

Caractérisation de l'ébullition convective sous différents régimes de gravité au sein de minicanaux à l'aide d'une technique inverse.

Sébastien LUCIANI*, David BRUTIN, Ouamar RAHLI, Christophe LE NILIOT, Lounès TADRIST

Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille - Laboratoire IUSTI
Technopôle de Château-Gombert - 5 rue Enrico Fermi - 13453 Marseille – France

*sebastien.luciani@polytech.univ-mrs.fr

Résumé - Cette communication présente l'application d'une méthode inverse à l'étude de l'ébullition convective afin de caractériser des transferts thermiques locaux dans des minicanaux. La méthode d'estimation consiste à inverser des mesures expérimentales (thermocouples) pour obtenir la température et la densité de flux dans un minicanal soumis à une ébullition convective. Le but est d'évaluer le coefficient d'ébullition local h associé. On étudie l'influence de la gravité sur les coefficients d'échanges lors de vols paraboliques.

Nomenclature

A	matrice	<i>Symboles grecs</i>	
W	matrice diagonale	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
U, V	matrice orthogonale	ϕ	densité de flux, $W.m^{-2}$
X	vecteur des inconnues	<i>Indices et exposants</i>	
B	vecteur second membre	<i>mes</i>	mesure
T	température, K	<i>mod</i>	modèle
h	coefficient convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>sat</i>	saturante
w	valeurs singulières	x, y, z	unité de mesure en m

1. Introduction

L'objectif de cette communication est de fournir des connaissances de base sur les systèmes de refroidissement diphasique au sein de canaux d'échelles millimétriques et micrométriques fonctionnant en microgravité. Les activités expérimentales couvrent les principales problématiques liées à cette thématique : transferts de chaleur, flux critique, interface liquide-vapeur et sont réalisées dans le cadre du projet MAP Boiling fondé par l'ESA. Des études précédentes ont montré l'influence de la gravité sur les structures des écoulements au sein de minicanaux (taille des bulles, régime du fluide) et ont permis d'étudier la stabilité de l'ébullition convective - [1]. L'analyse de ces résultats a conduit à la définition d'un coefficient convectif global plus important en microgravité.

L'aspect novateur de cet article réside ici dans l'introduction de méthodes inverses. L'approche inverse est indispensable dans notre configuration puisqu'il est impossible de placer un capteur de mesure à la surface des minicanaux étudiés sans perturber l'écoulement établi. De plus, cette démarche nous permet d'estimer les transferts thermiques locaux et plus particulièrement le coefficient convectif local dans un minicanal. Pour observer l'influence de la pesanteur sur l'écoulement et le comportement de l'ébullition convective, un dispositif expérimental a été conçu. Deux éprouvettes instrumentées sont embarquées pendant les vols paraboliques à bord de l'A300 du CNES (**Figure 1**); une pour la visualisation par caméra

rapide (les vidéos sont prises à 1000 img/s avec une vitesse d'obturateur de 250 μ s - 1024x512) et l'autre pour l'acquisition des mesures par thermocouples. Ils permettent de vérifier l'influence de la pesanteur sur les grandeurs de sortie (températures et pressions) pour trois niveaux de gravité : gravité terrestre (1g), hypergravité (1,8g) et microgravité (μ g).

2. Principe de fonctionnement

2.1. Présentation du dispositif expérimental

2.1.1. Expérience embarquée

Le rack est construit autour d'une enceinte de confinement au sein de laquelle ont lieu les expériences d'ébullition convective. Le principe retenu pour la présente étude est un canal chauffé par la face arrière, traversé par un fluide en écoulement. En régime d'ébullition, le fluide génère des bulles dont la taille varie en fonction du degré de confinement. Le dispositif est composé de plusieurs parties : les canaux instrumentés (où ont lieu les échanges thermiques), un condenseur à effet Peltier (cycle conçu pour récupérer la phase vapeur du fluide et la transformer en phase liquide) et un pousse seringue (pour injecter le fluide dans le minicanal). Ainsi élaboré, ce dispositif permet de contrôler les paramètres relatifs au chauffage et au fluide (température d'entrée dans le canal, flux de chaleur en face arrière, débit volumique en entrée de canal).

2.1.2. Présentation du minicanal

Le dispositif expérimental (**Figure 2**) est modélisé par un barreau rectangulaire composé de trois matériaux; une couche de polycarbonate ($\lambda=0,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) qui sert d'isolant, une semelle de ciment ($\lambda=0,83 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) instrumenté par 21 thermocouples et au milieu une plaque d'inconel® ($\lambda=10,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) dans lequel est gravé le minicanal. L'acquisition des pressions et des températures s'effectue simultanément à différents niveaux du canal où s'écoule le fluide. Le minicanal (50 mm de long, 6 mm de large et 200 μ m de haut) est gravé sur une plaque d'inconel centré sur la face supérieure. Au dessus du canal, nous disposons d'une série de capteurs de températures et de pression et à l'intérieur du barreau en ciment, 5 fils chauffants fournissent une puissance de 11 W. Enfin, 21 thermocouples (de type Chromel-Alumel, diamètre 140 μ m) sont situés à une hauteur de 9 mm soit à 1 mm de la plaque d'inconel et également répartis dans le sens de la longueur. Ces 21 capteurs nous permettent de connaître la température en différentes positions (x, y, z) du dispositif et constituent l'ensemble des mesures que nous cherchons à inverser afin de quantifier les transferts. Le système est isolé dans une enceinte de confinement maintenue à 41 °C. Les conditions limites aux frontières (contour du barreau) sont connues et prennent en compte la convection et le rayonnement (coefficient convectif équivalent de l'ordre de 3 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

2.2. Méthodes inverses

2.2.1. Mise en équation

L'estimation du coefficient d'échange est un problème inverse de conduction de la chaleur (PICC) - Beck [2], où l'on cherche à connaître les conditions limites inconnues dans un emplacement donné du système : le minicanal. La méthode est basée sur la méthode des éléments de frontière (B.E.M., Boundary Element Method) – [3], et utilisée au laboratoire pour la résolution des problèmes inverses - [4]. La démarche consiste à inverser les mesures

de températures données par les thermocouples afin d'estimer le flux de chaleur local et les températures de surface locales ($\phi_{surface}, T_{surface}$) à la surface de la plaque d'inconel. Les phases de microgravité et d'hypergravité étant stables pendant la durée de l'acquisition, nous avons pu moyenner sur 20 s les mesures des températures à inverser de manière à nous placer en régime permanent. Ces fonctions de l'espace sont les résultats de la résolution du problème inverse. L'estimation de ces 2 grandeurs constitue la solution du problème d'optimisation :

$$\hat{T}_{surface}, \hat{\phi}_{surface} = \arg \left\{ \min \left(\|T_{mod} - T_{mes}\| \right) \right\} \quad (1)$$

Dans cette dernière expression, les vecteurs T_{mes} et T_{mod} représentent respectivement les températures mesurées et les températures calculées dans notre modèle. Les inconnues (flux et températures surfaciques) sont obtenues en minimisant l'écart entre des mesures et leur modélisation mathématique. Compte tenu de la spécificité de la formulation *B.E.M.*, cette minimisation se fait au travers d'une fonction faisant intervenir une combinaison linéaire des mesures. Cette formulation conduit à un système de matrice d'équation linéaire :

$$AX=B \quad (2)$$

Le vecteur X contient toutes les inconnues incluant ($\phi_{surface}, T_{surface}$), B est un vecteur second membre où sont incluses une combinaison linéaire des mesures (T_{mes}) et les équations de frontière sont quand à elle rassemblées dans la matrice A . Notre système 3D présente 270 équations pour 255 inconnues (système surdéterminé). Classiquement, une procédure de résolution basée sur la minimisation de la norme de l'écart entre AX et B , peut être utilisée pour mettre en évidence une quasi solution de (2). Une solution explicite au sens des moindres carrés \hat{X} est obtenue comme étant la solution de l'**Equation 3** :

$$\begin{aligned} (A^T A) \hat{X} &= (A^T B) \\ \hat{X} &= \arg \left\{ \min \left(\|AX - B\|^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

Le vecteur \hat{X} ainsi obtenu contient toutes les températures de surface estimées ($\hat{T}_{surface}$) et le flux de chaleur surfacique ($\hat{\phi}_{surface}$) de sorte que nous puissions calculer le coefficient d'ébullition local \hat{h} dans le minicanal connaissant la température de saturation du liquide (T_{sat}). Cette température de saturation dépend de la pression de saturation du liquide et est calculée pour chaque mesure de pression le long du minicanal :

$$\hat{h} = \frac{\hat{\phi}_{surface}(x)}{\hat{T}_{surface}(x) - T_{sat}(P)} \quad (4)$$

Le problème inverse étant mal-posé au sens de Hadamard [5] nous observons pour la résolution numérique du système une instabilité de la solution \hat{X} vis-à-vis des erreurs de mesures introduites dans le vecteur B . Le caractère mal posé de notre système se traduit principalement par le fait que la solution est très sensible à la précision des mesures données par les thermocouples (précision des thermocouples et de leur position). Du point de vue numérique, la matrice A est mal conditionnée et les résultats sont instables. Pour obtenir une solution stable, nous devons utiliser des outils de régularisation : ici la méthode de troncature de spectre (*S.V.D.*, Singular Value Decomposition) [6].

2.2.2. Régularisation

La régularisation d'un problème inverse consiste à ajouter de l'information pour améliorer la stabilité de la solution vis-à-vis des bruits de mesure et/ou favoriser un type de solution

parmi toutes celles possibles. Le mauvais conditionnement de la matrice A se traduit par la présence de faibles valeurs singulières – Hansen [5] qui sont une conséquence de la présence d'équations quasiment dépendantes (indication d'une forte corrélation entre les inconnues). Cette approche permet de traiter notre problème inverse 3D où le maillage est déstructuré ; les éléments n'ont pas tous la même surface et donc la même sensibilité (**Figure 3**). La méthode de la troncature de spectre vise à écarter les valeurs singulières trop petites contenues dans la matrice W qui dégradent la stabilité du système. Le fait d'enlever ces équations améliore la résolution car elle écarte délibérément les équations qui perturbent le système. La matrice A peut se décomposer en un produit de matrices carrés (U et V sont des matrices orthogonales et W est la matrice diagonale des valeurs singulières w_j) :

$$X = \left(U^T \text{Diag} \left(\frac{1}{w_j} \right) V \right) B \text{ avec } A = UWV^T \quad (5)$$

A étant mal conditionnée, certaines valeurs singulières $w_j \rightarrow 0$ ($1/w_j \rightarrow \infty$) et les erreurs sont amplifiées. En utilisant *S.V.D.*, W^{-1} est tronquée des valeurs ($1/w_j$) trop grandes. Le vecteur solution évalué \hat{X} est fonction de la nouvelle matrice tronquée W_t^{-1} :

$$\hat{X} = (U^T W_t^{-1} V) B \quad (7)$$

On assiste comme pour la méthode par pénalisation (par exemple Tikhonov) à un lissage de la solution. Cependant, il est nécessaire d'expliquer comment s'effectue le choix des valeurs singulières à garder afin de stabiliser la solution. Il existe un moyen permettant de quantifier cette instabilité : le nombre de conditionnement. Il est défini par le rapport de la plus grande sur la plus faible des valeurs singulières contenues dans la matrice principale A . Le niveau de troncature est déterminé par la technique dite de la L-curve.

2.2.3. L-Curve

La solution corrigée dépend d'une valeur limite choisie par l'utilisateur. Pour éviter d'entrer dans des extrêmes et de perdre des informations, un outil appelé la L-curve a été introduit pour déterminer le nombre de conditionnement. Le but est de tracer sur une échelle logarithmique la norme de l'élément correcteur sur la norme de la minimisation des résidus calculés (**Figure 4**). La valeur optimale se trouve dans le creux du L où réside le meilleur compromis entre solution stable et résidus faibles. Cette valeur permet de définir le seuil de troncature et le nombre de conditionnement associé à notre problème (10^7 ici).

3. Résultats

3.1.1. Analyse

Nous avons inversé les mesures en différents instants décrivant le comportement de l'ébullition convective pour trois niveaux de gravité (μg , $1g$ et $1,8g$). De manière générale, le coefficient convectif local est plus élevé à l'entrée du minicanal (de l'ordre de $6 \times 10^3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ en microgravité et 4×10^3 en hyper et gravité terrestre) – phénomène qui est indépendant du niveau de pesanteur (variations de plus en plus grandes lorsque la densité de puissance augmente à l'entrée du minicanal). En ce qui concerne les profils de température, on remarque que la température dans le minicanal augmente suivant x (augmentation de 30°C - $x=15 \text{ mm}$ $T=56^\circ\text{C}$ et $x=65 \text{ mm}$ $T=92^\circ\text{C}$). Ce phénomène traduit bien un échauffement à l'origine de l'ébullition convective (formation des bulles). En effet, les fluctuations de flux sur le bord du minicanal témoignent des instabilités présentes (flux non constant), résultat confirmé par les

observations faites à travers la visualisation du deuxième barreau embarqué. Les instabilités créent des bouchons avec l'apparition de poches de vapeur. Ces poches ont pour effet d'augmenter la température de paroi au bord ($T_{sat} = 54^{\circ}\text{C}$), ce qui est en accord avec les profils de température surfacique obtenue par inversion (**Figure 5**).

3.1.2. Influence de la gravité sur les transferts thermiques

Au regard des profils de température en fonction de la gravité, il est clair que la gravité a une influence sur l'écoulement. Premier point, les résultats en gravité terrestre et en hypergravité sont analogues (moins d'un degré de différence). Deuxièmement, en microgravité, on remarque un écart de 4°C en moyenne (valeur supérieure aux incertitudes de mesures), ce qui confirme le fait qu'elle joue un rôle dans l'apparition des bulles de vapeurs. En ce qui concerne le coefficient convectif, il englobe 3 types de phases : zones liquides, diphasiques et vapeurs. En outre, dès que la vapeur remplit le canal, le coefficient d'échange chute fortement pour atteindre un niveau qui caractérise un transfert thermique avec seulement une phase vapeur. Pendant la phase de microgravité en entrée du minicanal ($x=20$ mm), il est plus élevé avec une valeur de l'ordre de $5500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ en comparaison avec la gravité terrestre et l'hypergravité où il est en moyenne égal à $3500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (**Figure 6**).

4. Conclusions et perspectives

Nous avons mis en évidence l'influence de la gravité sur l'ébullition convective au sein de minicanaux. Les transferts thermiques sont plus importants en microgravité. De plus, cette phase engendre des structures à poches de vapeur qui remplissent la largeur du minicanal alors que dans le cas de l'hypergravité, on observe une structure à bulle classique. Concernant les méthodes inverses, les incertitudes sur la position des capteurs sont à l'origine des perturbations, ce qui accentue le caractère mal posé du système. Selon nos études de sensibilité, les températures ne peuvent pas être évaluées sans prendre en compte l'erreur relative sur la précision des mesures (bruit) et sur le biais introduit par la position des thermocouples. Ces incertitudes entraînent des variations nettes sur la solution et particulièrement sur le flux surfacique. Une solution serait d'identifier les positions exactes en cassant le barreau de ciment et à posteriori il serait intéressant d'étudier l'influence d'une résistance de contact entre l'inconel et le ciment.

Références

- [1] Brutin D., Ecoulements liquides en microtubes et ébullition convective en minicanaux : étude expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I, France, 2003.
- [2] J.V. Beck, B. Blackwell, C.R.St. Clair, Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems, Wiley Interscience, New York, 1985.
- [3] C.A. Brebbia, J.C.F. Telles, Boundary Element Techniques, Berlin and New York, 1984.
- [4] Le Niliot C., *La méthode des Eléments de Frontière pour la Résolution de Problèmes Inverses en Conduction de la Chaleur : Applications numériques et Expérimentales*, Hdr 2002.
- [5] J. Hadamard, Le problème de cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques, Hermann, 1932.
- [6] P.C. Hansen, Rank-Deficient and discrete Ill-posed Problems, SIAM, Philadelphie, 1998.

Remerciements

Nous remercions le CNES et l'ESA (MAP Boiling) pour leurs soutiens financiers. Nous les remercions également de nous avoir permis d'accéder à l'expérimentation en μg à bord de

l'A300 - Zero-G. Nos remerciements vont également à Novespace pour leur aide technique lors de la réalisation de l'expérience et lors des campagnes de vols PF52/CNES et PF53/ESA.

5. Présentation des figures

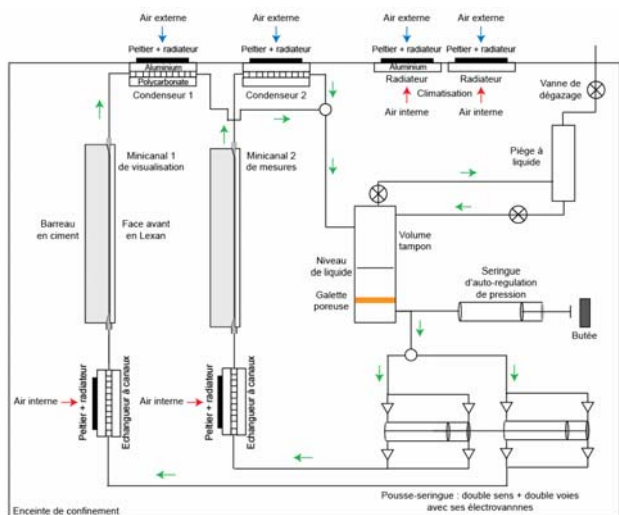


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

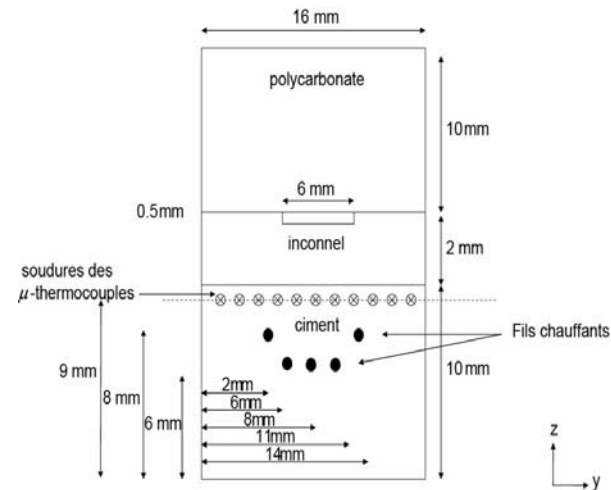


Figure 2 : Dimension du dispositif – coupe transversale

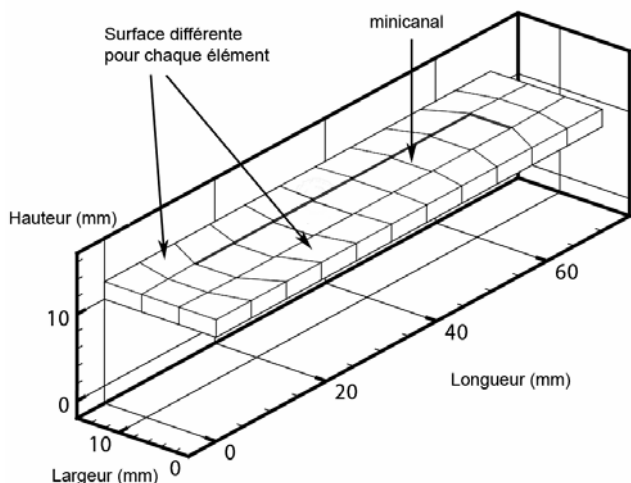


Figure 3 : Maillage 3D : seul les faces sont maillées

L-curve : Estimation du coefficient de régularisation par SVD

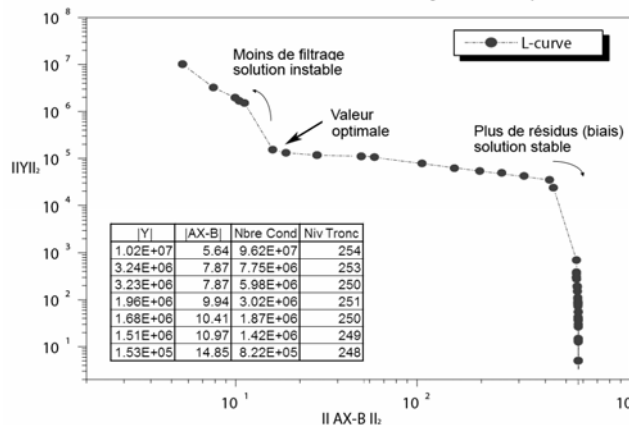


Figure 4 : Principe de la L-curve : estimation par troncature de spectre

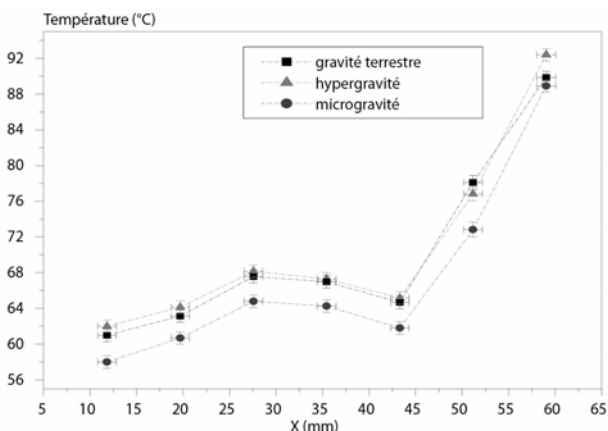


Figure 5 : Influence de la gravité sur le coefficient convectif h le long du minicanal (Débit massique : $3,8 \cdot 10^{-4}$ kg/s – Puissance par canaux : 11 W)

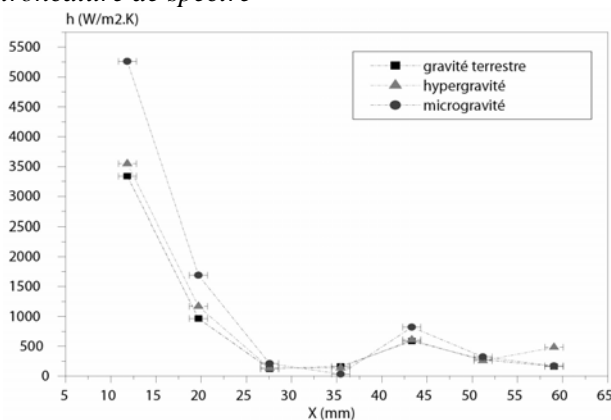


Figure 6 : Influence de la gravité sur la température surfacique le long du minicanal (Débit massique : $3,8 \cdot 10^{-4}$ kg/s – Puissance par canaux : 11 W)