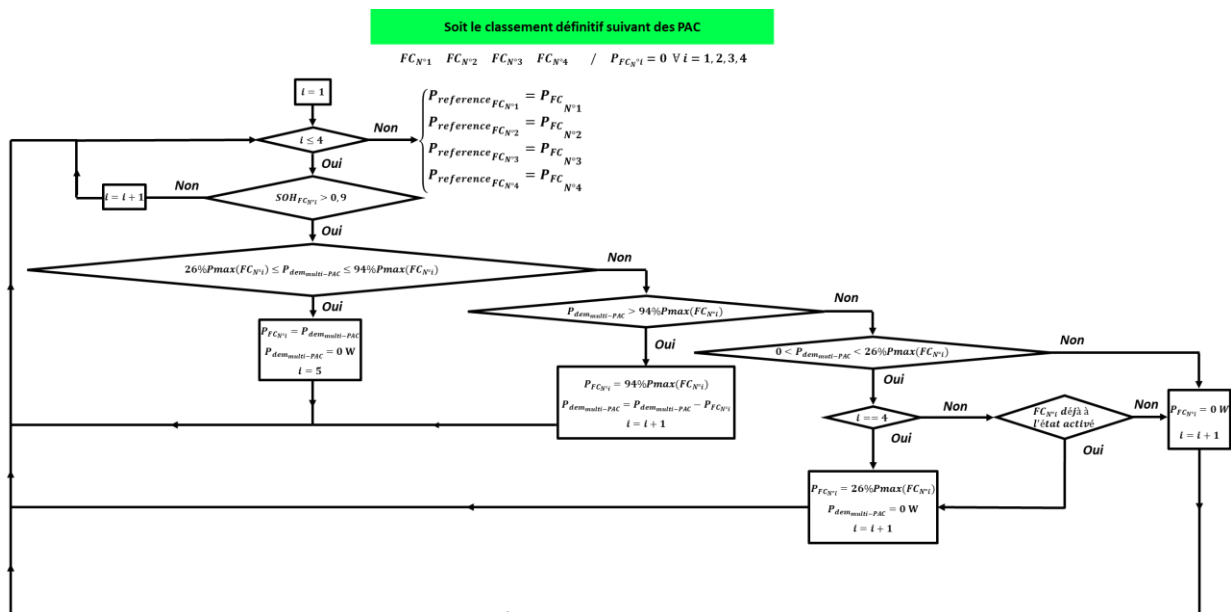
# Annexe

1. Algorithme de gestion d'énergie du système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état chargé  
214
2. Algorithme de gestion d'énergie du système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état déchargé  
215
3. Autres résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée  
216
4. Exemples de véhicules alimentés par des systèmes multi-PAC .....228

# 1. Algorithme de gestion d'énergie du système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état chargé



## 2. Algorithme de gestion d'énergie du système multi-PAC lorsque la batterie est à l'état déchargé



### 3. Autres résultats de simulation du système hybride multi-PAC/ batterie sous la SGE proposée

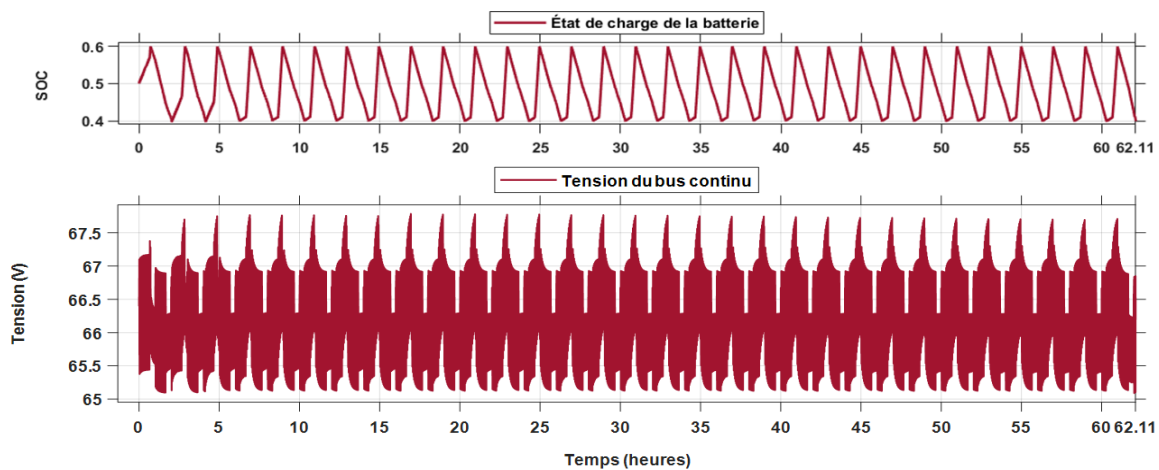


Figure 89: État de charge de la batterie et tension du bus continu / SGE proposée

Comme il peut être remarqué sur la Fig.89, le maintien de l'état de charge de la batterie entre 40% et 60% a permis de limiter la variation de la tension du bus continu entre 65,08 V et 67,8 V. En effet, la tension du bus continu varie en fonction de l'état de charge de la batterie car d'après l'hypothèse faite à la section 2 du chapitre III, la batterie est reliée au bus continu sans passer par un convertisseur DC-DC.

Selon que la batterie soit à l'état chargé ou à l'état déchargé, l'énergie du système hybride multi-PAC/ batterie n'est pas gérée de la même manière. C'est pour cette raison que l'algorithme de gestion d'énergie suivant le principe du Daisy-Chain avancé de la SGE proposée est présenté en détail pour les deux situations dans cette section annexe du manuscrit. Pour valider le fonctionnement du système multi-PAC suivant ce principe de gestion d'énergie, l'analyse de la répartition de la puissance  $P_{dem\_multi-PAC}$  réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC sur l'intervalle  $[5 h ; 6,264 h]$  où la batterie est à l'état chargé (Fig.89) et sur

l'intervalle [6,264 h ; 6,934 h] où la batterie est à l'état déchargé (Fig.89) est présentée dans cette section.

*i. De 5 h à 6,264 h où la batterie était à l'état chargé*

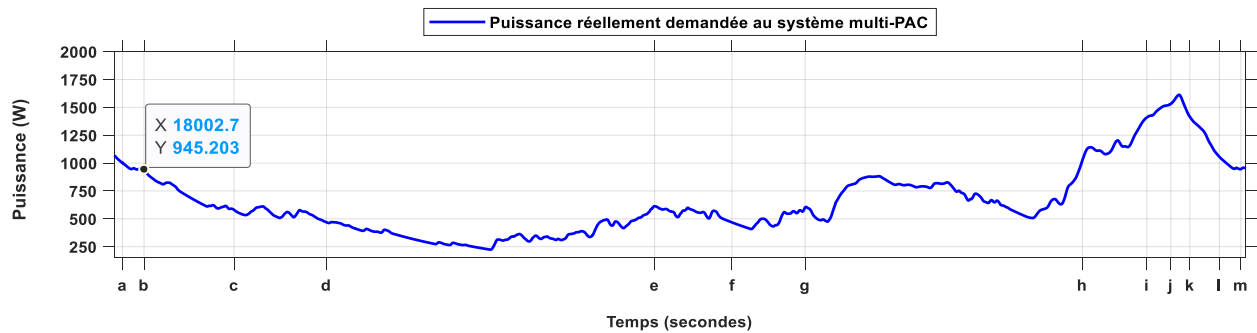


Figure 90: Puissance réellement demandée au système multi-PAC sur l'intervalle de temps [a ; m] = [18000 s ; 18140,4 s] où la batterie est à l'état chargé / SGE proposée

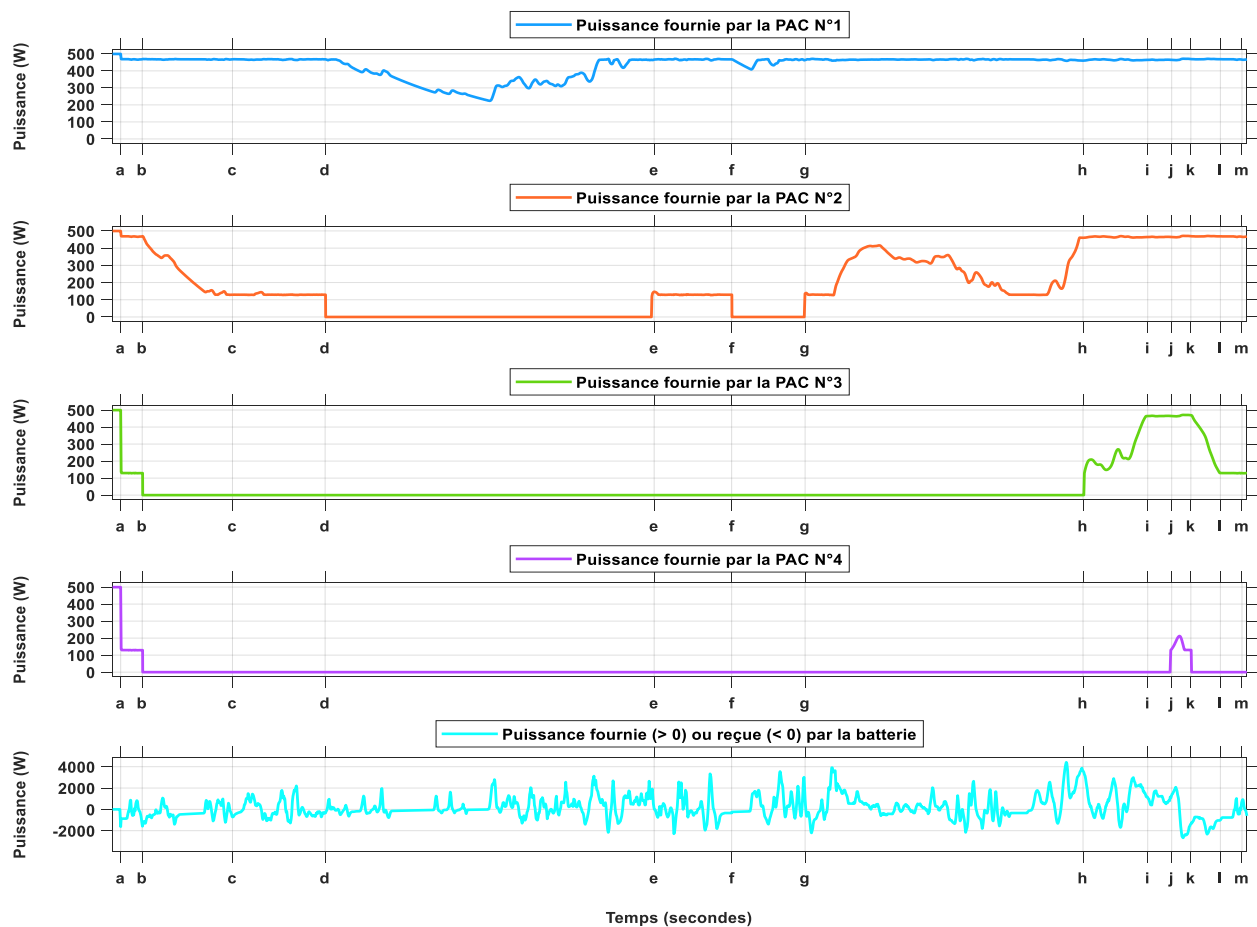


Figure 91: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC et puissance fournie ou reçue par la batterie, sur l'intervalle de temps [a ; m] = [18000 s ; 18140,4 s] / SGE proposée



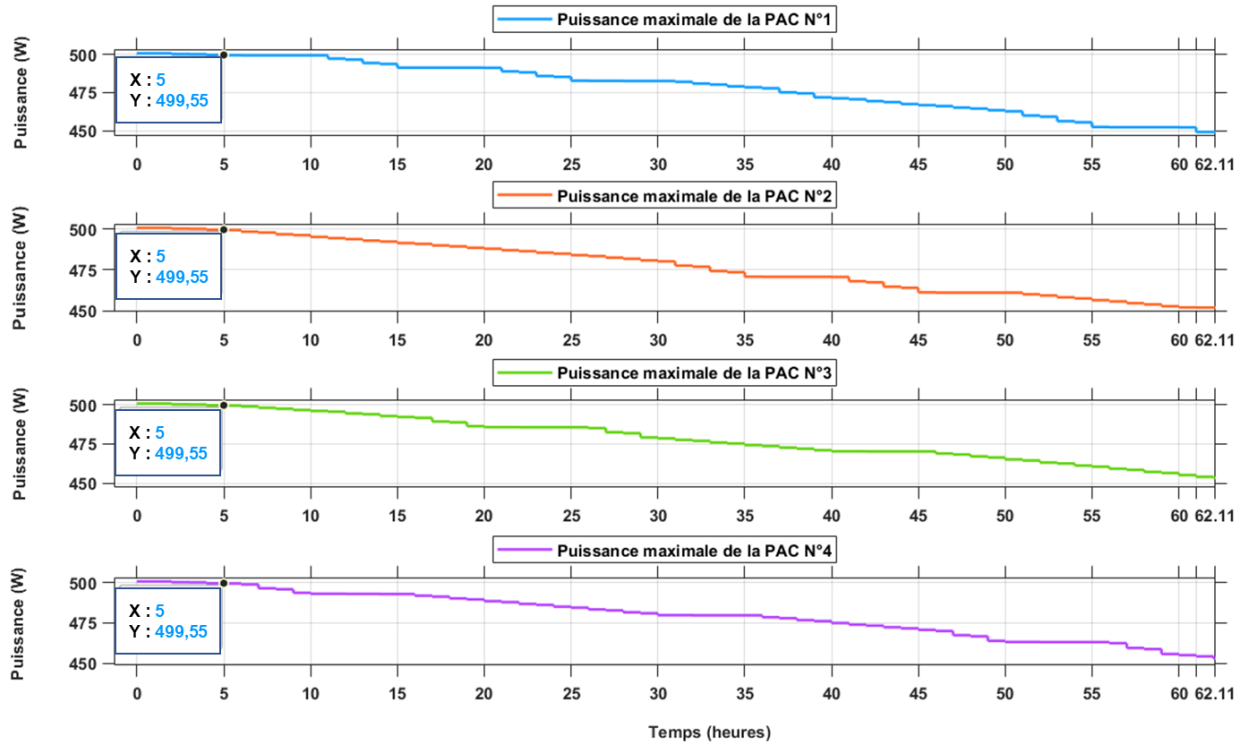


Figure 92: évolution temporelle de la puissance maximale de chaque PAC / SGE proposée

- De  $t = a = 18000 \text{ s}$  ( $5 \text{ h}$ ) à  $t = b = 18002,7 \text{ s}$ , d'après la Fig.90,  $P_{dem_{multi-PAC}}$  était au-delà de  $945 \text{ W}$  donc supérieure à  $94\%P_{max_{PAC N^1}} \simeq 469 \text{ W}$  d'où l'utilisation de la PAC N°1 à  $94\%P_{max}$  (Fig.91). La PAC N°2 a été également sollicitée à  $94\%P_{max}$  car la puissance restante ( $> 476 \text{ W}$ ) était supérieure à  $94\%P_{max_{PAC N^2}} \simeq 469 \text{ W}$ . En effet, à  $t = 18000 \text{ s}$ , toutes les PAC avaient des puissances maximales identiques (Fig.92) car elles avaient été utilisées de la même manière pendant les cinq premières heures. La limite supérieure de la puissance restante après l'utilisation de la PAC N°1 et de la PAC N°2 à  $94\%P_{max}$  étant d'environ  $(1000 \text{ W} - (469 \text{ W} \times 2)) = 61 \text{ W}$ , elle est située en dehors de la plage de puissance sécuritaire de la PAC N°3 car elle est inférieure à  $26\%P_{max_{PAC N^3}} \simeq 129 \text{ W}$ . De ce fait, en principe la PAC N°3 et la PAC N°4 ne devaient pas être utilisées. Cependant, puisqu'elles étaient déjà activées, elles ont été maintenues en opération pour fournir  $26\%P_{max}$ . Cela permet notamment de réduire la fréquence des cycles de démarrages-arrêts des PAC et ainsi de ralentir leur dégradation.

- À partir de  $t = b = 18002,7 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était inférieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$  mais supérieure à  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}}$  alors la PAC N°1 continuait de fonctionner à  $94\%P_{max}$  et la PAC N°2 complétait la demande car la puissance restante était comprise entre  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$  et  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$ . Ce qui explique d'ailleurs l'arrêt de la PAC N°3 et de la PAC N°4.
- À partir de  $t = c = 18014,7 \text{ s}$ , la puissance restante après l'utilisation de la PAC N°1 à  $94\%P_{max}$  était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$  donc en principe la PAC N°2 devrait être arrêtée. Cependant, puisqu'elle était déjà en fonctionnement, elle a été maintenue en opération pour fournir  $26\%P_{max}$ .
- À partir de  $t = d = 18025,6 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était comprise entre  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 1}}$  et  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}}$ . L'unique utilisation de la PAC N°1 était alors suffisante pour répondre à la demande d'où l'arrêt de la PAC N°2.
- La PAC N°2 est restée à l'arrêt jusqu'à l'instant  $t = e = 18066,8 \text{ s}$  à partir duquel  $P_{dem\_multi-PAC}$  était à nouveau supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$ . En effet, tant que  $P_{dem\_multi-PAC}$  ne dépassait pas ce seuil, la PAC N°2 devait être maintenue à l'arrêt, d'après le principe de réduction des cycles de démarrages-arrêts. C'est la batterie qui complétait la demande dans ce cas.
- À partir de  $t = f = 18076,5 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était à nouveau inférieure à  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}}$  d'où l'arrêt de la PAC N°2 et la sollicitation unique de la PAC N°1.
- La PAC N°2 était une fois encore maintenue à l'arrêt et ce jusqu'à l'instant  $t = g = 18085,7 \text{ s}$  à partir duquel  $P_{dem\_multi-PAC}$  était supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$ . La puissance restante après l'utilisation de la PAC N°1 à  $94\%P_{max}$  était alors fournie par la PAC N°2 et lorsqu'elle était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$ , la PAC N°2 était quand-même maintenue en opération et fonctionnait à  $26\%P_{max}$ .

- À partir de  $t = h = 18120,5 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était au-delà de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$ . Par conséquent, la PAC N°1 et la PAC N°2 étaient sollicitées à  $94\%P_{max}$ . Quant à elle, la PAC N°3 complétait la demande en fournissant directement la puissance restante.
- $P_{dem\_multi-PAC}$  continuait de croître et à partir de  $t = i = 18128,6 \text{ s}$ , elle était supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$  d'où l'utilisation des trois PAC à  $94\%P_{max}$ . La puissance restante était cependant inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 4}}$ . Pour cela, la PAC N°4 était toujours maintenue à l'arrêt.
- À partir de  $t = j = 18131,6 \text{ s}$ , la PAC N°4 était également utilisée car la puissance restante après l'utilisation des trois premières PAC à  $94\%P_{max}$  était comprise entre  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 4}}$  et  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 4}}$ .
- À partir de  $t = k = 18134 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était une nouvelle fois inférieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$ . Par conséquent, la PAC N°4 fut désactivée et la PAC N°3 complétait directement la demande après l'utilisation des PAC N°1 et PAC N°2 à  $94\%P_{max}$ .
- À partir de  $t = l = 18137,7 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était inférieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$  mais la PAC N°3 était maintenue en opération et fonctionnait à  $26\%P_{max}$  après l'utilisation de la PAC N°1 et de la PAC N°2 à  $94\%P_{max}$ .
- À  $t = m = 18140,4 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  se retrouvait à nouveau aux environs de 1000 W comme c'était le cas à l'instant  $t = a = 18000 \text{ s}$ . Ceci est dû à la répétition du profil de mission. La PAC N°1 et la PAC N°2 étaient alors sollicitées de la même manière qu'elles étaient utilisées sur l'intervalle de temps  $[a ; b]$  c'est-à-dire à  $94\%P_{max}$ . La PAC N°3 fonctionnait à  $26\%P_{max}$  car elle était déjà en utilisation contrairement à la PAC N°4 qui était à l'arrêt.

En raison de la répétition du profil de mission durant la simulation, les événements analysés se reproduisent tels quel tant que la batterie est à l'état chargé. De nouvelles situations n'apparaissent que lorsque la batterie se retrouve à l'état déchargé car dans ce cas, une puissance supplémentaire est demandée au système multi-PAC pour recharger la batterie.

**ii. De 6,264 h à 6,934 h où la batterie était à l'état déchargé**

- D'après la Fig.93, à partir de  $t = a = 22550,4 \text{ s}$  (6,264 h),  $P_{dem\_multi-PAC}$  était au-delà de 1135 W donc supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ}1} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ}2} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ}3})$ . Par conséquent, la PAC N°1 et la PAC N°2 étaient utilisées à  $94\%P_{max}$  puis la PAC N°3 fournissait le reste de la puissance demandée (Fig.94).
- À partir de  $t = b = 22551,9 \text{ s}$ , la puissance restante après la sollicitation des PAC N°1 et PAC N°2 à  $94\%P_{max}$  était au-delà de 474 W donc supérieure à  $94\%P_{maxPAC N^{\circ}3}$ . La PAC N°3 était alors utilisée à  $94\%P_{max}$  tout comme les deux premières PAC et puisque la nouvelle puissance restante était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ}4}$ , en principe la PAC N°4 ne devait pas être activée. Cependant, selon la SGE, lorsque la batterie est à l'état déchargé et que la puissance restante à fournir est non nulle malgré l'utilisation des trois premières PAC à plein régime, la dernière PAC qui est la PAC N°4 dans cette étude, doit fonctionner à  $26\%P_{max}$  d'où l'activation de la PAC N°4.
- À partir de  $t = c = 22552,8 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était inférieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ}1} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ}2} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ}3})$  alors les PAC N°1, N°2 continuaient de fonctionner à  $94\%P_{max}$  et la PAC N°3 complétait la demande. C'est ce qui explique l'arrêt de la PAC N°4.
- À partir de  $t = d = 22555,1 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  devient à nouveau supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ}1} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ}2} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ}3})$ . La puissance restante après

l'utilisation des trois PAC à  $94\%P_{max}$  n'était pas nulle alors la PAC N°4 a été activée pour compléter la demande en fournissant  $26\%P_{max}$ .

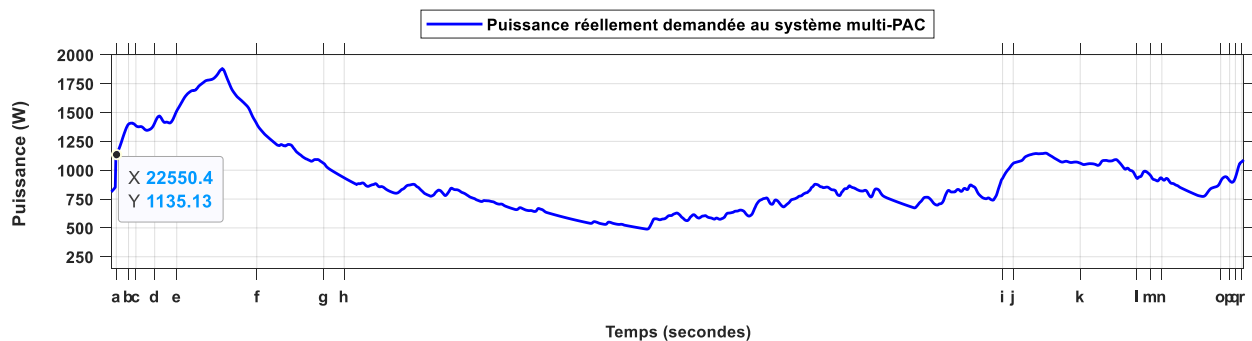
- À partir de  $t = e = 22557,8$  s, la puissance restante était au-delà de  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 4}}$  d'où le fonctionnement de la PAC N°4 à une puissance variable comprise entre  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 4}}$  et  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 4}}$ .
- À partir de  $t = f = 22567,6$  s,  $P_{dem_{multi-PAC}}$  se retrouve en deçà de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$  alors la PAC N°4 fut désactivée puis la PAC N°3 fonctionnait dans sa plage de puissance sécuritaire pour compléter la demande après l'utilisation des PAC N°1 et N°2 à  $94\%P_{max}$ .
- À partir de  $t = g = 22575,8$  s, la puissance restante après l'utilisation de la PAC N°1 et de la PAC N°2 à  $94\%P_{max}$  était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}}$ . Cependant, comme la PAC N°3 était déjà activée, elle était maintenue dans cet état et délivrait une puissance d'environ  $26\%P_{max}$ .
- $P_{dem_{multi-PAC}}$  continuait de décroître et à partir de  $t = h = 22578,3$  s, elle était inférieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$  d'où l'arrêt de la PAC N°3 et la sollicitation de la PAC N°1 et de la PAC N°2 respectivement à  $94\%P_{max}$  et à une puissance variable comprise entre  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$  et  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$ .
- À partir de  $t = i = 22658,9$  s,  $P_{dem_{multi-PAC}}$  était à nouveau au-delà de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$  mais la puissance restante après l'utilisation des deux PAC à  $94\%P_{max}$  était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}}$ . Par conséquent, la PAC N°3 était maintenue à l'arrêt. La PAC N°4 fut activée et sollicitée à  $26\%P_{max}$  en raison de l'état déchargé de la batterie et de la non-utilisation de la PAC N°3.

- À partir de  $t = j = 22660,2 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$  alors pendant que les deux premières PAC fonctionnaient à  $94\%P_{max}$ , la PAC N°3 complétait la demande d'où l'arrêt de la PAC N°4.
- À partir de  $t = k = 22668,4 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  se retrouvait une fois encore en deçà de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}} + 26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}})$ . Malgré cela, la PAC N°3 était maintenue en opération et son utilisation à  $26\%P_{max}$  permettait de compléter la demande pendant que les PAC N°1 et N°2 fonctionnaient à  $94\%P_{max}$ .
- $P_{dem\_multi-PAC}$  continuait de décroître et à partir de  $t = l = 22675,3 \text{ s}$ , elle était inférieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$  alors les deux premières PAC étaient respectivement sollicitées à  $94\%P_{max}$  et à une puissance variable comprise entre  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$  et  $94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}}$ . Ce qui explique l'arrêt de la PAC N°3. Il s'en est suivie ensuite l'activation de la PAC N°4 car  $P_{dem\_multi-PAC}$  avait à nouveau dépassé le seuil de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$ . Ainsi, la puissance restante après l'utilisation des PAC N°1 et N°2 à  $94\%P_{max}$  était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}}$  d'où le maintien de la PAC N°3 à l'arrêt. La PAC N°4 fut alors activée et sollicitée à  $26\%P_{max}$  pour compléter la demande.
- À partir de  $t = m = 22677 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  redescendit en deçà de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$ . L'utilisation des deux premières PAC était donc suffisante pour répondre à la demande d'où l'arrêt de la PAC N°4.
- À partir de  $t = n = 22678,2 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  était à nouveau supérieure à  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} + 94\%P_{maxPAC N^{\circ 2}})$ . Les deux PAC furent alors sollicitées à  $94\%P_{max}$  et la puissance restante à fournir était inférieure à  $26\%P_{maxPAC N^{\circ 3}}$ . La PAC N°3 ne pouvant donc pas être utilisée pour compléter la demande car étant à l'arrêt, la PAC N°4 fut activée et elle fonctionnait à  $26\%P_{max}$ . Toutefois, son utilisation fut très brève car à partir de  $t = 22678,3 \text{ s}$ ,  $P_{dem\_multi-PAC}$  se retrouvait encore en deçà de  $(94\%P_{maxPAC N^{\circ 1}} +$

$94\%P_{maxPAC N^{\circ}2}$ ). La sollicitation de la PAC N°1 et de la PAC N°2 suffisait alors pour satisfaire la demande.

Cette dernière situation s'est reproduite sur les intervalles de temps  $[t = o = 22685,6 s ; t = p = 22686,7 s]$  et  $[t = q = 22687,4 s ; t = r = 22688,2 s]$ . À partir de l'instant  $t = r = 22688,2 s$ , le profil de mission se répète. Les événements observés dans ce dernier scénario où la batterie était à l'état déchargé se reproduiraient tels quel tant que la batterie sera à l'état déchargé. Toutefois, l'ordre d'utilisation des PAC ne serait pas toujours le même car chaque cinq heures, il est mis à jour en fonction des RULs des PAC et de leur mode d'opération depuis la dernière mise à jour du classement.

Le tableau 11 fait apparaître le classement par ordre décroissant de RULs et le classement définitif des PAC qui devraient être obtenus à chaque mise à jour de RULs des PAC. Le classement par ordre décroissant de RULs obtenu et le classement définitif obtenu apparaissent également dans ce tableau. La différence entre les classements qui devraient être obtenus et les classements obtenus à certains instants sont dues à la manière dont l'algorithme de pronostic interprète la tendance de dégradation de certaines PAC lorsqu'un changement important intervient dans l'évolution de l'indicateur de santé de ces PAC. Toutefois, dans le cas où l'interprétation serait erronée, l'algorithme de pronostic corrige l'erreur à la prochaine séance de pronostic grâce aux échantillons de l'indicateur de santé qui se seraient ajoutés entre temps à la série temporelle.



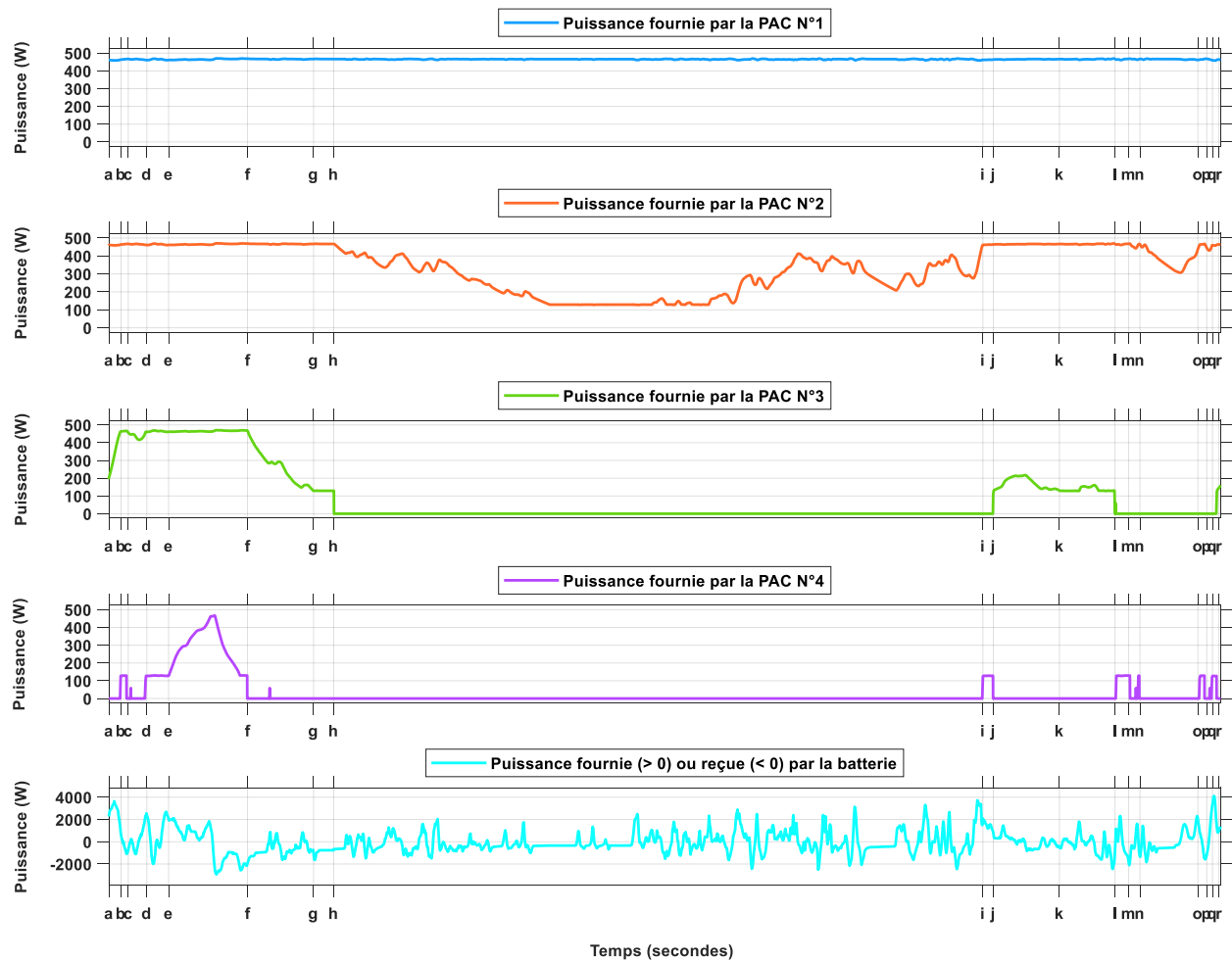


Figure 94: Répartition de la puissance réellement demandée au système multi-PAC entre les quatre PAC et puissance fournie ou reçue par la batterie, sur l'intervalle de temps [a ; r] = [22550.4 s ; 22688.2 s] / SGE proposée

Quant à elle, la Fig.95 présente l'évolution de l'état de santé de la batterie sur toute la durée de vie du système multi-PAC sous la SGE proposée. Après 62,11 heures d'opération du système hybride multi-PAC/ batterie, alors qu'une dégradation d'au moins 9,4% des performances maximales était observée chez toutes les PAC, l'état de santé de la batterie n'a chuté que de 0,0016%. En effet, contrairement au vieillissement des PAC, le vieillissement de la batterie n'a pas été accéléré dans cette étude. La prise en compte de la dégradation de la batterie dans le calcul du coût d'exploitation du système hybride multi-PAC/ a été jugée peu pertinente dans cette étude en raison du rapport important qui existe entre la durée de vie réelle des batteries et celles des PAC (plus de 45000 heures contre 5000 heures environ).



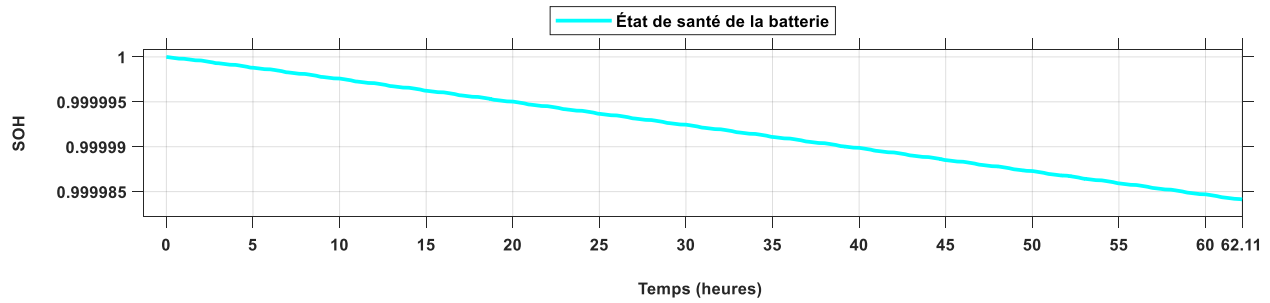


Figure 95: État de santé de batterie / SGE proposée

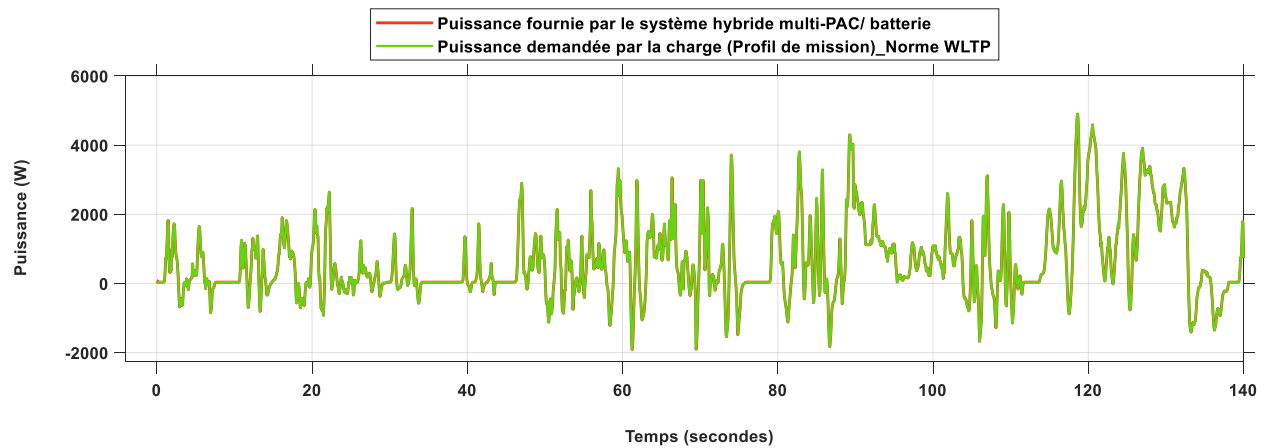


Figure 96: Superposition de la puissance fournie par le système hybride multi-PAC/ Batterie au profil de mission du véhicule (Zoom de 0 s à 140 s, soit l'intervalle de temps qui délimite un cycle du profil) / SGE proposée

La Fig.96 montre que la puissance totale fournie par l'ensemble du système d'alimentation (système multi-PAC + batterie) se superpose parfaitement au profil de mission imposé par la charge. Cela met en avant la capacité de la SGE proposée à fonctionner en ligne puisqu'elle est capable d'assurer l'égalité entre la puissance demandée par la charge et la puissance de sortie du système d'alimentation hybride. Le zoom de 0 s à 140 s a été considéré pour souligner cet aspect car la longueur du profil de mission remis à échelle pour avoir pendant les simulations, des niveaux de puissances cohérents avec ceux du banc d'essai, n'est que de 139 secondes (cf. Fig.36).

Tableau 11: Mise à jour du 1er classement et du classement définitif des PAC à chaque séance de pronostic de RULs / SGE proposée

<b>Instants de mise à jour</b>	<b>1<sup>er</sup> Classement des PAC qui devrait être obtenu</b>	<b>Classement définitif qui devrait être obtenu</b>	<b>1<sup>er</sup> Classement des PAC obtenu</b>	<b>Classement définitif obtenu</b>
<i>t = 5 h</i>	N°1, N°2, N°3, N°4	N°1, N°2, N°3, N°4	N°1, N°2, N°3, N°4	N°1, N°2, N°3, N°4
			Bien	Bien
<i>t = 10 h</i>	N°1, N°3, N°2, N°4	N°4, N°3, N°2, N°1	N°1, N°3, N°2, N°4	N°4, N°3, N°2, N°1
			Bien	Bien
<i>t = 15 h</i>	N°4, N°3, N°2, N°1	N°1, N°3, N°2, N°4	N°3, N°4, N°2, N°1	N°1, N°4, N°2, N°3
			Assez-bien	Assez-bien
<i>t = 20 h</i>	N°1, N°4, N°2, N°3	N°3, N°4, N°2, N°1	N°1, N°4, N°2, N°3	N°3, N°4, N°2, N°1
			Bien	Bien
<i>t = 25 h</i>	N°3, N°4, N°2, N°1	N°1, N°4, N°2, N°3	N°3, N°4, N°2, N°1	N°1, N°4, N°2, N°3
			Bien	Bien
<i>t = 30 h</i>	N°1, N°2, N°4, N°3	N°3, N°2, N°4, N°1	N°1, N°2, N°3, N°4	N°4, N°1, N°3, N°2
			Assez-bien	Pas bon
<i>t = 35 h</i>	N°4, N°1, N°3, N°2	N°2, N°1, N°3, N°4	N°1, N°4, N°3, N°2	N°2, N°4, N°3, N°1
			Assez-bien	Assez-bien
<i>t = 40 h</i>	N°4, N°1, N°2, N°3	N°3, N°1, N°4, N°2	N°4, N°1, N°2, N°3	N°3, N°1, N°4, N°2
			Bien	Bien
<i>t = 45 h</i>	N°4, N°3, N°1, N°2	N°2, N°3, N°1, N°4	N°4, N°3, N°1, N°2	N°2, N°3, N°1, N°4
			Bien	Bien
<i>t = 50 h</i>	N°3, N°4, N°1, N°2	N°3, N°4, N°1, N°2	N°1, N°3, N°2, N°4	N°4, N°3, N°2, N°1
			Pas bon	Pas bon
<i>t = 55 h</i>	N°4, N°3, N°2, N°1	N°1, N°3, N°2, N°4	N°4, N°3, N°2, N°1	N°1, N°3, N°2, N°4
			Bien	Bien
<i>t = 60 h</i>	N°3, N°4, N°1, N°2	N°2, N°4, N°3, N°1	N°3, N°4, N°1, N°2	N°2, N°4, N°3, N°1
			Bien	Bien

## 4. Exemples de véhicules alimentés par des systèmes multi-PAC

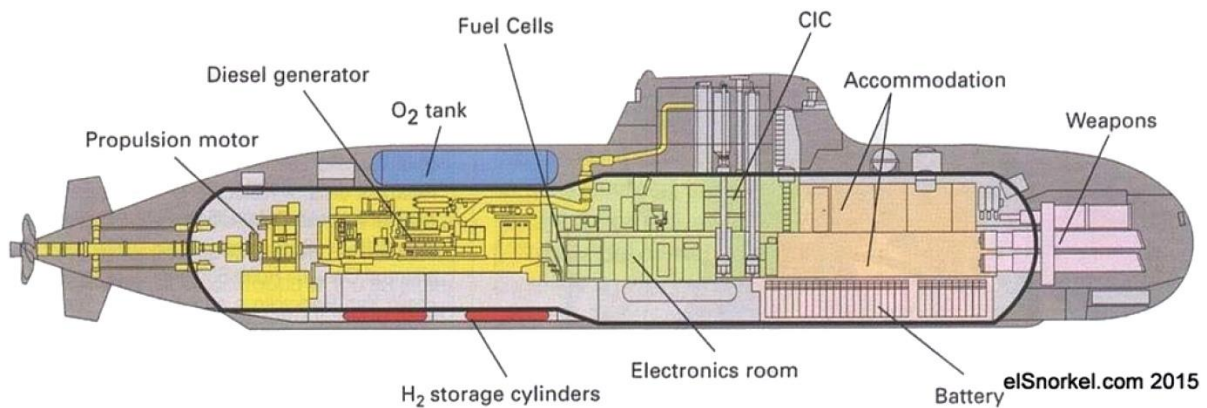


Figure 97: Synoptique du véhicule sous-marin Todaro de classe U212A, alimenté par neuf (9) modules de PAC de 30 kW- 50 kW / [De-Troya et al., 2016]



Figure 98: Avion HY4 à quatre places alimenté par quatre (4) PAC de 11 kW, développé par le centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique « DLR German Aerospace Center » / [Kallo, 2015]



# Résumé

Les effets du réchauffement climatique tels que l'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre, l'éloignement progressif des extrêmes climatiques, l'élévation du niveau moyen des mers et océans, etc., sont en grande partie liés à l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine dans l'atmosphère. À l'échelle mondiale, certains secteurs d'activités économiques contribuent à ce fléau de manière plus importante que d'autres. C'est notamment le cas du secteur des transports qui est responsable à lui tout seul de 25% des émissions mondiales de GES, d'après le rapport publié en 2020 par l'AIE. Avec ce pourcentage, le transport représente le second secteur économique le plus polluant après la production de l'énergie électrique. Une étude statistique plus poussée a révélé que le transport routier serait le mode de transport qui émet le plus de GES dans ce secteur. En France et au Canada par exemple, 94% et 70% des émissions provenant des transports sont respectivement attribuées au trafic routier d'après le rapport publié en 2020 par « *l'INSEE, France* » et d'après le rapport d'inventaire national 1990-2019 d' « *Environnement et changement climatique, Canada* ».

Pour réduire l'empreinte carbone du transport routier, l'utilisation des véhicules à hydrogène semble être une idée très captivante et complémentaire des véhicules électriques. Cependant, certains verrous technologiques tels que la courte durée de vie des piles à combustible (PAC), principale source de puissance des véhicules à hydrogène, s'ajoutent au problème de faible niveau de développement du réseau de distribution de l'hydrogène qui freine la commercialisation des véhicules à hydrogène.

Le concept de système de puissance modulaire appliqué aux PAC et qui a été introduit dans la littérature il y'a de cela dix ans, se révèle être particulièrement intéressant à étudier pour améliorer non seulement le critère de durabilité, mais aussi ceux de la tolérance aux pannes et du rendement énergétique des systèmes PAC. L'idée globale autour de ce concept consiste à associer plusieurs petits modules de PAC (la PAC et ses auxiliaires ) de puissances modérées au lieu d'utiliser un seul et unique gros module de PAC de très forte puissance. Le cas échéant, un système multi-PAC est obtenu et le défis principal ainsi mis en jeu est celui de la gestion d'énergie. En effet,

la gestion d'énergie est un élément essentiel dont dépendent toutes les performances qu'un système multi-PAC peut offrir.

De grandes avancées ont été réalisées au cours de cette dernière décennie dans certains domaines de recherche tels que celui du PHM « *prognostic and Health Management* » pour permettre aux SGE de systèmes multi-PAC de prendre les décisions de gestion d'énergie convenables quant à la durabilité de ces systèmes. Cependant, à ce jour, très peu de SGE basées sur le pronostic apparaissent dans la littérature. Pour cela, une SGE basée sur les pronostics de durées de vie restantes (RUL - « *Remaining Useful Life* ») des PAC est proposée dans cette thèse pour les systèmes multi-PAC, dans le cadre d'une application automobile.

La SGE proposée a été validée sur la base de simulations numériques réalisées dans l'environnement Matlab/ Simulink, sur un système multi-PAC composé de quatre PAC de 500 W en utilisant le cycle de classe 3 de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers (WLTP). Une étude comparative des performances du système multi-PAC sous la SGE proposée et sous les SGE conventionnelles a montré que la SGE proposée est capable de faire atteindre au système multi-PAC une durée de vie qui est plus de 2,35 fois supérieure à celle qu'il aurait sous les SGE conventionnelles. Tout ceci en maintenant la consommation d' $H_2$  du système à un niveau très raisonnable par rapport à la quantité d' $H_2$  consommée sous les SGE conventionnelles.

**Mots-clés:** Système multi-piles à combustible, pronostic, durée de vie restante, gestion d'énergie, véhicule à hydrogène.

# Abstract

The global warming's effects, such as the increase in the earth's surface average temperature, the progressive remoteness of climatic extremes, the increase in the average water level of seas and oceans, etc., are mainly attributed to human-induced accumulation of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere. Some economic sectors contribute more to this phenomenon than others, around the world. The transport sector, in particular, is responsible for 25% of global GHG emissions, according to the IEA 2020 report. This percentage makes the transport sector the most polluting economic sector after electric generation. A more detailed statistical analysis of transportation emissions shows that road transport is the most GHG-emitting transportation mode. According to the report published in 2020 by « *INSEE, France* » and the national inventory report 1990-2019 of « *Environment and Climate Change, Canada* », 94% and 70% of transportation emissions are respectively attributed to road traffic in France and in Canada.

To reduce the carbon footprint of road transport, using hydrogen-powered vehicles, also known as fuel cell hybrid electric vehicles (FCHEV) seems to be a very attractive idea and a complement to electric vehicles. However, besides the lack of hydrogen refueling infrastructures, there are some technological barriers such as the short lifetime of fuel cells, the main power sources of FCHEV, that slow down the commercialization of these vehicles.

The concept of modular power system for fuel cells, which was introduced in the literature ten years ago, is particularly interesting because it can improve the lifetime, fault tolerance, and energy efficiency of fuel cell systems. The basic idea of this concept is to combine several low power fuel cell modules (short stack + auxiliary units) instead of using a single high power fuel cell module. In this case, a multi-fuel cell stacks (MFCS) system is obtained and the main challenge to overcome is the development of an appropriate energy management strategy (EMS). In fact, energy management is an essential element on which all the performances that an MFCS system can offer depend.

Some great achievements have been made over the past decade in certain research areas, such as PHM « *prognostic and health management* », to enable EMSs for MFCS systems to make

appropriate energy management decisions regarding the lifetime of these systems. However, to date, very few prognostic-based EMSs are developed in the literature. To this end, a remaining useful life (RUL) prediction-based EMS is proposed in this thesis for MFCS systems in the context of an automotive application.

The proposed EMS was validated by simulations in Matlab/Simulink environment on an MFCS system consisting of four 500-W using the class 3 of the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). A comparative study of the MFCS system performance under the proposed EMS and the conventional EMSs showed that the proposed EMS can achieve a lifetime for the MFCS system that is more than 2.35 times greater than the one that could be reached under conventional EMSs. All this while keeping its hydrogen consumption at a very reasonable level compared to the amount of hydrogen consumed with the conventional EMS.

**Keywords:** multi-fuel cell stacks system, prognostic, remaining useful life, energy management, fuel cell hybrid electric vehicle.