

Ebullition en masse dans un milieu poreux modèle

Paul SAPIN^{1,3*}, Paul DURU¹, Florian FICHOT³, Marc PRAT^{1,2}, Michel QUINTARD^{1,2}

¹ Université de Toulouse ; INPT, UPS ; IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), Allée Camille Soula, 31400 Toulouse, France.

² CNRS ; IMFT ; 31400 Toulouse, France.

³ Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Cadarache, France.

* (auteur correspondant : psapin@imft.fr)

Résumé - L'ébullition est étudiée expérimentalement dans un réseau de cylindres chauffants répartis aléatoirement entre deux plaques de céramique. Les cylindres chauffants sont des sondes RTD (Resistance Temperature Detector) commandées individuellement via un système d'asservissement, ce qui fournit des mesures en chaque point du milieu poreux modèle bidimensionnel ainsi constitué. Les résultats présentés ici caractérisent seulement l'ébullition autour d'un cylindre unique monté dans la section test ainsi que le renoyage d'une ligne de cylindres surchauffés.

Nomenclature

h	Coefficient volumique d'échange thermique, $W.m^{-3}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
$\langle h_\beta \rangle^\beta$	Enthalpie massique moyenne de la phase β , $J.kg^{-1}$	α	Taux de vide
h_β^{sat}	Enthalpie massique de la phase β à la saturation, $J.kg^{-1}$	ϵ	Porosité
I	Intensité électrique, A	ρ	Masse volumique $kg.m^{-3}$
\mathbf{K}_β^*	Tenseur de diffusion thermique effectif, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ϖ_s	Source thermique volumique $W.m^{-3}$
\dot{m}	Taux d'évaporation, $kg.m^{-3}.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
Q	Flux volumique d'échange thermique, $W.m^{-3}$	cv	Echange convectif
R	Résistance électrique, Ω	g	Phase gazeuse
T	Température, $^\circ C$	i	Interface
$\langle T_\beta \rangle^\beta$	Température moyenne de la phase β , K	l	Phase liquide
$\langle \mathbf{v}_\beta \rangle^\beta$	Vitesse moyenne de la phase β , $m.s^{-1}$	nb	Ebullition nucléée
		s	Phase solide
		sat	Saturation
		β	Indice de phase : $\beta = g, l, s$

1. Introduction

Une rupture ou une fuite importante sur le circuit de refroidissement d'un réacteur à eau pressurisée entraîne un échauffement du cœur. La puissance résiduelle, habituellement évacuée grâce à la circulation du fluide caloporteur, provoque l'évaporation de l'eau et donc l'assèchement des crayons de combustible. Les accidents nucléaires de Three Mile Island (réacteur TMI-2) en 1979 et de Fukushima Daiichi en 2011 ont montré que cela peut mener à la dégradation de ces crayons ainsi qu'à la fusion de certains matériaux du cœur. Les défauts de refroidissement ont notamment entraîné la fusion partielle des cœurs de trois réacteurs à Fukushima. Dans la cuve du réacteur, il en résulte la formation d'un lit de débris chaud, assimilable à un milieu poreux, au sein duquel les fragments de combustible dégagent une puissance résiduelle importante. Les étapes successives d'un scénario type LOCA (Loss of Coolant Accident) ainsi que les caractéristiques du lit de débris en résultant ont pu être caractérisées grâce aux enseignements du programme expérimental Phébus PF (à l'échelle 1/5000e) et aux observations du réacteur

TMI-2. Si une source d'eau est disponible, le renoyage du coeur peut permettre un refroidissement efficace. La compréhension de ce phénomène est primordiale pour estimer les chances de succès d'un renoyage. Ce thème a été très approfondi à l'IRSN, l'objectif étant d'estimer avec précision l'augmentation de la pression dans le circuit primaire, la production d'hydrogène et le relâchement de produits de fission.

Le programme expérimental PRELUDE/PEARL (Figure 1(a)) étudie le renoyage d'un lit de particules d'acier chauffées par induction. La taille de ces particules a été choisie en accord avec les observations du réacteur TMI-2 ; plusieurs lits de billes de diamètres compris entre 1 et 8mm ont été étudiés. Les essais effectués ont permis de valider partiellement un modèle macroscopique à non-équilibre thermique local. De nombreuses réflexions théoriques [1], appuyées par certaines observations phénoménologiques (expériences PRELUDE) suggèrent l'existence de plusieurs régimes d'ébullition et d'évaporation à l'échelle du pore susceptibles d'impacter les propriétés macroscopiques requises pour simuler correctement les expériences disponibles avec ce modèle. L'étude de l'ébullition en masse dans un milieu poreux modèle proposée dans ce travail vise à caractériser les régimes d'écoulement lors d'un renoyage grâce à des visualisations 2D expérimentales. Le milieu poreux modèle (Figure 1(b)) réalisé est formé de cylindres aléatoirement disposés entre deux plaques. Le chauffage s'effectue par effet Joule, chacun des cylindres étant un élément chauffant contrôlé individuellement. Tous les cylindres n'étant donc pas nécessairement chauffés, l'expérience reproduit plus fidèlement la situation au sein d'un coeur de réacteur où seuls les fragments de combustible dégagent une puissance.

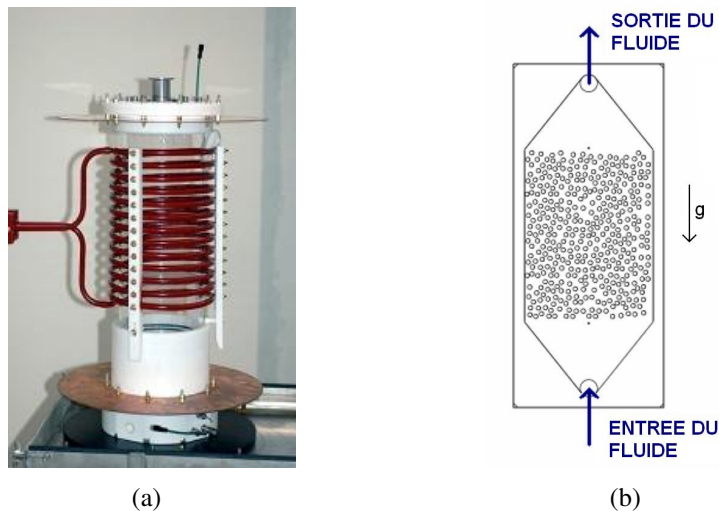


Figure 1 (a) Essais PRELUDE/PEARL, IRSN : Billes d'acier chauffées par induction ;
 (b) Thèse IMFT/IRSN : Cylindres disposés entre deux plaques, chauffage par effet Joule.

2. Précédentes études

Les écoulements et transferts de chaleur avec changement de phase en milieux poreux sont étudiés pour des domaines d'application très variés : problèmes de séchage [2], échangeurs de chaleur, géothermie [3] et sûreté nucléaire [4]. Pour ce dernier, la problématique de renoyage est prépondérante.

Un modèle macroscopique à non-équilibre thermique local [1] [5], obtenu par changement d'échelle à l'aide de la méthode de prise de moyenne volumique [6], a été développé pour le code ICARE/CATHARE. La caractéristique de ce modèle est d'établir des équations macroscopiques

piques pour chaque phase à partir du problème microscopique. Pour le changement d'échelle, les problèmes d'écoulement diphasique et de transfert de chaleur sont découplés. Grâce à l'hypothèse de quasi-staticité, qui revient à négliger l'impact de la vitesse de l'interface gaz-liquide dans le problème de changement d'échelle, le bilan de quantité de mouvement prend la forme d'une équation de type Darcy généralisé, pour chacune des phases fluides, avec des termes du type Forchheimer. Les effets de la pression entre les phases mouillante et non mouillante sont pris en compte grâce à l'introduction d'une pression capillaire fonction de la saturation. Les prises de moyenne volumique des équations locales de conservations de la masse et de l'énergie conduisent, moyennant certaines simplifications, à l'établissement des équations macroscopiques de conservation de l'énergie relatives à chacune des phases (gaz, liquide, solide) suivantes :

$$\frac{\partial(\alpha\epsilon\langle\rho_g\rangle^g\langle h_g\rangle^g)}{\partial t} + \nabla(\alpha\epsilon\langle\rho_g\rangle^g\langle\mathbf{v}_g\rangle^g\langle h_g\rangle^g) = \nabla(\mathbf{K}_g^* \cdot \nabla\langle T_g\rangle^g) + \dot{m}_g h_g^{sat} + Q_{sg} + Q_{gi} \quad (1)$$

$$\frac{\partial((1-\alpha)\epsilon\langle\rho_l\rangle^l\langle h_l\rangle^l)}{\partial t} + \nabla((1-\alpha)\epsilon\langle\rho_l\rangle^l\langle\mathbf{v}_l\rangle^l\langle h_l\rangle^l) = \nabla(\mathbf{K}_l^* \cdot \nabla\langle T_l\rangle^l) + \dot{m}_l h_l^{sat} + Q_{sl} + Q_{li} \quad (2)$$

$$\frac{\partial((1-\epsilon)\langle\rho_s\rangle^s\langle h_s\rangle^s)}{\partial t} = \nabla(\mathbf{K}_s^* \cdot \nabla\langle T_s\rangle^s) - Q_{sl} - Q_{sg} - Q_{si} + \varpi_s \quad (3)$$

où $\langle h_\beta\rangle^\beta$ et $\langle T_\beta\rangle^\beta$ représentent l'enthalpie et la température macroscopiques de la phase β ($\beta=g,l,s$ pour le gaz, le liquide et le solide respectivement).

Les coefficients macroscopiques mis en jeu sont les tenseurs de dispersion effective \mathbf{K}_β^* et les coefficients d'échange de chaleur entre phases et interface, intervenant dans les définitions des flux volumiques $Q_{\beta i}$ et $Q_{s\beta}$.

Ces derniers ont été déterminés analytiquement pour des configurations simples [5] (cellules stratifiées et cellules de Chang), toujours avec l'hypothèse de quasi-staticité. L'interface étant considérée fixe, ces modèles permettent de décrire convenablement les échanges de chaleur pour l'évaporation ou la condensation d'un film liquide sans ébullition ainsi que l'ébullition en film (température supérieure à la température de Leidenfrost dans le cas d'un renoyage). Cependant, le phénomène de nucléation n'étant pas modélisé, l'échange de chaleur dans les régimes d'ébullition nucléée et de transition est donc sous-estimé. Un renoyage entraîne en effet des mécanismes d'ébullition intense qu'il faut prendre en compte dans l'analyse de l'échange de chaleur.

Bachrata *et al.* [7] proposent une amélioration de ce modèle. Pour le régime de transition, le flux de chaleur est estimé en fonction du flux critique d'ébullition. Quant au régime d'ébullition nucléée, le coefficient volumique d'échange de chaleur est calculé en ajoutant aux termes convectifs h_{cv} un terme d'ébullition nucléée h_{nb} , pondéré par un facteur dépendant du taux de vide α (Equation 4). Ce coefficient h est alors utilisé pour estimer les flux de chaleur spécifiques $Q_{\beta i}$ et $Q_{s\beta}$. Le paramètre n est déterminé grâce aux relevés expérimentaux effectués sur l'expérience PRELUDE.

$$h = (1 - \alpha^n)h_{nb} + ((1 - \alpha)h_{cv,l} + \alpha h_{cv,g}) \quad (4)$$

Trois types de corrélations pour le calcul du coefficient d'échange thermique lors de l'ébullition nucléée en écoulement sont proposés dans la littérature : les modèles de superposition [8], les modèles asymptotiques et les modèles basés sur les modes d'écoulement. Le modèle heuristique proposé par Bachrata *et al.* [7] s'apparente au modèle de Chen [8] dans lequel les contributions

de l'ébullition nucléée et des échanges convectifs sont additionnées. Aucune corrélation n'étant disponible pour l'ébullition nucléée en écoulement dans un milieu poreux, et au vu des confrontations avec les résultats expérimentaux, la modélisation proposée par Bachrata *et al.*[7] semble être une bonne voie de développement. Cependant, l'interaction entre les éléments chauffants dans un milieu poreux facilite la coalescence des bulles, ce qui modifie fortement les échanges de chaleur.

Il est donc tout à fait nécessaire d'obtenir des visualisations à l'échelle du pore et des mesures de température/flux pour l'ébullition en milieu poreux afin d'identifier les modes d'écoulement rencontrés et de mieux comprendre les processus d'échange de chaleur (nucléation, convection, évaporation de film...). A partir de là, il sera possible de proposer des corrélations macroscopiques incorporant de manière plus précise la physique observée à l'échelle du pore.

3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental prévu pour l'étude de l'ébullition en masse dans un milieu poreux bidimensionnel (section test) est une boucle fluide fermée (Figure 2).

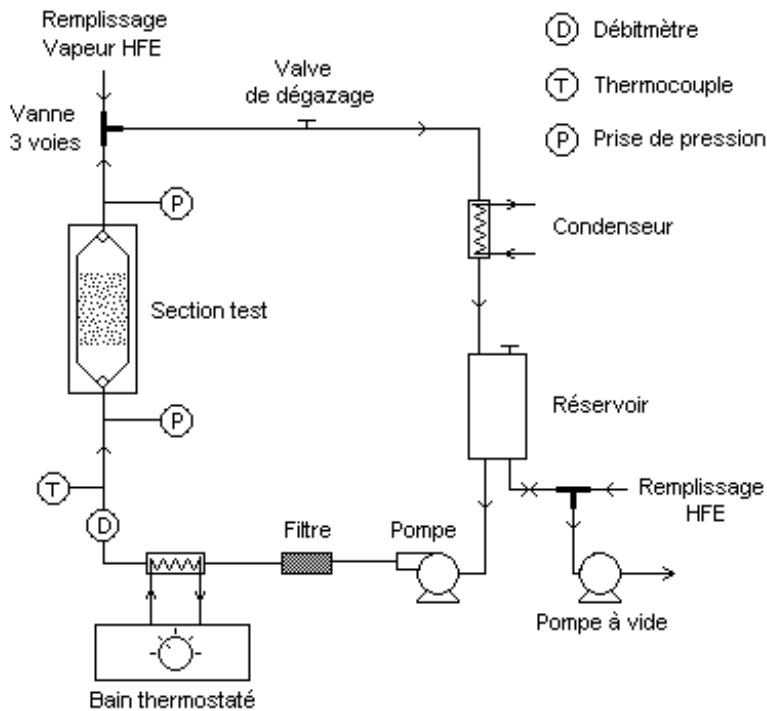


Figure 2 Dispositif expérimental : la boucle fluide.

Une pompe à engrenage (débit de 2 à 252 mL/min) entraîne la circulation du fluide qui est amené à une température proche de la saturation à l'entrée de la section test. A sa sortie la vapeur créée est condensée. Un réservoir fait office de chambre de tranquillisation afin de piéger la vapeur éventuellement non condensée ainsi que les gaz incondensables. Le fluide utilisé est le HFE 7000 de la société 3M. Il présente en effet de nombreux avantages : sa faible température d'ébullition (34°C à 1 atmosphère) permet d'observer tous les régimes d'ébullition avec des contraintes thermiques modérées et il s'agit d'un fluide très faiblement toxique, non inflammable et diélectrique, ce qui garantit une sécurité importante lors des manipulations. Il est néanmoins primordial d'éviter de le laisser longtemps en contact avec l'air car il est très volatil

et néfaste pour l'environnement (fort effet de serre). Le remplissage de ce dispositif s'effectue en faisant le vide dans la boucle grâce à une pompe à vide, afin d'éviter la présence d'air dans la boucle fluide, qui réduirait significativement la température de saturation du fluide.

La section test est un milieu poreux modèle formé de 392 cylindres de 2mm de diamètre disposés aléatoirement entre deux plaques, dont une est transparente (Figure 3). La porosité est de 0,65 et la perméabilité estimée avec le modèle de Kozeny-Carman (1937) est de $6,2 \cdot 10^{-9} \text{m}^2$.

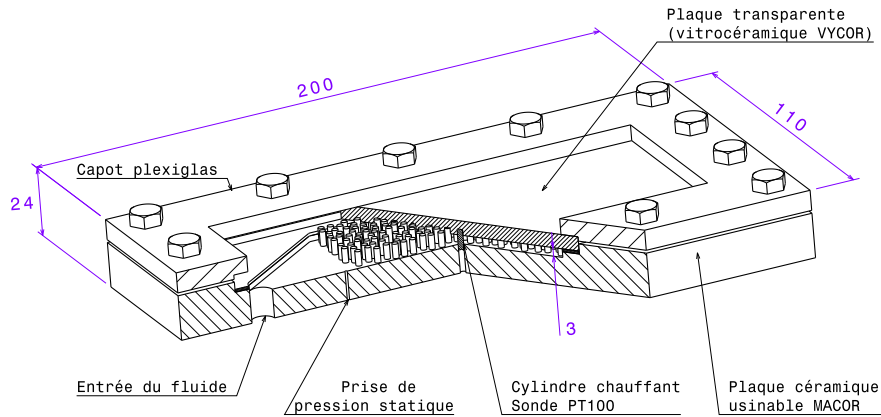


Figure 3 *Dispositif expérimental : la section test (dimensions en mm).*

Chaque cylindre constitutif de ce milieu poreux est une sonde RTD (Resistance Temperature Detector) utilisée non seulement comme élément chauffant mais aussi pour les mesures de température et de flux de chaleur locaux. Une sonde RTD (Figure 4) est constituée d'un enroulement de platine scellé dans un revêtement en céramique. La résistance du platine variant avec la température (100Ω à 0°C pour les sondes Pt100 utilisées), la température de l'élément peut facilement être mesurée.

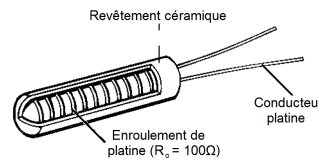


Figure 4 *Élément sensible d'une sonde RTD (Pt 100).*

Il est néanmoins nécessaire de prévoir un module de contrôle du flux de chaleur, du fait de cette variation de la résistance (effet Joule en $R(T)I^2$). Chaque sonde est donc reliée à un système microélectronique d'asservissement qui peut contrôler et mesurer en temps réel le flux de chaleur transmis à l'élément ainsi que sa température. Cela permet des études précises aux alentours du flux critique ou de la température de Leidenfrost et de fournir de nouvelles courbes de Nukiyama que l'on pourra implémenter dans le modèle macroscopique. Une des plaques étant transparente, la visualisation à haute vitesse par ombroscopie nous fournit la distribution des phases au sein du poreux. La coordination de l'ensemble des mesures par ordinateur permet ainsi de relier l'échange de chaleur effectif au régime d'ébullition (ébullition nucléée, en film...).

4. Résultats

Une section test préliminaire comportant un cylindre chauffant isolé ainsi qu'une ligne de 9 cylindres a été réalisée pour étudier d'une part l'ébullition autour d'un cylindre unique ainsi que le renoyage d'une première ligne chauffée. Pour cela, il faut tout d'abord mesurer la résistance

thermique du revêtement céramique de la sonde (Figure 4). En effet, lorsque cette dernière est soumise à un flux de chaleur, la température de l'enroulement de platine mesurée est différente de la température de paroi. Cette différence a été mesurée grâce à la thermographie infrarouge pour différents équilibres thermiques afin de déterminer la résistance thermique du revêtement.

4.1. Ebullition en vase autour d'un cylindre unique

Une fois cette correction appliquée, l'ébullition en vase autour d'un cylindre a été étudiée. Le flux de chaleur imposé étant contrôlé, les différents régimes d'ébullition ont été observés. Une courbe de Nukiyama (Figure 5) a été obtenue pour caractériser l'ébullition en vase autour des sondes utilisées, disposées horizontalement dans la section, dans un bain de HFE7000 maintenu à 20°C.

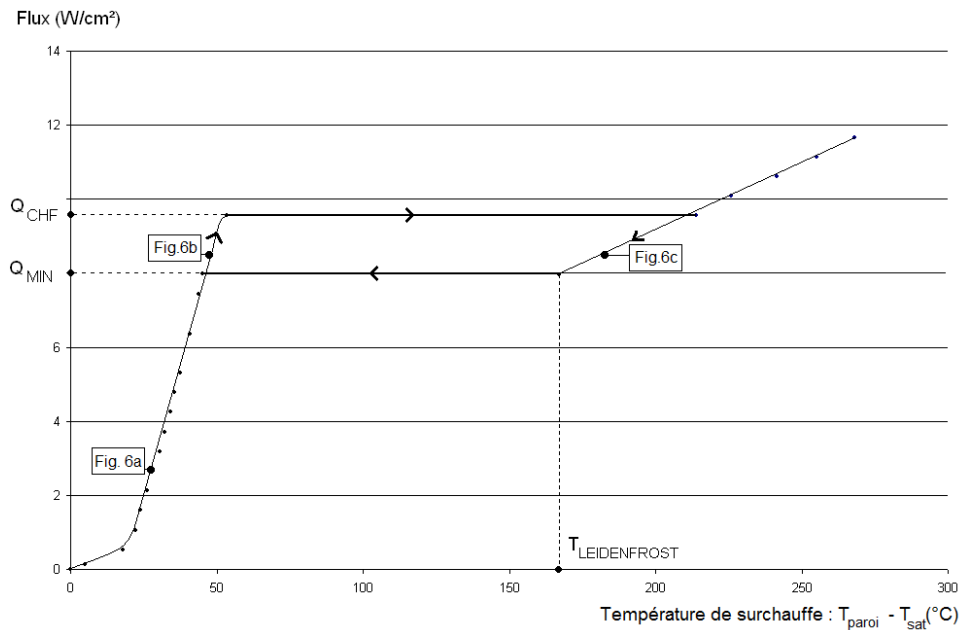


Figure 5 Courbe de Nukiyama pour le HFE7000 ($T_{sat} = 34^{\circ}C$).

Au cours de l'augmentation du flux de chaleur, l'ébullition nucléée (Figure 6(a)) puis l'ébullition à poches de vapeur (Figure 6(b)) sont observées sur l'élément. Une fois le flux critique d'ébullition Q_{CHF} ($9,5 W/cm^2$) atteint, la coalescence des poches de vapeur entraîne la crise d'ébullition : un film de vapeur se forme autour du cylindre. Le passage vers l'ébullition en film (Figure 6(c)) est violent et s'accompagne d'un saut de température important (d'environ $160^{\circ}C$) du fait que le liquide ne refroidit plus l'élément chauffant. Ensuite, en diminuant le flux appliqué, l'épaisseur du film de vapeur diminue. Le fluide entre de nouveau en contact avec le cylindre lorsque la température de Leidenfrost ($\Delta T_{sat}=162^{\circ}C$) est atteinte, pour un flux de chaleur appelé flux minimum Q_{MIN} ($8 W/cm^2$).

L'image 6(c) représente une ébullition en film autour d'un cylindre de 2mm de diamètre. La netteté de cette image est moindre comparativement à celles des images 6(a) et 6(b) du fait de la difficulté de capturer l'interface du film. Cependant, elle montre bien la génération de train de bulles de vapeur lors de ce régime. Le comportement de ces trains de bulles dans un milieu poreux est difficilement prévisible (coalescences, simples bulles de Taylor...) sur un grand nombre de pores ; il sera donc très instructif de mesurer l'influence du confinement sur l'échange de chaleur par ébullition.

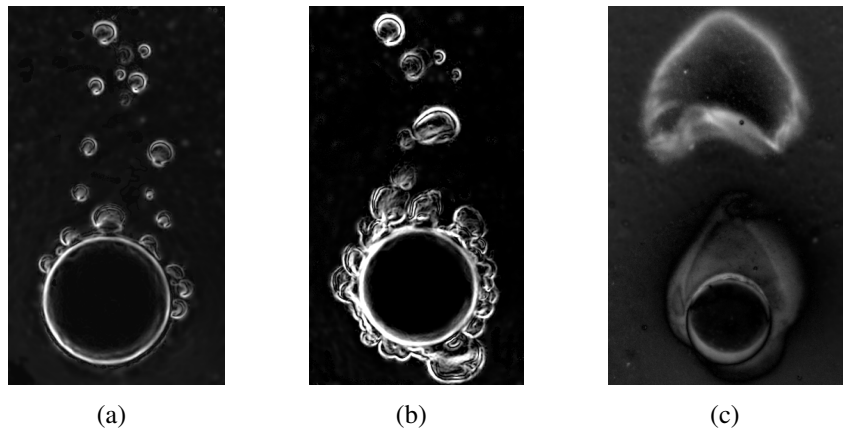


Figure 6 (a) *Ebullition nucléée partielle* ;(b) *Ebullition nucléée intense* ;(c) *Ebullition en film*.

4.2. Renoyage d'une ligne surchauffée

L'autre expérience préliminaire consiste à étudier le renoyage d'une ligne horizontale de cylindres surchauffés à une température d'environ 200°C (l'équilibre initial obtenu avec un flux de chaleur effectif de 4W/cm² est de 194°C pour la sonde n°1 la plus froide et de 201°C pour la sonde n°3 la plus chaude) avec un fluide injecté à 20°C à 0.2cm/s. Les relevés thermiques lors du renoyage sont présentés dans la figure 7 où le numéro de sonde correspondant est indiqué sur chaque courbe.

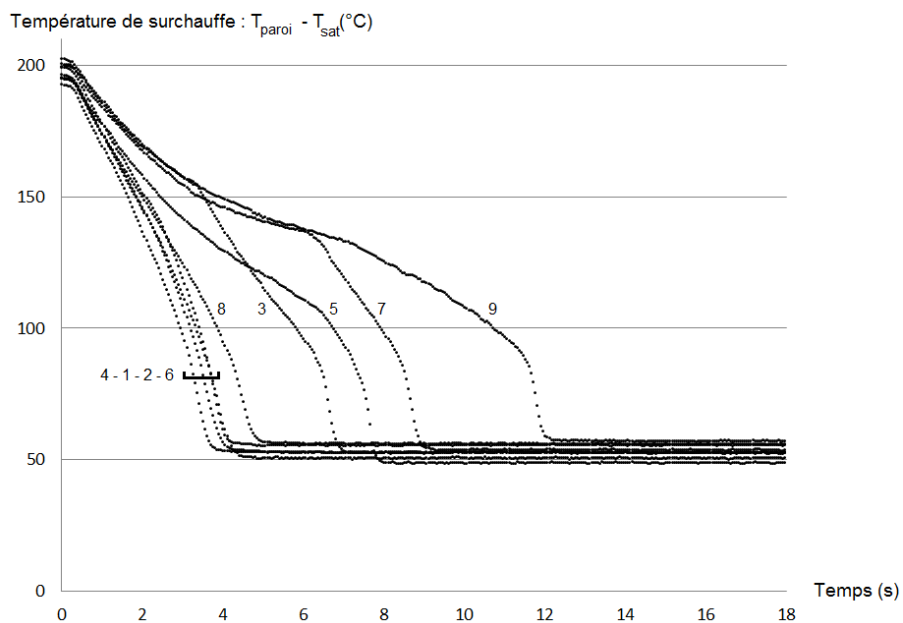


Figure 7 *Evolution de la température des cylindres surchauffés au cours du renoyage.*

La température initiale des sondes étant supérieure à la température de Leidenfrost, le premier régime est l'ébullition en film ; or le flux thermique étant nettement inférieur au flux minimum, l'état stable est en ébullition nucléée, même avec l'influence du débit liquide. Pour chaque sonde, le passage d'un régime à l'autre s'observe par une rupture de la pente de refroidissement. Les différences entre les courbes s'explique par la turbulence qui suit le front d'ébullition, qui entraîne des recirculations que l'on observe grâce à des visualisations à haute vitesse. La figure

8 montre quant à elle l'ébullition générée au cours du renoyage, 6,4 secondes après le contact du front de liquide avec la ligne de cylindres. Seule la sonde n°9 reste alors en ébullition en film, ce qui se retrouve sur les relevés thermiques correspondants.

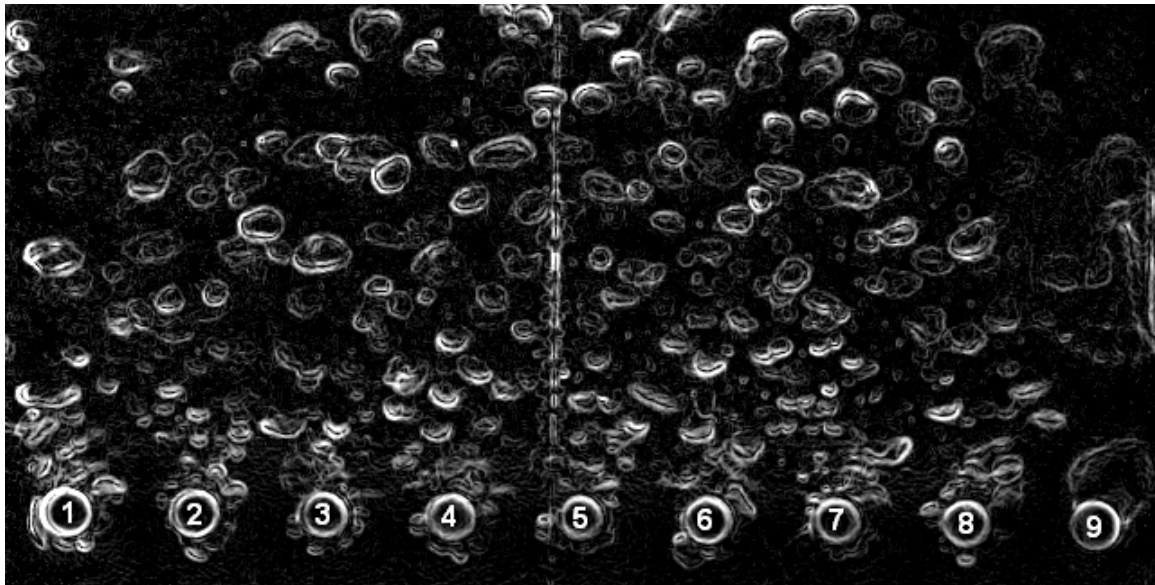


Figure 8 *Ebullition nucléée intense pour les sondes 1 à 8 et ébullition en film pour la sonde 9.*

5. Conclusion

Les expériences préliminaires réalisées ont permis de nombreux réglages expérimentaux et montré la faisabilité de cette étude expérimentale. Les résultats déjà obtenus confirment l'influence d'un milieu poreux sur les phénomènes d'ébullition par rapport à un obstacle solide unique. Ce dispositif sera donc utilisé pour fournir des courbes de Nukiyama « pour milieu poreux » afin de les intégrer au modèle macroscopique.

Références

- [1] F.Petit, F.Fichot, M.Quintard, Ecoulement diphasique en milieu poreux : modèle à non-équilibre local, *Int. J. Thermal Sc.*, 38-3 (1999) 239-249.
- [2] M.Pratt, 2D modelling of drying of porous media : Influence of edge effects at the interface, *Drying Technology*, 9-5 (1991) 1181-1208.
- [3] A.W.Woods, Liquid and vapor flow in superheated rocks, *Annual Review of Fluid Mech.*, 31-1 (1999) 171-199.
- [4] F.Fichot, F. Duval, N.Trégourès, C.Béchaud, M.Quintard, The impact of thermal non-equilibrium and large-scale 2D/3D effects on debris bed reflooding and coolability, *Nucl. Eng. Des.*, 236 (2006) 2144-2163.
- [5] F. Duval, F.Fichot, M.Quintard, A local thermal non-equilibrium model for two-phase flows with phase change in porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47-3 (2004) 613-639.
- [6] S.Whitaker, *The method of volume averaging*, Springer Netherlands, vol.13 (1999).
- [7] A. Bachrata, F.Fichot, G.Repetto, M.Quintard, J.Fleurot, Quench front progression in a superheated porous medium : Experimental analysis and model development, *NURETH-14*(2011).
- [8] J.C. Chen, Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flows, *I&EC Process Design and Development*, 5-3 (1966) 322-329.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à Hervé Ayrolles et Ruddy Soeparno pour leur temps passé au développement du dispositif expérimental.