

Ébullition dans un milieu poreux modèle surchauffé.

Ange Gourbil^{1*}, Paul Sapin¹, Paul Duru¹, Florian Fichot², Michel Quintard^{1,3}, Marc Prat^{1,3}

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

² Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), BP3 13115 St Paul lez Durance, France

³ CNRS ; IMFT ; F-31400 Toulouse, France

* (auteur correspondant : agourbil@imft.fr)

Résumé - Dans les études de sûreté des centrales nucléaires, la modélisation du “renoyage” occupe une place importante. Lors d’un accident de perte prolongée de refroidissement primaire, la dégradation des matériaux d’un cœur de réacteur nucléaire peut conduire à la formation d’un lit de débris radioactifs que l’on cherche à refroidir en y injectant de l’eau, dans une opération appelée renoyage. La compréhension des phénomènes en jeu nécessite de s’intéresser à l’ébullition intense dans un milieu poreux surchauffé. Le travail présenté ici est une étude expérimentale visant à caractériser les phénomènes d’ébullition à l’échelle du pore, afin d’affiner l’évaluation de paramètres effectifs du modèle utilisé par l’IRSN pour simuler le renoyage. Le dispositif expérimental réalisé permet de visualiser les écoulements à l’échelle du pore et d’effectuer des mesures thermiques locales dans un milieu poreux modèle bidimensionnel chauffé en masse. La section d’essai est formée de 392 cylindres de 2 mm de diamètre disposés transversalement entre deux plaques parallèles de céramique espacées de 3 mm, dont l’une transparente permet la visualisation des écoulements. Les cylindres sont des sondes thermo-résistives Pt100 présentant une double fonction : elles sont utilisées à la fois comme éléments chauffants et comme capteurs de température. La section d’essai est disposée dans un plan vertical, le liquide y est injecté par le bas à débit, pression et température d’injection réglables. Deux configurations principales ont été étudiées. Dans la première, comparable à une situation de renoyage, le liquide est injecté dans le milieu sec initialement surchauffé. Les relevés thermiques ont permis de caractériser la dynamique du renoyage et les visualisations d’observer les principaux régimes d’écoulement. Dans la seconde configuration, le milieu est initialement saturé en liquide et une puissance thermique donnée est appliquée à l’ensemble des éléments chauffants. Un cylindre particulier est alors chauffé jusqu’à l’apparition des différents régimes d’ébullition (nucléé, intense, en film). Cela permet d’établir des courbes flux-température de type Nukiyama sur un élément plongé dans un milieu poreux chauffant. Les expériences menées ont montré l’influence du taux de vide local sur les valeurs du flux minimum et du flux critique (figure 1).

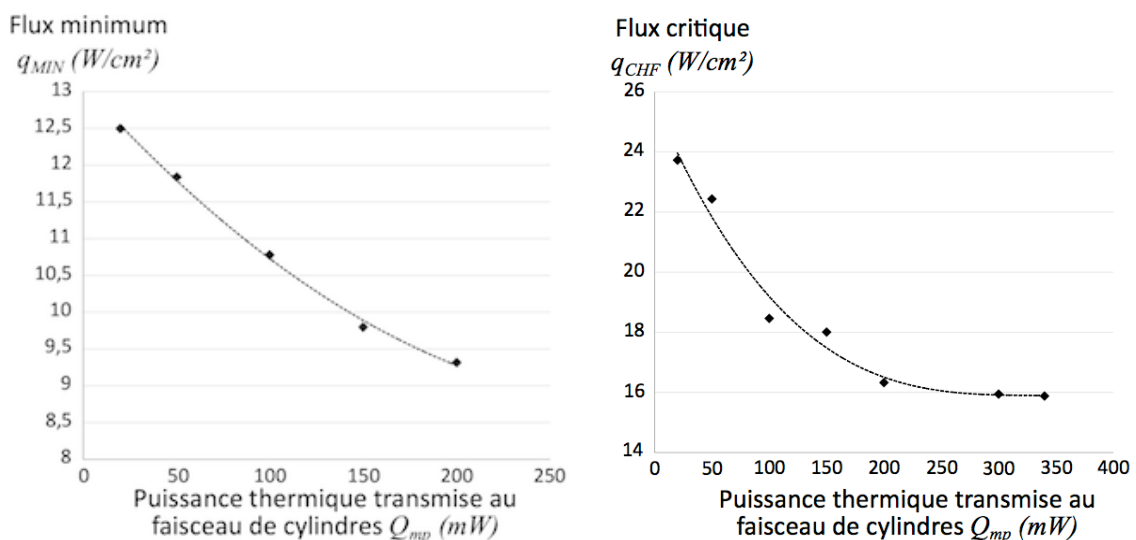


Figure 1 : Influence du chauffage en masse sur les flux minimum et critique appliqués à un élément.

Nomenclature

h	coefficient d'échange thermique, $W.m^{-3}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
h_β	enthalpie massique de la phase β , $J.kg^{-1}$	α	taux de vide
K_β^*	tenseur de diffusivité effective, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ε	porosité
\dot{m}	taux de changement de phase, $kg.m^{-3}.s^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
\overline{Q}	flux volumique d'échange thermique, $W.m^{-3}$	ϖ	puissance thermique volumique, $W.m^{-3}$
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>	
v	vecteur vitesse	g, l, s	gaz, liquide, solide
$\langle X_\beta \rangle^\beta$	moyenne intrinsèque de la variable X	β	relatif à la phase β ($\beta = g, l$ ou s)
∇	gradient	i	interface
$\nabla \cdot$	divergence	sat	valeur à saturation

1. Introduction

La perte prolongée de réfrigérant primaire d'un cœur de réacteur nucléaire est un scénario d'accident grave étudié par l'IRSN. Sous l'effet d'une forte élévation de température, la dégradation des matériaux du cœur de réacteur peut conduire à la formation d'un lit de débris radioactifs assimilable à un milieu poreux chauffant qu'il convient de refroidir le plus efficacement possible. Cela est réalisé par un renvoi d'eau dans le cœur de réacteur endommagé, opération appelée "renoyage". Cependant, cette opération comporte des risques et son succès à refroidir convenablement le cœur de réacteur n'est pas évident. De nombreuses études ont été menées sur la "refroidissabilité" (*coolability*) d'un lit de débris. Initiés dans les années 70, les différents travaux à ce sujet ont récemment été passés en revue et discutés par Fichot et al. [1]. La plupart ont cherché à déterminer les conditions d'assèchement d'un lit de débris renoyé et à définir un flux critique d'assèchement. Dans une approche plus globale, l'analyse de l'accident survenu en 1979 à la centrale de Three Mile Island sur le réacteur TMI2 a permis d'obtenir des informations sur l'ensemble des phénomènes survenant à la suite d'un accident de perte prolongée de refroidissement primaire. Par la suite, le programme expérimental Phébus sur un réacteur à échelle réduite, mais représentatif des conditions réelles de fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression, a permis de tirer des enseignements complémentaires.

À l'IRSN, le module du code ICARE/CATHARE utilisé pour la simulation du renoyage est basé sur un modèle thermohydraulique diphasique multidimensionnel en milieu poreux, qui met en jeu un certain nombre de paramètres effectifs. La validation de ce modèle a été effectuée en partie par des expériences sur un dispositif nommé PRELUDE et continue actuellement avec un autre de plus grandes dimensions, PEARL. Ces expériences consistent à renoyer un lit de billes d'acier empilées dans un cylindre et chauffées par induction. Elles permettent d'obtenir des données macroscopiques telles que taux de vapeur produite, montée en pression, pertes de charges, ainsi que des mesures de température en quelques points particuliers. Cependant elles ne donnent pas accès à la visualisation de la structure de l'écoulement diphasique au sein du milieu poreux. Or cette information est importante pour modéliser correctement les transferts thermiques et les propriétés de l'écoulement.

Le travail présenté ici est une étude expérimentale visant à caractériser les phénomènes d'ébullition à l'échelle du pore. Un milieu poreux modèle bidimensionnel a été conçu et réalisé de sorte à permettre le chauffage en masse du liquide le traversant, le contrôle thermique des éléments chauffants, l'acquisition des températures de ces éléments, et la visualisation des écoulements [2]. Nous aborderons tout d'abord les grandes lignes du modèle utilisé actuellement à l'IRSN pour simuler le renoyage. Nous présenterons alors le dispositif

expérimental, puis les résultats obtenus. Deux catégories d'expériences ont été menées, les unes, de type renoyage, en régime transitoire, les autres, de type courbes de Nukiyama, en régime permanent. Enfin, des travaux préliminaires de traitement d'images visant à déterminer le taux de vide seront exposés.

2. Modélisation

Dans le modèle actuel servant de base au code de simulation ICARE/CATHARE de l'IRSN, les problèmes d'hydraulique et de thermique sont découplés. Concernant l'écoulement diphasique, l'équation de quantité de mouvement de chaque phase est dérivée d'une loi de Darcy généralisée, à laquelle s'ajoutent un terme de Forchheimer pour tenir compte du nombre de Reynolds élevé, ainsi que des termes d'accumulation et d'advection. On en trouvera la formulation dans [1].

Pour ce qui est des transferts de chaleur, un modèle macroscopique à non-équilibre thermique local a été développé au moyen d'une méthode de prise de moyenne volumique des équations locales. Dans ce modèle, chaque phase, gaz, liquide et solide possède sa propre température. Les équations de conservation de l'énergie ont la forme suivante :

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

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

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

Les échanges de chaleur entre les différentes phases sont donnés par les relations :

$$Q_{\beta i} = h_{\beta i} (\langle T_\beta \rangle^\beta - T_{sat}) \quad (4)$$

$$Q_{s\beta} = h_{s\beta} (\langle T_s \rangle^s - \langle T_\beta \rangle^\beta) \quad (5)$$

Les coefficients macroscopiques d'échanges thermiques $h_{\beta i}$ et $h_{s\beta}$ ont été déterminés analytiquement pour des écoulements stratifiés [3] dans deux configurations dites SLG (Solide-Liquide-Gaz : le liquide est la phase mouillante) et SGL (Solide-Gaz-Liquide : la vapeur est la phase en contact avec le solide). Dans un écoulement diphasique en milieu poreux où le liquide et le gaz peuvent chacun être des phases mouillantes, les échanges thermiques dépendent des surfaces de contact entre les différentes phases ; ces surfaces sont évaluées à partir des fractions volumiques des phases fluides. Les coefficients d'échanges thermiques sont alors approximés par une superposition des deux configurations SLG et SGL pondérées linéairement par le taux de vide. Cependant aucune des configurations SLG ou SGL ne tient compte des phénomènes de nucléation. Bachrata [4] a proposé une amélioration de la formulation en ajoutant un terme d'ébullition nucléée dans l'expression des coefficients d'échanges. Cependant, ces coefficients restent déterminés à partir de résultats analytiques obtenus dans des configurations simples (SLG et SGL), combinés entre eux de façon heuristique avec des pondérations par le taux de vide et l'introduction d'un terme d'ébullition nucléée. Le risque de cette approche est de manipuler au final des coefficients macroscopiques qui, n'étant pas dérivés des équations locales par des techniques de changement d'échelles, ont un rapport éloigné et incertain avec la physique des phénomènes ayant lieu à l'échelle du pore. La nécessité de valider expérimentalement le modèle s'avère impérative ; plus particulièrement, on comprend l'intérêt de chercher à caractériser expérimentalement l'ébullition à l'échelle du pore.

3. Dispositif expérimental

La cellule d'essai est formée de 392 cylindres de 2 mm de diamètre disposés transversalement entre deux plaques parallèles de céramique espacées de 3 mm, dont l'une transparente permet la visualisation des écoulements. Les cylindres sont des sondes thermo-résistives Pt100 à enroulement de platine (Figure 2), qui sont chauffées par effet joule. La mesure de la tension appliquée à leurs bornes et de l'intensité les parcourant permet de déterminer la puissance électrique les alimentant ainsi que leur résistance. Cette dernière est fonction de la température de l'enroulement de platine selon une loi connue. La connaissance de la résistance thermique de l'enrobage de céramique autour du fil de platine, obtenue à partir de mesures à la caméra thermique infrarouge, permet de remonter de la température du fil de platine à la température de surface de la sonde. Afin d'estimer les pertes thermiques, un réseau résistif thermique représentant les échanges par conduction dans les différentes pièces de la section test a été réalisé sous Matlab. La méthode nodale utilisée consiste à établir un bilan de flux en chacun des noeuds.

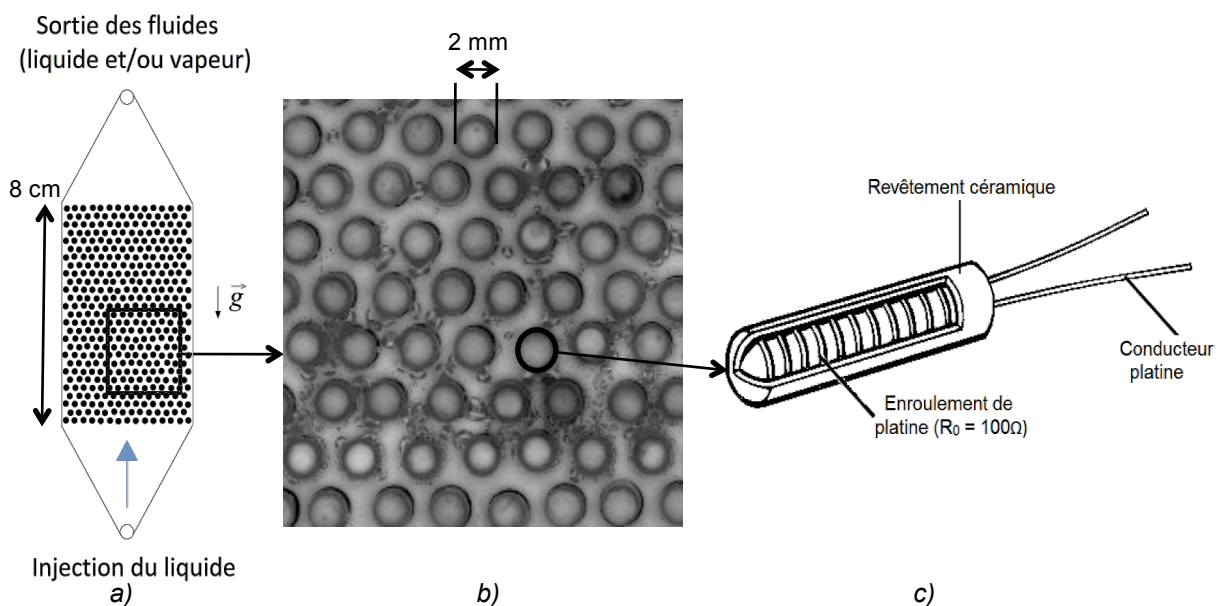


Figure 2 : a) Schéma de la section ; b) Exemple de visualisation ; c) Schéma d'un élément chauffant.

Les sondes Pt100 présentent donc une double fonction : elles sont utilisées à la fois comme capteurs de température et comme éléments chauffants, ce qui fait toute l'originalité de ce dispositif expérimental qui permet un chauffage en masse du milieu poreux modèle ainsi que l'obtention des relevés de température en tout point chauffant du milieu. Certaines sondes sont contrôlables individuellement, la plupart le sont par groupes de 4 ou 5 sondes voisines alignées ; leur contrôle, en puissance ou en température, s'effectue au moyen d'un asservissement électronique. La cellule d'essai est dans un plan vertical, le liquide y est injecté par le bas à débit, pression et température d'injection réglables. Le fluide utilisé est le HFE-7000, qui bout à 34°C à pression atmosphérique : cette température de saturation relativement faible permet d'obtenir tous les régimes d'ébullition, notamment celui d'ébullition en film, sans imposer de trop grandes contraintes thermiques au dispositif.

4. Résultats

Deux grands types d'expériences ont été menés. Dans une première configuration, comparable à une situation de renoyage, le liquide est injecté dans le milieu sec initialement surchauffé. Trois zones d'écoulement ont été identifiées grâce aux visualisations : en aval se

situé une zone monophasique vapeur, suivie d'une zone diphasique avec ébullition intense, puis d'une zone dite renoyée, quasiment saturée en liquide, en amont ; le liquide y reste cependant en ébullition faible car les éléments chauffants restent alimentés à une puissance thermique constante tout au long du renoyage. Les relevés thermiques ont permis de caractériser la dynamique du renoyage. En effet, une mesure locale de température permet de détecter l'arrivée du front de trempé (Figure 3 ; sur cet exemple, la vitesse de filtration d'injection est de $3,6 \text{ mm.s}^{-1}$). Les mesures en plusieurs points du milieu permettent alors de reconstituer la progression du front de trempé et de déterminer une vitesse de renoyage.

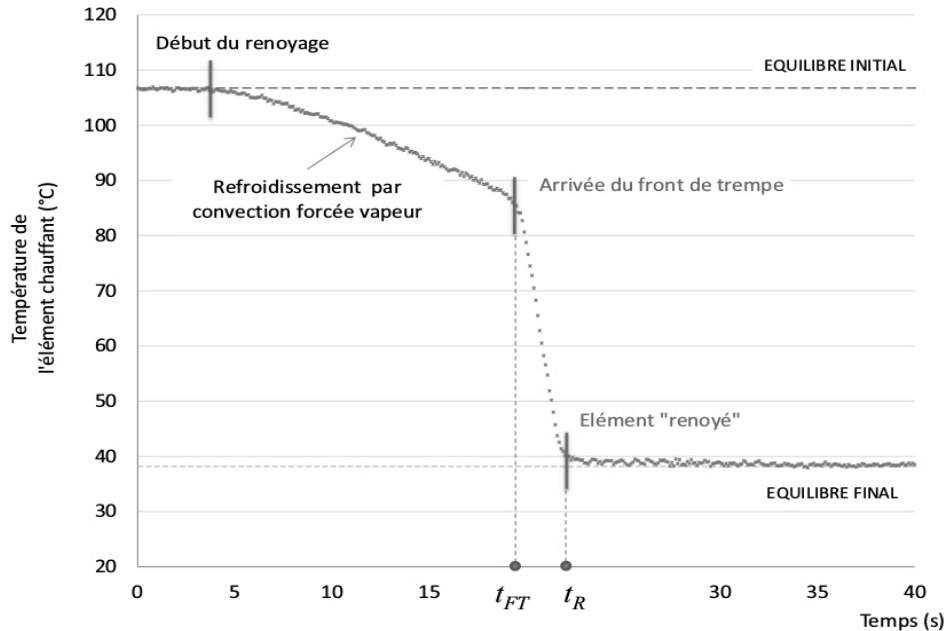


Figure 3 : Relevé de la température d'une sonde au cours d'un renoyage

Plus précisément on peut évaluer deux vitesses, l'une liée à la progression du front de trempé, l'autre relative à l'avancement de la zone renoyée. Pour une puissance thermique donnée, appliquée aux éléments chauffants, l'augmentation du débit d'injection de liquide accroît la différence entre les deux vitesses de progression : plus la vitesse d'injection est importante, plus la zone diphasique grandit au cours du temps. Dans l'exemple présenté sur la figure 4, les différents renoyages ont été effectués en appliquant une puissance thermique de 80 mW par cylindre chauffant.

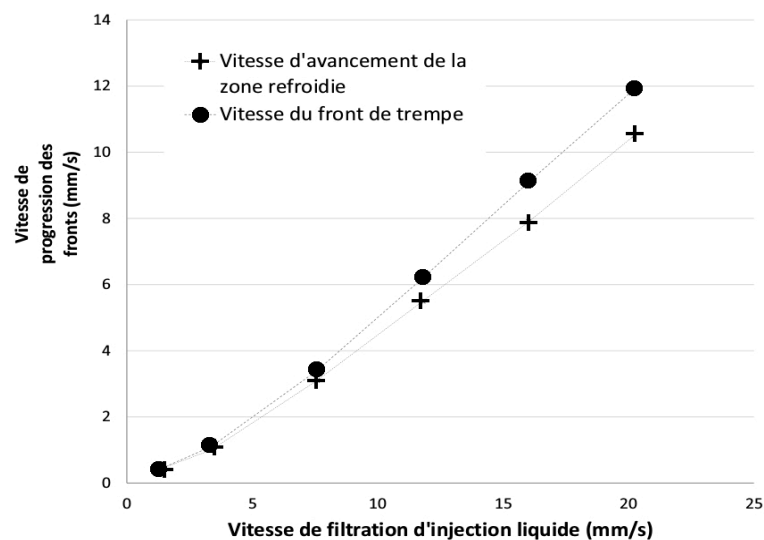


Figure 4 : Influence de la vitesse d'injection sur les vitesses de renoyage

La seconde configuration abordée est une étude en régime permanent. Le milieu est initialement saturé en liquide, en convection forcée à un débit fixé, et une puissance thermique donnée est appliquée à l'ensemble des éléments chauffants, qui génèrent un panache de bulles. Un cylindre particulier est alors chauffé jusqu'à l'apparition des différents régimes d'ébullition (nucléée, intense, en film). Cela permet d'établir des courbes flux-température de type Nukiyama sur un élément chauffant dans un milieu poreux chauffé en masse. Sur la figure 5 on peut comparer deux courbes de type Nukiyama obtenues sur une sonde donnée de la cellule d'essai, effectuées selon les cas sans chauffer les autres sondes (cas "sonde unique") ou bien en imposant une puissance thermique constante aux autres sondes (cas "sonde dans panache").

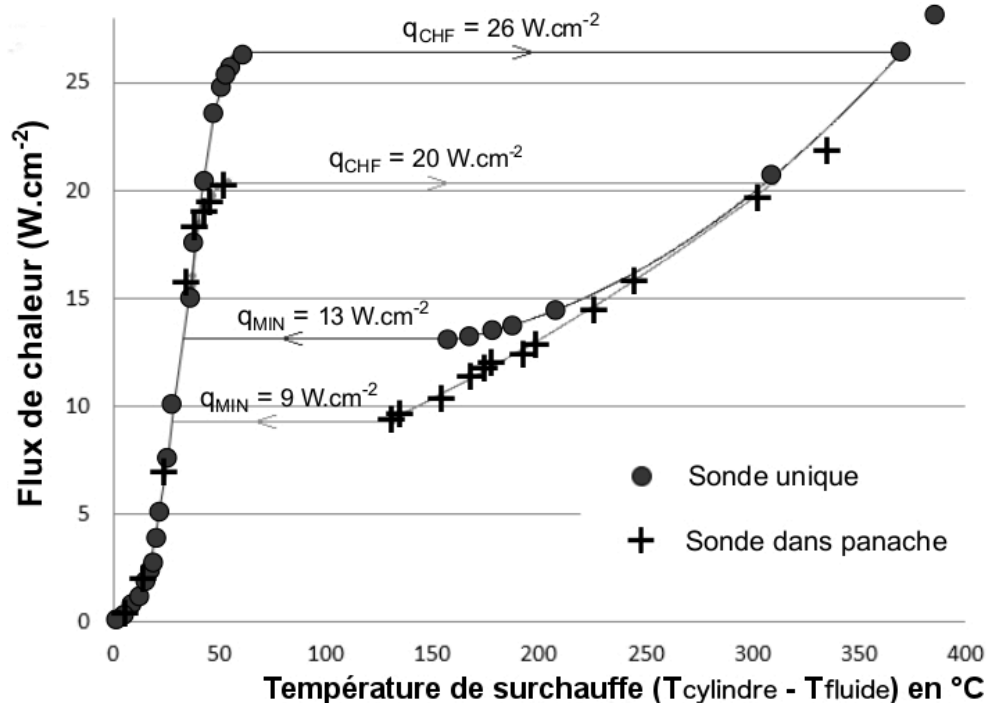


Figure 5 : Courbes de type Nukiyama obtenues dans un milieu poreux

On constate que les valeurs des flux critique q_{CHF} (CHF pour *Critical Heat Flux*) et minimum q_{MIN} sont plus faibles dans le cas où la sonde étudiée est plongée dans un milieu chauffant. On a reporté sur la figure 1 (voir résumé) les valeurs des flux critiques et minimums mesurés sur un élément pour différentes puissances de chauffe du milieu poreux. Les courbes montrent que le flux critique décroît en fonction du chauffage de la matrice poreuse, et que le flux minimum suit une évolution similaire. D'autres expériences où une à plusieurs lignes de sondes Pt100 sont chauffées en amont d'un élément étudié procurent des résultats affichant la même tendance [2].

Les visualisations montrent que la présence de bulles au voisinage d'un élément chauffant semble favoriser la création d'un film de vapeur lorsqu'on cherche à atteindre le flux critique, abaissant ainsi sa valeur. De même, lorsqu'on fait décroître le flux thermique à partir d'une situation d'ébullition en film, à l'approche du flux minimum des bulles environnant l'élément étudié peuvent alimenter en gaz le film de vapeur, favorisant son maintien et repoussant le flux minimum à des valeurs plus faibles. Pour aborder ces réflexions de façon quantitative il apparaît nécessaire de déterminer le taux de vide en fonction de la puissance thermique dégagée par le milieu poreux chauffant.

5. Traitement d'images : vers une détermination du taux de vide

Deux types d'acquisitions d'images ont été effectués. Les unes, prises à la caméra rapide, permettent d'obtenir des vitesses locales de bulles et des taux de vide locaux par analyse des variations temporelles des valeurs des pixels ; les autres, prises à une fréquence de 0,5 Hz, font l'objet d'un traitement statistique. Les travaux présentés ici sont en cours de développement.

5.1. Vitesse moyenne locale des bulles, taux de vide local

Les images enregistrées avec une caméra rapide Dimax ont une fréquence d'acquisition de 500 ou 1000 images par seconde ; leur résolution est de 35,5 pixels par millimètre. Pour estimer localement la vitesse ascendante des bulles, on étudie l'évolution temporelle du niveau de gris moyen des pixels sur deux régions d'intérêt voisines, placées à la verticale l'une de l'autre. Sur la figure 6 sont présentés les signaux typiques obtenus avec deux régions d'intérêt positionnées au centre de la cellule d'essai, lors d'un test avec deux lignes chauffées en amont à 400 mW par sonde et une vitesse débitante de $3,4 \text{ mm.s}^{-1}$. On observe 4 pics, soit le passage de 4 bulles, durant la séquence temporelle considérée. Le décalage entre les signaux est déterminé par le maximum de corrélation entre eux. Connaissant la distance entre les rectangles de contrôle ainsi que la fréquence d'acquisition des images, on peut alors calculer la vitesse moyenne d'ascension des bulles entre les deux rectangles, qui est ici de 10 cm.s^{-1} environ.

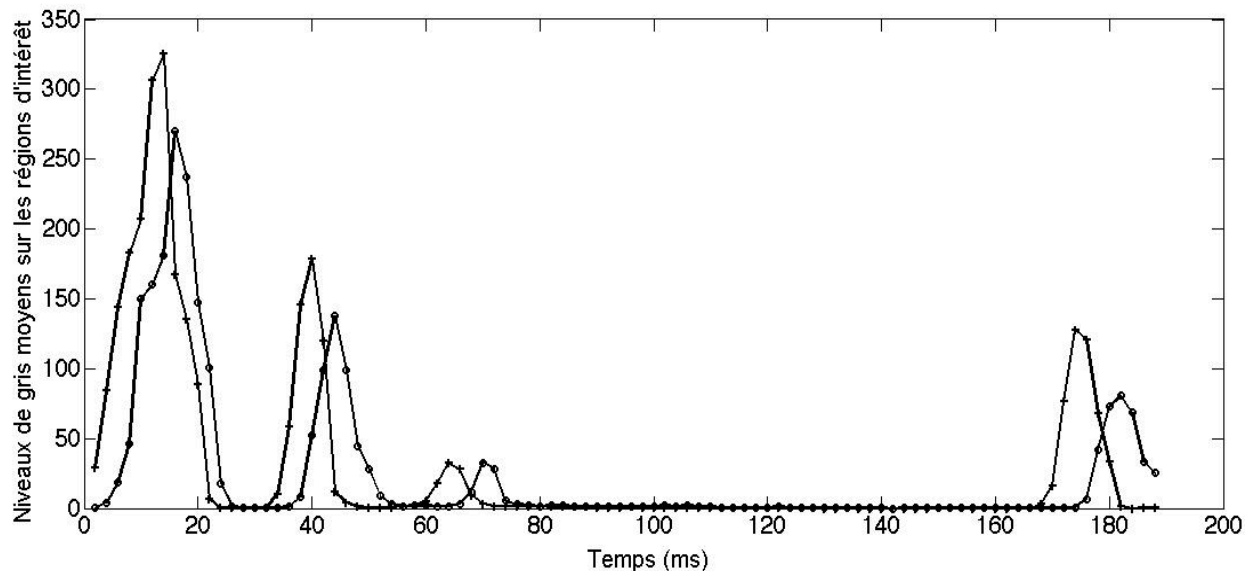


Figure 6 : Évolution de la valeur moyenne des niveaux de gris sur deux régions d'intérêt voisines

Par ailleurs, la largeur des pics nous renseigne sur le temps de passage des bulles. En étudiant localement l'évolution du niveau de gris sur un temps caractéristique suffisamment long, on pourra déterminer en additionnant les largeurs des pics la durée totale de présence locale des bulles ; en divisant cette durée par le temps d'observation, on accèdera à un taux de vide local.

5.2. Moyennes d'images d'évènements décorrelés

Quel que soit le régime d'ébullition, les bulles mettent moins de 1 seconde à traverser de bas en haut l'ensemble de la cellule d'essai. En effectuant des prises de vue toutes les 2 secondes (avec une caméra Sensicam), on photographie à chaque fois des évènements distincts présentant des motifs de bulles n'ayant pas de corrélation entre eux. Nous avons

enregistré trois séries de 1500 images de ce type, en chauffant respectivement en amont de section une ligne, puis deux, puis trois, puis nous avons calculé l'image moyenne de chaque série. Nous avons obtenu ainsi trois images moyennées, dont une est présentée en figure 7.

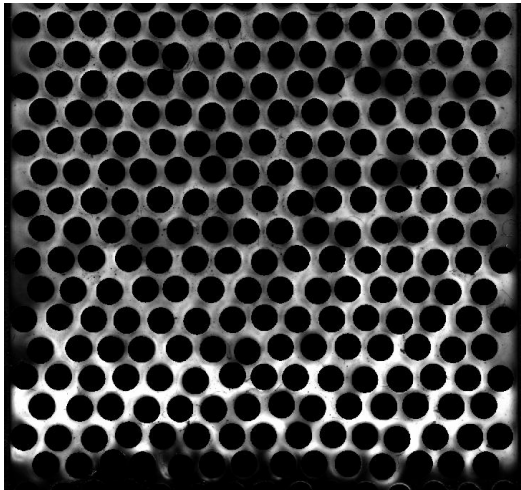


Figure 7 : Image moyennée sur 1500 images d'ébullition obtenues en chauffant 3 lignes

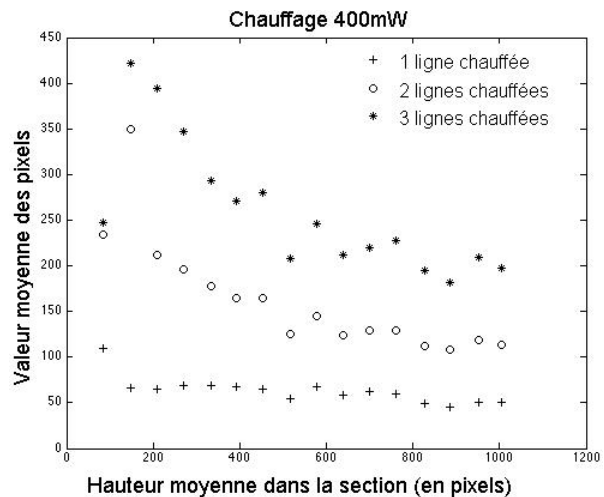


Figure 8 : Valeur du niveau de gris en fonction de la hauteur dans la section

Pour chaque image, nous avons calculé le niveau de gris moyen sur des bandes horizontales en fonction de la hauteur dans la section. Les résultats sont reportés sur le graphe de la figure 8. Les trois séries de valeurs sont nettement hiérarchisées : à une hauteur donnée dans la cellule d'essai, les valeurs des pixels sont d'autant plus élevées que l'on chauffe de lignes. On constate aussi que chaque série de valeurs converge vers une limite à partir d'une certaine hauteur dans la section. Cela pourrait signifier que les distributions des vitesses et des tailles de bulles deviennent constantes à partir d'une certaine hauteur. On cherche actuellement à établir un lien entre les niveaux de gris sur une image moyennée et le taux de vide.

6. Conclusion

Le dispositif expérimental réalisé a permis d'une part de décrire la phénoménologie du renoyage et de mesurer des vitesses de renoyage, et d'autre part d'obtenir des courbes de type Nukiyama en milieu poreux en mettant en évidence une baisse du flux critique et du flux minimum en fonction du chauffage de la matrice poreuse. Différents types de traitements d'images sont actuellement à l'étude pour déterminer le taux de vide, qui sera alors mis en relation avec les flux de chaleur échangés entre la matrice solide et le fluide.

Références

- [1] 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.
- [2] P. Sapin, Etude expérimentale de l'ébullition en masse dans un milieu poreux modèle, *PhD thesis*, Institut National Polytechnique de Toulouse (2014).
- [3] 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 Transf.*, 47-3 (2004), 613–639.
- [4] 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), 1–13.