



HAL
open science

Cavitation hydrodynamique de nanofluides dans des microcanaux

Frédéric Ayela, Jean-Pierre Franc, Manuel Medrano, Christian Pellone, Pierre Jean Zermatten

► **To cite this version:**

Frédéric Ayela, Jean-Pierre Franc, Manuel Medrano, Christian Pellone, Pierre Jean Zermatten. Cavitation hydrodynamique de nanofluides dans des microcanaux. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422620

HAL Id: hal-03422620

<https://hal.science/hal-03422620>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Cavitation hydrodynamique de nanofluides dans des microcanaux

F. AYELA^a, J.P. FRANC^a, M. MEDRANO^a, C. PELLONE^a, P.J. ZERMATTEN^a

a. Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI), UJF – CNRS, BP 53, 38041, GRENOBLE Cedex 9

Résumé :

La réalisation de micro diaphragmes et de micro Venturis dont la section de passage est de quelques dizaines de μm^2 nous a permis d'obtenir des écoulements cavitant à des débits inférieurs au 1 l/h . Des liquides disponibles en quantité limitée peuvent ainsi être caractérisés. Nous avons étudié des nanofluides constitués de nanoparticules dispersées dans de l'eau déionisée. Lorsque l'on utilise des micro Venturis, la présence de cette phase solide, à raison d'une concentration volumique de 10^{-4} , n'a pas d'influence sur le retard dans l'apparition de la cavitation qui résulte de la métastabilité de la phase liquide de l'eau. Par contre, lorsque l'on utilise des microdiaphragmes, ce phénomène de métastabilité continue à être observé avec de l'eau déionisée pure, mais disparaît dès lors que l'eau estensemencée de nanoparticules au dessus d'une concentration seuil. Des interactions entre les nano agrégats et les structures tourbillonnaires présentes en aval des diaphragmes sont supposées être à l'origine de ce phénomène.

Abstract :

Silicon – Pyrex microchannels with micro diaphragms or micro Venturis inside have been micromachined by a Deep Reactive Ion Etching process. These devices allowed us to characterize hydrodynamic cavitation with low flow rates. De ionized water and nanofluids (solid volume concentration up to 10^{-4}) have been tested. A metastable liquid phase and a delay in the onset of cavitation have been observed with Venturis for both types of fluids. However, the solid phase had a strong influence on the onset of cavitation when using micro diaphragms. Above a critical concentration, the liquid could not sustain any metastable state anymore. Interactions between solid nano aggregates and vortical structures downstream the diaphragms are believed to be the origin of such a behaviour.

Mots clefs : cavitation, métastabilité, microsystèmes, nanofluides

1 Introduction

Associer la cavitation hydrodynamique aux microsystèmes fluidiques peut sembler inapproprié, puisque ces derniers sont généralement le siège d'écoulements laminaires à faible nombre de Reynolds tandis que la cavitation se rapporte à un régime diphasique pouvant abriter des zones tourbillonnaires turbulentes. Néanmoins, l'attaque ionique réactive profonde du silicium (en anglais deep reactive ion etching, DRIE) et la technique de scellement anodique entre le silicium et le Pyrex permettent de réaliser des canaux interrompus par des retrécissements dont le diamètre hydraulique est de quelques dizaines de micromètres. L'accélération d'un liquide à travers de tels micro orifices permet alors de diminuer sa pression. Sous certaines conditions, la pression chute sous sa valeur saturante ce qui favorise l'apparition de la cavitation. Il devient ainsi concevable de réaliser des expériences de cavitation hydrodynamique avec ces laboratoires sur puce en consommant de faibles quantités de liquide, et donc de caractériser des liquides particuliers que leur production limitée ou leur toxicité rendent incompatibles avec l'usage d'un banc expérimental de taille macroscopique.

La cavitation hydrodynamique a été largement étudiée pour ses conséquences néfastes d'érosion sur les turbomachines. Des études plus récentes relèvent du génie des procédés, avec le problème du traitement des polluants que pourraient favoriser les conditions thermodynamiques extrêmes régnant à l'intérieur des bulles cavitantes en phase d'implosion [1], ou avec la synthèse de composants favorisée par le brassage des constituants entraînés par le tourbillons turbulents des écoulements cavitants [2]. Projeter ces applications à

l'échelle d'un microsysteme est une démarche analogue à ce qui a été entrepris auparavant en biologie avec les 'labs on chip'. D'un point de vue plus fondamental, maîtriser la cavitation à l'échelle d'un microsysteme fluide permet d'envisager l'étude localisée d'une bulle cavitante, ou l'étude de l'influence de nanogermes solides sur la tension de rupture d'un liquide [3]. Les microsystemes fluidiques ont la particularité de présenter des surfaces de très faible rugosité dont les effets deviennent prédominants par rapport aux effets de volume. La croissance d'une bulle de vapeur dans ces conditions peut présenter des particularités spécifiques à ces géométries.

Les seules références relatives à la cavitation hydrodynamique dans des microsystemes fluidiques sont la série d'articles publiés par Peles et ses collaborateurs [4-6]. Effectués à une période où subsistaient quelques controverses quant à la validité des lois de l'hydrodynamique à petite échelle, ces travaux qualitatifs concernant uniquement de l'eau déionisée ont démontré qu'une approche classique de la répartition des pressions le long des micro écoulements permettait de comprendre l'arrivée et la disparition de la cavitation. Nous avons par la suite élargi le champ de ces investigations en caractérisant plusieurs micro diaphragmes possédant des caractéristiques géométriques variées, et en variant les conditions de sortie des écoulements [7]. Dans cet article, nous comparons les régimes de cavitation dans des micro diaphragmes et des micro venturis parcourus par de l'eau déionisée et des nanofluides (eau chargée en nanoparticules). Conjointement aux enregistrements des relations entre pertes de charge et débit, des observations des écoulements par caméra rapide ont été effectuées. Nous concluons à l'absence d'influence des nano-agrégats sur la cavitation par poche dans les micro venturis, tandis que le déclenchement de la cavitation par frottement au débouché des microdiaphragmes est favorisé avec des nanofluides au dessus d'une concentration seuil.

2 Cavitation hydrodynamique et microsystemes

2.1 Conditions de cavitation

On considère un canal rectangulaire de largeur W , profondeur H , dont la section d'écoulement WH est brutalement retrécie à la valeur wH sur une longueur négligeable devant la longueur totale de l'écoulement ; $w \ll W$ (figure 1-a). La présence de cet orifice se traduit par une accélération locale de la vitesse d'écoulement et donc par une diminution de la pression, qui atteint un minimum à la sortie de l'orifice.

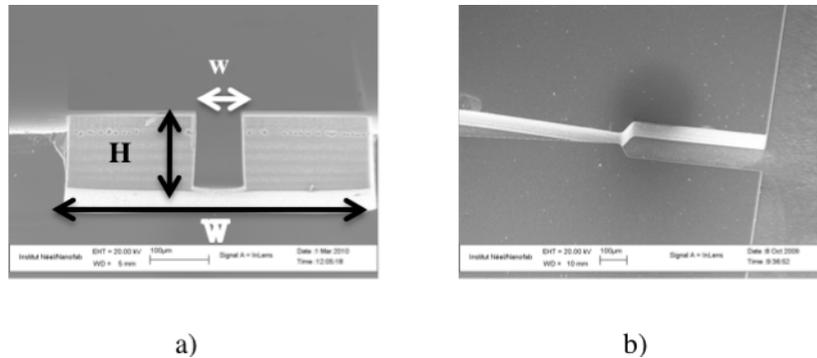


FIG. 1 – a) Coupe transversale d'un microcanal de largeur W et hauteur H , interrompu par un diaphragme de largeur w . b) Vue d'ensemble de l'entrée d'un micro venturi.

L'élargissement brutal de la section en sortie de l'orifice est la principale cause de chute de pression, et la différence de pression ΔP aux bornes d'un canal s'écrit :

$$\Delta P \approx \frac{\rho}{2C_d^2} \frac{1}{w^2 H^2} Q^2 \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique du liquide, C_d est le coefficient de décharge du diaphragme et Q le débit volumique. En augmentant ΔP , on augmente le débit et on peut démontrer [7] que quand Q excède Q_{cav} , défini par

$$Q_{cav} = H \left[W w \frac{C_d}{\rho} (P_{out} - P_{vap}) \right]^{1/2} \quad (2)$$

où P_{out} est la pression à la sortie du système, le minimum de pression chute sous sa valeur saturante P_{vap} .

On considère maintenant un venturi à section de passage rectangulaire, de hauteur H , largeur w au col, à la sortie duquel le diffuseur présente une ouverture caractérisée par un angle α sur une longueur L (figure 1-b). La pression minimale est attendue au col du venturi. Contrairement au cas du diaphragme, les pertes régulières en aval du rétrécissement, c'est à dire ici le long du diffuseur, ne sont plus négligeables et ont une influence sur la valeur critique du débit au dessus de laquelle la pression au col chute sous sa valeur saturante.

Pour comparer plusieurs systèmes de dimensions différentes ou de géométries distinctes, il est avantageux de remplacer ΔP et Q par deux nombres sans dimension : le nombre de cavitation σ défini par :

$$\sigma = \frac{2w^2H^2(P_{out} - P_{vap})}{\rho Q^2} \quad (3)$$

et le nombre de Reynolds au niveau du rétrécissement, défini classiquement par $Re = \rho u d_H / \eta$ où u est la vitesse débitante moyenne dans le rétrécissement, η la viscosité dynamique du liquide et d_H le diamètre hydraulique. Plus σ est faible, plus les conditions de déclenchement de la cavitation sont favorisées.

2.2 Réalisations et observations

La microfabrication des circuits suit un protocole classique qui a été déjà décrit auparavant [7]. Le principe des mesures est d'enregistrer la relation entre la différence de pression aux bornes du microsystème et le débit Q de fluide. En amont du dispositif, un filtre empêche la circulation de particules de taille supérieure à $1 \mu m$. La mise en mouvement du fluide conditionné dans une membrane souple est imposée par de l'azote pressurisé qui exerce une force sur la membrane. On évite ainsi la dissolution du gaz dans le liquide. Pour les observations par caméra rapide, nous avons réalisé des canaux optiquement transparents, ce que n'étaient pas les systèmes hybrides silicium – Pyrex réalisés jusqu'alors. Le principe et les étapes de fabrication sont représentés figure 2. Une feuille de silicium est scellée anodiquement sur un substrat en Pyrex. Si nécessaire, le silicium est aminci jusqu'à ce que son épaisseur égale la profondeur finale H souhaitée. On lithographie la géométrie souhaitée (micro diaphragme ou micro venturi) et on grave le silicium sur toute l'épaisseur. On scelle enfin un deuxième capot en Pyrex sur le système. Les orifices d'alimentation ont été préalablement percés au travers d'un des capots en Pyrex.

Une caméra rapide (Phantom V12) est positionnée parallèlement au plan d'écoulement à travers le microcanal considéré, en aval du rétrécissement. Un faisceau laser déviant de l'axe reliant la caméra au canal envoie un signal de référence focalisé sur la zone d'observation. Lorsque l'écoulement est monophasique et liquide, le faisceau n'est pas dévié et aucun signal lumineux n'arrive sur la caméra. En présence de bulles de vapeur, la lumière est diffusée vers la caméra. La faible épaisseur des canaux ($\approx 110 \mu m$) prévient de phénomènes de multi-diffusion, et le contraste enregistré est une indication précise du régime diphasique et de la localisation des bulles de vapeur caractéristiques de la cavitation.

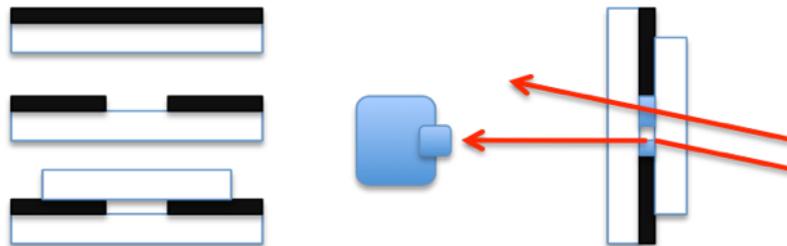


FIG. 2 – Étapes de fabrication de microcanaux optiquement transparents et principe d'observation du régime diphasique par caméra rapide.

Les clichés de la figure 3 se rapportent à un écoulement d'eau pure à travers un microdiaphragme. Les temps d'enregistrement ainsi que les conditions d'écoulement sont indiqués dans la légende. Un jet liquide persiste à la sortie du diaphragme et dévie sur le coté gauche (ligne pointillée rouge figure 3-a). Deux poches de recirculation sont créées, celle de plus petite taille subissant un gradient de vitesse et des contraintes tangentielles plus intenses. Les vortex présents à la frontière entre le jet émergent et la zone de recirculation sont le siège de dépressions localisées où se déclenche la cavitation. La pression régnant dans ces zones tourbillonnaires est inférieure à celle régnant dans la vena contracta en sortie du diaphragme. Ainsi, une fois le régime cavitant établi, celui-ci est susceptible de perdurer si le débit est diminué sous la valeur critique

Q_{cav} (eq. (1)). Cela correspond à une évolution du nombre de cavitation critique proportionnelle à la racine carrée du nombre de Reynolds à travers le diaphragme [8].

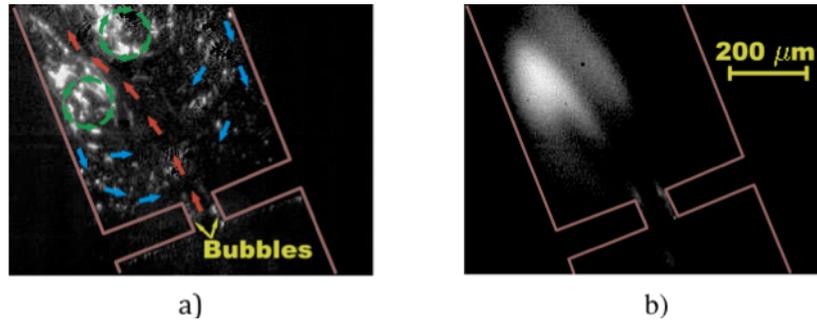


FIG. 3 – Clichés d’un débit cavitant ($P_{in} = 3,5$ bars, $P_{out} = 0,5$ bar, $Q = 227 \mu\text{l/s}$) pris avec des temps de pose a) : $5\mu\text{s}$ et b) : 41 ms. La profondeur du canal $H = 160 \mu\text{m}$ et la largeur du diaphragme $w = 54 \mu\text{m}$.

La nature du régime cavitant en aval d’un micro venturi est différente de celle observée en aval d’un micro diaphragme. Une poche de cavitation se développe, attachée à une paroi du diffuseur, en aval du col du venturi. Cette poche correspond à une zone dépressionnaire due au décollement laminaire du fluide alors en phase liquide. Les bulles de cavitation sont aspirées puis se développent dans cette poche. L’excès de vapeur dans la poche est périodiquement expulsé sous la forme de paquets de bulles en aval du diffuseur ; la recirculation du liquide vers l’extrémité de la poche est la cause de ces brisures périodiques.

3 Cavitation avec de l’eau déionisée et des nanofluides

3.1 Cavitation avec de l’eau déionisée

Les mesures de la différence de pression ΔP aux bornes des canaux en fonction du débit confirment la validité de l’équation (1) et d’un comportement hydrodynamique classique, pour la phase liquide. Cependant, l’écoulement reste en phase liquide pour des débits supérieurs à Q_{cav} . La rupture du liquide et la transition vers la cavitation se fait brutalement, en s’accompagnant d’un bruit audible et d’une légère chute de débit. En diminuant ΔP , la cavitation disparaît quand $Q < Q_{cav}$. Ce comportement métastable est caractéristique des microsystèmes car il découle de la faible rugosité des parois et de la filtration de germes de taille supérieure à $1 \mu\text{m}$ [9]. Il se traduit par une zone de recouvrement, dans un diagramme $\sigma(\text{Re})$, entre les points du régime non cavitant et ceux du régime cavitant.

3.2 Cavitation avec des nanofluides

Les nanofluides sont des suspensions diluées de nanoparticules dispersées ici dans de l’eau déionisée. Des publications récentes annoncent des comportements spécifiques de ces suspensions en ce qui concerne la tension de surface à l’interface liquide – gaz ou sur la croissance des bulles de vapeur [3, 10]. Rappelons qu’en tant que vecteurs de germes, des nanoparticules ont un rayon de courbure trop faible pour favoriser le développement de la cavitation [9]. Nous avons dispersé des nanoparticules de gadolinium enrobées d’une couche hydrophile de silice. La taille de ces nanoparticules est comprise entre 2 et 3 nm et les fractions volumiques solides caractérisées ont été comprises entre 10^{-5} et 10^{-4} . Des études précédentes sur la rhéologie de ce type de suspension [11] nous permettent d’estimer la taille moyenne des agrégats qu’elles produisent et la fraction volumique apparente ϕ_a , dans notre cas respectivement 25 nm et $10^{-4} < \phi_a < 10^{-3}$.

Les mesures comparatives sur un micro venturi ($H = 110 \mu\text{m}$, $w = 45 \mu\text{m}$, $\alpha = 3,5^\circ$) parcouru par de l’eau déionisée puis par un nanofluide de concentration $\phi = 7.10^{-5}$ n’ont démontré aucune différence comportementale. La figure 4 reporte les évolutions $\sigma(\text{Re})$. Les expériences avec le nanofluide ont été effectuées à quatre niveaux de pression de sortie différents. La métastabilité de l’eau permet d’atteindre en phase liquide des valeurs de σ relativement faibles, conjointement à des valeurs de Re grandes pour des systèmes microfluidiques. Une fois le régime cavitant établi, il perdure en diminuant Re et disparaît lorsque σ est supérieur à une valeur seuil σ_{des} quasiment confondue à celle mesurée avec de l’eau pure. La présence de nano agrégats dans le fluide n’a donc aucune influence notable sur les régimes de cavitation dans le micro venturi.

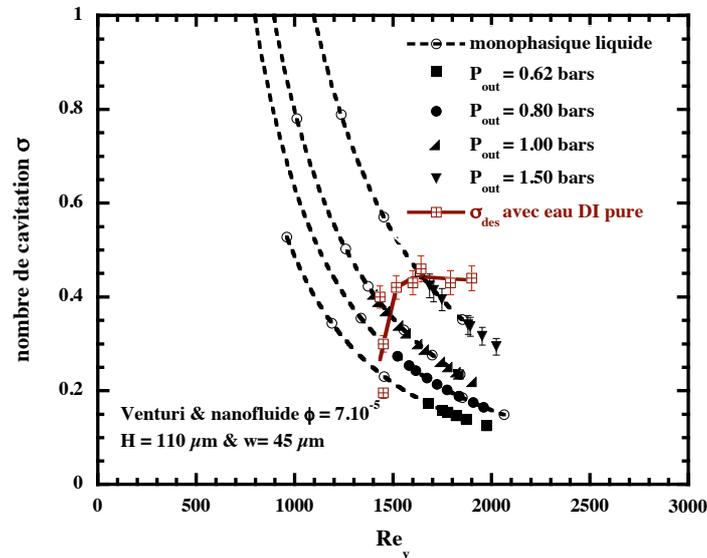


FIG. 4 – Evolution du nombre de cavitation en fonction de Re_v pour un micro venturi parcouru par un nanofluide. Les cercles vides accompagnés de lignes pointillées représentent les points expérimentaux en phase liquide. Les symboles pleins représentent les valeurs en régime cavitant. La coexistence, à P_{out} fixée, de points cavitants et non cavitants est la signature de la métastabilité de l'eau et du comportement hystérétique associé. La ligne continue σ_{des} délimite la zone de disparition de la cavitation mesurée avec l'eau pure. Elle est quasiment identique à celle que l'on obtiendrait avec le nanofluide

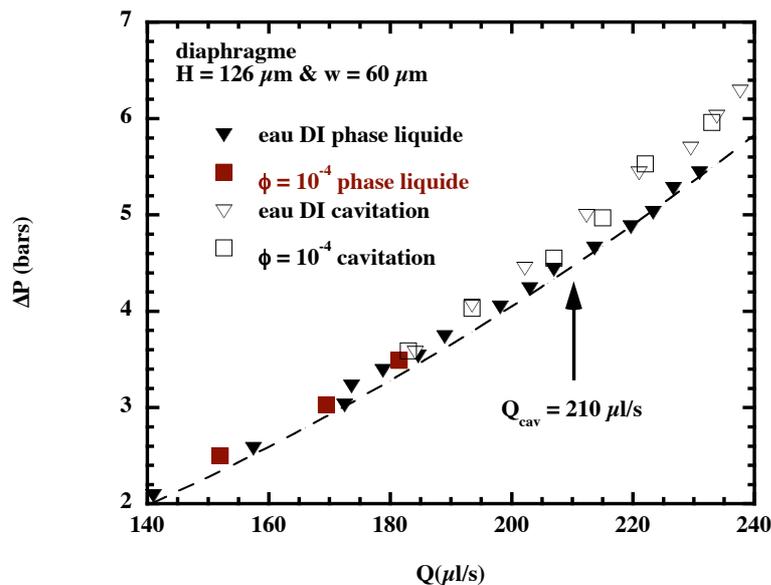


FIG. 5 – Exemple de transition vers la cavitation dans un microdiaphragme, en fonction de la concentration en nanoparticules. La pression de sortie est de 1 bar.

En ce qui concerne le déclenchement de la cavitation, des conclusions totalement différentes sont tirées des mesures faites avec un micro diaphragme avec $H = 120 \mu\text{m}$ et $w = 60 \mu\text{m}$. Cela est illustré figure 5 où une partie de la courbe $\Delta P(Q)$ est mise en exergue pour de l'eau pure (triangles) et pour une suspension de concentrations $\phi = 10^{-4}$ (carrés). L'eau pure présente un comportement métastable et hystérétique, avec une transition, lorsque ΔP augmente, à un débit $Q = 230 \mu\text{l/s}$ ($\approx \text{Re} = 2400$) supérieur à $Q_{\text{cav}} = 210 \mu\text{l/s}$ calculé avec l'eq. (2). Par contre, la cavitation se déclenche instantanément à $Q = 185 \mu\text{l/s} < Q_{\text{cav}}$ avec la suspension de concentration $\phi = 10^{-4}$. Bien qu'inattendu, l'effet de nanogermes solides sur le déclenchement de la cavitation dans ces géométries est reproductible. Il est certainement à relier aux observations optiques qui ont démontré l'existence de vortex dont le cœur possède une pression plus faible que celle en sortie d'orifice.

4 Conclusion

Il est possible de produire des écoulements cavitants à de débits inférieurs au litre / heure, au travers de micro diaphragmes ou de micro venturis gravés dans des microcanaux. Les régimes de cavitation observés à ces échelles sont identiques à ceux observés dans des dispositifs équivalents macroscopiques : cavitation par frottement en sortie d'un diaphragme, et cavitation par poche dans le diffuseur d'un venturi. La spécificité des microsystèmes étant la faible rugosité de leurs parois, l'utilisation d'eau déionisée a permis de mettre en évidence un régime d'équilibre métastable pour l'eau en phase liquide. Ce régime n'est pas perturbé par la présence de nanoparticules quand on utilise un venturi. Par contre, il ne résiste pas à la présence de nanoparticules quand on utilise un micro diaphragme. La présence de structures tourbillonnaires en aval de ce type de dispositif nous fait penser que des interactions entre la phase solide dispersée, au dessus d'une concentration seuil, et les vortex, sont à l'origine de cet effet. Des mesures complémentaires, avec une plus large gamme de concentration, devraient permettre de confirmer cette hypothèse.

Références

- [1] Wang X., Wang J., Guo P., Guo W., Wang C., Degradation of rhodamine B in aqueous solution by using swirling jet-induced cavitation combined with H_2O_2 , J. Hazard. Mat. 169, 486, 2009.
- [2] Suslick K. S., Mdleleni M. M., and Ries J. T., Chemistry induced by hydrodynamic cavitation, J. Am. Chem. Soc. 119, 9303, 1997.
- [3] Vafaei S., Purkayastha A., Jain A., Ramanath G. and Borca-Tasciuc T., The effect of nanoparticles on the liquid – gas surface tension of Bi_2Te_3 nanofluids, Nanotechnology 20, 185702 2009.
- [4] Mishra C. and Peles Y., Cavitation in flow through a micro-orifice inside a silicon microchannel, Phys. Fluids 17, 013601, 2005.
- [5] Mishra C. and Peles Y., Flow visualization of cavitating flows through a rectangular slot micro-orifice ingrained in a microchannel, Phys. Fluids 17, 113602, 2005.
- [6] Mishra C. and Peles Y., An experimental investigation of hydrodynamic cavitation in micro-Venturis, Phys. Fluids 18, 103603, 2006.
- [7] Medrano M., Franc J.P., Mohan M., Pellone C. Zermatten P.J. and Ayela F., Cavitation in microchannels, Proc. 2nd European Conf. Microfluidics, Toulouse, 2010.
- [8] Arndt R. E. A., Cavitation in vortical flows, Annu. Rev. Fluid Mech. 34, 143-175 2002.
- [9] Mørch K. A., Reflections on cavitation nuclei in water, Phys. Fluids 19, 072104, 2007.
- [10] Vafaei S. and Wen D., Effect of gold nanoparticles on the dynamics of gas bubbles, Langmuir 26 (10), 6902, 2010.
- [11] Chevalier J., Tillement O. and Ayela F., Structure and rheology of SiO_2 nanoparticles suspensions under very high shear rates, Phys Rev E **80**, 051403, 2009.