



Conseil National de la Recherche Scientifique



Proposition de sujet de thèse CNRS-L/UPPA 2019-2020

II. Fiche de Renseignements sur le laboratoire d'accueil au Liban

Université ou centre de recherche : **Notre Dame University - Louaize**

Laboratoire d'accueil : **Thermofluids Research Group - Mechanical Engineering Department**

Nom du Directeur du laboratoire : **Dr. Michel El Hayek**

Adresse : **NDU Louaize, Zouk Mosbeh, P.O. Box : 72, Zouk Mikael, Liban**

Ville : **Zouk Mosbeh**

Tél./Fax/Mél : **+961 9 208 000 Ext: 5134**

Faculté ou organisme auquel est affilié le laboratoire d'accueil : **Faculty of Engineering**

Nom du Directeur de thèse : **Charbel Habchi**

Le Directeur de thèse fait-il partie du laboratoire d'accueil : Oui / Non

Si non, précisez son rattachement et ses coordonnées :

- Principaux thèmes de recherche de l'équipe où sera effectué le travail de thèse :
Heat transfer and mixing enhancement in multifunctional heat exchangers/reactors
Chaotic advection flows
Magneto-hydrodynamic flows
Pulsed laser plasma propulsion
- Liste des publications récentes de l'équipe (pertinentes au sujet proposé- 3 dernières années) :
C. Habchi, A. Ghanem, T. Lemenand, D. Della Valle, H. Peerhossaini, Mixing performance in Split-And-Recombine Milli-Static Mixers - A numerical analysis. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 142, 298-306.

- S. Ali, C. Habchi, T. Lemenand, J.L. Harion, Towards Self-Sustained Oscillations of Multiple Flexible Vortex Generators. *Fluid Dynamics Research*, 2019, Accepted.
- M. Oneissi, C. Habchi, S. Russeil, D. Bougeard, T. Lemenand, Inclination Angle Optimization for Inclined Projected Winglet Pair Vortex Generator. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2019, 11, 0110141-01101410.
- M. Oneissi, C. Habchi, S. Russeil, T. Lemenand, D. Bougeard, Heat transfer enhancement of inclined projected winglet pair vortex generators with protrusions. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 134, 541-551.
- T. Lemenand, C. Habchi, D. Della Valle, H. Peerhossaini, Vorticity and convective heat transfer downstream of a vortex generator. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 125, 342-349.
- B. Mehra, J.V. Simo Tala, C. Habchi, J.-L. Harion, Local field synergy analysis of conjugate heat transfer for different plane fin configurations. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130, 1105-1120.
- A. Khanjian, C. Habchi, S. Russeil, S. Bougeard, T. Lemenand, Effect of the angle of attack of a rectangular wing on the heat transfer enhancement in channel flow at low Reynolds number. *Heat and Mass Transfer*, 2017, 1-12.
- S. Ali, C. Habchi, S. Menanteau, T. Lemenand, J.L. Harion, Three-dimensional numerical study of heat transfer and mixing enhancement in a circular pipe using self-sustained oscillating flexible vorticity generators. *Chemical Engineering Science*, 2017, 162, 152-174.
- A. Khanjian, C. Habchi, S. Russeil, S. Bougeard, T. Lemenand, Effect of rectangular winglet pair roll angle on the heat transfer enhancement in laminar channel flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 114, 1-14.
- C. Habchi, T. Lemenand, F. Azizi, Mixing Enhancement in a Novel Type of Split and Recombine Static Mixer. *IMECE*, Pittsburgh, PA, USA, 2018.
- R. Himo, C. Habchi. Revisiting the field synergy principle in an elliptic laminar flow. 3rd MHMT'18, Budapest, Hungary, 2018.
- B. Mehra, J.V. Simo Tala, C. Habchi, J.L. Harion. Analyse des transferts thermiques conjugués de trois géométries d'ailettes planes selon le principe local de synergie de champ. 13th CIFO, Saint-Lô, France, 2017.
- B. Mehra, J.V. Simo Tala, C. Habchi, J.L. Harion. Analyse des performances de transfert d'une ailette plane selon le principe local de synergie. SFT, Marseille, France, 2017.
- M. Oneissi, A. Khanjian, D. Bougeard, C. Habchi, S. Russeil, T. Lemenand. Intensification des transferts par génération de vorticité. 13th CIFO, Saint-L , France, 2017.

La thèse sera-t-elle effectuée en co-tutelle ou co-direction: **Co-tutelle internationale**

III. Fiche de Renseignements sur le laboratoire d'accueil à l'UPPA

Laboratoire d'accueil : Laboratoire **SIAME** (Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Electrique) – Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

Nom du Directeur du laboratoire : **Pr. Stéphane Abadie**

Adresse : **Laboratoire SIAME, Allée du Parc Montauray, 64600 Anglet**

Code postale-Ville : **64600 Anglet**

Tél./Mél : **05 59 57 44 21 - stephane.abadie@univ-pau.fr**

Ecole doctorale auquel est affilié le laboratoire d'accueil : **ED DEA – Sciences Exactes et leurs Applications de l'UPPA (ED 211)**

Nom du Directeur de thèse : **Yves Le Guer**

Co-directeur de thèse : **Pierre-Henri Cocquet** (Université de la Réunion mais en échange de service à l'UPPA, procédure de rattachement chercheur associé au Laboratoire SIAME en cours)

Le Directeur de thèse fait-il partie du laboratoire d'accueil : Oui / Non

Si non, précisez son rattachement et ses coordonnées :

- Nombre de thèses dirigées (ou co-dirigées) actuellement : **0 pour Yves Le Guer, 1 pour Pierre-Henri Cocquet**
- Pour les cinq dernières années, précisez les thèses soutenues, la durée en mois pour chacune d'entre elle, la liste des publications et la situation actuelle de chaque diplômé.

[1] Thèse UPPA d'**Amine Kacem** soutenue le 12 décembre 2017, débutée le 1^{er} octobre 2014 (38 mois) : *Etude expérimentale et numérique d'une nappe liquide en écoulement gravitaire.*

Direction : Yves Le Guer et Kamal El Omari

Situation actuelle : post-doctorant au LTeN – Polytech Nantes. Travaux dans le cadre de l'ANR HECO : from HEating to COoling, pour une meilleure prise en compte des phénomènes physiques complexes liés à la trempe.

Kacem A., El Omari K., Le Guer Y., Bruel, P. Experimental and numerical investigations of free planar water sheets flowing under gravity. Soumis à la revue *Int.J. of Multiphase Flow*, en révision.

Kacem A., Le Guer Y., El Omari K., P. Bruel, 2017 Experimental investigations of planar water sheets flowing under gravity. *9th International Conference on Computational & Experimental Methods in Multiphase & Complex Flow*, Tallinn, Estonie, 20-22 juin.

Kacem A., Mejia A., Le Guer Y., El Omari K., Reynaud S., Bruel P., Grassl B., 2015. Etude expérimentale d'une nappe liquide plane verticale. 22^{ème} Congrès Français de Mécanique, Lyon 24-28 août au 2 septembre.

[2] Thèse Univ. La Réunion de **Garry Rivière** soutenue le 3 mars 2017, débutée le 1^{er} septembre 2013 (42 mois) : *Optimisation topologique d'écoulements turbulents et applications à la ventilation des bâtiments.*

Direction : Alain Bastide. Co-direction : Eric Fock et Pierre-Henri Cocquet.

Situation actuelle : PRCE à l'Université de La Réunion.

Riviere G., Cocquet P.H., Fock E., Bastide A. Optimisation topologique d'une bouche de ventilation en régime turbulent, *Conférence Francophone de l'International Building Performance Simulation Association (IBPSA), 23-24 mai Champs-sur-Marne, 1-8, 2016.*

[3] Thèse Univ. La Réunion de **Delphine Ramalingom**, soutenue le 13 décembre 2017, débutée le 1^{er} septembre 2013 (52 mois – congé formation – déjà ingénieur d'études)

Optimisation des transferts thermiques au sein de cavités : applications à des composants passifs de bâtiments.

Direction : Alain Bastide. Co-direction : P.H. Cocquet.

Situation actuelle : Ingénieur d'Etudes en Calcul Scientifique au Laboratoire PIMENT (Université de la Réunion).

Bastide A., Cocquet P. H., Ramalingom D., Maleck R. A multi-objective optimization problem in mixed and natural convection for a vertical channel asymmetrically heated. *Structural and Multidisciplinary Optimization (to appear), 2019.*

Bastide A., Cocquet P. H., Ramalingom, D. Penalization model for Navier–Stokes–Darcy equations with application to porosity-oriented topology optimization. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 28(08), 1481-1512, 2018.*

Ramalingom D., Cocquet P. H., Bastide, A. A new interpolation technique to deal with fluid-porous media interfaces for topology optimization of heat transfer. *Computers & Fluids, 168, 144-158, 2018.*

Numerical study of natural convection in asymmetrically heated channel considering thermal stratification and surface radiation, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 72(9), 681-696, 2017.*

Ramalingom D., Cocquet P.H., Bastide A. Optimisation topologique des échanges thermiques dans un canal vertical asymétriquement chauffé, *25ème Congrès Français de Thermique, Marseille, 1-8, 2017.*

- Principaux thèmes de recherche de l'équipe où sera effectué le travail de thèse :
 - Mélange chaotique de fluides complexes avec transfert de chaleur
 - Optimisation topologique appliquée à la mécanique des fluides
 - Ecoulements magmatiques
 - Ecoulements multiphasiques (en rideau, pyroclastiques et tsunamis, ...)
 - Ecoulements instables avec transfert de chaleur

- Liste des publications récentes de l'équipe (pertinentes au sujet proposé) :

Publications :

Bastide, A., Cocquet, P. H., Ramalingom, D., Maleck, R., 2019

A multi-objective optimization problem in mixed and natural convection for a vertical channel asymmetrically heated.

Structural and Multidisciplinary Optimization (to appear).

Petrelli M., El Omari K., Spina L., Le Guer Y., La Spina G., Perugini D., 2018

Timescales of water accumulation in magmas and implications for short warning times of explosive eruptions.

Nature Communications, 9, Article number: 770. IF 2017/2018 = 12.3

Bastide, A., Cocquet, P. H., & Ramalingom, D., 2018
Penalization model for Navier–Stokes–Darcy equations with application to porosity-oriented topology optimization.

Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 28(08), 1481-1512.

Ramalingom, D., Cocquet, P. H., & Bastide, A., 2018

A new interpolation technique to deal with fluid-porous media interfaces for topology optimization of heat transfer. *Computers & Fluids*, 168, 144-158, 2018.

H. Aref, J.R. Blake, M. Budisic, S.S.S Cardoso, J.H.E. Cartwright, H.J.H. Clercx, U. Feudel, R. Golestanian, E. Gouillart, Y. Le Guer, G.F. van Heijst, T.S. Krasnopolskaya, R.S. MacKay, V.V. Meleshko, G. Metcalfe, I. Mezic, A.P.S. de Moura, K. El Omari, O. Piro, M.F.M. Speetjens, R. Sturman, J.-L. Thiffeault, I. Tuval, 2017
Frontiers of chaotic advection.

Reviews of Modern Physics, 025007 – Published 14 June 2017 69 pages. IF 2017/2018 = 36.3.

D. Ramalingom, P.H. Cocquet et A. Bastide, 2017

Numerical study of natural convection in asymmetrically heated channel considering thermal stratification and surface radiation.

Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 72(9), 681-696.

Petrelli M., El Omari K., Le Guer Y., Perugini D., 2016

Effects of chaotic advection on the timescales of cooling and crystallization of magma bodies at mid crustal levels. G-Cubed (Geochemistry, Geophysics and Geosystems), Paper #2015GC006109R, February. IF 2017/2018 = 2.98.

El Omari K., Le Guer Y., Perugini D. and Petrelli M., 2015

Thermal chaotic mixing during the cooling of a magmatic system.

Pure and Applied Geophysics, 172(7), 1835-1849. IF 2017/2018 = 1.65.

Communications :

Younes E., El Omari K., Moguen Y., Le Guer Y., C. Castelain C., Burghelea T., 2019

A novel active mixer for yield stress fluids.

Session: Non Newtonian Fluid Mechanics & Flow Instabilities, Annual European Rheology Conference 2019 (AERC 2019), Portoroz, Slovenia, April 8 – 11.

Petrelli M., El Omari K., Spina L., Le Guer Y., La Spina G., Perugini D., 2018

Volatiles accumulation in magmas: timescales and implications for short warning times of explosive eruptions, *AGU Fall Meeting*, Washington DC, December 14-18, abstract number 373707.

Younes E., El Omari K., Burghelea T., C. Castelain C., Le Guer Y., 2018

Active chaotic mixing in a plane channel with rotating arc walls.

12th European Fluid Mechanics Conference, September 09-13, Vienna, Austria.

Cocquet P.H., Gander M.J., 2018

Analysis of the shifted Helmholtz expansion preconditioner for the Helmholtz equation, *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXIV, LNCSE*, Springer-Verlag, 195-204. Editors: Bjørstad, P.E., Brenner, S.C., Halpern, L., Kim, H.H., Kornhuber, R., Rahman, T., Widlund, O.B. (Eds.). 24th International Conference on Domain Decomposition Methods in Science and Engineering, Svalbard, Norway, February 2017.

Cocquet P.H., Gander M.J., Xiang X., A finite difference method with optimized dispersion correction for the Helmholtz equation, *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XXIV, LNCSE*, Springer-Verlag, 205-214. Editors: Bjørstad, P.E., Brenner, S.C., Halpern, L., Kim, H.H., Kornhuber, R., Rahman, T., Widlund, O.B.

(Eds.). 24th International Conference on Domain Decomposition Methods in Science and Engineering, Svalbard, Norway, February 2017.

Ramalingom D., Cocquet P.H., Bastide A. Optimisation topologique des échanges thermiques dans un canal vertical asymétriquement chauffé, *25ème Congrès Français de Thermique*, Marseille, 1-8, 2017.

Petrelli M, El Omari K, Le Guer Y, Perugini D., 2016

Thermo-rheological and chemical evolution of magmatic systems at mid-crustal level: the role of chaotic advection

EGU (European Geosciences Union), Vienna, Austria, April 17-22.

Riviere G., Cocquet P.H., Fock E., Bastide A. Optimisation topologique d'une bouche de ventilation en régime turbulent, *Conférence Francophone de l'International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*, 23-24 mai Champs-sur-Marne, 1-8, 2016.

Cocquet P.H., Michaud J., 2016

Error of an explicit Fuzzy Domain Decomposition Method (eFDDM): What do matched asymptotic expansions teach us? *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Springer-Verlag. 335-343. Editors: Dickopf, Th., Gander, M.J., Halpern, L., Krause, R., Pavarino, L.F. 22nd International Conference on Domain Decomposition Methods, Lugano, Switzerland.

Cocquet P.H., Gander M.J., 2016

On the minimal shift in the shifted Laplacian preconditioner for multigrid to work. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, Springer-Verlag. 137-145. Editors: Dickopf, Th., Gander, M.J., Halpern, L., Krause, R., Pavarino, L.F. 22nd International Conference on Domain Decomposition Methods, Lugano, Switzerland.

El Omari K., Le Guer, Y., Perugini D., 2014

Cooling of a yield-stress magmatic fluid under convective chaotic mixing

24th Réunion des Sciences de la Terre, 27-31 octobre 2014, Pau.

El Omari K., Le Guer, Y., Perugini D., 2013

Chaotic advection for thermal mixing in magmatic systems.

VI International Conference on Fractals and Dynamic Systems in Geoscience, September 26th to October 02nd 2013, Perugia, Italy.

IV. Sujet de thèse

A faire signer obligatoirement par tous les co-directeurs

IV.1. Titre : **Optimisation des performances d'un nouvel échangeur multifonctionnel à canaux sinus-hélicoïdaux**

*La thèse fait-elle partie d'un projet de recherche financé par le CNRS-L : Oui / Non

Si oui, précisez :

*La thématique sous laquelle s'inscrit la thèse fait-elle partie des priorités de cet appel pour l'année 2019-2020 (voir annonce): Oui / Non

Si oui, précisez (possibilité de choisir plus qu'une): **Energie – Géophysique/géo-ressources – Environnement** (pour les applications)

Si non, définir une:

IV.2. Résumé (ne pas dépasser 200 mots)

La problématique environnementale impose aujourd'hui la recherche de la sobriété énergétique. Dans tous les domaines industriels il est nécessaire d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés pour réduire la pollution environnementale. Les échangeurs de chaleur sont des appareils indispensables au fonctionnement de nombreux procédés, ils sont donc directement concernés par cette recherche d'efficacité énergétique.

Nous proposons d'étudier une nouvelle géométrie d'échangeur compact pour intensifier les transferts de chaleur et le mélange. Ce dispositif vient de faire l'objet d'un dépôt de brevet¹ à l'UPPA, il s'agit d'un échangeur thermique qui repose sur une géométrie particulière qui met en œuvre l'advection chaotique. Il peut se décliner aussi en version mélangeur de fluides ou encore en réacteur chimique. La géométrie est constituée de canaux qui suivent une forme **sinus-hélicoïdale**.

Nous proposons de développer l'étude selon deux volets :

- le premier combine des simulations de mécanique des fluides et des méthodes d'optimisation mathématique pour définir une géométrie optimale d'échangeur répondant à un problème donné,
- le second utilise les prescriptions définies par l'optimisation pour quantifier expérimentalement l'accroissement des performances d'échange par rapport à des solutions plus classiques.

¹ Y. Le Guer et K. El Omari. Élément générateur d'un écoulement d'advection chaotique. Dépôt janvier 2019, référence BFF180510.

IV.3. Contexte et problématique (ne pas dépasser 200 mots)

Un échangeur de chaleur permet d'échanger de la chaleur entre deux fluides via une paroi. Le transfert de chaleur se fait par conduction à travers la paroi et par convection au sein de chacun des fluides. La convection en écoulement laminaire n'est en général pas efficace (trajectoires régulières) sauf si l'on utilise la propriété de l'advection chaotique, c'est-à-dire la faculté de l'écoulement à générer des trajectoires très complexes qui permettent d'améliorer le mélange et donc l'échange de chaleur pariétal. La problématique de l'augmentation des performances thermo-hydrauliques constitue un enjeu important dans le domaine des échangeurs de chaleur. Il existe de nombreuses solutions géométriques qui permettent d'intensifier les échanges thermiques en écoulement laminaire tout en limitant l'augmentation des pertes de charge, parmi celles-ci on peut citer l'utilisation d'inserts, de coudes ou de déformations pariétales. La solution innovante que nous proposons consiste à organiser les canaux courbes de l'échangeur le long d'une géométrie cylindrique (cf. Fig. 1). Pour atteindre la solution optimale maximisant le transfert de chaleur pariétal tout en minimisant les pertes de charge, il est nécessaire d'optimiser les formes des canaux le long d'une génératrice de type sinus-hélicoïdale. Nous allons utiliser les méthodes d'optimisation topologique pour atteindre cet objectif.

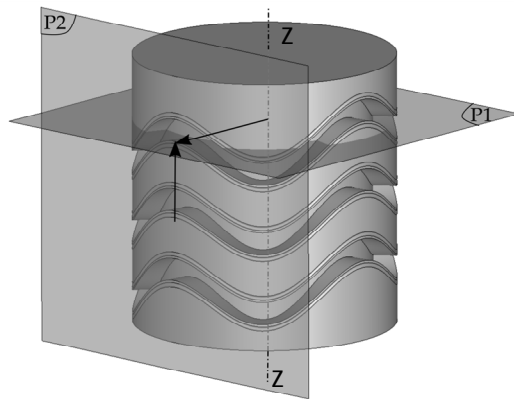


Figure 1 : Illustration des canaux ondulés de l'échangeur. La courbure du canal selon des plans perpendiculaires permet l'obtention des trajectoires complexes.

IV.4. Descriptif des objectifs et de l'impact (ne pas dépasser 200 mots)

Les objectifs seront d'optimiser la forme de l'échangeur en fonction de l'application choisie pour un secteur d'activité particulier (pharmaceutique/cosmétique, agroalimentaire, pétrolier, génie climatique, ...) en considérant les caractéristiques thermophysiques du fluide, pour une gamme de débit particulière (nombre de Reynolds ou de Dean en canaux courbes). Une optimisation topologique multicritère sera entreprise pour répondre aux objectifs conjoints de maximisation de l'échange et de minimisation des pertes de charge. Des corrélations en fonction de la variation des paramètres géométriques seront établies.

Les performances du prototype d'échangeur optimisé topologiquement seront évaluées sur un banc expérimental dédié pour déterminer les coefficients d'échange et les pertes de charge. Les

régimes d'écoulement couverts iront de l'écoulement laminaire à faible nombre de Reynolds jusqu'à l'écoulement pleinement turbulent.

Ce nouvel échangeur présente la capacité d'allier une forte compacité à des performances de mélange/échange de chaleur accrues. Les niveaux d'efficacité (échange/perte de charge/compacité) attendues sont bien supérieurs à ceux rencontrés pour des géométries plus classiques.

L'objectif du projet est aussi de pouvoir adapter l'échangeur au cahier des charges du client en lui offrant le design optimal pour son application. Des applications sont possibles dans le domaine de la géothermie (échangeurs d'ORC – Organic Rankine Cycle) ou de l'ingénierie pétrolière (récupération de la chaleur des puits ou de torchères, réchauffage de pipes, ...).

IV.5. Aspect appliqué et/ou aspect innovateur (ne pas dépasser 200 mots)

Hormis le domaine particulier de la microfluidique, la technologie des échangeurs de chaleur industriels a peu évolué depuis plusieurs décennies. Ce projet a pour objectif de faire évoluer les pratiques de conception et de fabrication dans le domaine. De ce fait, il revêt plusieurs aspects innovants que sont :

- L'utilisation d'une géométrie originale brevetée (cf. Fig. 1), très compacte, qui utilise les propriétés du mélange chaotique (encore mal connu dans l'industrie). Cette géométrie offre de nombreuses possibilités d'utilisation (mono canal ou multi canaux ondulé(s), canal central axial droit, canaux divisés et recombinaison, co ou contre-courant, forme en positif ou en négatif, ...).
- L'utilisation de méthodes d'optimisation topologique ou de formes paramétriques pour obtenir le design qui réponde le mieux aux contraintes imposées par un problème concret d'échange de chaleur.
- L'utilisation de la technique de fabrication additive utilisant des métaux ou alliages métalliques pour la fabrication de l'échangeur, une technique de fabrication qui représente un enjeu majeur pour l'avenir des entreprises industrielles.

IV.6. Etat des recherches dans le domaine avant la thèse (ne pas dépasser 200 mots) + Ref. Bibliographiques

Ce projet fait référence à un nouveau type d'échangeur de chaleur passif qui utilise des canaux courbes. La dynamique des fluides complexes générée dans les canaux courbes suscite un intérêt particulier depuis plusieurs décennies. En effet, les écoulements secondaires provoqués par les forces centrifuges permettent d'augmenter le mélange transversal dans des conduites courbes, de diminuer la dispersion axiale, d'augmenter le transfert de chaleur ou de masse pariétal [1]. L'étude d'échangeurs de chaleur ou de réacteurs utilisant différentes formes de canaux courbes alternés est plus récente [2] et nos deux équipes (NDU et UPPA) ont eu une participation active dans le développement de ces recherches [3, 4, 5, 6, 7]. Bien que les recherches aient progressées, la recherche du meilleur design pour améliorer leur efficacité d'échange reste encore assez empirique. Dans le cas présent, l'optimisation de la forme de l'échangeur revient à trouver la

période d'une sinusoïde et le pas d'un hélicoïde pour lesquels les performances sont optimales. Les méthodes mathématiques d'optimisation de formes paramétriques [8, 9] ou d'optimisation topologique [10, 11, 12, 13] couplées à des méthodes de réduction de modèle (POD, low-rank) [14, 15, 16] sont parfaitement adaptées à ce problème. Ces dernières ont, en effet, été déjà toutes appliquées pour la conception optimale de forme en mécanique des fluides.

References bibliographiques :

- [1] Vashisth, S., Kumar, V., Nigam, K.D.P. A review on the potential applications of curved geometries in process industry. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47, 10, 3291-3337, 2008
- [2] Acharya, N., Sen, M., Chang, H.-C., Heat Transfer Enhancement in coiled tubes by chaotic mixing, *Int. J. Heat Mass Trans.*, 35(10), 2475-2489, 1992.
- [3] Peerhossaini H., Castelain C., Le Guer Y. Heat exchanger design based on chaotic advection. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 7 (4), 333-344, 85, 1993.
- [4] C Castelain, A Mokrani, Y Le Guer, H Peerhossaini. Experimental study of chaotic advection regime in a twisted duct flow. *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 20 (2), 205-232
- [5] Boesinger C., Le Guer Y., Mory M.. Experimental study of reactive chaotic flows in tubular reactors. *AIChE Journal*, 51 (8), 2122-2132, 2005.
- [6] Habchi C., Lemenand T., Della Valle D., Peerhossaini H. Liquid/liquid dispersion in a chaotic advection flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 35 (6), 485-497, 2009.
- [7] Habchi C., Ghanem A., Lemenand T., Della Valle D., Peerhossaini H. Mixing performance in split-and-recombine milli-static mixers - a numerical analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 142, 298-306
- [8] Allaire G., Schoenauer M. *Conception optimale de structures* ; 58, 292 p., Berlin: Springer, 2007.
- [9] Feppon, F., Allaire, G., Bordeu, F., Cortial, J & Dapony, C. Shape optimization of a coupled thermal fluid-structure problem in a level set mesh evolution framework. *SéMA Journal*, 1-46, 2019.
- [10] Borrvall T., Petersson J. Topology optimization of fluids in Stokes flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 41(1), 77-107, 2003.
- [11] Othmer C. A continuous adjoint formulation for the computation of topological and surface sensitivities of ducted flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 58(8), 861-877, 2008.
- [12] Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031-1055, 2013.
- [13] Ramalingom D., Cocquet, P.H., Bastide A. A new interpolation technique to deal with fluid-porous media interfaces for topology optimization of heat transfer. *Computers & Fluids*, 168, 144-158, 2018.
- [14] Tallet A. (2013). *Contrôle des écoulements par modèles d'ordre réduit, en vue de l'application à la ventilation naturelle des bâtiments* (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle), 2013.
- [15] Dumon A., Allery C., Ammar A. Proper general decomposition (PGD) for the resolution of Navier-Stokes equations. *Journal of Computational Physics*, 230(4), 1387-1407, 2011.
- [16] Dolgov S., Stoll M. (2017). Low-Rank Solution to an Optimization Problem Constrained by the Navier-Stokes Equations. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 39(1), A255-A280, 2017.

IV.7. Programme de recherche prévu pour la thèse et contribution des différents partenaires (ne pas dépasser 200 mots)

Les deux équipes (NDU Liban et UPPA) ont des compétences complémentaires pour mener à bien le projet de thèse du doctorant. Elles n'ont jamais travaillé ensemble et souhaitent vivement pouvoir démarrer une collaboration fructueuse à partir de ce projet.

Le programme de travail de la thèse se décompose en trois parties dont deux sont fortement couplées :

- La **simulation numérique** (1) de l'écoulement et des transferts au sein de l'échangeur de chaleur couplée à la mise en œuvre de la **méthode d'optimisation** (2) des formes selon des critères d'efficacité d'échange et de minimisation du frottement.
- L'**évaluation des performances expérimentales** (3) de l'échangeur dont le design a été optimisé numériquement en utilisant un banc expérimental dédié et des méthodes de mesures appropriées (vitesses dans l'écoulement, pressions, températures et flux thermiques). Une confrontation des résultats expérimentaux et numériques sera entreprise. Au préalable, les performances d'un échangeur de chaleur non optimisé pourront être quantifiées, cela permettra de mettre en place toutes les techniques expérimentales dont celle de fabrication de l'échangeur par impression 3D.

La responsabilité de la partie (1) est confiée à Charbel Habchi au Liban, qui travaillera en étroite collaboration avec Pierre-Henri Cocquet à l'UPPA, qui aura la responsabilité de la partie (2). Yves Le Guer sera quant à lui responsable de la partie expérimentale (3) développée à Pau et de l'établissement des comparaisons avec les résultats numériques. Par ailleurs, Kamal El Omari (co-inventeur du brevet), actuellement à l'Université de la Réunion, collaborateur d'Yves Le Guer et de Pierre-Henri Cocquet, spécialiste de mécanique des fluides numérique apportera aussi son concours dans le cadre de ce projet de thèse, il fera notamment parti du comité de suivi de thèse du doctorant qui sera mis en place dès le début de la thèse.

IV.8. Calendrier prévisionnel des mobilités

Au cours de chacune des trois années de doctorat, il est prévu une durée de séjour de 4 à 6 mois en France selon les années. L'activité de modélisation et de simulation numérique pourra être entreprise aussi bien à l'Université NDU au Liban qu'en France à l'UPPA, les moyens de calcul intensif Aquitains (mésocentre de calcul) ou nationaux (CINES) seront utilisés. L'activité expérimentale est elle prévue à l'UPPA.

Il est prévu que les périodes de mobilité du doctorant seront financés par Campus France par le biais du programme CEDRE 2020 pendant les deux premières années de doctorat. Pour la 3^{ème} année, il est envisagé de faire appel au dispositif E2S UPPA « International Mobility Grant ».

Les mobilités des chercheurs liés au projet de recherche du doctorant seront financées via le programme CEDRE 2020 (la réponse à l'appel d'offre Campus France pour ce programme sera faite avant le 3 juin 2019).

IV.9. Diffusion/valorisation des résultats

La diffusion des résultats se fera au travers de la participation à des conférences internationales et des publications internationales de rang A.

Les développements expérimentaux se feront pour partie dans le cadre d'un projet de maturation (E2S UPPA et SATT Aquitaine) concernant le développement de la technologie prévue suite au dépôt de

brevet des chercheurs de l'UPPA en 2019 (Y. Le Guer et K. El Omari). Dans ce cadre, la recherche de partenaires industriels sera réalisée (clients potentiels avec cahier des charges, fabricants d'échangeurs ou de réacteurs, ...). Une pré-étude a déjà été réalisée (mars 2019) par le cabinet UMI de Lyon pour tester le marché de notre innovation à l'échelle mondiale, celle-ci a donné des résultats encourageants.

IV.10. Compétences requises

Le doctorant recruté devra posséder une formation en Génie Mécanique avec un bon niveau en mécanique des fluides.

De bonnes connaissances en mathématiques sont aussi requises ainsi que des aptitudes pour la modélisation et la simulation numérique. Un goût pour les activités expérimentales serait un plus.

Une bonne maîtrise de la langue anglaise est requise.

Date : le 6 mai 2019

Noms et signatures (directeurs de thèse)

Charbel Habchi

A blue ink signature of Charbel Habchi, featuring a stylized, cursive script with a prominent horizontal stroke at the end.

Yves Le Guer

A blue ink signature of Yves Le Guer, consisting of a few sharp, angular strokes.

Pierre-Henri Cocquet

A blue ink signature of Pierre-Henri Cocquet, written in a clear, cursive style.