

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Etude expérimentale de l'influence de la nature du fluide et de la géométrie de surface sur les performances thermiques d'un échangeur diphasique

Référence : **MFE-DMPE-2026-01**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 1/10/2026

Date limite de candidature : 30/04/2026

Mots clés : transferts thermiques, écoulement diphasique, ébullition convective, métrologie optique

Profil et compétences recherchées : ingénieur ou universitaire avec une formation en thermique, chimie des hydrocarbures, énergétique et/ou mécanique des fluides

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les systèmes de propulsion aérospatiaux modernes interviennent dans plusieurs secteurs industriels fortement innovants. L'amélioration de la performance d'un moteur aérospatial passe par une diminution du rapport poids-puissance. Un des organes clés du moteur est la chambre de combustion, dont les parois doivent supporter une forte charge thermique. Pour permettre une compacité suffisante de la chambre tout en garantissant la tenue thermomécanique des parois, un système de refroidissement pariétal est nécessaire.

Le système de refroidissement pariétal de certains systèmes de propulsion modernes est composé de circuits régénératifs. Ces derniers permettent un refroidissement actif de la paroi de la chambre de combustion via un transfert de la chaleur induite par le dégagement d'énergie dans la chambre de combustion vers un fluide caloporteur. Ils sont composés de canaux de refroidissement dans la paroi dans lesquels circule le fluide caloporteur. Suivant les conditions de fonctionnement du moteur, le caloporteur peut être partiellement ou totalement évaporé à la sortie de l'échangeur. En effet, l'ébullition est un phénomène fortement endothermique particulièrement adapté au refroidissement d'une paroi soumise à un fort flux thermique.

Ce processus est multi-échelles, complexe, et dépendant de nombreux paramètres. Cela rend difficile la prévision précise du taux de transfert de chaleur, et donc le dimensionnement de l'échangeur. Pour des flux thermiques modérés, le processus d'ébullition commence par une phase de nucléation, où de petites bulles de vapeur se forment à la paroi et croissent. A mesure que le flux thermique ou la fraction de vapeur augmentent, différents régimes d'écoulement diphasique peuvent être observés, présentant des phénoménologies distinctes. Au-delà d'un certain flux thermique, appelé flux thermique critique (CHF), le film d'eau liquide à la paroi s'évapore complètement et est remplacé par un film de vapeur. Le coefficient d'échange de chaleur chute alors brutalement, ce qui entraîne une forte augmentation de la température de paroi d'échange. Ce phénomène peut entraîner la destruction de la chambre de combustion, et doit donc être bien maîtrisé. Le caractère intrinsèquement instationnaire et local de l'ébullition, combiné avec le grand nombre de paramètres influant sur l'occurrence des régimes d'ébullition, rend le développement de modèles théoriques prédictifs complexes. Pour pallier à ce manque de modèles, des lois de corrélations empiriques ou semi-empiriques ont été progressivement développées. Le domaine de prédictibilité de chacune de ces corrélations reste néanmoins limité à des géométries d'échangeur et conditions de fonctionnement similaires à celles dans lesquelles elles ont été établies. Ce manque d'outils prédictifs fiables rend difficile la conception de nouvelles chambres de combustion.

Depuis plusieurs années, l'ONERA travaille sur cette thématique en développant une méthodologie de caractérisation de la thermique paroi couplée à la caractérisation du régime d'écoulement sur la maquette REMED [1]. Celle-ci consiste en un canal chauffé de section rectangulaire à faible rapport hauteur/largeur. Les travaux menés jusqu'à présent ont permis de valider la méthodologie expérimentale de caractérisation thermique / écoulement avec un

écoulement d'eau, de mettre en évidence plusieurs régime d'écoulement représentatifs de ceux décrits dans la littérature et de réaliser des mesures de coefficient d'échange afin d'établir des corrélations de type Nusselt. Ces mesures expérimentales se basent sur de l'imagerie haute cadence permettant d'identifier les régimes d'écoulement, ainsi que sur une implémentation innovante de la thermométrie de luminophores (PT) permettant de mesurer la température de paroi au travers de l'écoulement diphasique. Ces visualisations, ainsi que les régimes d'ébullition rencontrés, sont illustrées sur la Figure 1. Cette première étape du travail a été réalisée en utilisant de l'eau comme fluide caloporteur.

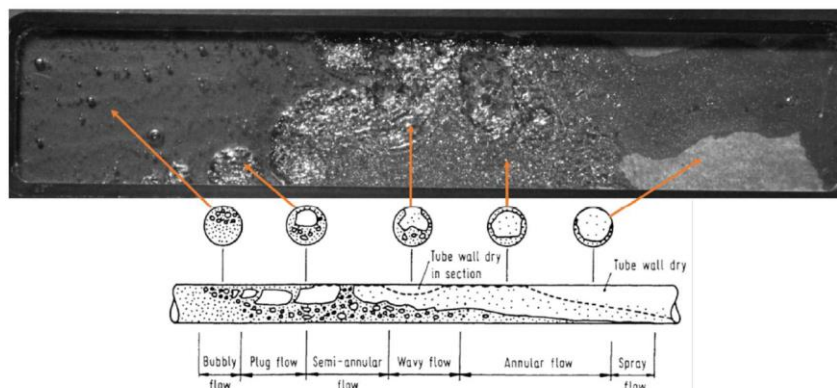


Figure 1 : Haut : Vue instantanée du mélange liquide/vapeur dans l'échangeur REMED à section rectangulaire, éclairé en lumière visible. L'écoulement va de la gauche vers la droite. Bas : reproduction d'un schéma de Stephan définissant des régimes d'ébullition dans un échangeur multiphasique à section circulaire. Des régimes de REMED peuvent être identifiés à ceux de Stephan [1]

L'objet du projet doctoral proposé ici est d'étendre ces caractérisations à des situations plus représentatives, permettant de reproduire une partie des phénomènes physiques rencontrés dans un système industriel. On s'intéressera en particulier à la géométrie de l'échangeur et son état de surface, ou encore la nature du fluide (tension de surface et aspect multi-composant).

Utiliser une huile d'un circuit hydraulique préexistant, ou le carburant liquide lui-même comme caloporteur avant son injection dans la chambre de combustion permet de se passer d'un circuit fluide annexe, et donc de gagner en poids et en encombrement. Qu'il s'agisse d'huiles, de kérosène ou de carburant de substitution durable (CSD, ou SAF en anglais), ces fluides sont composés d'un grand nombre d'espèces chimiques aux propriétés thermo-chimiques variées. En particulier, la température d'ébullition varie pour chaque composé. Cela conduit à une évaporation différentielle. Une des conséquences de cette évaporation différentielle est le changement de composition chimique des deux phases. Outre l'impact sur le fonctionnement de la chambre de combustion, cette évaporation différentielle se traduit également par une modification des propriétés physico-chimiques du fluide caloporteur (viscosité, diffusivité thermique, ...), ce qui influe sur les régimes d'ébullition et sur le transfert de chaleur. Une compréhension fine de l'impact du caractère multi-composant du fluide caloporteur sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur est donc de première importance pour l'utilisation de tels organes sur un moteur réel.

Un autre aspect lié à l'utilisation d'un carburant liquide comme fluide caloporteur est le risque de cokéfaction partielle du carburant à la surface d'échange de l'échangeur. Cette cokéfaction se traduit par la formation d'un dépôt sur la surface d'échange. Ce dépôt forme une couche isolante thermiquement, qui amoindrit l'efficacité du transfert de chaleur. Par ailleurs, la présence de ce dépôt altère également l'état de la surface d'échange (rugosité, porosité). Or la phase de nucléation de l'ébullition est fortement dépendante de l'état de la surface. On s'attend donc à une modification substantielle des régimes d'ébullition en présence d'un dépôt de carburant cokéfié à la paroi.

Cette thèse se propose d'étudier expérimentalement l'effet de la composition du fluide caloporteur sur l'efficacité d'un échangeur de chaleur régénératif. La première étape du travail consistera à déterminer une composition chimique d'un fluide multi-composant reproduisant certaines propriétés physico-chimiques d'un caloporteur réaliste (viscosité, tension de surface, courbe de distillation, ...) intervenant dans le processus d'ébullition. Ce fluide sera utilisé pour

caractériser macroscopiquement l'efficacité du transfert thermique et l'occurrence des régimes d'ébullition sur l'échangeur REMED. Une analyse locale se focalisera ensuite sur l'analyse de l'évaporation différenciée sur le régime de nucléation. Le caractère instationnaire et local des phénomènes physiques en jeu nécessitera l'utilisation d'outils de métrologie optique, tels que la thermométrie de luminophores et la visualisation directe à haute cadence. On cherchera ensuite à relier les observations locales sur la nucléation avec l'état de surface de la surface d'échange. Pour ce faire des parois d'échange à la rugosité contrôlée seront utilisées. En particulier, on s'attachera à reproduire l'état de surface d'un dépôt de carburant cokéfié.

[1] S. Hirsch, 2D Surface Phosphor Thermometry In A Shallow Boiling Water Channel, 54ème Journée Thématique de l'AFVL sur la Caractérisation des écoulements gaz-liquide à différentes échelles, 2024, https://www.afvl.fr/images/JThematique/JT54/JT54_Hirsch.pdf

Collaborations envisagées

DAAA ONERA Meudon, CEA Saclay

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Palaiseau

Contact :

Nicolas Fdida, Email : nicolas.fdida@onera.fr

Sylvain Petit, Email : sylvain.petit@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Guillaume Pilla,

Laboratoire : ONERA / DMPE, Université Paris Saclay

Email : guillaume.pilla@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>