

Étude expérimentale et comparaison des performances de deux échangeurs de chaleur vibrants à 35 kHz

Mathieu LEGAY¹, Stéphane LE PERSON², Nicolas GONDREXON^{1*},
André BONTEMPS², Primius BOLDO³

¹Lepmi, ²LEGI, Grenoble Universités
Rue de la piscine, BP75,
38402 St Martin d'Hères Cedex.

³Université de Savoie, Savoie Technolac,
73376 Le Bourget du Lac Cedex.

*(nicolas.gondrexon@lepmi.grenoble-inp.fr)

Résumé – Un nouvel échangeur de chaleur vibrant en configuration « bi-tube » a été conçu et étudié expérimentalement. Ses performances sont comparées avec celles d'un échangeur de type « tube en U – calandre » pour lequel plusieurs améliorations, liées à l'utilisation des ultrasons, ont été mises en évidence. La comparaison de ces deux échangeurs repose sur les bilans énergétiques, les densités de flux de chaleur échangée et le coefficient global de transfert thermique.

Nomenclature

A	Surface d'échange, m^2	<i>Indices et exposants</i>	
D	Diamètre, m	ch	Chaud
F	Facteur de correction	ech	Echangé
\dot{m}	Débit massique, $kg.s^{-1}$	env	Environnement
P, Q	Puissance, W	ext	Extérieur
Re	Nombre de Reynolds	fr	Froid
ΔT	Différence de température, K	int	Intérieur
U	Coefficient global d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	lm	Log-mean (moyenne logarithmique)
		US	Ultrasons

1. Introduction

Suite aux résultats prometteurs obtenus sur un échangeur de chaleur vibrant de type « tube en U – calandre » [1], une nouvelle configuration d'échangeur de type « bi-tube » a été adoptée. Cette géométrie simplifiée, constituée de deux tubes droits cylindriques et concentriques, a été mise en place afin d'étudier l'influence des ultrasons sur les transferts de chaleur pour une configuration plus commune.

L'utilisation des ultrasons est une technique dite « active » d'augmentation des transferts de chaleur. Un élément externe nécessitant un apport énergétique est nécessaire pour produire l'amélioration désirée. Cette source externe doit être prise en compte pendant l'évaluation thermo-hydraulique du système [2]. Il s'agit ici d'un transducteur ultrasonique alimenté par un générateur à 35 kHz qui communique les vibrations au tube extérieur de l'échangeur et le fait entrer en résonance (Sonitube®). Il est utilisé comme élément principal (calandre) pour les deux types d'échangeurs de chaleur décrits dans ce travail.

L'augmentation des transferts de chaleur grâce aux ultrasons a donné lieu à de nombreux travaux pour des systèmes moins complexes que les échangeurs de chaleur. Ainsi, les plaques planes ou les tubes chauffés et immergés dans un bain sont des configurations communes pour ce type de travail [3,4]. Mais paradoxalement, dans le domaine des échangeurs de

chaleur, très peu intègrent les ultrasons [5]. Pourtant, cette technologie peut constituer une voie de réponse à plusieurs problèmes comme la réduction des surfaces d'échange, l'augmentation des densités de flux de chaleur à évacuer ou encore la diminution de l'encrassement [6]. L'objectif de ce travail est de présenter les deux types d'échangeurs de chaleur étudiés et d'analyser leurs performances à l'aide de grandeurs habituelles (densité de flux de chaleur, coefficient global de transfert thermique) afin de démontrer l'intérêt de cette technologie.

2. Présentation

2.1. Dispositifs expérimentaux

2.1.1. Système global

La figure 1 présente le schéma global du banc expérimental, qui reste identique pour l'une ou l'autre des configurations d'échangeurs étudiées.

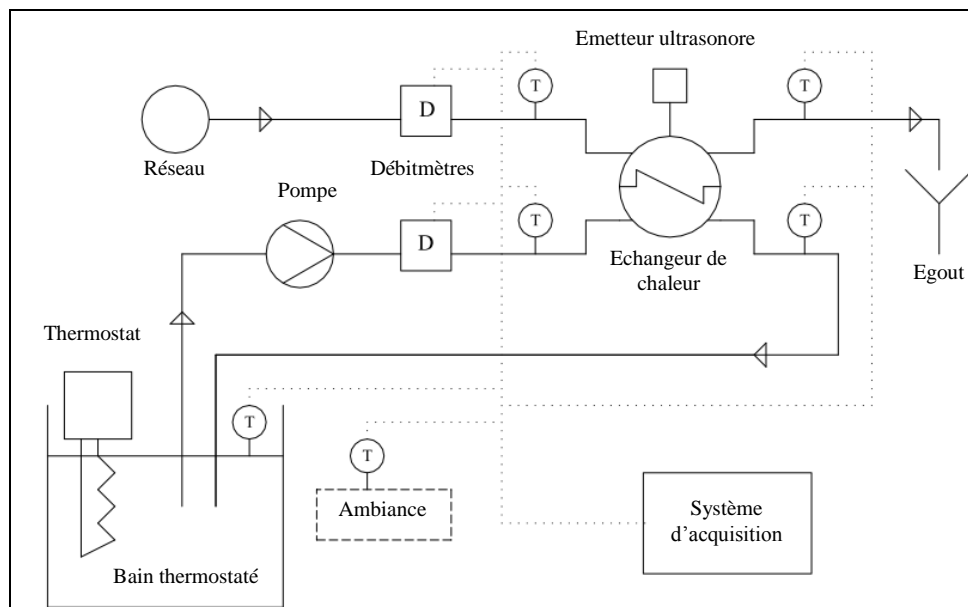


Figure 1 : Schéma global du banc expérimental

Le dispositif expérimental est essentiellement composé de deux circuits hydrauliques (fluides chaud et froid). L'eau est toujours utilisée comme fluide de travail. Concernant le circuit de fluide chaud, l'eau est stockée dans un bain thermostaté à environ 37°C. Une pompe située en aval de ce bain assure sa circulation à travers le système. Enfin, le circuit étant fermé, l'eau retourne dans le réservoir de stockage. Côté froid, l'eau provient directement du réseau. Le circuit côté froid est ouvert, ainsi l'eau est directement évacuée à l'égout en sortie de l'échangeur.

Un système d'acquisition est connecté à ce dispositif expérimental. Il relève les deux mesures de débit côté fluide chaud et côté fluide froid à l'aide de débitmètres à turbine (gammes respectives : 0.5 – 5.0 L/min et 0.1 – 1.0 L/min) ainsi que six mesures de températures (sondes Pt100), respectivement indiquées par les lettres « D » et « T » sur la figure 1. Quatre sondes de température sont situées aux entrées/sorties de l'échangeur, une dans le bain thermostaté ainsi qu'une autre mesurant la température de l'air ambiant.

2.1.2. Échangeurs

La figure 2 présente les schémas des deux échangeurs de chaleur. Le Sonitube® est fait de titane et les tubes internes sont en acier. La partie « vibrante » est grisée sur les schémas de la figure 2.

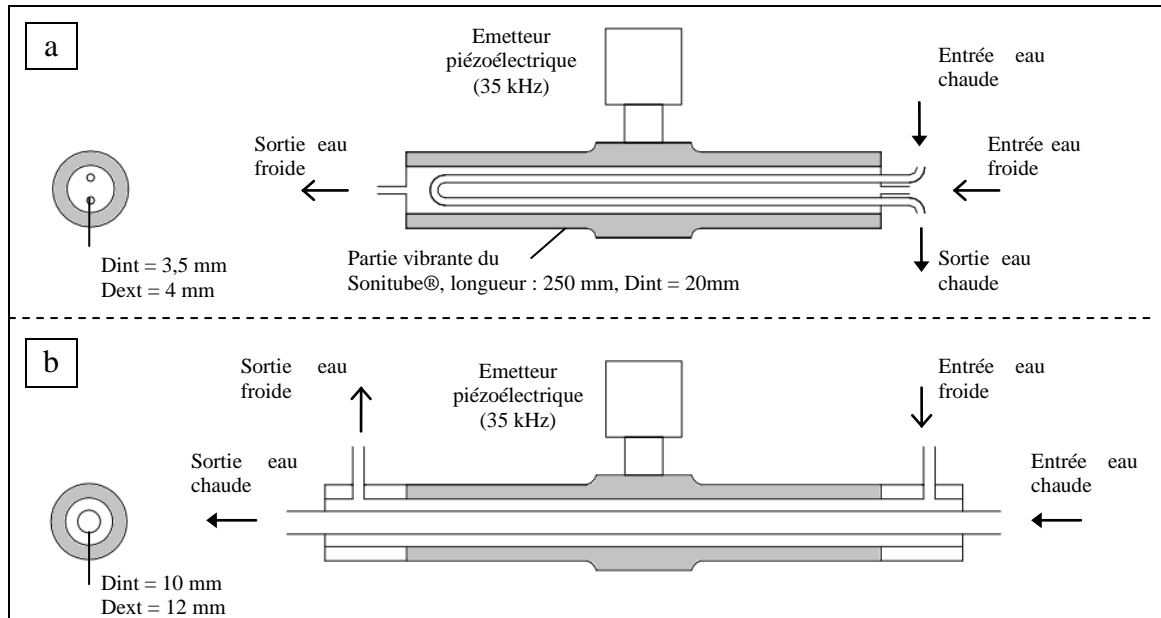


Figure 2 : échangeurs de chaleur étudiés – a : type « tube en U – calandre », b : type « bi – tube »

L'échangeur type « tube en U – calandre » est constitué du Sonitube® et d'un tube en épingle inséré à l'intérieur. Le Sonitube® possède un diamètre interne de 20 mm et une longueur de 250 mm. L'eau froide circule à l'intérieur. Le « tube en U », dont le diamètre interne est de 3,5 mm et le diamètre externe de 4 mm, possède une longueur totale de 440 mm (2 x 220 mm). Il est utilisé pour la circulation de l'eau chaude.

L'échangeur type « bi-tube », à co-courant, est lui aussi assemblé à partir du Sonitube®. Deux éléments, n'entrant pas en vibration, ont été fixés aux extrémités pour permettre l'entrée et la sortie de l'eau froide, rallongeant la longueur totale de la partie où a lieu l'échange à 330 mm. Le tube droit inséré à l'intérieur possède un diamètre interne de 10 mm et une épaisseur de 1 mm.

2.2. Méthodes expérimentales

Dans le but d'évaluer les performances des échangeurs, deux équations essentielles sont utilisées : un bilan énergétique (équation 1) et une équation du flux total échangé afin de calculer le coefficient global d'échange (équation 2).

$$Q_{ch} + P_{US} = Q_{fr} + Q_{env} \quad (1)$$

$$U = \frac{Q_{ech}}{FA\Delta T_{lm}} \quad (2)$$

Le bilan énergétique sur l'échangeur indique que la puissance cédée par le fluide chaud (Q_{ch}) ajoutée à la puissance ultrasonore dissipée (P_{US}) correspondent à la puissance récupérée par le fluide froid (Q_{fr}) additionnée de la puissance transmise (ou reçue) par l'environnement (Q_{env}). La puissance ultrasonore dissipée est calculée à l'aide d'une calorimétrie. Les

puissances Q_{ch} et Q_{fr} sont calculées à l'aide des températures aux entrées/sorties, des débits d'eau correspondants et de la capacité thermique massique moyenne sur la gamme de température considérée. Le coefficient global d'échange U est minimisé puis calculé avec la plus petite puissance échangée (Q_{ech}) parmi Q_{ch} et Q_{fr} (sans ultrasons) ou Q_{ch-US} et Q_{fr-US} (en présence d'ultrasons). Ces puissances peuvent être différentes soit à cause de la puissance ultrasonore dissipée principalement du côté froid soit à cause du transfert de chaleur à l'environnement. F est un facteur de correction déterminé à l'aide d'un abaque (pour l'échangeur type « bi-tube » $F=1$, pour l'échangeur type « tube en U – calandre », $F \approx 1$), A est la surface d'échange et ΔT_{lm} la différence de température logarithmique.

3. Résultats et discussion

3.1. Influence théorique des ultrasons

Des ultrasons de puissance sont utilisés dans ce travail, et les phénomènes résultant de la propagation des ondes ultrasonores tels que la cavitation acoustique sont très probablement à l'origine des évolutions. L'explication la plus communément admise est la perturbation des couches limites de vitesse au voisinage des parois par les bulles de cavitation (création, oscillation et implosion). Ces bulles permettraient de réduire la résistance thermique grâce aux micro-courants engendrés et par conséquent, d'améliorer les transferts de chaleur [7].

3.2. Bilans énergétiques

Quelques exemples de bilans énergétiques sont présentés dans le tableau 1, en présence d'ultrasons (si l'indice -US est ajouté) et en l'absence d'ultrasons ($P_{US}=0$). Sont proposés trois débits d'eau chaude (0,6 ; 1,0 et 1,6 L/min), deux débits d'eau froide (0,5 et 1,0 L/min), cela pour chaque type d'échangeur. Les nombres de Reynolds associés, caractérisant l'écoulement dans l'échangeur, sont aussi indiqués.

\dot{m}_{ch}	Re_{ch}	\dot{m}_{fr}	Re_{fr}	Q_{ch}	Q_{fr}	Q_{env}	Q_{ch-US}	Q_{fr-US}	Q_{env-US}	P_{US}
L/min	-	L/min	-	W	W	W	W	W	W	W
				Sans ultrasons			Avec ultrasons			
Echangeur type « bi – tube »										
0,6	1490	0,5	390	109	127	-18	124	301	-18	159
		1,0	780	140	163	-23	193	282	-2	87
1,0	2480	0,5	390	148	154	-6	178	351	-14	159
		1,0	780	188	201	-13	256	336	7	87
1,6	3970	0,5	390	151	157	-6	248	393	11	156
		1,0	780	222	236	-14	320	402	1	83
Echangeur type « tube en U – calandre »										
0,6	4255	0,5	445	114	113	1	154	250	-10,5	85,5
		1,0	890	159	159	0	183	279	11,1	107,1
1,0	7090	0,5	445	126	132	-6	181	268	-1,5	85,5
		1,0	890	181	190	-9	213	310	10,1	107,1
1,6	11350	0,5	445	141	141	0	211	289	7,5	85,5
		1,0	890	203	203	0	253	330	30,1	107,1

Tableau 1 : Bilans énergétiques pour deux types d'échangeurs de chaleur (« tube en U – calandre » et « bi – tube »)

Il est clairement mis en évidence que les puissances échangées (Q_{ch} et Q_{fr}) sont augmentées en présence d'ultrasons. Tout d'abord, concernant la puissance cédée par le fluide chaud, les performances sont d'autant plus améliorées que le débit d'eau chaude est élevé. Cela peut être expliqué par la diminution de la résistance thermique de ce « côté » de l'échangeur et le passage du régime laminaire au régime turbulent. La puissance reçue par l'eau froide est elle aussi augmentée (bien plus que Q_{ch}), car une grande partie de la puissance ultrasonore est dissipée dans le « côté » froid. Mais cette fois-ci, l'effet des ultrasons est plus prononcé pour des faibles débits d'eau froide, donc des basses vitesses d'écoulement de l'eau, réduisant très peu les effets des ultrasons. La puissance ultrasonore est très difficile à stabiliser pour l'échangeur type « bi – tube » car la transmission des ondes est perturbée par la présence du tube central et le générateur peine à s'adapter à la puissance demandée. Mais cette valeur est importante à prendre en compte comme source externe d'intensification des transferts de chaleur et doit rester la plus basse possible. La puissance transmise ou reçue par l'environnement est fonction de plusieurs paramètres (débits, température ambiante, géométrie) et par conséquent difficile à prévoir et à analyser mais reste cependant faible.

3.3. Densités de flux de chaleur échangée

Les deux graphiques (figures 3 et 4) représentent les densités de flux de chaleur échangée pour chaque type d'échangeur, sans et avec ultrasons. Ces courbes ont été tracées en fonction du débit d'eau chaude et pour un débit d'eau froide fixé. Il est à noter que les densités de flux échangé sont toujours calculées avec la plus petite valeur de puissance (côté chaud ou côté froid) pour ne pas être induit en erreur par la puissance ultrasonore dissipée ou le moins possible par les échanges avec l'environnement.

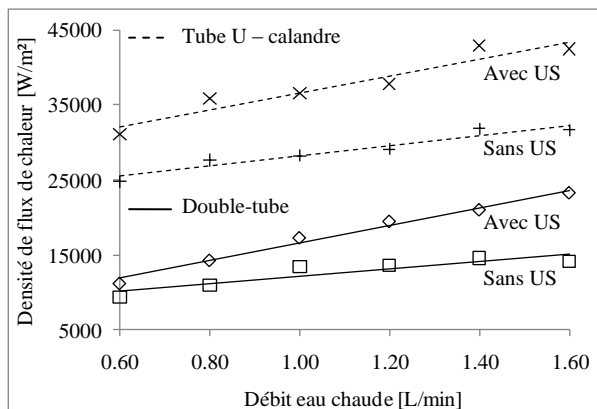


Figure 3 : Densités de flux de chaleur échangée, débit eau froide = 0,75 L/min

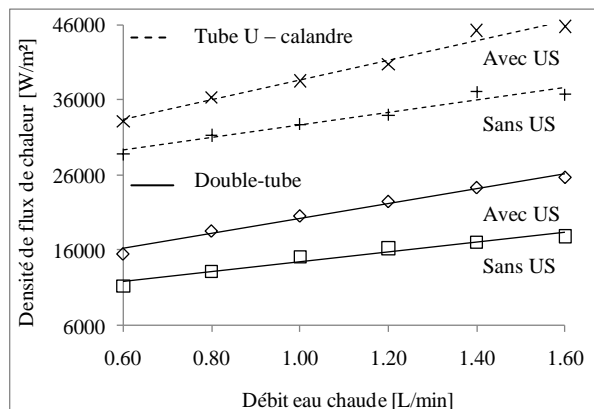


Figure 4 : Densités de flux de chaleur échangée, débit eau froide = 1,0 L/min

Ces courbes mettent en évidence une augmentation systématique des densités de flux de chaleur échangée lors de l'utilisation des ultrasons. On constate également un meilleur effet ultrasonore pour des débits d'eau chaude élevés (les courbes s'éloignent l'une de l'autre). Enfin, les flux échangés sont plus importants pour l'échangeur type « tube en U – calandre » principalement car les nombres de Reynolds sont plus élevés.

3.4. Coefficient global d'échange

Les figures 5 et 6 illustrent l'évolution du coefficient global d'échange avec l'augmentation du débit d'eau froide et pour un débit d'eau chaude fixé. Ce coefficient est représenté pour les deux échangeurs avec et sans ultrasons.

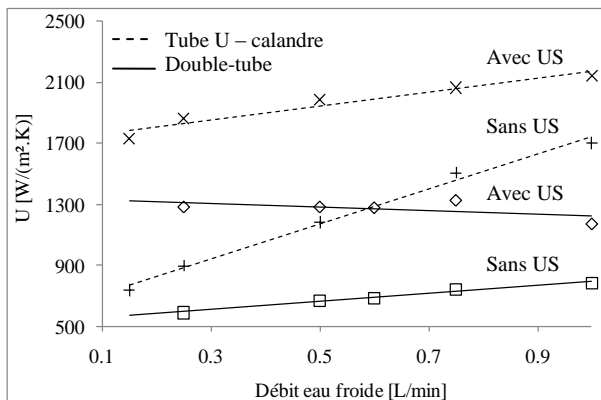


Figure 5 : Coefficient global de transfert de chaleur, débit eau chaude = 1,2 L/min

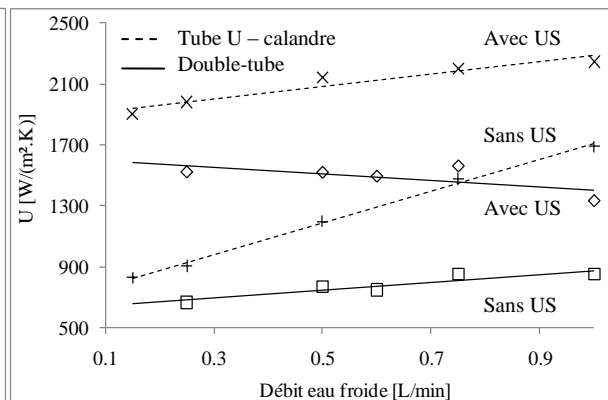


Figure 6 : Coefficient global de transfert de chaleur, débit eau chaude = 1,6 L/min

Une augmentation significative du coefficient global d'échange est constatée en présence d'ultrasons. Par contre, comme signalé lors des bilans énergétiques, l'influence des ultrasons est moins marquée (les courbes se rapprochent) avec l'augmentation du débit d'eau froide. Cela est expliqué par une moins bonne propagation des ultrasons dans l'eau circulant à une vitesse élevée, d'où des effets (cavitation, micro-turbulence, etc.) réduits.

4. Conclusion

Deux échangeurs de chaleur vibrants ont été présentés et leurs performances analysées à l'aide de différentes grandeurs telles que les bilans énergétiques, les densités de flux de chaleur échangée et le coefficient global d'échange. Il apparaît que les ultrasons et les phénomènes résultant constituent une technique active d'augmentation des transferts de chaleur tout à fait adaptée aux deux géométries d'échangeur testées.

Références

- [1] N. Gondrexon *et al.*, Intensification of heat transfer process: improvement of shell-and-tube heat exchanger performances by means of ultrasound, *Chem. Eng. and Proc.: Process Intensification*, 49 (2010), 936-942.
- [2] A. Bejan & A. D. Kraus, *Heat Transfer handbook*, John Wiley & Sons Inc. (2003).
- [3] H. Yukawa *et al.*, Effect of ultrasonic vibration on free convective heat transfer from an inclined plate in water, *Heat Transfer - Japanese Research*, 5-4 (1976), 1-16.
- [4] A. E. Bergles & P. H. Newell Jr, The influence of ultrasonic vibrations on heat transfer to water flowing in annuli, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8 (1965), 1273-1280.
- [5] U. Kurbanov & K. Melkumov, Use of ultrasound for intensification of heat transfer process in heat exchangers, *Proc. Int. Cong. of Refr.* (Washington D.C, 2003), 1-5.
- [6] T. R. Bott, Biofouling control with ultrasound, *Heat Trans. Eng.*, 21 (2000), 43-49.
- [7] S. Nomura & M. Nakagawa, Ultrasonic enhancement of heat transfer on narrow surface, *Heat Transfer - Jap. Res.*, 22-6 (1993), 546-558.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au financement des *Instituts Carnot Energies du Futur*.