

Table des matières

Résumé.....	ii
Remerciements.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
Liste des symboles	x
Chapitre 1 - Introduction.....	13
1.1 Contexte général du projet de recherche	17
1.2 Problématique.....	20
1.3 Objectifs	22
1.4 Méthodologie.....	24
1.5 Organisation du Mémoire.....	25
Chapitre 2 - L'état de la recherche.....	27
2.1 Les véhicules électriques hybrides à pile à combustible (VEH-FC).....	27
2.2 La pile à combustible et les basses températures	30
2.2.1 Études sur la détérioration irréversible	32

2.2.2	Études sur les méthodes de chauffage	34
2.2.3	Études des stratégies pour le démarrage à froid	36
2.3	Analyses et synthèse des revues	38
Chapitre 3 - Algorithme de démarrage à froid de la PAC		40
3.1	Introduction	40
3.2	L'architecture contrôle du FC-PHEV	41
3.1	Stratégie de démarrage à froid de la pile	43
3.2	Phase de préchauffage de la PAC.....	46
3.2.1	Estimation du temps de chauffage de la pile par une source thermique externe	52
3.2.2	Prédiction du temps de démarrage de la PAC	55
3.3	Phase d'auto-chauffage de la PAC	57
3.3.1	Profil optimal de courant	58
3.3.2	La commande optimale.....	61
3.3.3	Formulation du problème.....	63
3.3.4	Solution du problème d'optimisation	64
Chapitre 4 - Expériences et simulations.....		68
4.1	Validation du modèle avec la pile Hyteon	68
4.1.1	Objectif de l'expérimentation	71
4.1.2	Configuration du système expérimentale	71

4.1.3	Scénario de test	75
4.1.4	Résultats expérimentaux et de simulation	77
4.1.5	Analyse de la dynamique thermo énergétique de la PAC du banc d'essai.....	82
4.2	Contrôle thermique de la pile à combustible Mobixane sur le véhicule Nemo	83
4.2.1	Caractérisation thermique de la pile Mobixane	85
4.2.2	L'impact du procédé de démarrage sur la température interne de la pile.....	88
4.2.3	Surveillance thermique de la PAC.....	92
Chapitre 5 - Conclusion		97
Bibliographie.....		103
Annexe A – Résolution du système d'équations du modèle thermique de la PAC		107
Annexe B –Coefficient d'échange thermique par convection forcée de la pile à combustible.....		109

Liste des tableaux

Tableau 4-1 : Paramètres thermiques de la PAC Hyteon.....	73
Tableau 4-2 Paramètres physiques de la pile Mobixane.....	85
Tableau 4-3 Données expérimentales pour la pile Mobixane.....	87
Tableau 4-4 Deuxième ensemble des données expérimentales pour la pile Mobixane.....	89

Liste des figures

Figure 1-1	Ventilation des émissions du Canada, par secteur économique [1]	13
Figure 1-2	Émissions de GES des divers combustibles [9] (DOE 2009, 2010).....	16
Figure 1-3	Véhicule Nemo de l'IRH.....	18
Figure 1-4	Historique des températures moyennes pour Trois-Rivières Québec.....	20
Figure 2-1	PHEV-FC topologie sériele.....	28
Figure 2-2	PHEV-FC topologie parallèle.	29
Figure 2-3	Schéma du système pile à combustible avec échangeur de chaleur.	38
Figure 3-1.	Schéma général de l'architecture de gestion d'énergie du véhicule FC-PHEV.....	41
Figure 3-2	Algorithme général de contrôle thermique.....	46
Figure 3-3	Système thermique PAC	48
Figure 3-4	Plaque bipolaire d'une cellule avec des canaux pour le refroidissement.	49
Figure 3-5	Température de la PAC et du fluide.....	52
Figure 3-6	(A) Temps t_{he} et (B) différence de température ΔT_{fcw} en fonction du coefficient de transfert thermique global kw	54
Figure 3-7	Simulations pour le calcul des temps t_{st} , he , t_{st} et t_{he}	56
Figure 3-8	Rendement de la PAC vs Température et densité de courant	57
Figure 3-9	Schéma général de contrôle de l'étape d'auto chauffage.....	61
Figure 3-10	Structure de la commande optimale de temps minimal	67

Figure 4-1	Représentation du banc d'essai	69
Figure 4-2	Pile Hyteon à l'IRH	71
Figure 4-3	Système de la PAC Hyteon à l'IRH	72
Figure 4-4	Bain thermostatique pour le contrôle thermique de la PAC.....	73
Figure 4-5	Interface logicielle de contrôle du banc d'essai	74
Figure 4-6	Cycle expérimental d'appel de puissance du véhicule FC-PHEV.	75
Figure 4-7	Estimation en temps réel de <i>tst</i>	78
Figure 4-8	Distribution de puissance de la pile et puissance de traction du véhicule	79
Figure 4-9	Estimation du SOC dans les batteries.....	80
Figure 4-10	Évolution de la température de la pile Hyteon	81
Figure 4-11	Résultats de la distribution de puissance et flux de chaleur dans la pile Hyteon	82
Figure 4-12	Véhicule hybride Nemo à l'IRH	83
Figure 4-13	Pile à combustible Mobixane	84
Figure 4-14	Schéma général de la Mobixane.....	86
Figure 4-15	Évolution de la Température de la pile Mobixane	88
Figure 4-16	Prédiction du temps que prend la pile pour arriver à la température minimale.....	91
Figure 4-17	Algorithme de contrôle thermique de la pile Mobixane.....	92
Figure 4-18	Température expérimentale pile Mobilxane.....	95
Figure 4-19	Puissance à la sortie du convertisseur CC-CC de la pile Mobilxane.....	95
Figure 4-20	Interface Labview pour le contrôle thermique embarqué sur le Compact RIO.....	96

Liste des symboles

Alphabets

Unité

<i>c</i>	Capacité thermique massique ou chaleur spécifique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
<i>C</i>	Capacité thermique ou capacité calorifique	$J \cdot K^{-1}$
<i>E</i>	Énergie	J
<i>F</i>	Constante de Faraday	$C \cdot mol^{-1}$
ΔH	Enthalpie de formation	$kJ \cdot mol^{-1}$
<i>h</i>	Coefficient de transfert thermique par convection	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
<i>I</i>	Courant électrique	<i>Ampères</i>
<i>m</i>	Masse thermique	kg
\dot{m}	Débit massique	$kg \cdot s^{-1}$
<i>P</i>	Puissance	W
\dot{Q}	Flux de chaleur	W
<i>S</i>	Surface effective de transfert de chaleur	m^2
<i>t</i>	Temps	s
<i>T</i>	Température	$^{\circ}K, ^{\circ}C$
<i>V</i>	Tension	V

Symboles grecs

η Rendement

Indices supérieurs et inférieurs

a Air

act Activation

amb Ambiant

b Batterie

cell Cellule

con Concentration

cw Convection forcée à de l'eau

fc Pile à combustible (« Fuel Cell »)

he Élément chauffant

in Entré

m Mécanique, moyenne

max Maximum

min Minimum

mst Transport des espèces

nc Convection naturelle

ohm Ohmique

out Sortie

ocv Tension de circuit ouvert

rh Réaction de l'hydrogène avec l'oxygène

<i>st</i>	Temps pour démarrer
<i>td</i>	Durée du trajet
<i>tr</i>	Traction
<i>w</i>	Fluide liquide
<i>wh</i>	Échanger de chaleur à l'eau

Chapitre 1 - Introduction

Le développement de sources d'énergies alternatives et propres devient une priorité tout en cherchant la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles. Selon les statistiques du rapport d'inventaire national¹ [1] au 2010, le transport représente 24 % des émissions de gaz effet de serre (GES²) au Canada. Les processus de raffinage et de production des différents types de combustible sont aussi responsables d'une grande partie des émissions, environ 22 % du total des GES.

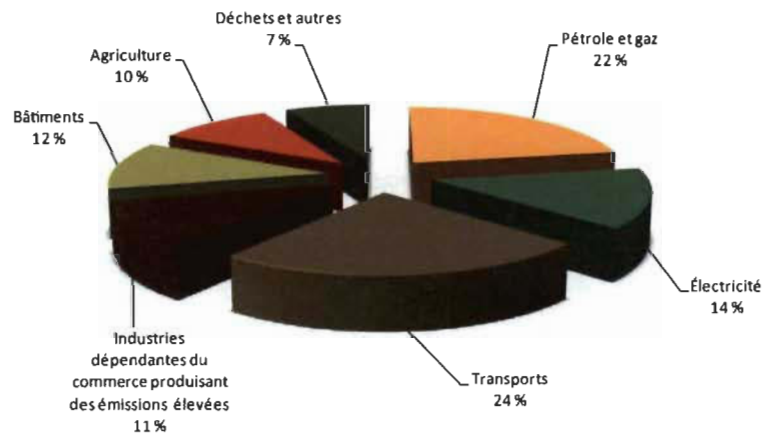


Figure 1-1 Ventilation des émissions du Canada, par secteur économique [1]

¹ Rapport d'inventaire National «sources et puits de gaz à effet de serre au Canada», www.ec.gc.ca

² Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui absorbent une partie des rayons solaires, bloquent les réfléchis par la surface terrestre et retiennent ainsi la chaleur. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂ ou gaz carbonique), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O) et l'ozone (O₃) sont les principaux GES naturellement présents dans l'atmosphère.

Dans la recherche d'alternatives écologiques pour le transport, les véhicules entièrement électriques (Full Electric Vehicles (FEVs)) et les véhicules électriques hybrides (VEH) se présentent comme une solution viable et fiable. Parmi les principaux avantages de l'électrification des véhicules, nous pouvons identifier : une diminution de la pollution des centres urbains, une réduction des émissions de GES et une alternative à la dépendance du pétrole, étant donné l'obligation d'en trouver une solution alternative.

Grâce aux derniers élans de l'industrie automobile, il est possible déjà de trouver dans le marché des solutions « zéro-émission », des voitures électriques très performantes et sécuritaires, avec une efficacité énergétique assez améliorée par rapport aux véhicules conventionnels à moteur à combustion interne (MCI). Le rendement du moteur électrique est d'environ 85 % alors que pour un MCI celui-ci ne dépasse pas les 30 %.

Une technologie très connue est le véhicule électrique à batteries BEV (« Battery Electric Vehicle » (BEV)). Différents types de batteries sont utilisés ou en cours de développement [2][3] pour ce type de véhicule. Les principaux problèmes liés à l'utilisation des batteries sont : la basse autonomie en comparaison avec les véhicules à l'essence due à une densité masse-énergie des batteries relativement basse et une durée de vie rapportée à son coût de production pas très attractive.

La combinaison de batteries avec d'autres sources de puissance offre aux véhicules électriques de grandes possibilités et flexibilités du côté de la gestion énergétique, comme la récupération d'énergie à partir du freinage de régénération ou l'intégration des technologies orientées à l'extension d'autonomie et la gestion plus efficace de l'énergie.

Dans ce contexte, une alternative très intéressante comme vecteur énergétique dans les véhicules électriques où même dans les véhicules à moteur à combustion interne est

l'hydrogène (H_2), ce gaz peut être brûlé dans un moteur de combustion interne ou converti en électricité dans une pile à combustible (PAC), où les deux processus n'émettent que de la vapeur d'eau.

En comparaison avec d'autres moyens de stockage d'énergie, l'Hydrogène a une densité massique d'énergie très élevée [4][5]. Grâce à cette caractéristique, l'incorporation des PAC à hydrogène est considérée comme solution au problème d'autonomie des BEV [2][6] et à la possibilité de recharge dans un temps acceptable. Le HEV-FC (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle) est appelé dans certains contextes académiques comme la voiture du futur. L'intérêt pour cette technologie est chaque fois plus croissant.

L'Hydrogène et les PAC ont été un sujet très intéressant d'étude comme système de propulsion pour les véhicules électriques à partir de la seconde moitié du siècle dernier. En effet, en 1959 aux États-Unis a été construit le premier prototype de véhicule propulsé par une PAC, un tracteur agricole du constructeur Allis-Chalmers modifié par Harry Karl Ihrig [7], après cela une grande quantité de prototypes de différentes marques et tailles ont été développés, mais c'est en 2002 que la compagnie Honda sort le premier véhicule commercial impulsé par une PAC, le FCX-V4 [8] et en 2008 sort le premier modèle pour les consommateurs courants : le FCX Clarity.

L'Hydrogène ne se trouve pas sous forme pure dans la nature, actuellement. Une grande partie de l'hydrogène consommé est produite à partir du gaz naturel tandis qu'une partie minoritaire est produite à partir de l'électrolyse de l'eau [9]. Dans la Figure 1-2 se trouve une comparaison des émissions de GES due à l'utilisation des différents combustibles, la production d'hydrogène génère de très basses émissions en comparaison avec les autres combustibles utilisés actuellement.

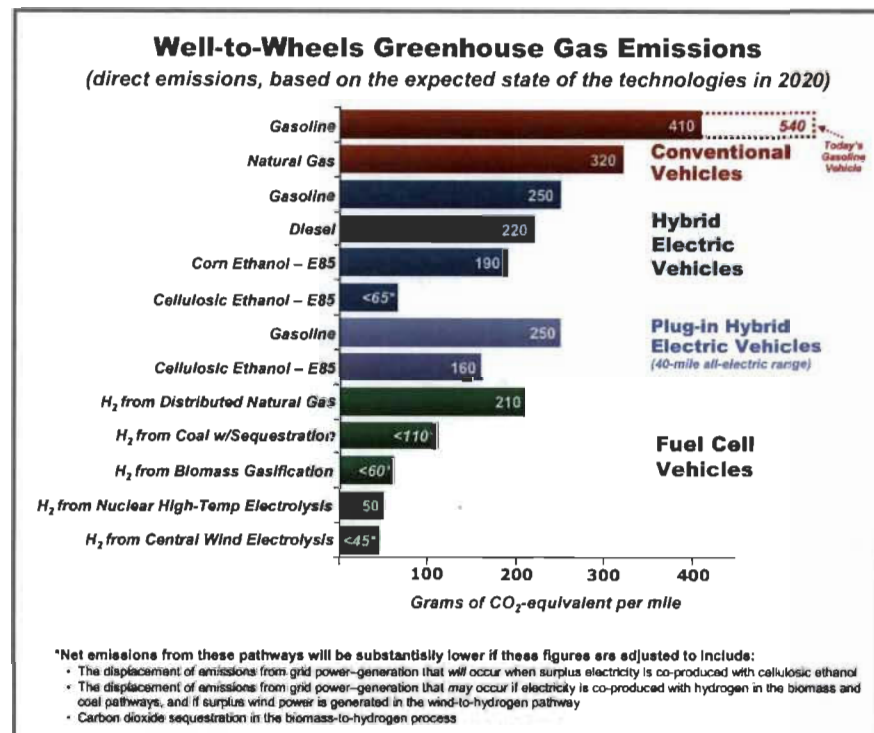


Figure 1-2 Émissions de GES des divers combustibles [9] (DOE³ 2009, 2010)

Dans cette analyse, la production d'hydrogène à partir de sources d'énergies propres comme les énergies renouvelables, est une priorité si nous pensons à l'hydrogène comme une solution viable avec l'environnement.

De toute façon, si nous pensons aux véhicules électriques comme une solution pour la réduction des émissions, cela demande non seulement une substitution des d'énergies fossiles utilisées dans les moteurs de combustion, mais aussi un changement des sources premières pour la génération d'électricité, étant donné que les batteries ou l'hydrogène ne sont qu'un moyen de stockage d'énergie.

³ U.S. Department of Energy, <http://www.hydrogen.energy.gov>

Les bénéfices pour l'environnement de l'utilisation des VEH-FC à la place de véhicules à moteur conventionnel sont nombreux, le plus important est la réduction des émissions de GES. Cependant, la pénétration du marché et la viabilité économique de cette technologie dépendent des avancées réalisées afin de combler certaines lacunes importantes dans l'utilisation des PAC. Par ailleurs, l'adoption des véhicules à PAC dépend aussi de la disponibilité des infrastructures de production, de stockage et de distribution d'hydrogène, ainsi que de la conception de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés pour la fabrication des piles, ces développements doivent envisager principalement la réduction des coûts de production, la maximisation de la durabilité, l'amélioration des performances et la réduction de la taille et du poids du système PAC.

En suivant ces directives, nous nous proposons d'aborder un problème spécifique dans les VEH-FC, le démarrage à froid des PAC. Ce sujet est très important dans l'implantation de systèmes de transport basés sur VEH-FC spécialement dans les pays avec des conditions climatiques froides.

1.1 Contexte général du projet de recherche

Ce projet est réalisé à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) de l'Université du Québec à Trois-Rivières, centre scientifique consacré à la recherche sur l'Hydrogène en tant que vecteur énergétique. De nombreuses études et projets concernant la technologie de l'hydrogène ont lieu dans ses laboratoires. La production de l'Hydrogène à partir d'énergies renouvelables, le développement des matériaux pour le stockage et la consommation dans différentes applications sont les principaux axes de recherche.

À l'IRH, deux types de technologies pour l'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules électriques sont en cours de déploiement : la production d'électricité à l'aide d'une pile à combustible et la combustion d'hydrogène dans un moteur thermique.

Le micro camion Nemo est un utilitaire électrique rechargeable conçu et fabriqué au Québec. Classifié comme véhicule électrique à basse vitesse (VBV), 40 km/h de vitesse maximale, ce prototype a été acquis par l'IRH en 2011, sa fonction principale est de servir comme plateforme expérimentale pour permettre aux chercheurs et étudiants de l'IRH d'avancer dans les projets sur la motricité électrique en utilisant l'Hydrogène. Actuellement différents algorithmes et stratégies de partage de puissance et de gestion énergétique sont testés à l'aide de ce véhicule.



Figure 1-3 Véhicule Nemo de l'IRH

Le Nemo est doté d'un système de propulsion 100 % électrique. Ce système est composé d'un banc de batteries d'acide-plomb et d'une pile à combustible du type PEM (membrane échangeuse de protons). Un système d'acquisition et de contrôle basé sur la technologie en temps réel Compact RIO de National Instruments a été mis en place pour les

différents algorithmes de commande et gestion thermo énergétique du véhicule. Les principaux travaux concernant le travail de recherche décrit dans ce mémoire sont orientés sur la gestion thermo énergétique de la pile à combustible et principalement l'étude sur le de démarrage à froid de la PAC. Cette pile est implantée comme système d'extension d'autonomie, mais sa plage de températures de fonctionnement (0-65 °C) l'empêche de démarrer pendant l'hiver québécois.

Pour valider le modèle thermique et les stratégies de démarrage à froid assisté, nous avons développé un banc d'essai avec une pile refroidie par de l'eau. Bien que ce banc n'ait pas la possibilité de faire des expériences à des températures inférieures à zéro – degrés, ceci est utilisé pour la validation d'une méthode de démarrage assistée des piles principalement pour l'estimation de délais et de l'énergie extra demandée avant le démarrage. Cette approche comprend l'utilisation d'un système de chauffage géré en considérant les besoins énergétiques du véhicule. Nous partons sur la base qu'il existe des solutions de fluides caloporteurs spécialement conçus pour les piles du type PEM. Ces fluides à base de glycols ont une conductivité électrique très faible et maintiennent leur état liquide jusqu'à des températures de -40 degrés Celsius [10]. Donc dans ce cas la chaleur latente lors d'un changement d'état n'est pas présente dans le bilan énergétique.

L'énergie stockée dans les batteries sert à la fois à propulser le véhicule et à alimenter les accessoires permettant d'assister la PAC pendant son opération. En particulier, lors d'un démarrage à froid, si la PAC requiert une assistance de chauffage, l'énergie est directement puisée de ces batteries. L'énergie ainsi utilisée pour aider la PAC au démarrage n'est plus disponible pour la propulsion. C'est pourquoi il est très important de définir une stratégie efficace de gestion thermo énergétique pour l'ensemble batterie-PAC.

1.2 Problématique

La littérature nous apprend que la PAC de type PEM est sensible aux conditions extrêmes de température [11][12][13]. En effet, quand la pile est en fonctionnement dans les conditions thermiques normales (température d'opération largement supérieure à celle du point de congélation), la réaction électrochimique qui a lieu dans la cellule produit un mélange liquide et de la vapeur d'eau. Cependant, l'eau gèle lorsque la température interne se trouve en dessous du point de congélation. La présence de cristaux de glace sur les membranes des cellules de la PAC réduit son efficacité à produire du courant en plus de sa durabilité. L'implantation des véhicules à PAC de type PEM dans les systèmes de transport pour de régions géographiques où la saison d'hiver est très longue et très froide (le climat québécois par exemple, voir figure 2), nécessite la mise au point de solutions fiables et efficaces pour le démarrage à froid ainsi que pour la réduction des risques de dommages irréversibles (dans la section 2.2.1, ce sujet sera abordé).

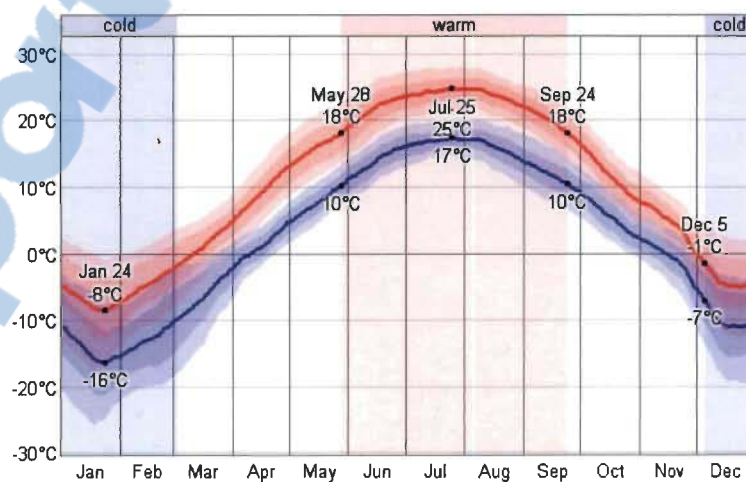


Figure 1-4 Historique des températures moyennes pour Trois-Rivières Québec⁴

⁴ Il est basé sur les données historiques de 1991 à 2011, Source; weatherspark.com.

En effet, après une exposition de la PAC à température au-dessous de zéro degré pendant une durée considérable sans fonctionnement, la température interne de la PAC descend lentement ou rapidement selon les caractéristiques des couches d'isolation thermique implantées. Cette décroissance de la température favorise la formation de cristaux de glace sur les membranes à partir de l'eau résiduelle produite pendant la phase de fonctionnement antérieure. Ceci peut aussi entraîner des difficultés pour le transport de masses et probablement faire échec au procédé de démarrage du système subséquent.

Plusieurs travaux sur l'impact de températures trop froides sur la performance des piles du type PEM ont rapporté des dégradations irréversibles dans plusieurs de leurs composants structurels, la formation de glace. L'expansion du volume des matériaux des cellules sous le point de congélation est une des raisons de la dégradation accélérée de la PAC [14].

Il est important de maîtriser le problème de démarrage à froid de la PAC en y apportant des conditions prévenant la formation de glace [15][16]. Dans les applications réelles, les constructeurs de voitures de type PHEV-FC prennent des mesures préventives en implantant des mécanismes d'assistance au démarrage par l'entremise de système de chauffage d'appoint pour minimiser la dégradation de la pile. Ces systèmes utilisent l'énergie préalablement stockée dans les batteries pour fonctionner. Leurs rendements sont difficiles à évaluer en raison de leurs modes de fonctionnement basés sur l'expertise du constructeur. Ainsi toute forme d'inefficacité prive le véhicule d'une partie de son énergie de motricité. Le premier problème abordé dans le projet de recherche concerne donc la mise au point d'une méthode efficace d'assistance thermique permettant de préparer la PAC à démarrer convenablement.

Lorsque la PAC est opérationnelle, son rendement augmente en fonction de la température [17]. Peu de travaux se sont attardés sur les méthodes efficaces permettant d'élever rapidement la température de la PAC. C'est pourquoi un second problème concernant la détermination du profil de courant pour une élévation rapide de la température de la PAC est défini dans le projet de recherche. Une fois que sa température atteint sa valeur optimale de fonctionnement, le problème de régulation thermique a été largement traité et documenté. Le problème de régulation ne sera pas traité dans ce projet. Cependant, nous avons sélectionné une méthode robuste et simple lors de l'élaboration de la stratégie globale de la gestion thermo énergétique du véhicule.

La nécessité de disposer de temps afin de préparer la PAC à démarrer convenablement entraîne une complexité additionnelle dans le module de gestion énergétique de l'ensemble batterie-PAC. En effet, ce module devrait être en mesure d'anticiper le moment où la contribution de la PAC est requise de manière à laisser du temps pour le démarrage à froid de la PAC. Le troisième problème étudié dans ce projet concerne donc la gestion anticipative de la PAC sous le point de congélation lorsqu'elle est utilisée sur un véhicule de type PHEV-FC.

1.3 Objectifs

L'objectif principal est de proposer une nouvelle stratégie globale de gestion thermo énergétique d'une PAC sur un véhicule hybride rechargeable en considérant un démarrage à froid efficace. Cette stratégie devrait permettre un contrôle optimisé de la température de la PAC, en cherchant les meilleures performances électriques et en tenant compte des limitations physiques et temporelles de tous les modules énergétiques impliquées. Le but ultime est donc d'augmenter l'efficacité sur route du véhicule et de prolonger la durée de

vie de la PAC. Les sous-objectifs suivants sont définis en fonction des problématiques ci-dessus préalablement identifiées :

1. Le développement d'une stratégie et d'un algorithme de contrôle de température pour le prédémarrage d'une pile à combustible de type PEM : cette stratégie doit considérer une méthode optimisée pour chauffer la pile à partir d'une source de chaleur auxiliaire, l'impact de la température extérieure sur l'évolution thermique de la pile et les contraintes opératoires imposées par le système de gestion énergétique PAC- batterie. Ces contraintes opératoires sont le temps prévu pour mettre à contribution la production de la PAC et l'énergie totale qu'elle doit fournir afin de permettre au véhicule d'arriver à destination.
2. L'analyse et le développement d'une méthode optimisée permettant à la température de la PAC d'augmenter rapidement pour atteindre sa valeur de rendement maximal. Dans cette étape, l'impact de la température sur le rendement transitoire sera analysé ainsi que la recherche du profil de puissance optimal permettant à la température de la PAC de croître rapidement avec peu d'apport calorifique externe.
3. Le développement d'une stratégie globale de gestion thermo énergétique du véhicule hybride et rechargeable : cette stratégie doit gérer toutes les phases de fonctionnement de la PAC, y compris la régulation thermique lorsque sa température atteint sa valeur nominale. Par ailleurs, la stratégie doit tenir compte du temps requis pour préparer la PAC au démarrage à froid. Par ailleurs, les différents phénomènes d'échange de chaleur qui ont lieu dans la pile seront considérés pour augmenter la performance du contrôleur.

1.4 Méthodologie

La stratégie de gestion thermo énergétique comprenant le démarrage à froid d'une pile à combustible comprend les étapes suivantes :

1. Une revue bibliographique et une formulation du problème de démarrage à froid : la problématique de démarrage d'une pile à combustible d'une manière générale est un champ de recherche très actif. La revue bibliographique qui sera effectuée nous permettra de bien formuler cette problématique en considérant le contexte spécifique aux véhicules de type PHEV-FC. Cette information principalement bibliographique permet de fixer toutes les contraintes liées au fonctionnement de la PAC sous le point de congélation (température minimale de fonctionnement, temps requis pour le démarrage, énergie utilisée pour réchauffer la structure de la PAC, etc.).
2. Une description de la dynamique thermique de la pile à partir d'un modèle thermique transitoire existant. Ce modèle doit considérer l'interaction avec :
 - le système de chauffage;
 - l'environnement (avec des températures sous le point de congélation);
 - les gaz utilisés par la réaction;
 - la chaleur générée par la réaction;
3. La conception d'un algorithme d'optimisation qui permet de démarrer la pile dans un temps fixé par le système de gestion d'énergie du véhicule. En utilisant le modèle thermique transitoire de la PAC, l'objectif sera d'amener la température de la pile à la température d'opération en utilisant le minimum d'énergie des batteries

et en un temps limité. Lors de cette étape de la méthodologie, nous considérons les restrictions suivantes:

- le temps de démarrage effectif de la PAC déterminé par le système de gestion énergétique du véhicule doit être respecté;
 - si un apport de chaleur par un dispositif d'appoint est requis lorsque la PAC est sous le point de congélation, alors le système de gestion thermique de la PAC doit tenir compte de la puissance limitée de l'élément chauffant;
 - la température ambiante n'est pas connue à l'avance, ce qui exige du système thermique de s'adapter continuellement, lorsque le véhicule se déplace.
4. Enfin, la validation des modèles et des algorithmes expérimentale à l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) sur un banc d'essai et sur un véhicule hybride à PAC permettra de mesurer l'efficacité globale de l'approche proposée.

1.5 Organisation du Mémoire

La structure de ce mémoire suit la méthodologie annoncée antérieurement. Le premier chapitre sera consacré à l'introduction générale du projet, la contextualisation du sujet de recherche selon la problématique à résoudre et la méthodologie que nous allons utiliser. Le deuxième chapitre contiendra la recherche bibliographique qui sous-tend le choix de la méthodologie et l'approche de la problématique. Le troisième chapitre sera dédié à la proposition et au développement de la stratégie de gestion thermo énergétique de la pile. Le quatrième chapitre contiendra les résultats des expériences et des simulations faites pour la validation des algorithmes et des modèles. Nous prenons une partie de ce chapitre pour l'étude de la pile à combustible sur le véhicule Nemo. Le dernier chapitre est dédié à la

conclusion générale, les discussions sur les résultats observés, les perspectives et les travaux futurs.

Chapitre 2 - L'état de la recherche

2.1 Les véhicules électriques hybrides à pile à combustible (VEH-FC)

Différents types de technologies de piles à combustible sont étudiés pour des applications avec véhicules VEH [6]. Toutefois, la pile à membrane échangeuse de protons (PEM) est une des sources d'énergie les plus utilisées pour la motricité électrique [18] .

Dans la plupart des applications de véhicules impliquant des piles à combustible et un banc de batteries (Véhicule hybride à pile à combustible, PHEV-FC), les batteries sont principalement utilisées pour récupérer la puissance régénérée durant le freinage et pour absorber les transitoires rapides et élevés de puissance provenant de la dynamique du véhicule [19].

Le rendement d'un véhicule hybride avec pile à combustible et banc de batteries est essentiellement lié d'une part à la topologie de connexion et d'autre part à la gestion de flux de puissance entre toutes les composantes que contribuent à la propulsion du véhicule. Beaucoup de travaux portant sur la problématique spécifique de la gestion d'énergie et du partage de la gestion de puissance ont été réalisés [20][21][22].

La présence et l'utilisation d'une batterie pour aider la PAC à absorber les puissances transitoires élevées lorsque le véhicule se déplace confère deux configurations :

- les véhicules à PAC : la batterie de taille réduite joue strictement les rôles d'absorption des pointes de puissance de traction et de stockage de l'énergie de régénération lors des phases de décélération du véhicule. Cette solution est souvent

coûteuse en raison notamment de la nécessité de disposer d'une PAC de grande puissance pour la traction.

- Les véhicules hybrides rechargeables à PAC (PHEV-FC): l'énergie stockée dans la batterie contribue à la propulsion tout comme le système à PAC. Ainsi, la taille de la PAC peut se réduire et celle de la batterie augmenter. En plus de fournir une partie de l'énergie de propulsion, cette batterie absorbe les pointes de puissances dues aux phases transitoires lors du déplacement du véhicule et stocke l'énergie de régénération du freinage. Une fois déchargée, la batterie est rechargée de manière conventionnelle lorsque le véhicule est à l'arrêt.

Trois topologies de connexion entre la PAC et les batteries ont été proposées récemment [23] :

- La topologie série:

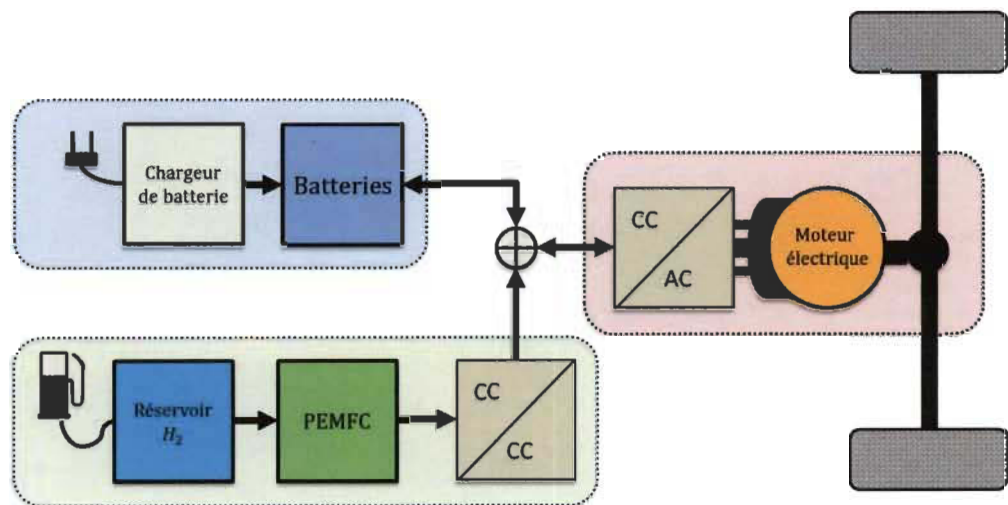


Figure 2-1 PHEV-FC topologie série.

La topologie de connexion série permet de démarrer la pile dans un point de fonctionnement optimal, la puissance produite peut aller directement au train de traction en cas de demande ou bien recharger les batteries. Cette topologie est recommandée pour des charges avec des composants fréquentielles élevées, de cette façon les batteries peuvent absorber les demandes brusques de courant dans le bus continu (CC).

- La topologie parallèle :

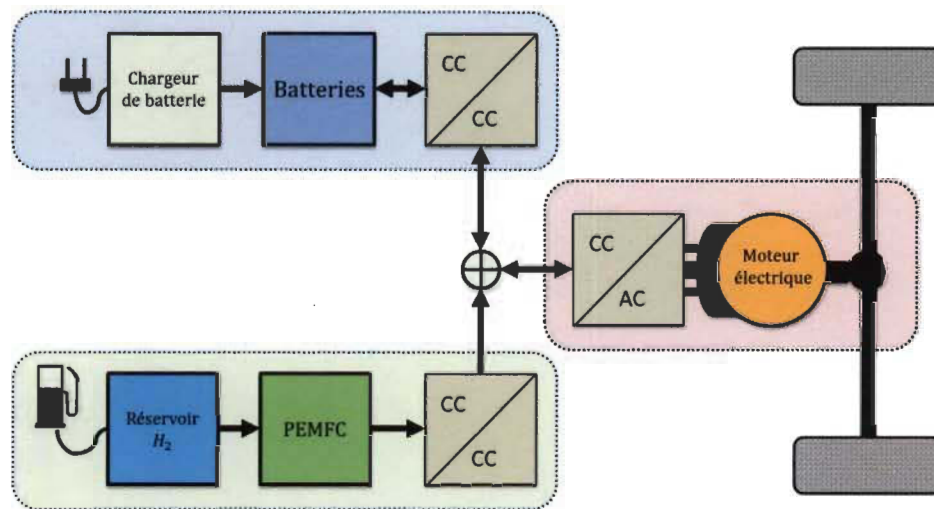


Figure 2-2 PHEV-FC topologie parallèle.

Dans la topologie parallèle, les deux sources, la PAC et les batteries sont connectées à la charge en utilisant un bus continu régulé. Dans cette configuration, la puissance est partagée selon le dimensionnement des sources et le mode de partage imposé par le système de gestion d'énergie. Cette topologie est recommandée pour des systèmes à multiples sources d'énergie. Par rapport à la configuration série, le rendement de la topologie parallèle est inférieure due à l'électronique de puissance incluse entre les batteries et le bus CC.

- La topologie série-parallèle :

Cette topologie est une combinaison des deux antérieures. Elle conserve les composants de la topologie parallèle et la différence se trouve dans la commande de l'électronique de puissance entre le bus CC et les batteries. L'électronique de puissance peut être commutée pour travailler dans les deux configurations selon les stratégies de partage de puissance du véhicule.

L'IRH s'est doté d'un véhicule hybride rechargeable équipé d'une PAC et utilisant la topologie série. C'est une topologie de départ simple, assez robuste pour les systèmes de prolongation d'autonomie et celle-ci nous permet d'éviter une électronique de puissance complexe pour les batteries. Nous considérons que les batteries ont assez de puissance pour la propulsion quand la pile n'est pas en fonctionnement.

2.2 La pile à combustible et les basses températures

Les études orientées sur la modélisation des PAC sont assez complexes en raison notamment de l'interaction des phénomènes électriques, chimiques, thermiques et fluidiques à l'intérieur des cellules. Ces modèles sont limités dans leurs capacités à décrire fidèlement le comportement de la PAC sous certaines conditions (régime transitoire rapide observé durant la mobilité du véhicule, démarrage efficace sous le point de congélation). Parmi les différents défis qui restent à surmonter figure le démarrage rapide et efficace de la PAC sous le point de congélation. En effet, l'eau produite pendant le fonctionnement gèle lorsque la température ambiante est sous le point de congélation. Cet état de gel a pour effet de réduire la capacité de la PAC à redémarrer subséquemment et de réduire sa durée de vie. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'analyser la problématique de

démarrage à froid d'une PAC où des stratégies novatrices seront proposées et que seront par la suite évaluées expérimentalement. Ainsi, la gestion thermo énergétique d'une PAC dans le contexte d'un véhicule hybride est le composant central de notre projet de recherche

Les études et travaux relatifs au démarrage à froid des piles du type PEM mettent en exergue deux défis principaux : la capacité d'un démarrage rapide et la réduction des détériorations irréversibles inhérentes à l'utilisation dans des conditions thermiques adverses, spécialement quand la température interne initiale est sous le point de congélation de l'eau.

Parmi les propositions, les plus remarquables sont des solutions portant sur les modifications structurelles au niveau de la fabrication, de la conception globale de la PAC et de ses accessoires [24]. À cet effet, de nouveaux matériaux, mécanismes et procédés dédiés au démarrage sont déjà enregistrés sous forme de brevets d'invention par les grands fabricants de voitures à PAC.

Du côté académique, la documentation scientifique publiée est limitée principalement aux études sur le comportement thermo énergétique de la PAC à températures très basses [25]. Les efforts sont déployés spécialement pour la modélisation des phénomènes reliés à la formation de glace dans les cellules et pour les expériences destinées à l'estimation de dommages au niveau de l'ensemble membrane-électrodes (MEA).

Par ailleurs, il y a des travaux expérimentaux qui montrent les possibilités de démarrage à partir de températures basses, sous le point de congélation de l'eau [26]. Cependant, la plupart de ces études concluent principalement que pour maximiser la durée de vie de la PAC et réduire la probabilité d'un endommagement total ou partiel pendant le processus de démarrage, il est fortement suggéré d'éviter un démarrage brusque sous le

point de congélation et de prendre des dispositions afin d'emmener la température de la PAC à l'intérieur de sa plage de fonctionnement avant de tirer du courant électrique [12].

Afin de couvrir tous les aspects du projet de recherche, la revue bibliographique est composée de trois parties :

- les principales études sur la détérioration irréversible de la PAC;
- les méthodes de chauffage et de contrôle thermique de la pile;
- les principales études sur les stratégies de démarrage à froid.

2.2.1 Études sur la détérioration irréversible

Les études sur la détérioration irréversible sont très importantes pour pouvoir comprendre les limitations du système au moment de démarrage de la PAC à températures initiales au-dessous de zéro degré. En général, les approches expérimentales donnent de meilleurs indices en ce qui concerne les limitations et les conditions de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM sous le point de congélation. De plus, ces expériences ont le mérite de fournir des données sur l'impact des conditions de démarrage sur la performance et la durée de vie de la PAC [27]. Ces études pourront beaucoup aider dans un contexte de démarrage non assisté, c'est-à-dire, sans utiliser des sources de chaleur externes pour monter la température initiale de la pile. Dans cette partie de la recherche bibliographique, nous rappelons quelques études sur dégradation des piles à températures négatives pour avoir une idée de la problématique liée aux types de démarrages.

Un travail expérimental très bien cité dans la bibliographie concernant la détérioration de piles de type PEM à cause des températures extrêmement froides a été présenté par Yan [25]. Dans ce travail, l'impact des températures inférieures à zéro degré Celsius est étudié

en profondeur, la détérioration est estimée en analysant le comportement de la courbe de polarisation de la pile après de plusieurs démarrages à des températures de départ de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

À l'aide d'un microscope électronique, les chercheurs ont observé des dommages dans la couche de diffusion de gaz (GDL), des délaminations de la couche du catalyseur et des dommages mineurs dans la couche de support du Téflon. Selon les conclusions, les causes de l'endommagement sont liées à la formation des cristaux de glace dans la cathode de la cellule.

À partir de ces observations, plusieurs recommandations qui peuvent être importantes dans une stratégie de contrôle sont suggérées :

- purger complètement la pile après son fonctionnement peut aider au démarrage postérieur à une température de départ de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sans présenter une dégradation irréversible;
- utiliser des densités de courant basses au démarrage à froid;
- isoler thermiquement la pile contre l'environnement froid;
- imposer un ratio stœchiométrique d'air élevé.

Dans les travaux d'Alink [14], la performance de la PAC à températures inférieures à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a été étudiée. Les résultats et les conclusions sont identiques au précédent travail. Les expériences ont été faites à une température initiale de cellule : $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Selon les auteurs, la principale cause identifiée de détérioration irréversible des cellules est l'expansion du volume due à la formation de glace dans la cellule. L'impact sur la conductivité de la membrane à des températures inférieures au point de congélation de l'eau a été étudié. La

variation de cette grandeur électrique est due principalement à une diminution de la capacité de transfert de charges en raison de la formation de glace.

Les auteurs remarquent alors l'importance de purger l'eau résiduelle dans les cellules pendant chaque procédure d'arrêt du système en utilisant de l'air à faible taux d'humidité.

La purge de la pile requiert de l'énergie qui ne sera plus disponible pour la motricité. C'est pourquoi il est important de tenir compte de la quantité d'énergie requise pour cette opération dans une stratégie globale de gestion thermique de la PAC.

À noter que plusieurs équipes de recherche à travers le monde utilisent ces données afin de fixer une température minimale de fonctionnement comme mesure préventive pour éviter des possibles dommages graves, en attendant les développements de nouveaux matériels et des solutions structurelles répondant aux exigences du démarrage à froid à des conditions froides extrêmes.

2.2.2 Études sur les méthodes de chauffage

Il existe deux techniques principales pour chauffer les piles selon la source de chaleur. L'utilisation de la chaleur d'une source externe à la PAC et la chaleur produite à l'intérieur de la PAC (chaleur de la réaction exothermique de l'oxydation de l'hydrogène) [28]. La deuxième consiste à apporter de la chaleur en provenance d'une source extérieure. Cette dernière méthode est plus accessible dans la pratique, elle ne requiert aucune modification structurale de la pile. Le transfert de chaleur est réalisé en faisant circuler un fluide dans un échangeur de chaleur dont la source de chaleur est obtenue par effet Joule. Des fluides antigels à base de glycol pur mélangés avec de l'eau sont souvent utilisés [24]. Ces fluides

sont disponibles dans le marché. L'air chaud est aussi utilisé surtout pour accélérer le chauffage et réduire la formation de glace pendant le démarrage électrique [24].

Les méthodes qui utilisent les sources de chaleur internes exploitent la chaleur de la réaction catalytique entre l'hydrogène et l'oxygène à l'intérieur de la pile. En effet, cette réaction produit de la chaleur qui est transférée à la structure de la pile par conduction thermique [12]. Un autre mécanisme utilisé pour générer de la chaleur à l'intérieur de la pile consiste à faire circuler du courant dans une résistance électrique intégrée dans la structure de la PAC. La chaleur ainsi produite par effet Joule est alors utilisée pour augmenter la température du GDL par conduction thermique. Cette deuxième méthode exige que l'élément chauffant soit intégré dans la pile pendant sa fabrication [24].

Les modèles thermiques transitoires des piles pour la gestion thermique tiennent en compte les sources de chaleur et les composants qui font partie du système de chauffage.

Dans le travail de modélisation de Jong-Woo Ahn et Song-Yul Choe [29], les différents phénomènes d'échange de chaleur qui ont lieu dans la pile à combustible en incluant les sources de chaleur externes et internes sont pris en compte. Ce modèle constitue une base acceptable pour l'analyse thermique de la pile et permettra de proposer des algorithmes de contrôle. Cependant, les auteurs ont fait deux principales suppositions :

- la pile est considérée comme une seule masse thermique avec une capacité calorifique moyenne;
- l'échange de chaleur par rayonnement et la convection naturelle sont négligeables.

Ces hypothèses ne sont pas valables lorsque la pile doit fonctionner sur un véhicule hybride. En effet, le mouvement du véhicule peut augmenter les échanges de chaleur par

convection naturelle avec l'environnement. Tenir en compte l'échange de chaleur avec l'environnement est important pour les stratégies qui planifient de garder chaude la pile pour de longues périodes de temps. Pesaran [15] a présenté un travail dans lequel est considérée la chaleur par convection libre au milieu ambiant et l'estimation de la chaleur minimale nécessaire pour maintenir la pile en tout temps à une température donnée.

2.2.3 Études des stratégies pour le démarrage à froid

Nous sommes principalement intéressés par des stratégies de démarrage qui prennent en considération les problèmes de détérioration irréversible de la PAC. Nous pouvons trouver des modèles pour analyser les phénomènes qui ont lieu à des températures sous zéro, mais à la fin, presque toutes les applications réelles évitent le fonctionnement de la pile à une certaine température minimale autour de zéro degré.

Sundaresan et Moore [30][12] ont réalisé une modélisation pour évaluer le comportement d'une pile à combustible du type PEM pendant le démarrage à des températures en dessous zéro degré. La principale contribution de ce travail réside dans l'évaluation des différents scénarios pour analyser la consommation énergétique des sources de chaleur externes et internes. De plus, l'impact énergétique des circuits de circulation du fluide et des échangeurs de chaleurs ont également été considérés. Les résultats de simulation de ce travail montrent l'évolution de la température de la PAC, dans un intervalle de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Trois scénarios ont été étudiés; température de départ de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec démarrage électrique à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les principales conclusions sont relatives au bilan énergétique après le démarrage. Chauffer la pile à des températures sous le point de congélation aide à l'économie de

l'énergie et aussi diminue le temps nécessaire pour arriver à la température optimale d'opération. Sur les mécanismes de chauffage, les auteurs recommandent l'utilisation de sources de chaleur internes comme la résistance électrique embarquée ou la réaction chimique dans les électrodes.

Ce travail nous montre deux approches de modélisation rapportées dans la littérature : modèle moyen et modèle multicouche.

- Modèle moyen : Le modèle moyen considère toute la pile et le système d'échange de chaleur comme une masse avec une capacité calorifique moyenne et considère aussi que le circuit de refroidissement est réduit (voir Figure 2-3). Ce modèle permet d'avoir une première approche de la quantité d'énergie et le temps que prend le système pour préparer la pile thermiquement pour son démarrage électrique.
- Modèle multicouche : Le modèle multicouche est plus précis, le comportement thermique de chaque cellule est fait de façon indépendante et le transfert de chaleur entre cellules est modélisé pour avoir une estimation de la distribution de températures dans tout l'empilement.

Le principal avantage de cette approche se trouve dans la possibilité d'estimer les gradients de température et d'identifier les zones critiques ou plus chaudes. Par exemple, les cellules peuvent présenter en quelques couches une température de 88 °C pendant que la moyenne de la pile est de 80 °C.

La Figure 2-3 montre un schéma sur la composition d'une PAC, les différentes structures constitutives d'une cellule doivent être incorporées dans une modélisation multicouche. Pour un modèle moins complexe et plus dédié au contrôle thermique, les

capacités calorifiques des matériaux sont moyennées et la distribution de température de la PAC est considérée uniforme.

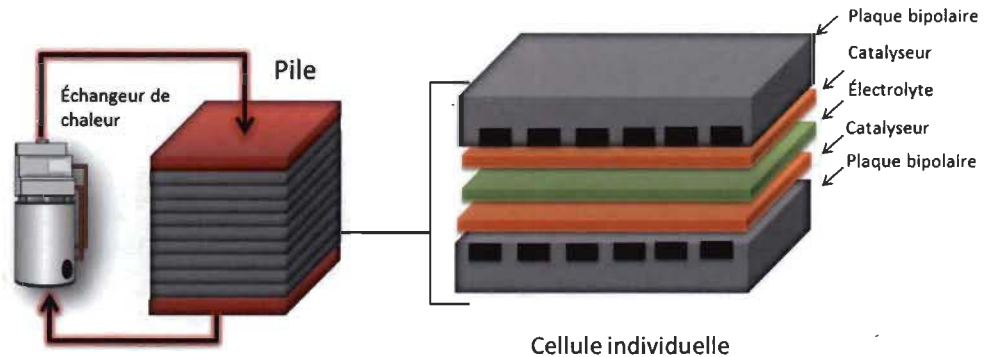


Figure 2-3 Schéma du système pile à combustible avec échangeur de chaleur.

Comme recommandation pour les systèmes de contrôle et gestion thermique des piles à combustible, les auteurs proposent de faire circuler en tout temps le liquide de refroidissement pendant le démarrage et de cette façon avoir une distribution plus uniforme de la température. Notons que l'approche multicouche de la modélisation est essentiellement destinée à la régulation des températures élevées.

2.3 Analyses et synthèse des revues

La plupart des solutions orientées sur cette problématique ont été développées par l'industrie manufacturière dont les documents sont préservés dans le domaine privé ou sous forme de brevets d'invention. Néanmoins, les recherches dans le domaine académique existent, mais sont peu nombreuses.

La modélisation est complexée à des températures au-dessous de zéro degré. La gestion de l'eau produite pendant le démarrage n'est pas facilement abordable, la difficulté réside dans l'estimation de la quantité de glace formée par la réaction et l'application d'une

stratégie de contrôle au niveau du courant électrique et débit de fluides réactifs. Les considérations sur les problèmes de dégradations irréversibles graves pendant le démarrage nous emmènent à proposer une stratégie de démarrage assisté.

Pour une application réelle, l'utilisation de la modélisation multicouche est complexe. En général, le système de contrôle de température doit se concevoir selon le système de mesure, et normalement l'estimation de la température de la pile est faite à partir d'un ou de plusieurs capteurs placés de façon stratégique. Le système de contrôle prend en compte à la fois la température moyenne et le gradient maximal de températures admissibles.

Le démarrage à froid est normalement traité comme un problème général pour des véhicules ayant comme source principale une pile à combustible. Pour ce faire, nous incorporons la contextualisation particulière du véhicule électrique hybride avec la topologie série décrite dans la section 2.1.

Dans ce cas, la gestion énergétique permet d'élaborer des stratégies en visant la maximisation de l'efficacité énergétique du système. Nous proposons de gérer l'énergie du véhicule en programmant le démarrage de la PAC selon les besoins énergétiques du véhicule, un minimum d'énergie pour le préchauffage de la PAC et une solution de contrôle optimal pendant le démarrage électrique de la PAC pour atteindre rapidement le point optimal de fonctionnement en température. Nous traitons aussi le scénario de chauffage après le démarrage électrique de la PAC, pour calculer l'impact sur le bilan énergétique de cette stratégie.

Chapitre 3 - Algorithme de démarrage à froid de la PAC

3.1 Introduction

Nous proposons dans ce chapitre une méthode de prédiction du moment de démarrage du système de chauffage à partir de l'information de consommation d'énergie des batteries fournie par le système de gestion d'énergie du véhicule. Nous considérons l'étude d'un véhicule hybride rechargeable doté d'une pile à combustible. Cette dernière, connectée suivant la topologie série, ne sert qu'à recharger les batteries pendant l'opération du véhicule. Nous considérons que le système global de gestion d'énergie peut connaître l'état de charge des batteries et la puissance moyenne demandée par le système de traction du véhicule pendant un parcours.

Afin de décider du moment opportun de recharger les batteries, un système de gestion énergétique est implanté sur le véhicule. Dans sa forme simplifiée, ce système surveille constamment l'état de charge des batteries afin d'éviter une décharge profonde trop prononcée. Une telle décharge, si elle survenait, entraînerait des dommages irréversibles aux batteries. Par ailleurs, étant donné que la pile à combustible a besoin de temps pour démarrer à froid (temps de chauffage par une source externe, s'il y a lieu, temps de montée en puissance de la pile, une fois démarrée), ce système de gestion doit communiquer à l'avance le moment où la contribution de la pile sera sollicitée.

3.2 L'architecture contrôle du FC-PHEV

La Figure 3-1 représente une topologie série typique pour un véhicule hybride FC-PHEV, les flèches continues et en pointillées représentent le flux d'alimentation en puissance et les signaux de commande, respectivement.

La consigne de puissance P_u générée par l'utilisateur est envoyée comme consigne au Système de Gestion d'Énergie (SGE). Ce dernier génère la puissance mécanique correspondante P_m qui sera fournie par le système de traction du véhicule (moteur électrique et électronique de puissance). Un convertisseur bidirectionnel gère la puissance P_b qui permet aux batteries la décharge et la recharge. Dans cette architecture, le SGE supervise aussi le contrôle thermique de la PAC et l'état de charge des batteries E_b . La puissance générée pour la PAC P_{fc} peut servir de recharge aux batteries ou être dirigée vers la charge (train de propulsion) grâce au nœud électrique commun.

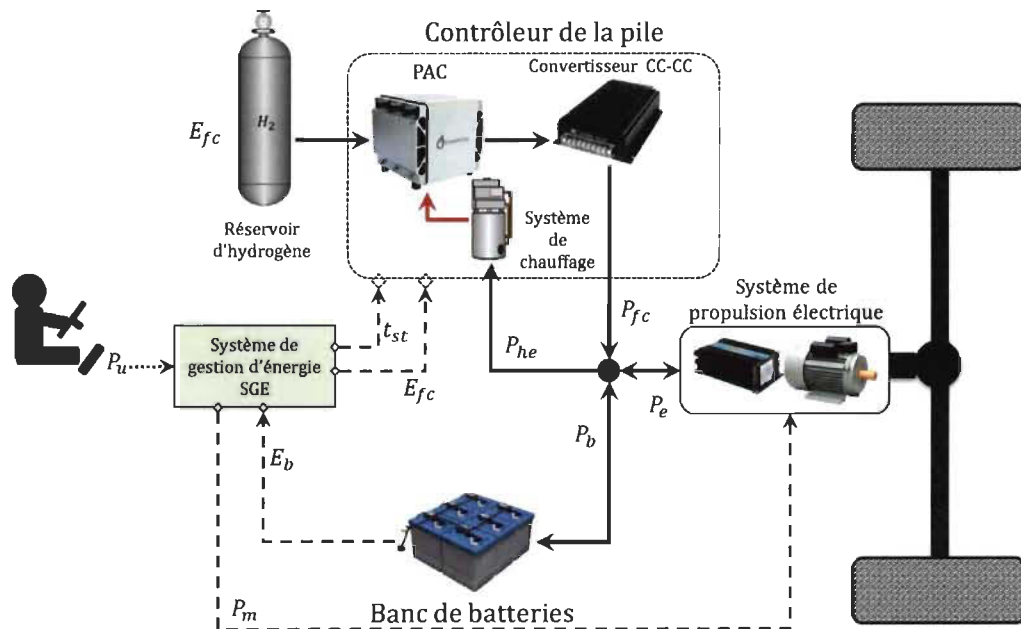


Figure 3-1. Schéma général de l'architecture de gestion d'énergie du véhicule FC-PHEV

Pour prévenir la décharge profonde prononcée des batteries, un seuil minimal d'énergie E_b^{min} est requis [31]. Donc, les batteries peuvent fonctionner en mode de décharge jusqu'à ce que l'énergie restante E_b arrive à la valeur minimale E_b^{min} définie préalablement. Étant donné l'état de charge initial E_b^0 , l'énergie disponible pour accomplir un parcours E_b^a est représentée par l'équation suivante :

$$E_b^a = E_b^0 - E_b^{min} - E_{he}^{max} \quad (3.1)$$

Où E_{he}^{max} est la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer la pile. Dans cette étude, il est considéré qu'une source thermique externe est utilisée pour élever la température de la pile en puisant son énergie des batteries.

Nous considérons que toute la durée moyenne du parcours t_{td} et la puissance moyenne \tilde{P}_m sont connues. Ainsi, l'énergie totale demandée pour le parcours est approximativement :

$$\tilde{E}_{tr} = \tilde{P}_m t_{td} \quad (3.2)$$

Si $(E_b^a < \tilde{E}_{tr})$, l'énergie additionnelle requise à la PAC \tilde{E}_{fc} est estimée en utilisant l'équation suivante :

$$\tilde{E}_{fc} = \tilde{E}_{tr} - E_b^a \quad (3.3)$$

Lorsque la PAC a besoin d'être réchauffée, un échangeur de chaleur doit commencer à fonctionner de façon anticipée pour pouvoir assurer que la pile produise la puissance requise au moment prévu par le système de gestion d'énergie. Ainsi, le SGE doit anticiper le moment où E_b l'énergie des batteries atteindra le seuil minimal d'énergie E_b^{min} . Si P_m est

connu parfaitement, le temps t_{st} pour atteindre E_b^{min} est obtenu en résolvant l'équation suivante :

$$E_b^0 - \int_0^{t_{st}} P_m(t) dt - E_{he}^{max} = E_b^{min} \quad (3.4)$$

Où E_b^0 est l'énergie initiale dans les batteries et $t_{st} \geq 0$.

Dans la pratique, il est difficile de connaître exactement, P_m car elle dépend des valeurs futures de P_u . En effet, la difficulté d'obtention de ces valeurs réside dans des facteurs imprévisibles durant le parcours comme les conditions de la route et du trafic par exemple. Il est donc nécessaire de développer une approche pratique permettant d'estimer ce temps t_{st} . Dans le reste du document, nous désignons par \tilde{t}_{st} , la valeur estimée du temps de démarrage de la pile t_{st} .

L'estimation de t_{st} sera présentée dans la section 3.4.1.

3.1 Stratégie de démarrage à froid de la pile

Ce travail propose une solution pour le démarrage à froid d'une PAC implantée dans le véhicule hybride avec le but d'augmenter son autonomie. Dans ce véhicule le moment de démarrage de la pile est connu, de plus, la température initiale de la pile T_{fc}^0 et la température ambiante T_{amb} peuvent aussi se mesurer. Si T_{fc}^0 et T_{amb} se trouvent en dessous du point de congélation de l'eau, il est recommandé de chauffer la pile afin d'éviter des problèmes complexes dans la gestion de l'eau produite par la réaction chimique, la formation et l'accumulation de glace qui peuvent endommager la pile ou raccourcir sa durée de vie. En effet, les piles du type PEM ont une plage d'opération de température

$(T_{fc}^{min} \leq T_{fc} \leq T_{fc}^{max})$ qui dépend des mécanismes de contrôle thermique et des spécifications du fabricant.

Le modèle électrochimique de la pile à combustible du type PEM montre que son rendement dépend de plusieurs paramètres, tels que la pression partielle des espèces, la concentration d'eau dans la membrane, la stœchiométrie de l'air, etc.[32]. Dans cette étude nous sommes intéressés principalement par l'effet de la température sur la performance et le point de fonctionnement.

Plusieurs études et analyses ont démontré qu'en augmentant la température jusqu'à une certaine valeur maximale, le rendement de la PAC atteint aussi sa valeur la plus élevée. La vitesse de montée de la température dépend du taux de production de chaleur à l'intérieur de la pile et des contributions de chaleur des différents phénomènes thermiques qui interagissent avec elle.

En sachant qu'on a besoin de chauffer la pile quand elle se trouve sous la température minimale de fonctionnement T_{fc}^{min} , la stratégie de continuer de la chauffer pour améliorer son rendement lorsque la pile peut être démarrée électriquement, n'est pas recommandée d'un point de vue de l'efficacité énergétique. En effet, les études théoriques ainsi que les mesures pratiques montrent que la chaleur générée par la réaction électrochimique est suffisante pour augmenter la température jusqu'à ce qu'arrive la valeur maximale de fonctionnement T_{fc}^{max} .

Si la PAC fonctionne comme source secondaire dans le véhicule, le profil de courant de démarrage dans la charge peut être imposé. Dans cette situation, le deuxième problème dans ce travail de recherche, consiste à trouver un profil de courant qui permet à la pile de

s'auto-chauffer le plus rapidement possible, en prenant en compte les conditions thermiques environnementales.

Finalement les besoins de refroidissement de la pile sont aussi traités, pour compléter un algorithme de gestion thermique globale capable de faire fonctionner la pile dans une grande plage de température.

Cet algorithme de gestion thermique, représenté par la Figure 3-2, comporte trois phases différentes :

1. **la phase de préchauffage** : lorsque la température de la pile est inférieure à sa température minimale de fonctionnement, elle ne peut pas démarrer de manière sécuritaire (sans courir le risque d'endommager les membranes). Un système d'apport externe de chaleur est donc requis pour élever la température de la PAC : c'est la phase de préchauffage;
2. **la phase d'auto-chauffage** : une fois que la température a atteint la valeur minimale de fonctionnement de la pile, elle est démarrée et la production de l'électricité qui s'en suit, dégage de la chaleur qui contribue à faire augmenter sa température. Cependant, le rendement de la pile demeure bas. Il faut donc augmenter rapidement la température de la pile pour atteindre T_{fc}^{max} . Nous avons démontré qu'il n'est pas énergétiquement efficace d'aider la pile à accroître rapidement sa température en lui fournissant de la chaleur à partir d'une source externe. La réaction exothermique qui a lieu à l'intérieur de la pile produit suffisamment de chaleur pour élever la température. Grâce au principe de Pontryagin [33], nous avons démontré que le profil de puissance idéal pour élever

rapidement la température de la pile est un échelon dont la valeur stationnaire correspond à la puissance maximale de la pile;

3. **la phase de régulation thermique** : une fois que la température atteint la valeur maximale, le système procède alors à une régulation qui a pour but de maintenir T_{fc} le plus proche possible de T_{fc}^{max} .

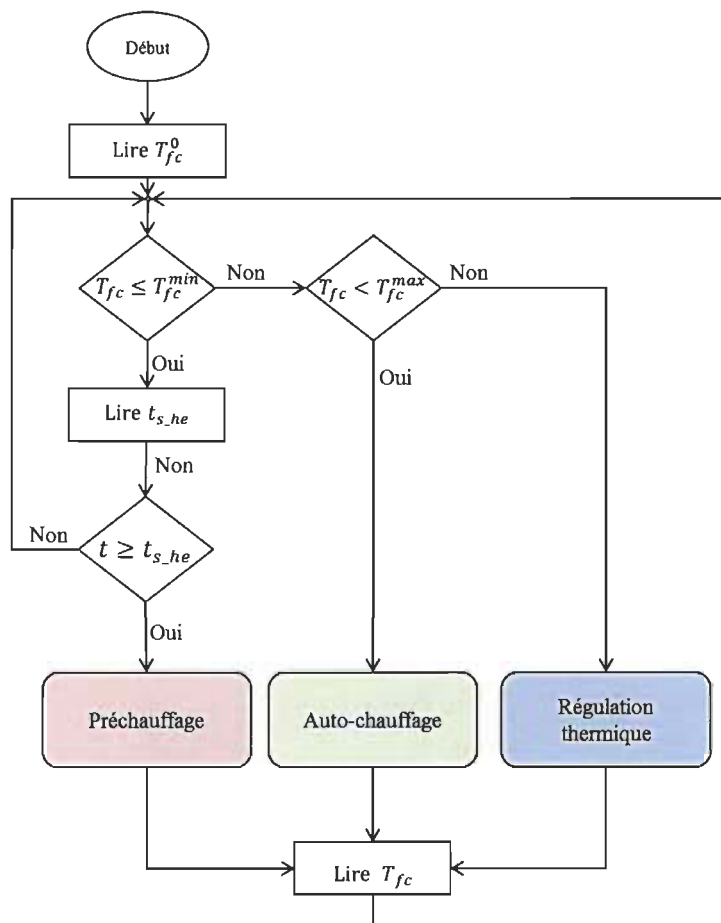


Figure 3-2 Algorithme général de contrôle thermique

3.2 Phase de préchauffage de la PAC

Dans cette section une méthode pour calculer le temps approprié pour commencer à chauffer la PAC lorsque sa température initiale est en dessous de la température minimale

de fonctionnement est étudiée. Nous utilisons une source externe de chaleur, modélisée par un échangeur chaleur comportant un élément chauffant et un fluide caloporteur qui circule, pompé à travers des canaux disposés pour le refroidissement de la pile (voir Figure 3-4).

Dans l'industrie des piles à combustible, il existe déjà des développements importants dans les conceptions de fluides antigel caloporteurs de conductivité électrique suffisamment faible. Les principales solutions sont composées d'eau et de solutions à base de glycol.

Les hypothèses suivantes sont utilisées :

- le temps de démarrage \tilde{t}_{st} est donné par le SGE;
- la quantité d'énergie à produire pour la pile est aussi donnée;
- le fluide utilisé pour chauffer la pile est incompressible;
- le modèle thermique transitoire de la PAC est représenté pour la capacité thermique massique moyenne c_{fc} et la masse m_{fc} ;
- la puissance de chauffage du système d'apport calorique est fixe et connue à l'avance.

La figure suivante représente le système de chauffage relié à la pile PAC. Dans ce modèle, l'échange de chaleur par rayonnement est négligé dû à sa faible intensité. L'enthalpie de fusion ou chaleur latente de fusion considérée comme l'énergie absorbée sous forme de chaleur par un corps lorsqu'il passe de l'état solide à l'état liquide, n'est pas considérée dans bilan énergétique de la pile, étant donné qu'il n'y aura pas de production d'eau quand la température interne de la pile se trouve en dessous du point de congélation et que la glace restante des cycles de fonctionnement antérieurs est minimale grâce à la procédure de purge pendant l'arrêt du système.

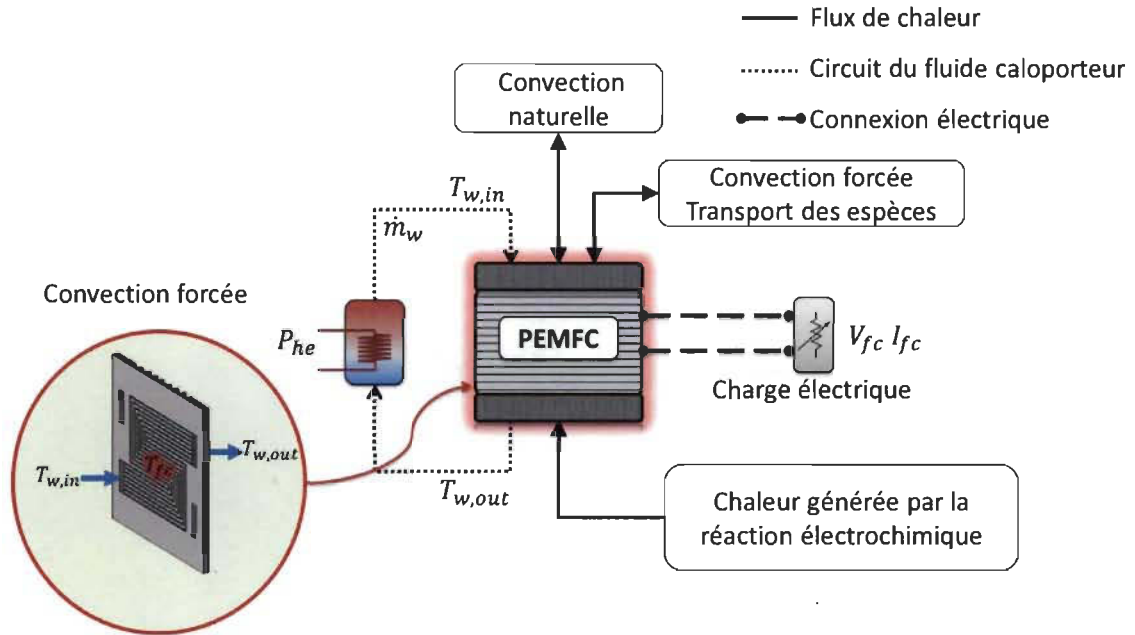


Figure 3-3 Système thermique PAC

La dynamique du système représentée par la Figure 3-3 est modélisée par l'ensemble des équations différentielles de premier ordre :

$$\begin{cases} m_w c_w \dot{T}_w = P_{he} - \dot{Q}_{whe} \\ m_{fc} c_{fc} \dot{T}_{fc} = -\dot{Q}_{amb} + \dot{Q}_{whe} \end{cases} \quad (3.5)$$

Où

m_{fc} est la masse de la PAC;

c_{fc} est la chaleur spécifique moyenne de la PAC;

T_{fc} est la température moyenne de la PAC;

\dot{Q}_{whe} est le taux de transfert de chaleur entre la PAC et le fluide caloporteur;

m_w est la masse du fluide caloporteur;

c_w est la chaleur spécifique du fluide caloporteur;

T_w est la température moyenne du fluide caloporteur;

P_{he} est la puissance électrique dans l'élément chauffant.

La quantité de chaleur Q_{whe} transférée à la pile dépend du débit massique du fluide et aussi de la différence entre la température du fluide à l'entrée et la sortie de la pile, tel qu'il est montré dans l'équation (3.6).

$$\dot{Q}_{whe} = \dot{m}_w c_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (3.6)$$

Où

\dot{m}_w est le débit massique du fluide caloporteur;

c_w est la chaleur spécifique du fluide;

$T_{w,out}$ est la température de sortie du fluide.

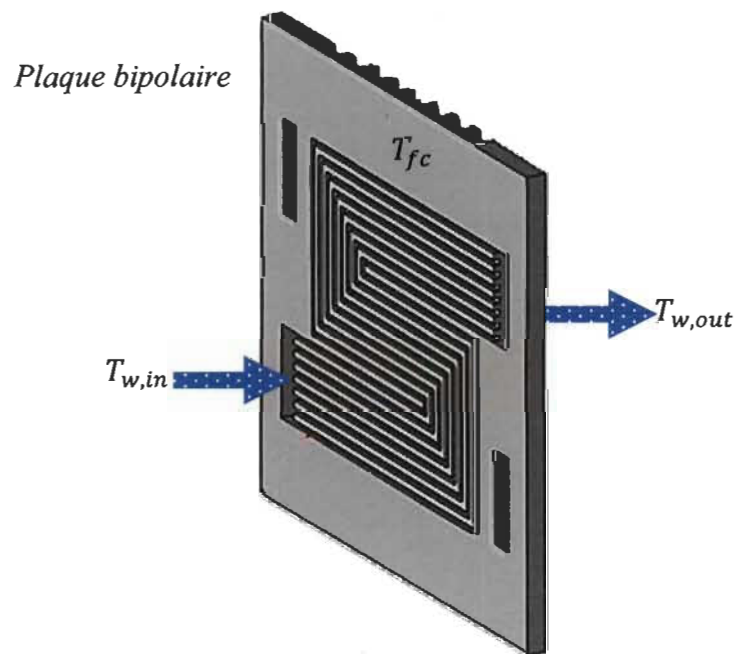


Figure 3-4 Plaque bipolaire d'une cellule avec des canaux pour le refroidissement.

L'équation (3.7) exprime la température de sortie du fluide caloporteur en fonction de la température interne moyenne de la pile et la température d'entrée du fluide dans la pile [34].

$$T_{w,out} = T_{fc} + (T_{w,in} - T_{fc}) \exp\left(-\frac{h_{cw}S_{cw}}{\dot{m}_w c_w}\right) \quad (3.7)$$

Où

h_w est le coefficient d'échange thermique par convection forcée (voir annexe B);

S_w est la surface de transfert de chaleur;

$T_{w,out}$ est la température de sortie de l'eau;

Le regroupement des équations (3.6) et (3.7) permet d'obtenir une expression pour le taux de transfert de chaleur entre la PAC et l'échangeur de chaleur :

$$\dot{Q}_{whe} = k_w (T_{w,in} - T_{fc}) \quad (3.8)$$

Où

$$k_w = \dot{m}_w c_w \left[1 - \exp\left(-\frac{h_{cw}S_{cw}}{\dot{m}_w c_w}\right)\right] \quad (3.9)$$

Le taux de transfert de chaleur entre la PAC et l'environnement \dot{Q}_{amb} est décrit par l'équation (3.10).

$$\dot{Q}_{amb} = h_{nc} S_{nc} (T_{fc} - T_{amb}) \quad (3.10)$$

Où

h_{cn} est le coefficient d'échange thermique par convection;

S_{cn} est la surface d'échange ou surface extérieure de la PAC;

T_{amb} est la température ambiante.

L'évolution de la température est donnée par l'équation (3.11), résultat de résolution du système d'équations (3.5) (voir annexe A).

$$T_{fc}(t) = T_{fc}^{\infty} + (T_{fc}^0 - T_{fc}^{\infty} - C) \exp(-r_1 t) + C \exp(-r_2 t) \quad (3.11)$$

Où T_{fc}^{∞} est donné par l'équation (3.12), cette expression représente la température en régime permanent. Cette équation nous permet de calculer la puissance de chauffage nécessaire P_{he} pour garder la pile chaude dans une stratégie à long terme. Les constantes C , r_1 et r_2 sont définies par les équations (3.13) et (3.14).

$$T_{fc}^{\infty} = T_{amb} + \frac{P_{he}}{h_{nc} S_{nc}} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{\frac{k_w}{C_{fc}} T_w^0 + \frac{k_w}{C_w} T_{fc}^0 + \frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}} T_{amb} - T_{fc}^0 r_2 - T_{fc}^{\infty} r_1}{(r_1 - r_2)} \quad (3.13)$$

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_w} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_w} \right)^2 - 4 \frac{k_w}{C_w} \frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}}} \quad (3.14)$$

Où $C_{fc} = m_{fc} c_{fc}$ et $C_w = m_w c_w$, représentent la capacité calorifique moyenne de la PAC et la capacité calorifique moyenne du fluide caloporteur respectivement.

La Figure 3-5 montre une simulation de l'équation (3.11). Les paramètres thermiques et physiques de la pile sont pris de données expérimentales inscrites dans le Tableau 4-1.

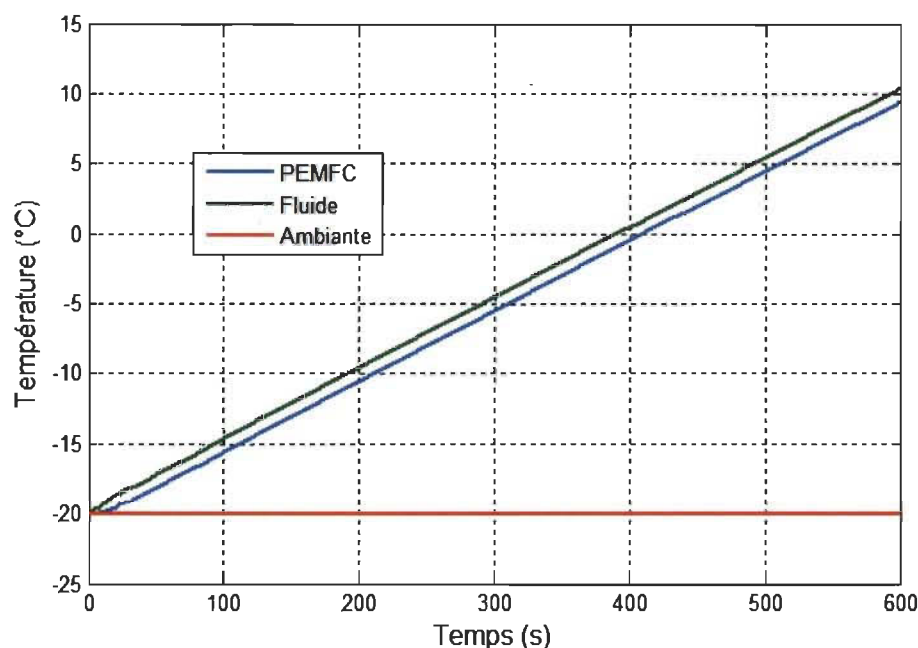


Figure 3-5 Température de la PAC et du fluide

Dans cette situation théorique, la température de la pile suit la température du fluide et le temps de montée jusqu'à la température d'opération maximale T_{fc}^{max} dépend la puissance de l'élément chauffant.

3.2.1 Estimation du temps de chauffage de la pile par une source thermique externe

Pour estimer le temps de chauffage avant de démarrer la pile, il faut isoler le temps dans l'équation (3.11). Étant donné que l'isolation du temps dans cette équation ne peut se faire simplement par une solution analytique, il faudrait la résoudre de façon numérique. Une expression pour estimer le temps minimal t_{he} que prend la PAC pour que sa température passe de T_{amb} à T_{fc}^{min} est représentée par l'équation (3.15). Celle-ci tient compte de la puissance de chauffage P_{he} supposée constante et considère que la



température initiale du fluide caloporteur et la température initiale de la PAC sont égales ($T_{fc}^0 = T_w^0$).

$$t_{he} \approx \frac{C_{fcw}}{h_{nc}S_{nc}} \ln \left[\frac{h_{nc}S_{nc}(T_{fc}^0 - T_{amb}) - P_{he}}{h_{nc}S_{nc}(T_{fc}^{min} - T_{amb}) - P_{he}} \right] \quad (3.15)$$

Où $C_{fcw} = m_w c_w + m_{fc} c_{fc}$.

La précision de cette équation dépend de la valeur du coefficient global de transfert de chaleur entre le fluide et la pile décrit dans l'équation (3.9). Les paramètres physiques de construction de canaux pour le refroidissement (voir Figure 3-4) et le débit massique du fluide sont importants pour calculer ce coefficient. Si le coefficient C_{fcw} est grand, la différence de température entre la pile et le fluide est plus faible, et l'erreur d'estimation du temps t_{he} sera faible aussi.

Au temps $t = t_{he}$, selon l'équation (3.8), la différence de température entre la pile et le fluide ΔT_{fcw} est approximativement $\Delta T_{fcw} = \dot{Q}_{whe}/k_w$. Cette différence peut se visualiser en observant la Figure 3-5. À ce moment-là, le flux de chaleur \dot{Q}_{whe} est environ $\dot{Q}_{whe} = P_{he}(C_{fc}/C_{fcw})$. Donc l'équation (3.15) peut se récrire ainsi :

$$t_{he} \approx \frac{C_{fcw}}{h_{nc}S_{nc}} \ln \left[\frac{h_{nc}S_{nc}(T_{fc}^0 + \Delta T_{fcw} - T_{amb}) - P_{he}}{h_{nc}S_{nc}(T_{fc}^{min} - T_{amb}) - P_{he}} \right] \quad (3.16)$$

Où $\Delta T_{fcw} = P_{he}C_{fc}/k_w$.

Une simulation du temps t_{he} et de la différence de température ΔT_{fcw} comme fonction du coefficient k_w sont montrées dans la figure suivante. Les paramètres thermiques utilisés

sont mentionnés dans le Tableau 4-1. Les conditions pour les différentes températures et la puissance de chauffage sont : $T_{fc}^0 = T_w^0 = T_{amb} = -20^\circ\text{C}$, $T_{fc}^{min} = 5^\circ\text{C}$ et $P_{he} = 1000\text{W}$.

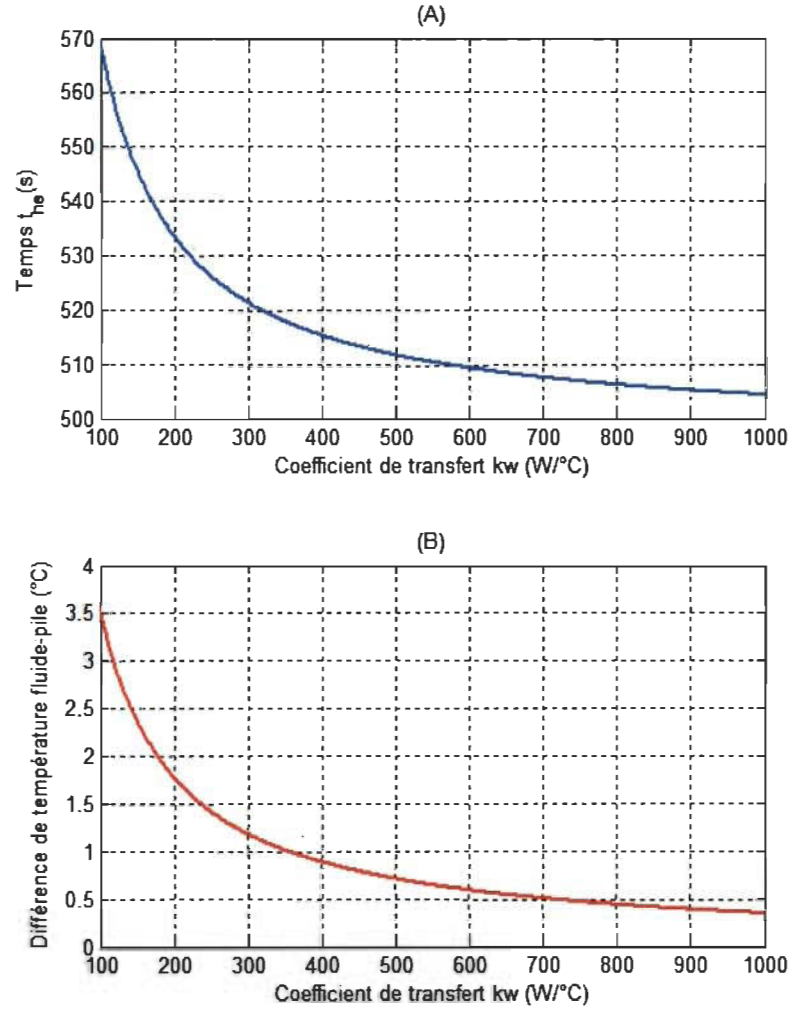


Figure 3-6 (A) Temps t_{he} et (B) différence de température ΔT_{fcw} en fonction du coefficient de transfert thermique global k_w .

En considérant le temps \tilde{t}_{st} calculé pour démarrer la pile, le moment $t_{st,he}$ pour démarrer le système de chauffage peut se calculer avec l'équation suivante :

$$t_{st,he} \approx \tilde{t}_{st} - t_{he} \quad (3.17)$$

L'énergie totale prise des batteries par le système de chauffage de la PAC est calculée avec l'équation (3.18).

$$U_{he} = \int_{t_{st,he}}^{\tilde{t}_{st}} P_{he} dt = P_{he}(\tilde{t}_{st} - t_{st,he}) \quad (3.18)$$

3.2.2 Prédiction du temps de démarrage de la PAC

En utilisant l'équation (3.15), nous pouvons calculer le délai que prend le système de chauffage pour préparer thermiquement la pile. Dans l'application de véhicule électrique hybride de topologie série, il faut connaître le moment où le système de gestion d'énergie aura besoin de démarrer la pile.

En assumant que pour $t < t_{st}$, les valeurs passées de la puissance de traction $P_m(t)$ sont connues, alors le temps pour que l'énergie des batteries atteignent le seuil minimal E_b^{min} est donné par :

$$E_b^0 - \int_0^t P_m(\tau) d\tau - \int_t^{\tilde{t}_{st}} \tilde{P}_m(\tau) d\tau - E_{he}^{max} = E_b^{min} \quad (3.19)$$

Où \tilde{P}_m est la puissance moyenne obtenue d'après l'historique de la demande de puissance P_m . En considérant \tilde{P}_m comme une constante, cette expression devient :

$$E_b^0 - \int_0^t P_m(\tau) d\tau - \tilde{P}_m(\tilde{t}_{st} - t) - E_{he}^{max} = E_b^{min} \quad (3.20)$$

Où \tilde{t}_{st} est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$\tilde{t}_{st} = t + \frac{E_b^0 - \int_0^t P_m(\tau) d\tau - E_b^{min} - E_{he}^{max}}{\tilde{P}_m} \quad (3.21)$$

Une simulation pour le calcul des temps $t_{st,he}$, t_{st} et t_{he} est montrée dans la Figure 3-7. Le cycle de puissance utilisé a été pris des données obtenues avec le véhicule Nemo et mises en échelle pour une pile de 1000 watts. Le modèle électrique de batteries offert par Simulink- Matlab a été utilisé pour estimer l'état de charge de batteries. Nous pouvons remarquer que le temps prédit pour démarrer la pile en surveillant un état de charge des batteries de 84 % de la capacité totale a été calculé avec succès.

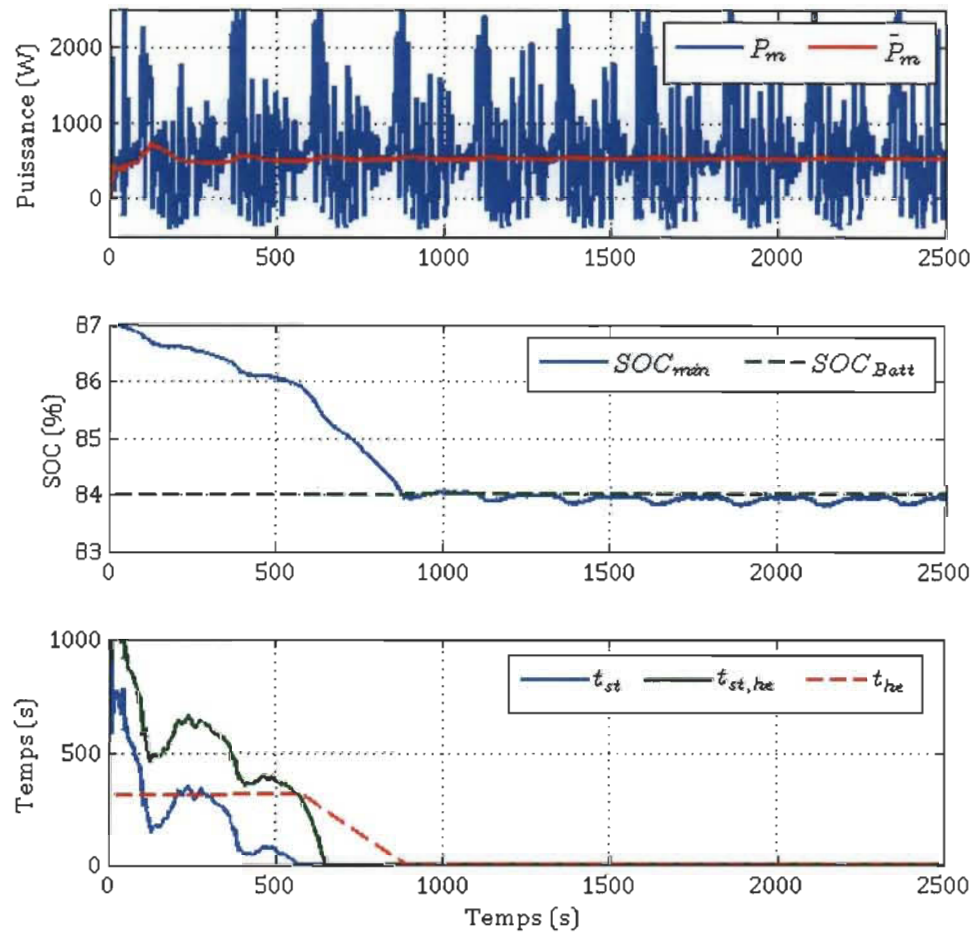


Figure 3-7 Simulations pour le calcul des temps $t_{st,he}$, t_{st} et t_{he} .

3.3 Phase d'auto-chauffage de la PAC

La PAC peut démarrer lorsqu'elle a atteint la température minimale de fonctionnement T_{fc}^{min} . L'efficacité de la pile est inférieure à basse température, tel qu'il est montré dans la Figure 3-8. Dans cette situation, si la température augmente rapidement, le rendement augmentera aussi. Une façon d'accélérer la montée de la température consiste à ajouter de la chaleur à partir d'une source extérieure en utilisant la même source utilisée par le préchauffage. Mais cette stratégie n'est pas viable d'un point de vue de l'efficacité énergétique, parce que l'énergie utilisée pour accélérer le chauffage n'est pas récupérée même si l'augmentation du rendement est accélérée.

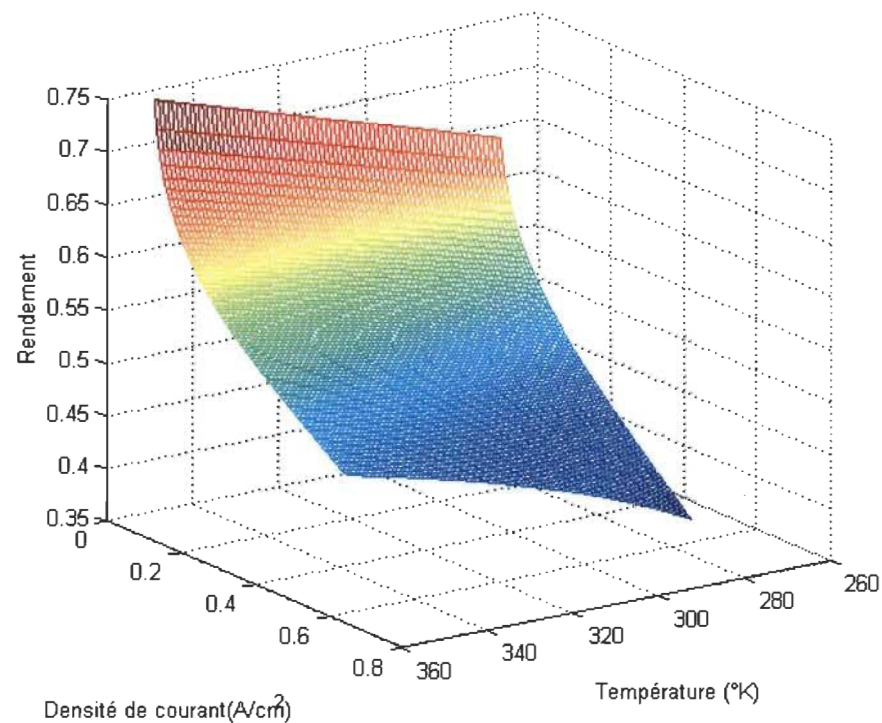


Figure 3-8 Rendement de la PAC vs Température et densité de courant

La réaction électrochimique dans la PAC est exothermique, donc la production d'électricité va générer aussi de la chaleur suffisant pour chauffer la PAC à partir de valeur minimale de puissance électrique à la sortie du système. Dans cette section on propose une méthode pour trouver un profil de puissance optimale pour monter la température rapidement après que la pile soit fonctionnelle ($T_{fc} \geq T_{fc}^{min}$) et pour éviter que la pile tombe au-dessous de la température minimale T_{fc}^{min} , quand la température ambiante est inférieure à T_{fc}^{min} .

3.3.1 Profil optimal de courant

Dans la stratégie globale de démarrage à froid, la PAC est démarrée quand elle arrive à la température minimale de fonctionnement T_{fc}^{min} . L'évolution de la température de la PAC dépend du taux de chaleur générée par la réaction \dot{Q}_{rh} et de l'échange de chaleur \dot{Q}_{mst} entre la PAC et les gaz qui circulent à travers le système. Dans ce cas, on considère l'impact de la température d'entrée de l'air. L'échange de chaleur avec l'hydrogène est négligé.

La quantité de chaleur produite par la réaction est fonction du rendement de la PAC. Ce rendement dépend de la température interne et de plusieurs paramètres tels que le courant dans la charge, la concentration d'eau dans les membranes, la stœchiométrie de l'air, la pression des gaz, etc. La dynamique de la température de la PAC est représentée par la suivante équation différentielle de premier ordre [35]:

$$m_{fc} c_{fc} \frac{dT_{fc}}{dt} = \dot{Q}_a + \dot{Q}_{rh} - \dot{Q}_{amb} \quad (3.22)$$

Où

\dot{Q}_{amb} est représenté par l'équation (3.10);

\dot{Q}_{rh} est la chaleur produite par réaction (voir l'équation (3.25));

\dot{Q}_a est le taux de transfert de chaleur entre l'air entrant et la PAC.

\dot{Q}_a est estimée comme dans le cas de transfert de chaleur par convection forcée (voir les équations (3.7), (3.8) et (3.9)).

$$\dot{Q}_a = k_a(T_{a,in} - T_{fc}) \quad (3.23)$$

Où le coefficient k_a est exprimé dans l'équation suivante :

$$k_a = \dot{m}_a c_a \left[1 - \exp\left(-\frac{h_a S_a}{\dot{m}_a c_a}\right) \right] \quad (3.24)$$

Dans l'équation (3.24) \dot{m}_a , c_a , h_a , S_a et $T_{a,in}$ représentent respectivement, le débit massique de l'air, la chaleur spécifique de l'air, le coefficient de convection forcée, la surface effective de transfert thermique et la température d'entrée de l'air.

Le taux de chaleur générée par la réaction est représenté par l'équation suivante [36] :

$$\dot{Q}_{rh} = \left(-\frac{\Delta H_{rh}}{2F} - V_{cell} \right) I_{fc} N \quad (3.25)$$

Où ΔH_{rh} , F , V_{cell} , I_{fc} et N représentent respectivement, l'enthalpie standard de formation [37], la constante de Faraday, la tension de cellule décrite en [32], le courant dans la charge et le nombre de cellules dans la pile.

La tension de cellule est donnée par :

$$V_{cell} = V_{ocv} - V_{ohm} - V_{act} - V_{con} \quad (3.26)$$

Où V_{ocv} , V_{ohm} , V_{act} et V_{con} représentent la tension de circuit ouvert ou tension de Nerst, la perte ohmique, la perte par activation et la perte par concentration.

La linéarisation de l'équation (3.22) autour d'une température cible donne comme résultat un système scalaire décrit par l'équation différentielle de premier ordre suivant :

$$\dot{T}_{fc} = AT_{fc} + Bu(t) \quad (3.27)$$

où les coefficients A et B sont désignés par les équations (3.28) et (3.29) respectivement.

$$A = -\frac{k_a + h_{cn}S_{cn}}{m_{fc}c_{fc}} \quad (3.28)$$

$$B = \frac{1}{m_{fc}c_{fc}} \quad (3.29)$$

La variable de contrôle u désigne la quantité de chaleur nette que doit entrer dans la pile. Un schéma de contrôle qu'illustre le processus est montré dans la Figure 3-9. La température ambiante T_{amb} et la température d'entrée de l'air $T_{a,in}$ peuvent être mesurées et leurs influences sur le flux de chaleur net sur la pile peuvent aussi être estimées. Dans ce cas, la température de la PAC est une variable assez lente par rapport à la réaction électrochimique, donc la chaleur générée par la réaction peut s'imposer en tenant compte de la température, mais sans considérer sa dynamique.

$$u(t) = \dot{Q}_{rh} + h_{cn}S_{cn}T_{amb} + k_aT_{a,in} \quad (3.30)$$

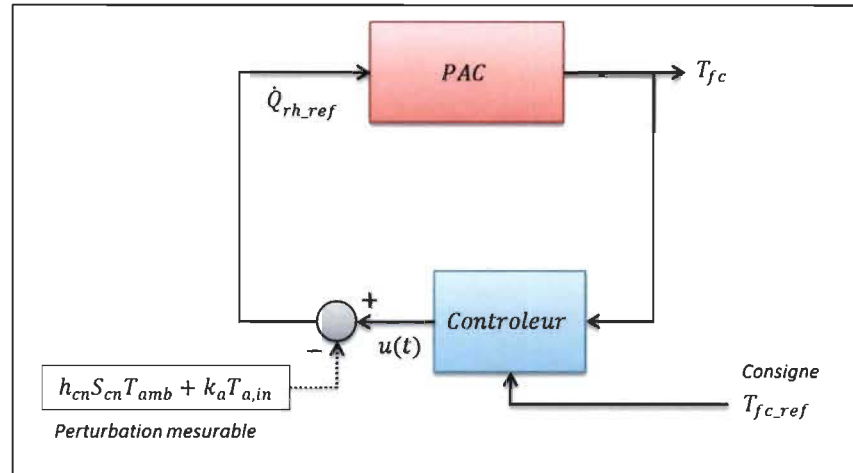


Figure 3-9 Schéma général de contrôle de l'étape d'auto chauffage

3.3.2 La commande optimale

La commande optimale permet de concevoir des lois de contrôle pour des systèmes linéaires et non linéaires, avec comme objectif de minimiser où maximiser certains critères de performance. Ces critères doivent être déclarés d'une manière adéquate dans une fonction mathématique connue comme indice de performance ou fonction de coût.

Cette théorie de contrôle est utilisée dans le contrôle moderne, son développement a commencé pendant les années 50, grâce à la formulation du principe du maximum de Pontryagin à partir des équations d'Euler-Lagrange du calcul des variations [33].

Pour la proposition de la solution de ce problème de commande optimale, on travaille à partir des procédés et démonstrations exposés en [33]. La solution d'un problème de commande optimale suit généralement les étapes suivantes :

- énoncé du problème (à partir de la modélisation de la dynamique du système);
- définition de l'indice de performance ou fonction de coût;
- solution à partir du principe de Pontryagin avec le formalisme de l'Hamiltonien;

- les équations canoniques (équation d'état, équation d'état adjoint, conditions de transversalité et de stationnarité).

Pour la commande d'un système linéaire, avec variable d'état x décrit par l'équation dynamique :

$$\dot{x} = ax + bu = f(x, u, t) \quad t \geq t_0 \quad (3.31)$$

Où a et b sont constants et t_0 est le temps initial.

La fonction de coût est définie comme :

$$J = \theta(x_f, t_f) + \int_0^{t_f} L(x, u, t) dt \quad (3.32)$$

Le hamiltonian :

$$H(x, u, \lambda, t) = L(x, u, t) + \lambda f(x, u, t) \quad (3.33)$$

Pour trouver le contrôle u pour une trajectoire optimale x , il faut résoudre l'ensemble des équations suivant:

- Équation d'état;

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = f(x, u, t) \quad (3.34)$$

- Équation d'état adjoint;

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial L}{\partial x} \quad t \leq t_f \quad (3.35)$$

- Condition de transversalité;

$$\left(H(t_f) + \frac{\partial \theta}{\partial t_f} \right) \delta t_f + \left(-\lambda(t_f) + \frac{\partial \theta}{\partial x_f} \right) \delta x_f = 0 \quad (3.36)$$

- Si aucune contrainte n'est imposée sur la commande u (condition de stationnarité);

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial L}{\partial u} + \frac{\partial f}{\partial u} = 0 \quad (3.37)$$

3.3.3 Formulation du problème

En considérant la dynamique de la température représentée par l'équation (3.27), l'objectif est de trouver le profil de courant I_{fc} (voir les équations (3.25) et (3.30)) qui puisse augmenter rapidement la température de la pile de T_{fc}^{min} à T_{fc}^{max} . Ce courant ne doit pas dépasser le courant maximal nominal de la PAC ($0 < I_{fc} \leq I_{fc}^{max}$). Alors on formule un problème d'optimisation de temps minimal comme suit : trouver le contrôle $u^*(t)$ (taux de production de chaleur) qui minimise la fonction de coût représentée par l'équation (3.38), sous les contraintes de la dynamique de la température exposée dans l'équation (3.27), avec un état initial arbitraire $T_{fc}(t_0) = T_{fc}^0$.

$$J = \int_{\tilde{t}_{st}}^{t_{fc,min}} dt \quad (3.38)$$

Dans l'équation (3.38), $t_{fc,min}$ représente le temps minimal que prend la PAC pour atteindre la température de fonctionnement maximale T_{fc}^{max} et \tilde{t}_{st} est obtenu à partir de l'équation (3.17).

3.3.4 Solution du problème d'optimisation

Le hamiltonian du système est représenté par :

$$\mathcal{H}(T_{fc}, \lambda, u, t) = 1 + \lambda(t)(AT_{fc}(t) + Bu(t)) \quad (3.39)$$

Où λ représente la variable de l'état adjoint du système, celle-ci est exprimée en forme différentielle par l'équation suivante :

$$-\dot{\lambda}(t) = \frac{\partial \mathcal{H}(T_{fc}, \lambda, u, t)}{\partial T_{fc}} \quad (3.40)$$

En différentiant l'équation (3.39) par rapport à T_{fc} on obtient :

$$-\dot{\lambda}(t) = A\lambda(t) \quad (3.41)$$

D'où la solution pour cette équation d'état adjoint :

$$\lambda(t) = \lambda(t_{fc,min}) \exp[-A(t_{fc,min} - t)] \quad (3.42)$$

Si $t_{fc,min}$ est libre, ($dt_{fc,min} \neq 0$). La condition de transversalité devient :

$$\mathcal{H}(T_{fc}, \lambda, u, t_{fc,min}) = 0 \quad (3.43)$$

En appliquant les conditions aux frontières, l'équation (3.43) est équivalente à :

$$1 + \lambda(t_{fc,min})[AT_{fc}(t_{fc,min}) + Bu(t_{fc,min})] = 0 \quad (3.44)$$

Si nous voulons avoir $T_{fc}(t_{fc,min}) = T_{fc}^{max}$, aux frontières l'équation de l'état adjoint est calculée comme :

$$\lambda(t_{fc,min}) = -\frac{1}{AT_{fc}^{max} + Bu(t_{fc,min})} \quad (3.45)$$

Si le contrôle optimal à temps minimal u^* existe, alors le principe du minimum de Pontryagin exige que [33]:

$$\mathcal{H}(T_{fc}^*, \lambda^*, u^*, t) \leq \mathcal{H}(T_{fc}^*, \lambda^*, u, t) \quad (3.46)$$

où T_{fc}^* , λ^* et u^* représentent respectivement : le profil optimal de température, la trajectoire optimale pour la variable de l'état adjoint et la trajectoire de contrôle pour la production de chaleur dans la pile.

En utilisant le hamiltonian (équation (3.39)), l'expression (3.46) devient:

$$\lambda^*(t)Bu^*(t) \leq \lambda^*(t)Bu(t) \quad (3.47)$$

Ainsi, la production optimale de chaleur $u^*(t)$ est donnée par l'équation suivante [33];

$$u^*(t) = -sgn[B\lambda(t)]u^{max} \quad (3.48)$$

D'où

$$\text{sgn}[B\lambda(t)] = \begin{cases} 1, & \text{if } B\lambda(t) > 0 \\ \text{indeterminé}, & \text{if } B\lambda(t) = 0 \\ -1, & \text{if } B\lambda(t) < 0 \end{cases} \quad (3.49)$$

et u^{max} est le taux de transfert maximal de chaleur dans la pile.

L'équation (3.49) montre que le taux optimal de production de chaleur va prendre toujours les valeurs extrêmes de u . Alors, $u^*(t)$ peut prendre seulement une des deux valeurs suivantes :

- $u^*(t) = u^{max}$ si $(B\lambda(t))$ est négative;
- $u^*(t) = -u^{max}$ si $(B\lambda(t))$ est positive.

Dans le cas où $\lambda(t) = 0$, celui-ci est une singularité. Mais ce cas n'arrive pas avec u^{max} comme démontré ci-dessous.

Assumons que $u^*(t_{fc,min}) = u^{max}$; la valeur finale pour l'équation de l'état adjoint est donnée par :

$$\lambda(t_{fc,min}) = -\frac{1}{AT_{fc}^{max} + Bu^{max}} \quad (3.50)$$

Ainsi, le profil de l'état adjoint qui est dérivé de l'équation (3.45) devient :

$$\lambda(t) = -\left(\frac{1}{AT_{fc}^{max} + Bu^{max}}\right) \exp[-A(t_{fc,min} - t)] \quad (3.51)$$

Si le taux de production de chaleur est assez élevé pour chauffer la pile, alors :

$$u^{max} > -\frac{A}{B}T_{fc}^{max} \quad (3.52)$$

Dans ce cas $\lambda(t) < 0$, lequel confirme que $u^*(t_{fc,min}) = u^{max}$. De plus, $\lambda(t)$ ne peut pas être égal à 0. Clairement, il n'y a pas une singularité avec cette loi de contrôle sous la condition (3.52). La solution optimale de temps minimal consiste alors à appliquer u^{max} . Le taux de production de chaleur maximale \dot{Q}_{rh}^{max} qui correspond à u^{max} est calculée en utilisant l'équation (3.30). Ainsi, le profil de courant optimal est trouvé à partir de l'équation (3.25).

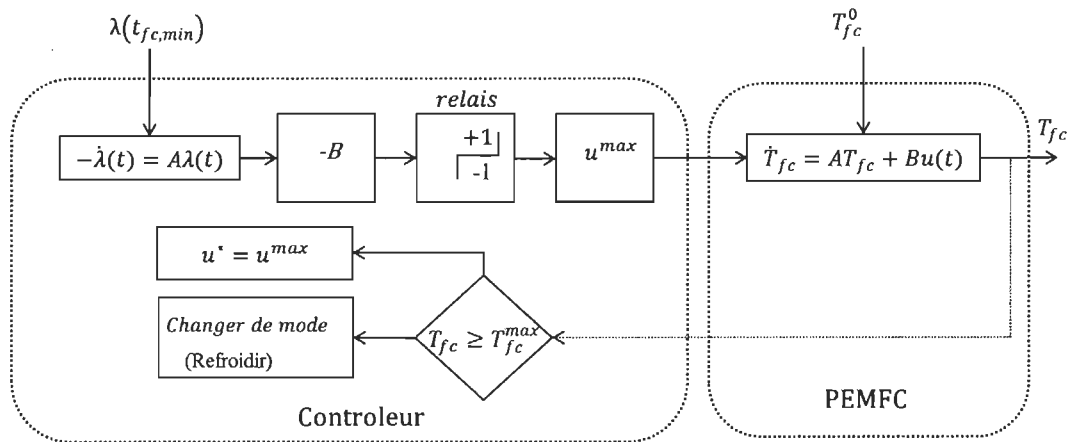


Figure 3-10 Structure de la commande optimale de temps minimal

Chapitre 4 - Expériences et simulations

Dans les applications stationnaires ou de mobilité, deux types de piles à combustible sont généralement utilisés : les piles à combustible à pression atmosphérique et les piles à combustible à air forcé. Nous avons donc validé expérimentalement nos approches sur ces deux types de piles. La première validation a été effectuée avec la pile à air forcé installé sur un banc d'essai à l'institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) et la deuxième validation a été faite sur un véhicule réel qui appartient au même centre de recherche.

4.1 Validation du modèle avec la pile Hyteon

Dans le banc d'essai, nous avons utilisé une PAC de 800W (de la compagnie Hyteon) refroidie par à eau. Cette pile a été paramétrée thermiquement avant de réaliser nos tests de validation du modèle. L'algorithme de démarrage à froid a été testé au complet. La réalisation du sous-module embarqué de démarrage à froid requiert une analyse thermodynamique de la PAC. C'est pourquoi nous présentons les résultats théoriques et pratiques obtenus à partir des tests effectués sur notre banc d'essai qui a été construit l'année dernière.

La nécessité de tenir compte de l'évolution de la température de la pile et aussi la nécessité d'émuler la récupération énergétique due au freinage nous a emmenés à modifier le banc d'essai développé l'année précédente. La nouvelle version est représentée sur la figure ci-dessous.

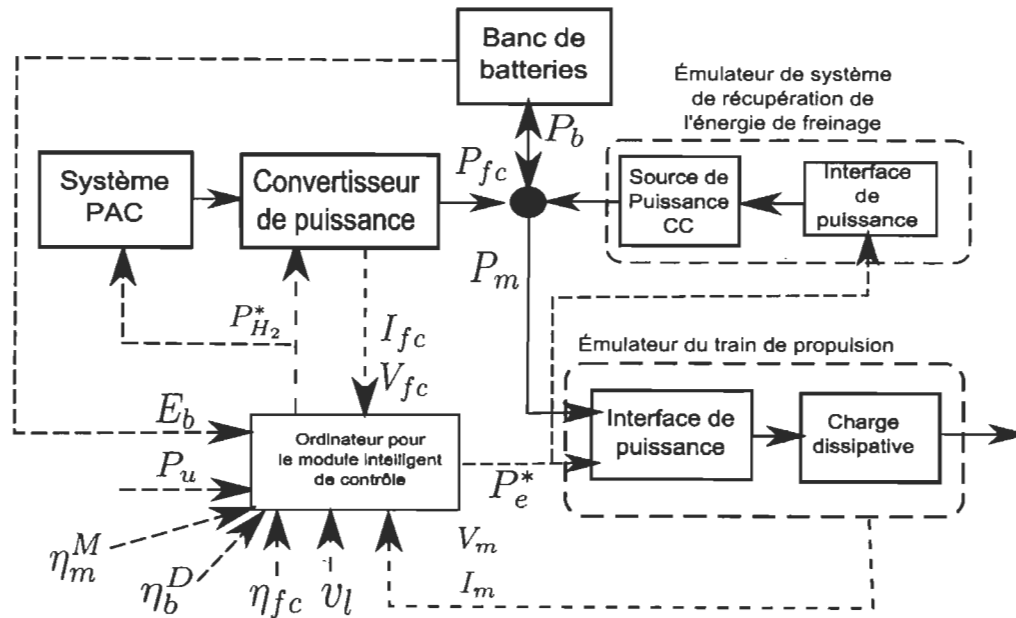


Figure 4-1 Représentation du banc d'essai

Ce banc d'essai est un outil pratique nous permettant d'expérimenter dans des conditions contrôlées, l'évolution thermique transitoire d'une PAC de petite taille (800W).

Le banc d'essai comprend les suivants éléments :

- le système PAC : la pile à combustible dont les 25 cellules sont accessibles pour des fins de mesurage est alimentée par de l'air provenant d'un réservoir sous pression. L'alimentation en hydrogène (H_2) se fait via un cylindre pressurisé commercial. Les capteurs permettant de mesurer la température ambiante et la température interne des cellules sont installés. Les autres paramètres (débit d'air, débit de H_2 , pression d'air, pression de H_2 , taux d'humidité dans l'air, etc.) sont également installés. Les consignes de puissance de la PAC P_{H_2} sont exécutées par un programme spécialement dédié au contrôle du convertisseur de puissance situé entre la sortie de la PAC et le banc de batteries. La puissance effectivement

produite à la sortie de ce convertisseur est notée P_{fc} , le courant et la tension mesurés sont respectivement désignés par I_{fc} et V_{fc} .

- le banc de batteries est composé de 3 batteries de type acide-plomb pouvant fournir individuellement 150 AH avec un courant débité de 50 A. Il est important de noter que dans ce projet, le rendement énergétique des batteries n'est pas constant et varie de manière non linéaire en fonction de la puissance de décharge;
- l'émulateur du système de récupération de l'énergie de freinage permet d'ajouter de la puissance électrique aux batteries afin d'émuler la récupération énergétique qui a lieu pendant les phases de décélération d'un véhicule électrique. Ce système est composé d'une source de puissance à courant continu et d'une interface de puissance permettant son contrôle;
- l'émulateur du train de propulsion représente la chaîne de traction du véhicule d'un point de vue énergétique. Il est composé d'une charge programmée pour reproduire les dynamiques des appels de puissance P_e d'un véhicule réel (maximum de 12 kW de puissance de traction). La tension V_m et le courant I_m aux bornes de la charge programmable sont mesurés afin de déduire la puissance P_m
- l'ordinateur pour le module intelligent de contrôle contient tous les programmes requis pour effectuer la gestion du système PAC, des batteries, de l'émulation de la récupération énergétique et de l'émulateur du train de propulsion. Ce module utilise les profils de vitesses v_l que nous voulons tester, la carte de rendement du système PAC η_{fc} , la carte de rendement des batteries η_b^D , la carte de rendement du train de propulsion émulé η_m^M , la puissance commandée par le conducteur du véhicule P_u et l'énergie de batteries E_b .

4.1.1 Objectif de l'expérimentation

Les expériences proposées ont comme objectif la validation des méthodes suivantes :

- l'estimation du temps pour démarrer la PAC en utilisant l'information de décharge des batteries fournie par le système de gestion d'énergie;
- le calcul du temps pour commencer à chauffer la PAC;
- le modèle thermique pendant l'étape d'autochauffage;
- la solution de temps minimal utilisée dans ce travail.

4.1.2 Configuration du système expérimentale

Un banc d'essai a été construit avec un système de pile à combustible de 800W (voir Figure 4-2). Les paramètres expérimentaux sont listés dans le Tableau 4-1. Le schéma complet du banc est présenté dans la Figure 4-3. Dans cette figure, nous avons un circuit d'alimentation d'air, un circuit d'hydrogène fermé avec de purges périodiques en fonction de la puissance demandée dans la charge et un système de contrôle thermique avec un circuit de refroidissement.



Figure 4-2 Pile Hyteon à l'IRH

Le circuit d'alimentation d'air est composé d'un compresseur, d'un débitmètre, d'un capteur de pression et d'une électrovanne. Pour le contrôle de l'humidité relative et de la température d'entrée de l'air, un bain thermostatique est utilisé.

Le circuit d'hydrogène comprend une bouteille d'hydrogène, une électrovanne, un capteur de débit massique et une électrovanne à échappement. Cette dernière est commandée de façon périodique pour évacuer l'eau afin qu'elle ne s'accumule pas dans l'anode des cellules.

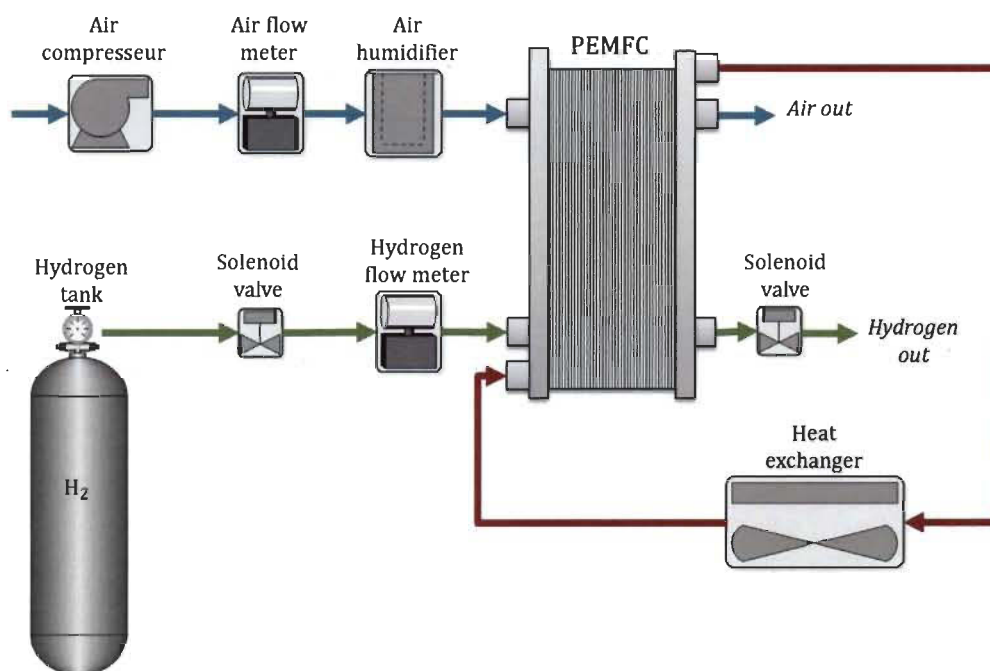


Figure 4-3 Système de la PAC Hyteon à l'IRH

Le système pour le contrôle thermique de la pile comprend un bain thermostatique (voir la Figure 4-4), qui est commandé en se servant d'un ordinateur. Une charge programmable connectée à la sortie de la PAC est aussi contrôlée par l'ordinateur. Cette charge dynamique émule le cycle d'appel de puissance du véhicule FC-PHEV. Les données à émuler sont prises des expériences sur le véhicule.





Figure 4-4 Bain thermostatique pour le contrôle thermique de la PAC

Tableau 4-1 : Paramètres thermiques de la PAC Hyteon

Paramètres		Valeurs
Pile	N	23 (Cell)
	m_{fc}	12 [Kg]
	c_{fc}	700 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Convection naturelle	h_{nc}	5 [W.K ⁻¹ . m ⁻²]
	S_{nc}	0.24 [m ²]
Convention forcée (par air)	c_a	1000 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
	h_a	90 [W.K ⁻¹ . m ⁻²] (annexe B)
	S_a	0.4968 [m ²]
	\dot{m}_a	$3.57 \times 10^{-7} (\lambda_a \cdot I_{fc} \cdot N)$ [kg.s ⁻¹]
	λ_a	2.4
Convection forcée (par eau)	c_w	4200 [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
	m_w	7.2 [kg]
	h_{cw}	1934 [W.K ⁻¹ . m ⁻²] (annexe B)
	S_{cw}	0.5962 [m ²]
	\dot{m}_w	0.055 [kg.s ⁻¹]

Tous les programmes Labview relatifs aux méthodes et algorithmes décrits dans ce travail de recherche sont compilés sur un ordinateur avec un système d'acquisition des signaux de National Instruments. L'interface d'utilisateur est montrée dans la Figure 4-5.

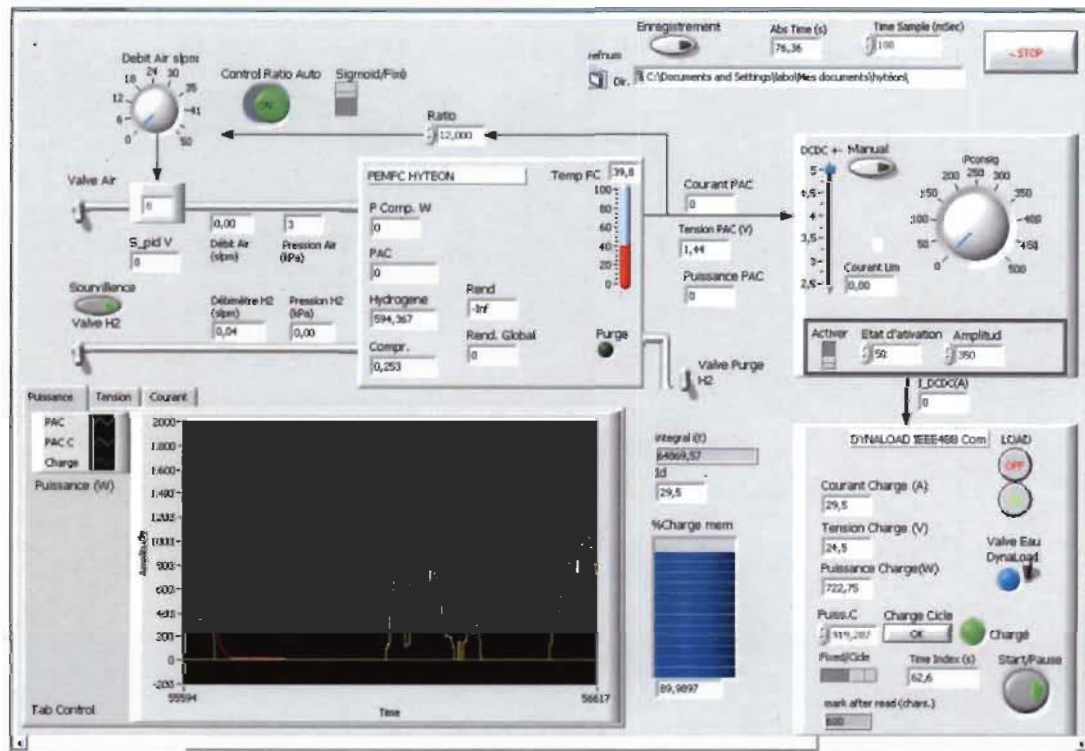


Figure 4-5 Interface logicielle de contrôle du banc d'essai

Le contrôle thermique de la pile devrait nous permettre de faire des essais à basse température. La température minimale qui peut être imposée avec le bain thermostatique est d'environ 1 °C. De plus, comme conséquence de l'absence d'une chambre climatique, la température ambiante ne peut pas être contrôlée. Donc, pour l'instant, nous décidons de faire des tests entre [274.15 °K, 323.15 °K]. Cette plage nous permet de valider les méthodes proposées et le modèle thermique moyen utilisé.

4.1.3 Scénario de test

4.1.3.1 Cycle de conduite et puissance moyenne dans le FC-PHEV

Un cycle de conduite obtenu avec le véhicule expérimental présent à l'IRH est utilisé pour l'émulation dans le banc d'essai. Les données de puissance ont été prises sur le campus de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). En connaissant les paramètres du véhicule et le cycle d'appel de puissance, nous calculons la puissance moyenne de la traction du véhicule P_m . La puissance moyenne est normalisée à la puissance nominale de fonctionnement de la pile à combustible placée dans le banc d'essai. Bien que la pile Hyteon puisse fonctionner à une puissance maximale de 800 W, le rendement dans ce point d'opération est très faible, donc nous avons imposé à la pile 500 W comme consigne de puissance. Le cycle de puissance est montré dans la Figure 4-6.

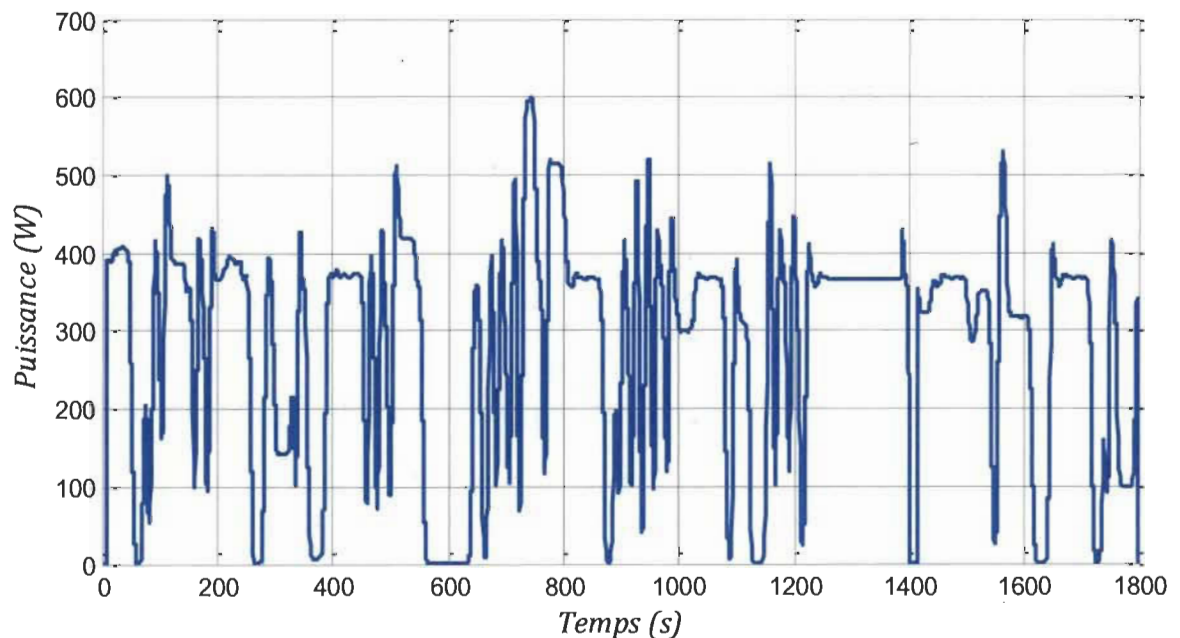


Figure 4-6 Cycle expérimental d'appel de puissance du véhicule FC-PHEV.

4.1.3.2 Paramètres du Système de gestion d'énergie (SGE)

L'énergie des batteries est estimée selon le pourcentage de charge SOC (State-Of-Charge), ce pourcentage est donné par le rapport entre l'énergie présente E_b et l'énergie maximale E_b^0 . Au commencement de l'expérience, l'état de charge dans les batteries est estimé à 86.8 %. Et le pourcentage minimal à surveiller pour démarrer la PAC est fixé à 85 %. Nous avons fixé le seuil minimal de l'état de charge de la batterie de manière à observer toutes les phases impliquées dans la gestion thermo énergétique de la PAC, lorsque le profil d'appel de puissance présenté ci-dessus est utilisé. Nous avons imposé une différence faible entre E_b et E_b^0 pour éviter une longue période de fonctionnement des batteries avant de démarrer la pile. Dans ce cas nous considérons que le fait de varier l'énergie à utiliser ne va pas changer la logique de l'algorithme et est suffisant pour le valider.

Pendant que le cycle de puissance est émulé dans la charge programmable, le SGE doit estimer en temps réel le temps \tilde{t}_{st} pour démarrer la PAC en utilisant les valeurs passées de P_m .

4.1.3.3 Paramètres du contrôle thermique de la PAC

La pile à combustible n'a pas de couche d'isolation thermique, la température extérieure mesurée est de 297 °K. Pour faire les tests dans les différentes phases thermiques de la pile (chauffage, autochauffage et refroidissement), nous avons choisi les suivantes conditions d'opération :

- au commencement ($t = 0$), la température interne de la pile T_{fc}^0 est la même que celle à l'ambiante ($T_{amb} = 24^\circ C$);

- la plage de fonctionnement de la PAC est établie entre $[30^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}]$. La température minimale de fonctionnement ($T_{fc}^{min} = 30^{\circ}\text{C}$) est supérieure à la température ambiante afin de permettre au système de chauffage (le bain thermostatique) de chauffer la pile et augmenter la température T_{fc} de T_{fc}^0 à T_{fc}^{min} . Ce processus va émuler la phase d'échauffement de la stratégie de démarrage à froid;
- la puissance maximale d'échauffement du système de chauffage est de 700W. Le fluide caloporteur est de l'eau qui circule dans un circuit fermé;
- de 30°C à $T_{fc}^{max} = 60^{\circ}\text{C}$ la pile est dans le mode d'autochauffage, dans ce cas-là, la chaleur produite par la réaction électrochimique est utilisée pour augmenter la pile;
- lorsque la température maximale T_{fc}^{max} est atteinte, la phase de refroidissement est démarrée.

4.1.4 Résultats expérimentaux et de simulation

Dans cette section, nous présentons une étude comparative entre les résultats expérimentaux et de simulation. Les paramètres et conditions utilisés dans les tests sont décrits au-dessous.

4.1.4.1 Validation du temps pour démarrer la PAC

En utilisant le profil de puissance représenté à la Figure 4-6, le temps que prennent les batteries pour arriver à la valeur minimale dépend de la consommation énergétique. Pour estimer ce temps, les valeurs passées de la puissance débitée par les batteries P_m sont utilisées.

La Figure 4-7 montre l'estimation en temps réel du temps pour démarrer la pile \tilde{t}_{st} , ce temps est obtenu en prenant l'équation (3.23). Pour des fins de comparaison, nous avons fait une estimation hors ligne de l'état de charge de batteries. Pour une telle estimation, nous avons utilisé toute l'information du profil de puissance. Le SOC minimal à surveiller dans les batteries est fixé en 85 % et le SOC initial donné par l'estimateur montrait 86.8 %. Dans ce cas, avec une puissance moyenne du cycle de 400W, le temps pour arriver à $E_b^{min} = 85\%SOC$ est environ ($t_{st} \approx 1000$ s). L'évaluation en temps réel du temps pour démarrer la PAC est présentée dans la figure suivante :

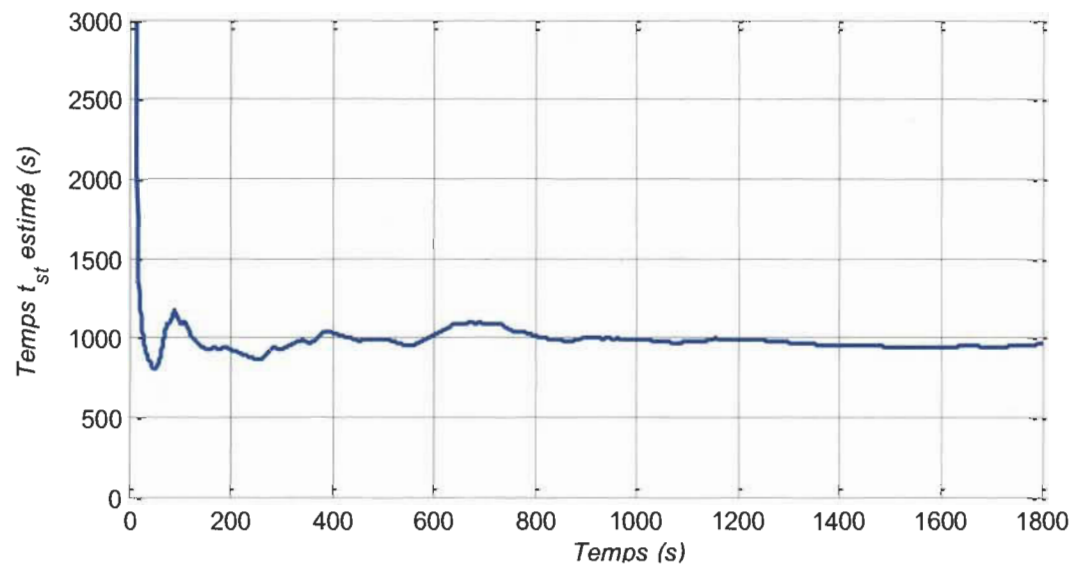


Figure 4-7 Estimation en temps réel de t_{st} .

Nous pouvons observer dans la Figure 4-7 qu'au commencement, l'estimation de \tilde{t}_{st} n'est pas très proche de la valeur calculée hors-ligne. Mais lorsque le temps avance et que la puissance moyenne est plus proche de la valeur réelle mesurée, l'estimation devient plus cohérente avec la valeur théorique, malgré les grandes variations de la puissance dans la traction du véhicule.

La Figure 4-8 montre que la pile démarre à $t = 1029s$, ce temps est supérieur à celui (t_{st}) calculé en raison du temps que prend le système pour mettre en marche la pile après que la commande de démarrage soit donnée. Dans notre système, le délai dû à l'ouverture de valves et la purge initiale est d'environ $20 s$.

4.1.4.2 Estimation du temps pour démarrer le système de chauffage

Étant donné le temps \tilde{t}_{st} , le contrôleur thermique de la pile doit déterminer le temps $t_{st,he}$ pour démarrer l'échangeur de chaleur. Dans ce procédé le système utilise les paramètres thermiques de l'ensemble pile-échangeur, la température ambiante T_{amb} , la température minimale de fonctionnement T_{fc}^{min} et la puissance de chauffage de l'élément chauffante. Pour les expériences, la température initiale de la pile est égale à la température ambiante $T_{fc}^0 = T_{amb}$.

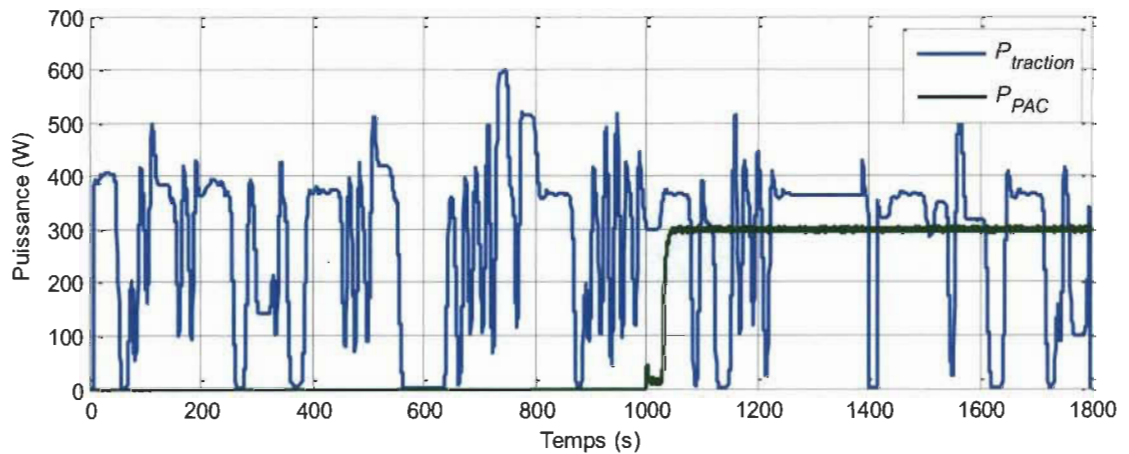


Figure 4-8 Distribution de puissance de la pile et puissance de traction du véhicule

La Figure 4-10 montre que la température de la pile est $T_{fc}^{min} \cong 30^{\circ}C$ à $t = 1029s$. Bien qu'il y ait un écart de temps de $29s$ dû au délai d'ouverture de valves et au temps de

montée de la puissance dans la sortie du convertisseur CC-CC, les résultats expérimentaux montrent une cohérence du modèle et de la stratégie de contrôle.

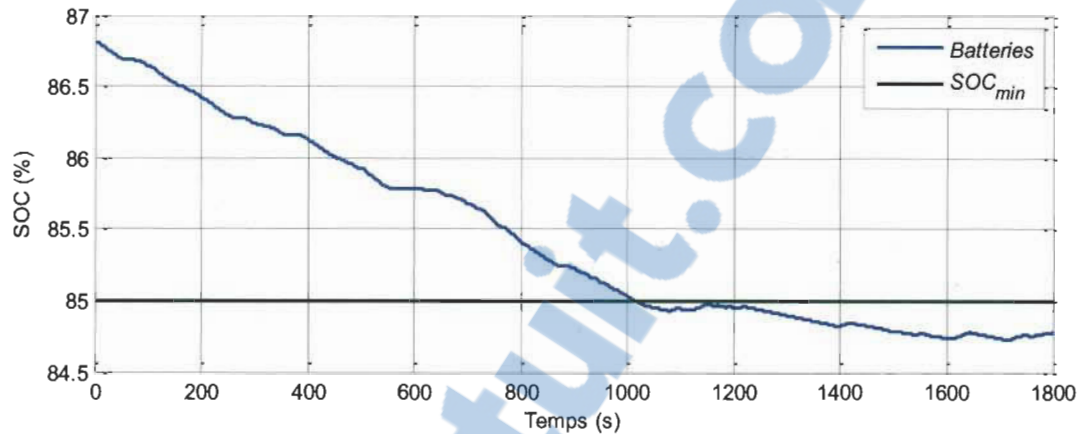


Figure 4-9 Estimation du SOC dans les batteries.

En utilisant l'équation (3.21), le temps pour démarrer le système de chauffage est estimé à 628 s, tel qu'il est montré dans la Figure 4-8. Si l'estimation est bonne, la température de la pile doit atteindre T_{fc}^{min} à $t = \bar{t}_{st}$. À ce moment, la pile sera démarrée.

4.1.4.3 Modèle thermique de la PAC pendant la phase d'auto-chauffage

Quand la température interne de la PAC atteint la valeur minimale d'opération T_{fc}^{min} , la PAC démarre automatiquement (voir la courbe violette dans la Figure 4-10). La chaleur produite par la réaction électrochimique (courbe rouge Figure 4-11) permet à la pile d'augmenter la température et la vitesse de montée de la température dépend de la puissance dans la charge. Pendant le temps de simulation et d'expérimentation, la température de la pile passe de 24°C à 50°C. Un écart entre la courbe expérimentale de la température et celle simulée est trouvé dans les résultats, cela est dû principalement au :

- le comportement non linéaire introduit par l'échange de chaleur par conduction avec les plaques terminales qui n'est pas considéré dans le modèle thermique moyenne;
- thermocouple dont l'estimation de la température est ponctuelle dans l'espace, c'est-à-dire qu'en réalité, la mesure d'un point de la pile est considérée comme étant celle de la température moyenne de la pile. Donc la température est estimée à partir d'un seul capteur placé sur la surface extérieure d'une cellule. Pour avoir des mesures plus précises, il faudra placer plusieurs capteurs directement dans les différentes cellules de la pile.

Pour le contrôle thermique dans les applications réelles, le modèle permet de prendre des décisions adéquates pour accomplir le bon fonctionnement de la pile. L'écart maximal entre la température prédite par le modèle et la température mesurée est inférieur à 3°C , ce qui est acceptable pour la gestion énergétique globale du banc d'essai.

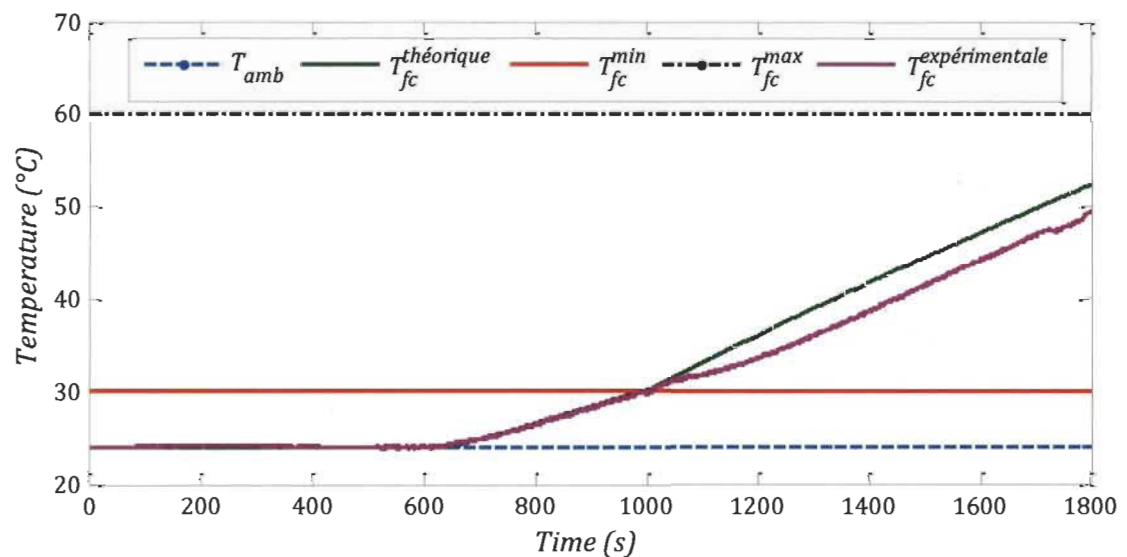


Figure 4-10 Évolution de la température de la pile Hyteon

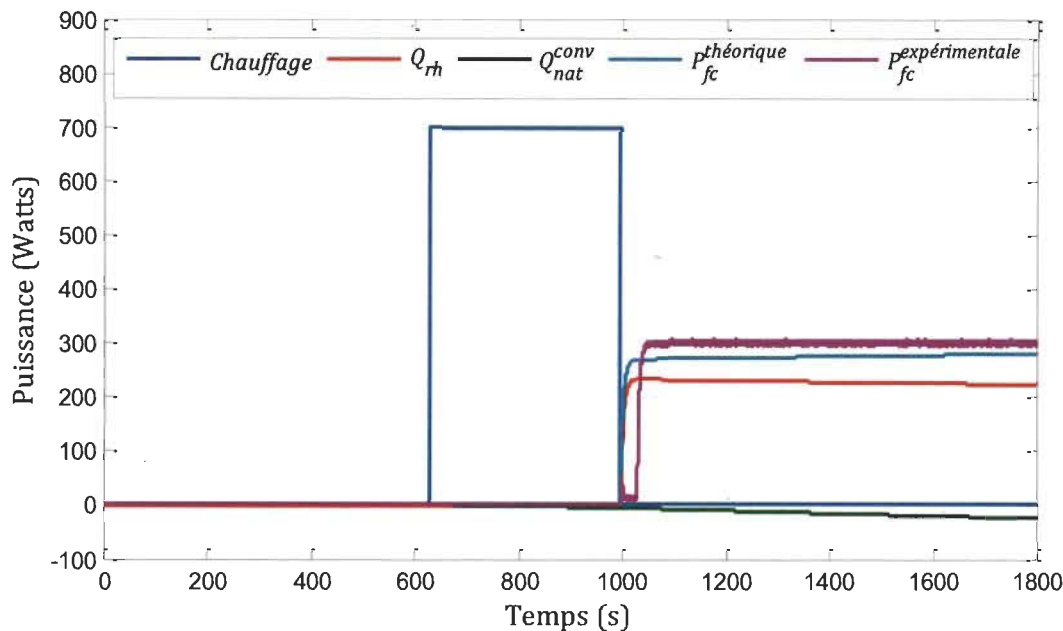


Figure 4-11 Résultats de la distribution de puissance et flux de chaleur dans la pile Hyteon

4.1.5 Analyse de la dynamique thermo énergétique de la PAC du banc d'essai

Le comportement thermo énergétique d'une PAC est complexe en raison de l'interdépendance entre les phénomènes fluidiques, thermiques, électriques et chimiques [38][32]. C'est pourquoi dans ce projet, nous avons adopté une approche expérimentale basée sur la description de l'évolution thermo énergétique moyenne de la PAC. Les détails de cette analyse ainsi que les différents résultats expérimentaux sont publiés dans la revue internationale *Journal Of Power Sources* [39].

L'incapacité du bain thermostatique de fonctionner en dessous du point de congélation de l'eau nous empêche de faire des expériences à de très basses températures. Néanmoins, à partir des expériences faites entre 2°C et 60°C, nous avons été en mesure de dégager une méthode fiable permettant de faire fonctionner la pile du véhicule de test par temps froid.



4.2 Contrôle thermique de la pile à combustible Mobixane sur le véhicule Nemo

Différentes études sont faites à l'IRH pour améliorer les performances d'utilisation de la pile à combustible dans le véhicule hybride. Un des projets consiste à la gestion thermo-énergétique d'une pile à combustible implantée sur le véhicule Nemo. Le système est produit par la marque Axane et nommé comme MobixaneTM. C'est un générateur électrique portable à courant alternatif d'une puissance maximale de 2.5 kW. Ce système est basé sur une pile du type PEM, à la différence de la pile Hyteon, la pile Mobixane est refroidie par air (voir la Figure 4-14 et la Figure 4-13). La plage de fonctionnement en température de cette pile va de 1 °C à 65°, celle-ci ne comporte ni de système de préchauffage ni de mécanisme pour le démarrage assisté dans le cas où la température interne soit inférieure à la température minimale exigée par le fabricant.



Figure 4-12 Véhicule hybride Nemo à l'IRH

Concernant le démarrage à froid, des stratégies pour maintenir la pile en conditions d'utilisation selon le cycle d'appel de puissance et les conditions environnementales sont étudiées en considérant toujours une température de départ dans la plage de fonctionnement. Une étude thermique et une stratégie pour la gestion thermique sont proposées dans cette section.

Dans la première partie de ce travail, nous allons déterminer les paramètres thermiques globaux de la pile Mobixane avec l'objectif d'estimer l'impact de conditions environnementales froides sur la température de la pile. Deuxièmement, nous proposons un algorithme de contrôle thermique pour assurer le fonctionnement de la pile en conditions environnementales froides. Pour toute la partie expérimentale avec cette pile nous avons utilisé un système d'acquisition des données et de contrôle basé sur la technologie de temps réel Compact-RIO de National Instruments et le module de conditionnement de thermocouples NI9211.



Figure 4-13 Pile à combustible Mobixane

Les principaux paramètres physiques et thermiques de la pile à combustible Mobixane sont montrés dans le tableau suivant.

Tableau 4-2 Paramètres physiques de la pile Mobixane

Domaine de puissance	0,5 à 2,5 kW
Poids	75 kg (hors hydrogène)
Dimensions	66 x 48 x 48 cm (200 litres)
Température de stockage	-40 °C à + 70 °C
Température de fonctionnement	0 °C à +45 °C

4.2.1 Caractérisation thermique de la pile Mobixane

Si la température de départ de la pile est dans la plage de fonctionnement, nous pouvons faire une estimation du temps que prendra la température de la pile pour descendre sous la valeur minimale de fonctionnement, dans ce cas 2 °C, à partir des paramètres thermiques estimés en utilisant des données expérimentales. Un schéma général de la pile Mobixane est montré dans la Figure 4-14.

Lorsque la pile ne produit pas d'électricité, il n'y a pas des sources de chaleur et le bilan thermique est exprimé pour l'équation suivante :

$$m_{fc} c_{fc} \frac{dT}{dt} = -h_{nc} S_{nc} (T_{fc} - T_{amb}) \quad (4.1)$$

Où

m_{fc} est la masse de la PAC;

c_{fc} est la chaleur spécifique moyenne de la PAC;

T_{fc} est la température moyenne de la PAC;

h_{cn} est le coefficient de transfert thermique par convection naturelle;

S_{cn} est la surface extérieure de la PAC;

T_{amb} est la température ambiante.

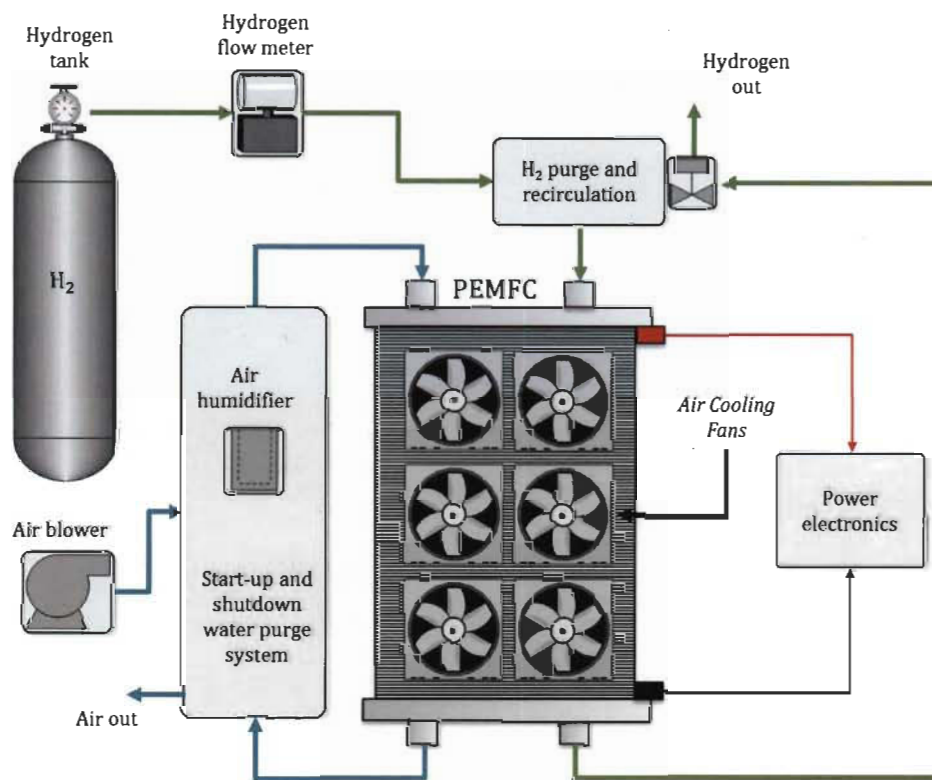


Figure 4-14 Schéma général de la Mobixane

Pour simplifier la modélisation, on va utiliser le rapport adimensionnel α , défini comme le quotient entre le coefficient global de transfert thermique par convection naturelle $h_{nc}S_{nc}$ et la capacité calorifique de la pile $m_{fc}c_{fc}$.

$$\frac{h_{nc}S_{nc}}{m_{fc}c_{fc}} = \alpha \quad (4.2)$$

La solution de l'équation différentielle (4.1) donne :

$$\ln(T_{fc} - T_{amb}) \Big|_{T_{fc}^0}^{T_{fc}(t_f)} = -\alpha t_f \quad (4.3)$$

Le rapport α peut se calculer alors, en utilisant l'équation (4.4) et les données expérimentales montrées dans la table 2. Le temps de durée expérience t_f est fixé de manière arbitraire en considérant une évolution notable de la température.

$$\alpha = \ln \left(\frac{T_{fc}^0 - T_{amb}}{T_{fc}(t_f) - T_{amb}} \right) \frac{1}{t_f} \quad (4.4)$$

Tableau 4-3 Données expérimentales pour la pile Mobixane

Paramètre	Valeur
t_f	3950 s
T_{fc}^0	49.2 °C
$T_{fc}(t_f)$	34.8 °C
T_{amb}	25 °C

Pour la pile Mobixane, le rapport α est égal à 2.28×10^{-4} et la température en fonction du temps est décrite par l'équation suivante :

$$T_{fc}(t) = T_{amb} + (T_{fc}^0 - T_{amb})e^{-\alpha t} \quad (4.5)$$

Dans la Figure 4-15, il est montré la courbe expérimentale et de simulation de l'équation (4.5).

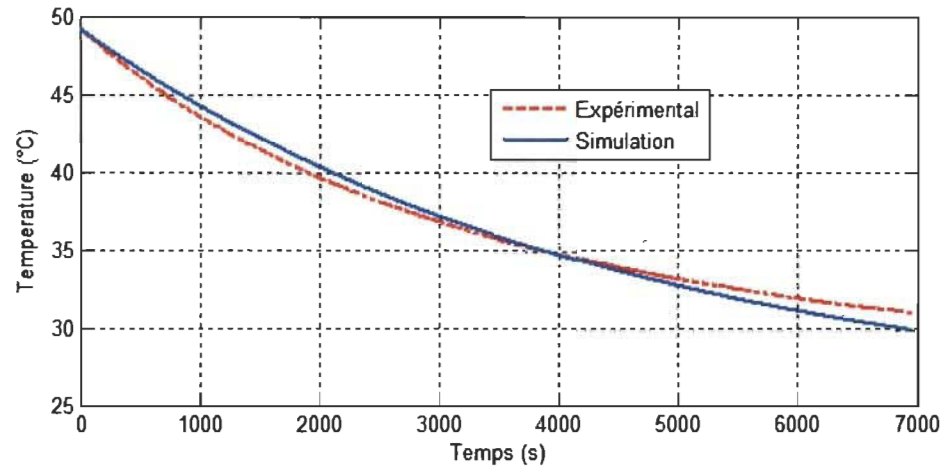


Figure 4-15 Évolution de la Température de la pile Mobixane

4.2.2 L'impact du procédé de démarrage sur la température interne de la pile

L'évacuation de l'eau qui est restée dans la pile après un cycle d'utilisation antérieur est une considération importante pour son démarrage. Dans le procédé de démarrage de la pile Mobixane, pendant quelques secondes le système de contrôle fait circuler de l'air. Cette opération produit une perte de chaleur par convection forcée, ce qui provoque une variation de la température de la pile. Cette variation est plus considérable quand l'air entrant est trop froid.

L'équation différentielle (4.6) décrit le comportement de la température en considérant l'échange de chaleur par convection naturelle et forcée pendant la purge. Dans le système pile Mobixane, il n'y a pas d'accessoire pour le préchauffage de l'air qui entre dans la pile, donc la température de l'air d'entrée T_a^{in} est égale à la température ambiante T_{amb} .

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = -\alpha(T_{fc} - T_{amb}) - \beta(T_{fc} - T_{amb}) \quad (4.6)$$

Pour la convection forcée, on considère maintenant le rapport β comme le quotient entre le coefficient global de transfert thermique forcée k_a et la capacité calorifique de la pile.

$$\beta = \frac{k_a}{C_p^{fc}} \quad (4.7)$$

La solution de l'équation (1.5) est donnée par l'équation (4.8) :

$$\ln\left(\frac{T_{fc} - T_{amb}}{T_{fc}^i - T_{amb}}\right) = -(\alpha + \beta)t_p \quad (4.8)$$

Où t_p est le temps de purge et T_{fc}^i est la température de la pile au moment du démarrage du système de purge.

Les données pour calculer le rapport $\beta = 7.58 \times 10^{-3}$ de la pile Mobixane sont montrées dans la table suivante.

Tableau 4-4 Deuxième ensemble des données expérimentales pour la pile Mobixane

Paramètre	Valeur
t_p	20 s
T_{fc}^i	63.2 °C
$T_{fc}(t_p)$	55.2 °C
T_{amb}	25 °C

La durée de purge t_p , est un paramètre fixé par le fabricant de la pile comme procédure standard pendant le démarrage. Cette valeur ne dépend pas des conditions d'opération et est toujours constante.

L'équation transitoire pour la température donnée par l'équation (4.9) est la solution de l'équation différentielle (4.6)

$$T_{fc}(t_p) = T_{amb} + (T_{fc}^i - T_{amb}) \exp[-(\alpha + \beta)t_p] \quad (4.9)$$

La purge peut entraîner une chute de température au-dessous de la température minimale de fonctionnement T_{fc}^{min} , pour estimer l'impact de la purge il faut calculer la variation de température due à la circulation d'air froid pendant la purge. Cette variation est calculée en utilisant l'équation (4.10) et en faisant $T_{fc}(t_p) = T_{fc}^{min}$ dans l'équation (4.9).

$$\Delta T_{fc} = T_{fc}^i - T_{fc}^{min} = (T_{fc}^{min} - T_{amb})(e^{(\alpha + \beta)t_p} - 1) \quad (4.10)$$

L'estimation du temps que prend la pile pour arriver à la température minimale de fonctionnement est calculée en utilisant l'équation suivante : quand la pile n'est pas en fonctionnement, la dynamique de la température est décrite par l'équation (4.5). À celle-ci, nous rajoutons le terme de correction ΔT_{fc} pour considérer l'impact de la purge au démarrage. Le temps de refroidissement de la pile pour arriver à la température critique est exprimé dans l'équation suivante:

$$t_f = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{T_{fc}^0 - T_{amb}}{T_{fc}^{min} + \Delta T_{fc} - T_{amb}} \right) \quad (4.11)$$

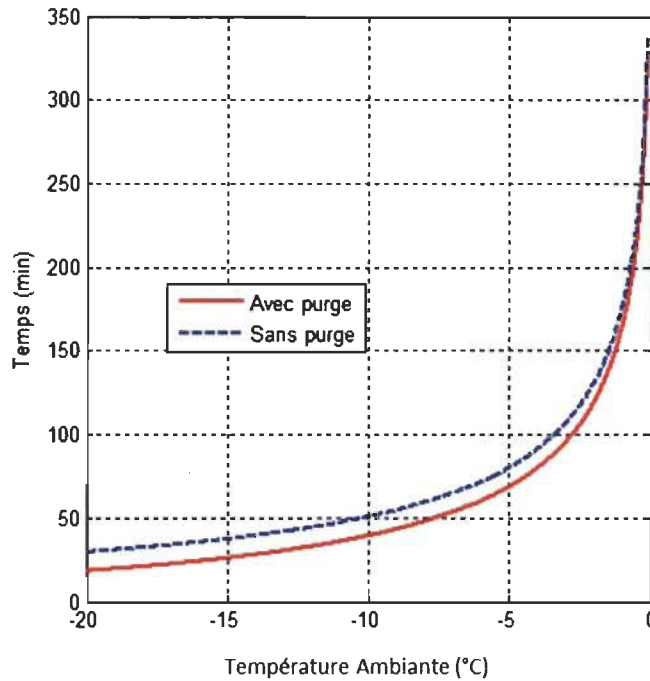


Figure 4-16 Prédiction du temps que prend la pile pour arriver à la température minimale.

Dans la figure antérieure, le temps que prend la pile pour arriver à la température minimale de fonctionnement ($T_{fc}^{min} = 0^{\circ}\text{C}$) a été simulé pour deux situations différentes; la première montre le temps d'arrivée à la température critique sans considérer l'effet de la purge ($\Delta T_{fc} = 0$, courbe bleue), la deuxième tient en compte l'anticipation qui doit être faite en considérant la chute de température provoquée par le procédé de démarrage (tel qu'il est fait dans la pile, courbe rouge).

Les simulations dans ce cas ont été faites en fixant la température initiale $T_{fc}^0 = 10^\circ\text{C}$, la plage de température ambiante se trouve au-dessous de la température minimale ($-20^\circ\text{C} \leq T_{amb} < T_{fc}^{min}$) et le temps de purge $t_p = 20\text{s}$.

4.2.3 Surveillance thermique de la PAC

Dans les conditions environnementales de l'hiver québécois, l'utilisation du véhicule sans système de chauffage pour la PAC demande une stratégie pour maintenir la pile opérationnelle en tout temps.

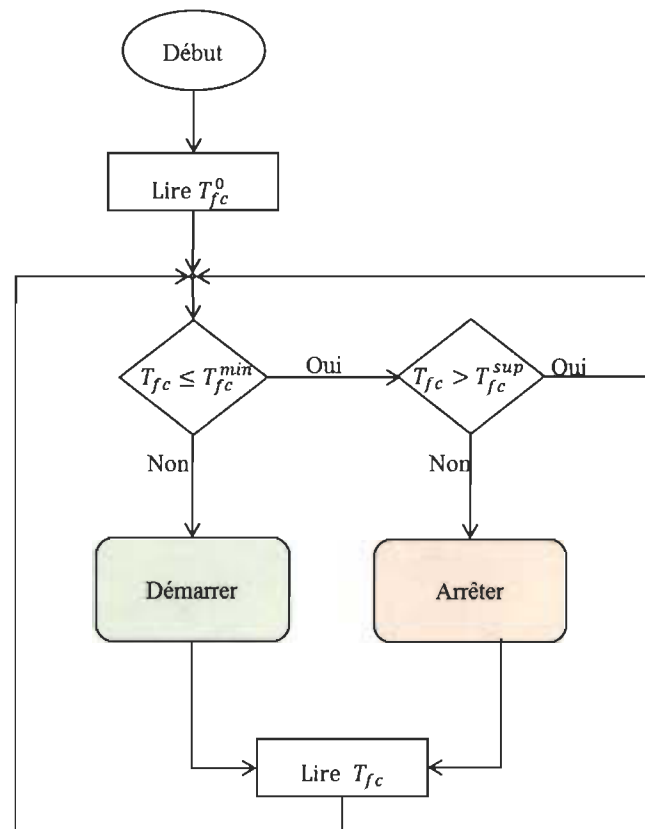


Figure 4-17 Algorithme de contrôle thermique de la pile Mobixane.

La température de départ est égale ou supérieure à la température minimale d'opération. Cela prend en considération que le véhicule est gardé dans un garage réchauffé.



L'algorithme supervise que la température de la pile ne tombe pas sous un seuil minimal T_{fc}^{min} . Quand la pile est démarrée pour s'auto-chauffer, un seuil supérieur de température est fixé, la pile s'arrête une fois que la température atteint cette valeur.

La puissance minimale demandée pour chauffer la pile peut se calculer en utilisant l'équation (3.52) résultant de la solution de temps minimal proposée dans le chapitre 2.

$$u^{max} > (k_a + h_{cn}S_{cn})T_{fc}^{max} \quad (4.12)$$

En remplaçant l'expression (3.30) dans l'équation (4.12) et en isolant le taux de production de chaleur, on obtient l'expression suivante :

$$\dot{Q}_{rh} > (k_a + h_{cn}S_{cn})T_{fc}^{max} - h_{cn}S_{cn}T_{amb} - k_aT_{a,in} \quad (4.13)$$

L'air qui entre dans le système n'est pas préchauffé, alors la température $T_{a,in} = T_{amb}$, l'équation antérieure dévient :

$$\dot{Q}_{rh} > (k_a + h_{cn}S_{cn})(T_{fc}^{max} - T_{amb}) \quad (4.14)$$

Dans l'équation (4.14), évidemment la pile doit produire assez de chaleur pour compenser les pertes de chaleur par convection naturelle et forcée résultante de la circulation de l'air demandé par la réaction.

La pile Mobilxane produit une puissance minimale pour faire fonctionner ses accessoires (recharge de batterie, ventilateurs, systèmes de contrôle électronique et électronique de puissance), les données expérimentales montrent une puissance minimale de fonctionnement de 200W.

Dans cette condition la chaleur produite doit répondre à l'exigence de l'équation (4.14), donc il faut au moins demander une quantité minimale de puissance dans la charge pour produire assez de chaleur permettant de chauffer la pile. Dans ce cas l'énergie produite peut être utilisée pour la recharge des batteries, une option intéressante c'est d'imposer une puissance à la pile dans un point de bon rendement et important pour produire de la chaleur.

Les résultats expérimentaux de la stratégie pour maintenir la pile dans les conditions thermiques fonctionnelles sont montrés dans la Figure 4-18. La température ambiante est d'environ 10 °C, la température minimale de fonctionnement est fixée à 20 °C et la température d'arrêt d'auto- chauffage est fixée à 30 °C. Dans ce cas, chaque fois que la température de la pile s'approche à la température minimale, le système de contrôle envoie une commande pour tirer la puissance qui permette à la pile de se chauffer. La Figure 4-19 montre la courbe de puissance de la pile : nous observons un comportement intermittent de la puissance; ce comportement est défini par les seuils d'hystérésis à des températures fixés de manière arbitraire pour cette expérience et montrés dans la Figure 4-18 avec l'objectif de valider la fonctionnalité de l'algorithme. Finalement, une image de l'interface développée sur Labview pour communiquer avec la pile est montrée dans la Figure 4-20.

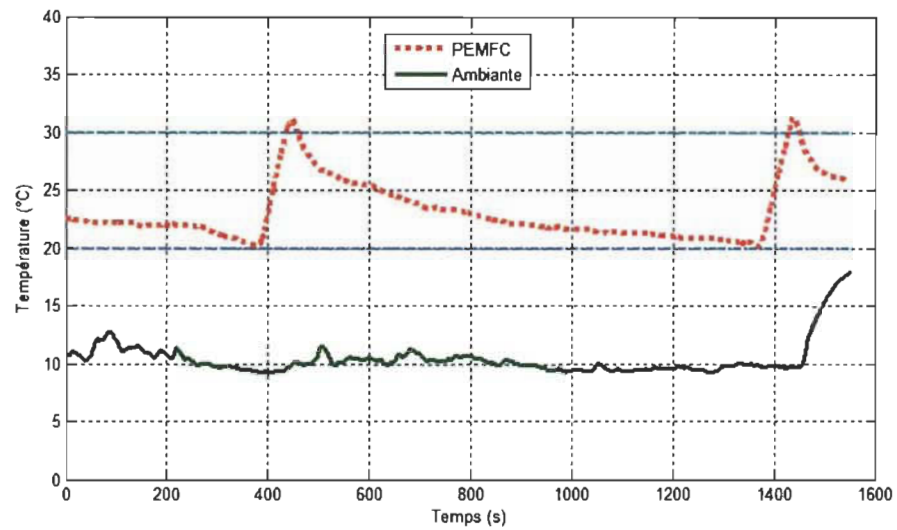


Figure 4-18 Température expérimentale pile Mobilxane

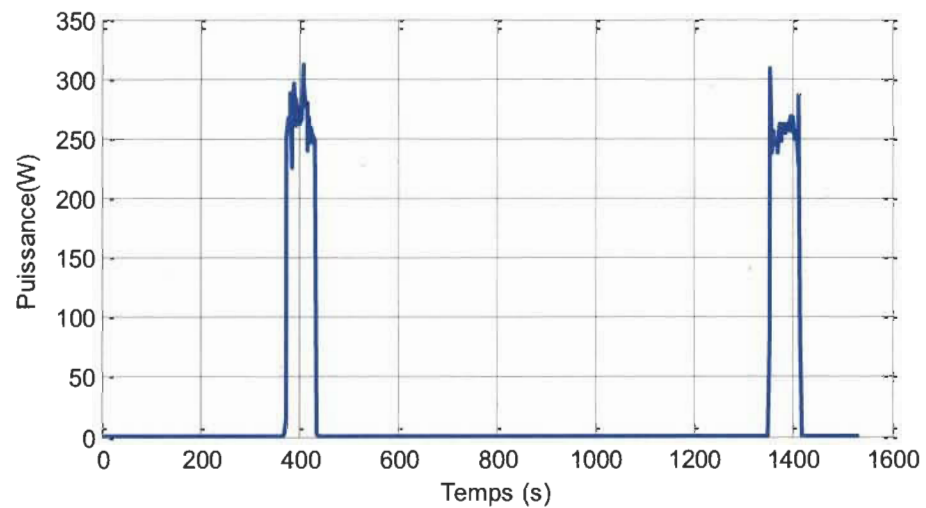


Figure 4-19 Puissance à la sortie du convertisseur CC-CC de la pile Mobilxane

L'algorithme de contrôle thermique proposé pour la pile Mobixane permet en théorie de faire fonctionner la pile à des températures ambiantes inférieures au point de congélation. Des expériences dans des conditions hivernales à température ambiante négative n'ont pas été faites, mais nous considérons que l'algorithme est valide pour ces conditions. Toutefois,

la température initiale de la pile doit être dans la plage de fonctionnement spécifiée par le fabricant. Donc, il est important que le véhicule soit garé dans un milieu chauffé pendant l'hiver.

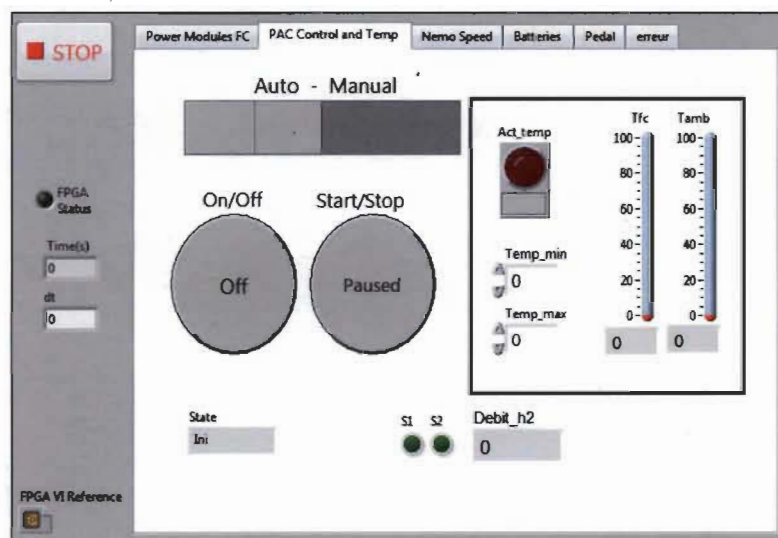


Figure 4-20 Interface Labview pour le contrôle thermique embarqué sur le Compact RIO.

La pile Mobixane vient avec un système de contrôle complet embarqué, lorsque la pile reçoit la commande d'arrêt, le système fait une purge pour retirer l'eau résiduelle dans la pile en utilisant l'air pris à température ambiante. La durée de la purge est assez considérable, ce qui cause une chute de température importante. Les pertes de chaleur augmentent à cause de ce procédé. Pour une gestion thermique plus efficace, cette purge doit se faire à la fin du cycle d'utilisation du véhicule ou quand la pile ne va plus être utilisée dans le parcours.

Chapitre 5 - Conclusion

Dans ce travail de recherche une stratégie pour la gestion thermo énergétique d'une pile à combustible a été proposée. Le système proposé gère un démarrage assisté lorsque la pile n'est pas fonctionnelle à cause des températures trop basses. Nous utilisons la puissance moyenne de traction du véhicule pour calculer le temps de démarrage de la pile. Ce temps est utilisé pour préparer la pile à fonctionner lorsque le seuil minimal des batteries est atteint.

Les tests réalisés ont prouvé que l'algorithme implanté permet de faire le contrôle thermique de la pile en considérant l'architecture d'interconnexion électrique du véhicule. Les simulations nous montrent la possibilité d'un démarrage dans une large plage de températures. Le calcul du temps de préchauffage réduit permet l'économie d'énergie quand l'environnement est froid, car les pertes de chaleur par convection naturelle sont réduites au minimum. Le calcul du temps de démarrage du système de chauffage et la prédiction de la décharge des batteries à partir des appels de puissance du système de traction du véhicule permettent d'anticiper le démarrage de la pile avec succès pour éviter la décharge profonde des batteries.

Les algorithmes et modèles mathématiques proposés ont été validés pour une pile à air comprimé et refroidi par de l'eau sur un banc d'essai de l'IRH et sur une pile refroidie par air installée sur le véhicule expérimental Nemo.

Pour la pile du banc d'essai, une méthode optimisée a été développée pour la chauffer à partir d'une source de chaleur auxiliaire. Pour ce cas, l'impact de la température extérieure sur l'évolution thermique de la pile et les contraintes opératoires imposées par le système de gestion énergétique PAC-batteries ont été pris en compte pour programmer un démarrage assisté. Le système de chauffage a été démarré avec succès en tenant compte du délai d'échauffement de la pile.

Lorsque la température de la pile atteint une température minimale de fonctionnement, une solution de temps minimal a été développée pour ramener la pile au point minimal opérationnel. Nous avons démontré que la réaction exothermique est suffisante pour la montée rapide de la température de la PAC. Quand la PAC atteint la température d'opération, un contrôleur classique est utilisé pour commander le système de refroidissement. Les différents phénomènes d'échange de chaleur qui ont lieu dans la pile sont considérés pour augmenter la performance du contrôleur.

Dans l'étape d'autoéchauffement, l'effet d'accélérer le chauffage en utilisant encore la source d'appoint ne permet pas d'économiser de l'énergie, par contre, l'énergie investie dans le processus n'est jamais récupérée, malgré l'augmentation rapide du rendement. Les scénarios de test sont étudiés en détail dans notre article de conférence IEEE [40].

La régulation thermique pour le refroidissement de la pile a été faite avec un contrôleur PID embarqué dans l'échangeur de chaleur. Dans cette étape le régulateur surveille une température entre 60 et 70 °C. Celle-ci est la plage de température d'opération des piles actuelles du type PEM. Normalement à ces températures le contrôle est plus concentré sur la problématique d'humidification de la membrane [41].

Pour la pile atmosphérique de Nemo, nous avons fait une modélisation thermique et proposé un algorithme pour la faire fonctionner dans des environnements en dessous de la température minimale de fonctionnement fixée par le fabricant. Un algorithme basé sur une machine séquentielle démarre la pile.

Les algorithmes proposés ont été simulés sous Matlab. Dans le banc d'essai, les algorithmes ont été implantés en utilisant le langage Labview et le système d'acquisition de National Instruments. Pour la partie d'intégration dans le véhicule Nemo, nous avons utilisé le système à temps réel de National Instruments (Compact RIO), dans lequel l'estimateur de l'état de charge des batteries et une machine séquentielle pour le contrôle thermique ont été embarqués sur le module FPGA.

Discussions

Notre travail offre une perspective pour le démarrage à froid dans une contextualisation du véhicule hybride avec topologie sérieuse. Nous profitons de la flexibilité d'une telle topologie pour accomplir un démarrage programmé selon les besoins énergétiques du véhicule. Cela nous permet d'incorporer une stratégie orientée vers l'efficacité énergétique et la réduction de risques dans l'utilisation de la pile à températures basses. Généralement dans la littérature, le démarrage à froid des piles est traité en considérant la pile comme source principale, cela demande un démarrage rapide et peu orienté à l'optimisation énergétique. Nous considérons aussi l'impact de la température ambiante à court et moyen terme pendant le cycle d'utilisation du véhicule. Normalement l'effet de la température ambiante est négligé dans les approches existantes.

L'impact de la masse thermique de la pile et du système de chauffage est très important sur le bilan énergétique après les essais. La pile du banc d'essai a une densité de puissance

en pointe ou puissance spécifique trop faible environ 58 w/kg , cela implique plus de consommation d'énergie et un délai plus grand pendant l'étape de préchauffage. La réduction de la masse thermique, de la quantité du fluide caloporteur et l'implantation de couches d'isolation thermique peuvent minimiser beaucoup l'énergie calorifique perdue.

Le modèle électrochimique pour la pile à combustible à membrane échangeuse de protons montre l'influence de la température sur la performance et le rendement. Arriver à la température adéquate de fonctionnement peut prendre plusieurs minutes selon les conditions d'isolation et la puissance des systèmes de chauffage. Les environnements très froids peuvent empêcher le fonctionnement de la PAC ou diminuer de façon significative son rendement. Le modèle thermique transitoire dépend des caractéristiques physiques de chaque pile, de l'isolation thermique, du courant débité, du ratio stœchiométrique, du niveau d'humification, de la température de l'air, de la température extérieure, et de l'échange de chaleur avec mécanisme de chauffage et refroidissement. Lorsque la pile est dans la plage de fonctionnement thermique adéquate, nous considérons que les conditions permettant un bon fonctionnement peuvent être imposées sans problème.

Une expansion de l'étude de démarrage à froid des piles pourra incorporer des analyses sur l'impact de basses températures sur chacun des paramètres et accessoires portant du système par exemple, l'effet de la température sur la dynamique et performance des pompes, des éléments chauffants et des autres appareils utilisés avant démarrage et au démarrage. Les approches proposées dans ce travail sont orientés à trouver une solution principalement théorique en visant l'objective principale d'accomplir un démarrage assisté quand la température initiale de la pile est trop basse pour pouvoir démarrer sans risques de dommages graves.

Perspectives et travaux futurs

– Implantation du système de démarrage assisté sur Nemo :

Le véhicule Nemo présent à l'IRH n'a pas un système de chauffage embarqué, alors si la température initiale interne de la pile est inférieure à 2 °C, il est impossible de la démarre. Bien que la stratégie de gestion thermique puisse éviter que la pile tombe au-dessous de la température minimale, donner à la pile la possibilité d'un démarrage dans ces conditions permettra de faire de tests plus réalistes. Dans ce cas il sera possible d'utiliser le véhicule pendant l'hiver québécois.

– Impact de la température sur les batteries et les accessoires :

Nous n'avons pas considéré l'impact de la température sur les batteries. L'effet de les utiliser comme source primaire à des conditions extrêmes a un grand impact sur le bilan énergétique de la voiture. La performance du système en incluant les accessoires comme le compresseur, la pompe d'eau et le fluide caloporteur peut être considérablement influencée par la température. Ces sujets nécessitent une étude complète qui vaudrait la peine d'être analysée dans des travaux futurs.

– Démarrages non assistés :

Idéalement dans un véhicule muni d'un système de pile à combustible, le démarrage ne devrait pas impliquer les systèmes ou les accessoires auxiliaires, car ceux-ci augmentent le cout du véhicule et diminuent son efficacité globale. Mais pour pouvoir donner des solutions à la problématique de démarrage à froid, nous devons penser à des stratégies non assistées, économiques et robustes. Trouver des profils de courant pendant le démarrage et la combinaison des techniques pour gérer l'eau et la glace formée pendant le démarrage est

prioritaire pour éviter l'étouffement progressif de la pile, les dommages graves et le vieillissement accéléré.

La réaction exothermique est très intéressante comme solution. Mais cela demande une étude expérimentale et théorique rigoureuse. Celle-ci est nécessaire pour comprendre les phénomènes qui ont lieu dans les cellules à des températures inférieures au point de congélation. Dans telles conditions, maîtriser l'influence des différents paramètres comme la densité de courant, l'impédance, la formation de glace, le contenu de l'eau (coefficient de diffusion, teneur en eau) est essentiel pour pouvoir accomplir un démarrage à froid avec succès. Pour une telle étude, l'équipement de laboratoire qui pourra aider beaucoup est :

- une chambre climatique qui permette de réaliser des essais à des températures de -40 °C;
- systèmes de mesure pour quantifier l'impact de démarrage sur la pile, spécialement l'impédance de la membrane et l'affectation de la courbe de polarisation;
- analyses des dommages au niveau de cellules, les images de microscope électronique permettront d'observer les dégradations irréversibles graves.



Bibliographie

- [1] “Rapport d’inventaire national, SOURCES ET PUIITS DE GAZ À EFFET DE SERRE AU CANADA,” 2010.
- [2] Global Climate & Energy Project, “Global Climate & Energy Project Technical Assessment Report A Technical Assessment of High-Energy Batteries for Light-Duty Electric Vehicles,” 2006.
- [3] R. Delft, G. Duleep, C. E. Delft, B. Kampman, and M. Gr, “Impacts of Electric Vehicles - Assessment of electric vehicle and battery technology,” 2011.
- [4] S. J. Moura, J. B. Siegel, D. J. Siegel, H. K. Fathy, and A. G. Stefanopoulou, “Education on Vehicle Electrification : Battery Systems , Fuel Cells , and Hydrogen,” in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010, pp. 1–6, 1–3.
- [5] Y. Haseli, G. Naterer, and I. Dincer, “Comparative assessment of greenhouse gas mitigation of hydrogen passenger trains,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1788–1796, Apr. 2008.
- [6] N. Briguglio, L. Andaloro, M. Ferraro, and V. Antonucci, “Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles,” 2005.
- [7] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design*. Washington: University of West Florida, 2005.
- [8] M. Matsunaga, T. Fukushima, and K. Ojima, “Powertrain System of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle,” vol. 3, pp. 1–10, 2009.
- [9] Department of Energy, “Hydrogen and Fuel Cell Activities, Progress, and Plans: Report to Congress,” 2009.
- [10] “Inhibited Glycol Coolant For Fuel Cells and Electronics Cooling - Dynalene FC.” [Online]. Available: <http://www.dynalene.com/Inhibited-Glycol-Coolant-Dynalene-FC-s/1870.htm>. [Accessed: 22-Aug-2013].
- [11] Y. Wang, “Analysis of the Key Parameters in the Cold Start of Polymer Electrolyte Fuel Cells,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 154, no. 10, p. B1041, 2007.

- [12] M. Sundaresan, "A thermal model to evaluate sub-freezing startup for a direct hydrogen hybrid fuel cell vehicle polymer electrolyte fuel cell stack and system," University of California, Davis, 2004.
- [13] L. Mao, C.-Y. Wang, and Y. Tabuchi, "A Multiphase Model for Cold Start of Polymer Electrolyte Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 154, no. 3, p. B341, 2007.
- [14] R. Alink, D. Gerteisen, and M. Oszcipok, "Degradation effects in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks by sub-zero operation—An in situ and ex situ analysis," *J. Power Sources*, vol. 182, no. 1, pp. 175–187, Jul. 2008.
- [15] A. A. Pesaran, G. Kim, and J. D. Gonder, "PEM Fuel Cell Freeze and Rapid Startup Investigation," Golden, Colorado, 2005.
- [16] A. Faghri and Z. Guo, "Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 19–20, pp. 3891–3920, Sep. 2005.
- [17] K. Haraldsson and K. Wipke, "Evaluating PEM fuel cell system models," *J. Power Sources*, vol. 126, no. 1–2, pp. 88–97, Feb. 2004.
- [18] D. Feroldi, M. Serra, and J. Riera, "Design and Analysis of Fuel-Cell Hybrid Systems Oriented to Automotive Applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 4720–4729, 2009.
- [19] Z. Yu, D. Zinger, and A. Bose, "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351–2359, Feb. 2011.
- [20] S. G. Wirasingha and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, 2011.
- [21] H. E. Hong-wen, Z. Ying-qi, W. A. N. Fan, A. Fuel, H. Power, and T. Structure, "Control Strategies Design for a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle," pp. 1–6, 2008.
- [22] S. Kelouwani, N. Henao, K. Agbossou, S. Member, Y. Dubé, and L. Boulon, "Two-Layer Energy-Management Architecture for a Fuel Cell HEV Using Road Trip Information," vol. 61, no. 9, pp. 3851–3864, 2012.
- [23] C. . Ramos-Paja, A. Romeroa, R. Giral, J. Calvente, and L. Martinez-Salamero, "Mathematical analysis of hybrid topologies efficiency for PEM fuel.pdf," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, pp. 1049–1061, 2010.

- [24] A. A. Pesaran, G. Kim, and J. D. Gonder, "PEM Fuel Cell Freeze and Rapid Startup Investigation PEM Fuel Cell Freeze and Rapid Startup Investigation," *Contract*, no. September, 2005.
- [25] Q. Yan, H. Toghiani, Y.-W. Lee, K. Liang, and H. Causey, "Effect of sub-freezing temperatures on a PEM fuel cell performance, startup and fuel cell components," *J. Power Sources*, vol. 160, no. 2, pp. 1242–1250, Oct. 2006.
- [26] C. Chacko, R. Ramasamy, S. Kim, M. Khandelwal, and M. Mench, "Characteristic Behavior of Polymer Electrolyte Fuel Cell Resistance during Cold Start," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 155, no. 11, p. B1145, 2008.
- [27] L. Mao and C.-Y. Wang, "Analysis of Cold Start in Polymer Electrolyte Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 154, no. 2, p. B139, 2007.
- [28] S. Sun, H. Yu, J. Hou, Z. Shao, B. Yi, P. Ming, and Z. Hou, "Catalytic hydrogen/oxygen reaction assisted the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) startup at subzero temperature," *J. Power Sources*, vol. 177, no. 1, pp. 137–141, Feb. 2008.
- [29] J.-W. Ahn and S.-Y. Choe, "Coolant controls of a PEM fuel cell system," *J. Power Sources*, vol. 179, no. 1, pp. 252–264, Apr. 2008.
- [30] M. Sundaresan and R. M. Moore, "Polymer electrolyte fuel cell stack thermal model to evaluate sub-freezing startup," *J. Power Sources*, vol. 145, no. 2, pp. 534–545, Aug. 2005.
- [31] C. Ernst, A. Hackbarth, R. Madlener, B. Lunz, D. U. Sauer, and L. Eckstein, "Battery Sizing for Serial Plug-in Hybrid Vehicles : A Model-Based Economic Analysis for Germany," no. 14. Aachen, Germany, 2011.
- [32] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 86, no. 1–2, pp. 173–180, Mar. 2000.
- [33] F. L. Lewis and V. L. Syrmos, *Optimal Control*. J. Wiley, 1995.
- [34] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*. J. Wiley, 2002.
- [35] B. W. Shevock, "System Level Modeling of Thermal Transients in PEMFC Systems," 2008.

- [36] K. P. Adzakpa, J. Ramousse, Y. Dubé, H. Akremi, K. Agbossou, M. Dostie, A. Poulin, and M. Fournier, "Transient air cooling thermal modeling of a PEM fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 179, no. 1, pp. 164–176, Apr. 2008.
- [37] A. Dicks and J. Larminie, *Fuel Cell Systems Explained*, 2. Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [38] P. Moldrik and R. Chvalek, "PEM fuel cells — The effect of fuel parameters on efficiency and quality of electric power supply," *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, pp. 1–4, May 2011.
- [39] N. Henao, S. Kelouwani, K. Agbossou, and Y. Dubé, "Proton exchange membrane fuel cells cold startup global strategy for fuel cell plug-in hybrid electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 220, pp. 31–41, Dec. 2012.
- [40] N. Henao, S. Kelouwani, K. Agbossou, and Y. Dube, "PEMFC low temperature startup for electric vehicle," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 2977–2982.
- [41] K. Haraldsson, *On Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles- Modelling and Demonstration*. 2005.
- [42] C. Spiegel, *PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab*. Amsterdam Boston: Academic Press/Elsevier, 2008.
- [43] "Engineering ToolBox." [Online]. Available: <http://www.engineeringtoolbox.com/>. [Accessed: 16-Oct-2013].

Annexe A – Résolution du système d'équations du modèle thermique de la PAC

Solution du système des équations dynamiques du modèle thermique de la pile décrit dans la section 3.2.

$$m_{fc}c_{fc}\dot{T}_{fc} = \dot{Q}_{amb} + \dot{Q}_{whe}$$

$$m_w c_w \dot{T}_w = P_{he} - \dot{Q}_{whe}$$

- Remplacement des variables et paramètres thermiques non simplifiés

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = -\frac{1}{C_{fc}}(h_{nc}S_{nc} + k_w)T_{fc} + \frac{k_w}{C_{fc}}T_w + \frac{h_{nc}S_{nc}}{C_{fc}}T_{amb}$$

$$\frac{dT_w}{dt} = -\frac{k_w}{C_w}T_w + \frac{k_w}{C_w}T_{fc} + \frac{P_e}{C_w}$$

- Simplification du système d'équations différentielles en utilisant de variables auxiliaires q et p et de coefficients simplifiés a , b , c y d :

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = aT_{fc} + bT_w + q$$

$$\frac{dT_w}{dt} = cT_w + dT_{fc} + p$$

- Transformation de Laplace des équations antérieures pour trouver une expression de la température de la PAC en variable s :

$$sT_{fc}(s) - T_{fc}^0 = aT_{fc}(s) + bT_w(s) + \frac{q}{s}$$

$$sT_w(s) - T_w^0 = cT_w(s) + dT_{fc}(s) + \frac{p}{s}$$

$$T_{fc}(s) = \frac{T_{fc}^0 s^2 + (bT_w^0 - T_{fc}^0 c + q)s + bp - qc}{s[s^2 - (a + c)s + ac - bd]}$$

- Expression de $T_{fc}(s)$ en éléments simples en utilisant la technique de décomposition des fractions partielles d'une fraction rationnelle :

$$T_{fc}(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{(s + r_1)} + \frac{C}{(s + r_2)}$$

Où

$$A = \frac{bp - qc}{r_1 r_2} = T_{fc}^{\infty}$$

$$B = T_{fc}^0 - A - C = T_{fc}^0 - T_{fc}^{\infty} - C$$

$$C = \frac{bT_w^0 - T_{fc}^0 c + q - T_{fc}^0 r_2 - T_{fc}^{\infty} r_1}{(r_1 - r_2)}$$

- La solution de $T_{fc}(t)$ dans le domaine temporel est donnée par la transformation inverse de donne $T_{fc}(s)$:

$$T_{fc} = A + B e^{-r_1 t} + C e^{-r_2 t}$$

$$T_{fc} = T_{fc}^{\infty} + (T_{fc}^0 - T_{fc}^{\infty} - C) e^{-r_1 t} + C e^{-r_2 t}$$

Où

$$r_{1,2} = \frac{(a + c) \pm \sqrt{(a + c)^2 - 4c(a + d)}}{2}$$

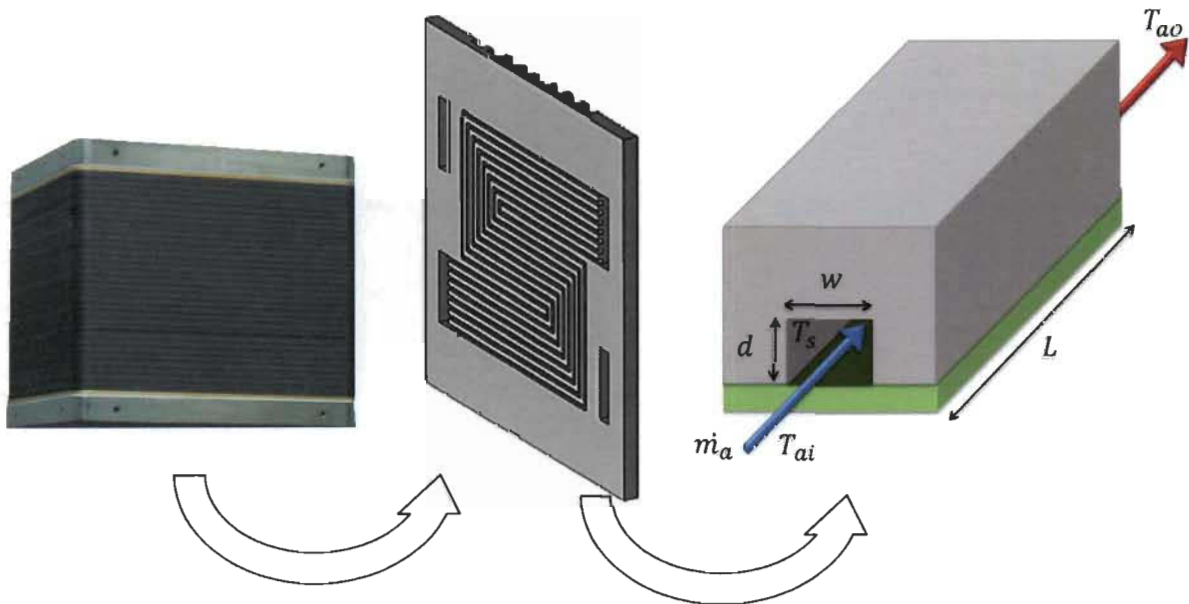
$$r_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_w} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_{fc}} + \frac{k_w}{C_w} \right)^2 - 4 \frac{k_w}{C_w} \frac{h_{nc} S_{nc}}{C_{fc}}}$$

Annexe B –Coefficient d'échange thermique par convection forcée de la pile à combustible

Pour le coefficient de transfert thermique par convection forcée de la pile à combustible h_w , nous utilisons la relation entre le nombre de Nusselt Nu , nombre de Reynolds Re et nombre de Prandtl Pr pour un fluide laminaire avec coefficient de conductivité k_a , en fonction du rayon hydraulique D du canal avec longueur L_c .[42][34] :

Les corrélations empiriques pour la convection naturelle sont généralement de la forme :

$$Nu = \frac{h_w D}{k_a} \quad (B.1)$$



Pile - Cellule - Canal

Où le diamètre hydraulique est exprimé comme :

$$D = \frac{4A_t}{P_c} = \frac{4wd}{2(w + d)} \quad (\text{B.2})$$

Détermination du type d'écoulement :

Pour déterminer le type d'écoulement, il faut d'abord calculer le nombre de Reynolds pour le type de fluide.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (\text{B.2})$$

Où;

ρ est la densité du fluide

μ est la viscosité du fluide

D est le diamètre hydraulique du canal

U es la vitesse du fluide

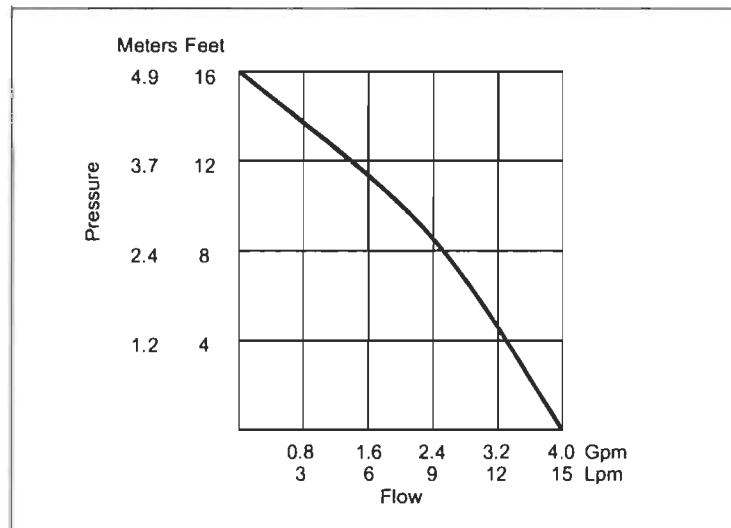
Les paramètres physiques nécessaires pour la détermination coefficient d'échange thermique par convection forcée de la pile à combustible Hyteon sont montrés dans le tableau suivant :

w	$1.6mm$
d	$1mm$
A_t	$1.6mm^2$

D	$1.23mm$
L	$72cm$

Le rapport pression vs débit volumétrique de la pompe utilisé pour le circuit de refroidissement est montré dans la figure suivante :

Pump Capacity*



À une pression moyenne dans la pompe la vitesse du fluide dans un canal peut se calculer à partir de l'équation suivante :

$$U = \frac{\dot{Q}}{N n_{ic} A_t} = \frac{9}{60} \frac{x 10^{-3} m^3}{24 \times 5 \times 1.6 \times 10^{-6} m^2} = 0.78125 (m \cdot s^{-1})$$

Où;

\dot{Q} est le débit en $[Lpm]$

N est le nombre de cellules de la pile

n_{ic} est le nombre de canaux d'une cellule











A_t est la surface de la section transversale d'un canal

Pour le cas de l'eau $\mu = 0.001002 \text{ Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ et le nombre de Reynolds est égal à $Re = 954$. Dans ce cas, selon [34] pour un $Re < 2300$ l'écoulement est laminaire.

En isolant h_w nous obtenons le coefficient de transfert thermique par convention forcée.

$$h_w = \frac{Nuk_a}{D}$$

Pour les fluides laminaires, nous avons pris la relation Nusselt, Prand Reynolds considérée dans le livre d'Incropera [34]. Les Nombres de Nusselt et de facteurs de friction pour un écoulement laminaire complètement développé dans des tubes de section transversale non circulaire sont montrés dans la figure suivante (Source : Incropera and DeWitt's [34]) :

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		(Uniform q''_s)	(Uniform T_s)	
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
	∞	5.39	4.86	96
	—	3.11	2.49	53

Finalement, les paramètres thermiques des fluides utilisés dans la pile Hyteon apparaissent dans le tableau suivant :

	Paramètre	Valeur
Eau	c_p	4100 ($J.kg^{-1}$)
	μ	0.001002 ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
	k	0.58 ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
	Nu	4.2
	h_w	1900 $Wm^{-2}K^{-1}$

	Paramètre	Valeur
Air	c_p	1000 ($J.kg^{-1}$)
	k_a	0.0272 $Wm^{-1}K^{-1}$
	μ	0.001002 ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
	Nu	4.2
	h_a	80 $Wm^{-2}K^{-1}$

Source: engineeringtoolbox [43]