

Titre du projet

MICROFLUIDIQUE DIPHASIQUE ET TRANSFERTS DE CHALEUR

Responsable du projet : Lounès TADRIST
En collaboration avec : Maxime CHINAUD et Irina MARTIN

Key words

Micro-scale Heat transfer, Liquid-vapour phase change, Two-phase flow microfluidic, reference experiments

Mots clés

Microthermique, Microfluidique diphasique, changement de phase liquide-vapeur, expériences de référence

1. Contexte général et motivations

Les systèmes et les composants de conversion d'énergie impliquent généralement de la chaleur. Pour assurer le bon fonctionnement de ces systèmes, la chaleur générée doit être contrôlée en créant des architectures fluidiques appropriées. De nombreuses techniques ont été mises en œuvre pour assurer le transfert de chaleur à l'interface entre une paroi et un fluide (Léal et al. 2013). Ces techniques sont basées sur la perturbation des couches limite, la structuration des surfaces pour favoriser l'initiation de l'ébullition. Ces techniques ont permis d'améliorer le transfert thermique (Bergles 2011). Avec le développement de composants miniaturisés aux fonctions de plus en plus complexes en microélectronique par exemple, les densités de flux thermiques à extraire sont proches de 500 W.cm^{-2} . Pour les futures centrales électronucléaires à fusion, les densités de puissance à extraire avoisinent 5000 W.cm^{-2} (www-fusion-magnetique.cea.fr). Ainsi, pour les technologies de nouvelle génération, les densités de flux thermique à extraire seront de l'ordre de 500 à 5000 W.cm^{-2} associées à des coefficients de transfert thermique proches de $500 \cdot 10^3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. **Ces caractéristiques thermiques sont actuellement inaccessibles par les techniques existantes.** A titre d'exemple, Liang et al. (2019) ont atteint des densités de flux thermique d'environ 600 W.cm^{-2} en laboratoire.

Ce projet se concentre sur des études fondamentales pour comprendre les mécanismes de transfert de chaleur aux interfaces à la transition entre l'ébullition convective et nucléée. Le projet permettra le développement de nouveaux concepts pour mettre en œuvre des techniques originales d'amélioration des transferts de chaleur.

Motivations de l'étude en apesanteur

Les processus d'ébullition mettent en jeu des phases liquide et vapeur dans lesquels le rapport des densités entre ces phases est généralement très important (pour l'eau par exemple $\rho_L/\rho_v \approx 10^3$ à pression atmosphérique). Les forces de volume s'appliquant sur la phase vapeur engendrent des glissements entre ces deux phases sur le solide. Les expériences d'ébullition menées sur terre masquent plusieurs phénomènes en particulier au niveau de l'interface entre le fluide et la paroi. Dans cette zone la couche limite thermique est particulièrement importante pour les échanges diphasiques car c'est le lieu de la transition de phase liquide-vapeur au niveau de la ligne de contact joignant les trois interfaces. Pour pallier ce problème important, une expérience de référence RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation) a été conçue et réalisée par un consortium de recherche européen. Elle a fait l'objet de plusieurs développements pour étudier le phénomène d'ébullition sur site isolé en apesanteur.

RUBI est un dispositif expérimental visant à étudier les phénomènes fondamentaux des processus de transfert de chaleur par ébullition sur une surface chauffée. **Le caractère original de ce dispositif consiste à étudier la dynamique macroscopique des bulles associée aux phénomènes microscopiques situés dans les micro-couches du site d'ébullition en absence de mouvements de convection induits par la gravité.** L'expérience RUBI a été conçue dans le but d'obtenir des données macroscopiques et microscopiques locales détaillées dans des conditions de microgravité bien contrôlées. Elle a pour ambition d'être une expérience de référence pour développer des modèles théoriques et numériques sur le transfert de chaleur par ébullition. Cette expérience a été dotée d'un système complémentaire afin d'étudier l'influence des forces externes dans la dynamique des bulles de vapeur. Les forces de flottabilité étant nulles en conditions de microgravité, elles ont été remplacées par des forces électriques

(forces volumiques) ainsi que par des forces de cisaillement (forces surfaciques). **Les objectifs de l'expérience RUBI se concentrent sur l'amélioration de la modélisation des processus d'ébullition y compris en condition de gravité normale.**

Cette expérience de référence RUBI a été finalisée et testée sur terre à la fin de l'année 2018 par l'équipe de développement d'Airbus. En juillet 2019, RUBI a été transplantée dans la Station spatiale internationale. La mise en route de l'expérience a débuté en septembre 2019 et les premières expériences ont été réalisées entre octobre 2019 et Février 2020. Une seconde série d'expériences sera conduite dans la période septembre – décembre 2021.

2. Objectifs de l'étude et projet du post-doctorant

Le but de ce projet de recherche est de mieux comprendre les phénomènes de transfert de chaleur lors du changement de phase liquide vapeur généré au niveau d'une paroi chauffée. Ces travaux s'appuient sur les données fournies par l'expérience de référence RUBI. Depuis la fin de la première campagne expérimentale (février 2020), le groupe de recherche constitué de plusieurs laboratoires européens (TTD-Allemagne, IMFT-France, UNIP-Italie, TIPS-Belgique, AUTH-Grèce, AMU-France) dispose d'une banque de données importante qui sera exploitée dans le courant de l'année 2020-2021. Actuellement, les équipes se concentrent sur la stratégie d'exploitation des données : près d'un millier d'expériences ont été réalisées à ce jour. Une seconde série d'expériences a été conduite dans le courant du premier trimestre 2021.

Cette banque de données est unique et prometteuse. En effet, la démarche originale de RUBI permettra sans doute d'apporter les réponses aux nombreuses questions non encore élucidées sur la micro-mécanique du changement de phase au niveau de la ligne triple. **Les conditions opératoires uniques de RUBI seront l'occasion d'obtenir des résultats clairs, originaux et nécessaires pour la modélisation des transferts de chaleur au niveau des interfaces et de la ligne de contact.** Notamment les données analysées permettront de bâtir une théorie des phénomènes de nucléation, de croissance et de détachement des bulles hors gravité.

Le projet de post doc

Le post-doc effectuera ses recherches à l'IUSTI. Il apportera dans un premier temps une contribution à l'analyse des données expérimentales recueillies lors de la première campagne de test de RUBI. Le second volet du post-doc portera sur l'élaboration d'éléments théoriques de l'ébullition en apesanteur. Le post-doc sera intégré au consortium de recherche européen et participera aux deux manifestations scientifiques prévues en 2022. Le congrès de l'IPHMT initialement prévu en juin 2021 à Marseille est reporté en 2022. De même celui de l'ITW prévu en novembre 2021 à Kobé au Japon est reporté pour l'année 2022. Lors de ces deux manifestations, des sessions seront dédiées à la présentation des résultats obtenus avec l'expérience de référence RUBI.

Au plan des travaux expérimentaux, le post-doctorant aura en charge l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus à partir des données brutes fournies par l'expérience RUBI. Il s'agira de contribuer à la mise au point une méthode d'analyse automatisée et simultanée des signaux provenant des capteurs de RUBI (imagerie visible et infrarouge, micro-thermocouples). Il devra confronter ses résultats à ceux obtenus par les autres groupes de recherche du consortium. Ces données couplées de thermique, de thermodynamique et de micro-fluidique, mettront en évidence les caractéristiques de la nucléation, de la croissance et du détachement de bulles.

Après cette phase de consolidation et de validation des méthodes d'analyses des données, le post doc participera à l'analyse et l'interprétation des résultats pour une configuration d'ébullition nucléée. Cette analyse prendra en compte les aspects multi-échelles des phénomènes de transfert aux interfaces mis en jeu dans la couche limite et au niveau de la surface où l'ébullition prend place. Les autres groupes de recherche exploiteront les résultats pour des situations complémentaires où d'autres forces seront mises en œuvre lors de l'ébullition (forces électriques, forces de cisaillement).

De concert avec cette démarche d'analyse de données, une analyse théorique sera développée en collaboration avec les membres du consortium. Cette analyse intégrera les connaissances expérimentales issues de RUBI pour proposer des lois de transferts de chaleur prenant en compte les phénomènes physiques mis en jeu. Dans cette approche analytique, une attention particulière sera portée sur le phénomène de nucléation. En effet il sera possible d'étudier ce phénomène en s'appuyant directement sur les résultats issus de l'expérience RUBI.

Compétences requises

Les compétences à mettre en œuvre dans ce projet relèvent des transferts thermiques, de la micro-fluidique diphasique, des techniques d'analyse d'image et de traitement des données (imagerie visible, imagerie infrarouge, capteurs de températures, pression, ...).

Profil recherché : Expérimentateur ayant une bonne expérience dans les domaines du changement de phase liquide-vapeur, des interfaces, des transferts de chaleur et du traitement des données.

Au plan de l'analyse des phénomènes, le candidat devra avoir de bonnes connaissances théoriques sur les phénomènes de nucléation, de transfert de chaleur et des écoulements aux petites échelles.

Résultats attendus

- Meilleure compréhension de la contribution du changement de phase et des phénomènes induits aux transferts de chaleur lors de l'ébullition générée au niveau d'une paroi chauffée.
- Contribution à l'analyse des données fournies par l'expérience de référence RUBI.
- Contribution à l'analyse théorique du changement de phase liquide-vapeur
- Valorisation des résultats par des publications et participation à des conférences internationales
- Contribution à une meilleure maîtrise des phénomènes de transfert de chaleur dans les systèmes diphasiques pour les applications terrestres (générateurs de vapeur, intensification des transferts de chaleur, ...) et spatiales (boucles diphasiques pour le refroidissement de composantes électroniques).
- Préparation à des appels à projets au niveau national (ANR) et européen (ESA)

3. Environnement du post-doctorant, et participations aux activités d'enseignement et séminaires

Environnement du post doc

Le post doc travaillera dans un environnement structuré autour du projet RUBI en relation avec le consortium scientifique européen. Au niveau local il sera en relation avec trois enseignants-chercheurs :

- Maxime CHINAUD pour l'appui aux traitements des données et au développement du système de traitements d'images noir et blanc et imagerie infrarouge adapté à l'expérience RUBI.
- Irina MARTIN pour l'appui aux développements théoriques sur les phénomènes de transferts aux interfaces aux micro-échelles.
- Lounès TADRIST pour l'appui en physique du changement de phase et de l'interprétation des résultats expérimentaux et pour le développement des analyses théoriques sur les phénomènes d'ébullition et de transferts de chaleur couplés aux interfaces.

D'autres collaborations pourraient émerger avec d'autres chercheurs de l'Institut à l'occasion de son séjour et des séminaires qu'il présentera.

Autres demandes en lien avec le projet

1. La demande CNES effectuée en 2020 par L. TADRIST a abouti. Le projet expérimental sera enclenché dans le courant du second semestre de l'année 2021. L'objectif est de réaliser une expérience de référence dans le cas de l'ébullition multi-sites pour étudier les phénomènes d'interactions entre bulles sur les lois de transferts de chaleur. Cette étude s'appuiera sur les travaux et résultats obtenus à l'aide de l'expérience RUBI.
2. Un Projet ANR TraThI (Transferts Thermiques aux interfaces) (coordonnateur L. TADRIST) a passé la 1ère phase de sélection dans le cadre de l'AAPG 2021. Le projet complet été soumis pour la seconde phase en cours d'instruction. Il regroupe plusieurs partenaires au niveau national (IMFT, FEMTO-ST) et international (LTT-Univ. Ljubljana – Slovénie). Ce projet porte sur la réalisation de deux expériences modèles pour aider au développement d'un modèle de partition des transferts de chaleur lors de la transition de régime convection monophasique-ébullition nucléée.

Participation aux activités d'enseignement et séminaires

En outre de ses activités de recherche, le post-doctorant sera sollicité pour effectuer des enseignements auprès des étudiants de Master 2 et doctorants sur les techniques expérimentales en microgravité (6h) et/ou d'un cours sur le changement de phase et des écoulements diphasiques en microgravité (6h). Il sera également invité à effectuer 2 ou 3 séminaires dans les laboratoires de l'Institut de Mécanique.

4. Références

Bergles (2011) Heat and mass transfer, <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0872-y>

Léal et al. (2013), Int. Journal of Heat and Mass Transfer, [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.083](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.083)

Liang et al. (2019) Int. Journal of Heat and Mass Transfer, [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026)