

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 2024/2025

Intitulé : Etude du risque de dégradation des réseaux enfouis lors de feux de végétation

Encadrants : Anthony Collin, anthony.collin@univ-lorraine.fr

Lucas Terrei, lucas.terrei@univ-lorraine.fr

Domaine : Transfert de chaleur, approches numérique et expérimentale.

Localisation du stage : LEMTA, Université de Lorraine, site de Brabois, Nancy (Grand-Est, France)

Descriptif

1. Contexte. Initialement, les feux de végétation constituent l'un des régulateurs naturels de nos éco-systèmes qui façonnent et renouvellent nos paysages. Néanmoins, ces incendies sont de plus en plus fréquents et leurs intensités ont tendance à s'amplifier avec le temps. Cette dérégulation contribue de manière négative et importante sur la faune et la flore (disparition de couverts de végétaux endémiques, nuages de fumées et poussières qui parcourent une grande partie du globe) et sur nos sociétés (dommages physiques et financiers, impacts sur la santé des populations exposées).



Figure 1 - Feux de végétation de plus en plus nombreux à travers la planète

L'intensification de ces incendies entraîne la propagation des feux aux zones urbaines et fait apparaître de nouvelles problématiques qui sont celles de la vulnérabilité des interfaces forêt / habitat. Ces espaces sont sensibles car le risque incendie est préoccupant en raison d'une augmentation des sources d'inflammation (déprise agricole, expansion urbaine et sécheresse répétée) et de la vulnérabilité des infrastructures. A titre d'exemple, le feu de « Paradise » en Californie en 2018 a détruit 19 000 structures bâtementaires. En France, l'incendie le plus critique pour les interfaces forêt / habitat est celui de Gonfaron (Var) en 2021, où 50 bâtiments ont été détruits. Si ces structures sont vulnérables, alors elles n'offrent plus de refuges protecteurs pour la population et l'évacuation des zones impactées par l'incendie devient une obligation.



Figure 2 - Réseau aérien de télécommunication détruit en 2021 en Californie

LEMTA

UMR 7563 CNRS - Université de Lorraine
2 avenue de la Forêt de Haye | BP 90161
54505 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex

Dans ce cadre sécuritaire, des nombreuses études sont en cours pour redéfinir les obligations réglementaires pour les habitations qui se trouvent dans ces zones sensibles. Il en va de même pour la sécurisation des réseaux aériens, comme les réseaux électriques et de

Suivez-nous sur :

lemta.univ-lorraine.fr

[linkedin.com/company/laboratoire-lemta](https://www.linkedin.com/company/laboratoire-lemta)

télécommunications. Une solution technique consiste à enfouir les réseaux électriques, comme le réseau d'eau. Cependant, lors d'un violent feu de végétation, ces réseaux peuvent être également impactés, si les conditions thermiques sont extrêmes, par une onde de chaleur qui se propage dans le sol et peut mettre en péril la continuité des services. Ce sujet de stage propose de traiter de cette thématique, de manière expérimentale et numérique, en définissant les conditions sous lesquelles ces réseaux peuvent être impactés.

2. Travail proposé. Deux volets sont proposés dans ce stage pour répondre à la question initiale :

- Une partie expérimentale aura un double objectif : tout d'abord des essais sur terrain permettront de reproduire des feux de végétation (feux de sols). Sous conditions de charge de végétation données (masse par unité de surface), ces tests permettront de définir à quelle densité de flux et sous quelle durée les sols sont impactés par l'incendie. Ensuite, à plus petite échelle, des sols fictifs (non réactifs à l'incendie) de type lit de sable seront exposés sous différentes contraintes thermiques (via des panneaux rayonnants alimentés en gaz) et seront équipés de thermocouples. Ces outils permettront de suivre la propagation du front de chaleur au sein du sol et de définir une distance d'impact des sols en fonction des conditions thermiques en surface. Pour cette dernière partie, il sera nécessaire de développer le banc expérimental dans sa totalité durant le stage.
- Une partie numérique permettra de reproduire numériquement l'exposition d'un sous-sol à des conditions thermiques représentant la contribution d'un feu de végétation. Tout d'abord, en 1 D, le modèle devra être en mesure de reproduire les résultats des essais qui auront été produits à petite échelle. Une seconde étape est attendue en développant ce modèle en 2D voire 3D pour prendre en compte d'éventuels effets de bord.

Ce travail de stage permettra d'initier les travaux de recherche de l'Equipe « Feux » du LEMTA dans le domaine des feux de sous-sols à la fois sur le plan expérimental et numérique. Des collaborations avec l'Equipe « Sol » du LEMTA, ainsi qu'avec le SDIS 54 pour la partie « essais terrain » sont envisageables.

3. Profil recherché. La/Le candidat(e) recherché(e) devra avoir une appétence pour les transferts de chaleur et pour la thématique de l'incendie d'une manière générale. La personne devra être curieuse, dynamique et bonne communicante pour développer ce projet de recherche. Aucune qualification technique particulière (utilisation de thermocouples, ou programmation numérique) n'est demandée initialement et pourra faire l'objet d'une montée en compétences durant le stage.

Intitulé : Simulation numérique de la protection d'une surface à l'aide de sprays

Encadrant(s) : Rabah Mehaddi , rabah.mehaddi@univ-lorraine.fr

Zoubir Acem , zoubir.acem@univ-lorraine.fr

Domaine : mécanique des fluides

1. Descriptif

L'aspersion – terme désignant ici la pulvérisation d'eau pour limiter ou éteindre un incendie – fait partie des moyens de lutte active qui jouent un rôle majeur dans les systèmes de protection. Ces moyens sont variés et dépendent à la fois du scénario du feu ainsi que du type de biens concernés. Toutefois, que ce soit pour protéger un bâtiment ou lutter contre un feu de végétation, l'utilisation de l'aspersion peut être un moyen pour limiter l'incendie, protéger les structures et empêcher la transition du feu vers l'habitat. L'objectif de ce projet est l'évaluation du code de calcul Fire Dynamics Simulator (FDS) pour la simulation des températures attendues sur les surfaces soumises à un refroidissement par pulvérisation. À l'aide de données issues de campagnes expérimentales menées au Laboratoire d'énergie et de mécanique théorique et appliquée (LEMETA), ce projet de recherche analysera différentes orientations de surfaces métalliques chauffées et leur refroidissement par des sprays.



Fig 1 : Exemple d'expériences réalisées au LEMTA

2. Contexte

A l'échelle du laboratoire, il a été montré que l'usage de l'eau est optimal sous forme divisée (gouttelettes) [1]. Les mécanismes d'action sont connus : (1) refroidissement de la flamme en particulier par évaporation, (2) effet d'inertage associé à l'évaporation et à la production de vapeur qui dilue le mélange combustible/oxygène, (3) refroidissement des surfaces par impact et ruissellement avec des effets associés de transfert de chaleur qui peuvent limiter la pyrolyse des surfaces qui alimentent la combustion en gaz combustibles, (4) atténuation du rayonnement de la flamme par phénomènes d'absorption et diffusion par les gouttes, mais aussi (5) impact sur la dynamique des écoulements en lien avec les effets de traînée et d'interaction avec la turbulence. Si ces mécanismes sont bien identifiés, les modèles associés

restent perfectibles, voire sont remis en question pour l'évaporation, la traînée ou les échanges gouttes/parois [2]. Ces effets sont en tout cas mal quantifiés et méritent un travail fondamental pour améliorer leur modélisation et leur prise en compte dans les simulations. Sur un plan applicatif, ce travail amont est nécessaire à la fois pour optimiser les moyens de protection des structures par aspersion, ou pour prévenir la transition des feux de végétation vers l'habitat (Wildland Urban Interface Fires)

3. Travail proposé

L'étudiant commencera son travail de recherche par une étude bibliographique des sous-modèles de pulvérisation, en apprenant à utiliser FDS. Il/elle aidera à la mise en place du banc expérimental (voir illustration sur la figure 2) et à la conduite des expériences.

Il/elle testera une sélection de sous-modèles, évaluant leur capacité à reproduire un spray, leur capacité d'atténuation radiative et leurs propriétés de refroidissement. Il bénéficiera de la plateforme de calcul EXPLOR (cluster de l'Université de Lorraine) pour gérer les temps de calcul élevés attendus. La dernière partie du projet consistera en des simulations en vraie grandeur.

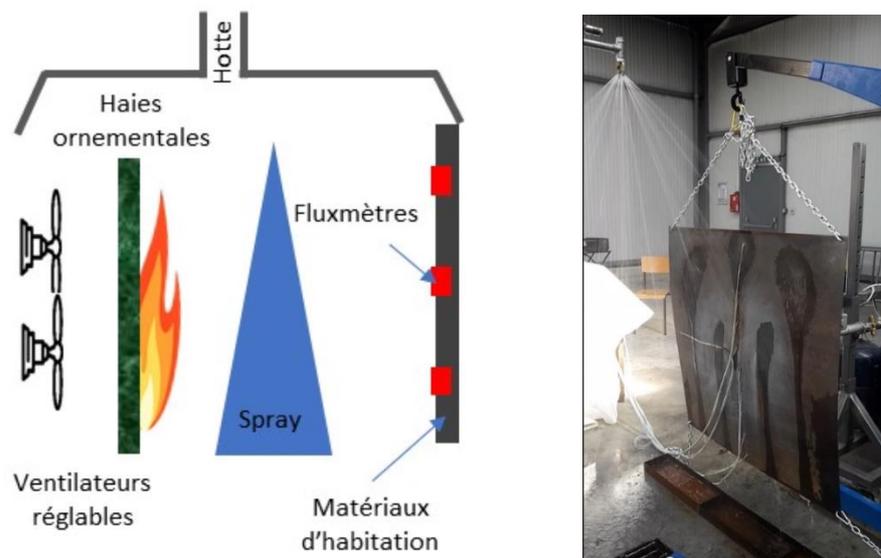


Fig 2 : illustration de la configuration expérimentale qui sera mise en place

4. Références

- [1] P. Boulet et al. Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source. Fire Safety Journal. Vol. 41, Issue 1, February 2006, Pages 15-30
- [2] Y. Liu et al., Numerical analysis of a water mist spray: The importance of various numerical and physical parameters, including the drag force. Fire Safety Journal, Vol. 127 (2022), 103515
- [3] A. Jenft et al. Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist. Fire Safety Journal. Vol. 67, July 2014, Pages 1-12
- [4] G. Parent et al. Radiative shielding effect due to different water sprays used in a real scale application. International Journal of Thermal Sciences. Vol. 105, July 2016, Pages 174-181
- [5] Y. Pérez-Ramirez et al., Numerical characterization of structures heat exposure at WUI, IX International Conference on Forest Fire Research (Coimbra, Portugal 11-18 Nov, 2022)

Intitulé : Conception et tests d'un banc et d'une cellule segmentée Haute Température

Encadrant(s) : Jérôme Dillet, jerome.dillet@univ-lorraine.fr

Olivier Lottin, olivier.lottin@univ-lorraine.fr

Domaine : Pile à combustible à membrane protonique, hydrogène, aéronautique, haute température (160°C)

Descriptif

1. Contexte

Une collaboration entre le LEMTA Laboratoire Énergies & Mécanique Théorique et Appliquée et l'entreprise Safran Power Units vient d'être initiée pour débiter un travail sur les piles à combustible à membrane protonique pouvant fonctionner à haute température (160°C). Traditionnellement, les piles PEMFC avec des membranes fluorées fonctionnent entre 60°C et 90°C. L'augmentation de la température doit permettre de faciliter la gestion de l'eau (suppression de l'humidification des gaz Air-hydrogène en entrée) et de minimiser la taille des systèmes, notamment en facilitant le refroidissement. Pour cela, les piles à combustible utilisent des matériaux différents des assemblages classiques dont on maîtrise moins bien les conditions de fonctionnement locale (leur homogénéité sur l'ensemble de surface active) ainsi que les problématiques de vieillissement.

L'objectif du partenariat vise -sur plusieurs années- à quantifier numériquement et expérimentalement les phénomènes de transfert (matière, charge et chaleur) limitant les performances et ceux responsables des principales dégradations dans les assemblages membrane-électrodes haute température. La membrane PBI (Polybenzimidazole) est imprégnée d'acide phosphorique pour conduire les proton H⁺. Cette dernière subit des dégradations importantes lors des phases d'arrêt-démarrage et d'OCV (open circuit voltage). Il s'agira donc d'imaginer des protocoles d'arrêt-démarrage minimisant les dégradations (membrane et électrodes) sans utilisation de gaz inerte (azote) lors des montées-descentes de la température (température ambiante – 160°C) afin d'éviter la perte d'acide de la membrane et sa dilution dans l'eau liquide présente dans la pile.

2. Travail proposé

L'objectif du stage M2 (5 mois) sera essentiellement expérimental avec la conception et le développement d'une nouvelle cellule segmentée et instrumentée de 50 cm² associée à un banc expérimental compatible avec l'environnement PEM Haute Température (160°C et atmosphère corrosive). En fin de stage, le ou la stagiaire pourra débiter les premiers tests du banc et de la cellule avec des mesures temporelles des performance locales en fonction des conditions de fonctionnement : pression, température, stœchiométrie d'alimentation, recirculation d'hydrogène ou alimentation en mode bouché, co-flux ou contre-flux, ...).

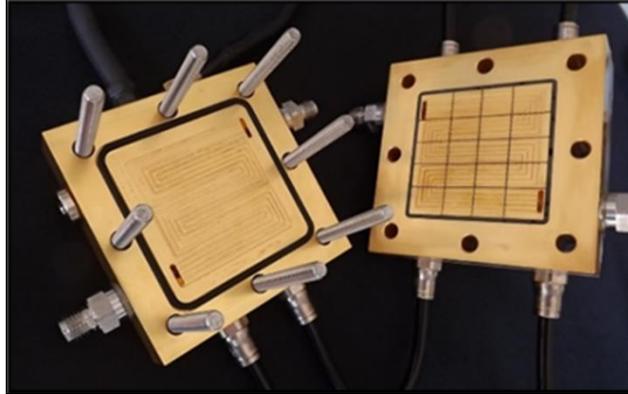


Fig. Cellule segmentée de 25 cm² fabriquée au LEMTA

Le stage s'adresse à tout-e étudiant-e en dernière année d'école d'ingénieur (généraliste ou spécialisé) ou de l'université dans le domaine thermique, mécanique ou électrochimie. De plus, votre parcours de formation et/ou vos précédentes expériences vous permettent d'avoir de bonnes connaissances en instrumentation, en caractérisation et une bonne compréhension de la pile à combustible. Vous rejoindrez au LEMTA une équipe dynamique d'une quinzaine de personnes travaillant dans le domaine de la recherche scientifique de la conversion électrochimique de l'hydrogène. Le stage amènera à des interactions avec l'entreprise Safran Power Units (Toulouse). Safran est un groupe international de haute technologie opérant dans les domaines de l'aéronautique (propulsion, équipements et intérieurs), de l'espace et de la défense.

3. Références

Anode aging in polymer electrolyte membrane fuel Cells I: Anode monitoring by ElectroChemical impedance spectroscopy, S. Touhami et al., Journal of Power Sources, Volume 481, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228908>.

Comparing shut-down strategies for proton exchange membrane fuel cells, A. Oyarce et al., Journal of Power Sources, Volume 254, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.058>.

Étude et optimisation des phases de démarrage et d'arrêt des piles à combustible de type PEM haute température en vue de maximiser leur durée de vie, M . Durand, Thèse 2022

Polybenzimidazole (PBI)-based membranes for fuel cell, water electrolysis and desalination, A. Das et al. Desalination, Volume 579, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117500>.

Intitulé : Convection thermique dans des mousses solides structurées

Encadrant(s) : Nicolò Sgreva, nicolo.sgreva@univ-lorraine.fr
Tien Dung Le, tien-dung.le@univ-lorraine.fr
Christel Métivier, christel.metivier@univ-lorraine.fr

Domaine : Mécanique des fluides, énergie et systèmes thermiques

Descriptif

1. Contexte

La convection thermique dans les milieux poreux est un aspect clé de nombreux phénomènes naturels et applications industrielles, tels que les systèmes d'isolation et de stockage d'énergie thermique. Dans le cas du stockage d'énergie thermique, les milieux poreux peuvent être saturés de matériaux à changement de phase (MCP) pour former des systèmes composites où la chaleur est stockée et libérée efficacement ^[1]. Parmi les milieux poreux les plus utilisés, on trouve les mousses solides à grande porosité, capables de stocker une grande quantité de MCP, offrant un rapport surface/volume élevé et accélérant le processus de fusion. Ces mousses, fabriquées à partir de différents matériaux, possèdent une structure solide généralement aléatoire ou des cellules unitaires avec une géométrie spécifique. Lorsque ces systèmes composites sont soumis à un gradient de température, le transfert de chaleur se fait par conduction et, selon les conditions, par convection. La compétition entre ces mécanismes dépend des propriétés thermiques des matériaux, de la capacité du fluide à circuler entre les pores et du gradient thermique ^[2].

Malgré l'importance de la convection dans ces systèmes, les études détaillant le rôle des propriétés des milieux poreux sur le transfert convectif de chaleur sont encore rares dans la littérature. Cela s'explique en grande partie par la complexité des expériences utilisant les outils conventionnels de visualisation des écoulements. De même, les simulations en dynamique des fluides sont confrontées à divers problèmes thermodynamiques et mécaniques (effets de non-équilibre thermique aux frontières, échelles de pores multiples, etc.).

2. Travail proposé

Nous proposons d'étudier la convection thermique dans une mousse hautement poreuse saturée de fluide à travers des simulations numériques. L'accent sera mis sur une configuration analogue à la convection de Rayleigh-Bénard dans les milieux poreux, caractérisée par un écoulement thermo-convectif combinant des gradients de température et la dynamique des fluides. La première étape consistera à développer un modèle numérique à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (fig. 1), en reproduisant des expériences antérieures menées au LEMTA ^[3] afin de permettre une comparaison directe entre les résultats numériques et expérimentaux. Une fois validé, le modèle sera ajusté pour explorer les effets de diverses propriétés des mousses sur les régimes convectifs transitoires et stationnaires. Nous examinerons l'influence des propriétés thermiques des mousses, telles que la conductivité thermique plus ou moins élevée par rapport au fluide, et l'impact des structures

poruses sur l'écoulement du fluide en raison de la résistance générée près de la matrice poreuse.

Ces simulations fourniront des informations détaillées sur la dynamique des écoulements à l'échelle des pores, afin d'enrichir les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire.

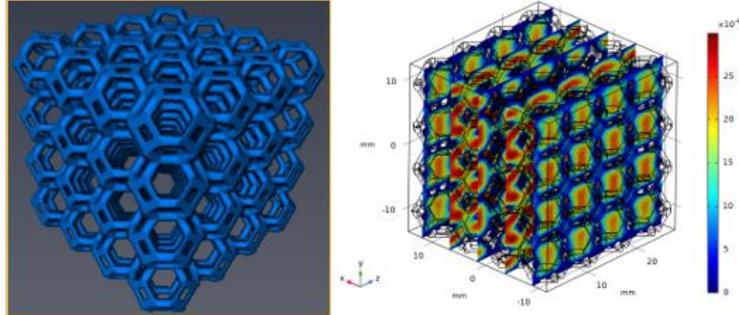


Figure 3: Structured porous foam (left) and local velocity field for Stokes flow induced by a pressure drop (right)

3. Références

- [1] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 615–628.
- [2] S. Gasow, A.V. Kuznetsov, Y. Jin, Prediction of pore-scale-property dependent natural convection in porous media at high Rayleigh numbers, *Int. J. Therm. Sci.* 179 (2022) 107635.
- [3] Sgreva, N. R., Métivier, C., Teixeira, A., Le, T. D., & Leclerc, S. (2024). Experimental velocity and temperature measurements for natural convection in a highly porous medium. *International Journal of Thermal Sciences*, 205, 109257.

Intitulé : Effets des transitoires de courant sur les performances des piles à combustibles type PEM

Encadrants : Julia Mainka, julia.mainka@univ-lorraine.fr

Fabien Harel, 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 » aux bornes d'une pile à combustible en fonctionnement est peu documenté ou du moins sujet à interprétations diverses dans la bibliographie [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.

Ce sujet de projet s'inscrit dans le contexte des travaux que menés dans le cadre des projets FCLAB UPPERCUT (2023) et EDELWEISS (2024) qui visent à mettre en évidence les phénomènes physiques en jeu. Le projet UPPERCUT mené courant 2024 a permis de caractériser de manière systématique l'effet de courts circuits maîtrisés sur les performances d'une pile à combustible à cathode fermée en fonctionnement et d'étudier les effets en longue durée. Une première approche de modélisation de l'impédance par spectrométrie d'impédance et circuits électriques équivalents a permis d'explicitier une partie des phénomènes observés mais une analyse plus profonde paraît nécessaire pour interpréter complètement la physique des processus en jeu et vérifier les hypothèses émises. Pour cela, le projet EDELWEISS qui va se dérouler sur l'année 2025 permettra d'investiguer plus en détail l'effet des courts circuits en s'appuyant sur des techniques de mesure des potentiels d'électrodes pendant les sollicitations transitoires en courant. Au-delà de la compréhension physique, le projet vise à déterminer l'impact d'autres paramètres comme la durée d'un court-circuit [5, 8, 9], ou le mode d'alimentation en air (cathode ouverte ou fermée).

2. Travail proposé

Dans un premier temps, il s'agit de mener une étude bibliographique sur ce qui est connu actuellement sur l'impact des courts-circuits et plus généralement du cyclage en potentiel sur la performance et la dégradation des PEMFC. Une attention particulière portera sur l'identification des potentiels auxquels auront lieux les réactions de corrosion du carbone et du catalyseur. Cela permettra d'interpréter l'impact des courts circuits en termes de réactions dégradantes des matériaux.

La deuxième partie du stage portera sur l'étude expérimentale d'une mono-cellule de PEMFC (LEMTA ou FEMTO-ST, reste à définir) 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 devraient permettre d'appréhender plus finement les mécanismes électrochimiques en jeu, notamment d'identifier les temps de réaction de réduction de l'oxygène dont la constante de temps joue un rôle important dans les phénomènes observés. Ces nouvelles caractérisations seront associées à des mesures par spectroscopie d'impédance et à des simulations par circuits électriques équivalents [10].

L'étude expérimentale sera accompagnée par une modélisation du comportement dynamique en termes de courant et de potentiel d'une PEMFC suite à un court-circuit. La simulation numérique pourra se faire sous Python ou Matlab.

3. Références

1. Jincheol Kim, Dong-Min Kim, Sung-Yug Kim, Suk Woo Nam, Taegy 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 - MAN5100319-0C – 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. Horizon fuel cell technology - H-1000 Fuel Cell Stack User Manual, Manual_FCS-C1000_V1.1_EN – 23, 2013.
9. 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.
10. 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

Intitulé : Gestion de l'écoulement et de l'électrochimie dans les batteries à flux redox

Encadrant(s) : Liang LIU , liang.liu@univ-lorraine.fr (LCPME)

Sophie DIDIERJEAN, sophie.didierjean@univ-lorraine.fr (LEMTA)

Domaine : Énergie, électrochimie, modélisation multiphysique

Descriptif

1. Contexte : Les batteries à flux redox (RFB) sont considérées comme une alternative peu coûteuse pour le stockage stationnaire de l'énergie, ce qui est essentiel pour conserver les énergies renouvelables (éolienne, solaire, etc.) qui sont intermittentes par nature. Le stockage de l'énergie dans les RFBs est réalisé en changeant l'état redox des électrolytes dans les réservoirs, ce qui est régi par des réactions électrochimiques. Pour augmenter la densité de courant pour la charge/décharge du RFB, trois stratégies sont envisagées : (1) Augmenter la cinétique de transfert de charge sur l'électrode. Cela dépend de l'électrolyte et du matériau d'électrode choisis. (2) Augmenter la surface active de l'électrode. On y parvient généralement en utilisant des électrodes poreuses telles que le feutre de carbone. (3) Améliorer le transport de masse de l'électrolyte par la gestion du flux. Il s'agit d'une question clé dans le domaine de la RFB. D'une part, le flux peut accélérer le transport de masse de l'électrolyte pour augmenter la densité du courant de charge/décharge, mais d'autre part, le flux est aussi intrinsèquement une source de perte d'énergie. La pression élevée dans l'écoulement peut également entraîner des problèmes techniques, tels que des fuites d'électrolyte. Il convient de noter que (2) et (3) dépendent de la géométrie de l'électrode, qui revêt manifestement une grande importance dans la conception de la batterie. Le stage s'inscrit dans le cadre du projet PEPR Radical qui vise à concevoir une nouvelle génération de batterie à flux redox organique aqueux pour le stockage des énergies renouvelables. Dans ce contexte, nous disposons également d'un financement de trois ans pour une thèse de doctorat pouvant faire suite à ce projet de Master.

2. Travail proposé : Le travail sera basé sur des simulations numériques des réactions électrochimiques et de l'écoulement. Le déroulement général du stage est le suivant : conception de la géométrie des électrodes → Simulation de l'écoulement par CFD → Simulation des processus électrochimiques avec la cinétique du transfert de charge et le transport de masse à partir de l'écoulement → Validation expérimentale des résultats de la simulation (en étroite collaboration avec les expérimentateurs).

La conception de la géométrie des électrodes peut s'appuyer sur la littérature. Ensuite, des modifications seront apportées en tenant compte de la faisabilité expérimentale. L'écoulement statique sera considéré et la distribution de la vitesse et de la pression sera simulée. Cela peut indiquer la stabilité structurelle de l'électrode, le risque de fuite, ainsi que la consommation d'énergie sur l'écoulement. Les résultats obtenus permettront de simuler le comportement électrochimique et d'obtenir la distribution du courant. Il s'agit d'un autre indicateur important du système, car il peut affecter l'échauffement local et la stabilité du système. Si l'avancement du projet le permet, nous pourrions également envisager la gestion de la chaleur du système.

Les résultats de la modélisation seront validés par impression en 3D des électrodes et leur évaluation dans la batterie, avec le soutien de collègues expérimentateurs. Les interactions entre la conception, la modélisation et les expériences convergeront finalement vers une conception d'électrode optimisée pour la batterie pouvant délivrer une haute densité de courant.

3. Références

F. Zhang, M. Cazot, G. Maranzana, J. Dillet, S. Didierjean, J. Energy Storage 55 (2022) 105704.

V. Feynerol, R. El Hage, M. Brites Helú, V. Fierro, A. Celzard, L. Liu, M. Etienne, Electrochim. Acta 421 (2022) 140373.

Intitulé : 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 infrarouge

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 performances¹⁻³. Ces systèmes nécessitent donc un refroidissement efficace, d'autant plus crucial que les besoins en puissance de refroidissement devraient dépasser les 1000 W/cm^2 dans un avenir proche, contre seulement 10 à 100 W/cm^2 actuellement⁴. 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 sont optimisées à travers une texturation spécifique et le choix d'un matériau adapté⁵⁻⁷.

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. 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, offrant une résolution à la fois spatiale et temporelle, dans les cas de gouttes individuelles ou multiples. Pour le spray, l'analyse s'appuie sur un réseau de thermocouples, disposés stratégiquement en différents points sous la surface de la paroi pour capturer les variations de température.

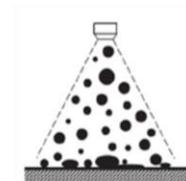
Goutte individuelle



Groupe de gouttes



Spray



Dans le cadre de ce stage, le travail proposé consistera à :

- **Améliorer les bancs expérimentaux** : Le banc dédié à l'étude du groupe de gouttes est en phase de finalisation, tandis que celui du spray est en cours de dimensionnement. Le stagiaire sera chargé de finaliser les dispositifs d'injection, en veillant à leur bon fonctionnement et à leur optimisation pour les expériences.
- **Mener des campagnes de mesures** : 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). L'objectif est d'évaluer l'influence de ces facteurs sur l'efficacité du refroidissement.

3. Références

¹ P GaneshKumar et al., Spray cooling for hydrogen vehicle, electronic devices, solar and building (low temperature) applications: A state-of-art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 189 (2024) 113931

² 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

³ 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.

⁴ J. Yin et al, Spray Cooling as a High-Efficient Thermal Management Solution: A Review. *Energies* **2022**, 15, 8547.

⁵ G. Castanet et al., The Leidenfrost transition of water droplets impinging onto a superheated surface, *Int. J. Heat Mass Transf.* 160 (2020) 120126.

⁶ Y.T. Aksoy et al., Experimental investigation of the influence of nanoparticles on droplet spreading dynamics and heat transfer during early-stage cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science* (149) : 111023, 2023.

⁷ 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.

Intitulé : Optimisation des paramètres opératoires en pile à combustible à membrane échangeuse d'anions (AEMFC)

Encadrant(s) : Feina XU, feina.xu@univ-lorraine.fr

Domaine : Pile à combustible à hydrogène, AEMFC, électrochimie, procédé, matériaux

Descriptif

1. Contexte

Les piles à combustibles à hydrogène, telles que PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) et AEMFC (Anion Exchange Membrane Fuel Cell), sont des systèmes électrochimiques permettant de produire de l'énergie électrique et de l'eau comme sous-produit [1]. Contrairement à la PEMFC, l'AEMFC fonctionne en milieu alcalin et la réaction de réduction de l'oxygène à la cathode nécessite de consommer une molécule d'eau. Bien que l'AEMFC soit encore en cours de recherche et développement, elle offre la possibilité d'utiliser des catalyseurs sans platine et à terme permet une diminution de son coût de production par rapport à la PEMFC.

2. Travail proposé

Afin de mieux appréhender le fonctionnement de l'AEMFC, nous avons besoin d'optimiser les paramètres opératoires de cette pile, soit en modifiant la composition de la couches catalytiques de l'assemble électrode-membrane (AME) et/ou soit en variant les conditions opératoires de la pile AEMFC.

Le ou la candidat(e) de ce stage master 2 sera amené(e) (1) à effectuer des tests en pile avec des AEMs préparés et formulés au LEMTA dans les conditions définies à l'avance et (2) à traiter et analyser les résultats avec Matlab.

Le travail de stage, d'une durée de 6 mois, est basé au LEMTA (UMR 7563) à Nancy.

Profils recherchés :

- Formation Master 2, si possible en génie des procédés, chimie des matériaux ou électrochimie.
- Des connaissances en électrochimie, en procédé et en matériaux catalytiques seraient appréciées.
- Une bonne base en anglais.
- Rigueur, curiosité, esprit critique, travail en équipe, polyvalence, volonté à apprendre

3. Références

[1] : Gutru, Rambabu, Zarina Turtayeva, Feina Xu, Gaël Maranzana, Brigitte Vigolo, et Alexandre Desforges. « A Comprehensive Review on Water Management Strategies and Developments in Anion Exchange Membrane Fuel Cells ». International Journal of Hydrogen Energy 45, n° 38 (juillet 2020): 19642-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.026>.

Intitulé : Imagerie IRM de la distribution d'eau dans des membranes PEMFC - Modélisation et développement d'un résonateur multibrins à 128 MHz.

Encadrant(s) : Laouès Guendouz, laoues.guendouz@univ-lorraine.fr

Jean-Christophe Perrin, jean-christophe.perrin@univ-lorraine.fr

Domaine : Instrumentation radiofréquence, imagerie par résonance magnétique nucléaire

Descriptif

1. Contexte

Au sein de la filière hydrogène, l'utilisation de piles à combustible basse température (PEMFC) est reconnue aujourd'hui comme le mode de conversion présentant la plus grande efficacité et les plus faibles émissions. La recherche fondamentale et technologique est intense dans ce domaine ainsi de nombreuses activités de recherche ont pour but d'augmenter la durée de vie des PEMFC (problème du vieillissement des couches catalytiques ou de la membrane polymère électrolyte). Un verrou réside dans le manque de compréhension des interactions entre les différents modes de transport de l'eau au travers du cœur de pile (diffuseurs poreux, assemblage membrane/électrodes) lors des différents régimes de fonctionnement et pour diverses conditions opératoires. En d'autres termes, les distributions d'eau dans les composants ainsi qu'à leurs interfaces sont mal connues et mal maîtrisées, ce qui peut impacter les performances de la pile et accélérer son vieillissement.

Pour ce qui concerne les PEMFC en général, la façon la plus efficace d'étudier ces modes de transport est la visualisation directe, résolue dans l'espace et le temps, de la distribution d'eau dans le cœur de pile. A l'heure actuelle, seules les techniques de diffusion de rayonnement (RX, neutrons) offrent des résolutions spatiales et temporelles adéquates (~5-10 μm / ~ 1min). Ces méthodes souffrent cependant de leur très grande inaccessibilité car, dans les cas les plus favorables, seule une campagne d'une à deux semaines peut être envisagée par an et par équipe de recherche. L'imagerie par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (IRM) est une méthode envisagée car elle possède l'avantage d'être non intrusive et d'être particulièrement sensible et sélective à l'eau. Seule notre équipe au niveau national [1] et seules 5 autres équipes au niveau international ont par le passé obtenu des résultats portant sur la distribution de l'eau dans une PEMFC en fonctionnement. Les résultats reportés ont tous été obtenus sur des prototypes de pile placés à l'intérieur d'un spectromètre RMN et les méthodes utilisées ont employé une instrumentation standard (non adaptée, ni optimisée pour des échantillons aussi complexes) en termes de sonde RMN, élément central servant à exciter l'aimantation nucléaire de l'échantillon et à recueillir le signal RMN.

Contrairement aux piles PEMFC, pour ce qui est des membranes polymères électrolytes étudiées seules, l'étude des modes de transport par IRM est parfaitement indiquée en raison du comportement diélectrique des membranes et de l'absence de matériaux conducteurs comme des plaques en graphite ou des couches carbonées qui font écran aux signaux radiofréquences (RF). De là, le développement d'une sonde de type planaire entièrement dédiée est parfaitement envisageable, voire recommandé en raison du faible coefficient de remplissage des sondes commerciales pour des échantillons de faible épaisseur.

2. Travail proposé

Dans le contexte évoqué ci-dessus, ce sujet de stage propose de modéliser, d'optimiser et de développer une sonde radiofréquence adaptée à la géométrie des membranes PEMFC. Il repose sur les résultats acquis au laboratoire sur l'imagerie à haute résolution de la membrane polymère grâce à une petite bobine de cuivre en forme de spire gravée sur un substrat de Téflon et intégrée dans une cellule contrôlée en humidité [2-3].

Dans le cas présent, en revanche, la sonde RF viendra prendre en sandwich la membrane et devra produire un champ radiofréquence B_1 orienté parallèlement au plan de la membrane (voir Fig. 1). Le dispositif RF sera, en fait, constitué de deux grilles filaires qui lorsqu'elles sont mises en vis-à-vis génèrent un champ magnétique transverse en principe homogène.

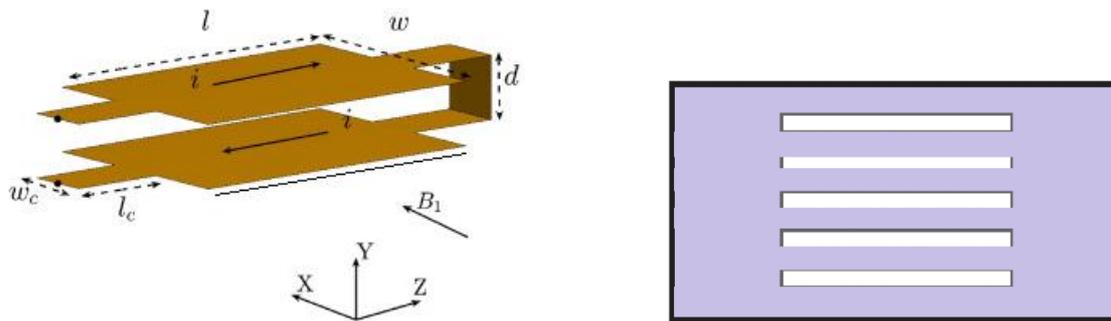


Fig. 1 - A 128MHz multi-wire parallel plate resonator:
parallel plate resonator (*left*), view of one face (*right*).

Dans le cas présent, toute proportion gardée, la distance entre les grilles est un paramètre d'ajustement très influent sur l'homogénéité du champ magnétique. Des simulations seront effectuées à l'aide du logiciel Comsol® multiphysics. Dans une première étape une analyse du fonctionnement en régime DC du résonateur sera effectuée pour valider le concept. Dans un second temps, une analyse en radiofréquence devrait permettre d'optimiser la structure réelle et définir les dimensions effectives des éléments conducteurs (forme, section, longueur). Les conditions d'accord et d'adaptation pourront être déterminées. Un couplage original pourra être avantageusement mis en œuvre.

Le dispositif réalisé sera caractérisé et vérifié hors aimant sur un banc de mesures et de tests existant (relevés du facteur de qualité, du profil de champ, des limitations en puissance).

Dernière étape, des expériences de micro-imagerie seront réalisées sur le spectromètre afin de valider le travail.

3. Références

1. Bedet, J.; Maranzana, G.; Leclerc, S.; Lottin, O.; Moyne, C.; Stemmelen, D.; Mutzenhardt, P.; Canet, D., Magnetic resonance imaging of water distribution and production in a 6 cm(2) PEMFC under operation. International Journal of Hydrogen Energy 2008, 33 (12), 3146-3149.
2. Klein, M., Perrin, J.-C., Leclerc, S., Guendouz, L., Dillet, J. and Lottin, O. Anisotropy of water self-diffusion measured in a single Nafion membrane under traction, Macromolecules, Vol. 46, 23, 2013, pp. 9259-9269.
3. Klein, M., Perrin, J.-C., Leclerc, S., Guendouz, L., Dillet, J., and Lottin, O. Spatially and Temporally Resolved Measurement of Water Distribution in Nafion Using NMR Imaging. ECS Transactions, Vol. 58, N°1, 2013, pp. 283-289.

Intitulé : Développement de lois de comportement pour des polymères soumis à une sollicitation combinée en traction/torsion dans le cadre de la viscoélasticité non-linéaire et des déformations finies

Encadrant(s) : Stéphane André , stephane.andre@univ-lorraine.fr,

Laurent Farge, laurent.farge@univ-lorraine.fr,

Julien Boisse, julien.boisse@univ-lorraine.fr

Domaine : Mécanique des polymères

1 Descriptif

Le développement de lois de comportement valides dans le cadre de sollicitations multiaxiales et en déformations finies est un axe de recherche qui est encore très peu exploré en mécanique des polymères. Avec pour but de faire progresser cette thématique de recherche, l'équipe de rhéologie solide du LEMTA a conduit plusieurs études préliminaires, rendue possibles grâce à la machine de traction/torsion dont elle dispose. Des procédures expérimentales ont été mises au point pour permettre l'asservissement de la machine à partir d'un signal externe, obtenu en temps réel via des mesures de corrélation d'images 3D. Il est alors possible de contrôler parfaitement le trajet de chargement imposé au matériau dans la partie utile des éprouvettes tubulaires.

Au cours d'un précédent stage de master, il a été possible de modéliser le couplage traction/torsion avec un modèle phénoménologique dans le cadre des petites déformations (Figure 1).

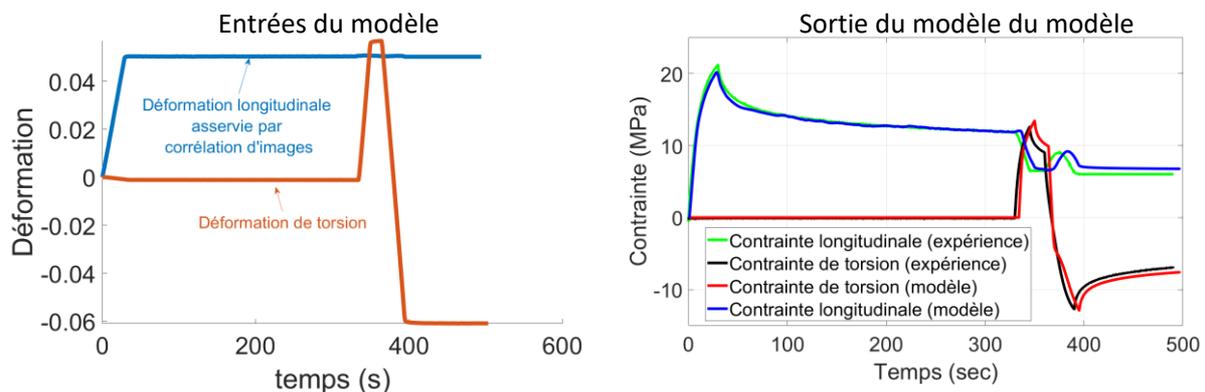


Figure 1 Modélisation d'une expérience de couplage traction-torsion

L'objectif du stage est de développer une approche de modélisation rigoureuse dans le cadre des déformations finies. Pour ce faire, des procédures originales de traitement des données ont déjà été mises au point pour estimer le tenseur « gradient de la transformation », y compris pour les points situés dans le volume du tube creux et non uniquement sur sa surface extérieure. Cela permet de calculer tous les tenseurs de déformation utilisés en déformations finies, qu'ils soient eulériens ou lagrangiens, ainsi que les tenseurs de contrainte qui leur sont associés. L'objectif final est

naturellement d'établir des relations entre les déformations et les contraintes, afin de formuler des lois de comportement multiaxiales.

Ce stage pourra éventuellement être suivi d'une thèse.

2 Travail proposé

Le travail du stagiaire consistera principalement à :

En premier lieu, se familiariser avec les outils et les procédures déjà développés, les améliorer, puis d'initier la constitution d'une base de données expérimentales large et pertinente.

Ensuite, de commencer à développer des lois de comportement dans le cadre de la viscoélasticité non-linéaire en déformations finies. On pourra s'inspirer de certains modèles de comportement des polymères, assez facilement transposables à notre approche, qui ont été conçus initialement pour être intégrés dans des codes simulation par éléments finis.¹

3 Références

1 Bonet, J. (2001). Large strain viscoelastic constitutive models. *International Journal of Solids and Structures*, 38(17), 2953-2968

Intitulé : Séchage et retrait d'hydrogels polymériques super-absorbants

Encadrant : **Didier STEMMELEN** didier.stemmelen@univ-lorraine.fr

Domaine : Matière molle – Polymère – Poro-mécanique – Physico-chimie – RMN / IRM

Descriptif

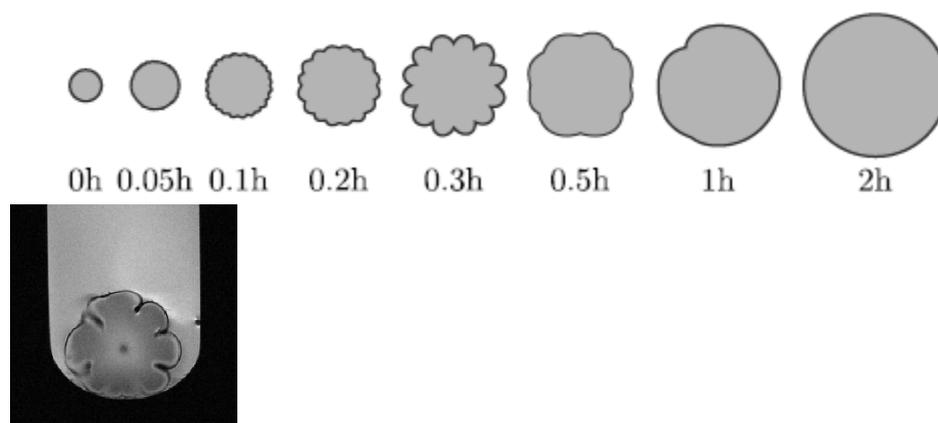
1. Contexte

L'étude porte sur les hydrogels polymériques super-absorbants qui peuvent gonfler jusqu'à plus de 100 fois leur volume initial. Ils sont constitués de chaînes polymères liées entre elles et formant un réseau peu réticulé. Ces chaînes ont une forte affinité avec l'eau due à l'existence de groupements hydrophiles [1]. Lorsqu'un hydrogel sec est immergé dans l'eau, les molécules d'eau viennent occuper les sites hydrophiles, ce qui conduit à un déploiement du réseau de polymères et à un gonflement macroscopique de l'hydrogel qui peut être tout à fait spectaculaire. La réticulation des chaînes du réseau permet malgré tout à l'hydrogel de conserver une certaine rigidité sans se déliter.

Ces hydrogels sont utilisés dans de nombreuses applications : dans le domaine médical (pansements pour brûlures, délivrance ciblée de médicament, lentilles de contact, ingénierie tissulaire), dans le secteur de l'hygiène corporelle (couches, serviettes hygiéniques), en matière de micro-systèmes (détecteurs, actionneurs, micro-vannes) ou aussi en agronomie et environnement (rétention d'humidité, apport ciblé de fertilisants, dépollution des eaux ou des sols).

2. Travail proposé

Nous avons travaillé jusqu'à présent sur l'hydratation/gonflement de billes sphériques d'hydrogel. Un phénomène particulier lors du processus de gonflement a retenu notre attention, à savoir l'apparition de lobes, puis leur coalescence, pour aboutir à nouveau à une géométrie sphérique de la bille d'hydrogel gorgée d'eau [2-4]. Il semble que ce phénomène n'apparaisse pas lors d'un processus de séchage/retrait d'où des questions d'hystérésis ou encore d'irréversibilité.



Schématisation du processus transitoire de gonflement d'une bille d'hydrogel et IRM obtenue après 30 minutes de gonflement.

Le travail proposé consistera à faire l'observation par des techniques classiques (pesée, calibration, dosage, photographie) ou par RMN (relaxation, IRM) du gonflement/hydratation et du retrait/séchage de billes d'hydrogel dans des conditions fixées. Pour réaliser des images par IRM d'hydrogel hydraté, il est nécessaire d'utiliser un agent de contraste (ions paramagnétiques). En effet, le signal RMN de l'eau et celui d'un l'hydrogel hydraté sont trop proches l'un de l'autre pour pouvoir être distingués, l'hydrogel pouvant contenir plus de 99% d'eau. L'agent de contraste (ions paramagnétiques) permet de différencier l'hydrogel de la solution dans laquelle il est immergé (cf. IRM ci-dessus). Cependant, la présence d'ions en solution peut modifier considérablement le processus d'hydratation de l'hydrogel [4]. Plusieurs travaux précédents ont permis de tester dans quelle mesure la nature des ions et leur concentration influent sur les mécanismes de gonflement-retrait de l'hydrogel. Aussi, dans le cadre de ce stage, on s'intéressera plus précisément au mécanisme de déshydratation/retrait et notamment à la déshydratation osmotique des billes d'hydrogel qui consiste à faire dégonfler une bille en la plongeant dans une solution saline de concentration élevée. Les billes d'hydrogel pourront également être déshydratées par des techniques de séchage plus classiques (flux d'air, chauffage).

3. Références

- [1] T. Tanaka et al., Nature, 325, pp. 796-798 (1987)
- [2] T. Bertrand, J. Peixinho, S. Mukhopadhyay, C. MacMinn ; Physical Review Applied 6, 064010 (2016)
- [3] W. Barros, E. Azevedo, M. Engelsberg ; Soft Matter, 8, 8511 (2012)
- [4] D. Stemmelen, F. Xu, A. Bchini, S. Leclerc, J. Peixinho, Observation par IRM du gonflement d'hydrogels, 25^{ème} Congrès Français de Mécanique (2022) <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03815085>

