

Influence de l'interaction entre ultrasons et écoulement sur l'intensification du transfert thermique : effets de la fréquence des ondes selon le régime hydrodynamique

Influence of interaction between ultrasound and flow on heat transfer enhancement: waves frequency effects depending on flow regime

Christophe PONCET^{1*}, Odin BULLIARD-SAURET¹, Sébastien FERROUILLAT¹, Laure VIGNAL¹, Nicolas GONDREXON²

¹ Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Université Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP, LEGI, 38000 Grenoble, France

² Laboratoire Rhéologie et Procédés, Université Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, 38000 Grenoble, France

*(auteur correspondant : christophe.poncet@univ-grenoble-alpes.fr)

Résumé – La capacité des ultrasons à intensifier les transferts thermiques convectifs a été largement démontrée. Cependant, l'intensification produite par un champ ultrasonore dépend fortement de plusieurs paramètres, tel que le régime d'écoulement ou la fréquence des ondes. Cette étude présente l'influence de la fréquence des ultrasons et du régime d'écoulement sur l'intensification du transfert thermique et sur l'hydrodynamique en convection forcée.

Mots-clés : Ultrasons, Intensification, Transfert thermique, Régime d'écoulement, Convection

Abstract - The efficiency of ultrasound to enhance heat transfer has been widely demonstrated. However, the enhancement produced by an ultrasonic field strongly depends on several parameters, such as the flow regime or the wave frequency used. This study focuses on the influence of ultrasonic frequencies and flow regime on heat transfer enhancement and on hydrodynamics in forced convection.

Keywords: Ultrasound, Enhancement, Heat transfer, Flow regime, Convection

Nomenclature

<i>HTEF</i>	Facteur d'intensification du transfert thermique, %	<i>Symboles grecs</i>	
<i>Nu</i>	Nombre de Nusselt	Φ	Flux thermique, W
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	λ	Conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
<i>S</i>	Surface d'échange, m ²	μ	Viscosité dynamique, Pa.s
<i>T</i>	Température, °C	ρ	Masse volumique, kg.m ⁻³
<i>TKE</i>	Energie cinétique turbulente, m ² .s ⁻²	<i>Indices</i>	
<i>v</i>	Composante de vitesse, m.s ⁻¹	<i>f</i>	Se réfère au fluide
<i>V</i>	Vitesse débitante de l'écoulement, m.s ⁻¹	<i>p</i>	Se réfère à la paroi chauffante
<i>y</i>	Position verticale le long de la plaque chauffante, m	<i>US</i>	Se réfère aux ultrasons

1. Introduction

1.1. Généralités sur les ultrasons

L'utilisation des ultrasons est désormais une méthode reconnue permettant d'intensifier les transferts thermiques [1,2]. Selon la fréquence, les ultrasons sont à l'origine d'effets hydrodynamiques différents : la cavitation acoustique et les courants acoustiques. La cavitation acoustique est principalement observée à basse fréquence (de 20 kHz à quelques centaines de kHz). L'implosion violente des bulles de cavitation induit des effets hydrodynamiques locaux intenses. Lorsque l'implosion des bulles a lieu à proximité d'une paroi solide chauffante, la couche limite s'en trouve fortement perturbée [3], induisant une intensification des transferts thermiques convectifs [4]. Les courants acoustiques sont générés par la dissipation et l'atténuation de l'énergie des ondes acoustiques, à l'origine d'un gradient de pression à l'intérieur du fluide. Ce gradient de pression induit un écoulement à flux massique net nul (recirculations) colinéaire au champ acoustique [5] et induisant du cisaillement, une augmentation du mélange et finalement une intensification des transferts thermiques [6].

1.2. Interaction entre ultrasons et écoulements

Plusieurs études ont démontré que l'émission d'ultrasons dans un fluide peut se traduire par l'apparition d'un profil d'écoulement turbulent en régime laminaire [7] ou l'augmentation de l'énergie cinétique turbulente (TKE) [8]. La répartition de la TKE produite par les phénomènes hydrodynamiques ultrasonores au sein de l'écoulement est différente selon ces mêmes effets et donc selon la fréquence utilisée [9]. Réciproquement, le régime d'écoulement semble également influencer le comportement des phénomènes induits par les ultrasons. Plusieurs études ont démontré que les effets sonochimiques, dus à la cavitation acoustique, sont intensifiés en présence d'un écoulement [10,11]. Les courants acoustiques sont eux aussi fortement influencés par le régime d'écoulement. Ces derniers, lorsqu'ils sont produits perpendiculairement à un écoulement, peuvent être dissipés lorsque les vitesses débitantes sont trop importantes [3]. Ainsi, l'augmentation de la TKE associée aux courants acoustiques diminue à mesure que le nombre de Reynolds augmente [12, 13].

1.3. Interaction entre ultrasons et transfert thermique en convection forcée

Plusieurs études expérimentales ont analysé l'évolution du transfert thermique soumis à un champ ultrasonore de basse fréquence [12] ou de haute fréquence [6], en fonction de la vitesse de l'écoulement dans différentes configurations d'échangeurs thermiques [2, 13]. Les conclusions sont similaires : les transferts thermiques sont systématiquement intensifiés par les ultrasons, dont l'effet diminue à mesure que la vitesse débitante augmente. Il a également été démontré que la zone d'influence du champ ultrasonore, correspondant à la zone pour laquelle le transfert thermique est intensifié, tend à se déplacer en aval de l'écoulement lorsque la vitesse débitante augmente [12]. Cependant, il a également été montré que la production de turbulence par la cavitation acoustique tend à être améliorée par l'augmentation de la vitesse débitante induisant une intensification des transferts thermiques [9]. Ces résultats sont en accord avec le fait que les effets sonochimiques sont intensifiés en présence d'un écoulement. Il semble donc y avoir contradiction entre certaines études en ce qui concerne l'interaction entre la cavitation acoustique et la vitesse débitante ou le régime d'écoulement. Il est à noter que ces études contradictoires ne concernent pas les mêmes gammes de régimes d'écoulement ou de vitesses débitantes. L'interaction cavitation acoustique / écoulement semble présenter deux

comportements différents en fonction des vitesses débitantes ou des régimes d'écoulements en présence.

L'objectif de cette étude vise donc à analyser l'influence des ultrasons et de leur fréquence sur le transfert thermique et l'hydrodynamique en fonction du régime d'écoulement

2. Matériels et méthodes

2.1. Section d'essais

La présente section d'essais permet d'étudier l'intensification des transferts thermiques par ultrasons en convection forcée. L'écoulement s'effectue verticalement le long d'une paroi chauffée à flux imposé et constituée de 5 blocs indépendants, dans un canal de section rectangulaire avec un entraxe de 33 mm, et de largeur 100 mm. Un émetteur positionné en vis-à-vis permet de générer un champ ultrasonore, perpendiculairement à l'écoulement. L'établissement de l'écoulement est assuré par un canal d'établissement de longueur L (0,9 m) (figure 1.a). L'écoulement est ainsi hydrodynamiquement établi, mais thermiquement non-établi. Des thermocouples placés au niveau de la paroi d'échange et du fluide permettent la détermination du coefficient local d'échange convectif (figure 1.b).

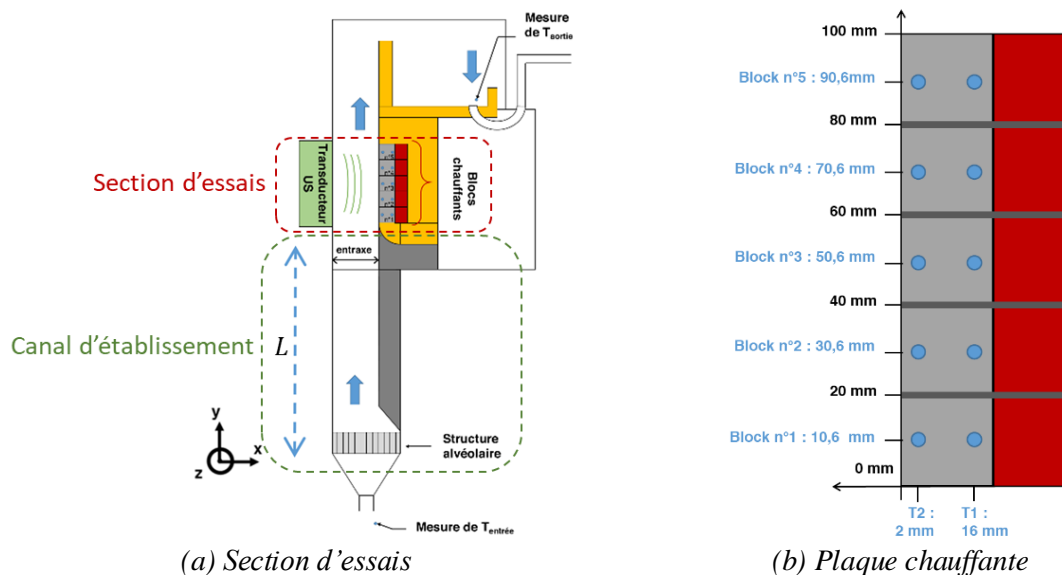


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

Ce dispositif expérimental est intégré à un banc thermo-hydraulique garantissant la maîtrise et la mesure du débit et de la température du fluide. La gamme de débit étudiée est comprise entre $0,21 \text{ m}^3/\text{h}$ et $3,40 \text{ m}^3/\text{h}$. Il est ensuite possible de déterminer un nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \times V \times D_h}{\mu} \quad (1)$$

Deux émetteurs ultrasonores distincts sont utilisés dans cette étude : 25 kHz (ultrasons basse fréquence) et 2 MHz (ultrasons haute fréquence). Leur caractérisation (test de la feuille d'aluminium) a permis de confirmer que l'émetteur 25 kHz produit de la cavitation acoustique à même de générer des effets mécaniques intenses. L'émetteur 2 MHz, quant à lui, induit d'intenses courants acoustiques, produisant du mélange par recirculation au sein du fluide, alors qu'aucun phénomène de cavitation (chimique ou mécanique) n'a été observé pour cette fréquence. De manière à assurer une comparaison pertinente, la puissance acoustique a été

déterminée par méthode calorimétrique pour chacun des transducteurs, et est fixée à 110 W pour l'ensemble des essais.

2.2. Méthode d'analyse du transfert thermique local

Le flux thermique Φ et la température de paroi T_p de chacun des blocs chauffants sont déterminés grâce aux thermocouples T1 et T2 (figure 1.b) et à la loi de Fourier. Les nombres de Nusselt au niveau de chaque bloc peuvent être déterminés selon le diamètre hydraulique D_h :

$$Nu = \frac{\Phi}{S \times (T_p - T_f)} \times \frac{D_h}{\lambda_f} \quad (2)$$

L'intensification des transferts thermiques est quantifiée par le facteur d'intensification HTEF (*Heat Transfer Enhancement Factor*), défini par :

$$HTEF = \frac{Nu_{avec\ US} - Nu_{sans\ US}}{Nu_{sans\ US}} \times 100 \quad (3)$$

Les barres d'erreurs présentes pour chaque résultat correspondent à l'écart-type calculé sur 6 essais avec des conditions initiales identiques.

2.3. Méthode d'analyse de l'hydrodynamique

En parallèle des mesures thermiques, des mesures de champs de vitesse sont réalisées dans la section d'essais par Particule Image Velocimetry (PIV), selon deux dimensions et deux composantes v_x et v_y (2D-2C). Cette méthode permet de suivre, à l'aide d'une caméra, des particules réfléchissant la lumière d'une nappe laser. Ceci permet donc d'obtenir le champ de vitesses dans le plan créé par la nappe laser. Les vitesses sont déterminées grâce à la mesure du déplacement des particules entre deux images séparées par un temps Δt [s] connu précisément. Par la suite, un logiciel traite les données de la caméra et calcule les champs de vitesse instantanée (v_i). Un champ de vitesses moyennes (\bar{v}) en est alors déduit. La TKE de l'écoulement est ensuite déterminée à partir de l'expression suivante, avec 2500 champs instantanés mesurés (N) [14]:

$$TKE = \frac{3}{4} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}{(N - 1)}} \quad (4)$$

La TKE, qui quantifie les fluctuations de vitesse instantanée au sein de l'écoulement, sera utilisée dans cette étude afin d'analyser l'influence des ultrasons sur l'hydrodynamique. Dans l'équation 4, le facteur $\frac{3}{4}$, et non $\frac{1}{2}$, permet de prendre en compte le fait que la mesure est réalisée selon le plan 2D de la nappe laser au lieu d'être en 3D [14]. En régime turbulent, afin de quantifier la TKE uniquement générée par les ultrasons, un facteur d'intensification de la TKE est défini de la même manière que le HTEF (équation 3), tel que :

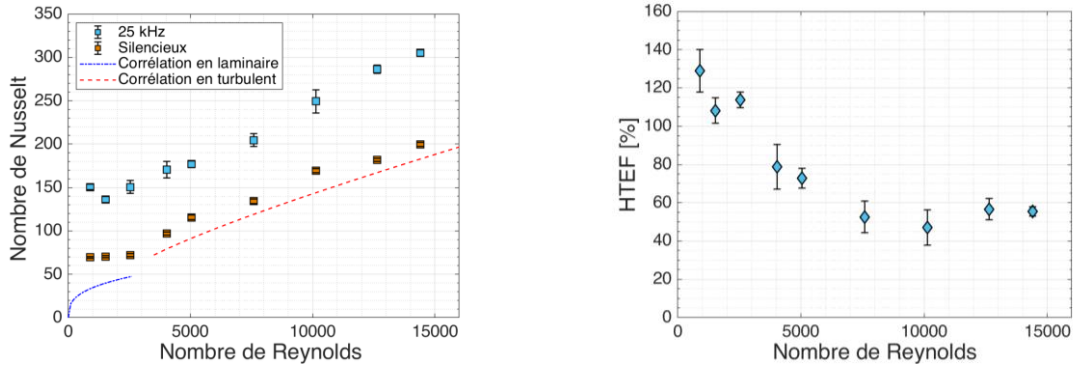
$$TKE\ EF = \frac{TKE_{avec\ US} - TKE_{sans\ US}}{TKE_{sans\ US}} \times 100 \quad (5)$$

Résultats

2.4. Influence des ultrasons de 25 kHz sur le transfert thermique et l'hydrodynamique

La figure 2 présente l'évolution du transfert thermique sans et avec ultrasons de 25 kHz au niveau du bloc n°5 à partir du nombre de Nusselt (figure 2.a) en fonction du nombre de

Reynolds. Les courbes en pointillés représentent l'évolution théorique du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds, pour un écoulement interne au sein d'un canal rectangulaire hydrodynamiquement établi et thermiquement non-établi, en régime laminaire (bleu) et en régime turbulent (rouge) [15]. Sans ultrasons, les résultats expérimentaux montrent une augmentation du nombre de Nusselt avec l'augmentation du nombre de Reynolds, suivant une tendance similaire à la corrélation empirique. Ces résultats sont ainsi cohérents avec la théorie.

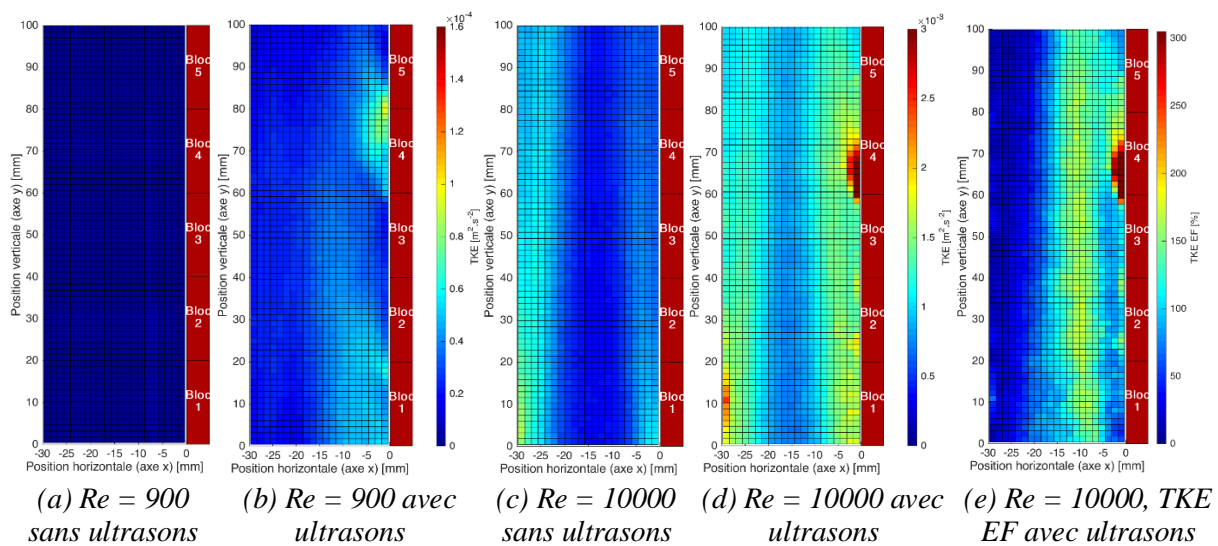


(a) Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (b) HTEF en fonction du nombre de Reynolds

Figure 2 : Transfert thermique au niveau du bloc n°5, sous ultrasons ($f=25$ kHz ; $P_{us} = 110$ W)

L'augmentation du nombre de Nusselt en présence d'un champ ultrasonore de 25 kHz, par rapport au nombre de Nusselt obtenu sans ultrasons, traduit le fait que ces derniers intensifient les transferts thermiques de manière notable quel que soit le nombre de Reynolds. La figure 2.b représente l'évolution du facteur d'intensification thermique, HTEF, en fonction du nombre de Reynolds. Cette figure illustre que l'intensification du transfert thermique décroît lorsque le nombre de Reynolds augmente avant d'atteindre une asymptote autour de 50 % traduisant un niveau d'intensification constant au-delà d'un nombre de Reynolds supérieur à 7500.

La figure 3 permet d'analyser le comportement hydrodynamique dans la section d'essais grâce à la comparaison de l'évolution de la TKE au sein du canal, avec et sans ultrasons (25 kHz) en régime laminaire ($Re = 900$) et en régime turbulent ($Re = 10000$).



(a) $Re = 900$ sans ultrasons (b) $Re = 900$ avec ultrasons (c) $Re = 10000$ sans ultrasons (d) $Re = 10000$ avec ultrasons (e) $Re = 10000$, TKE EF avec ultrasons

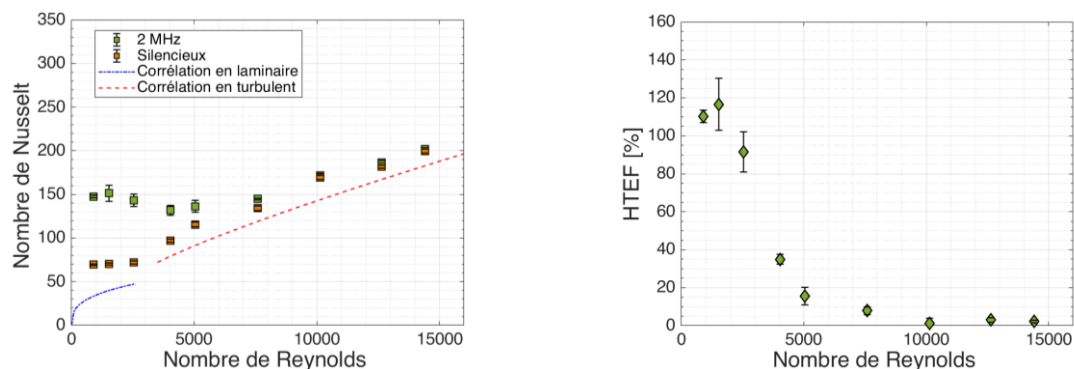
Figure 3 : TKE sans et avec ultrasons et TKE EF au sein du canal ($f = 25$ kHz ; $P_{us} 110$ W)

Pour un régime d'écoulement laminaire en conditions silencieuses ($Re=900$), la TKE est logiquement nulle (figure 3.a, l'échelle de couleur est la même que la figure 3.b). En revanche la présence d'ultrasons de 25 kHz pour ce même régime d'écoulement induit la présence de TKE (figure 3.b) localisée principalement à proximité de la paroi chauffante, et répartie de manière hétérogène le long de la plaque. En régime turbulent, l'écoulement sans ultrasons est caractérisé par la présence de TKE (figure 3.c, l'échelle de couleur est la même que la figure 3.d) que la présence d'ultrasons de 25 kHz vient encore accentuer au sein de l'écoulement (figure 3.d). L'intensification de cette TKE en régime turbulent, évaluée par la TKE EF (figure 3.e), est principalement localisée à proximité de la paroi chauffante répartie de manière hétérogène et également au cœur de l'écoulement. La contribution relative des ultrasons à la production de TKE par rapport à l'écoulement est cependant moins importante qu'en écoulement laminaire, puisque pour un nombre de Reynolds de 900, seuls les ultrasons sont à l'origine de la TKE produite.

La cavitation acoustique permet donc de générer des fluctuations de vitesse dans un écoulement sans turbulence préexistante, notamment à proximité des parois confirmant certains résultats de la littérature [11]. Lorsque l'écoulement présente de la turbulence en conditions silencieuses, la cavitation acoustique permet de maintenir un niveau d'intensification significatif du transfert thermique. La cavitation acoustique générée par les ultrasons de 25 kHz à proximité de la paroi chauffante perturbe ainsi l'établissement de la couche limite thermique et permet ainsi l'intensification du transfert thermique entre la paroi et le fluide.

2.5. Influence des ultrasons de 2 MHz sur le transfert thermique et l'hydrodynamique

La figure 4 présente l'évolution du transfert thermique sans et avec ultrasons de 2 MHz et de l'intensification de ce transfert, de manière analogue à la figure 2.



(a) Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds

(b) HTEF en fonction du nombre de Reynolds

Figure 4 : Transfert thermique au niveau du bloc n°5, sous ultrasons ($f=2$ MHz ; $P_{us} = 110$ W)

La figure 4.a montre qu'en présence d'ultrasons de 2 MHz le nombre de Nusselt est constant ($Nu \sim 150$) jusqu'à un nombre de Reynolds de 7500. Au-delà, le nombre de Nusselt en présence d'ultrasons suit le même comportement qu'en conditions silencieuses. La figure 4.b illustre que, sur la gamme de Reynolds pour laquelle les ultrasons ont un effet d'intensification thermique, le HTEF décroît d'une valeur initiale de 110 % jusqu'à atteindre un niveau proche de 0 %. Le phénomène d'intensification des transferts thermiques par des ultrasons produisant majoritairement du courant acoustique est donc limité à un régime d'écoulement restreint, au-delà duquel leur utilisation ne présente plus aucun intérêt. Dans la zone d'intérêt, le niveau de

transfert thermique, traduit par le nombre de Nusselt, est alors déterminé par la puissance ultrasonore transmise au fluide [10].

La figure 5 détaille l'évolution spatiale (2D) de la TKE au sein de la section d'essais, sans et avec ultrasons de 2 MHz. En régime laminaire (figure 5.a et 5.b, l'échelle de couleur est la même), les ultrasons de 2 MHz induisent de la TKE, plus importante au centre de l'écoulement. En régime turbulent (figure 5.c et 5.d, l'échelle de couleur est la même) les ultrasons de haute fréquence permettent également une augmentation de la TKE au sein de l'écoulement. Cependant, l'intensification de cette TKE générée par les ultrasons se trouve principalement localisée au centre de l'écoulement, à un niveau inférieur à l'intensification obtenue avec les ultrasons de 25 kHz. Ainsi, ce faible niveau d'intensification de la TKE à proximité de la paroi corrobore l'absence d'intensification du transfert thermique à ce régime d'écoulement. En effet, les effets convectifs produits par les ultrasons de 2 MHz sont considérablement atténués par l'écoulement principal, les ultrasons ne sont alors plus en mesure de perturber la couche limite thermique en régime turbulent.

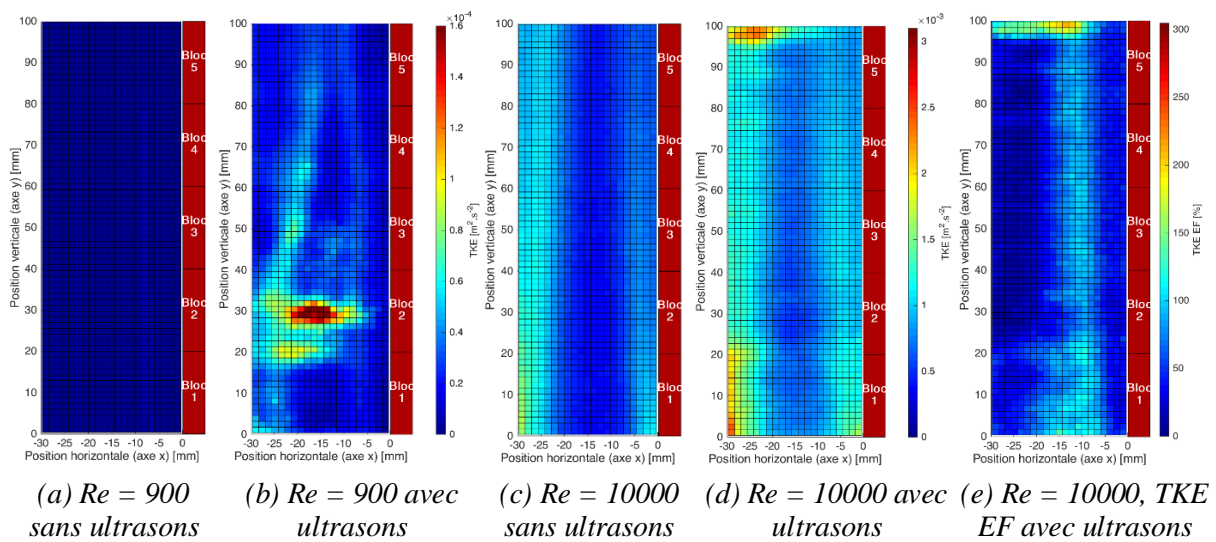


Figure 5 : TKE sans et avec ultrasons et TKE EF au sein du canal ($f = 2 \text{ MHz}$; $P_{us} 110 \text{ W}$)

3. Conclusion

Cette étude a montré l'influence des ultrasons sur le transfert thermique ainsi que sur l'hydrodynamique, en convection forcée. Les effets des ultrasons ont été analysés pour différents nombres de Reynolds et selon deux fréquences ultrasonores (25 kHz et 2 MHz) à l'origine d'effets de nature différente.

Les ultrasons de 25 kHz génèrent principalement de la cavitation acoustique, dont la capacité à produire des fluctuations de vitesse instantanée a été confirmée. La TKE se concentre notamment à proximité de la paroi faisant face à l'émetteur ultrasonore, qui correspond ici à la plaque chauffante. Lorsque les ultrasons de 25 kHz sont émis dans un écoulement turbulent, la cavitation acoustique intensifie la TKE. Ainsi, par la génération de perturbations hydrodynamiques supplémentaires au sein de l'écoulement et à proximité de la paroi, les ultrasons de 25 kHz permettent d'intensifier les transferts thermiques convectifs de manière notable par une agitation de la couche limite thermique. L'intensification générée tend à décroître en partie avec l'augmentation du nombre de Reynolds, pour se stabiliser à une valeur constante qui garantit un niveau minimal d'intensification peu importe le nombre de Reynolds

sur la gamme de débits testée, et donc quelle que soit la turbulence naturelle de l'écoulement. Les ultrasons de 2 MHz, à l'origine de courants acoustiques, permettent également de générer de la TKE au sein d'un écoulement. Cette dernière tend à être plus importante au cœur de l'écoulement. Lorsque les ultrasons de 2 MHz sont émis dans un écoulement déjà turbulent, cette TKE est intensifiée, mais de manière moins importante qu'à 25 kHz, et surtout cette intensification est faible à proximité de la paroi faisant face à l'émetteur. Les résultats en transfert thermique montrent que les ultrasons de 2 MHz garantissent un niveau constant de transfert thermique pour des nombres de Reynolds inférieur à 7500. Au-delà, ils n'ont plus d'intérêt. Finalement, l'interaction entre ondes et écoulement apparaît comme étant un élément déterminant dans la perspective de l'utilisation des ultrasons à des fins d'intensification du transfert thermique, le régime d'écoulement conditionnant le niveau d'intensification selon la fréquence ultrasonore utilisée.

Références

- [1] Dingwei Zhou, Xuegong Hu, Dengying Liu, Local Convective Heat Transfer from a Horizontal Tube in an Acoustic Cavitation Field, *Journal of Thermal Sciences*, 13, 4 (2004) 338-343.
- [2] M. Legay, S. Le Person, N. Gondrexon, P. Boldo, A. Bontemps, Performances of two heat exchangers assisted by ultrasound, *Applied Thermal Engineering*, 37 (2012) 60–66.
- [3] M. Barthès, G. Mazue, D. Bonnet, R. Viennet, J. Hihn, Y. Bailly, Characterization of the activity of ultrasound emitted in a perpendicular liquid flow using Particle Image Velocimetry (PIV) and electrochemical mass transfer measurements, *Ultrasonics* 59 (2015) 72–78.
- [4] Shinfuku Nomura, Koichi Murakami, Yoshiyuki Aoyama, Junji Ochi. Effect of changes in frequency of ultrasonic vibrations on heat transfer. *Heat Transfer–Asian research*, 29, 5 (2000) 358-372.
- [5] Tristan Cambonie, Brahim Moudjed, Valéry Botton, Daniel Henry, Hamda Ben Hadid. From flying wheel to square flow : Dynamics of a flow driven by acoustic forcing, *Phys. Rev. Fluids* (2017) 123901
- [6] O. Bulliard-Sauret, S. Ferrouillat, L. Vignal, A. Memponteil, N. Gondrexon, Heat transfert enhancement using 2 MHz ultrasound, *Ultras. Sonochem.* 39 (2017) 262-271.
- [7] Shinfuku Nomura, Koichi Murakami, Makoto Kawada. Effects of Turbulence by Ultrasonic Vibration on Fluid Flow in a Rectangular Channel. *Japanese Journal of Applied Physics*, 41 (2002) 6601-6605.
- [8] Seung Youp Lee, Young Don Choi, Turbulence Enhancement by ultrasonically induced gaseous cavitation in CO2 saturated water, *KSME International Journal*, 16, 2 (2002) 246-254.
- [9] O.Bulliard-Sauret, J. Berindei, S. Ferrouillat, L. Vignal, A. Memponteil, C. Poncet, J.M. Leveque, N. Gondrexon. Heat transfer intensification by low or high frequency ultrasound : Thermal and hydrodynamic phenomenological analysis. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 104 (2019) 258-271.
- [10] Shin-ichi Hatanaka, Hideto Mitome, Kyuichi Yasui, Shigeo Hayashi, Multibubble sonoluminescence enhancement by fluid flow, *Ultrasonics*, 44 (2006) e435-e438
- [11] Yoshihiro Kojima, Yoshiyuki Asakura, Genki Sugiyama, Shinobu Koda, The effects of acoustic flow and mechanical flow on the sonochemical efficiency in a rectangular sonochemical reactor, *Ultrasonics Sonochemistry*, 17 (2010) 978-984
- [12] Nathat Inworn, Weerachai Chaiworapuek, On the thermal characteristic of a heating flat surface under low frequency waves, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 122 (2018) 1153-1161
- [13] A. Amiri Delouei, H. Sajjadi, R. Mohebbi, M. Izadi, Experimental study on inlet turbulent flow under ultrasonic vibration: Pressure drop and heat transfer enhancement, *Ultrason. Sonochem.*, 51 (2019) 151-159.
- [14] LaVision, Product Manual DaVis 8.3 Software. Göttingen, 2015
- [15] Sadik Kakaç, Ramesh K. Shah et Win Aung, *Handbook of single-phase heat transfer*, John Wiley & sons, (1987).