

Méthodologie expérimentale de mesure de croissance et de détachement de bulles de vapeur pour l'ébullition nucléée en site isolé

Jaroslaw PAKLEZA*, Jean-Bertrand CHALFEN*, Marie-Christine DULUC*, Tomasz A. KOWALEWSKI, Andrzej CYBULSKI****

* LIMSI – CNRS, UPR 3251, B.P. 133, F-91403 Orsay Cedex.

** Centre de Mécanique et d'Informatique appliquée IPPT, Académie des Sciences de Pologne, 21 rue Swietokrzyska, PL-00-049 Varsovie, Pologne

Résumé - Un dispositif expérimental destiné à l'étude de la croissance de bulle en cavité est présenté. La visualisation des bulles, générées à partir d'un site unique, est réalisée à l'aide d'une caméra couleur 3CCD, dont la fréquence d'acquisition est artificiellement augmentée par utilisation d'un stroboscope. L'analyse d'images, effectuée à l'aide d'un ensemble de logiciels développés spécifiquement, donne accès à divers paramètres parmi lesquels le contour de la bulle, les composantes normale et tangentielle de la vitesse interfaciale ou encore les champs de vitesse et de température dans le liquide environnant, déterminés par PIV et PIT respectivement.

1. Introduction et situation de l'étude

La grande efficacité du transfert de chaleur par ébullition nucléée en fait un mode de réfrigération privilégié dans bon nombre d'applications. En dépit de la quantité considérable de résultats disponibles dans la littérature, essentiellement de nature expérimentale, la prédiction du phénomène reste imprécise. Les simulations numériques apparues au cours des dix dernières années, limitées de par la complexité du problème, à la modélisation de la croissance d'une bulle sur un site isolé, requièrent en parallèle des investigations expérimentales appropriées. Parmi les nombreux paramètres du problème, certains sont directement accessibles à la mesure, tels que l'évolution au cours du temps de la forme de la bulle par utilisation de caméras rapides [1,2]. L'étonnante variété de formes observables, souvent très éloignées de géométries simples, requiert la mise en œuvre d'une méthodologie adaptée à l'analyse de ces images. Dans ce travail, on présente une expérience destinée à l'étude de la croissance de bulle sur site isolé. Le traitement d'images, développé spécifiquement, permet l'accès à divers paramètres tels que la forme et le volume de la bulle, le vecteur vitesse à l'interface ainsi que les champs de vitesse et de température dans le bain obtenus par PIV (vélocimétrie par images de particules) et PIT (thermographie par images de particules).

2. Dispositif expérimental

2.1. Cellule de mesure

La génération de bulles est réalisée à l'intérieur d'une enceinte cubique d'arête égale à 80mm. Des canaux percés dans les parois de la boîte permettent la circulation d'un fluide caloporteur et par-là

même le maintien en température de la cavité et du liquide à l'intérieur à $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Chaque face latérale comporte un hublot de verre destiné à l'éclairage et à la visualisation (*figure 1*). La face supérieure est surmontée d'un tube transparent de hauteur 200 mm dont le rôle est d'assurer, par condensation de la vapeur générée, la stabilité du niveau dans la cavité à une valeur d'environ 100 mm. La cellule est obturée à sa base par un dispositif amovible sur lequel est fixée la surface chauffante selon une implantation interchangeable (*figure 2*). L'objectif, à terme, est de réaliser une visualisation simultanée dans le plan latéral et sous la plaque transparente afin d'observer la croissance de bulle, et l'évolution de la surface asséchée qui y est associée. Un premier dispositif dans lequel un fluide chaud circule entre deux surfaces de verre a été réalisé dans ce but. L'impossibilité d'immobiliser la bulle de vapeur générée nous a toutefois conduit à différer la mesure sur surface transparente. Un autre système de plaque chauffante a été conçu dans lequel l'unicité et la stabilité du site de nucléation sont assurées en créant localement un point chaud : la chaleur générée électriquement, est focalisée au centre de la plaque par un cône de laiton enchâssé dans une matrice isolante (*figure 2*). La surface en contact avec le liquide est ainsi constituée de deux disques concentriques ; le diamètre de la zone centrale ou point chaud, pouvant varier de 0,2 à 5 mm.

L'étanchéité de la cellule est assurée pour des pressions comprises entre 20 et 2000 mbar. Le fluide utilisé est de l'eau distillée. Les conditions de nucléation sont réalisées pour des pressions inférieures à l'atmosphère, la cellule de mesure étant connectée à un système de pompage. La pression à la surface libre est mesurée avec une précision égale à 0,1 mbar. Deux thermocouples, l'un situé dans le fluide en partie haute de la cavité et l'autre dans la pointe en laiton à 1 mm de la surface chauffante (*figure 1*), indiquent la température en ces points avec une précision de 0,1 K.

2.2. Prise de vues

La visualisation de la croissance de bulle est effectuée par caméra 3CCD couleur positionnée latéralement ((6) *figure 3*). Les images obtenues codées en 24 bits (3x8 bits), offrent une résolution de 768x574 pixels. La caméra étant une caméra vidéo standard (25 images/s), il est impossible d'enregistrer l'intégralité du cycle d'une bulle depuis le départ de la bulle précédente jusqu'à son propre détachement. La mesure de vitesse de croissance de bulle est cependant accessible par utilisation d'un stroboscope ((3) *figure 3*) dont la fréquence f_s judicieusement choisie permet l'obtention sur une même image de plusieurs contours successifs séparés entre eux par un intervalle de temps égal à $1/f_s$. Ce procédé permet ainsi d'augmenter artificiellement la vitesse de la caméra. Les images présentées ici ont été enregistrées avec une fréquence de stroboscope égale à 200 Hz, soit un nombre de flashes par image égal à 8. Plusieurs contours sont ainsi observés sur une même image. L'utilisation de la caméra en mode "images entrelacées" permet une première séparation des images en deux (*figures 4a et 4b*).

La détermination du champ de vitesse et de température dans le bain est obtenue par PIV (Particle Image Velocimetry) et PIT (Particle Image Thermography) en ensemençant le fluide à l'aide de cristaux liquides. Les particules encapsulées, de diamètre 25 μm , sont dispersées en concentration volumique suffisamment faible (10^{-5}) pour que leur effet sur le processus physique puisse être négligé. La visualisation est réalisée, perpendiculairement à l'axe de la caméra, sur un plan de lumière blanche généré par une fibre optique ((4) *figure 3*), couplée à une lentille cylindrique ((5) *figure 3*).

3. Procédure opératoire

La cavité est remplie d'eau distillée. Le dégazage de la cellule et du fluide est effectué à basse pression en portant pendant plusieurs heures la température du bain à 38°C . Les mesures et enregistrements vidéo sont réalisés lorsque tous les paramètres de contrôle (pression, température du bain et de la plaque chauffante) présentent des valeurs stationnaires. La visualisation est assurée en direct et en continu par un moniteur de contrôle. Les images présentées sur les figures 4a et 4b ont été obtenues au cours d'une expérience réalisée sous une pression de 35,7 mbar, pour une température de bain égale à $36,7^\circ\text{C}$. La température à 1 mm de la surface chauffante est de $51,2^\circ\text{C}$.

4. Traitement d'images

Un ensemble d'une quarantaine de logiciels a été développé pour réaliser le traitement complexe d'une série de prises de vues.

4.1. Séparation des images superposées

La première opération consiste décomposer chaque frame en deux images (*figures 4a et 4b*) par séparation des lignes paires et impaires d'enregistrement. Sur chaque nouvelle image apparaît maintenant le résultat de 4 éclaircissements consécutifs, toujours superposés. Le logiciel utilisé pour cette opération attribue aux fichiers comportant les images un code d'identification imposé par utilisateur et un numéro d'ordre dans cette série.

4.2. Extraction de contours des bulles

Cette opération est effectuée par un logiciel fondé sur la rotation de la matrice de Hirsch et amélioré au LIMSI pour affiner l'épaisseur des contours si possible jusqu'à 1 seul pixel. Les résultats de ce calcul sont présentés sur les figures 5a et 5b. A partir de ces images, on procède à la numérotation des contours pour une bulle choisie afin obtenir une séquence de son évolution spatio-temporelle. Selon la durée de "vie" d'une bulle, cette opération peut concerner une ou plusieurs frames. Dans l'exemple ici présenté, six contours numérotés de 1 à 6, sont retenus et enregistrés sur 6 images distinctes. Cette opération de séquençage, non entièrement automatisée à ce jour, nécessite l'intervention de l'opérateur.

4.3. Numérisation de contours de bulles

Chaque contour individuel, bien que visuellement correct, comporte des défauts, essentiellement de discontinuité : des pixels peuvent être manquants ou au contraire présenter des "doublons". Le calcul des grandeurs physiques, caractérisant le phénomène d'ébullition, à partir de telles images est en pratique inconcevable. Nous procédons alors à la reconstruction des contours des bulles en coordonnées cartésiennes à l'aide des polynômes de Bézier, fonctions continues et dérivables. Le calcul comporte deux étapes successives : on procède tout d'abord au tri et rangement des pixels pour le calcul, puis on définit, par une méthode itérative, le nombre de pôles et leurs coordonnées cartésiennes pour un seul polynôme de Bézier par contour entier. La précision obtenue par ce calcul est de 1,5 pixel, le nombre de pôles dans la plupart des cas, y compris pour les formes complexes, ne dépassant pas 11 (polynôme d'ordre 10). Six contours superposés, reconstruits à partir des fonctions de Bézier, sont représentés sur la *figure 6*. Il est ensuite possible de représenter sous forme d'images pixélisées l'évolution de la bulle de vapeur avec une haute résolution (*figure 7*). Cette étape du traitement d'images est entièrement automatisée.

5. Détermination de grandeurs physiques

5.1. Vitesse interfaciale

Le calcul du vecteur vitesse à l'interface, en chaque point du contour de la bulle, est réalisé de façon entièrement automatique et ce, quelle que soit la longueur N de la série d'images. Ce calcul, effectué à partir de deux images consécutives, est ainsi limité aux N-1 premières images (*figure 8*). Le logiciel, original et conçu au LIMSI, repose sur la technique du flot optique fondée sur l'utilisation de la programmation dynamique. Cette méthode présente plusieurs avantages : fonctionnement sur des séquences de longueur quelconque (deux images ou plus), propagation des contraintes de continuité et de régularité, obtention d'un champ dense et continu avec un vecteur de vitesse pour chaque pixel d'image. A partir des contours préalablement reconstruits par fonctions de Bézier, les composantes normale et tangentielle de la vitesse interfaciale sont déterminées et représentées sur la *figure 9* en fonction de la longueur évolutive des cinq contours.

5.2. Angle de contact et rayon de courbure

La représentation paramétrique ($0 \leq u \leq 1$) des contours par les courbes de Bézier rend directement accessible la détermination des angles de contact au point triple liquide-vapeur-solide. L'évolution dynamique de ces angles (dérivée première pour $u=0$ ou pour $u=1$) est représentée sur la figure 10. On remarque l'inversion du signe juste avant le décrochement de la bulle. Les rayons de courbure, paramètres utiles pour la comparaison avec la simulation numérique, sont calculés selon les relations classiques en chaque point de l'interface (figure 11).

5.3. Volume et diamètre équivalent

Le volume des bulles est déterminé avec une bonne précision, sous l'hypothèse d'axisymétrie, à partir des images pixelisées (figure 7). Le résultat du calcul est présenté sur la figure 12, selon la représentation habituellement retenue dans la littérature, en terme de rayon ou de diamètre équivalent.

5.4. Champ de vitesse et de température dans le fluide

L'ensemencement du fluide par des cristaux liquides permet de déterminer en 2D la structure et la distribution de la température momentanées dans le fluide entourant les bulles. Cette expérimentation exige un éclairage par un plan mince de la lumière blanche, perpendiculaire à la direction des prises de vues (figure 13a). Le champ de vitesse est reconstruit par une approche équivalente à celle des techniques PIV, les cristaux jouant le rôle d'un traceur quelconque. La méthode du flot optique, parfaitement adaptée aux domaines présentant des frontières mobiles, est à nouveau employée (figure 13b). La réflectivité de cristaux variant en fonction de la température, les images, enregistrées par une caméra 3CCD, présentent de la couleur sur la majorité des pixels. Chaque couleur (hue) est identifiée à une température après étalonnage préalable. On obtient ainsi, un champ quasi-continu de température dans le fluide (figure 13c), donnant en particulier accès aux gradients près de l'interface.

6. Conclusion et perspectives

Le dispositif expérimental présenté ici est destiné à l'étude de la croissance de bulles de vapeur générées à partir d'un site de nucléation unique. La visualisation, réalisée par caméra 3CCD couleur, associée à un traitement d'images performant, permet de déterminer avec précision les principales grandeurs physiques pertinentes telles que le rayon de courbure local, les composantes normale et tangentielle de la vitesse interfaciale, l'angle de contact ou encore les champs de vitesse et de température dans le fluide environnant.

Faute d'une caméra rapide, le dispositif n'autorise pas actuellement l'enregistrement du cycle complet d'une bulle depuis sa nucléation jusqu'à son départ. En revanche, l'emploi du stroboscope à des fréquences élevées ($f_s=300$ Hz) associé à un choix judicieux des temps d'ouverture de la caméra permet la capture de phénomènes très brefs tels que le détachement de la bulle. Nos efforts immédiats visent à développer la mesure du champ de température par cristaux liquides. En parallèle, la réflexion se poursuit pour parvenir à l'observation de la surface asséchée en paroi.

Références

- [1] N. Ginet, H. Louahlia, S. Cioulachtjian et M. Lallemand, Etude expérimentale de la croissance d'une bulle en ébullition nucléée, Congrès SFT 1999, Elsevier, Paris, France, 1999, pp. 455-460.
- [2] S. Son, V. K. Dhir, N. Ramanujapu, Dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, J. Heat Transfer (121) (1999) 623-631.
- [3] G. Quénot, J. Pakleza and T. A. Kowalewski, Particle image velocimetry with optical flow, Experiments in Fluids 25 (1998) 177-189.



Figure 1 : Cellule de mesure

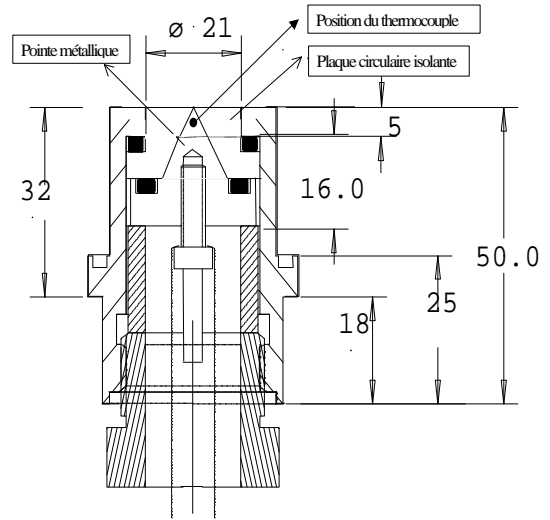


Figure 2 : Dispositif de chauffage

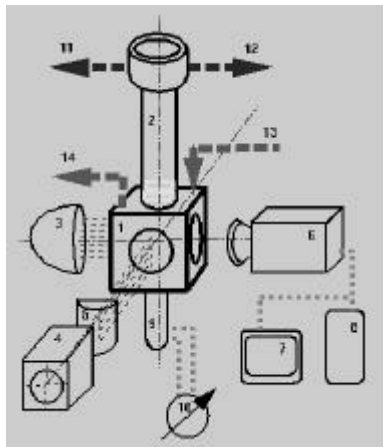


Figure 3 : Dispositif d'acquisition d'images

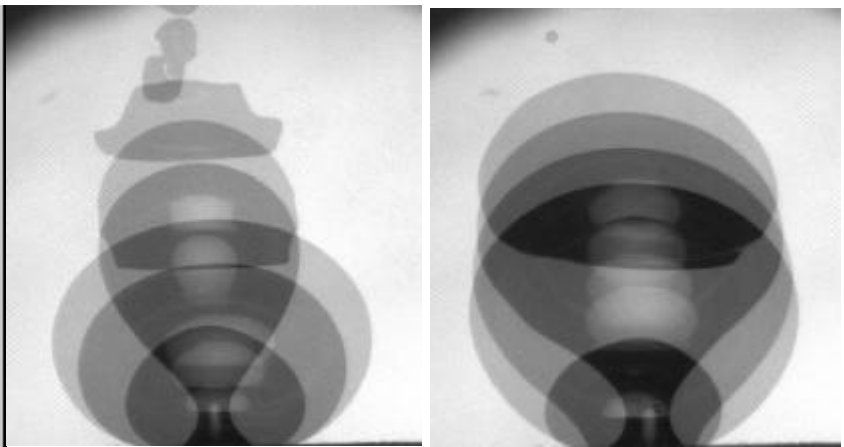


Figure 4 : Deux images consécutives obtenues à $P=35,7$ mbar avec $T_{\text{liquide}}=36,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{paroi}}=51,2^\circ\text{C}$ et $f_s=200$ Hz.

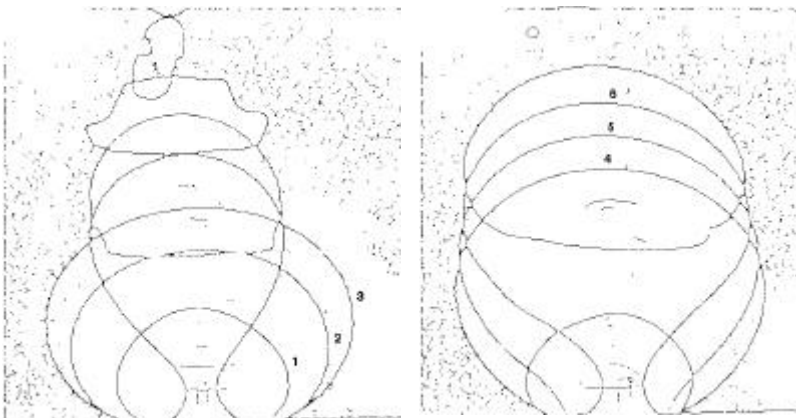


Figure 5 : Les deux images de la figure 4 après extraction des contours. Les contours numérotés de 1 à 6 correspondent à une même bulle.

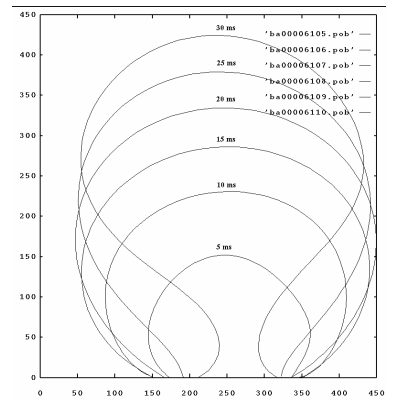


Figure 6 : Les 6 contours de la figure 5 reconstruits par fonctions de Bézier (l'abscisse et l'ordonnée sont indiquées en pixels)

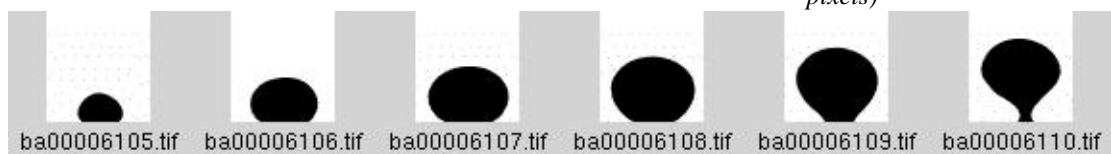


Figure 7 : Evolution temporelle de la bulle reconstruite par fonctions de Bézier. L'intervalle de temps séparant deux contours consécutifs est égal à 5 ms.

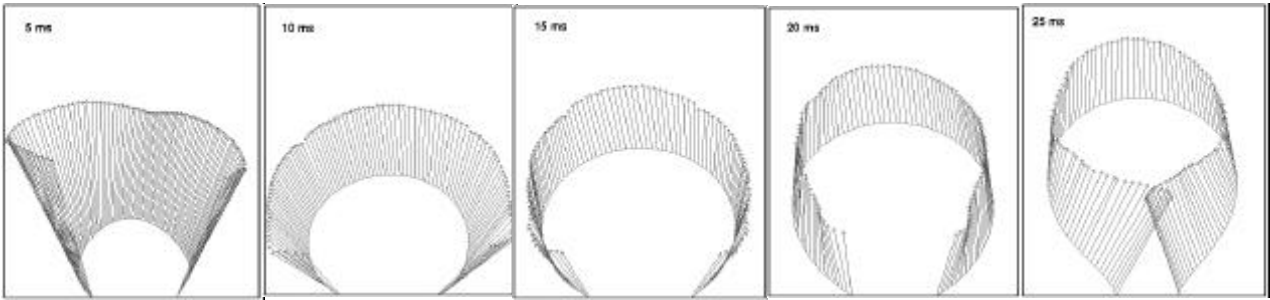


Figure 8 : Vitesse interfaciale obtenue par la méthode du flot optique à partir de deux contours consécutifs.

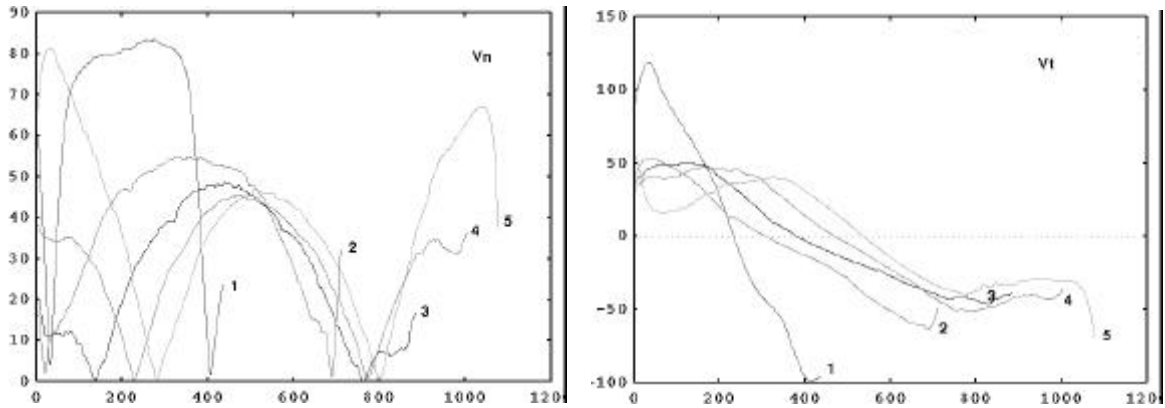


Figure 9 : Composantes normale et tangentielle de la vitesse interfaciale à 5 ms (1), 10 ms (2), 15 ms (3), 20 ms (4) et 25 ms (5). La coordonnée curviligne indiquée en pixels (1 pixel=18 μm) figure en abscisse. La vitesse est portée en ordonnées en pixels/période d'échantillonnage (100=0,36 m/s)

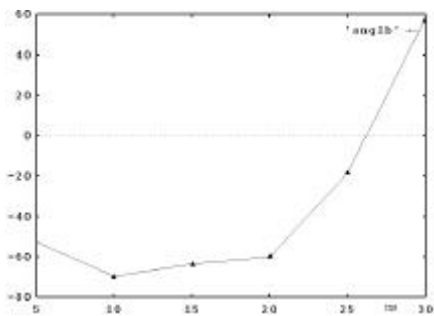


Figure 10 : Evolution temporelle de l'angle de contact entre la bulle et la paroi

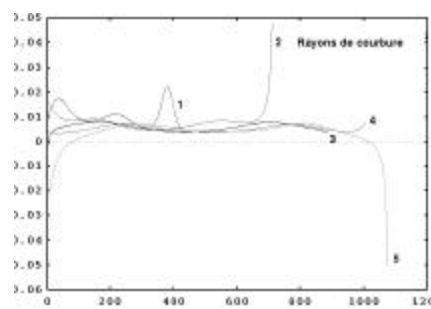


Figure 11 : Rayon de courbure en fonction de la coordonnée curviligne indiquée en pixels

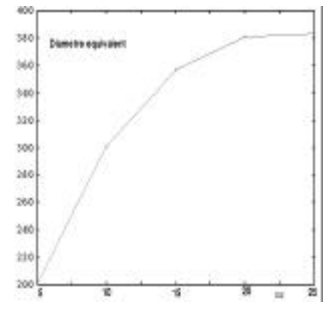


Figure 12 : Evolution temporelle du diamètre équivalent de la bulle

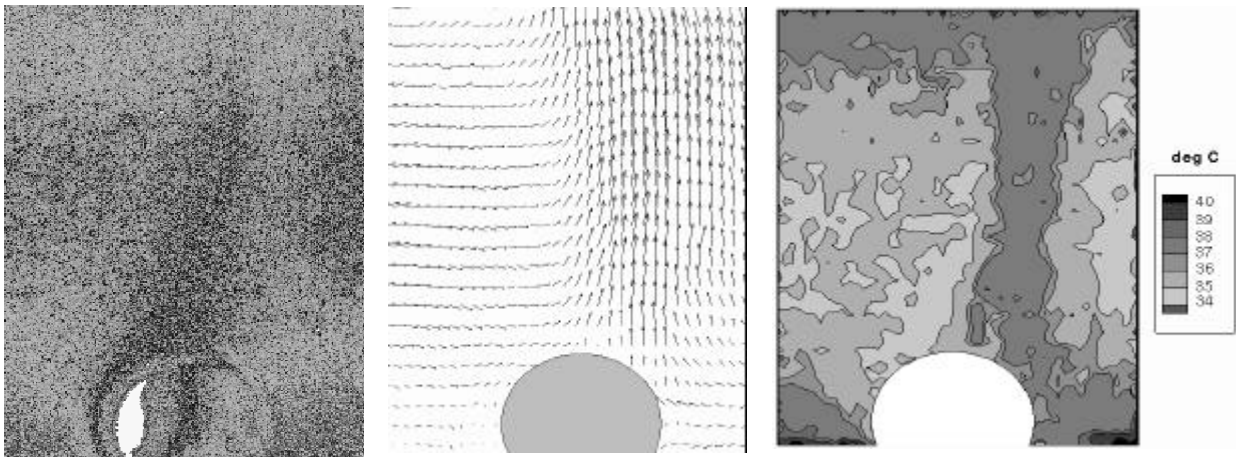


Figure 13 : Après ensemencement du bain par cristaux liquides (a), détermination du champ de vitesse (b) et de température (c) dans la cavité par PIV et PIT.