

Projets du parcours Artem 2A et consignes pour le département *Énergie & Fluides*

Version du 11 avril 2018

Les projets de ce catalogue¹ ont été présentés oralement aux élèves le 22 novembre 2017. Les élèves ont choisi leur projet ce jour même : les élèves ayant choisi un sujet sont listés à la fin de la section de chaque sujet. Voyez, sur les créneaux de projet, [l'emploi du temps en section 2 de la page 2A du département, http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/depEF/2A](http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/depEF/2A).

On attire l'attention des élèves sur les consignes de *gestion de projet* de l'**annexe A**.

Le *rapport de projet final* sera envoyé par mel au responsable du département et à tous les tuteurs au plus tard **mercredi 6 juin à 12h**. Dans les mêmes délais, un exemplaire imprimé de ce rapport sera déposé dans le casier du responsable de département². Ce rapport fera 20 à 30 pages hors annexes, 30 à 60 pages avec annexes pour les binômes ; 25 à 35 pages hors annexes, 40 à 70 pages avec annexes pour le trinôme. Sous la forme d'un PDF navigable, il devra comporter au moins une annexe. Il devra comporter une bibliographie étoffée référencée dans le corps du texte, suivant les consignes de l'**annexe B**. Il présentera de façon *scientifique* le sujet du projet, dans son contexte, le travail effectué, enfin, quelques conclusions et perspectives.

Les *soutenances finales* seront placées le **lundi 11 ou mardi 12 juin**.

Vous préparerez un exposé oral *scientifique* de 25 minutes pour les binômes, 35 minutes pour les trinômes, avec les mêmes items que le rapport (sujet dans son contexte, travail, conclusions et perspectives) mais sur la base d'une *présentation* vidéo PPT ou PDF.

Après votre soutenance vous serez soumis à une séance de questions - réponses de la part de vos tuteur(s) et responsable de département.

1. L'ordre de ces sujets importe peu.

2. Mon casier se trouve au 1^{er} étage du bâtiment A, à droite de l'ascenseur, en face du bureau A127.

1 Mesure des propriétés thermiques de matériaux isolants à haute température

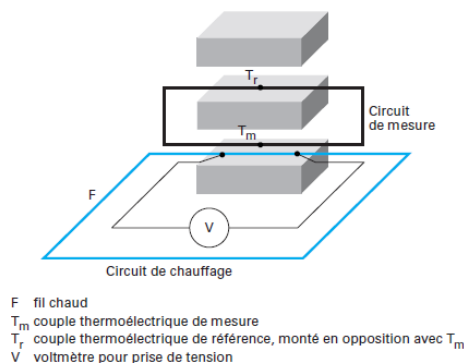
Tuteur : Yves Jannot, IR CNRS
03 72 74 43 08
yves.jannot@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

La connaissance des *propriétés thermiques des isolants* et en particulier de leur *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. Ainsi, 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 leur matériaux. Cela concerne en particulier la phase de recherche-développement pendant laquelle de nombreux essais de formulation vont être réalisés en produisant 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 mm². Le coût d'une mesure est par ailleurs très élevé.

On étudie donc au LEMTA la mise au point d'une alternative du même ordre de précision mais moins coûteuse à cette méthode. Une première étude réalisée dans le cadre d'un contrat de recherche pour la société **Saint-Gobain Recherche** (SGR) a permis de mettre au point une méthode fluxmétrique par comparaison (CFM) en régime permanent, permettant la mesure de la conductivité sur des échantillons de 300 x 300 mm² (voire 150 x 150 mm²). Cette méthode nécessite toutefois l'utilisation d'un échantillon de référence de conductivité thermique connue, pour l'instant mesurée par le LNE.

L'objectif est ici d'étudier et de mettre en place un dispositif de mesure basé sur la *méthode transitoire du fil chaud parallèle* (FCP - schéma de principe ci-dessous) pour obtenir cette valeur de référence.



On notera que la méthode FCP ne s'applique que sur des matériaux isotropes, elle ne peut donc pas remplacer la méthode CFM pour les matériaux anisotropes.

Le travail de projet consistera en :

- Une étude bibliographique sur la méthode du fil chaud parallèle.
- Une *modélisation simplifiée* 2D avec *résolution analytique* du champ de température.
- Une *modélisation complète* 2D avec *résolution numérique* du champ de température.
- Une *optimisation* des dimensions du dispositif et des échantillons par étude des sensibilités réduites.
- 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**.

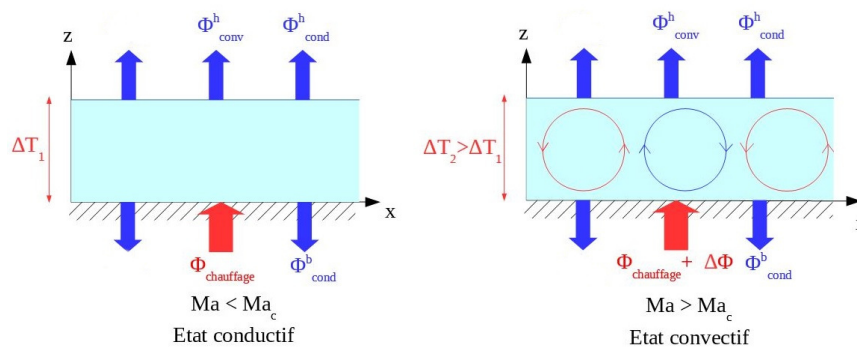
Élèves ayant choisi ce sujet : Jean-Baptiste Behnke, François Fotré & Cédric Gosselin.

2 Analyse des structures en thermoconvection de Bénard Marangoni

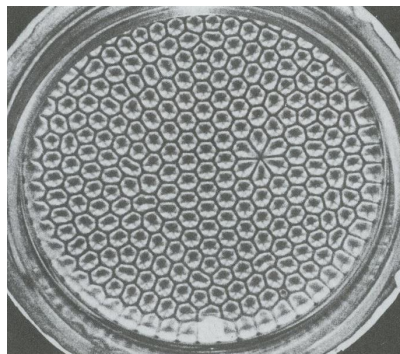
Tuteurs : Thomas Varé, doctorant UL Chérif Nouar, DR CNRS
 03 72 74 43 22 03 72 74 42 77
thomas.vare@univ-lorraine.fr cherif.nouar@univ-lorraine.fr
 LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Une fine couche de fluide chauffée par le bas peut être le siège d'une *instabilité thermocapillaire* appelée *instabilité de Bénard-Marangoni*. Cette dernière est causée par des gradients de tension superficielle dus à des inhomogénéités de température qui vont avoir tendance à provoquer un mouvement du fluide. Lorsque ce phénomène, connu sous le nom d'*effet Marangoni*, est suffisamment important pour l'emporter sur la diffusion thermique et les forces de frottement dues à la viscosité, on observe l'apparition de *cellules de convection*. Le nombre de Marangoni Ma est la grandeur adimensionnelle permettant de quantifier les variations de tension superficielle nécessaires au déclenchement de la convection : cette dernière a lieu à partir d'une valeur critique de ce nombre notée Ma_c , comme visible sur le schéma de principe ci-dessous :



La convection peut s'organiser suivant différentes « *structures* » ou « *motifs* » comme des *rouleaux* ou des *hexagones* ; ci-dessous une photographie d'hexagones vus de dessus, due à Koschmieder :



On propose une *étude théorique* de ce problème pour déterminer l'*influence des transferts de chaleur* d'abord sur le *seuil* à partir duquel la convection s'amorce, puis sur les *motifs de convection* qui émergent à proximité de ce seuil.

Une première phase de modélisation aboutira à l'écriture des équations descriptives du système. Ensuite, on utilisera une *analyse de stabilité linéaire* pour déterminer les conditions critiques à partir desquelles la convection se développe. Enfin, dans un troisième temps, on utilisera une *analyse de stabilité faiblement non linéaire* pour étudier la stabilité des différents motifs de convection à proximité du seuil. Les analyses de stabilité seront menées numériquement en utilisant une *méthode spectrale* basée sur les polynômes de Tchebyshev. La programmation se fera avec les logiciels Mathematica pour les calculs formels et Matlab pour les calculs numériques.

Références :

- HEDDY MEZGER 1946 Loi de variation de la tension superficielle avec la température, *J. Phys. Radium* **7**, 303-309.
- PEARSON, J. R. A. 1958 On convection cells induced by surface tension, *J. Fluid Mech.* **4**, 489-500.
- CLOOT, A. & LEBON, G. 1984 A nonlinear stability analysis of the Bénard-Marangoni problem, *J. Fluid Mech.* **145**, 447-469.
- BRAGARD, J. & VELARDE, M. G. 1998 Bénard-Marangoni convection : planforms and related theoretical predictions, *J. Fluid Mech.* **368**, 165-194.
- CHARRU, F. 2007, Instabilités Hydrodynamiques. *EDP Sciences*.

Élèves ayant choisi ce sujet : Antoine Bidel & Raphaël Rey.

3 Étude expérimentale de courants de gravité avec suspensions de particules

Tuteur : Yvan Dossmann, MC UL
03 72 74 42 83
yvan.dossmann@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

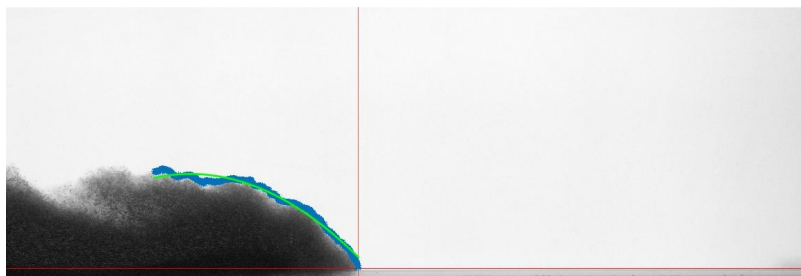
Descriptif du sujet :

Les *courants de gravité* sont présents dans de nombreux systèmes géophysiques ou industriels. Ces *écoulements stratifiés*, liés à des hétérogénéités de masse volumique, comme dans de l'eau plus ou moins chargée en sel, sont fréquemment rencontrés en présence de *suspensions de particules* : ainsi de la neige dans les avalanches, ou des sédiments dans les courants de turbidité. Ces suspensions de particules affectent la dynamique de l'écoulement, en induisant notamment des *effets non newtoniens*.

Un grand nombre d'études a porté sur la *dynamique turbulente* des courants de gravité en l'absence de particules. Une configuration de type 'lock-exchange' entre deux fluides homogènes et miscibles a permis une description exhaustive de la dynamique turbulente des courants de gravité (Prastowo et al. 2008).

La dynamique de courants de gravité avec suspension de particules a été étudiée à bas nombre de Reynolds (Saha et al. 2013). En revanche, le lien entre les propriétés rhéologiques du fluide et la dynamique de l'écoulement en régime turbulent est peu décrit.

L'objectif de ce projet est une *étude essentiellement expérimentale* des *effets d'une rhéologie complexe dans les courants de gravité fortement chargés en particules* et de l'*influence des fortes valeurs de concentration sur la turbulence et le transport*. L'*expérience du Lemta* déjà en place sera utilisée, et les élèves poursuivront le *développement de méthodes de mesures originales* pour suivre la dynamique de l'écoulement. En particulier, des *mesures optiques de densité à haute résolution spatiale*, développée par exemple par Blanc (2017), seront étendues dans le cas de suspensions de particules concentrées. Ces mesures ont par exemple permis, sur l'image ci-dessous, de localiser précisément un front entre une zone légère et une zone dense contenant des particules :



Un travail bibliographique et d'analyse complètera cette étude. Pour le traitement des données et des images, on utilisera le logiciel Matlab.

Références :

BLANC, B. 2017 Étude des écoulements de gravité avec suspension de particules. *Rapport de stage 3A, ENSEM filière EM-SYS*.

PRASTOWO, T., GRIFFITHS, R. W., HUGHES, G. O. & HOGG, A. MCC. 2008 Mixing efficiency in controlled exchange flows. *J. Fluid Mech.* **600**, 235-244.

SAHA, S., SALIN, D., & TALON, L. 2013 Low Reynolds number suspension gravity currents. *Eur. Phys. J. E* **36** 10,385.

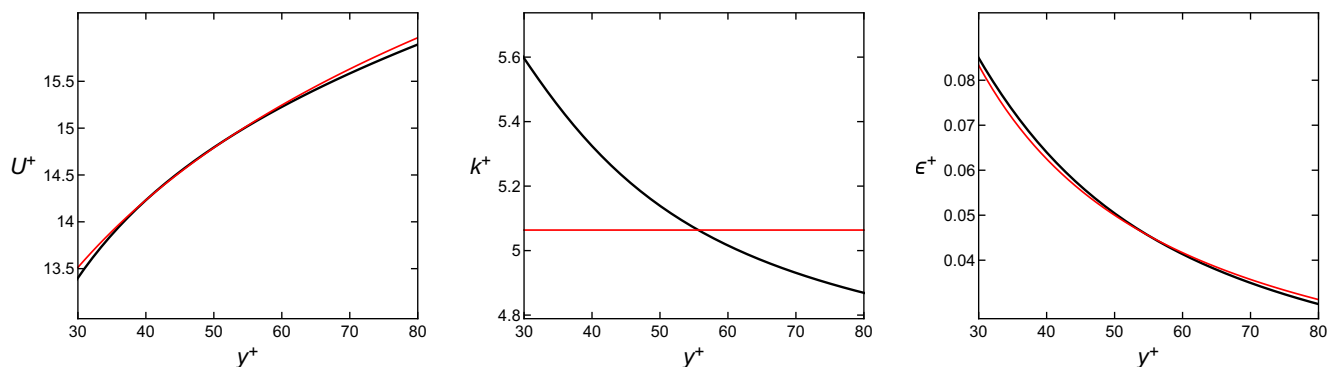
Élèves ayant choisi ce sujet : Quentin Bucquet, Matthieu Regnier & Cécilia Hernandez-Simonet.

4 Améliorer le modèle $k - \epsilon$: lois de paroi - comparaisons à des SND en canal plan

Tuteur : Emmanuel Plaut, PR UL
03 72 74 49 10
emmanuel.plaut@univ-lorraine.fr
LEMTA site ENSEM, Vandœuvre-lès-Nancy

Descriptif du sujet :

Les *modèles de turbulence avec moyenne de Reynolds* ('*RANS models*'), comme le modèle $k - \epsilon$, sont souvent utilisés en recherche & développement pour étudier des systèmes de grande taille, par exemple, pour l'étude du sillage d'éoliennes (van der Laan et al. 2014). En effet, des simulations numériques directes (SND) ou même des simulations numériques des grandes échelles seulement requerraient trop de puissance de calcul. De plus, pour ne pas avoir à utiliser un maillage trop fin, les *conditions limites* près du sol sont en général écrites dans la *couche externe* comme des « *lois de parois* » analytiques. Celles-ci résultent du modèle de Karman - Prandtl des couches limites turbulentes : une hypothèse de longueur de mélange est utilisée pour estimer la viscosité turbulente et l'écoulement moyen ; le modèle $k - \epsilon$ est utilisé pour estimer les champs turbulents. Cette approche peut bien sûr être utilisée pour des systèmes plus simples et plus petits comme un écoulement en *canal plan*. Dans ce cas, des comparaisons avec des SND ou des expériences sont plus accessibles, ce qui permet de « questionner » les lois de paroi, introduites pour $k - \epsilon$ dans les années 1970 mais sans validation claire. Machrafi et al. ont mené en 2017 une étude systématique d'écoulements en canal avec le modèle $k - \epsilon$. Des solutions « globales », de la couche externe près de la paroi jusqu'au centre du canal, ont été obtenues avec une méthode spectrale, et comparées à des SND. Dans la lignée de ce travail (Plaut 2017), on a montré par comparaisons aux SND de Lee & Moser (2015) (dont les résultats sont publiés sur le site <http://turbulence.ices.utexas.edu>) que les *lois de paroi du modèle $k - \epsilon$ standard posent problème*. Ceci est visible sur les figures ci-dessous, qui montrent, en adimensionnement « interne », en fonction de la distance réduite à la paroi y^+ , la vitesse moyenne U^+ , l'énergie cinétique turbulente moyenne k^+ , et la dissipation turbulente moyenne ϵ^+ extraites de la SND de Lee & Moser (2015) à $Re_\tau \simeq 5200$ en noir et les lois de parois analytiques « optimales » en rouge ³ :



Alors que les profils de U^+ et ϵ^+ modèles approximent bien ceux de la SND, pour k^+ , le modèle prévoit un plateau dans la couche externe, en contradiction avec la SND qui montre une décroissance de k^+ dans la couche externe. L'étude de Plaut (2017) montre aussi que, lorsque l'on s'éloigne de la couche externe pour aller vers le centre du canal, la viscosité turbulente ou l'énergie cinétique turbulente sont mal prédites par le modèle $k - \epsilon$ standard, tandis que l'équation de la dissipation pose problème.

On propose d'*améliorer le modèle $k - \epsilon$* . On explorera des modèles améliorés du type de celui de van der Laan et al. (2014), dans lesquels la loi de viscosité turbulente est modifiée à l'aide d'une fonction qui introduit de nouveaux degrés de liberté. On s'appuiera sur la *comparaison à des SND*, en essayant

3. Gris sur le document papier

autant que faire se peut de développer des *calculs analytiques* (par exemple à très haut Reynolds), et une ou des *résolutions par méthode numérique spectrale* (le code de Machrafi et al. sera un bon point de départ).

Références :

LEE, M. & MOSER, R. D. 2015 Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau \simeq 5200$. *J. Fluid Mech.* **774**, 395–415.

MACHRAFI, A., SANQUER, H. & EL JAZOULI, C. 2017 Modèle $k - \epsilon$ d'écoulements turbulents en canal plan : comparaison à des simulations numériques directes. *Rapport de projet 2A, Mines Nancy département Énergie & Fluides*.

PLAUT, E. 2017 Study of the channel flow DNS of Lee & Moser (2015). Tries to fit the $k - \epsilon$ model on the high-Reynolds number DNS. *Rapport interne Lemta*.

VAN DER LAAN, M. P., SØRENSEN, N. N., RÉTHORÉ, P.-E. et al. 2014 An improved $k - \epsilon$ model applied to a wind turbine wake in atmospheric turbulence. *Wind Energy* **18**, 899-907.

Élèves ayant choisi ce sujet : Paul Baumann & Younes Yaakoubd.

A Memento gestion de projet

Nous comptons sur les élèves pour mettre en place, sous la conduite de leur(s) tuteur(s), de bonnes pratiques de *conduite de projet*.

En particulier, *après chaque séance projet* affichée à l'emploi du temps, *envoi rapide* (délai \lesssim 24 h) aux tuteurs et à tous les élèves du groupe d'un *bref compte rendu du travail effectué* pendant la séance, des *décisions prises* concernant la marche du projet (notamment, répartition des tâches entre les élèves du groupe - projet), enfin, des *propositions pour la séance projet suivante : demande ou rappel de RV*, avec ordre du jour, ou *proposition détaillée de travail en autonomie*.

B Consignes pour la bibliographie

Cette bibliographie doit être étoffée par rapport à celle (éventuellement) fournie ici. Pour la présenter, vous suivrez au moins dans ses grandes lignes la norme ISO 690, décrite sur [le document suivant](#)⁴. Vous pourrez aussi vous inspirer de la façon avec laquelle Emmanuel Plaut présente les bibliographies de ses photocopiés⁵.

4. D'Annie Laroche-Joubert ; lien explicite : <http://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/bibliographie.pdf> .

5. Une variante de la norme ISO 690 dans laquelle l'année de publication, considérée d'une grande importance, est placée plus tôt, juste après les noms des auteurs. Notez que l'utilitaire bibtex couplé au traitement de texte scientifique LaTeX peut vous aider, cf. <http://emmanuelplaut.perso.univ-lorraine.fr/latex> .