

# Expérimentation micromodèles d'ébullition en milieu poreux : évaluation du taux de vide.

Ange GOURBIL<sup>1\*</sup>, Paul SAPIN<sup>2</sup>, Paul DURU<sup>1</sup>, Florian FICHOT<sup>3</sup>, Michel QUINTARD<sup>1</sup>, Marc PRAT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) - Université de Toulouse, CNRS-INPT-UPS, Toulouse FRANCE

<sup>2</sup>Imperial College London, South Kensington Campus, London SW7 2AZ, UK

<sup>3</sup>Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), BP3 13115 St Paul lez Durance, France

\* (auteur correspondant : [agourbil@imft.fr](mailto:agourbil@imft.fr))

**Résumé** - Un micromodèle de milieu poreux chauffant, quasi-bidimensionnel, a permis de montrer expérimentalement l'influence du chauffage du milieu sur le flux critique d'assèchement local, et d'obtenir des visualisations de l'ébullition au sein de l'espace poral. Les visualisations sont actuellement traitées pour déterminer des taux de vide. La complexité des images à analyser a conduit à la réalisation d'une expérience diphasique isotherme permettant de calibrer les algorithmes de traitement d'images.

## 1. Introduction

Dans les études de sûreté des centrales nucléaires, le "renoyage" occupe une place importante. En cas d'accident grave de perte de refroidissement primaire, les matériaux d'un cœur de réacteur nucléaire peuvent fondre, s'effriter, et constituer un lit de débris radioactifs 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 tels que l'explosion de vapeur ou la production intense de dihydrogène, et son succès à refroidir convenablement le cœur de réacteur n'est pas évident du fait notamment des phénomènes de caléfaction et d'assèchement. 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 de type assèchement.

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. Afin de valider et affiner ce modèle, un programme de recherche expérimentale a été mis en place, qui a donné naissance à deux dispositifs nommés PRELUDE et PEARL. Ces expériences consistent à renoyer par de l'eau 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. Or la modélisation des transferts thermiques lors d'un renoyage nécessite aussi la connaissance de données locales sur l'écoulement, à l'échelle des pores.

En complément des campagnes de mesures macroscopiques sur PRELUDE et PEARL menées à l'IRSN, une collaboration a été entreprise avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), dans l'objectif de caractériser les phénomènes d'ébullition à l'échelle du pore. Un milieu poreux chauffant modèle, quasi-bidimensionnel, a été réalisé à l'IMFT (thèse de P. Sapin [2]). Ce micromodèle est conçu 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.

Nous présenterons tout d'abord ce micromodèle de milieu poreux chauffant, ainsi qu'un résultat important obtenu sur ce dispositif. Puis nous détaillerons les travaux de traitements d'images qui sont en cours, visant à déterminer les taux de vide à partir des visualisations des écoulements.

## 2. 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 (Figure 1.a et 1.b). Les cylindres sont des sondes thermo-résistives Pt100 à enroulement de platine (Figure 1.c), qui sont chauffées par effet Joule. Ces sondes ont une double fonction : elles sont utilisées à la fois comme capteurs de température, et comme éléments chauffants. Cela 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 puissance thermique dégagée et de température en tout point chauffant du milieu. 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 peu élevée permet d'obtenir tous les régimes d'ébullition, notamment celui d'ébullition en film, avec des contraintes thermiques relativement faibles. La taille des cylindres a été choisie de telle sorte que le rapport diamètre des cylindres sur longueur capillaire du HFE-7000 soit identique au rapport diamètre des billes sur longueur capillaire de l'eau dans l'expérience PRELUDE, afin que les structures d'écoulement soient comparables dans ces deux expériences.

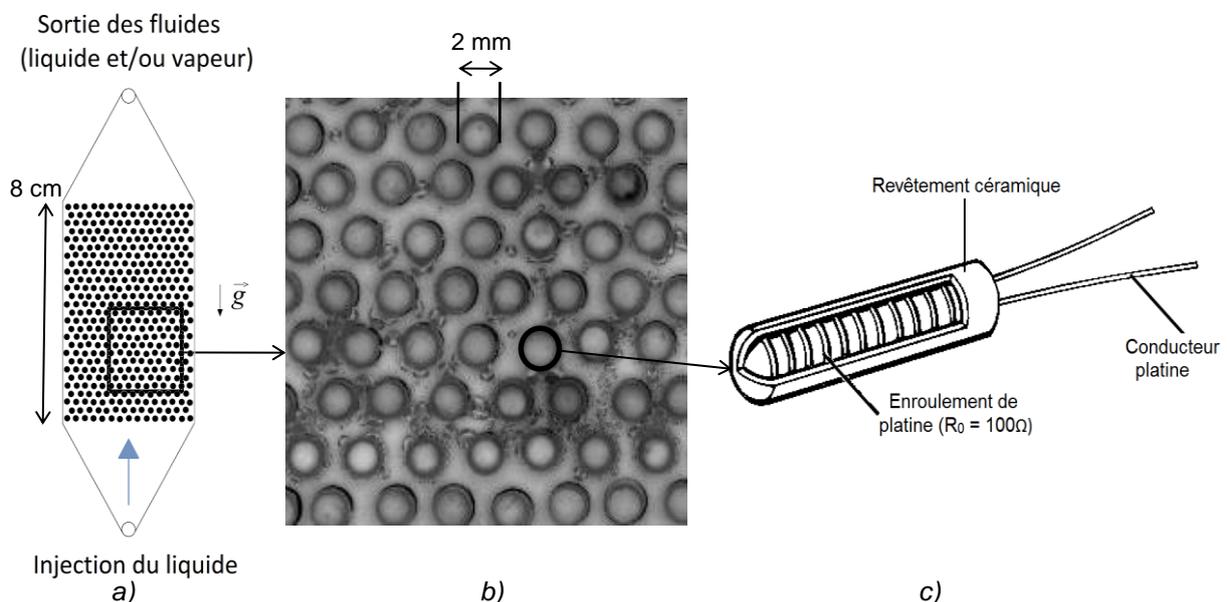


Figure 1 : a) Schéma de la section ; b) Exemple de visualisation ; c) Schéma d'un élément chauffant.

Des expériences de type renoyage avec chauffage en masse du milieu, qui ne sont pas présentées ici, ont déjà été réalisées [2]. Ce dispositif a aussi permis d'établir des courbes flux-température de type Nukiyama sur un élément chauffant plongé dans un milieu poreux chauffé en masse. 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 (nucléé, intense, en film). Sur la figure 2 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").

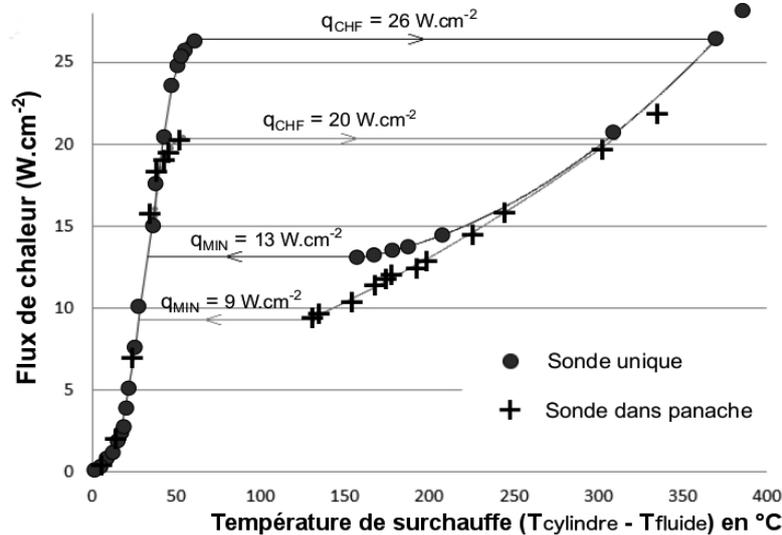


Figure 2 : Courbes de type Nukiyama obtenues dans un milieu poreux.

On constate que les valeurs des flux critiques  $q_{CHF}$  (CHF pour *Critical Heat Flux*) auxquels est atteinte la crise d'ébullition sont plus faibles dans le cas où la sonde étudiée est plongée dans un milieu chauffant. On a reporté sur la Figure 3 les valeurs des flux critiques mesurés sur un élément pour différentes puissances de chauffe du milieu poreux environnant : le flux critique décroît en fonction du chauffage de la matrice poreuse. D'autres expériences où une à plusieurs lignes de sondes Pt100 sont successivement chauffées en amont d'un élément étudié procurent des résultats affichant la même tendance [2].

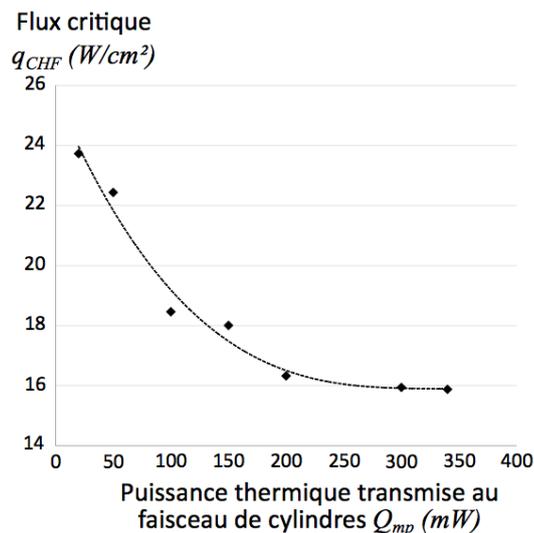


Figure 3 : Influence du chauffage en masse du milieu sur le flux critique appliqué à un élément.

En complément de ces données thermiques, des visualisations par caméra rapide montrent que la présence de bulles au voisinage d'un élément chauffant favorise la création d'un film de vapeur lorsqu'on cherche à atteindre le flux critique, abaissant ainsi sa valeur. Pour discuter ce constat de façon quantitative nous cherchons actuellement à déterminer par des

analyses d'images le taux de vide en fonction de la puissance thermique dégagée par le milieu poreux chauffant.

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

Deux types d'acquisitions d'images ont été effectués, dans des situations d'ébullition convective en régime permanent avec successivement une, deux, puis trois lignes horizontales consécutives de cylindres chauffés chacun à 400 mW ; la vitesse de filtration liquide de 3,6 mm/s est identique dans chaque cas. D'une part, des images prises à la caméra rapide permettent d'obtenir des informations liées au taux de présence local de vapeur par analyse des variations temporelles des niveaux de gris des pixels. D'autre part, des images acquises à une fréquence de 0,5 Hz font l'objet d'un traitement statistique. Enfin, des travaux sont en cours de développement pour estimer la fraction volumique de gaz à partir des images binarisées.

Une image originale n'est pas directement exploitable. Avant analyse, on lui soustrait une image de fond qui correspond à la visualisation de l'écoulement monophasique liquide ; puis on applique un calque qui masque les plots cylindriques. L'image qui en résulte fait ressortir les bulles en clair sur fond noir, tel qu'on le voit sur la Figure 4 qui est extraite d'une image d'un cas d'expérience à deux lignes chauffées. Par la suite, toutes les images utilisées ont subi cette opération de soustraction de l'image de fond et de masquage des plots cylindriques.

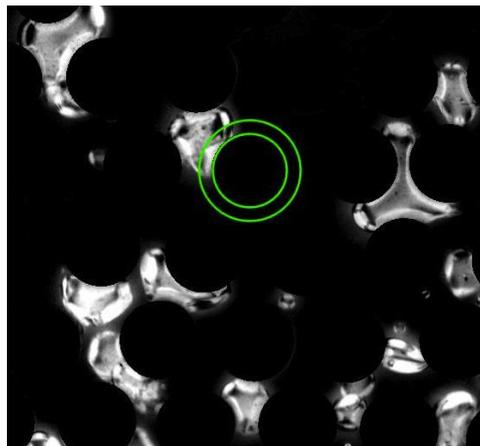


Figure 4 : Région d'intérêt annulaire autour d'un plot cylindrique.

#### 3.1. Indicateur lié au taux de présence local de vapeur

On exploite ici des séries d'images obtenues par visualisation rapide au moyen d'une caméra Dimax. La fréquence d'acquisition est de 500 images par seconde, la résolution est de 35,5 pixels par millimètre, la taille des images est de 2016 par 1800 pixels. On définit sur ces images une région d'intérêt (ROI) annulaire autour d'un plot cylindrique donné, comme montré sur la Figure 4. On calcule alors le niveau de gris moyen des pixels sur cette ROI en fonction du numéro d'image dans la séquence filmée. Lorsqu'une bulle se situe dans la ROI, elle augmente le niveau de gris moyen sur cette zone ; sans présence de bulle, le niveau de gris est faible, proche de zéro (zéro correspond au noir ; la valeur d'un pixel est d'autant plus élevée que sa luminosité l'est). On obtient ainsi un signal tel celui de la Figure 5, où chaque pic correspond au passage d'une ou plusieurs bulles dans la ROI. En prenant la valeur moyenne de ce signal sur la durée d'observation, on obtient ainsi un indicateur qui est une fonction croissante du taux de présence local de vapeur dans la ROI. Par exemple sur la Figure 5, qui correspond à une expérience avec deux lignes de cylindres chauffés, cet indicateur est à un niveau de gris moyen de 79,8 autour du cylindre numéro 114.

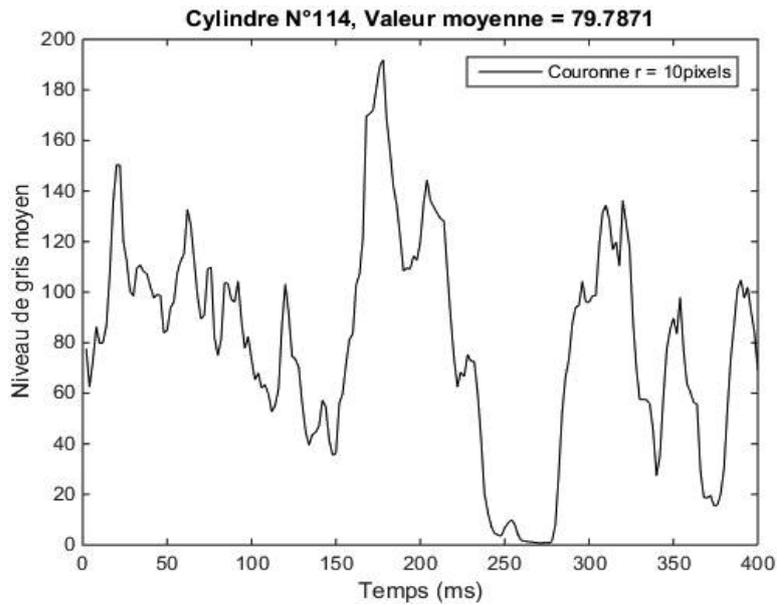


Figure 5 : Évolution de la valeur moyenne des niveaux de gris sur la région d'intérêt annulaire.

Nous avons calculé cet indicateur autour des 232 cylindres situés en aval des lignes chauffées, soit 16 lignes de cylindres (comprenant les lignes chauffées), pour chaque configuration d'ébullition étudiée, sur une durée de 2 secondes correspondant à 1000 images. En effectuant la moyenne des résultats obtenus pour chaque ligne de cylindres et dans chaque configuration, on peut reporter la valeur moyenne de l'indicateur du taux de présence local de vapeur en fonction de la hauteur dans la cellule d'essai, et en fonction du nombre de lignes chauffées (Figure 6).

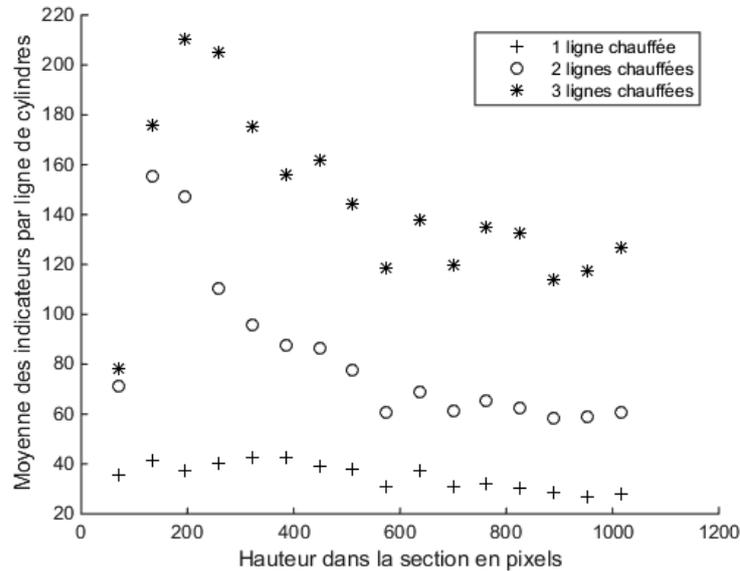


Figure 6 : Indicateurs du taux de présence local en fonction de la hauteur dans la cellule.

Les trois séries de valeurs sont nettement hiérarchisées : à une hauteur donnée dans la cellule d'essai, le taux de présence local de vapeur est d'autant plus élevé 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 suggère que les distributions des vitesses et des tailles de bulles atteignent un équilibre à partir d'une certaine hauteur. On cherche actuellement à déterminer la fonction qui relie l'indicateur de niveau de gris moyen au taux de présence local de vapeur.

### 3.2. Moyennes d'images d'évènements décorrélés

On s'intéresse ici aux images acquises à une fréquence de 0,5 Hz au moyen d'une caméra Sensicam.

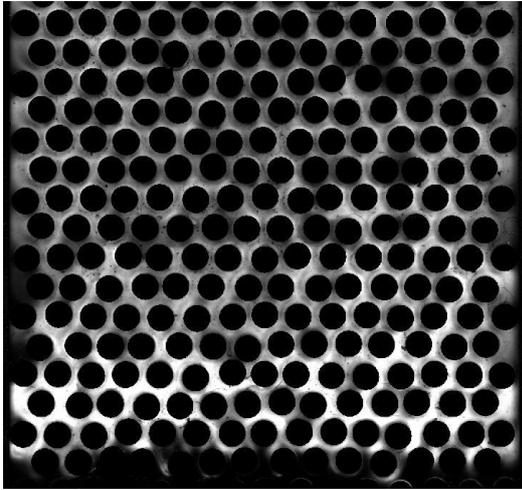


Figure 7 : Image moyennée sur 1500 images d'ébullition obtenues en chauffant 3 lignes

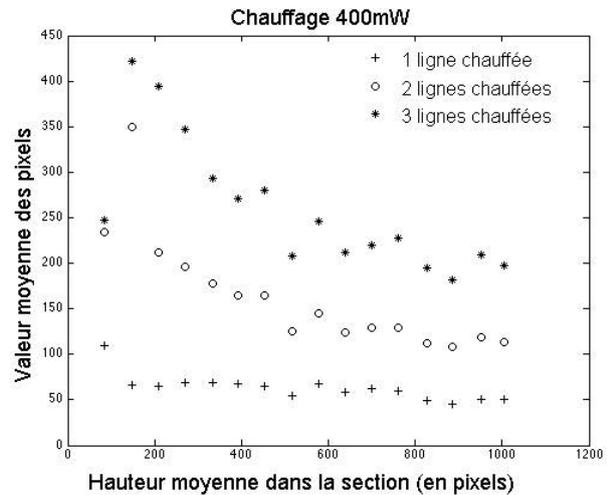


Figure 8 : Valeur du niveau de gris moyen en fonction de la hauteur dans la section

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, 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. Pour chacune de ces trois images, nous avons calculé le niveau de gris moyen sur des bandes horizontales en fonction de la hauteur dans la section. Les résultats, reportés sur le graphe de la figure 8, montrent la même tendance que ceux présentés en Figure 6 (l'étendue des niveaux de gris diffère entre les deux figures car les caméras utilisées et les temps d'exposition des images acquises sont différents dans les deux cas). On peut ainsi s'affranchir du suivi temporel des bulles au profit d'un traitement statistique d'images d'évènements décorrélés. Là encore, il reste à étalonner le niveau de gris moyen en fonction du taux de présence local de vapeur. Pour cela nous cherchons actuellement à estimer les volumes des bulles à partir d'images binarisées, c'est-à-dire converties en noir et blanc.

### 3.3. Binarisation des images

À notre connaissance, la bibliographie existante sur la binarisation d'images d'écoulements diphasiques en milieu poreux reste limitée à des régimes d'écoulements à bulles finement dispersées, de taille caractéristique inférieure aux constriction de l'espace poral [3]. Dans notre cas nous explorons des régimes d'ébullition plus intenses. De plus, à cause d'un éclairage frontal bien moins efficace qu'un éclairage traversant par face arrière (ce qui n'est pas possible dans notre configuration expérimentale), le contraste obtenu entre les bulles et le milieu poreux n'est pas très prononcé. Les bulles sur nos images ont souvent des formes complexes (Figure 4), mêlant parties convexes et concaves, du fait de leur confinement entre les plots cylindriques. Leur contour tout comme leur remplissage possèdent des zones aussi bien claires que foncées, car elles sont sièges de nombreux reflets dus aux cylindres environnants. Tout ceci rend les images particulièrement difficiles à traiter.

Nous avons mis au point une méthode pour binariser nos images, dont les grandes étapes sont les suivantes :

- Retrait de l'image de fond à l'image originale
- Application d'un masque pour éliminer les cylindres chauffants
- Application d'un seuil de niveau de gris pour binariser l'image
- Opération morphologique de dilatation-érosion pour lisser les contours des bulles
- Remplissage en blanc de l'intérieur des bulles (élimination de taches résiduelles)
- Labellisation des objets : attribution d'un numéro à chaque bulle identifiée

Les algorithmes de traitement d'images ont été écrits sous Matlab. Les deux étapes déterminantes sur les résultats finaux sont les opérations de seuillage et de dilatation-érosion, qui nécessitent d'appliquer un seuil puis une taille d'élément structurant qui sont déterminés à l'appréciation, sans critère quantitatif. L'opération de dilatation-érosion est essentielle pour lisser les contours des bulles, qui sont rongés par de nombreuses tâches à l'issue de l'étape de seuillage (Figure 9). Elle consiste à balayer les contours des bulles avec un "élément structurant", un cercle dans notre cas, qui vient successivement agrandir les contours (dilatation) puis les rétrécir (érosion). Cela peut résulter, selon le rayon du cercle utilisé, en un lissage plus ou moins partiel des bulles, voire à leur coalescence (Figure 9).

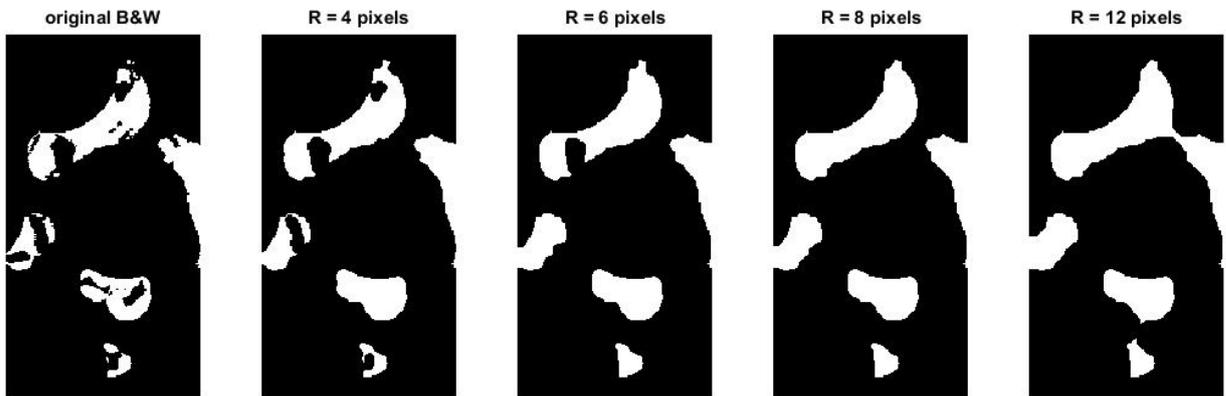


Figure 9 : Résultats de dilatation-érosion obtenus pour différents rayons d'élément structurant.

L'appréciation du seuil et de la taille de l'élément structurant se fait visuellement. En superposant à une image originale les contours des bulles obtenus sur son image binarisée, on estime à l'œil la correspondance entre l'image originale et celle en noir et blanc. Si ce n'est pas satisfaisant, on réitère les étapes de la binarisation en adaptant les paramètres jusqu'à ce qu'on estime que le résultat est convenable.

A partir des images binarisées, la détermination des surfaces des bulles permet de calculer le rapport de l'aire totale des bulles divisée par l'aire des pores. Cette fraction surfacique, bien que calculée grâce à la surface projetée des bulles dans un plan vertical, sans prise en compte de leur volume, peut être considérée comme un indicateur de l'ordre de grandeur du taux de vide dans la cellule d'essai, comme le proposent Jo et Revankar [3]. On obtient les résultats suivants en appliquant à nos images un seuil de niveau de gris de 195 et un rayon d'élément structurant de 7 pixels :

	1 ligne chauffée	2 lignes chauffées	3 lignes chauffées
Puissance thermique totale	5,6 W	11,6 W	17,2 W
Fraction surfacique de vapeur	0,07	0,22	0,47

Tableau 1 : Fraction surfacique de vapeur en fonction de différentes puissances de chauffe.

### 3.4. Vers une estimation du volume des bulles

Pour pouvoir évaluer un véritable taux de vide moyen correspondant à la fraction volumique de gaz dans la cellule, il nous faut estimer le volume des bulles. Nous distinguons pour cela trois populations de bulles. Les “petites”, de dimensions inférieures aux constriction de l’espace poral, sont considérées comme sphériques. Les “grosses”, de dimensions supérieures à l’écart entre les plaques céramique de la cellule, s’appuient sur les parois. Les bulles de dimension intermédiaire posent par contre des difficultés, leur épaisseur étant inconnue. Afin de calibrer notre estimation du volume des bulles et d’évaluer son incertitude, nous avons reproduit à l’imprimante 3D une cellule d’essai de géométrie identique au micromodèle chauffant, mais où de l’air est injecté dans une configuration isotherme en amont de la section, toujours parcourue par du HFE-7000. Des essais de bullage ont été effectués pour reproduire des motifs d’écoulements similaires à ceux obtenus avec l’expérience chauffante. Le débit d’air injecté est mesuré. La cellule d’essai, translucide, permet des visualisations par ombroscopie, offrant un bon contraste entre les bulles et le milieu poreux. Nous sommes actuellement en train de traiter les images de cette expérience de bullage avec les mêmes algorithmes que ceux utilisés pour l’expérience chauffante. L’idée est de retrouver par traitement d’images un débit de gaz correspondant à celui réellement mesuré : cela validera alors les paramètres utilisés dans nos algorithmes (seuil de binarisation, taille d’élément structurant et classification par taille des différentes populations de bulles) pour le calcul du volume des bulles et nous permettra d’estimer de manière rigoureuse une incertitude sur la mesure du taux de vide.

## 4. Conclusion

Un micromodèle de milieu poreux chauffant a permis de montrer et mesurer la baisse du flux critique d’assèchement autour d’un élément donné en fonction de l’augmentation du chauffage de la matrice poreuse environnante. L’objectif actuel est de relier cette évolution du flux critique au taux de vide, en exploitant des visualisations des expériences. Les traitements d’images se limitent pour l’instant à définir des indicateurs liés au taux de présence local de vapeur, ainsi qu’à calculer une fraction surfacique de gaz à partir des surfaces des bulles projetées dans un plan vertical. L’analyse reste à affiner afin d’estimer la fraction volumique de gaz. Pour cela une calibration des algorithmes de traitement d’image est en cours au moyen des visualisations d’une expérience de bullage isotherme où le débit d’injection de gaz est connu. A terme, on cherchera à quantifier expérimentalement l’influence du taux de vide sur le flux critique. Ces résultats devront être pris en compte dans les outils de simulation numérique du renoyage utilisés à l’IRSN, où les flux critiques sont actuellement déduits essentiellement de corrélations établies en ébullition convective de type « pool boiling ».

### 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] D. Jo, S. Revankar, Bubble mechanisms and characteristics at pore scale in a packed-bed reactor, *Chemical Engineering Science*, 64-13 (2009), 3179-3187.