

# Etude d'une méthode de chauffage rapide de pile à combustible PEM pour une application transport.

Sylvie BEGOT<sup>1\*</sup>, Fabien HAREL<sup>2</sup>, Valérie LEPILLER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST, FCLAB, F90000 Belfort, France

<sup>2</sup>Univ Eiffel, Univ Lyon, ENTPE, LICIT-ECO7, F-69675 Lyon, France

\* (auteur correspondant : [sylvie.begot@univ-fcomte.fr](mailto:sylvie.begot@univ-fcomte.fr))

**Résumé** - Les piles à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane) sont une des solutions étudiées pour atteindre les objectifs de décarbonation du secteur des transports. Dans cet article, nous proposons et étudions expérimentalement une méthode originale permettant le chauffage rapide d'une pile à combustible. La méthode est basée sur l'application d'un écoulement alterné incluant ou non des phases d'arrêt. Nous montrons que cette méthode permet à la fois le chauffage rapide, le maintien d'une homogénéité en température dans l'empilement et la possibilité d'utiliser une partie de la puissance thermique d'une cellule sur les cellules adjacentes.

## Nomenclature

$d$  durée, s

POW puissance, W

$T$  température, °C

*Symboles grecs*

$\alpha$  configuration sens direct

$\beta$  configuration sens inverse

*Indices et exposants*

$A$  anode

$E$  supplémentaire

$in$  entrée

$K$  cathode

$M$  central

$out$  sortie

$FC$  pile à combustible

## 1. Introduction

Dans le contexte du réchauffement climatique, les véhicules électriques à pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane) semblent être la solution à long terme la plus appropriée pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre [1]. Toutefois, un certain nombre de problèmes doivent encore être résolus si l'on veut que cette technologie soit largement diffusée. Parmi ces problèmes, la gestion thermique est une question centrale car les systèmes électrochimiques ne peuvent fonctionner de manière optimale que dans une plage de température étroite. Hors de cette plage, leurs performances et leur durée de vie sont fortement affectées [2]. Cependant, dans le cadre d'une application de transport, les cycles de démarrage et d'arrêt et les variations de charge sont présents dans toutes les conditions de température ambiante. Il en résulte des exigences importantes pour le système de gestion thermique [3].

Le chauffage rapide est intéressant à température nominale pour maintenir les conditions optimales de température en cas de variation de charge [4][5]. Il est également indispensable dans une application transport lors du démarrage en température négative [6]. Parmi les méthodes utilisées dans ce dernier cas, une famille consiste à chauffer le circuit caloporteur [7]. Utiliser un équipement auxiliaire de chauffage augmente le volume et la masse embarqués dans le véhicule, aussi des recherches sont en cours sur des stratégies de chauffage autonome utilisant la chaleur produite par la pile à combustible [8]. Cette variation de température doit être la plus homogène possible à l'intérieur de l'empilement afin d'éviter à la fois des points de gel notamment au niveau des cellules d'extrémité et des points chauds au niveau des cellules

centrales [9][10][11]. Dans une première étude, les auteurs ont proposé une méthode originale permettant le chauffage rapide d'une pile à combustible tout en assurant l'homogénéité des températures dans l'empilement [12]. Il a été démontré que piloter le circuit caloporteur de façon à générer un écoulement alterné permet de remplir ces conditions. Les meilleures performances sont obtenues en incluant des phases d'arrêt de l'écoulement entre les phases d'alternance.

Dans cet article, nous poursuivons cette étude en analysant plus en détail le fonctionnement de la stratégie proposée. Nous cherchons à évaluer l'impact des performances thermiques d'une cellule sur les cellules adjacentes dans ces conditions. La première partie de l'article décrit le matériel et les méthodes utilisées. La deuxième partie présente les résultats expérimentaux et leur analyse.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Pile à combustible

La pile à combustible utilisée est une pile commerciale refroidie par eau du fabricant ZSW [55]. Afin de pouvoir représenter les effets d'extrémité, l'empilement choisi est constitué de trois cellules de surface  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  (Figure 1). Pour les besoins de cette étude, la pile à combustible a été utilisée sans alimentation en gaz. L'objectif est de distinguer les effets des réactions électrochimiques du comportement thermique pur. Des films chauffants électriques d'une puissance maximale de 100 W et d'une surface de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  remplacent les assemblages membrane-électrodes. La densité de puissance thermique maximale obtenue par film est de  $0,72 \text{ W.cm}^{-2}$ , ce qui est comparable à la densité de puissance thermique en fonctionnement réel. Chaque film chauffant est inséré entre deux plaques bipolaires. Les plaques de refroidissement sont insérées du côté de la cathode de chaque cellule. Une quatrième plaque de refroidissement est insérée du côté de l'anode de la pile. Les plaques collectrices et les plaques d'extrémité entourent ces trois cellules. La cellule la plus proche du côté anodique est désignée par A, la cellule centrale est désignée par M et la cellule la plus proche du côté cathodique est désignée par K. La quatrième plaque de refroidissement est désignée par E, elle fournit un refroidissement supplémentaire du côté de l'anode.

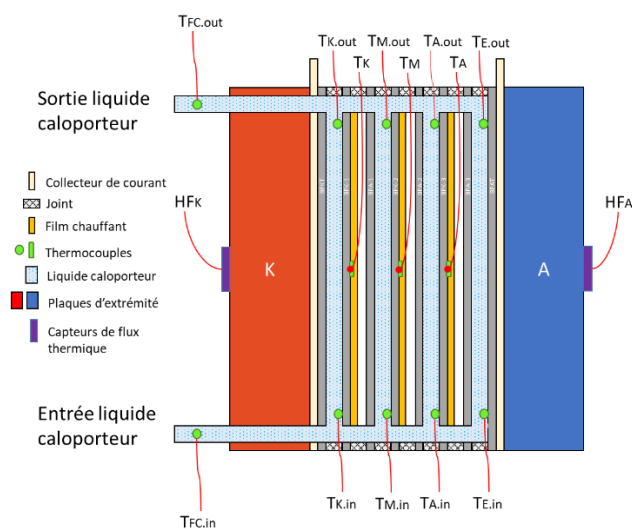


Figure 1 : Schéma de la pile à combustible étudiée [12]

## 2.2. Banc d'essais

Le banc d'essai se compose du circuit de refroidissement de la pile à combustible, de sa commande et de son instrumentation (Figure 2). Le fluide caloporteur est de l'eau, et une pompe électrique assure la circulation. Deux électrovannes à 3 voies assurent que le liquide caloporteur puisse circuler alternativement dans la pile en fonction de leur position (Figure 3) [9]. La configuration  $\alpha$  de la Figure 3b est la configuration par défaut du circuit caloporteur (écoulement en sens direct). Dans la configuration  $\beta$  (Figure 3c), le sens de l'écoulement est inversé. Une troisième configuration (Figure 3d) permet le by-pass de la pile en commandant la première électrovanne comme en configuration  $\beta$  et la seconde comme en configuration  $\alpha$ . Dans la pompe, le fluide s'écoule toujours dans le même sens quelle que soit la configuration. Un débitmètre Coriolis est utilisé pour mesurer le débit  $Q_{cor}$  en sortie de pompe avec une précision de 0,2%. Un deuxième débitmètre, à ultrasons, est inséré dans la branche de la pile à combustible. Sa mesure  $Q_{us}$  est moins précise (précision de 5 %) que celle du débitmètre Coriolis. Néanmoins, sa dynamique relativement élevée nous permet d'observer des variations transitoires de débit dans la pile. La différence de pression ( $\Delta P$ ) entre l'entrée et la sortie du circuit caloporteur de la pile est mesurée par un capteur piézoélectrique différentiel Keller PD33X avec une précision de 0,1%. Deux thermocouples fabriqués avec un diamètre de fil de 127  $\mu\text{m}$  sont également insérés directement dans le liquide de refroidissement à l'entrée et à la sortie de la pile et de chaque cellule. La puissance des films chauffants est déterminée à l'aide d'un capteur de courant à effet Hall et de la mesure de la tension de la batterie. Les mesures et le contrôle du banc d'essai sont effectués avec un système CompactDaq National Instrument.

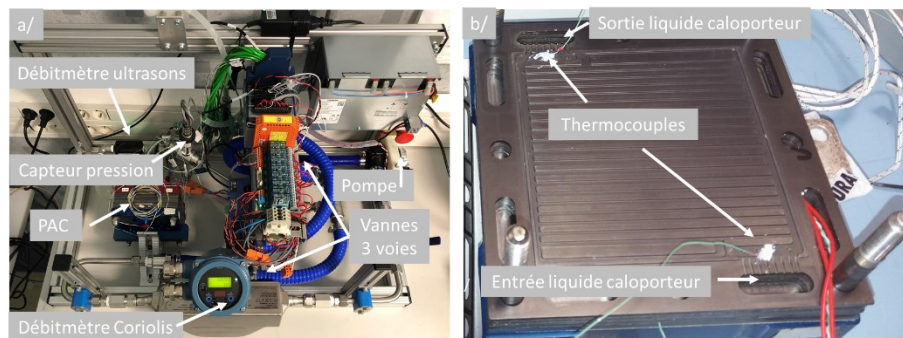


Figure 2 : a/ Photo du banc expérimental b/Mesures de température interne

## 2.3. Stratégies de commande du circuit caloporteur

L'étude vise à évaluer les stratégies utilisant un écoulement alterné de liquide caloporteur dans la pile à combustible pour améliorer les performances de démarrage. Les nouvelles stratégies sont comparées à deux situations de référence (Tableau 1). Dans une première situation, il n'y a pas de débit de liquide caloporteur, la pompe étant à l'arrêt. Cette stratégie ne serait pas utilisable en fonctionnement réel pour des raisons de risque d'échauffement non maîtrisé. Une deuxième situation est lorsque le liquide s'écoule dans le sens direct dans la pile à combustible, comme en fonctionnement normal. Cette situation est appelée « unidir. ». Le débit de référence est de 0,7 l/min ce qui permet de refroidir une pile à combustible de 250 W avec une différence de température de 5°C entre la sortie et l'entrée de la pile [3]. Etant destinée à refroidir le dispositif, cette stratégie n'est pas adaptée à un chauffage rapide.

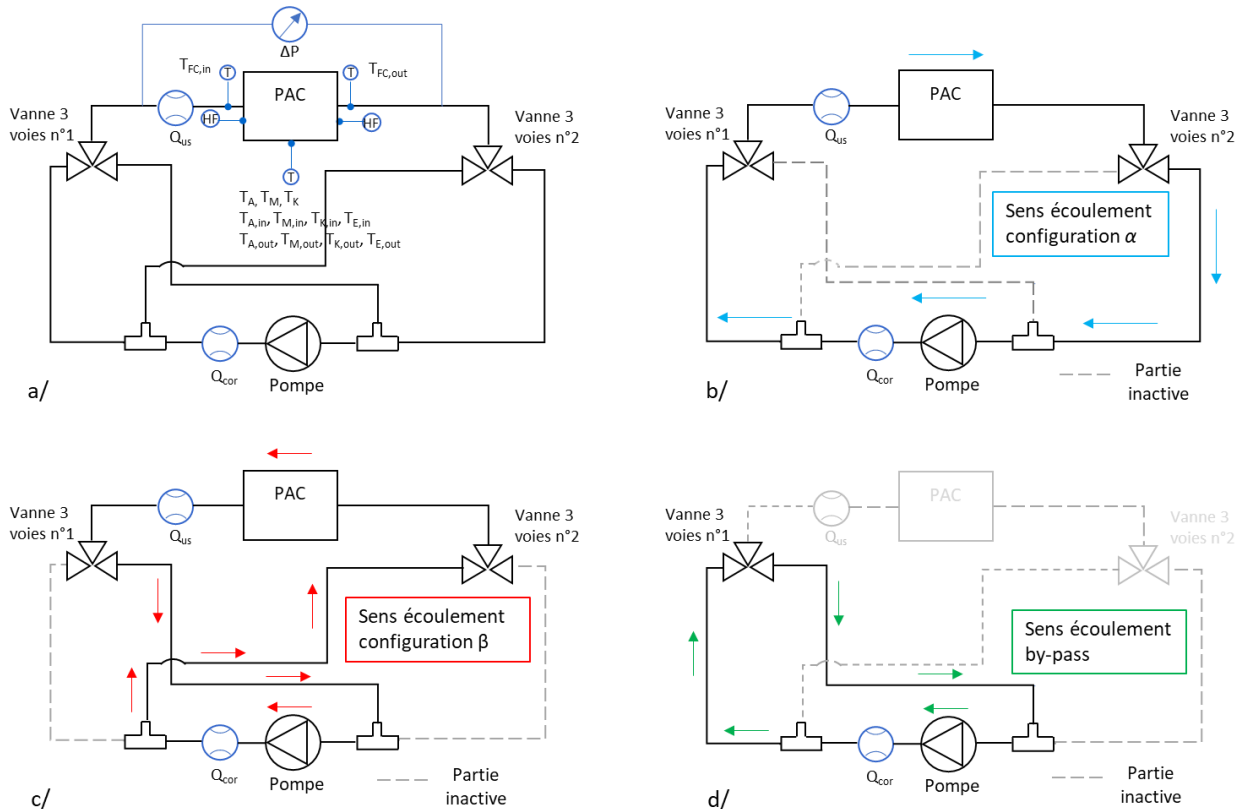


Figure 3 : Schéma de principe du circuit caloporteur a/complet avec instrumentation b/Sens direct : configuration  $\alpha$  c/Sens inverse : configuration  $\beta$  d/Configuration avec by-pass de la pile

Pour les nouvelles stratégies, la première consiste à faire alterner symétriquement l'écoulement de liquide caloporteur à travers la pile à combustible en commandant les électrovannes à 3 voies. Le liquide de refroidissement circule dans le sens direct pendant la durée  $d_\alpha$ , et dans le sens inverse pendant la durée égale  $d_\beta$ . Cette stratégie est notée « alt. ». La fréquence étudiée est de 0,0625 Hz pour permettre à un volume significatif de liquide de sortir de la pile à combustible. La deuxième stratégie consiste à insérer une phase sans écoulement entre les étapes où l'écoulement du fluide est alterné. Ceci est pratiquement réalisé en réalisant temporairement un by-pass de la pile à combustible (Figure 3d). La stratégie est caractérisée par le rapport entre la durée de l'étape d'arrêt et la durée de toute la période. Ce rapport est appelé « rapport stop » et la stratégie est notée « alt&stop ».

## 2.4. Evaluation des performances

L'évaluation de la performance des stratégies est évaluée par l'analyse de :

- la valeur de l'augmentation de la température dans des conditions données,
- l'homogénéité horizontale en température déterminée par la valeur de l'écart type sur les températures entre les cellules à la fin du chauffage,
- l'homogénéité verticale au sein d'une cellule déterminée par la différence entre les valeurs moyennes des températures entrée et sortie pendant la phase de chauffage.

## 2.5. Protocole d'essais

Le protocole d'essais est le suivant :

- Etape 1 : Démarrage de la pompe en mode unidirectionnel (sauf essai sans débit)
- Etape 2 : Démarrage des modes en écoulement alterné le cas échéant

- Étape 3 : Alimentation d'un ou plusieurs films chauffants pour une durée fixe de 85 s
  - Etape 4 : Refroidissement.
- La température initiale est la température ambiante à environ 22°C.

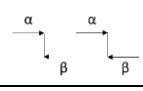
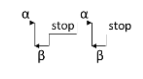
Nom stratégie	Description	Commande
Sans débit	Aucune circulation de fluide dans le circuit	
Unidir	Écoulement unidirectionnel en sens direct 0.7 l/min	$\xrightarrow{\alpha}$
Alt	Écoulement alterné dans la pile à combustible, chaque sens de durée $d$ égale $d_{\alpha} = d_{\beta} = \frac{d_{\alpha} + d_{\beta}}{2}; \text{fréquence } 0.0625 \text{ Hz}$	
Alt&Stop	Écoulement alterné incluant des phases d'arrêt, by-pass de la pile à combustible $\text{Rapport\_Stop} = \frac{d_{\text{stop}}}{d_{\alpha} + d_{\beta} + d_{\text{stop}}}$ avec $d_{\alpha} = d_{\beta}$ ; fréquence 0.0625 Hz	

Tableau 1 : Description des stratégies de commande du circuit caloporteur

### 3. Résultats

#### 3.1. Essais de références

Lorsqu'il n'y a pas de débit de refroidissement dans la pile (Figure 4a), nous constatons lorsque les 3 cellules sont chauffées une augmentation importante de température (37,6°C en moyenne) après 85s. L'homogénéité en température entre les cellules est faible avec un écart type à 7,5°C, l'homogénéité verticale calculée est bonne avec un écart de 1,2°C maximum. La dissymétrie entre le côté cathode K et le côté anode A est responsable de l'écart de température entre les cellules K et A. La cellule K est en effet celle où la résistance thermique vers l'ambiance est la plus faible (Figure 1). Pour les essais où les cellules sont chauffées individuellement, nous observons que les cellules chauffées présentent une élévation de température importante. Lorsqu'une seule des cellules est chauffée, nous observons logiquement que la cellule centrale M est celle dont l'augmentation de température est la plus forte. Une partie de la puissance thermique est alors transmise par conduction aux cellules adjacentes A et K permettant une élévation de température de 8,7°C et 2,8°C respectivement. Lorsque les cellules A et K sont chauffées individuellement, une partie de la puissance est également transmise à la cellule M.

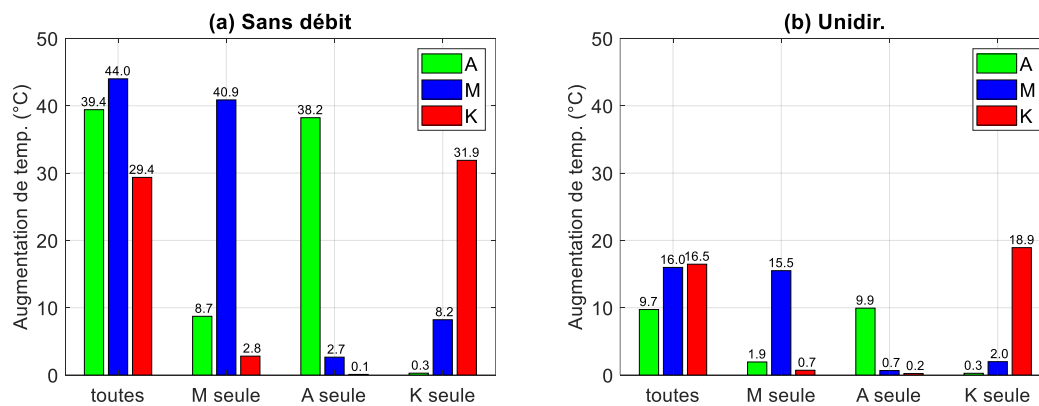


Figure 4 : Essais de référence : sans débit et débit unidirectionnel

Dans le cas où le liquide caloporteur circule dans le sens direct (Figure 4b), lorsque toutes les cellules sont chauffées l'élévation de température est bien entendu nettement plus faible à 14,1 °C en moyenne et l'homogénéité horizontale est meilleure avec un écart type de 3,6°C. En revanche, l'homogénéité verticale est dégradée, on calcule un écart de 5,5°C. Chauffées séparément, l'élévation de température des cellules a un impact très faible sur les cellules adjacentes avec des augmentations maximales de températures à 2°C.

## 3.2. Essais de nouvelles stratégies

### 3.2.1. Résultats détaillés d'un essai stratégie « alt », cellule M chauffée seule

Nous commençons par une analyse détaillée d'un essai en écoulement alterné sans phase d'arrêt, la cellule M étant chauffée seule. La même quantité de liquide caloporteur circule donc dans la pile à combustible chaque demi-période, mais en sens inverse. L'élévation de température des films chauffants, les températures à l'entrée et la sortie de la pile à combustible, la puissance  $P_{ow}$  appliquée et la densité de flux thermique  $HF_A$  et  $HF_B$  mesurée sur les plaques d'extrémité sont tracées en Figure 5a. Les températures à l'entrée et à la sortie de la pile à combustible  $T_{FC,in}$  et  $T_{FC,out}$ , présentent des oscillations dues au changement de sens de l'écoulement. En moyenne, ces températures augmentent en raison de la puissance électrique  $P_{ow}$  appliquée. Nous observons par conséquent une nette élévation de température au niveau du film chauffant de la cellule M. Les températures des cellules A et K augmentent également légèrement. Les oscillations de température due à l'écoulement alterné sont clairement visibles au niveau de l'entrée et sortie des canaux de la cellule M (Figure 5b), mais aussi des canaux des deux autres cellules. Ainsi, le liquide chauffé au niveau de la cellule M se mélange au liquide issu des deux autres cellules, puis est injecté à nouveau dans la pile dans la demi-période suivante. Par conséquent, la chaleur produite au niveau de la cellule M est transmise aux cellules A et K par convection également. La différence de température moyenne (Figure 5c) entre les parties supérieure et inférieure des cellules est faible, l'homogénéité verticale est bonne avec un écart de seulement 0,3°C. La pression différentielle entre l'entrée et la sortie du liquide caloporteur (Figure 5d) change de signe lorsque l'écoulement s'inverse. Le débit dans la pompe  $Q_{cor}$  est presque constant, mais les oscillations ont un impact sur sa valeur. Dans la pile à combustible, la mesure du débitmètre à ultrasons  $Q_{us}$  varie entre 0 et la valeur maximale car il ne fonctionne que dans le sens de l'écoulement direct. À 97 s, l'écoulement alterné est arrêté et un écoulement unidirectionnel est appliqué.

### 3.2.2. Analyse synthétique des essais

L'élévation de température obtenue par les nouvelles stratégies est comparée à celle obtenue pour les essais de référence sur la Figure 6a, b et c pour des essais où les cellules A, M et K sont chauffées seules respectivement. Nous observons que les nouvelles stratégies présentent une élévation de température intermédiaire entre les essais de référence. Par ordre décroissant d'élévation en température, on relève les essais sans débit, « alt&stop », « alt » puis « unidir ». Nous observons de plus que ces stratégies en écoulement alterné permettent de transmettre la puissance thermique produite au niveau d'une cellule aux cellules adjacentes. On relève une augmentation de température de 5,6°C et 2,7°C sur les cellules A et K respectivement lorsque la cellule M est chauffée en stratégie « alt&stop ». Ainsi, en fonctionnement réel, l'écoulement alterné contribuerait à maintenir une homogénéité de température dans la pile dans le cas où cellule aurait une température plus faible. L'homogénéité verticale est bonne (Figure 6d).

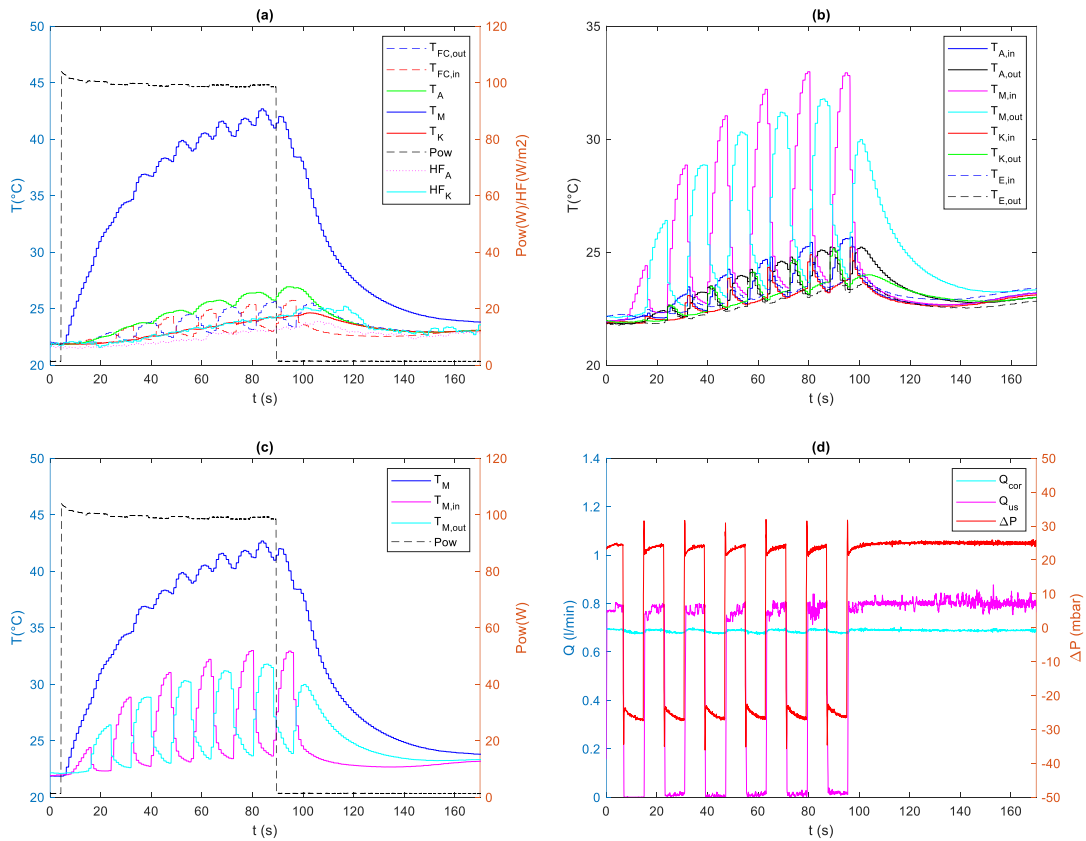


Figure 5 : Essai écoulement alterné chauffage cellule M seule

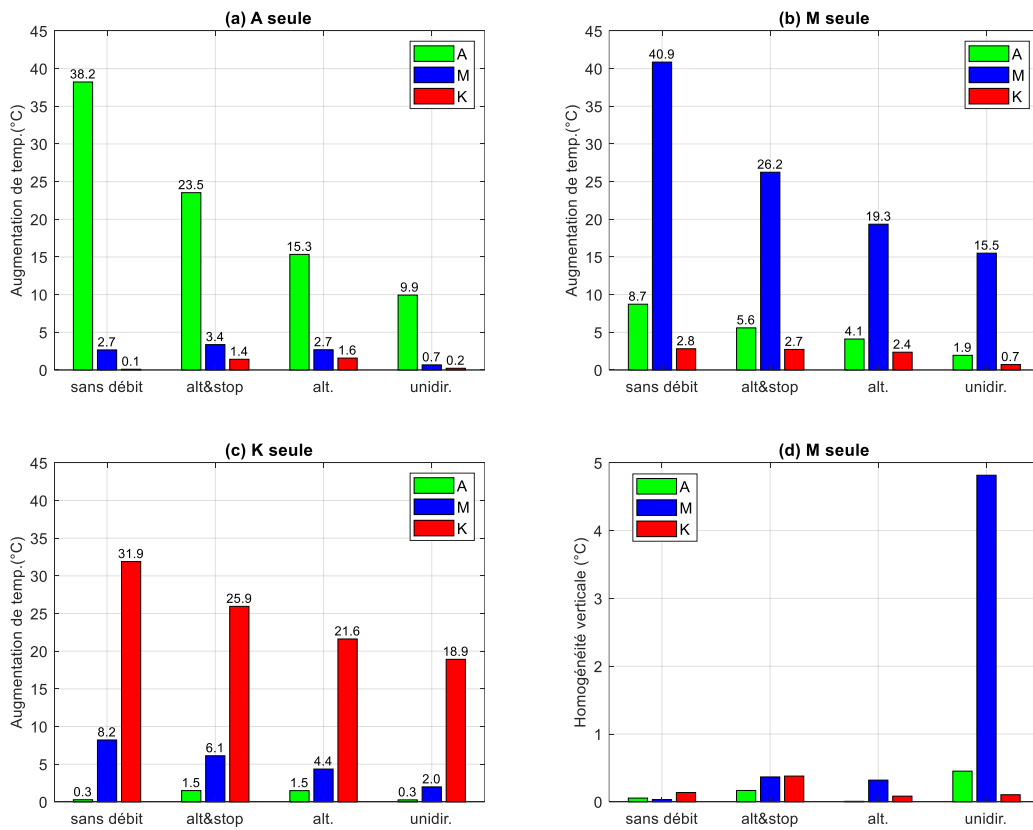


Figure 6 : Comparaison des nouvelles stratégies aux stratégies de référence

## 4. Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié expérimentalement une méthode originale permettant le chauffage rapide d'une pile à combustible. La méthode est basée sur l'application d'un écoulement alterné incluant ou non des phases d'arrêt. Nous avons montré que cette méthode permet à la fois le chauffage rapide, le maintien d'une homogénéité en température dans entre les cellules et au sein même d'une cellule. Nous avons également montré que ces stratégies permettent d'utiliser une partie de la puissance thermique d'une cellule pour augmenter la température des cellules adjacentes. Ces propriétés ouvrent des perspectives d'application en fonctionnement réel pour assurer des démarrages rapides en condition de gel.

## Références

- [1] A. Ajanovic and R. Haas. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16):10049–10058, 2021. Hydrogen and Fuel Cells.
- [2] Satish G. Kandlikar and Zijie Lu. Thermal management issues in a PEMFC stack : A brief review of current status. *Applied Thermal Engineering*, 29(7):1276–1280, 2009. Selected Papers from the 10th UK National Heat Transfer Conference, Edinburgh, Scotland, September 10-11, 2007.
- [3] Jiamin Xu, Caizhi Zhang, Zhongmin Wan, Xi Chen, Siew Hwa Chan, and Zhengkai Tu. Progress and perspectives of integrated thermal management systems in PEM fuel cell vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155:111908.
- [4] Vincenzo Liso, Mads Pagh Nielsen, Soren Knudsen Kaer, and Henrik H. Mortensen. Thermal modeling and temperature control of a pem fuel cell system for forklift applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16):8410–8420.
- [5] Siliang Cheng, Chuan Fang, Liangfei Xu, Jianqiu Li, and Minggao Ouyang. Model-based temperature regulation of a PEM fuel cell system on a city bus. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39):13566–13575.
- [6] A. A. Amamou, S. Kelouwani, L. Boulon, and K. Agbossou. A comprehensive review of solutions and strategies for cold start of automotive proton exchange membrane fuel cells. *IEEE Access*, 4:4989–5002, 2016.
- [7] Y. Luo and K. Jiao. Cold start of proton exchange membrane fuel cell. *Progress in Energy and Combustion Science*, 64:29 – 61, 2018.
- [8] Qin Chen, Guobin Zhang, Xuzhong Zhang, Cheng Sun, Kui Jiao, and Yun Wang. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of cooling methods, material properties, and durability. *Applied Energy*, 286:116496, 2021.
- [9] Sylvie Bégot, Sadok Garnit, Xavier Glipe, Fabien Harel, Jean-Marc Le Canut, Patrick Le Gallo, and Eric Pinton. Systeme de refroidissement pour pile a combustible, Patent WO 2012104553.
- [10] Rui Lin, Yike Zhu, Meng Ni, Zhenghua Jiang, Diming Lou, Lihang Han, and Di Zhong. Consistency analysis of polymer electrolyte membrane fuel cell stack during cold start. *Applied Energy*, 241:420–432, 2019.
- [11] Xiaokang Yang, Jiaqi Sun, Shucheng Sun, and Zhigang Shao. An efficient cold start strategy for proton exchange membrane fuel cell stacks. *Journal of Power Sources*, 542:231492, 2022.
- [12] Sylvie Bégot, Fabien Harel, Valérie Lepiller, and Wafa Hafsa Saidouni. A new cooling circuit and its control strategies for the thermal management of PEMFC in rapid startup application, *International Journal of Hydrogen Energy*, accepté pour publication, disponible en ligne 04 Janvier 2023.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la Graduate School EIPHI (contrat ANR-17-EURE-0002) et à la région Bourgogne-Franche-Comté.