



HAL
open science

Etude expérimentale de l'ébullition et de la crise d'ébullition en convection forcée dans un canal annulaire en pyrex en utilisant le R-11 comme réfrigérant

Youcef Bouaichaoui, Mohamed Semine, Salah Hanini

► To cite this version:

Youcef Bouaichaoui, Mohamed Semine, Salah Hanini. Etude expérimentale de l'ébullition et de la crise d'ébullition en convection forcée dans un canal annulaire en pyrex en utilisant le R-11 comme réfrigérant. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00166845

HAL Id: hal-00166845

<https://hal.science/hal-00166845v1>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EBULLITION ET DE LA CRISE D'EBULLITION EN CONVECTION FORCEE DANS UN CANAL ANNULAIRE EN PYREX EN UTILISANT LE R-11 COMME REFRIGERANT

Youcef BOUAICHAOUI^{1*}, Mohamed SEMINE¹, Salah HANINI²

¹ Centre de Recherche Nucléaire de Birine/ COMENA
BP 180 - Aïn Oussera - 17 200 - Djelfa

² LBMPT, Université Yahia Farès de Médéa

* bouaicha_73@hotmail.com

Résumé : Dans ce travail, on se propose de contribuer à l'étude expérimentale de l'ébullition et de la crise d'ébullition dans un canal de géométrie annulaire simulant, dans une certaine mesure, un canal d'un réacteur nucléaire avec un assemblage combustible comportant un seul élément combustible, l'énergie nucléaire étant remplacée par l'énergie électrique. Le fluide utilisé à cet effet, est le Fréon-11 qui offre l'avantage d'obtenir un changement de phase avec des niveaux de flux de chaleur relativement bas permettant ainsi l'étude du phénomène en écoulement diphasique. La section d'essai est en pyrex permettant de visualiser les transformations que subit la structure du fluide lors du chauffage par effet Joule. Les résultats ont permis d'observer notamment le phénomène de l'initiation de l'ébullition qui correspond à l'apparition des premières bulles de vapeur dans l'écoulement et celui de la crise d'ébullition qui accompagne la formation du manteau de vapeur autour de l'élément chauffant.

Mots clés : Ebullition, crise d'ébullition, convection forcée, écoulement diphasique,

1. INTRODUCTION

L'étude et la prédiction des phénomènes liés à l'ébullition et jusqu'à l'échauffement critique sont d'une importance capitale dans la conception et l'opération des réacteurs nucléaires. En effet, l'échauffement critique est caractérisé par une dégradation rapide du transfert de chaleur suite à une ébullition intense du réfrigérant et la formation d'une couche de vapeur qui s'interpose entre la surface de la gaine de l'élément combustible et le liquide et pourrait conduire à la destruction de l'élément.

De nombreux travaux de recherche ont été menés à ce sujet pour tenter d'expliquer le mécanisme physique des phénomènes accompagnant l'ébullition [1]. Sur le plan théorique [2,3], quelques modèles, chacun se basant sur des hypothèses propres, ont été jusque là développés. Toutefois, ces modèles demeurent encore peu précis par rapport aux relations empiriques.

Par ailleurs, un grand nombre de corrélations [4] permettant de prédire ces phénomènes existe dans la littérature, la majorité est établie pour des tubes circulaires refroidis à l'eau et n'est valable que dans un intervalle réduit de variation des conditions thermohydrauliques.

Dans cette optique, on a jugé intéressant de contribuer à de tels travaux [5] par une étude expérimentale de la convection forcée avec changement de phase à l'aide d'une boucle d'essai utilisant le R11 comme réfrigérant. Nous avons étudié, en particulier, l'initiation à l'ébullition et la crise d'ébullition. Les données récoltées ont été confrontées à celle de la littérature.

2. INSTALLATION EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTATION ASSOCIEE

La figure (1) représente le schéma de la boucle d'essai utilisée [6]. Elle est composée essentiellement de trois circuits, le circuit primaire qui comporte la section d'essai et où circule le Fréon-11, le secondaire de refroidissement utilisant de l'eau comme caloporteur, et enfin, le circuit complémentaire qui sert pour le refroidissement du circuit secondaire

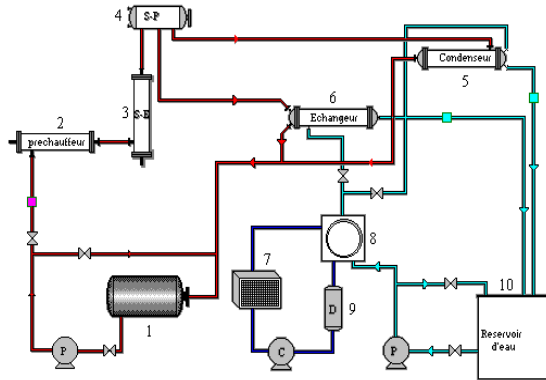


Figure 1 : Schéma global de la boucle

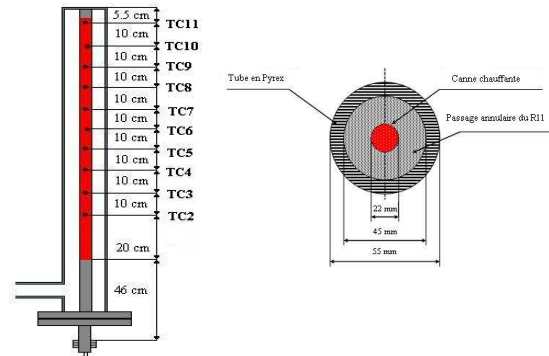


Figure 2 : section d'essais

Le Fréon-11 est aspiré à partir du réservoir (1) et refoulé, à l'aide d'une pompe, vers un pré chauffeur (2) et puis, vers la section d'essai (3) où il est successivement chauffé par effet Joule. L'énergie absorbée par le fluide est ensuite cédée dans un échangeur de chaleur (6) à l'eau du circuit secondaire de refroidissement qui, à son tour, la transmet à travers l'évaporateur coaxial (8) du circuit complémentaire au Fréon22. Le circuit primaire comporte également d'autres composants tels que le séparateur de phases(4) qui permet de séparer la phase liquide de la phase vapeur et le condenseur (5) qui sert à condenser le Fréon à l'état vapeur avant d'être renvoyé vers le réservoir.

La section d'essai, élément principal de la boucle illustrée en détail par la Fig.2. Elle est constituée d'une conduite cylindrique en verre de diamètre interne de 45 mm dans laquelle est insérée une canne chauffante (24 kW) par effet Joule qui permet d'obtenir les conditions de flux de chaleur désirées. La longueur active de la canne chauffante est de 1100 mm et son diamètre est de 22 mm. L'écoulement du Fréon-11 s'effectue à travers l'espace annulaire ($D_h=23\text{mm}$) qui sépare la canne chauffante de la paroi interne de la conduite. Dix thermocouples sont soudés à la paroi de la canne chauffante et répartis sur la longueur à des distances de 10 cm. Ces thermocouples sont reliés à un système de protection qui permet d'arrêter automatiquement le chauffage électrique dès qu'un seuil de température fixé au préalable est atteint par l'un d'entre eux. En outre, l'installation est munie d'un débitmètre à section variable pour la mesure du débit de Fréon-11 et de deux autres de type électromagnétique pour la mesure du débit d'eau dans l'échangeur de chaleur et dans le condenseur. La température des différents fluides est mesurée à l'aide de 13 thermocouples placés en des endroits judicieusement choisis sur l'installation. La pression du Fréon-11 est, quant à elle, mesurée à l'aide de manomètres installés en différents points du circuit primaire. Le point de mesure de la pression dans la section d'essai est situé à l'entrée du canal.

Enfin, tous les instruments de mesure sont connectés à une centrale d'acquisition de données laquelle est reliée à un PC afin de pouvoir suivre et contrôler, en temps réel, l'évolution de tous les paramètres de la boucle.

3. RESULTATS

3.1. Approche de l'initiation l'ébullition par la variation du débit de réfrigérant

Nous avons représenté sur la figure (3) la température de paroi enregistrée par deux thermocouples distants de 40 cm l'un de l'autre et sur la même figure, nous avons tracé la variation du débit. Nous notons que le régime stationnaire est atteint (après 200 secondes) et que la courbe représenté peut être divisé en deux régions distinctes, une région où les deux températures sont pratiquement confondues ce qui signifie que le fluide est encore à l'état simple phase liquide (la puissance étant faible, l'écart de température n'est pas décelable). Une deuxième région où les deux courbes se sépare l'une de l'autre. Cette séparation coïncide avec l'instant de diminution de la valeur de débit opérée lors de l'expérience. En effet, il est aisé de remarquer que la température enregistrée au voisinage de la sortie est nettement plus faible que celle de l'autre thermocouple situé à l'amont. Ceci ne peut être expliqué que par l'apparition de l'ébullition à cet instant au niveau du thermocouple TC11 et l'amélioration du transfert de chaleur, contrairement au thermocouple TC6 où le fluide reste monophasique (l'écart est de 4°C). Ceci est confirmé par l'observation de l'occurrence de l'ébullition lors de la variation du débit.

Pour étudier l'influence de la variation du débit de réfrigérant sur le déplacement de la cote d'ébullition, nous avons localisé visuellement la cote d'ébullition à travers la section d'essai transparente. En effet, la répartition de plusieurs thermocouples le long de la canne chauffante offre la possibilité de d'estimer la position de la cote d'ébullition dans la section d'essai pour différentes conditions de fonctionnement. Pour une valeur de débit maximale, le fluide dans la section d'essai est d'abord à l'état liquide. Nous réduisons le débit à petit pas jusqu'à obtenir, pour une certaine valeur, l'ébullition nucléée. Le point où apparaît cette ébullition est alors localisé sur le canal. En diminuant davantage le débit, ce point change de position dans le sens inverse de l'écoulement. La figure (4) illustre la variation de la position de la cote d'ébullition pour les différentes vitesses massiques et ce, pour un flux de chaleur de 3.946 W/cm² et une température d'entrée de 25°C. Sur la même courbe nous avons tracé la variation théorique de la cote d'ébullition calculée par la corrélation déduite des bilans thermique, Il est clair, d'après cette courbe, que la cote d'ébullition se déplace vers la sortie proportionnellement à l'augmentation de la vitesse massique et elle est fortement liée à la température de saturation qui, elle dépend de la pression de service, ceci nous a conduit à tracer sa variation théorique pour des valeurs de pression qui correspondent aux fluctuations de pression durant une expérience. Dans ce cas la pression varie entre 0.14 et 0.16 MPa. L'écart entre la cote d'ébullition mesurée et celle calculée ne dépasse pas les 15%.

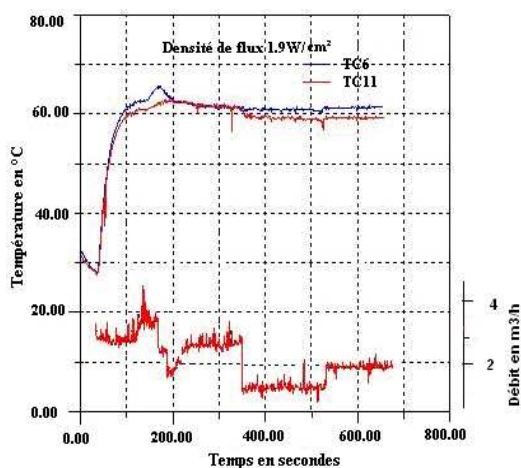


Figure3 : Effet de la variation de débit sur les températures de paroi
Albi, France du 28 au 30 Août 2007

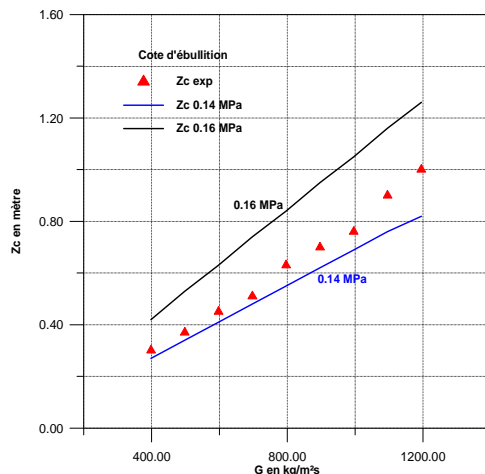


Figure 4 : Effet de la variation de débit sur la cote d'ébullition

3.2. Approche de la crise d'ébullition

Dans l'étude expérimentale de la crise d'ébullition, nous nous sommes fixés pour objectif principal la mise en évidence du phénomène, sa quantification et le point de son d'apparition dans le canal. Une analyse des photos prises durant l'expérience nous a permis d'observer les transformations morphologiques de l'écoulement lors de la crise d'ébullition. Après démarrage des trois systèmes de refroidissement et réglage des débits dans les circuits primaire et secondaire, on fixe la puissance dans le pré chauffeur afin d'obtenir la température du Fréon désirée à l'entrée de la section d'essai. Ensuite, on augmente progressivement la puissance de chauffage dans la section d'essai. A chaque palier de puissance, on maintient celle-ci jusqu'à stabilisation des conditions de fonctionnement. On laisse l'installation fonctionner en régime stationnaire. Lorsque, pour une puissance donnée, les températures de paroi atteignent des niveaux assez élevés (de l'ordre de 150°C) on poursuit la montée en puissance mais avec un pas très faible afin d'éviter que le flux critique ne soit dépassé sans qu'il ne soit détecté. La valeur de la puissance pour laquelle la température de paroi enregistre un saut brutal (pour une puissance maintenue constante) sera considérée comme étant celle qui correspond au flux critique. Dans la phase de montée en puissance, la température de paroi croît proportionnellement tout en restant à des niveaux relativement bas. Cette dernière demeure également stable en régime stationnaire pour tous les paliers de puissance figure (5). Au voisinage d'une puissance de 8.8 kW, une légère variation du flux de chaleur engendre une élévation considérable et rapide de la température de paroi qui atteint environ 500°C traduit par le pic sur la courbe. La deuxième courbe de la figure (5) illustre encore mieux l'apparition du phénomène et montre que le flux critique correspond à une puissance de (8.8kW). A ces graphes, nous avons joint quatre photographies de la section d'essai qui illustrent les changements observés dans la morphologie de l'écoulement. L'écoulement tel qu'on le voit sur la première photographie (figure 6) est à l'état simple phase liquide. Lorsque la puissance passe à 3.4 kW, la température de paroi est autour de 70°C. On observe la naissance des premières bulles au niveau de la surface de l'élément chauffant mais celles-ci se condensent aussitôt dans le fluide qui les entoure car la température de celui-ci n'a pas encore atteint la température de saturation. A 6.55 kW, la température de la paroi augmente avec la puissance. Ces conditions expérimentales ont permis d'obtenir l'ébullition franche (3^{ème} photographie de la figure 6). Les bulles de vapeur sont présentes dans tout le volume du fluide, elles ne se condensent plus du fait que la température de ce dernier a atteint celle de la saturation. Lorsque le flux de chaleur atteint une valeur critique, la température de paroi enregistre un saut brutal dépassant les 500 °C (figure 5). Le saut brutal de température est engendré par l'accumulation des bulles et la formation d'un manteau de vapeur qui isole la gaine de l'élément chauffant du fluide réfrigérant. Ceci est clairement illustré par la dernière photographie de la (figure 5)

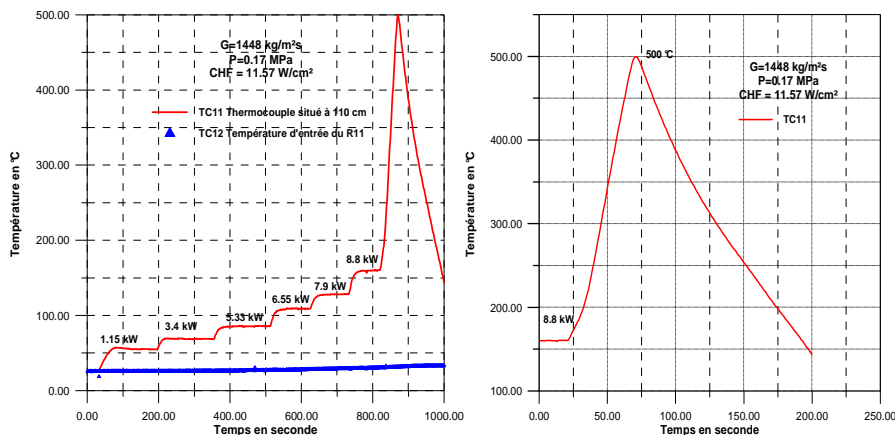


Figure 5 Evolution dans le temps de la température du thermocouple à 110 cm de l'entrée

Albi, France du 28 au 30 Août 2007



Figure 6 : Illustration photographique

CONCLUSION

La présente étude a permis, d'une part, d'observer le phénomène de l'initiation de l'ébullition qui correspond à l'apparition des premières bulles de vapeur dans l'écoulement et celui de la crise d'ébullition qui accompagne la formation du manteau de vapeur autour de l'élément chauffant. Les résultats obtenus sont satisfaisants sur le plan qualitatif, en ce sens que les principaux phénomènes visés par l'étude ont été simulés expérimentalement et visualisés. Le comportement des paramètres décrivant les phénomènes reflète parfaitement la nature de ces derniers. La comparaison des résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'initiation de l'ébullition et la crise d'ébullition avec les corrélations les plus répandues a donnée des écarts relativement faibles et qui sont de l'ordre de 10 %.

Nomenclature

D	Diamètre intérieur de la section d'essai, <i>mm</i>	T_{ent}	Température à l'entrée, °C
D_h	Diamètre hydraulique, <i>mm</i>	T_f	Température du fluide, °C
h	Coefficient d'échange, <i>W/m²C</i>	T_w	Température de paroi, °C
q	Densité de flux de chaleur <i>W/cm²</i>	TC	Thermocouple
L	Longueur de la section d'essai, <i>mm</i>	P	Pression à l'entrée, <i>bar</i>

Références

- [1] J.M Delhaye, M. Giot, M.L Riethmuller “ Thermohydraulics of Two-Phase Systems for industrial design and Nuclear Engineering”, *Series in Thermal and fluids Engineering*, McGraw hill Book Company, 1981.
- [2] John G. Collier and John R. Thome Convective boiling and condensation, *International Book Company*, Third Edition (2001)
- [3] P. Bricard, Modélisation de l'ébullition sous-saturée et de la crise d'ébullition par caléfaction en convection forcée, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Paris, France, soutenue le 12 déc.1996.
- [4] C. Grossetete, Caractérisation expérimentale et simulation de l'évolution d'un écoulement diphasique à bulles ascendant dans une conduite verticale, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Paris, France, soutenue le 19 mai.1996.
- [5] Y.Bouaichaoui, M.Semine, S.Hanini, F.Belalouache, Etude expérimentale d'un écoulement diphasique dans un canal en pyrex en utilisant le R-11 comme réfrigérant, *Congés Français de la thermique SFT06 Ile de Ré, France*, Tome2, page 57, 16-19 mai.2006.
- [6] Y.Bouaichaoui, K.Kadi M.Semine, F.Belalouache, Détermination expérimentale du flux thermique critique à l'aide d'une boucle d'essai à Fréon, *5ème Congrès Nationale de la Physique et de ses applications CNPA 2002*, Université Colonel Hadj Lakhder, Batna, 28-30 Oct. 2002