Catalogue des projets 3A et consignes pour *Énergie & Fluides*

Version du 12 février 2019

Ces projets, listés ci-après dans un ordre indifférent, ont été présentés aux élèves le 17 septembre 2018. Une réunion de choix des projets a eu lieu le lendemain ; le ou les élèves ayant choisi chaque sujet sont indiqués à la fin de chaque sujet. Les projets ont démarré le jour même.
Les créneaux de projets sont typiquement les mardi matin, mercredi après-midi et jeudi matin. Depuis le 11 janvier 2019, les vendredi après-midi seront aussi disponibles. Des soutenances « à mi-parcours » ont été organisées les 20 et 21 décembre. De nombreux créneaux de projets sont disponibles en cette fin de semestre, cf. l'emploi du temps en section 2 de la page web 3A du département.

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].

Ce rapport sera réalisé sous la forme d'un document PDF navigable, et envoyé par mel au responsable de département et aux tuteurs de projet au plus tard **mercredi 13 février à 9h**. Dans le même délai, un exemplaire imprimé de ce rapport sera déposé dans le casier du responsable de département au 1er étage de l'école.

Voici le planning des ***soutenances finales*** ; notez que jeudi 14 février en salle P318 de 10h45 à 11h E. Plaut présentera un bilan concernant le module AFM (notes et résultats...) :

1ère session jeudi 14 février en salle P318 :

Heure	Élève	Sujet	Tuteurs présents
11h00	Sanquer	**4** CFD d'écoulements dans des tubes hélicoïdaux	Abushammala & Neveux

Fin vers 11h45.

2ème session vendredi 15 février en salle P318 :

Heure	Élève	Sujet	Tuteurs présents
9h15	Bonicel	**1** Métrologie thermique de matériaux isolants semi transparents à hte T	Jannot & Schick
10h00	Dewintre & Semblat	**2** Identification de modèles thermiques d'un four industriel et sa charge	Zacharie & Schick
11h10	Rey & Salleyrette	**5** Simulation d'une suspension liquide - solide par approche CFD - DEM	Loubière & Olmos

Fin vers 12h10.

3ème session vendredi 15 février en salle P318 :

Heure	Élève(s)	Sujet	Tuteurs présents
13h30	Baumann & Gosselin	**3** Courants de shunt dans une batterie organique à électrolyte circulant	Didierjean & Cazot
14h30	Yaakoubd	**7** Écoulement dans un canal en aval d'une station d'épuration	Lemaître & Pons
15h15	Bignon	**6** Thermoconvection de fluides rhéofluidifiants thermodépendants	Nouar & Varé

Bilan pédagogique du S9 - *Fin vers* 16h30.

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

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. en fin de section 1 de la page 3A du département http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/3A.

1 Mesure des propriétés thermiques de matériaux isolants semi transparents à haute température

Tuteurs : Vincent Schick, MC UL — 03 72 74 43 03 — vincent.schick@univ-lorraine.fr
Yves Jannot, IR CNRS — 03 72 74 43 08 — yves.jannot@univ-lorraine.fr
Lemta site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

La connaissance des valeurs des ***propriétés thermiques des isolants*** et en particulier de la ***conductivité*** est indispensable quand il s'agit de dimensionner une installation industrielle. Cela est encore plus vrai pour un ***fonctionnement à haute température*** pour lequel les pertes de chaleur sont très élevées. Les industriels producteurs d'isolants à haute température ont besoin d'une ***méthode de mesure fiable***, applicable à des échantillons de dimensions réduites et d'un coût abordable pour caractériser leurs matériaux. Cela concerne en particulier la phase de recherche - développement pendant laquelle de nombreux essais de formulation sont réalisés avec des échantillons de taille réduite pour limiter les coûts.
La principale méthode utilisée à ce jour est la méthode de la plaque chaude gardée. Un seul dispositif de ce type atteignant 500°C existe actuellement en France au Laboratoire National d'Essais (LNE). Il permet d'obtenir des valeurs de la conductivité thermique avec une précision de 10% à 500°C sur des échantillons de section 500x500 mm^2. Le coût d'une mesure est par ailleurs très élevé.

L'objectif est ici de proposer une alternative du même ordre de précision mais moins coûteuse à cette méthode. Une première étude a permis de mettre en place un dispositif de mesure basé sur la ***méthode transitoire du fil chaud parallèle*** (FCP, cf. figure). La technique mise au point permet de réaliser une bonne estimation de la conductivité thermique sur des matériaux parfaitement opaques. Cependant, la plupart des isolants conçus pour les hautes températures sont ***semi-transparents au rayonnement infrarouge***. Afin de compléter la première étude, il faut donc mettre au point un ***modèle couplé conducto - radiatif*** d'estimation des propriétés thermiques des isolant à haute température.

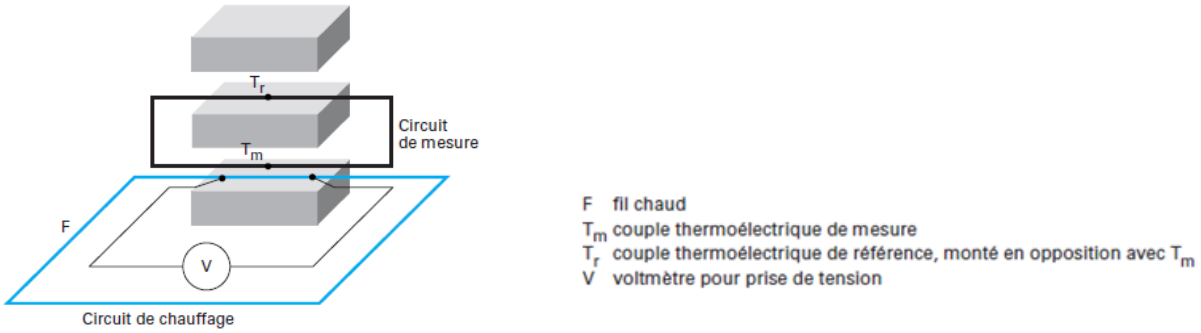

Fig. : schéma de principe de la méthode du fil chaud parallèle.

Le travail consistera en :

- Une étude bibliographique sur les méthodes fil chaud utilisées sur des matériaux semi transparents.
- La modélisation 2D du transfert couplé conducto-radiatif sur un logiciel de résolution d'EDP : FlexPDE, COMSOL, FLUENT, ...
- La validation du modèle numérique en comparant avec un modèle analytique 1D existant.
- La mise au point d'un algorithme d'estimation de la conductivité thermique « phonique » couplant Matlab et le modèle numérique.
- La réalisation et l'exploitation de tests de validation du dispositif expérimental.

Référence :

De Ponte, F. & Klarsfeld, S. 1991 Conductivité thermique des isolants. *Techniques de l'ingénieur* **R2930**.

Élève ayant choisi ce sujet : Antony Bonicel.

2 Identification de fonctions de transfert sur un four industriel et sa charge via différents modèles paramétriques

Tuteurs : Vincent Schick, MC UL — Célien Zacharie, doctorant CIFRE UL - Fives
03 72 74 43 03
vincent.schick@univ-lorraine.fr — celien.zacharie@univ-lorraine.fr
Lemta site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Le Lemta travaille actuellement avec l'entreprise **Fives Cryo** (88) 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*** (figure a) 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 températures relevées correspondantes.

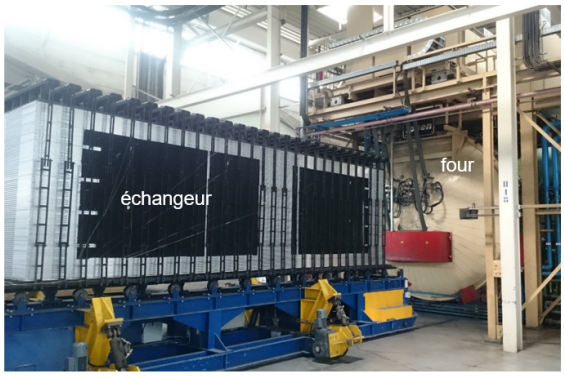

Fig. a : photo de l'un des deux fours sur site et d'un échangeur avant enfournement.

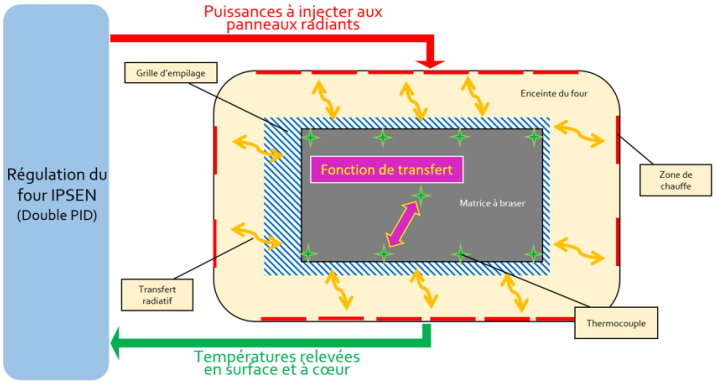

Fig. b : schéma du système {four + charge} et d'une fonction de transfert entre deux points à l'intérieur de l'échangeur.

Pour répondre à cette problématique, l'objet d'une thèse en cours est de ***développer des modèles qui rendront compte du comportement thermique du four et de la charge***. Ainsi, en remontant à la « signature thermique » du système considéré, on espère discriminer plus facilement les topologies d'échangeurs qui présentent des anomalies lors du brasage. On utilisera des ***fonctions de transfert*** (ou lois Entrée(s)/Sortie(s)) : elles mettent en relation plusieurs variables d'état du système ; dans notre cas, des températures et des puissances thermiques quasi exclusivement. Les efforts de recherche se concentrent actuellement sur l'étude de ***modèles « paramétriques » de type autorégressifs*** (ARX). Leur pertinence a été soulignée lors de précédentes collaborations avec d'autres industriels tels que Airbus et Safran. Il en existe toute une déclinaison ainsi que d'autres variétés, qui font l'objet de ce projet.

- On propose de tester la capacité d'***autres modèles paramétriques*** que les ARX à reconstituer les réponses attendues, le tout à partir de données expérimentales ou issues d'un modèle numérique représentatif du système. On utilisera pour ce faire la 'System Identification Toolbox' de **Matlab**. Parmi les modèles à tester, on peut citer entre autres les ARMAX, Nonlinear ARX, Transfer Functions models, State-Space Models. Un travail bibliographique est attendu sur les différents modèles choisis.
- En fonction de l'avancement du projet, différentes zones du système global pourront être étudiées : une fonction de transfert « interne » à la charge (figure b), une fonction de transfert entre le four et la charge, etc...

Références :

Petit, D. & Maillet, D. 2008 Techniques inverses et estimation de paramètres. *Techniques de l'Ingénieur*.

Uriz, F. 2012 Mise en place d'une méthodologie pour l'identification de modèles d'extrapolation de température. *Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine - Airbus*.

Zacharie, C. 2018 Identification de fonctions de transfert pour un four de brasage sous vide et sa charge. *26ème congrès de la Société Française de Thermique*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Hermence Dewintre & Rémi Semblat.

3 Modélisation des courants de shunt dans une batterie organique à électrolyte circulant

Tuteurs : Sophie Didierjean, PR UL — 03 72 74 43 05
Mathilde Cazot, doctorante CIFRE UL - Kemiwatt — 03 72 74 42 38 — mathilde.cazot@univ-lorraine.fr
Lemta site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Dans le cadre de la ***transition énergétique***, et, par exemple, de la gestion du caractère intermittent des énergies renouvelables, les ***systèmes de stockage d'énergie électrique par batterie*** sont actuellement l'objet d'intenses efforts de R&D. Le Lemta est en contact avec la ***startup française Kemiwatt*** [www.kemiwatt.com] qui développe une ***batterie organique à électrolyte circulant***, ou 'organic redox-flow battery', pour des applications stationnaires de stockage d'énergie électrique. Cette technologie consiste à faire circuler deux électrolytes liquides dans le réacteur composé de cellules empilées, alimentées en parallèle par les fluides (figure a).

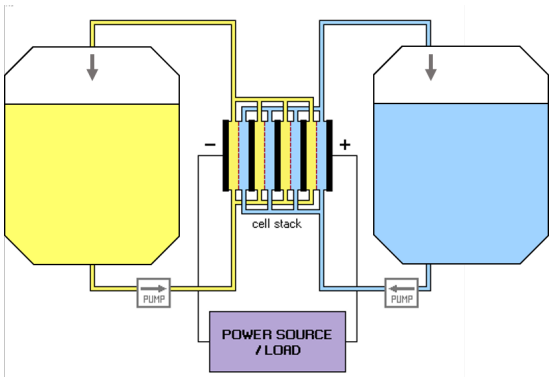

Fig. a : principe de fonctionnement d'une batterie à électrolyte circulant.

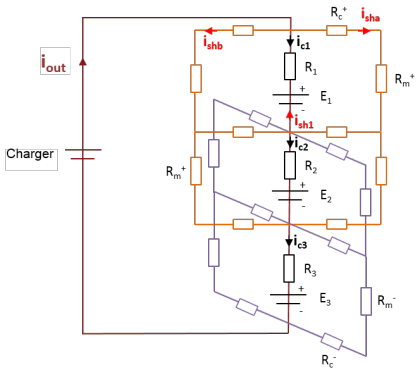

Fig. b : modèle électrique équivalent d'un stack de 3 cellules d'une telle batterie.

Ce système fait intervenir de nombreux paramètres et son ***optimisation*** nécessite la ***mise en place de modèles de simulation performants***. Il est proposé dans ce projet de ***modéliser les pertes induites par les phénomènes de « courants de shunt »***. Ces courants sont créés par le mouvement d'ions dans les électrolytes liquides qui alimentent et relient électriquement les cellules d'un stack de batterie. Ils peuvent représenter d'importantes pertes énergétiques si le système n'est pas bien dimensionné, et générer un vieillissement prématuré des matériaux de la batterie. L'utilisation de circuits électriques équivalents a prouvé son efficacité pour étudier ce phénomène (Xing et al. 2011).

Le travail consistera à ***implémenter le modèle électrique*** de la littérature (figure b) dans le logiciel **Simulink** et à l'adapter au système Kemiwatt, afin d'évaluer les courants de shunt. Ce modèle sera ensuite corrélé au modèle multiphysique déjà développé pour une seule cellule. Il sera alors possible d'***évaluer le design actuel de la batterie***, et de ***proposer des améliorations***, notamment pour les paramètres suivants : nombre de cellules empilées, dimension des canaux d'alimentation, courant de fonctionnement...

Référence :

Xing, F., Zhang, H. & Ma, X. 2011 Shunt current loss of the vanadium redox flow battery. *J. Power Sources* **196**, 10753-10757.

Élèves ayant choisi ce sujet : Paul Baumann & Cédric Gosselin.

4 Étude par CFD des écoulements dans des échangeurs de chaleur à tubes hélicoïdaux

Tuteurs universitaires : Omran Abushammala, doctorant UL — 03 72 74 38 74 — omran.abushammala@univ-lorraine.fr
Rainier Hreiz, MC UL — 03 72 74 38 76 — rainier.hreiz@univ-lorraine.fr
LRGP, site ENSIC, 1 rue Grandville, Nancy

Tuteur entreprise : Thibaut Neveux, IR EDF — 01 30 87 85 69 — thibaut.neveux@edf.fr
EDF R&D, 6 quai Watier, 78401 Chatou

Descriptif du sujet :

Les ***échangeurs de chaleur*** sont des organes essentiels dans de nombreux ***procédés industriels***, et leur optimisation est cruciale en terme d'***efficacité énergétique***. Au cours du temps, ces échangeurs peuvent s'encrasser plus ou moins rapidement en fonction de la qualité des fluides utilisés, créant ainsi une résistance au transfert thermique pénalisant leurs performances. En particulier, les ***centrales nucléaires*** (en France, celles d'***EDF***) utilisent de l'eau naturelle (fleuve ou mer) pour refroidir le cycle de production électrogène. Ces eaux charrient des matières minérales ou organiques qui engendrent des ***problèmes d'encrassement*** dans les échangeurs (figure a) et réduisent le rendement des centrales.

Fig. a : dépôt organique (matières en suspension + biofilm) dans un tube d'échangeur de chaleur.

Fig. b : échangeur de chaleur à tubes spiralés.

Sur le marché industriel, de nouveaux types d'échangeurs de chaleur ont été proposés pour maximiser le transfert thermique, dont des ***échangeurs à tubes spiralés*** (figure b). Ces échangeurs améliorent la puissance échangée et/ou réduisent significativement l'empreinte au sol. En plus, dans un tube hélicoïdal, le frottement pariétal moyen (contrainte de cisaillement à la paroi) est plus important que dans un tube droit, ce qui est censé limiter l'encrassement. Cependant, ces forces de frottement ne sont pas uniformément distribuées sur le pourtour du tube : il existe des zones où les contraintes pariétales sont très faibles, donc propices au développement de biofilms et aux dépôts organiques.
Dans ce projet, le code de CFD **ANSYS Fluent** sera utilisé pour ***simuler l'hydrodynamique dans les conduites hélicoïdales***. Dans un premier temps, la confrontation des résultats numériques à des ***mesures expérimentales*** disponibles permettra le ***choix d'un modèle de turbulence adapté***.
Dans un second temps, des simulations seront réalisées pour différentes conditions opératoires (nombre de Reynolds) et paramètres géométriques (pas et rayon de l'hélice) afin de ***déterminer la configuration la plus avantageuse***, c.à.d. celle qui permet le minimiser les zones à faible cisaillement pour une baisse de compacité et une augmentation des pertes de charge relativement modérées.

Références :

Jatale A. & Srinivasa M. 2015 CFD Modeling of Fouling in Crude Oil Refinery Heat Exchangers. *Meeting and 11th Global Congress on Process Safety-AIChE, Austin.*

Müller-Steinhagen, H. 2011 Heat transfer fouling : 50 years after the kern and seaton model. *Heat Transfer Engineering* **32**, 1-13.

Élève ayant choisi ce sujet : Hugo Sanquer.

5 Simulation numérique d'une suspension liquide - solide par approche CFD - Discrete Element Models

Tuteurs : Éric Olmos, PR UL — 03 72 74 39 72 — eric.olmos@univ-lorraine.fr
Céline Loubiere, doctorante UL — 03 72 74 39 67 — 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 μm, et de masse volumique environ 1030 kg/m^3. Ces microparticules forment une ***suspension dans la phase liquide assurant leur nutrition*** ; la fraction volumique de solide est de l'ordre de 5%. Afin d'étudier la distribution volumique des particules au sein de la cuve agitée, par la ***simulation des écoulements diphasiques*** correspondants, une approche continue Euler-Euler a été précédemment utilisée (Delafosse et al., 2018). Cependant, celle-ci ne permet pas de décrire les gradients de concentration de particules observés expérimentalement en fond de cuve.

Afin d'améliorer la précision des résultats, il est proposé ici d'appliquer une approche de ***simulation par éléments discrets*** (CFD-DEM), disponible dans le logiciel commercial **ANSYS Fluent**, car elle modélise plus fidélement la physique des suspensions solide-liquide que l'approche eulérienne (Blais et al., 2016, dont la figure est tirée).

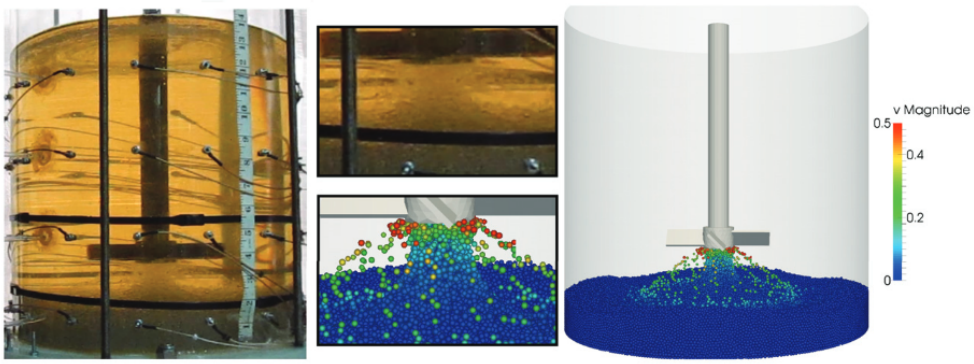

Fig. : comparaison de la distribution de billes en verre dans une cuve en régime transitoire, selon une visualisation expérimentale et une simulation CFD - DEM (N = 200 rotations par minutes).

On propose les étapes suivantes :

- Étude bibliographique et analyse des résultats précédemment obtenus. Prise en main du logiciel **ANSYS 16** (Design Modeler, Meshing, Fluent).
- Choix des modèles d'interaction et des approches de simulation pertinents puis simulation de l'écoulement liquide-solide par l'approche DEM.
- Analyse des résultats et rédaction du rapport.

Références :

Delafosse, A., Loubière, C., Calvo, S., Toye, D. & Olmos, E. 2018 Solid-liquid suspension of microcarriers in stirred tank bioreactor - Experimental and numerical analysis. *Chem. Eng. Sci.* **180**, 52-63.

Blais, B., Lassaigne, M., Goniva, C., Fradette, L. & Bertrand, F. 2016. Development of an unresolved CFD - DEM model for the flow of viscous suspensions and its application to solid–liquid mixing. *J. Comp. Physics* **318**, 201-221.

Élèves ayant choisi ce sujet : Raphaël Rey & Loïc Salleyrette.

6 Convection de Rayleigh-Bénard de fluides rhéofluidifiants thermodépendants : approche faiblement non linéaire

Tuteurs : Thomas Varé, doctorant UL — 03 72 74 43 22 — thomas.vare@univ-lorraine.fr
Chérif Nouar, DR CNRS — 03 72 74 42 77 — cherif.nouar@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Nous nous intéressons à la compréhension des ***mécanismes de structuration spontanée*** d'un ***système physique dissipatif*** parmi les plus simples : les ***écoulements de thermoconvection naturelle de Rayleigh-Bénard*** induits par l'instabilité d'une ***couche de fluide horizontale chauffée par le bas***. Près du seuil de convection, caractérisé par une valeur critique du nombre de Rayleigh, l'écoulement qui se développe au sein d'une couche fluide de grande extension horizontale dans un fluide newtonien obéissant aux approximations d'Oberbeck - Boussinesq est constitué de ***rouleaux de convection***, comme visible sur les figures a et b.

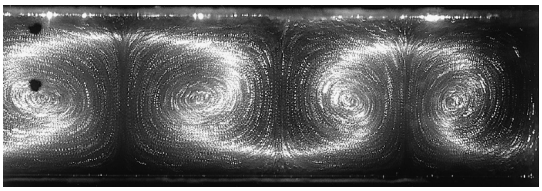

Fig. a : dans une section verticale de la couche fluide, écoulements et isotherme moyenne dans des rouleaux de convection, expérience de Stasiek (1997).

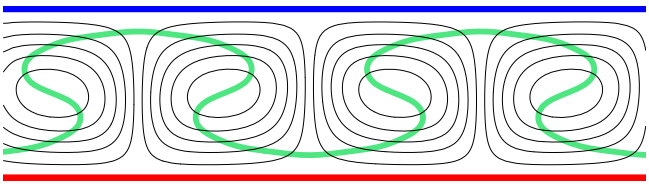

Fig. b : dans une section verticale de la couche fluide, lignes de courant et isotherme moyenne dans des rouleaux de convection, calcul, cf. Plaut & Peinke (2018).

Au contraire, dans le cas d'un fluide aux ***propriétés physiques thermodépendantes***, on observe au seuil une ***structure cellulaire hexagonale***, comme cela a été prédit par Busse (1967). Un exemple de telle structure est visible sur la figure c issue d'expériences de visualisation par ombroscopie effectuées au Lemta dans une solution aqueuse d'un polymère semi-rigide.

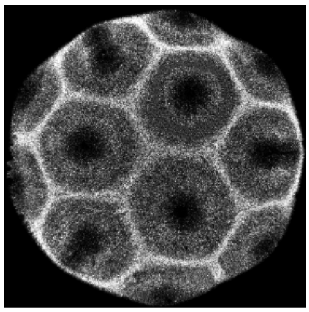

Fig. c : vue de dessus la couche fluide, motifs d'hexagones, expériences de Bouteraa (2016).

Revenant au cas d'un ***fluide newtonien thermodépendant***, Busse (1967) a montré, grâce à une ***analyse faiblement non linéaire de stabilité***, que l'écoulement s'organise d'abord en hexagones, puis que des rouleaux émergent quand le nombre de Rayleigh augmente, avant que les hexagones ne finissent par devenir instables pour des valeurs suffisamment élevées du nombre de Rayleigh.
Dans son modèle, Busse a considéré que les propriétés du fluide variaient linéairement avec la température, ce qui est une bonne approximation lorsque l'écart de températures entre les plaques reste faible. Pour de plus grands écarts, on doit remettre en cause cette hypothèse.

Toujours grâce à une ***analyse faiblement non linéaire de stabilité***, reposant sur des calculs formels asymptotiques utilisant un code **Mathematica** déjà existant et à modifier, on veut ici, dans un premier temps, améliorer le modèle de Busse (1967) en utilisant des ***lois de variations des propriétés thermophysiques avec la température plus réalistes***. Dans un second temps, on cherchera à inclure dans le

modèle un ***comportement rhéofluidifiant***, à savoir une diminution de la viscosité avec le cisaillement, caractéristique de nombreux ***fluides non newtoniens***, comme certaines solutions aqueuses de polymères semi-rigides.

Références :

Bouteraa, M. 2016 Convection de Rayleigh-Bénard pour des fluides rhéofluidifiants : approche théorique et expérimentale. *Thèse de l'université de Lorraine.*

Busse, F. H. 1967. The stability of finite amplitude cellular convection and its relation to an extremum principle. *J. Fluid Mech.* **30**, 625-649.

Plaut, E. & Peinke J. 2018 Advanced Fluid Mechanics. Cours de 3ème année de Mines Nancy.

Stasiek, J. 1997 Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research. *Heat and Mass Trans.* **33**, 27.

Varé, T., Nouar, C. & Métivier, C. 2017 Instabilities of convection patterns in a shear-thinning fluid between plates of finite conductivity. *Phys. Rev. E.* **96**, 043109, 1-20.

Élève ayant choisi ce sujet : Adrien Bignon.

7 Simulation numérique de l'écoulement d'eau dans un canal en aval d'une station d'épuration

Tuteur : Cécile Lemaître, MC UL
03 83 59 57 45
cecile.lemaitre@univ-lorraine.fr
LRGP, site ENSIC, 1 rue Grandville, Nancy

Descriptif du sujet :

Dans le département de la Marne, à Reims, une ***zone de rejet végétalisée*** a été mise en place. Il s'agit d'une installation expérimentale pour ***améliorer la qualité de l'eau en sortie de station d'épuration***. Elle est constituée de 3 bassins de post-traitement, alimentés par un canal de répartition (figure). Depuis sa mise en fonctionnement, on observe que les 3 bassins ne se remplissent pas au même niveau, contrairement à ce qui était prévu par le bureau d'étude qui les a conçus.

Pour comprendre l'origine du problème et trouver une solution, ce projet scientifique consiste à ***simuler l'écoulement de l'eau dans le canal de répartition***.

Dans un premier temps, le ***logiciel de conception*** **Autocad** sera employé pour définir la géométrie du canal de repartition. Puis, le ***logiciel*** **ANSYS Meshing** permettra d'effectuer un maillage du domaine de simulation. Enfin le ***logiciel commercial de mécanique des fluides numérique*** **ANSYS Fluent** sera utilisé pour simuler l'écoulement. Les débits d'entrée et de sortie alimentant les 3 bassins seront fixés d'après des mesures expérimentales effectuées sur le terrain. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement seront ensuite résolues. Les champs de vitesse obtenus permettront d'analyser l'écoulement et de détecter si un des bassin est préférentiellement alimenté. Des ***propositions de modification de structure*** seront alors proposées et testées.

Référence :

https://epnac.irstea.fr/zones-de-rejet-vegetalisees .

Élève ayant choisi ce sujet : Younes Yaakoubd.