

Étude expérimentale de l'amélioration des transferts thermiques par les ultrasons sur une plaque plane verticale en convection forcée

Odin BULLIARD-SAURET^{1, 2*}, Sebastien FERROUILLAT², Laure VIGNAL², Alain MEMPONTEIL¹, Nicolas GONDREXON³

¹Univ. Grenoble Alpes, CEA/LITEN, F-38054 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, LEGI, F-38041 Grenoble, France

³Univ. Grenoble Alpes, LRP, F-38041 Grenoble, France

* (odin.bulliard-sauret@cea.fr)

Résumé - Les transferts thermiques et le contrôle de la température jouent un rôle central dans de nombreux procédés industriels. Aussi, une optimisation accrue des échangeurs de chaleur par un meilleur dimensionnement ou une diminution de la consommation énergétique liée aux procédés permet-elle une augmentation de la rentabilité économique et une diminution de l'impact écologique de ces derniers. Les ultrasons peuvent être employés à ces fins.

Cet article présente le banc d'essais ALTO qui permet une étude sur l'impact des ultrasons en convection forcée dans un canal plan vertical en conditions de transferts thermiques à flux de chaleur imposé. ALTO permet de réaliser des essais dans un écoulement en eau pour différentes fréquences ultrasonores (25 kHz, 1 MHz et 2 MHz) et pour des Reynolds allant de 170 à 3500. L'effet de la fréquence et de la puissance ultrasonore pour un régime d'écoulement à Reynolds 900 sont présentés dans ce communiqué.

Nomenclature

Symboles Latins

e Distance séparant deux mesures de températures, m

h Coefficient d'échange thermique convectif, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

S Section traversée par un flux, m^2

T Température, K

t Temps, s

C_p Chaleur spécifique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Symboles Grecs

ϕ Flux de Chaleur, W

λ Conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Δ Différence entre deux valeurs

Indices

1 ou 2 Se rapporte aux positions 1 ou 2

bulk Se rapporte au fluide

p Se rapporte à la paroi chauffante

US Grandeur physique avec ultrasons

1. Contexte scientifique de cette étude

Les performances des échangeurs de chaleur peuvent être améliorées de façon passive ou active. Les méthodes passives ne nécessitent pas d'apports d'énergie supplémentaire, et usent souvent de modifications géométriques au sein des échangeurs de chaleur ou en amont dans l'écoulement. Les méthodes actives au contraire nécessitent de l'énergie pour fonctionner [1]. L'une d'elles utilise les ultrasons.

Les ultrasons sont des ondes mécaniques correspondant à trois gammes de fréquences. Les basses fréquences (20 kHz à 100 kHz) génèrent une activité cavitationnelle aux effets mécaniques importants. Les moyennes fréquences (100 kHz à 1 MHz) génèrent simultanément une activité cavitationnelle à forte activité chimique et un mouvement convectif colinéaire à la direction de propagation de l'onde appelé « acoustic streaming ». Les hautes fréquences quant à elles (supérieures à 1 MHz) génèrent principalement du streaming acoustique.

Les premières publications traitant des effets bénéfiques des ultrasons sur les transferts thermiques datent de 1960 [2]. Depuis une dizaine d'années, les publications sur le sujet se sont multipliées [3]. Si l'on exclut du propos les procédés de séchage et de régénération des gels de silice, la quasi-totalité des publications traitent de convection naturelle ou d'ébullition en présence d'ultrasons à basse fréquence. Seules deux publications font référence à l'utilisation d'ultrasons de hautes fréquences [4] [5]. Les autres domaines d'études traitant de l'influence des ultrasons sur les transferts thermiques comprennent le changement de phase hors ébullition, les échangeurs de chaleur et les simulations numériques. Notre étude portera sur la convection forcée en géométrie plane. Pour plus d'informations sur les autres domaines d'études, le lecteur est invité à s'intéresser à la revue bibliographique sur le sujet de Mathieu Legay [3]. Depuis cet article datant de 2010, 25 nouvelles publications traitant de l'interaction ultrasons/transferts thermiques ont été recensées.

Treize publications traitent des transferts thermiques sous ultrasons en convection forcée généralement dans un contexte d'écoulement en géométrie cylindrique. Deux articles traitent de l'interaction ultrasons/écoulement dans un liquide [6] [7].

Les études paramétriques portant sur les échanges de chaleur en convection forcée sont aujourd'hui encore peu nombreuses.

2. Présentation du set up expérimental d'ALTO

La section d'essais ALTO a été fabriquée dans le but de réaliser une étude paramétrique en fréquence ultrasonore, nombre de Reynolds (changement de débit à entrefer fixe ou changement d'entrefer à débit fixe) et puissance (ultrasonore et thermique). L'objectif principal des expérimentations menées sur ALTO est de déterminer dans quelle mesure ces paramètres influencent l'amélioration des transferts thermiques soumis à des ultrasons en régime monophasique. Ces données permettront de déterminer quels couples de paramètres sont les plus appropriés aux applications thermiques telles que les échangeurs de chaleur ou le contrôle de température de surface à flux de chaleur imposé.

Le corps de la section d'essais est constitué d'une cuve en acier inoxydable munie de hublots permettant une visualisation des phénomènes ainsi que la mise en place de mesures des champs de vitesse par Particule Image Velocimetry. Un jeu de brides permet de changer les transducteurs ultrasonores afin de tester différentes fréquences.

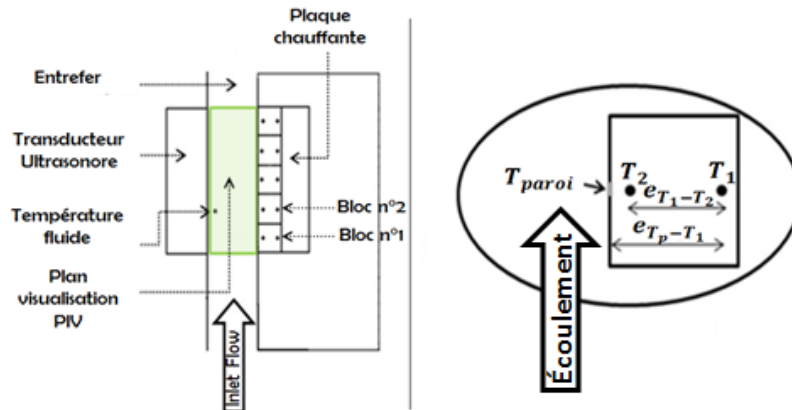


Figure 1 : Schémas de principe du canal de la section d'essais (gauche) et détails d'un des blocs en acier inoxydable (droite)

Ces derniers sont composés de blocs en acier inoxydable de 160×160 mm dont la surface active (générant les ultrasons) centrée face à la plaque chauffante mesure 100×100 mm. Les deux blocs haute fréquence (fabriqués par la société SONOSYS) sont constitués de quatre rangées de quatre transducteurs de même fréquence et d'une dizaine de millimètres de diamètre collés sur une tôle en acier inoxydable. Le bloc basse fréquence (fabriqué par la société SYNAPTEC) est lui constitué de quatre blocs de 25 kHz eux aussi collés sur une tôle en acier inoxydable.

L'organe principal de cette section d'essais est constitué par une plaque chauffante plane et verticale, instrumentée en thermocouples de type K (Figure 1) de 100 mm de long et 90 mm de large. Cinq blocs distincts en acier inoxydable séparés par des intercalaires en MACOR® (céramique présentant une conductivité thermique de $1.46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) constituent la partie externe du corps de chauffe du fluide caloporteur. La plaque chauffante est discrétisée en cinq blocs afin de se placer dans des conditions de validité de la loi de Fourier qui n'est rigoureusement utilisable que pour des flux de chaleur dont la direction de propagation est perpendiculaire à la section traversée par ce flux. Il est notable que sur une plaque plane verticale de taille suffisante, une composante verticale du flux de chaleur apparait. Les blocs chauffant présents sur ALTO sont dimensionnés de manière à ce que cet effet reste négligeable. Ces précautions sont prises afin de pouvoir calculer en toute rigueur pour chaque bloc inox le flux de chaleur, la température de paroi et le coefficient d'échange convectif.

Les blocs en acier inoxydable sont équipés chacun de deux thermocouples (Figure 1 schéma de droite) et d'un barreau chauffant pouvant dissiper 200 W. Le barreau est inséré dans un bloc de cuivre vissé au bloc en acier inoxydable afin d'homogénéiser le flux de chaleur. Un premier thermocouple est situé à l'opposé du fluide caloporteur et placé à deux millimètres du bloc de cuivre (mesure T_1). Coté fluide, un deuxième thermocouple est situé à deux millimètres de l'interface plaque chauffante fluide caloporteur (mesure T_2).

Dans la suite de cet article, chaque bloc sera numéroté de 1 à 5, le n°1 étant le plus proche de l'entrée fluide et le n°5 le plus proche de la sortie fluide.

Le flux de chaleur traversant chacun des blocs est déterminé par la loi de Fourier de diffusion de la chaleur exprimée par l'équation suivante :

$$\phi = -\frac{\lambda}{e_{T_1-T_2}} S(T_1 - T_2) \quad (1)$$

À partir de ce flux déterminé grâce aux valeurs mesurées de T_1 et T_2 , la température de paroi inox/fluide de la plaque chauffante (T_p) est calculée en utilisant cette même loi :

$$T_p = -\frac{\phi}{\lambda S} e_{T_1-T_p} + T_1 \quad (2)$$

Par la suite le coefficient d'échange convectif est calculé selon la loi classique suivante :

$$h = \frac{\phi}{S(T_{bulk} - T_p)} \quad (3)$$

La température du fluide (notée T_{bulk}) est mesurée par un thermocouple au niveau de l'entrefer. Une moyenne sur l'ensemble du temps d'acquisition est ensuite opérée. L'expérience a montré que la température du fluide ne varie pas de façon significative durant toute la procédure d'acquisition (moins de 1°C de variation). De même, la différence de température entre les températures du fluide à l'entrée et à la sortie du canal ne dépasse pas $1,5^\circ\text{C}$. Ceci est dû aux faibles valeurs de puissance de la plaque chauffante et des ultrasons relativement au produit $\dot{m}C_p$. Enfin, en déplaçant le thermocouple du fluide verticalement afin de déterminer un effet de position sur la mesure, il n'est apparu aucune variation de température. Le régime d'écoulement correspondant à un nombre de Reynolds égale à 900 pour ces essais, l'ordre de grandeur de la largeur du panache thermique issu de la plaque chauffante (environ 3 mm) reste très inférieur à l'ordre de grandeur de la distance T_{bulk} /paroi (25 mm).

La procédure d'acquisition est la suivante : après établissement thermique sans ultrasons, une acquisition de température est réalisée toutes les 10 secondes sur une période de 5 minutes. Ces mesures permettent le calcul du coefficient convectif sans ultrasons $h_{sans\ us}$. Tout en continuant l'acquisition, les ultrasons sont mis en fonctionnement à la puissance souhaitée. À partir de ce instant, la température de paroi ainsi que T_1 et T_2 chutent radicalement. Suite à un temps de stabilisation thermique d'une vingtaine de minutes, une nouvelle phase d'acquisition stationnaire de cinq minutes est opérée permettant d'obtenir le coefficient convectif avec ultrasons $h_{avec\ us}$. Le facteur d'amélioration du coefficient d'échange thermique est alors défini comme étant le rapport :

$$\frac{h_{avec\ us}}{h_{sans\ us}} - 1 \quad (4)$$

Chaque point présenté sur la Figure 3 est issu de la moyenne de six essais expérimentaux réalisés dans des conditions identiques. Afin de mesurer la dispersion de ces valeurs, l'écart-type pour chaque point est calculé. Pour l'ensemble des trois blocs présentés dans cette communication, plus de 51% de valeurs d'écart-type sur les moyennes sont inférieures à 10% ; 28% sont comprises entre 10% et 20% ; 12% sont comprises entre 20% et 30% et 7.7% sont supérieures à 30%. Tous les essais pour lesquels l'écart type est supérieur à 20% sont issus de tests réalisés à 1 MHz. Cette fréquence provoque une grande quantité de bulles de cavitation générant un effet stochastique important sur les résultats.

La puissance ultrasonore mentionnée dans cet article est déterminée par calorimétrie. Pour chaque fréquence et chaque puissance testée, les transducteurs sont caractérisés par l'élévation de température d'une masse d'eau isolée thermiquement de l'extérieur sur un temps donné. La puissance transmise à l'eau est alors calculée selon la formule suivante :

$$P_{us} = mC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (5)$$

L'implosion des bulles de cavitation produite pour les gammes de fréquences comprises entre 100 kHz et 2 MHz est connue pour sa capacité à générer des effets oxydants dus à la création de radicaux $\text{H}\dot{\text{O}}$. Pour cette étude, les effets de l'activité cavitationnelle à 1 MHz et 2 MHz ont été caractérisés par suivi spectrophotométrique de la cinétique de l'oxydation de l'iodure de potassium. Cette caractérisation préliminaire a permis de mettre en évidence une forte activité cavitationnelle à 1MHz. Aucune activité cavitationnelle capable d'oxyder l'iodure de potassium n'a en revanche été détecté à 2MHz.

3. Présentation des résultats

Cet article présente l'étude de l'influence de la puissance et de la fréquence ultrasonore sur le facteur d'amélioration des transferts thermiques. Les résultats qui suivent ont été obtenus pour des fréquences de 25 kHz, 1 MHz et 2 MHz et des puissances ultrasonores allant de 30 W_{US} à 120 W_{US} par pas de 30 W_{US} . Le débit en eau est fixé à 320 l/h et l'entrefer (distance transducteur plaque chauffante) est de 30 mm créant un régime d'écoulement dont le nombre de Reynolds est égal à 900.

Lorsque les ultrasons sont mis en marche ($t = 320$ secondes sur la Figure 2), la température de paroi chute radicalement et ce, quel que soit le bloc considéré. Dans le cas présenté figure 2, les différences de températures de paroi avec et sans ultrasons sont comprises entre 12°C (bloc 1) et 10 °C (bloc 3 et 4).

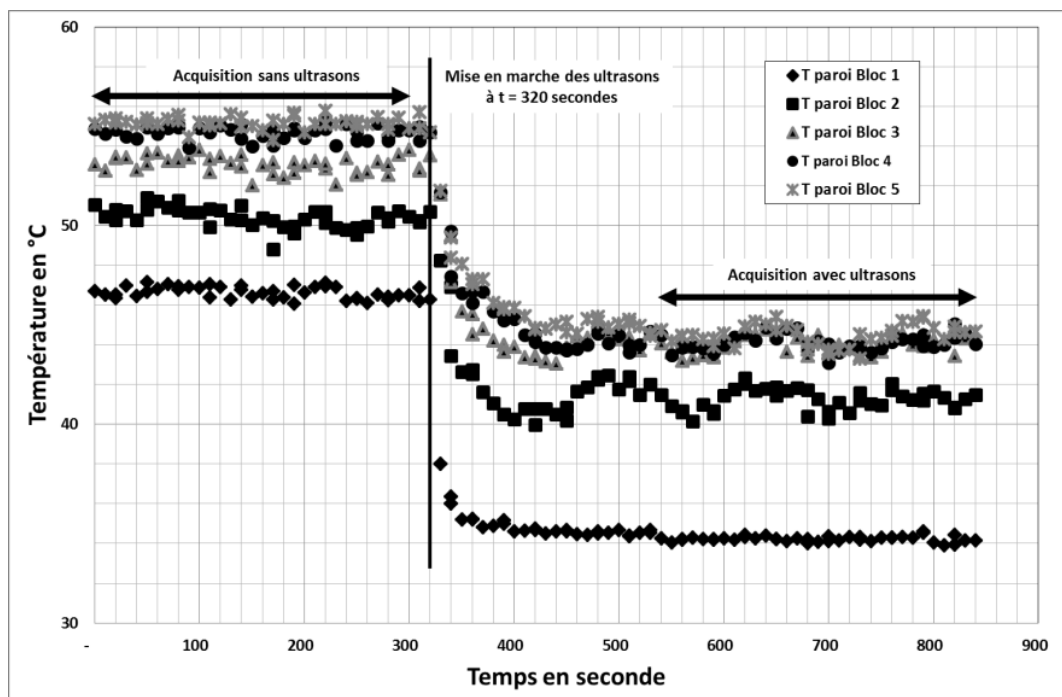


Figure 2 : Cinétique des températures de paroi soumises aux ultrasons pour chaque bloc inox de la plaque chauffante. Fréquence : 1MHz, Puissance ultrasonore 60 W_{US} , Puissance thermique sans US 303 W, Puissance thermique avec US 350 W

Pour chaque essai, le flux total imposé sur l'ensemble des cinq blocs est de 450 W. Cependant, du fait des pertes thermiques liées au système, cette puissance initialement imposée n'est pas celle mesurée au niveau de la paroi. Sa valeur varie également en fonction de la présence ou non d'ultrasons. Lorsque ces derniers sont à l'arrêt, les pertes thermiques s'élèvent à 150 W. Le flux traversant effectivement la paroi chauffante est alors d'environ 300 W (60 W par bloc). Grâce à l'amélioration du coefficient de transfert thermique induit à la paroi chauffante par les ultrasons, une partie du flux de chaleur initialement perdu par fuites thermiques est redirigé vers la surface chauffante (350 W sous ultrasons ; soit 70 W par bloc

chauffant). Par conséquent le coefficient d'échange thermique sans ultrasons est calculé à partir du flux mesuré en paroi pour le cas silencieux. L'inverse est réalisé dans le cas où les ultrasons sont en fonctionnement.

La Figure 3 présente les résultats liés à l'évolution du facteur d'amélioration du coefficient de transfert thermique en fonction de la puissance et de la fréquence ultrasonore ainsi que de la position de la mesure sur la plaque chauffante. Cet article ne présentera que les résultats issus des trois derniers blocs chauffants. En effet, les blocs n°1 et n°2 présentent des effets de bord importants et une mauvaise répétabilité.

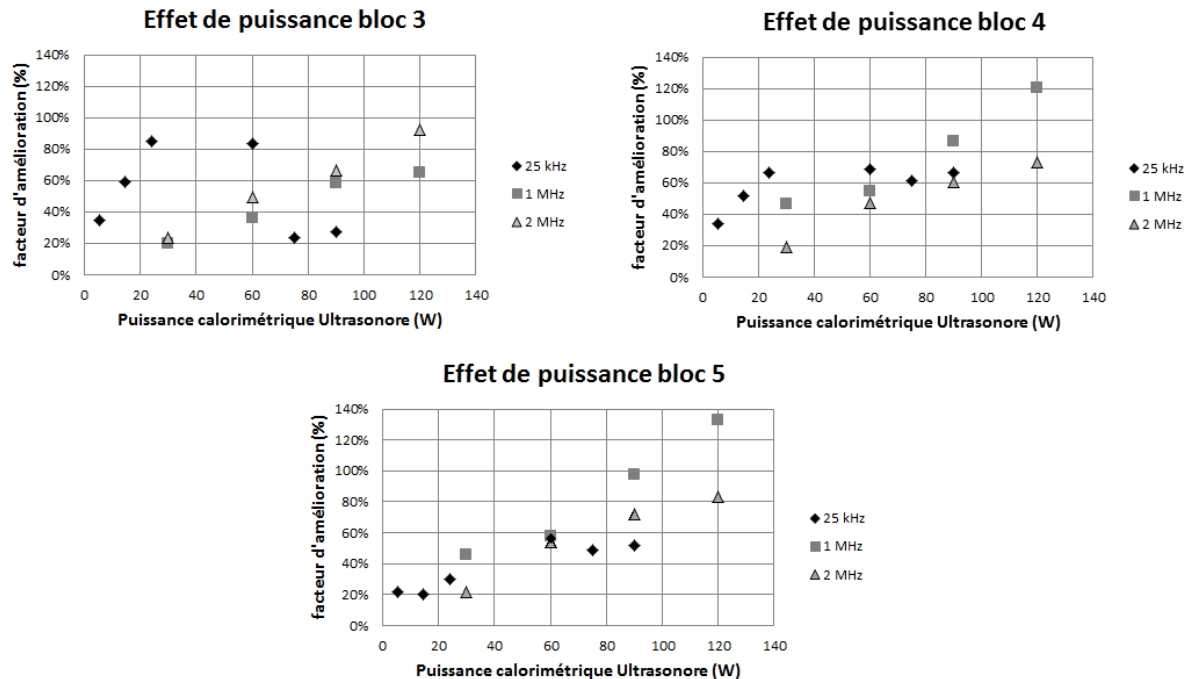


Figure 3 : Effet de puissance et de fréquence sur le facteur d'amélioration au niveau des trois derniers blocs chauffants pour un débit de 320 L/h, un entrefer de 30 mm (Reynolds de 900) et une puissance thermique par bloc de 60 W

À 1 MHz et 90 W_{US} , le facteur d'amélioration subit une forte augmentation au niveau des blocs chauffants n°4 et n°5. L'observation montre que ce phénomène est lié à l'apparition brutale de bulles de cavitation dans l'écoulement. Ces dernières stagnent ensuite à proximité de la paroi de ces blocs.

Les bulles de cavitation, qu'elles soient générées à basse ou à moyenne fréquence, oscillent ou s'effondrent violemment - suivant leur taille - sous l'effet du forçage induit par l'onde acoustique. Ces phénomènes permettent de créer un fort cisaillement et de l'agitation au voisinage proche des parois des bulles. Par conséquent, Lorsque ces dernières apparaissent près d'une surface chauffante, ces effets agissent au niveau de la couche limite thermique, créant une amélioration du transfert de chaleur. Pour cette fréquence et dans cette gamme de puissance acoustique, une augmentation de cette dernière induit une augmentation du facteur d'amélioration.

L'augmentation de la puissance acoustique à 25 kHz, permet l'augmentation du facteur d'amélioration jusqu'à un seuil au-delà duquel aucune évolution significative de sa valeur n'est observée (blocs n°4 et n°5). Pour des puissances ultrasonore inférieures à 60 W_{US} , cette fréquence induit globalement un facteur d'amélioration supérieur ou égal à celui induit à 1 MHz et 2 MHz.

Cependant, une chute brutale du facteur d'amélioration apparaît au niveau du bloc n°3 à partir de 75 W_{US} . Le champ acoustique produit à 25 kHz est spatialement inhomogène. Les

différents blocs chauffants ne sont donc pas tous irradiés avec la même intensité ultrasonore. Cette inhomogénéité spatiale est également dépendante de la valeur de consigne de puissance ultrasonore imposée (variation géographique des zones de forte activité cavitationnelle en fonction de la puissance acoustique). De plus, lorsque la consigne de puissance atteint des valeurs approchant les limites du système ($90 W_{US}$ pour cette étude), des fluctuations importantes des valeurs effectives de puissance acoustique générées dans le fluide apparaissent (plus ou moins 20 W). Par conséquent, il semble raisonnable d'attribuer cette chute brutale du facteur d'amélioration à une défaillance du matériel utilisé, plutôt qu'à un phénomène physique issu de l'interaction ultrasons/transferts thermiques.

L'effet d'amélioration des transferts thermiques à 2 MHz est beaucoup plus homogène qu'à 1 MHz ou 25 kHz. Pour les quatre blocs chauffants, les valeurs du facteur d'amélioration sont de 20% à $30 W_{US}$ et atteignent 70% à 90% pour $120 W_{US}$. Cette fréquence ne génère qu'un effet convectif dont la direction de propagation est colinéaire à celle de l'onde acoustique. Dans cette expérience, le streaming acoustique impacte donc perpendiculairement la plaque chauffante. Cet effet est beaucoup plus homogène que les effets induits par la cavitation. Cependant il est également beaucoup plus sensible au débit imposé dans l'entrefer.

4. Conclusion et perspectives

Les essais obtenus jusqu'à présent ont permis de mettre expérimentalement en évidence le fait que les ultrasons génèrent une nette amélioration du coefficient d'échange thermique et ce, quelles que soit les gammes de fréquences utilisées. Ce résultat en lui seul constitue une avancée par rapport à la bibliographie existante. En effet, la seule étude comparative des effets de fréquence sur l'amélioration du coefficient de transfert thermique connue à ce jour concerne une étude numérique réalisée entre 24 kHz et 1.7 MHz par Maryam, et al. en 2014 [4].

Un effet couplé de fréquence et de puissance acoustique a également été mesuré. A 25 kHz, après une rapide augmentation, les valeurs du facteur d'amélioration atteignent un seuil lorsque la puissance ultrasonore imposée est égale à $65 W_{us}$. En revanche le facteur d'amélioration à 1 MHz et 2 MHz croît constamment lorsque la puissance acoustique augmente. Des essais complémentaires sont nécessaires afin de déterminer pour ces fréquences s'il existe ou non un effet de seuil à partir d'une certaine puissance acoustique.

L'impact des ultrasons à 1MHz sur l'augmentation du coefficient de transfert thermique semble plus grand que pour les autres fréquences. Cependant, la reproductibilité des essais pour cette fréquence semble moins bonne qu'à 25 kHz ou 2 MHz.

L'étude de l'impact du régime d'écoulement (variation du paramètre de Reynolds) est actuellement en cours. Ceci permettra de valider ou d'infirmer l'hypothèse selon laquelle l'effet convectif généré par les moyennes et les hautes fréquences est balayé par l'écoulement du fluide caloporteur tout en conservant tout ou partie de l'activité cavitationnelle lorsqu'elle existe.

Références

- [1] **Léal, Miscevic, et al.**, An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials. 2013, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 61, pp. 505-524.
- [2] **Kave et Fand**, Acoustic streaming near a heated cylinder. 1960, *Journal of the Acoustical society of America*, Vol. 32, pp. 579-584.

- [3] **Legay, Gondrexon, et al**, Enhancement of heat transfer by ultrasound: Review and Recent advances, 2011, *International Journal of Chemical Engineering*.
- [4] **Maryam, Dehbani, et al.**, CFD modeling of convection heat transfer using 1.7 MHz and 24 kHz ultrasonic waves a comparative study, 2014, *Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1319–1333.
- [5] **Rahimi, Dehbani et Abolhasani**, Experimental study on the effects of acoustic streaming of high frequency ultrasonic waves on convective heat transfer: Effects of transducer position and wave interference, 2012, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 720-725.
- [6] **Nomura, Kawada et Murakami**, Effects of Turbulence by Ultrasonic Vibration on Fluid Flow in a Rectangular Channel, 11A, Novembre 2002, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 41, pp. 6601-6605.
- [7] **Nomura, Sasaki et Murakami**, Flow pattern in channel during application of ultrasonic vibration, 2000, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 37, pp. 4987-4989.