

Amélioration du coefficient d'échange global d'un échangeur par champ ultrasonore. Mise en oeuvre dans une géométrie faisceau de tubes/calandre.

Yohann Rousselet¹, Nicolas Gondrexon¹, Primius Boldo² & André Bontemps³

¹LEPMI, UMR 5631 INPG/CNRS/UJF, BP75, 38402 St Martin d'Hères cedex France

²Polytech'Savoie, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac cedex France

³Université Joseph Fourier, LEGI, 38041 Grenoble Cedex 9 France

*(auteur correspondant : André.Bontemps@ujf-grenoble.fr)

Résumé - Dans ce travail nous avons voulu vérifier la faisabilité et montrer l'intérêt de l'utilisation d'un champ ultrasonore basse fréquence pour améliorer le transfert de chaleur dans des conditions de géométrie proches de celles d'un échangeur de chaleur industriel. Un échangeur de chaleur de géométrie classique faisceau de tubes - calandre a donc été réalisé en utilisant un émetteur ultrasonore de forme tubulaire en guise de calandre. La comparaison des flux échangés et du coefficient d'échange global avec et sans champ ultrasonore montre une amélioration systématique des flux échangés et du coefficient global de transfert dans toutes les configurations hydrodynamiques étudiées.

Nomenclature

A	Facteur d'amélioration ultrasonore	F	Facteur de correction
C_p	Capacité thermique massique de l'eau, $J.kg^{-1}.°C^{-1}$	\dot{m}	Débit massique de fluide, $kg.s^{-1}$
T_1	Température entrée eau froide, $°C$	T_2	Température sortie eau froide, $°C$
t_1	Température entrée eau chaude, $°C$	t_2	Température sortie eau chaude, $°C$
ΔT	Différence de température pour un fluide, $°C$	\dot{Q}	Flux thermique, W
ΔT_m	Différence de température moyenne, $°C$	\dot{Q}_{froid}	Flux thermique côté calandre, W
ΔT_{ml}	Différence logarithmique moyenne des températures, $°C$	\dot{Q}_{chaud}	Flux thermique côté tube(s), W
U	Coefficient d'échange global, $W.m^{-2}.K^{-1}$	S	Surface moyenne d'échange, m^2
P_{us}	Puissance ultrasonore transmise déterminée par calorimétrie, W		

1. Introduction

Les effets des ultrasons sur les phénomènes de transfert de chaleur ont été étudiés dans de nombreux travaux fondamentaux concernant aussi bien l'influence des ondes ultrasonores sur la convection naturelle et/ou forcée que sur les phénomènes de transfert avec changement de phase [1-4].

Les recherches sur l'application d'un champ acoustique au sein même d'un échangeur de chaleur sont quant à elles quasi-inexistantes [5]. Aussi, le travail rapporté ici concerne le développement d'un nouveau type d'échangeur de chaleur : il s'agit d'un échangeur faisceau de tubes - calandre vibrant. L'appareil d'un type nouveau ainsi constitué est ce qu'il est convenu d'appeler un « sonoéchangeur ». Cet appareil est en outre un échangeur de vibrations puisque que celles-ci sont transmises par le fluide à l'ensemble de l'appareil y compris le faisceau. Certains résultats obtenus avec ce dispositif sont présentés ici. La comparaison des valeurs expérimentales avec et sans champ ultrasonore porte sur les flux échangés et le

coefficient global d'échange dans différentes configurations hydrodynamiques et pour différentes puissances ultrasonores.

2. Dispositifs et méthodologies

2.1. Descriptif de l'échangeur

L'échangeur de chaleur utilisé dans ce travail a été conçu et réalisé à partir d'un module tubulaire vibrant breveté, le Sonitube®. Ce dispositif de conception et d'usage industriel, peut être présenté comme un tube vibrant à une fréquence ultrasonore donnée à travers lequel circule un fluide [6]. Le Sonitube® (SM 35, fréquence 35 kHz, longueur 240 mm, diamètre intérieur 20 mm) fait ici office de calandre au sein de laquelle est inséré un tube coudé (diamètre intérieur 4 mm, diamètre extérieur 6 mm) offrant une surface d'échange moyenne S de $0,0063 \text{ m}^2$. L'échangeur ultrasonore ainsi constitué est présenté sur la figure 1 ci-après.

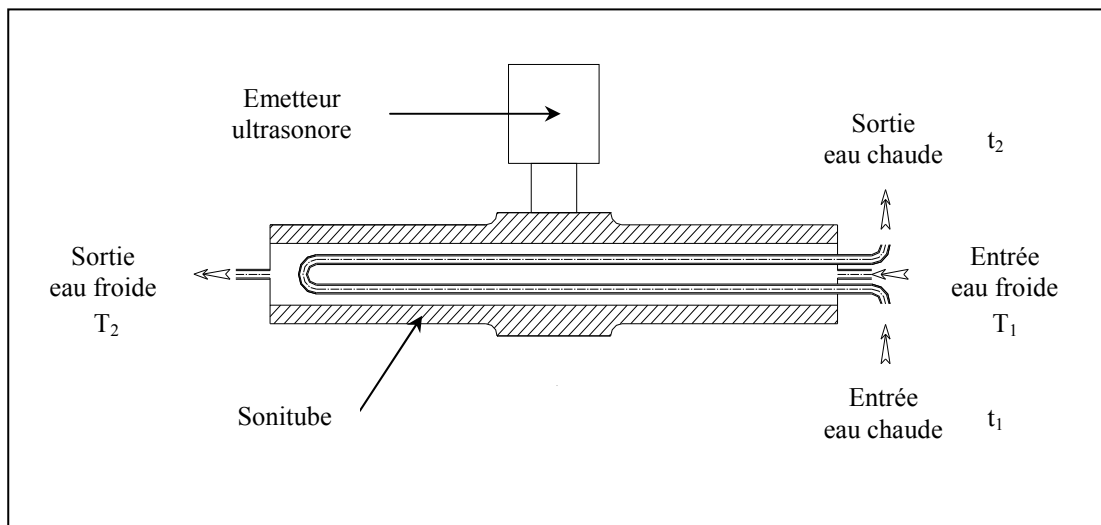


Figure 1 : Représentation schématique du sonoéchangeur

2.2. Dispositif d'études

Le dispositif expérimental utilisé est représenté schématiquement sur la figure 2.

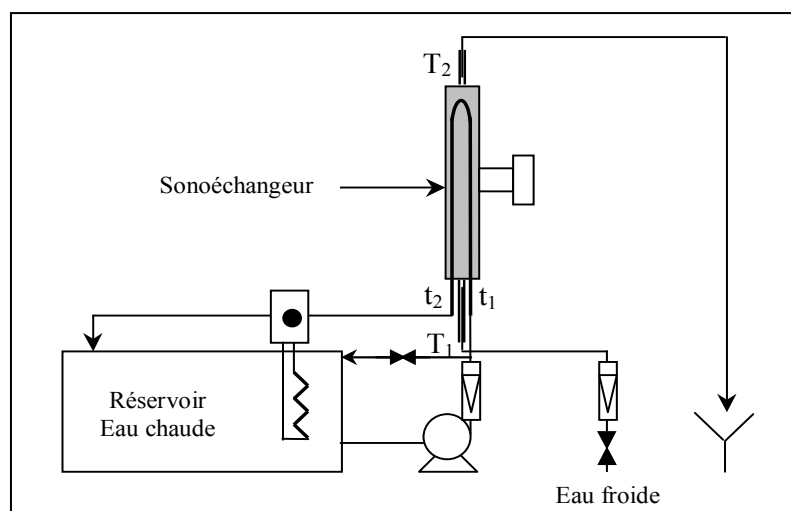


Figure 2 : Représentation de l'ensemble du dispositif expérimental

L'eau chaude produite dans le réservoir ($t_1 = 36\text{ °C}$) est pompée à un débit variant de $0,6\text{ l.min}^{-1}$ à $2,4\text{ l.min}^{-1}$ afin d'alimenter l'échangeur côté tubes. En sortie d'échangeur, cette eau chaude retourne vers le réservoir d'alimentation dont elle est issue. L'eau froide provient quant à elle directement du réseau et circule côté calandre à un débit variant de $0,15\text{ l.min}^{-1}$ à $1,0\text{ l.min}^{-1}$. Cinq sondes de température (plus une pour vérification de la température dans le réservoir) de type Pt100 (précision $0,1\text{ °C}$), reliées à un système d'acquisition de données ADAM collectées par un PC à l'aide d'un logiciel spécifique, permettent de mesurer et de suivre l'évolution en temps réel des températures entrée et sortie de chacun des deux fluides chauds (t_1, t_2), et froids (T_1, T_2). La mesure des débits est assurée par deux débitmètres McMillian®.

2.3. Procédure expérimentale

L'échangeur est préalablement alimenté en eau froide à un débit constant. Il est ensuite alimenté en eau chaude côté tubes à débit fixé par mise en route de la pompe de circulation et réglage de la vanne de by-pass. Comme illustré sur la copie d'écran donnée sur la figure 3, l'acquisition de données permet de suivre l'évolution des températures entrée et sortie pour chacun des deux fluides en temps réel. Lorsque les valeurs mesurées n'évoluent plus, le processus d'échange de chaleur est considéré comme ayant atteint l'équilibre.

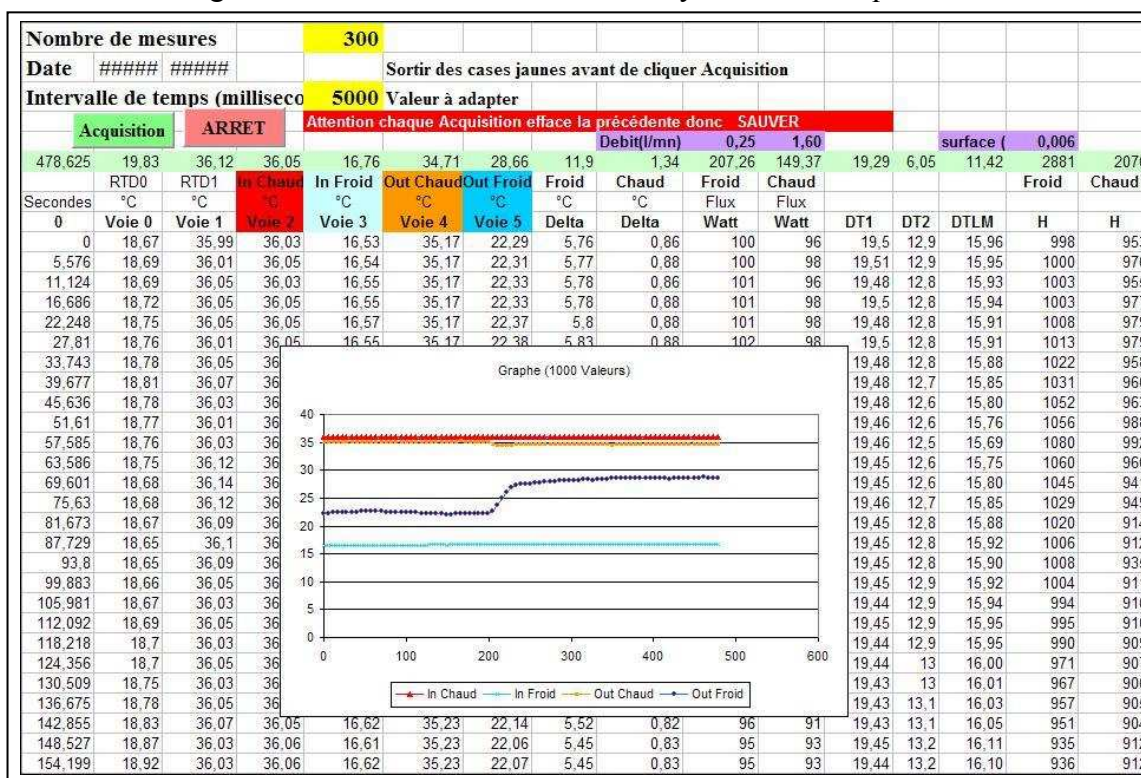


Figure 3 : Capture d'écran du programme d'acquisition des données

3. Résultats et discussion

3.1. Bilan thermique

En présence ou non d'ultrasons, le bilan thermique global sur l'échangeur à l'équilibre s'écrit selon l'expression suivante :

$$P_{us} + Q_{chaud} = Q_{froid} + Pertes\ thermiques \quad (1)$$

Dans l'équation (1), P_{us} qui désigne la puissance ultrasonore transmise au fluide côté calandre, correspond en moyenne à 95 % de la puissance électrique incidente. Cette puissance est déterminée expérimentalement par une méthode utilisée classiquement pour la caractérisation énergétique des réacteurs ultrasonores, dite méthode calorimétrique [7]. Par ailleurs, les flux de chaleur relatifs à chacun des deux fluides sont calculés, à partir des mesures de température et de débit, selon l'équation (2) :

$$\dot{Q}_{chaud\ ou\ froid} = \dot{m}_{chaud\ ou\ froid} C_p \Delta T_{chaud\ ou\ froid} \quad (2)$$

Les pertes thermiques peuvent donc être estimées à partir de l'équation (1) dans la mesure où tous les autres termes du bilan thermique sont connus.

Comme illustré par les valeurs expérimentales choisies pour exemple et présentées dans le tableau 1 ci-après, l'ensemble des résultats expérimentaux ainsi obtenus ont permis de montrer que les flux de chaleur calculés en présence d'ultrasons sont toujours supérieurs à ceux obtenus sans irradiation ultrasonore. Cette observation, qui reste vraie quelles que soient les conditions de débit testées, démontre l'apport bénéfique des ondes ultrasonores sur les flux de chaleur échangés. L'amélioration significative des flux est observée à la fois côté tubes et côté calandre.

<i>Amplitude Ultrasons</i>	t_1	t_2	Q_{chaud}	T_1	T_2	Q_{froid}	P_{us}	<i>Pertes thermiques</i>
<i>%/max</i>	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	W	W	W
0	36,6	34,3	251,9	18,6	21,6	212,5	0	39,4
50	36,5	33,8	301	18,5	23,2	321,2	58,8	38,6
70	36,4	33,7	301	18,5	23,1	322,6	66	44,4
90	36,3	33,6	301	18,4	23,2	331,6	73	42,3
100	36,1	33,4	297,6	18,3	23,2	342,1	86,7	42,3

Tableau 1 : Exemples de valeurs des températures et puissances ultrasonores mesurées, des flux et pertes thermiques calculés (débit d'eau chaude = 1,6 l.min⁻¹, débit d'eau froide = 0,75 l.min⁻¹)

En l'absence d'ultrasons, le flux de chaleur côté chaud est systématiquement supérieur au flux de chaleur côté froid. Ceci traduit naturellement l'existence de pertes thermiques, estimées à partir du bilan thermique global. Ces pertes sont justifiées dans la mesure où aucune précaution particulière n'a été prise au niveau de l'échangeur pour les éviter ou même les minimiser.

En présence d'ultrasons, le flux de chaleur côté froid est cette fois toujours supérieur au flux thermique côté chaud. Ceci traduit le fait que l'émission d'ondes au niveau de la calandre qui vibre induit un apport énergétique supplémentaire correspondant à l'énergie ultrasonore transmise à l'eau froide sous forme calorifique.

Les pertes thermiques au niveau de l'échangeur restent quant à elles du même ordre de grandeur avec et sans ultrasons.

3.2. Comparaison du coefficient global de transfert de chaleur

Dans le but de comparer le transfert de chaleur réalisé au sein de l'échangeur en présence ou non d'ultrasons, le coefficient d'échange global U a été déterminé pour chaque expérience réalisée à partir de l'expression suivante :

$$\dot{Q} = U S \Delta T_m \quad (3)$$

équation (3) dans laquelle $\Delta T_m = F \times \Delta T_{ml}$ où F désigne le facteur de correction donné par l'abaque correspondant et ΔT_{ml} la différence logarithmique moyenne des températures.

Compte tenu des observations expérimentales relatives aux flux de chaleur mentionnées ci-avant, la détermination du coefficient global de transfert de chaleur U a été réalisée à partir du flux réellement transféré à travers la surface d'échange S . Aussi, et de façon à minimiser l'influence des ultrasons, le coefficient global d'échange U a été estimé à partir du flux thermique le plus faible : c'est donc le flux côté froid \dot{Q}_{froid} qui est utilisé en l'absence d'ultrasons et le flux côté chaud \dot{Q}_{chaud} qui fait référence en présence d'ultrasons.

Afin de quantifier l'effet observé, un facteur d'amélioration ultrasonore A , défini comme le rapport du coefficient global d'échange obtenu avec ultrasons sur le coefficient global d'échange obtenu sans ultrasons dans les mêmes conditions hydrodynamiques, est calculé selon :

$$A = U_{avec\ ultrasons} / U_{sans\ ultrasons} \quad (4)$$

Les valeurs de U et de A correspondants aux conditions d'essais rapportées dans le tableau 1 sont fournies dans le tableau 2 ci-dessous :

Amplitude Ultrasons	$\Delta T_1 = t_1 - T_2$	$\Delta T_2 = t_2 - T_1$	ΔT_{ml}	$\Delta T_m = F \cdot \Delta T_{ml}$	\dot{Q}	U	A
%/max	°C	°C	°C	°C	W	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$	
0	14,99	15,78	15,38	15,4	212,5	2192,7	-
50	13,35	15,26	14,28	14,3	301	3344,5	1,53
70	13,22	15,15	14,16	14,2	301	3373	1,54
90	13,05	15,11	14,05	14,1	301	3398,9	1,55
100	12,87	15,11	13,96	14	297,6	3384	1,54

Tableau 2 : Ensemble des valeurs du coefficient global d'échange de chaleur U et du facteur d'amélioration ultrasonore A correspondant (débit d'eau chaude = 1,6 l.min⁻¹, débit d'eau froide = 0,75 l.min⁻¹, facteur de correction $F = 1$)

Au vu de ces données, il apparaît que l'application du champ ultrasonore côté calandre se traduit systématiquement par une amélioration significative du coefficient global d'échange de chaleur U . Cette amélioration se révèle peu sensible à l'intensité du champ ultrasonore, ce qui constitue un résultat économiquement important pour l'avenir du sonoéchangeur.

L'effet bénéfique des ultrasons peut être étendu à l'ensemble des configurations hydrodynamiques étudiées dont les résultats sont présentés sur la figure 4 et pour lesquels on constate une amélioration systématique des flux échangés et du coefficient global de transfert. En effet, le coefficient d'amélioration ultrasonore A est toujours supérieur à 1.

L'influence des ultrasons s'explique par la turbulence induite au sein du liquide dans la calandre par les effets qui accompagnent l'émission d'ondes ultrasonores dans l'eau. L'implosion des bulles de cavitation génère des ondes de choc et des micro-jets qui favorisent un mélange local auquel vient s'ajouter la contribution d'intenses courants de convection [8,9]. Si l'amélioration due aux ultrasons est peu sensible à la puissance ultrasonore transmise au milieu, elle est par contre influencée de manière significative par le débit d'eau froide,

c'est à dire côté calandre. En effet, le facteur d'amélioration est d'autant plus prononcé que ce débit est faible. Dans ce cas, la turbulence engendrée par les ondes ultrasonores vient s'imposer à l'écoulement du fluide dans la calandre alors qu'elle ne semble que le compléter aux plus forts débits.

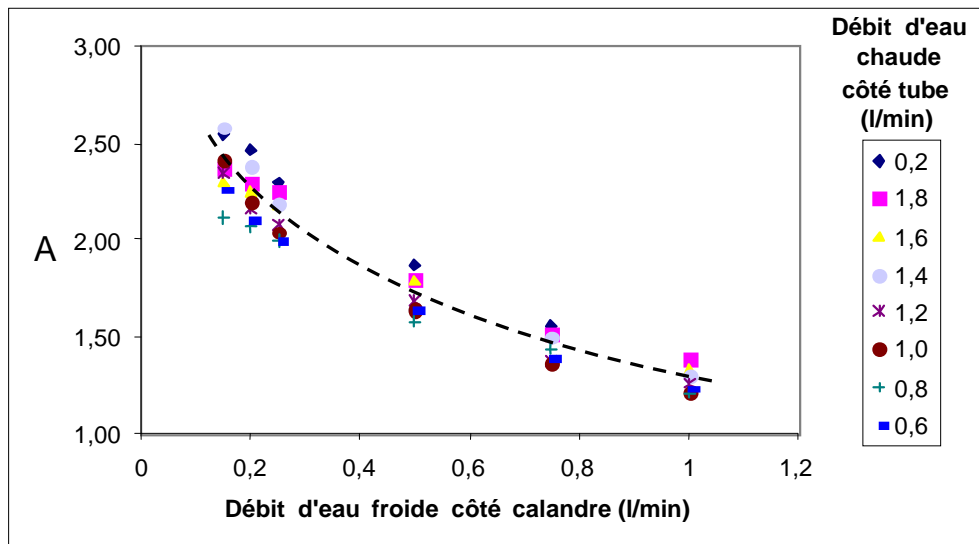


Figure 4 : Valeurs du facteur d'amélioration ultrasonore A dans différentes configurations hydrodynamiques (amplitude ultrasonore constante = 50 %)

4. Conclusion

L'utilisation d'un échangeur de chaleur tubes et calandre vibrant a permis d'illustrer l'amélioration des flux de chaleur transférés en présence d'ultrasons aussi bien côté tubes que côté calandre. La comparaison des coefficients d'échange globaux a démontré l'apport bénéfique du champ ultrasonore. Si l'effet des ultrasons est indépendant de la puissance ultrasonore, il est d'autant plus prononcé que les coefficients d'échange sont faibles, c'est à dire pour des valeurs de débits de fluide faibles. L'apport des ondes ultrasonores, exprimé par le rapport du coefficient global d'échange avec ultrasons sur le coefficient global d'échange sans ultrasons, définissant ainsi le facteur d'amélioration ultrasonore, est compris entre 120 et 252 %.

Références

- [1] S. W. Wong, and W.Y. Chon, *AIChE Journal*, 15-2 (1969), 281-288.
- [2] Y.K Oh, S.H. Park and Y.I. Cho, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45-23 (2002), 4631-4641.
- [3] A. Monnot, P. Boldo, N. Gondrexon and A. Bontemps, *Heat transfer engineering*, 28-1 (2007), 1-6.
- [4] S. Komarov and M. Hirasawa, *Ultrasonics*, 41-4 (2003), 289-293.
- [5] U. Melkumov and K. Kurbanov, *Proc. International Congress of Refrigeration*, Washington, DC, 2003, Vol. 4, 1-5.
- [6] D. Dubruque, J.L. Luche and J. Berlan, *Réc. Progrès en Génie des Procédés*, 31-7 (1993), 17-22.
- [7] P. Boldo, C. Pétrier and N. Gondrexon, *Proc. 9th Meeting of the European Society of Sonochemistry*, Badajoz, Spain, 2004, 147-148.
- [8] R.M.G. Boucher, *British Chemical Engineering Journal*, 15-3 (1970), 363-367.
- [9] Y.L. Lee and Y.D. Choi, *KSME Int. Journal*, 16-2 (2002), 246-254.