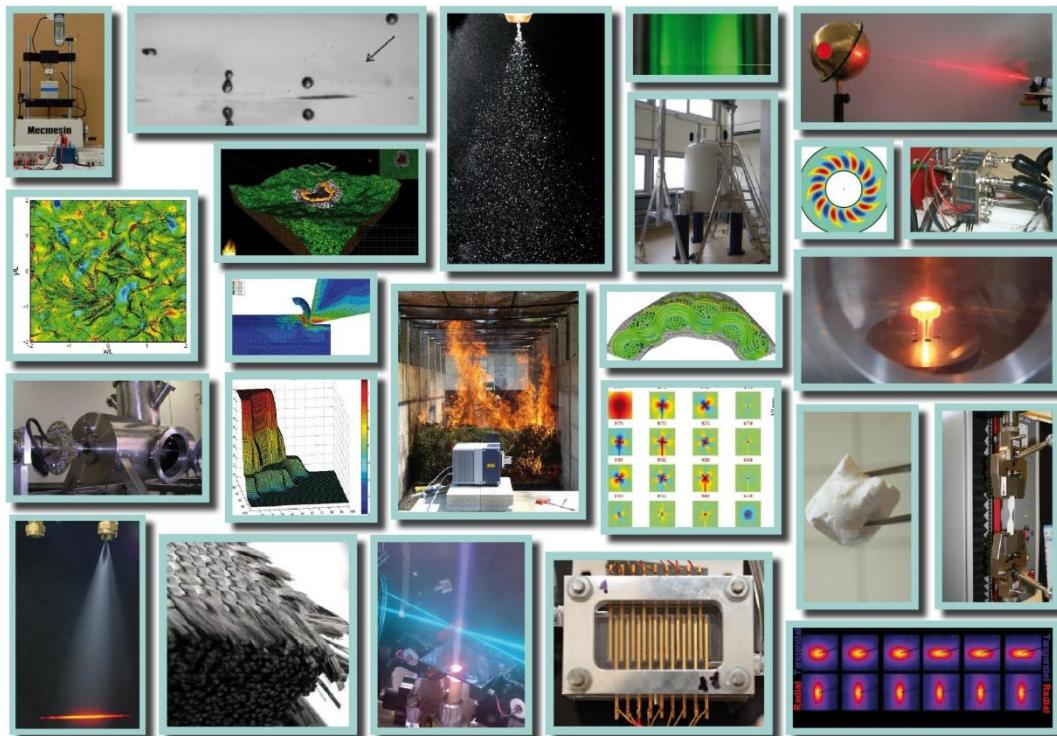


Descriptif succinct des offres de stages type Recherche niveau M2 au LEMTA ou en partenariat avec le LEMTA

Les sujets présentés ci-dessous sont proposés par les groupes de recherche du LEMTA:

- Milieux Fluides, Rhéophysique ;
 - Énergie et Transferts ;
 - Vecteurs énergétiques ;
 - IRM pour l'ingénierie.

Ils sont décrits brièvement et accompagnés des coordonnées de la personne à l'origine du sujet. Cela vous permettra d'en savoir plus si vous êtes intéressés, et de poser votre candidature auprès des personnes concernées.



Année universitaire 2025/2026

Mesure de la distribution de tailles de pores par cryoporométrie RMN

Encadrant(s): **Didier STEMMELEN**, Didier.Stemmelen@univ-lorraine.fr

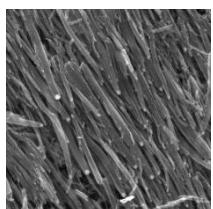
Sébastien LECLERC, Sebastien.Leclerc@univ-lorraine.fr

Domaine : Thermodynamique ; Thermique ; Milieux Poreux ; RMN bas champ.

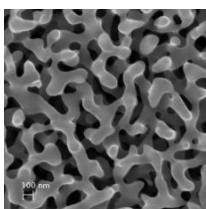
Description

1. Contexte

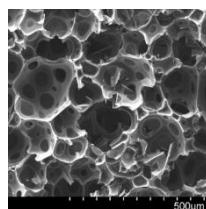
Les matériaux nanoporeux (argiles, silice poreuse, charbons, zéolites, nanotubes de carbone...) sont largement présents dans notre environnement et interviennent dans les domaines de la filtration, du stockage, de la dépollution... Leurs propriétés dépendent étroitement de la géométrie et de la distribution des tailles de pores.



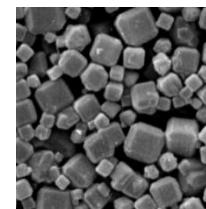
Nanotube de carbone



Verre nanoporeux



Charbon actif



Zéolithe

La taille des pores dans les matériaux micro- ou nanoporeux peut être déterminée par des techniques de microscopie (X- μ CT, MEB, FIB-SEM, imagerie synchrotron) ou par des méthodes plus globales et moins coûteuses, telles que l'intrusion au mercure, l'adsorption de gaz, la relaxation RMN ou encore la cryoporométrie RMN.

La cryoporométrie RMN permet de caractériser les pores de 1 à 100 nm. Elle repose sur la loi de Gibbs-Thomson, selon laquelle la température de fusion d'un liquide diminue lorsqu'il est confiné dans des pores de petite taille. La RMN bas champ, sensible uniquement aux phases liquides, mesure le volume du liquide contenu dans ces pores. En suivant la fonte progressive du liquide lors d'une rampe de température, on détermine la distribution de tailles des nano- pores. Cette distribution peut ensuite être comparée à celle obtenue par relaxation T_2 RMN, qui explore un domaine de tailles plus large (10 nm à 1 mm) à l'aide du même équipement RMN.

2. Travail demandé

L'objectif du stage est de contribuer au développement, au laboratoire, de la méthode de cryoporométrie RMN à l'aide des appareils bas champ disponibles. Elle sera appliquée à des milieux poreux étalons (verre fritté, silicagel, Vycor, nanopoudres...) et à divers fluides (eau, solutions ioniques, cyclohexane, dodécane...). L'étude portera aussi sur les effets de tension interfaciale glace/liquide, déterminants pour l'interprétation des résultats de cryoporométrie.

3. Références

- J.H. Strange, M. Rahman, E.G. Smith; Characterization of porous solids by NMR. *Phys. Rew. Lett.* V.71, n°21 (1993).
- J. Mitchell, J.B. Webber, J.H. Strange; Nuclear magnetic resonance cryoporometry. *Phys. Reports* 461, 1-36 (2008).
- O.V. Petrov, I. Furo ; NMR cryoporometry : principles, applications and potential. *Progress in NMR Spectroscopy* 54, pp. 97-122 (2009).

Ecoulements à bulles observés par IRM

Encadrant(s): [Didier STEMMELEN, Didier.Stemmelen@univ-lorraine.fr](mailto:Didier.Stemmelen@univ-lorraine.fr)

[Sébastien LECLERC, Sebastien.Leclerc@univ-lorraine.fr](mailto:Sebastien.Leclerc@univ-lorraine.fr)

Domaine : Mécanique des fluides ; Ecoulements diphasiques ; IRM ; Traitement d'images

Description

1. Contexte

L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) est une technique de visualisation utilisée depuis longtemps dans le domaine médical, et à présent de plus en plus appliquée à l'étude des écoulements de fluides. Au LEMTA, en collaboration avec EDF, des recherches en cours visent à évaluer le potentiel des techniques d'IRM pour caractériser des écoulements à bulles dans des géométries complexes. Nous nous intéressons notamment à des écoulements représentatifs de ceux présents au cœur des réacteurs nucléaires : un écoulement diphasique liquide-gaz, à bulles dispersées, vertical ascendant dans un faisceau de tubes parallèles. L'objectif est de produire des données expérimentales pour valider des codes CFD en diphasique.

2. Travail demandé

L'objectif du stage est de participer aux campagnes de mesures réalisées sur la boucle ROMANE (RésOnance MAgnétique Nucléaire d'Ecoulements diphasiques), qui traverse un spectromètre RMN doté d'un système d'imagerie à haute résolution. La géométrie étudiée correspond à un sous-canal vertical délimité par 4 tubes de dimensions comparables à ceux d'un réacteur nucléaire. Le programme prévoit en particulier de tester un nouvel injecteur capable de générer des trains de bulles. Une première partie importante du travail consistera à traiter les données IRM, assimilables à du traitement d'images, à l'aide des logiciels Matlab ou Python. Viendra ensuite une interprétation des résultats en termes de vitesse, de taux de vide et de taille des bulles.



Photo de la boucle ROMANE traversant un spectromètre RMN

3. Références

- B. Oesterlé ; Ecoulements multiphasiques, *Hermes-Science* 219 p. (2006).
- P. T. Callaghan, Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy, *Oxford*, 490 pp. (1994).
- L.F. Gladden et al. Dynamic MR imaging of single- and two-phase flows, *Chem. Eng. Res. Design* 84 (2006) 272–281.
- A. Oliveira, D. Stemmelen, S. Leclerc, T. Glantz, A. Labergue, G. Repetto and M. Gradeck, Velocity field and flow redistribution in a ballooned 7x7 fuel bundle measured by magnetic resonance velocimetry, *Nuclear Engineering and Design*, 369, pp.110828 (2020).

Détermination des propriétés de transport de la couche poreuse (PTL) dans les électrolyseurs PEM

Encadrant(s) : [Tien Dung Le, tien-dung.le@univ-lorraine.fr](mailto:tien-dung.le@univ-lorraine.fr)

[Christophe Morlot, christophe.morlot@univ-lorraine.fr](mailto:christophe.morlot@univ-lorraine.fr)

[Gaël Maranzana, gael.maranzana@univ-lorraine.fr](mailto:gael.maranzana@univ-lorraine.fr)

Domaine : Électrolyseurs PEM, PTL, tomographie aux rayons X, propriétés de transport

Descriptif

1. Contexte

La technologie d'électrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons (PEMW) présente un fort potentiel grâce à sa flexibilité et à sa réponse rapide aux variations de charge. Cependant, sa mise en œuvre à grande échelle industrielle se heurte encore à des défis importants, notamment en termes d'efficacité et de durabilité [1]. Certaines limitations sont liées aux phénomènes de transport de masse et de transfert de charge au sein des matériaux poreux. Une alimentation en eau insuffisante de la couche catalytique anodique, souvent causée par une évacuation incomplète de l'oxygène, conduit à des surtensions élevées et à une diminution des performances du dispositif. La couche poreuse de transport (PTL) joue un rôle crucial dans le fonctionnement du PEMWE : elle assure la conduction électronique depuis la couche catalytique, l'alimentation en eau des sites de réaction et l'évacuation de l'oxygène produit. L'efficacité de ces processus de transport au sein de la PTL dépend fortement de ses caractéristiques microstructurales. Par exemple, des PTL présentant des pores de plus grande taille peuvent améliorer le transport de l'eau et des gaz, mais augmenter la résistance électrique. À l'inverse, des pores plus fins réduisent la résistance mais peuvent freiner le transport des fluides [1], [2]. Ainsi, la compréhension de la relation entre la microstructure de la PTL et ses propriétés de transport est essentielle pour optimiser les performances du dispositif et faire progresser la technologie PEMWE.

2. Travail proposé

Ce stage a pour objectif de caractériser plusieurs couches poreuses de transport (PTL) commerciales présentant des microstructures différentes. La tomographie aux rayons X sera utilisée afin d'obtenir des images 3D de ces matériaux poreux. Ces images seront ensuite traitées et segmentées à l'aide du logiciel Avizo afin de distinguer les phases solide et poreuse. À cette étape, les principaux paramètres structuraux, tels que la porosité et la connectivité des PTL, seront déterminés.

Les images 3D segmentées seront ensuite utilisées pour calculer différentes propriétés de transport, notamment le coefficient de diffusion effectif, la perméabilité, la perméabilité relative et la courbe de pression capillaire. Ces simulations seront réalisées à l'aide du logiciel GeoDict. Les résultats obtenus fourniront des informations précieuses sur l'efficacité des transports au sein de ces matériaux poreux.

3. Références

- [1] J. Parra-Restrepo *et al.*, Influence of the porous transport layer properties on the mass and charge transfer in a segmented PEM electrolyzer, *Int. J. Hydrog. Energy*, 45, 8094-8106 (2020).
- [2] B. Amoury *et al.*, Experimental study of gas invasion mechanism in the porous transport layer of a PEM electrolyzer, *Transport in Porous Media*, 152:16 (2025).

Caractérisation des transferts de chaleur à la paroi lors d'un refroidissement par spray

Encadrant(s) : Ophélie CABALLINA, ophelie.caballina@univ-lorraine.fr

Guillaume CASTANET, guillaume.castanet@univ-lorraine.fr

Domaine : transfert de chaleur aux interfaces, efficacité énergétique, thermographie infra-rouge

Descriptif

1. Contexte

Les dispositifs électroniques (data centers, IA, électromobilité, aéronautique, médical, ...) et les systèmes de conversion d'énergie dans les industries (solaire, nucléaire, moteurs électriques...) connaissent une expansion exponentielle. Cependant, ils sont confrontés à un défi majeur : la chaleur qui perturbe leur bon fonctionnement et affecte leurs performances¹⁻². Ces systèmes nécessitent donc un refroidissement efficace, d'autant plus crucial que les besoins en puissance de refroidissement devraient dépasser les 1000 W/cm² dans un avenir proche, contre seulement 10 à 100 W/cm² actuellement³. Parmi les limitations actuelles, l'extraction de la chaleur est souvent éloignée de la source de chaleur. De plus, seule la convection forcée est exploitée alors qu'il faudrait se tourner vers l'ébullition d'un liquide pour renforcer le refroidissement avec la chaleur latente de vaporisation. Ce projet s'inscrit dans une démarche de recherche visant à développer une solution de refroidissement plus performante par contact direct, en pulvérisant le liquide de refroidissement (comme l'eau) sous forme d'un spray de fines gouttelettes directement sur la surface à refroidir. Par ailleurs, pour intensifier l'efficacité du refroidissement, les propriétés de la surface solide d'échange peuvent être optimisées à travers une texturation et le choix d'un matériau adapté.

2. Travail proposé

Pour caractériser expérimentalement les transferts de chaleur à la paroi, nous avons équipé des bancs de mesure permettant d'observer le refroidissement dans des configurations de complexité croissante : goutte individuelle, groupe de gouttes, et enfin spray (Figure 1)⁴⁻⁵. À chaque étape, les mesures ont pour objectif de déterminer l'évolution temporelle de la température de la paroi, afin de remonter au flux de chaleur extrait par les gouttes et ainsi évaluer l'efficacité du refroidissement. La caractérisation peut être réalisée par **thermographie infrarouge (TIR)**, offrant une résolution à la fois spatiale et temporelle, dans les cas de gouttes individuelles ou multiples (Figure 2)⁵. On peut y associer, pour ces deux configurations, des observations en vue de côté par **imagerie rapide en ombroscopie** pour relier la déformation de la goutte aux phénomènes thermiques (Figure 2).



Figure 1 : Configurations d'étude de l'impact de gouttes sur surface chauffée disponibles pour le travail à réaliser dans le cadre du stage.

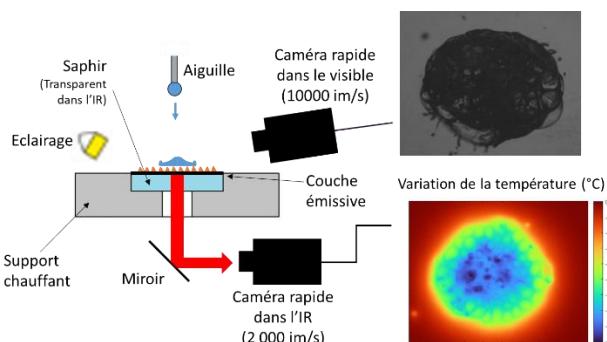


Figure 2 : Mesure du flux de chaleur par thermographie infrarouge⁵

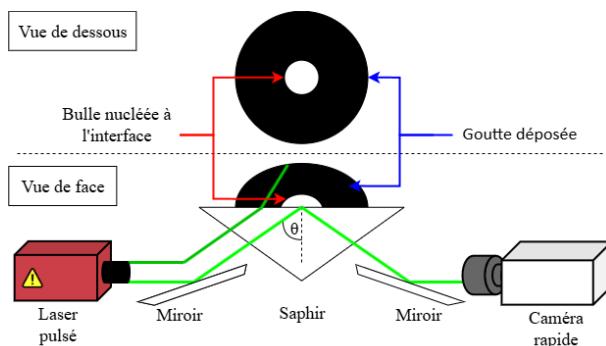


Figure 3 : Mesure de la surface mouillée par une technique optique de réflexion interne totale.

En complément de la thermographie infrarouge et de l'ombroscopie, la méthode de visualisation par réflexion totale interne (RTI) peut être mise en œuvre lorsque la paroi est transparente (par exemple en saphir). Cette technique repose sur la différence d'indice optique entre la paroi et le liquide. Lorsque la surface est sèche, la lumière incidente est totalement réfléchie, tandis que la présence d'un film liquide modifie localement l'indice optique et rompt la condition de réflexion totale, entraînant la disparition du signal réfléchi. L'analyse des images obtenues permet ainsi de cartographier et de quantifier les zones mouillées à la surface de la paroi (Figure 3).

Dans le cadre de ce stage, Le flux de chaleur extrait à la paroi sera mesuré en fonction des paramètres d'impact (taille et vitesse des gouttes), de la température de la paroi et de la nature des surfaces (lisse ou texturée) dans le cas d'une goutte individuelle. L'objectif est d'évaluer l'influence de ces paramètres sur l'efficacité du refroidissement.

Les images obtenues par ombroscopie et par thermographie infrarouge (TIR) viendront compléter les mesures obtenues par la méthode de réflexion interne totale (RIT) afin de mettre en évidence les couplages entre la dynamique d'étalement des gouttes et le transfert de chaleur à la paroi.

Les expérimentations pourront être ensuite étendues à un ensemble de gouttes, où les interactions lors de l'étalement sont susceptibles de modifier l'efficacité du refroidissement.

Ces mesures contribueront à l'enrichissement de la base de données expérimentales, dans la continuité des travaux de thèse de Thomas Potaufeux, dont la soutenance est prévue le 17 décembre 2025.

3. Références

¹ Z Zhang et al., A review of the state-of-the-art in electronic cooling, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy 1 (2021) 100009

² Huan Chen et al., Application status and prospect of spray cooling in electronics and energy conversion industries, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52(2022) 102181.

³ J. Yin et al, Spray Cooling as a High-Efficient Thermal Management Solution: A Review. *Energies* **2022**, *15*, 8547.

⁴ G. Castanet et al., The Leidenfrost transition of water droplets impinging onto a superheated surface, *Int. J. Heat Mass Transf.* **160** (2020) 120126.

⁵ W. Chaze et al., Heat flux reconstruction by inversion of experimental infrared temperature measurements – Application to the impact of a droplet in the film boiling regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (128) : 469-478, 2019.

Peintures thermosensibles pour l'étude des transferts de chaleur à l'interface liquide-surface

Encadrants :

- **Guillaume Castanet** (LEMTA, Nancy), guillaume.castanet@univ-lorraine.fr
- **Thomas Potauféoux** (LEMTA, Nancy), thomas.potauféoux@univ-lorraine.fr
- **Mehdi Stiti** (IMFT, Toulouse), mehdi.stiti@imft.fr
- **Thierry Czerwic** (IJL, Nancy), thierry.czerwic@univ-lorraine.fr

Domaine :

Transfert de chaleur aux interfaces, thermographie, spectroscopie, revêtements luminescents

1. Contexte

La mesure locale de la température de surface reste aujourd’hui un défi expérimental important dans de nombreux domaines scientifiques et industriels. La thermographie infrarouge est souvent considérée comme la méthode de référence, mais elle atteint vite ses limites lorsque les phénomènes étudiés sont rapides et se produisent à basse ou moyenne température.

C'est notamment le cas pour l'impact de gouttes ou le ruissellement de films liquides sur des surfaces froides ou modérément chauffées. Ces situations sont pourtant très fréquentes, aussi bien dans la nature que dans de nombreux procédés industriels, par exemple le refroidissement par spray, la condensation ou encore le dégivrage. Les mécanismes de transfert de chaleur associés à ces phénomènes restent cependant encore mal connus.

Les peintures thermosensibles (Temperature-Sensitive Paints, TSPs) offrent une piste prometteuse pour cartographier sans contact la température de surface avec une grande précision spatiale. Elles sont constituées de colorants luminescents dont les propriétés d'émission (intensité, longueur d'onde, durée de vie) dépendent de la température. Leur utilisation reste toutefois limitée par plusieurs contraintes : la fragilité des peintures, leur vieillissement dans des environnements contraignants (humidité, givrage, gradients thermiques rapides) et la difficulté à obtenir des couches fines et homogènes, présentant une faible résistance thermique.

2. Travail proposé

L'objectif principal de ce stage est de développer et de caractériser des peintures thermosensibles capables de mesurer les transferts de chaleur mis en jeu lors de l'impact de gouttes et du ruissellement de films liquides. Ces développements visent, à plus long terme, des applications dans l'étude du givrage en aéronautique.

Le stage portera sur la formulation, le dépôt et la caractérisation de peintures thermosensibles luminescentes. Dans un premier temps, il s'agira de concevoir et tester différentes formulations en faisant varier à la fois le colorant luminescent (luminophore) et la matrice polymère utilisée. Une attention particulière sera portée à la bonne dispersion du colorant et à l'obtention d'un film de peinture uniforme et homogène. Chaque formulation sera ensuite caractérisée expérimentalement afin de déterminer :

- la variation du signal luminescent en fonction de la température,
- le spectre d'émission et la sensibilité thermique,
- ainsi que l'intensité du signal et les longueurs d'onde d'excitation les plus efficaces.

Une couche protectrice sera ensuite étudiée afin d'améliorer la durabilité du revêtement et de permettre des mesures optiques à travers des substrats transparents, comme illustré à la figure 1.

Ce travail sera mené en collaboration avec l'IJL et l'IMFT, partenaires du projet, qui apporteront leur expertise dans différentes techniques de dépôt, telles que le spin coating ou le tirage de couche à la barrette, permettant de réaliser des couches minces, homogènes et bien contrôlées.

Enfin, les formulations les plus prometteuses seront testées dans des conditions thermiques représentatives, comme l'évaporation d'une goutte sessile ou l'impact d'une goutte sur une surface froide – des cas de référence fréquemment étudiés dans la littérature (voir figure 2).

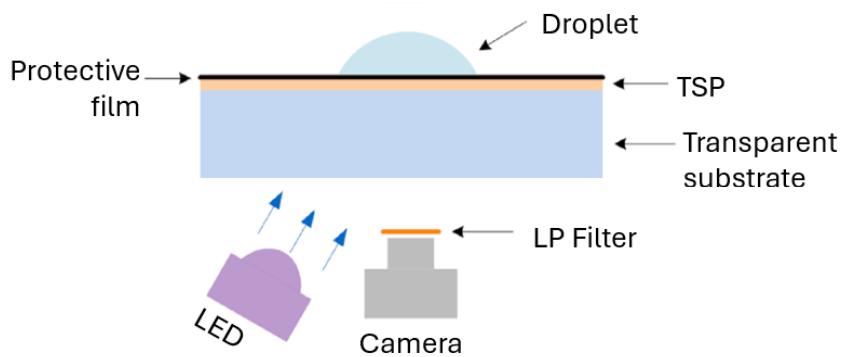


Figure 1 : Illustration du dispositif expérimental pour la mesure de la température de surface sous une goutte.

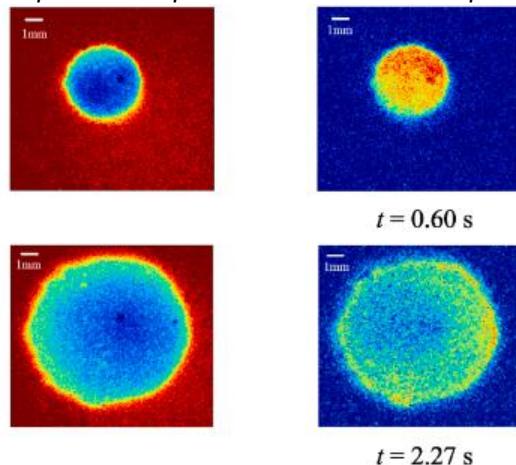


Figure 2 : Exemple d'images de température obtenues lors de l'évaporation d'une goutte de HFE-7100, un liquide de refroidissement couramment utilisé pour les systèmes électroniques [1].

3. Référence :

Lu Liu, Kaiqi Zhang, Haiyan Liu, Shulei Zhang, Menglong Mi, *Experimental study on the interfacial heat transfer of sessile droplet evaporation using temperature-sensitive paint*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 128, 2021, 110436. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110436>

Effets des transitoires de courant sur les performances et la durée de vie des piles à combustibles type PEM

Encadrants : [Julia Mainka, julia.mainka@univ-lorraine.fr](mailto:julia.mainka@univ-lorraine.fr)

[Fabien Harel, fabien.harel@univ-eiffel.fr](mailto:fabien.harel@univ-eiffel.fr)

Domaine/nature : piles à combustible, électrochimie, étude bibliographique, modélisation, simulation numérique, mesures expérimentales

Descriptif

1. Contexte

Les effets de l'application de forts transitoires de courant ou « courts circuits » (SC) aux bornes d'une pile à combustible en fonctionnement sont peu documentés ou du moins sujet à interprétations diverses [1-6]. C'est pourtant une technique utilisée depuis de nombreuses années par plusieurs constructeurs de piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) à cathode ouverte de faible puissance dans le but d'améliorer leurs performances. Au-delà d'un brevet déposé par Ballard sur le sujet [7], seules quelques publications scientifiques font état d'explications diverses entre humidification des membranes et désoxydation du catalyseur pour expliquer l'amélioration des performances constatées [1,2,5].

Ce sujet de projet s'inscrit dans le contexte d'une collaboration entre les laboratoires FEMTO-ST et LEMTA menés depuis 2023 qui vise à mettre en évidence les phénomènes physiques en jeu, et plus précisément dans le cadre du projet FCLAB ESCAPADE en cours. Les travaux précédents ont permis de caractériser de manière systématique l'effet de courts circuits maîtrisés sur les performances d'une pile à combustible de 10 cellules à cathode fermée en fonctionnement et d'étudier les effets en longue durée [8]. Une première approche de modélisation de l'impédance par spectrométrie d'impédance et circuits électriques équivalents (EEC) a permis d'expliquer une partie des phénomènes observés. Les travaux menés en 2025 ont permis d'approfondir l'analyse. Ils portaient sur l'utilisation d'une monocellule de PEMFC couplée à plusieurs techniques de caractérisation électrochimique (EIS, voltamétrie cyclique, courant de perméation H₂) et la mesure haute fréquence des potentiels d'électrode. Ces mesures spécifiques nécessitaient une cellule équipée d'une électrode de référence d'hydrogène (RHE) conçue par le LEMTA associée au générateur SC développé par FEMTO-ST. Ces mesures ont permis d'appréhender plus finement les mécanismes électrochimiques en jeu, notamment d'identifier les temps caractéristiques de la réduction d'oxygène et de diffusion de l'air à la cathode qui jouent un rôle important dans les phénomènes observés. De plus, la mesure des potentiels d'électrodes a permis d'identifier des réactions électrochimiques pouvant avoir un impact sur la dégradation de la pile. Une analyse plus approfondie reste nécessaire pour interpréter complètement la physique des processus en jeu et vérifier les hypothèses émises.

Dans cet objectif, le projet ESCAPADE et le stage visent à identifier de manière systématique les phénomènes de transfert en jeu lors d'application de SC selon le point de fonctionnement (courant, humidification des gaz, pression, température) et la longueur d'un court-circuit [5, 9, 10]. Basé sur ces résultats, un second objectif sera d'étudier l'impact de séquences de SC sur la dégradation des performances de la pile en lien avec celle de ses composants.

2. Travail proposé

Dans un premier temps, il s'agit de se familiariser avec le sujet et de prendre connaissance de l'état de l'art concernant l'impact des courts-circuits et plus généralement du cyclage en potentiel sur la performance et la dégradation des PEMFC en s'appuyant sur la littérature et les travaux précédents. Cela permettra d'interpréter l'impact des courts circuits en termes de phénomènes de transfert dans les composants des piles à combustible.

La deuxième partie du stage portera sur l'étude expérimentale d'une mono-cellule de PEMFC au LEMTA sous sollicitation transitoire de forts courants. Au-delà des performances (courant et tension de cellule), il s'agira de mesurer les potentiels d'électrodes à haute fréquence pendant les phases de sollicitations dynamiques. Ces mesures réalisées sur différents points de fonctionnement de la cellule (courant, humidification des gaz, pression, température) devront permettre d'appréhender plus finement les mécanismes électrochimiques en jeu en fonction des paramètres retenus et notamment d'identifier les possibles dégradations induites. Ces nouvelles caractérisations seront associées à des mesures par spectroscopie d'impédance et une interprétation par EEC [11].

L'étude expérimentale sera accompagnée par une modélisation du comportement d'une PEMFC suite à un court-circuit.

3. Références

1. Jincheol Kim, Dong-Min Kim, Sung-Yug Kim, Suk Woo Nam, Taegyu Kim. Humidification of polymer electrolyte membrane fuel cell using short circuit control for unmanned aerial vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy* – 39, 7925-7930, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.012>
2. Yuedong Zhan, Youguang Guo, Jianguo Zhu, Li Li. Current short circuit implementation for performance improvement and lifetime extension of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* – 270(15), 183-192, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.104>
3. Dianlong Wang, Xinjian Ding, Daijun Yang, Zhimin Liang, Liwei Wang. A novel high current pulse activation method for proton exchange membrane fuel cell. *AIP Advances* – 11, 055004, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0046879>
4. Mahmoud Dhimish, Romênia G. Vieira, Ghadeer Badran. Investigating the stability and degradation of hydrogen PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* – 46, 37017-37028, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.183>
5. Gaurav Gupta, Billy Wu, Simon Mylius, Gregory J. Offer. A systematic study on the use of short circuiting for the improvement of proton exchange membrane fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy* – 42(7), 4320-4327, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.080>
6. Ballard Power Systems Inc. - Cgen®-1020ACS/FCvelocity® -1020ACS Fuel Cell Stack - Product Manual and Integration Guide - MAN5100319-OC – 116, 2014
7. Martin T. Pearson (Ballard Power Systems Inc). Apparatus for improving the performance of a fuel cell electric power system. Patent US 7632583 B2, 2009.
8. Effects of short circuit applications on PEM fuel cell performance and degradation, Fabien Harel, Frederic GUSTIN, Julia MAINKA, Peizhe WU, Journal of Power Sources, Vol. 632, 236348, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236348>
9. Horizon fuel cell technology - H-1000 Fuel Cell Stack User Manual, Manual_FCS-C1000_V1.1_EN – 23, 2013.
10. Steven M. Summer, Shane Nicholson. Abusive Testing of Proton Exchange Membrane Hydrogen Fuel Cells. *U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration - Report DOT/FAA/TC-16/24*, p15-17, 2016.
11. S. Touhami, L. Dubau, J. Mainka, J. Dillet, M. Chatenet, and O. Lottin, “Anode aging in polymer electrolyte membrane fuel Cells I: Anode monitoring by ElectroChemical impedance spectroscopy,” *Journal of power sources*, vol. 481, pp. 228908-, 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228908

Étude des transferts hydriques du bois humide face à une sollicitation thermique.

Encadrants : TERREI Lucas (lucas.terrei@univ-lorraine.fr), PARENT Gilles, ACEM Zoubir, PERRIN Jean-Christophe, LECLERC Sébastien, MORLOT Christophe.

Domaine/nature : transfert hydrique, mesure de température, IRM.

1. Contexte :

En raison de l'augmentation continue de la population, le besoin de construire ou reconstruire des logements ne cesse de s'accroître. La transition écologique et la modernisation des plans urbains conduisent à trouver de nouvelles alternatives concernant les matériaux de construction. Une volonté politique s'est tournée vers l'utilisation du matériau bois dans la construction des bâtiments de grande hauteur, aussi bien d'habitation que de travail. La part de marché de la construction bois s'est ainsi vue doubler dans les quinze dernières années. En revanche, la prédition du comportement au feu du bois lors d'un incendie reste encore des questions qui mobilisent industriels et laboratoires.

Les ingénieurs dimensionnent et conseillent quant à l'utilisation du bois dans la construction principalement sur la base de corrélations empiriques et de normes strictes. En effet, puisque ce matériau est combustible, il peut par conséquent participer à la progression de l'incendie dans un ouvrage et compromettre la tenue de la structure. L'étude de la dégradation du bois sous incendie fait partie des thématiques phare de l'équipe feux du LEMTA qui tente de répondre aux besoins sociétaux d'utilisation de ce matériau dans la construction.

Le travail effectué au sein du LEMTA avec des acteurs de l'incendie ont permis d'établir des réponses sur le comportement au feu du bois à l'échelle du matériau de son inflammation à son extinction en passant par sa dégradation. Les conclusions ont surtout montré que les conditions expérimentales ainsi que l'échantillon étudié pouvaient très fortement influencer les résultats. Les récentes recherches ont pour but de mettre en place un modèle complet de dégradation du bois en trois dimensions couplant la pyrolyse, les transferts de chaleur (impliquant la caractérisation des propriétés thermophysiques : conductivité, Cp, densité... qui varient au cours de la dégradation) ainsi que les transferts de masse (diffusion de l'eau, séchage).

2. Travail proposé :

Les phénomènes qui régissent la dégradation au feu du bois sont nombreux et complexes. Leur prise en compte dans un modèle nécessite une bonne compréhension des différents mécanismes et processus provoquant cette dégradation. Cela passe nécessairement par une mise en évidence expérimentale, de façon couplée ou non, de chacun de ces phénomènes.

C'est dans ce contexte que la personne recrutée pour ce stage s'inscrira afin d'améliorer la compréhension du transfert de l'eau dans le bois pendant une sollicitation thermique. Pour cela, une expérience devra être mise en place afin de disposer un échantillon de bois humide dans une IRM. Cet appareil permet d'observer la distribution d'eau dans des milieux opaques et donc de suivre potentiellement cette distribution au cours du temps. La figure 1 présente un échantillon de bois disposé dans une IRM et séché au cours du temps sous pression. La sollicitation thermique proviendra quant à elle d'un laser CO₂ sur une face. Ces appareils sont déjà disponibles au LEMTA dans l'équipe transverse IRM ainsi que dans l'équipe feux.

Dans un même temps, cette étude passera par une phase importante de bibliographie afin d'établir un plan d'expérience robuste et de participer à la mise en place d'un modèle de transfert hydrique dans le bois. La méthode expérimentale qui sera mise en place devra passer par une phase de validation (faisabilité de la mesure

en fonction des teneurs en eau dans le bois et répétabilité). Cette étude est la suite d'un premier stage de recherche dans cette thématique où des essais préliminaires ont été effectués.



Figure 1 : IRM du séchage sous pression d'un échantillon de sapin douglas
Gauche : état initial, centre : après 30 minutes, droite : après 4h30.

L'étudiant(e) recruté(e) devra faire preuve de curiosité et de connaissances solides dans des thématiques comme les matériaux, les transferts thermiques et hydriques. Ce stage se déroulant entre deux équipes de recherche, l'étudiant(e) devra faire preuve d'organisation dans la planification des expériences (environ une semaine pleine d'expérience par mois avec l'IRM) ainsi que dans le traitement des résultats qui configureront les campagnes d'essai suivantes.

3. Références

- Almeida, G., Leclerc, S., Perre, P. (2008). NMR Imaging of a fluid pathways during drainage of softwood in a pressure membrane chamber. *International journal of multiphase flow*, 34, 312-321
- Boonstra, M. (2008). A two-stage thermal modification of wood (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- Passarini, L., Malveau, C., & Hernández, R. E. (2015). Distribution of the equilibrium moisture content in four hardwoods below fiber saturation point with magnetic resonance microimaging. *Wood Science and Technology*, 49(6), 1251-1268.
- El Hachem, C., Abahri, K., Leclerc, S., Bennacer, R. (2020). NMR and XRD quantification of bound and free water interaction of spruce wood fibers. *Construction and Building Materials*, 260, 120470.
- Cai, C., Javed, M. A., Komulainen, S., Telkki, V. V., Haapala, A., & Heräjärvi, H. (2020). Effect of natural weathering on water absorption and pore size distribution in thermally modified wood determined by nuclear magnetic resonance. *Cellulose*, 27(8), 4235-4247.