Catalogue des projets 3A et consignes pour Énergie & Fluides

Version du 13 février 2018

Ces projets, listés ci-après dans un ordre indifférent, ont été présentés aux élèves le 18 septembre 2017. Les choix de projets se sont faits le 20 septembre suite à la définition « spontanée » des monômes ou binômes, cf. à la fin de la section de chaque projet. Les projets ont démarré le 26 septembre. Les créneaux de projets sont typiquement les mardi matin, mercredi après-midi et jeudi matin. Des soutenances « à mi-parcours » ont eu lieu les 21 et 22 décembre 2017. À partir du 26 janvier 2018, des créneaux sont aussi disponibles les vendredi. De nombreux créneaux de projets sont donc disponibles en fin de semestre, cf. l'emploi du temps en section 2 de la page web 3A du département.

Voici le programme des soutenances finales, qui auront toutes lieu en salle P320 de l'école :

1^{ère} session jeudi 15 février :

1	Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteurs	
	8h30	Jourdain & Machrafi	6 Étude CFD des transferts dans des membranes hélicoïdales	Abushammala & Hreiz	
	9h40	El Jazouli & Sahabi	5 Étude CFD d'écoulements diphasiques en géométrie tournante	Loubière & Olmos	

Fin vers 11h : résultats du module AFM de 10h45 à 11h environ.

2^{ème} session vendredi 16 février matin :

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteur(s)
8h45	François	1 Caractérisation thermique d'un échangeur lors d'un cycle de brasage	Schick & Zacharie
9h30	Jund	2 Caractérisation d'un modèle d'alimentation autonome RTG	Lacroix
10h45	Mieuguem	7 Modélisation instationnaire d'une PAC PEMFC en déficit d'alimentation	Mainka & Lottin

Fin vers 11h45.

$3^{\rm ème}$ session vendredi 16 février après-midi :

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteurs
13h30	El Basri & Kadiri	3 Simulation du fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique	Moyne & Feidt
14h30	Danouf & Ouchibou	4 Tuyère de détente diphasique pour conversion de chaleurs fatales	Blaise & Feidt

De 15h45 à 16h15 environ, bilan global de la 3A.

Préparez une présentation vidéo de 25 minutes environ pour un monôme, 40 minutes environ pour un binôme. Exposez **de façon scientifique** le sujet et le contexte du projet, ainsi que le travail réalisé. Tous les élèves assisteront à toutes les soutenances.

Le *rapport final* consistera en une **présentation de type scientifique** de l'objet du projet et du travail réalisé, respectant le cahier des charges suivant :

- longueur 20 à 40 pages hors annexes, 30 à 80 pages avec annexes pour un monôme; 25 à 45 pages hors annexes, 40 à 90 pages avec annexes pour un binôme;
- au moins une annexe;
- inclusion d'un résumé d'une demie page à une page;
- inclusion d'une bibliographie citée dans le corps du texte, étoffée par rapport à celle de ce catalogue, et présentée dans les règles ¹.

Il devra être envoyé par mel, au format PDF navigable, au plus tard **mardi 13 février 2018 à 16h** au responsable de département et aux tuteurs de projet. Dans le même délai, une copie papier de ce rapport sera déposé dans le casier du responsable de département au 1^{er} étage de l'école.

Il faut viser, en concertation entre élèves et tuteurs, un rapport et/ou les plans vidéos des soutenances et/ou l'oral des soutenances en anglais; au moins l'une de ces trois possibilités devra se réaliser.

^{1.} Cf. la section 1.3 de la page 2A du département http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/2A.

1 Caractérisation de phénomènes thermiques en périphérie d'un échangeur à plaques brasées lors d'un cycle de brasage

Tuteurs: Vincent Schick, MC UL Célien Zacharie, doctorant CIFRE UL - Fives

03 83 59 57 11

vincent.schick@univ-lorraine.fr celien.zacharie@univ-lorraine.fr

Lemta site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Le Lemta, en lien avec l'entreprise Fives, travaille actuellement sur l'optimisation thermique d'un procédé de fabrication d'échangeurs de chaleur en aluminium à plaques et ondes brasées destinés au traitement des fluides cryogéniques. Ces échangeurs font en général plusieurs mètres de long et jusqu'à deux mètres en hauteur et largeur. Ce sont des empilements de pièces en aluminium dont la cohésion est assurée par un procédé d'assemblage, dit « brasage », exécuté à une température proche de la température de fusion du matériau utilisé. L'ensemble est placé dans un four sous vide, à l'intérieur duquel une série de panneaux radiants assure la chauffe. Lors du brasage, ces ensembles sont équipés de thermocouples de manière à renseigner le système de régulation en température du four. De la maîtrise de cette régulation dépend la bonne tenue mécanique de ces structures brasées.





Aujourd'hui, on ne dispose que des évolutions temporelles de profils de températures localisées en certains points de l'échangeur en surface et à cœur, ce qui ne permet pas une interprétation aisée des phénomènes ayant lieu à plus petite échelle dans la matrice brasée. Il est très probable que ces phénomènes thermiques soient à l'origine de fragilités dans la pièce. Ainsi, en l'état, il est difficile de discriminer une matrice saine d'une défectueuse en se basant uniquement sur les jeux de données correspondants.

Il se pourrait que les phénomènes thermiques pouvant conduire à l'apparition de défauts soient localisés dans certains **zones** qui font l'objet de cette étude et qui sont décrites ci-après.

- Certaines zones en surface sont noircies afin de les rendre plus émissives et capter plus de chaleur des panneaux radiants; les effets d'un tel dépôt de noir de fumée sur la mesure de température en peau d'échangeur (notamment au niveau de la discontinuité blanc/noir) sont à étudier.
- Les zones de « jonction d'ondes » peuvent également être le siège d'apparitions de défauts. Elles correspondent à un changement de type d'onde dans un passage d'échangeur.
- Les zones de mesure des températures ne sont pas directement liées à l'apparition de défauts mais il faut s'assurer de la qualité de l'information thermique fournie à la régulation. Il est ici question de quantifier l'erreur de mesure de la soudure chaude d'un thermocouple par rapport à son environnement direct en complément des études existantes.

Il s'agit donc dans ce projet de développer des *modèles de comportement thermique de ces diffé*rentes zones en régime transitoire, principalement sous FLEXPDE, logiciel éléments finis.

Ce projet serait l'occasion de travailler sur des *phénomènes de transferts conductif et radiatif*, sur les principes de *mesure par thermocouple*, sur le *calcul de propriétés thermophysiques équivalentes*, et sur la *modélisation numérique*.

Référence:

NEMER, M. 2005 Modélisation de fours de brasage sous vide et validation expérimentale. Méthodes de réduction du temps de brasage. Thèse de Mines Paris.

Élève ayant choisi ce sujet : Charlotte François.

2 Caractérisation d'un modèle d'alimentation autonome 'Radioisotope Thermoelectric Generator' en condition de stockage géologique

Tuteur universitaire: David Lacroix, PR UL

03 72 74 42 22

david.lacroix@univ-lorraine.fr

Lemta site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Tuteurs industriels: Mickaël Gay Hilaire Ihou Mouko

AREVA Hotblock on Board

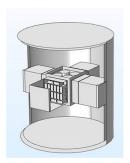
Contexte général:

On s'intéresse à l'alimentation en énergie des capteurs de surveillance de CIGEO, le Centre industriel de stockage géologique de Bure, pour le stockage profond des déchets radioactifs. Cette alimentation, cruciale, est rendue difficile par les contraintes du projet : la durée de vie, le caractère intermittent de la demande en énergie, et la préférence pour des solutions évitant de percer la couche géologique du stockage et donc de créer des chemins de fuite. Le concept de RTG, 'Radioisotope Thermoelectric Generator', est prometteur pour résoudre ces difficultés. Les utilisations passées de ce genre d'équipement relèvent principalement du domaine spatial (les sondes Voyager, par exemple), et mettaient en œuvre des isotopes différents.

Un vaste projet est en cours pour concevoir un convertisseur thermo-électrique adapté aux températures d'une source chaude à l'américium, qui présente par ailleurs des garanties de performance et de robustesse compatibles avec une utilisation pendant 100 ans. À cette fin, le design et la fabrication du prototype de RTG, sans source active, doit être mené à l'aide d'AREVA (coordination, design et modélisation), de Hotblock on Board (fabrication des modules TE et du RTG) et du Lemta (expertise thermique et thermoélectrique). Les développements du projet doivent être validés par la production d'un prototype inactif qui pourra être testé dans les conditions réelles du stockage géologique.

Descriptif du sujet :

On veut dimensionner le RTG à l'aide du logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Des études préliminaires ont déjà été menées, cf. la figure ci-dessous qui montre un RTG simulé sous COMSOL avec la source à radio-isotope au centre et les quatre modules thermoélectriques en périphérie (travail de stage de Master 2 MEPP de Jérémy Colombiano) :



Pour ce dimensionnement, une étape cruciale est la *qualification* « *physique* » *de l'environnement*, afin d'évaluer les incertitudes sur les grandeurs calculées (puissance du système, tension de sortie, température des différentes parties, ...) compte tenu des paramètres d'entrée. Deux types de grandeurs ont un impact majeur sur les résultats numériques :

- les *propriétés physiques des matériaux* utilisés : conductivité thermique et électriques, coefficient Seebeck, ...
- les résistances thermiques et électriques liées aux transferts aux interfaces.

Pour fiabiliser nos calculs, nous envisageons de *simuler le comportement de couples thermoélec*triques simples et de comparer leurs performances à celles de dispositifs utilisant des matériaux similaires déjà qualifiés expérimentalement (Wang et al. 2013ab). Dans un premier temps, le ou les élèves prendront en main le logiciel COMSOL pour des applications « classiques » liées à la thermoélectricité. Puis, sur la base du design d'un module thermoélectrique simple, on mènera à bien une *étude de sensibilité* prenant en compte les différents facteurs évoqués ci-dessus.

Références:

WANG, H. et al. 2013a Transport Properties of Bulk Thermoelectrics - An International Round-Robin Study, Part I : Seebeck Coefficient and Electrical Resistivity. *J. Elec. Mat.* 42, 654-664.

WANG, H. et al. 2013b Transport Properties of Bulk Thermoelectrics - An International Round-Robin Study, Part II: Thermal Diffusivity, Specific Heat, and Thermal Conductivity. J. Elec. Mat. 42, 1073-1084.

Élève ayant choisi ce sujet : Helen Jund.

3 Simulation du fonctionnement d'une pompe à chaleur géothermique

Tuteurs: Michel Feidt, PR émérite UL Christian Moyne, DR CNRS

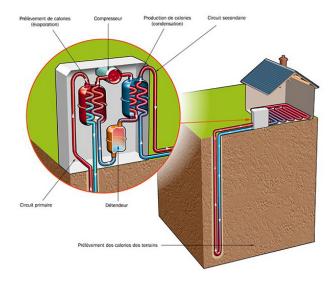
03 72 74 42 65 03 72 74 48 36

michel.feidt@univ-lorraine.fr christian.moyne@univ-lorraine.fr

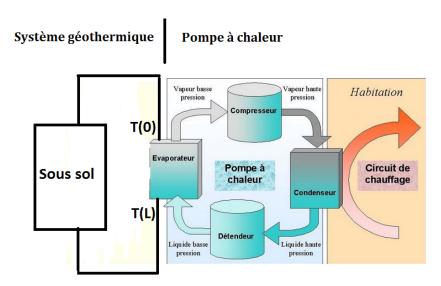
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

L'énergie géothermique représente une source d'énergie basse température gratuite et naturelle, que l'on peut exploiter par exemple par « pompe à chaleur (PAC) géothermique » pour des applications de chauffage de bâtiments. Comme représenté ci-dessous ², un « circuit primaire » consistant notamment en une « sonde géothermique verticale » ou « échangeur géothermique », tube polyéthylène haute densité en U dans lequel circule un liquide caloporteur, peut être couplé à un échangeur de chauffage basse température (par exemple, pour un chauffage par le sol), par une PAC classique à compression de vapeur.



Dans le principe, on a donc trois boucles fluides en cascade :



L'objectif de ce projet est de parfaire un ensemble de programmes existants pour *simuler le chauffage* d'un hall par le sol, en partant de la configuration chargée de la capacité thermique à l'instant initial, correspondant à la fin de l'été. On dispose d'un programme de simulation de l'évolution de la température

^{2.} Figure tirée du site www.geothermie-perspectives.fr .

de source géothermique en géométrie cylindrique en fonction du temps (jour car transitoire lent), et d'un programme de simulation de PAC à compression mécanique de vapeur (en régime dynamique stationnaire). On doit mettre au point une cosimulation du système source géothermique- PAC, avec étude de sensibilité paramétrique en vue d'une éventuelle optimisation à définir.

On s'appuiera pour ce faire sur les rapports de Moyne (2016) et Loueslati (2017). La validation des propositions se fera par rapport à des résultats existants dans la littérature (Pahud & Hubbuch 2007).

Références:

DI DONNA, A. & LALOUI, L. 2013 Energy Geostructures: innovation in underground engineering. Wiley.

LOUESLATI, M. 2017 Modèle de pompe à chaleur géothermique pour simulation de fonctionnement. Rapport de stage Erasmus effectué au Lemta.

MOYNE, C. 2017 Géothermie basse température. Rapport interne Lemta.

Pahud, D. & Hubbuch, M. 2007 Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zürich. Rapport de projet DIS, Office fédéral de l'énergie de la confédération suisse. http://repository.supsi.ch/...

Élèves ayant choisi ce sujet : Imane El Basri & Meryem Kadiri.

4 Dimensionnement d'une tuyère de détente diphasique dans le but de convertir des rejets thermiques industriels en électricité

Tuteurs : Mathilde Blaise, post-doctorante HEVATECH - UL Michel Feidt, PR émérite UL 03 83 59 56 19 03 72 74 42 65

mathilde.blaise@univ-lorraine.fr

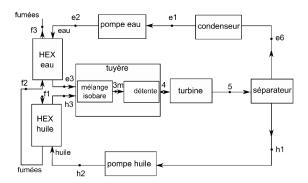
michel.feidt@univ-lorraine.fr

LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Turbosol® est un convertisseur de chaleur en énergie mécanique (et ensuite, éventuellement en électricité). Le concept est breveté par Jean Edmond Chaix (France Brevet FR1101045, 2011). Ce convertisseur est un moteur à apport de chaleur externe, ce qui implique que la source de chaleur peut être de diverses formes. Le développement de ce convertisseur s'est alors tourné vers la valorisation des rejets thermiques industriels (« chaleur fatale »). L'entreprise qui exploite le brevet de Turbosol® est Hevatech (http://www.hevatech.fr).

Le système Turbosol® est représenté sur ce schéma simplifié :



Trois circuits sont distingués, celui des *fumées* (« f »), celui de l'*eau* (« e ») et celui de l'*huile* (« h »). L'huile est mise en pression par une pompe (h1-h2). Elle prend alors de la chaleur aux fumées dans l'échangeur fumée-huile (h2-h3). En parallèle, l'eau est mise en pression par une pompe (e1-e2). L'eau passe ensuite dans l'échangeur de chaleur fumées-eau (e2-e3). Pendant cet échange de chaleur, l'eau est préchauffée et partiellement vaporisée. Ensuite, l'huile est mise en contact direct avec l'eau dans une *tuyère*. Dans la tuyère on distingue 2 étapes, le mélange avec transfert de chaleur (3-3m), et la détente du mélange jusqu'au point 4. La détente du mélange entraine une augmentation de sa vitesse, c'est la phase motrice. Le mélange eau-huile passe ensuite dans la turbine (4-5). Pendant cette étape, la puissance cinétique du jet est récupérée sur l'arbre de la turbine. En sortie de turbine, le mélange passe dans un réservoir de décantation, ce qui permet la séparation des deux fluides. Au point h1, l'huile seule sort du séparateur pour aller vers la réserve d'huile (non représentée sur le schéma). Quand à l'eau sous forme vapeur, elle est désurchauffée, condensée et sous refroidie dans un condenseur (e6-e1).

On veut dans ce projet mettre en place un *modèle* permettant de *déterminer le profil de la tuyère* pour des conditions d'entrées définies (pressions, température et débits) afin de détendre le mélange jusqu'à une pression de sortie définie (actuellement la pression atmosphérique), de manière à maximiser la puissance cinétique en sortie de tuyère. Le dimensionnement de cette tuyère se fera suivant deux approches : l'utilisation d'un fluide homogène équivalent au mélange vapeur d'eau/huile et l'utilisation d'un modèle diphasique (Blaise 2016).

Référence:

BLAISE, M. 2016 Contribution au développement des moteurs à apport de chaleur externe utilisés pour la conversion des rejets thermiques industriels en électricité. Modélisation et optimisation thermodynamique d'un nouveau convertisseur : Turbosol. *Thèse UL*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Rémi Danouf & Medhi Ouchibou.

5 Étude par CFD de l'écoulement liquide-solide dans une géométrie tournante et caractérisation des contraintes mécaniques engendrées

Tuteurs : Éric Olmos, PR UL Céline Loubiere, doctorante UL

03 72 74 39 72 03 72 74 39 67

 $eric.olmos@univ-lorraine.fr \\ celine.loubiere@univ-lorraine.fr \\$

LRGP, site ENSAIA, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet:

On s'intéresse à la recherche et optimisation de nouveaux designs et conditions opératoires pour la culture de cellules animales en réacteur agité. Plus particulièrement, on étudie des cultures de cellules sur des microparticules solides, de diamètre environ 200 μ m, et de masse volumique environ 1030 kg/m³. Ces microparticules forment une suspension dans la phase liquide assurant leur nutrition; la fraction volumique de solide est de l'ordre de 5%. Suite à une étude comparative basée sur un système tournant autour de son axe, avec ou sans chicane, et de base variable, la géométrie particulière du parallélépipède rectangle est apparue comme fournissant un mélange suffisant entre les deux phases, liquide (milieu de culture) et solide (microparticules) pour de faibles fréquences d'agitation. L'optimisation du design du système et l'évaluation de son potentiel passent donc initialement par une description des écoulements liquide-solide générés au sein du système. Un travail décomposé en quatre à cinq étapes est proposé :

- 1. Analyse de la bibliographie et des résultats préliminaires.
- 2. Prise en main du *logiciel CFD* ANSYS 16 Design Modeler, Meshing, Fluent. Une formation et un appui technique seront assurés par les encadrants du projet.
- 3. Simulation numérique à l'aide d'un modèle 2D Euler-Euler de l'écoulement granulaire en géométrie carrée munie de chicanes (cf. figure) et définition de paramètres caractéristiques des contraintes hydromécaniques.
- 4. *Comparaison des contraintes* avec des systèmes de formes plus traditionnelles et évaluation du *potentiel du nouveau réacteur*.
- 5. Si le temps le permet, des simulations réalisées en 3D pourront être envisagées et comparées aux résultats 2D.

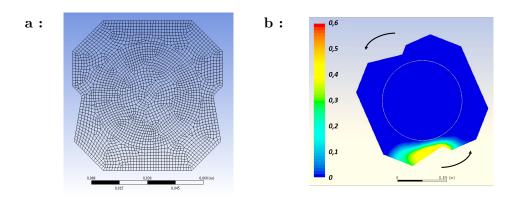


Fig. a : Maillage de la géométrie carrée munie de chicanes construite en 2D (environ 2500 élements, surface totale de 60 cm²). b : Répartition des particules (fractions volumiques locales de la phase solide représentées) dans le système tournant à 3 tours par minute.

Référence:

Collignon, M. L.,, Olmos, E. 2016 Large-Eddy Simulations of microcarrier exposure to potentially damaging eddies inside mini-bioreactors. *Biochem. Eng.* **108**, 30-43.

Élèves ayant choisi ce sujet : Charif El Jazouli & Amine Sahabi.

6 Étude par mécanique des fluides numériques du transfert de matière dans des membranes hélicoïdales

Tuteurs: Rainier Hreiz, MC UL Omran Abushammala, doctorant UL

03 72 74 38 76 03 83 17 53 70

rainier.hreiz@univ-lorraine.fr omran.abushammala@univ-lorraine.fr

LRGP, site ENSIC, 1 rue Grandville, Nancy

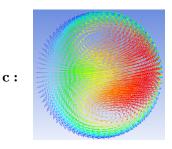
Descriptif du sujet :

Une membrane est une couche de matériau à perméabilité sélective, i.e., imperméable à certaines molécules mais perméable à d'autres qui peuvent la traverser par diffusion. Le champ d'application des membranes, très large, comprend l'oxygénation des bioréacteurs, le traitement du gaz naturel et la purification du biogaz, diverses applications médicales (électrodyalyse, poumons artificiels, etc...), la séparation O_2 /air, le dessalement de l'eau de mer, le traitement des eaux (ozonation, chloration), etc... Les membranes sont généralement disposées en module membranaire (figure a), d'une structure très similaire à celle d'un échangeur de chaleur de type tubes-calandre. Il comprend des membranes en forme de tubes creux dans lesquelles circule un premier fluide, de l'eau par exemple, alors qu'un deuxième fluide, de l'air par exemple, est mis en écoulement dans la calandre. Les membranes ne laissent traverser que certains composés d'un fluide vers l'autre, par exemple, uniquement l' O_2 de l'air pourra diffuser à travers la membrane et s'absorber dans l'eau.

Pour des raisons de facilité de fabrication, les membranes sont généralement de forme cylindrique. Des géométries différentes (figure b : membrane hélicoïdale) permettant de meilleures performances ont été proposées (Kaufhold et al. 2012). Cependant, elles n'ont pas encore été retenues pour les applications industrielles. En effet, les techniques de fabrication classiques ne permettent pas une production en masse de ces géométries non conventionnelles. Cependant, aujourd'hui, avec l'évolution de la *fabrication additive* et de l'*impression 3D*, il devient possible de fabriquer des *membranes de formes plus évoluées*.







Ce projet vise à caractériser l'hydrodynamique et le transfert de matière dans les membranes hélicoïdales. En effet, sous certaines conditions, les forces centrifuges dues à la courbure du tube génèrent des tourbillons qui se superposent à l'écoulement axial principal (figure c). Ces structures tourbillonnaires, appelées écoulements secondaires, conduisent à une amélioration considérable du transfert de matière (ou de chaleur) par rapport aux tubes droits. Cependant, les tubes hélicoïdaux engendrent des pertes de charge plus importantes, et ne peuvent être empilés d'une manière aussi compacte que des cylindres (figure b). Le logiciel CFD ANSYS Fluent sera utilisé pour simuler l'hydrodynamique dans les membranes hélicoïdales et quantifier l'efficacité de transfert de matière associée. Les simulations seront réalisées pour différentes conditions opératoires (nombre de Reynolds, etc...) et paramètres géométriques (pas et rayons de l'hélice) afin de déterminer la configuration la plus avantageuse, qui permet une amélioration appréciable du transfert de matière, pour une baisse en compacité et une augmentation des pertes de charge relativement modérées.

Référence:

Kaufhold, D., Kopf, F., Wolff, C. et al. 2012 Generation of Dean vortices and enhancement of oxygen transfer rates in membrane contactors for different hollow fiber geometries. *J. Membrane Sci.* 423, 342-347.

Élèves ayant choisi ce sujet : Antoine Jourdain & Aboubakr Machrafi.

7 Modélisation du comportement instationnaire d'une pile à combustible PEMFC en déficit d'alimentation en air et/ou hydrogène

Tuteurs: Julia Mainka, MC UL Olivier Lottin, PR UL

03 72 74 43 20 03 72 74 42 42

julia.mainka@univ-lorraine.fr olivier.lottin@univ-lorraine.fr

LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet:

L'hydrogène, considéré comme un potentiel troisième vecteur énergétique aux côtés de l'électricité et du gaz naturel, fait l'objet de nombreux projets nationaux et internationaux ces dernières années. Dans le contexte de la transition énergétique, le développement d'une « filière hydrogène énergie » est l'objectif de plusieurs projets joignants la recherche et l'industrie dans le cadre du PACTE Lorraine et du dossier I-Site « Lorraine Université d'excellence ».

La reconversion de l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique est réalisée par l'intermédiaire d'une *pile à combustible* (PAC), le plus souvent de type PEMFC ('Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells') fonctionnant à l'hydrogène pur et ne rejetant (localement) que de l'eau. Ce projet s'insère dans les travaux du groupe de recherche « Énergie » du LEMTA sur l'amélioration des performances et de la durée de vie des PEMFC.

L'objectif est d'analyser le comportement instationnaire de ces piles pendant les phases d'augmentation de l'intensité (charge) avec des déficits en alimentation air et/ou hydrogène. Pour pallier le temps de réponse du dispositif d'alimentation des gaz par rapport aux variations de charge, les PAC sont souvent associées à des composants électrochimiques de stockage de type supercondensateurs ou supercapacités. L'étude expérimentale de cette hybridation PEMFC-Supercapacité fait objet du projet ANR/ASTRID SUPERCAPAC. Ce travail de modélisation vise donc à compléter les données expérimentales obtenues dans le cadre de l'ANR afin de mieux les interpréter. On prendra notamment en compte le transport des réactifs au sein des différents composants d'une PAC : canaux de distribution, couches de diffusion, électrodes, ... pour réaliser un modèle basé sur les équations de conservation de la masse et des charges, afin d'obtenir la réponse en tension de la cellule. La résolution des équations différentielles et aux dérivées partielles obtenues sera réalisée sous Matlab.

Élève ayant choisi ce sujet, continuation de son projet 2A parcours Recherche: Alex Mieuguem.