

Etudes expérimentale et numérique de la distribution d'écoulements monophasiques dans un échangeur à mini-canaux.

Frédéric POGGI^{1,2*}, André BONTEMPS², Hélène MACCHI-TEJEDA¹, Denis LEDUCQ¹, Alain MARECHAL³

¹Cemagref, GPAN, BP 44 - 92 163 Antony cedex, France

²Université Joseph Fourier, LEGI-GREThE, BP 53, 38 041 Grenoble, France

³GREThE CEA, 17 rue des martyrs - 38 054 Grenoble, France

* (auteur correspondant : frederic.poggi@cemagref.fr)

Résumé - Ces études portent sur la distribution d'écoulements monophasiques dans un échangeur de chaleur à mini-canaux. Une section d'essais composée d'un distributeur relié à 8 barrettes de mini-canaux permet la mesure locale des pertes de pression singulières et régulières dans le distributeur et dans les mini-canaux, ainsi que la distribution des débits dans chaque barrette de mini-canaux. On présente et on analyse les résultats concernant la position verticale du distributeur (écoulement vertical descendant dans le distributeur et horizontal dans les mini-canaux) correspondant à la majorité des applications industrielles. Les résultats expérimentaux sont comparés à ceux obtenus par la simulation numérique ainsi qu'à ceux obtenus à l'aide d'un modèle simplifié.

Nomenclature

D_h	diamètre hydraulique, m	<i>Symboles grecs</i>	
f	coefficient de frottement	γ	rapport d'aspect
G	densité de flux massique, $kg.(m^2.s)^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
\dot{M}_0	débit massique total, $kg.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
\dot{m}	débit massique, $kg.s^{-1}$	co	contraction
P	pression, Pa	ex	expansion
P_0	pression en entrée du distributeur	$frot$	frottement
S_0	section du distributeur, m^2	i	numéros de barrettes
\bar{S}	section réduite du distributeur, m^2	p	position
z	distance le long du distributeur, m	$sing$	singulière

1. Introduction

L'utilisation de technologies dites compactes est un moyen efficace d'intensifier les transferts de chaleur dans les procédés [1]. L'emploi des échangeurs de chaleur compacts à mini-canaux s'inscrit dans le cadre de la miniaturisation des systèmes frigorifiques et de l'amélioration de leurs performances. Les échangeurs compacts à mini-canaux comportent des distributeurs et des collecteurs dans lesquels les pertes de pression sont mal connues compte tenu des perturbations engendrées par l'insertion des barrettes de mini-canaux. L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement une portion de ce type d'échangeur en écoulement adiabatique monophasique liquide. La géométrie choisie est celle désormais utilisée par les équipementiers automobiles (figure 1). Le distributeur permet de répartir le frigorigène dans des mini-canaux situés à l'intérieur de barrettes en aluminium extrudé. La distribution d'un écoulement vertical descendant, les pertes de pression régulières dans les mini-canaux horizontaux et les pertes de pression singulières liées aux insertions des barrettes dans le distributeur sont étudiées. Le passage par l'étude numérique a été nécessaire pour caractériser les phénomènes prenant place dans le distributeur.

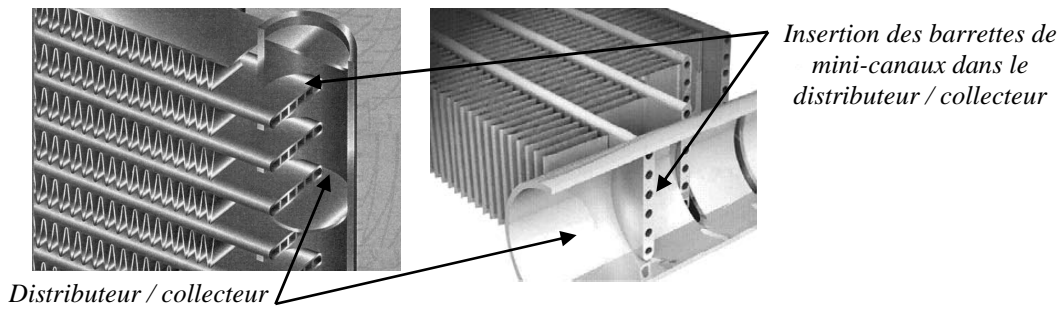


Figure 1 : Représentations de la géométrie du distributeur (collecteur) étudié

2. Dispositif expérimental et instrumentation

La section d'essais est réalisée en polycarbonate poli transparent pour permettre la visualisation des écoulements dans le distributeur et dans les mini-canaux. Elle consiste en un distributeur de 16 mm de diamètre, 90 mm de long dans lequel sont insérées 8 barrettes de 7 mini-canaux rectangulaires ($D_h = 0,889$ mm) d'une longueur de 230 mm (figure 2); la hauteur d'insertion des barrettes à l'intérieur du distributeur est de 8 mm. Deux expérimentations ont été réalisées, l'une avec le HFE 7100 (HydroFluoroEther) et l'autre avec l'eau. L'instrumentation permet de déterminer la répartition du débit en sortie de distributeur en fonction du débit en entrée, et les pertes de pression associées. Le débit de frigorigène, la température ainsi que la pression sont mesurés respectivement par un débitmètre massique, une sonde de platine et un capteur de pression absolue 0/2 bars en entrée de section d'essais. Huit débitmètres massiques sont placés en sortie de barrettes de mini-canaux. Les mesures de pression le long du distributeur sont réalisées grâce à un capteur de pression différentielle de grande précision -5/5 mbars. Deux autres capteurs de pression différentielle instrumentent la section d'essais : (1) -10/70 mbar pour la contraction distributeur / mini-canaux et (2) -50/250 mbars pour les mini-canaux. L'instrumentation de la section d'essais est reliée à une centrale d'acquisition rapide National Instrument NI SVX-1000 couplée à un micro-ordinateur.

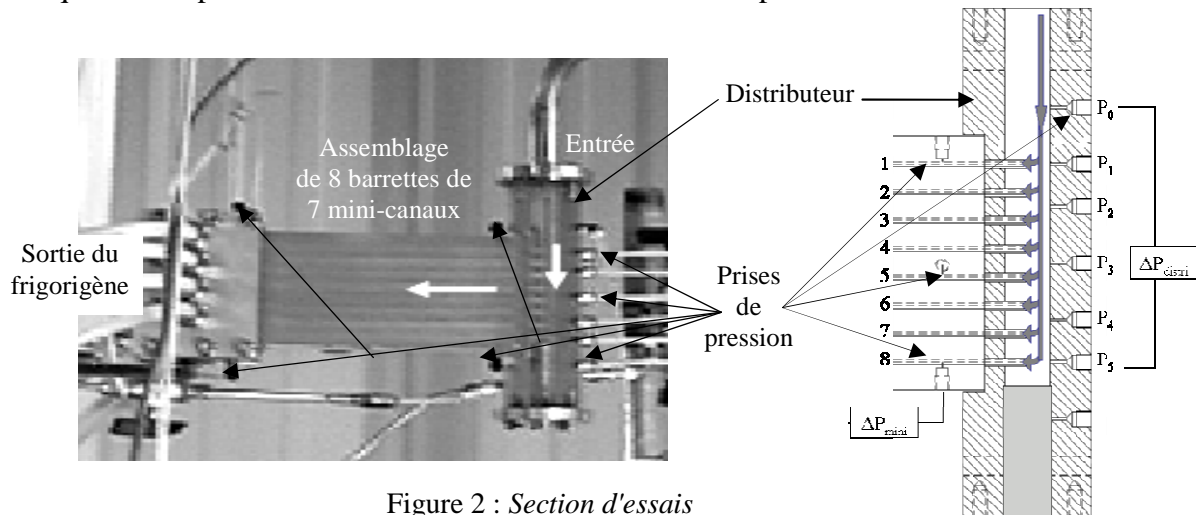


Figure 2 : Section d'essais

3. Résultats expérimentaux

3.1. Distribution

La répartition des débits entre les 8 barrettes de mini-canaux est présentée de façon adimensionnelle (débits massiques dans chaque barrette \dot{m}_i sur le débit massique total \dot{M}_0). La gamme de densité de flux massique G étudiée s'étend de 15 à 500 kg/(m².s) pour le HFE et de 100 à 690 kg/(m².s) pour l'eau en entrée de section d'essais. La représentation des débits

massiques adimensionnés montre que la distribution s'effectue de manière relativement homogène et identique quels que soient le débit en entrée de section d'essais et le fluide utilisé (Figure 3). En effet le rapport entre les pertes de pression mesurées dans les mini-canaux et dans le distributeur est supérieur à 10 homogénéisant ainsi la distribution [2] et conduisant à un débit adimensionné moyen d'environ 0,125 ($\pm 0,03$) dans chacune des barrettes de mini-canaux sauf pour la dernière barrette où une remontée de débit est observée due à l'« effet de fond ».

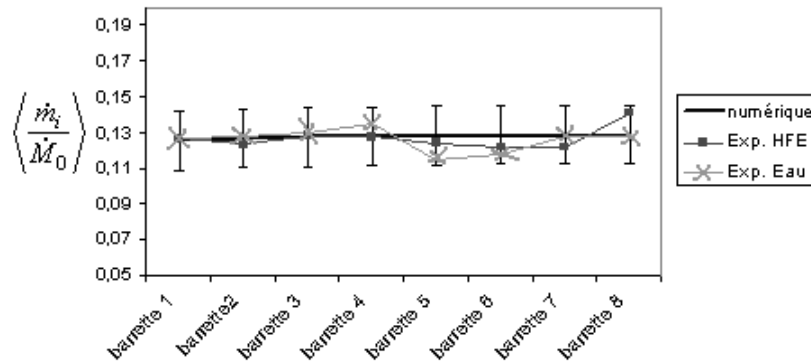


Figure 3 : Répartition des débits expérimentaux de HFE et d'eau, comparés à la répartition des débits de HFE donnée par Fluent.

3.2. Pertes de pression singulières

Les intrusions de barrettes dans le distributeur, l'utilisation de mini-canaux qui les composent induisent un grand nombre de singularités avec les pertes de pression associées (figure 1). L'influence de la gravité est soustraite des mesures de pression pour ne tenir compte que des pertes de pression régulières et singulières. La variation de la pression dans le distributeur est due à la compétition de deux phénomènes, une augmentation de pression due à la diminution progressive du débit, une diminution de pression due aux pertes de pression régulières et singulières le long du distributeur. Pour les distinguer l'une de l'autre, on a étudié la variation de pression d'une part en alimentant les 8 barrettes (figures 4, 5 a et b), d'autres part en alimentant uniquement les 2 dernières barrettes (vannes des 6 premières barrettes fermées, figure 4). Cette dernière représente les pertes de pression régulières (frottement) et singulières dans la première partie du distributeur, ce qui nous a permis de déterminer les coefficients de singularité relatifs aux insertions [3]. Après la 6^{ème} barrette la diminution de débit conduit à une compensation partielle de ces pertes de pression.

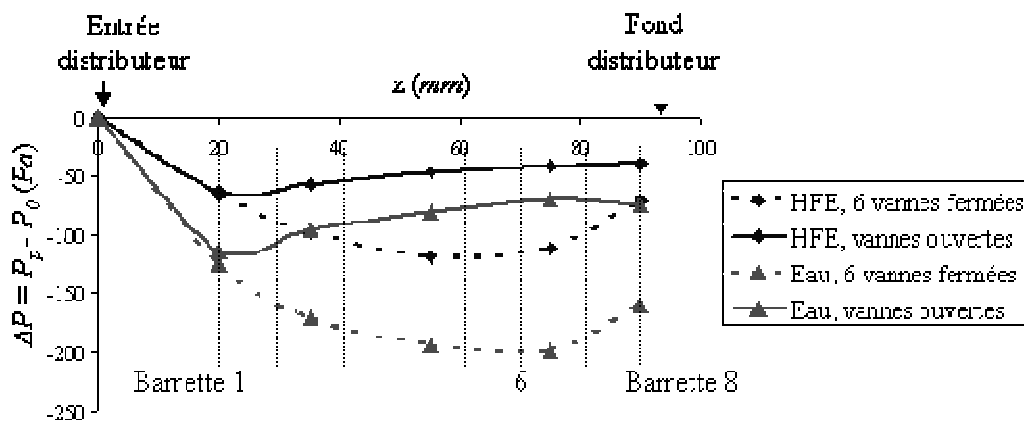


Figure 4 : Variation de pression le long du distributeur pour un débit massique de 190 kg/h vanes ouvertes et 6 vanes fermées pour deux fluides (HFE, et Eau).

En s'appuyant sur les résultats expérimentaux vannes fermées ainsi que sur la simulation numérique (§ 4), les coefficients de singularité relatifs aux insertions de barrettes dans le distributeur ont été déterminés.

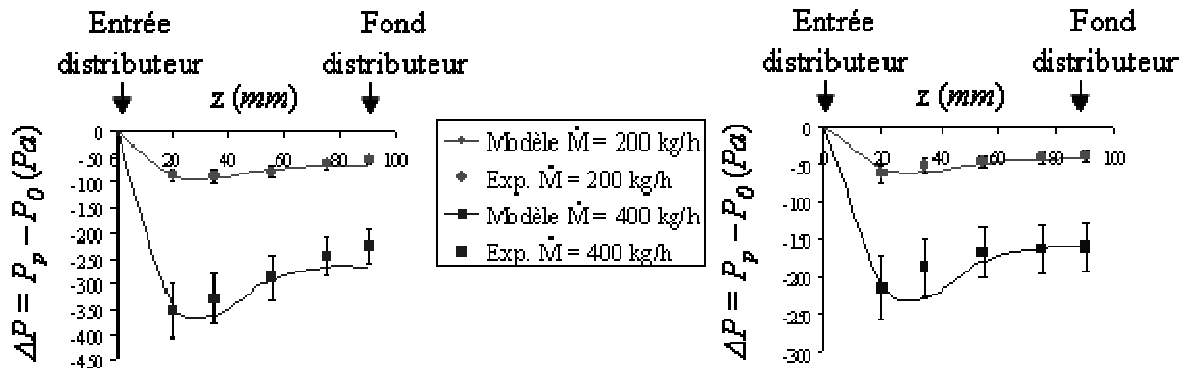


Figure 5 a et b : Variation de pression le long du distributeur pour deux débits massiques vannes ouvertes respectivement pour l'eau et le HFE.

4. Simulation numérique

Le comportement des écoulements dans le distributeur et les pertes de pression associées ont été étudiés par simulation numérique en utilisant le logiciel Fluent. Le modèle « $k-\varepsilon$ réalisable » a été utilisé. La vitesse débitante en entrée du distributeur et une pression constante en sortie de collecteur ont été imposées. La simulation a permis de mettre en avant un effet de contraction causé par l'insertion de la première barrette de mini-canaux. Ensuite du fait des insertions de barrettes, des zones de recirculation se créent entre les barrettes, confinant l'écoulement principal entre le sommet des barrettes et la paroi du distributeur (figure 7). Tout se passe comme si le diamètre du distributeur était « réduit » de la hauteur d'insertion des barrettes, avec des zones d'expansion et de contractions entre les barrettes (zone de recirculation). La « section réduite », \bar{S} , est identifiable (Figure 8).

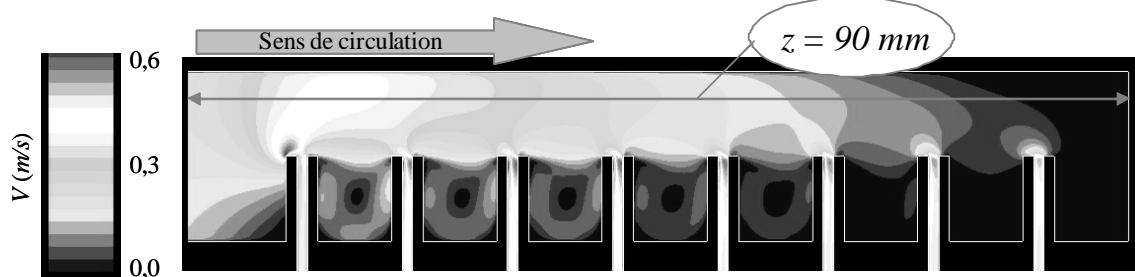
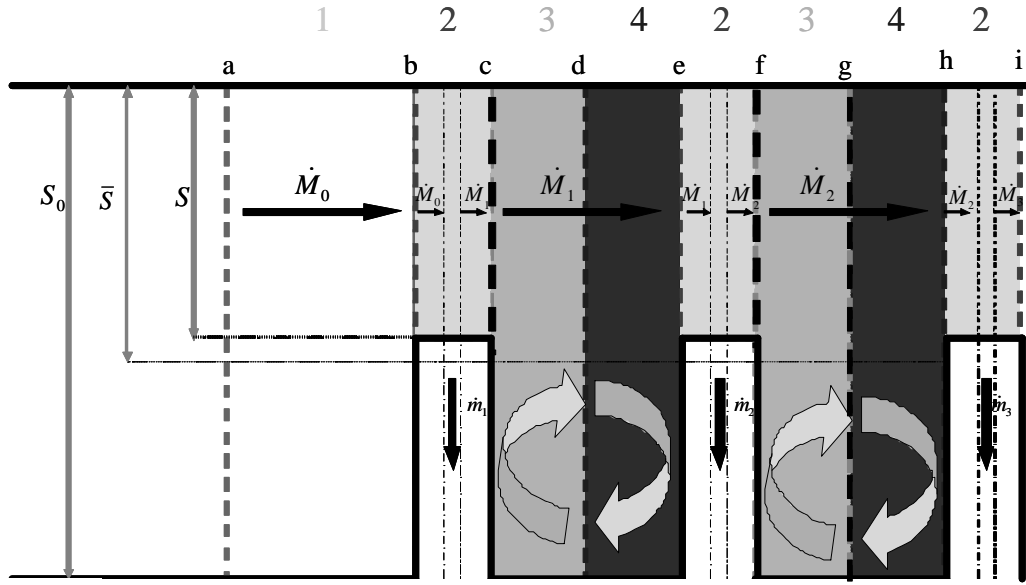


Figure 7 : Simulation Fluent (modèle $k-\varepsilon$) vannes ouvertes d'un écoulement de HFE dans le distributeur pour un débit massique de 223 kg/h.

5. Modèle simplifié

Un modèle simplifié a été mis au point pour prédire les variations de pression le long du distributeur. La figure 8 représente les différentes zones du distributeur, ainsi que les étapes de calculs. Ce modèle est établi à partir des observations des simulations numériques (§ 4) et des données expérimentales pour la détermination des coefficients de singularités (§ 3.2). Les premiers résultats disponibles sont visibles sur les figures 5 a et b, où ils sont comparés aux valeurs expérimentales pour les deux fluides (Eau et HFE). La principale constatation est une bonne prédiction de la variation de pression le long du distributeur. L'écart le plus important entre les valeurs calculées et des valeurs expérimentales est obtenu entre P_0 et P_2 . Cet écart est d'autant plus marqué que le débit massique en entrée augmente. Une mauvaise estimation

des vitesses en entrée du distributeur peut expliquer ces différences. Cependant cet écart n'excède pas les 17 % avec le HFE et 10 % avec l'eau. ;



- Zones :**
- 1 : Contraction en entrée, Equation de Bemoulli
 - 2 : Distribution, Equations : Conservation de la masse + Equation de Bernoulli
 - 3 : Expansion après la barrette, Equation de Bernoulli
 - 4 : Contraction avant la barrette, Equation de Bernoulli

Figure 8 : Représentation schématique des différentes zones de calculs dans le distributeur

En se référant à la figure 8, on donne ci-après les relations permettant de décrire le modèle

Zone 1 : Contraction en entrée [a-b]

$$\text{Equation de Bernoulli : } P_a - P_b = \frac{1}{2} \rho (V_b^2 - V_a^2) + \Delta P_{frot,1} + \Delta P_{sing}$$

$$\text{Où, } V_a = \frac{\dot{M}_0}{\rho S_0}, V_b = \frac{\dot{M}_0}{\rho S}, S = \frac{1}{2} S_0 \text{ et } \Delta P_{sing} = \xi_{co,1} \frac{1}{2} \rho V_b^2$$

$$\text{avec } \xi_{co,1} = f(S_0, S) \text{ donné par Idel'cik [3], } \xi_{co,1} = 0,5(1 - S/S_0) = 0,25$$

Zone 2 : Distribution de débit [b-c]

$$\text{Conservation de la masse : } \dot{M}_0 = \dot{M}_1 + \dot{m}_1$$

$$\text{Equation de Bernoulli : } P_b - P_c = \frac{1}{2} \rho (V_c^2 - V_b^2) + \Delta P_{frot,2} + \Delta P_{Té}$$

$$\text{Où, } V_b = \frac{\dot{M}_0}{\rho S}, V_c = \frac{\dot{M}_1}{\rho S}, S = \frac{1}{2} S_0 \text{ et } \Delta P_{Té} = \zeta_{Té} \frac{1}{2} \rho V_b^2 \text{ avec } \zeta_{Té} = 0,4(1 - V_c/V_b)^2$$

Zone 3 et 4 : Recirculation entre les barrettes [c-e] expansion [c-d]

$$\text{Equation de Bernoulli : } P_d - P_c = \frac{1}{2} \rho (V_c^2 - V_d^2) + \Delta P_{frot,3} + \Delta P_{sing}$$

$$\text{Où, } V_c = \frac{\dot{M}_1}{\rho S}, V_d = \frac{\dot{M}_1}{\rho \bar{S}}, S = \frac{1}{2} S_0, \frac{\bar{S}}{S} = 0,9 \text{ et } \Delta P_{sing} = \xi_{ex} \frac{1}{2} \rho V_c^2$$

$$\text{avec } \xi_{ex} = f(S_0, \bar{S}) \text{ donné par Idel'cik [3], } \xi_{ex} = 0,01$$

\bar{S} est déterminée expérimentalement et justifiée numériquement

contraction [d-e]

Equation de Bernoulli : $P_e - P_d = \frac{1}{2} \rho (V_d^2 - V_e^2) + \Delta P_{frot,4} + \Delta P_{sing}$

$$\text{Où, } V_d = \frac{\dot{M}_1}{\rho S}, V_e = \frac{\dot{M}_1}{\rho S}, S = \frac{1}{2} S_0, \frac{S}{S_0} = 0,9 \text{ et } \Delta P_{sing.} = \xi_{co} \frac{1}{2} \rho V_e^2$$

avec $\xi_{co} = f(S_0, \bar{S})$ donné par Idel'cik [3], $\xi_{ex} = 0,05$

NB : $\Delta P_{frot.,p} = 4.f. \frac{G^2 \cdot z_p}{2 \cdot \rho \cdot D_h}$ où p est la position dans le distributeur ($1 \leq p \leq 8$).

Pour un mini-canal de section rectangulaire (a.b), le rapport d'aspect est $\gamma = a/b$

En régime laminaire, on utilise la corrélation de Shah et London:

$$4.f = 96 \cdot (1 - 1,3553 \cdot \gamma + 1,9467 \cdot \gamma^2 - 1,7012 \cdot \gamma^3 + 0,9564 \cdot \gamma^4 - 0,2537 \cdot \gamma^5)$$

En régime turbulent, on utilise la relation de Blasius: $4.f = 0,316 \cdot Re^{-0,25}$

Les pertes de pressions régulières (frottement) dans les mini-canaux ont été mesurées mais ne sont pas présentées dans cet article. Nous avons pu constater que les résultats pour les tubes conventionnels restent applicables dans les mini-canaux [4, 5, 6, 7].

Le coefficient de singularité global associé à l'insertion d'une barrette a fait l'objet de peu de travaux comparables [8] ; il est de l'ordre de 0,31.

6. Conclusion

Une section d'essais en polycarbonate caractérisant un distributeur dans lequel sont insérées des barrettes de mini-canaux a permis de mesurer les débits dans ces dernières et la pression le long du distributeur. La distribution a été caractérisée pour deux fluides (HFE, Eau). Les essais ont été réalisés pour des écoulements monophasiques avec des densités de flux massique respectivement comprises entre 15 et 500 kg/(m².s), et 100 à 690 kg/(m².s). La distribution du fluide est relativement homogène quels que soient le débit en entrée et le fluide utilisé. La simulation numérique nous a permis de comprendre le comportement des écoulements dans le distributeur et ainsi de déterminer un modèle simplifié pour prédire les variations de pression le long de celui-ci.

Références

- [1] R. K. Shah, Advances in Science and Technology of compact heat exchangers, *Heat Transfer Engineering*, 27 (2006), 3-22.
- [2] R.H. Perry, P.W. Green, Chemical Engineers Handbook. Mc Graw-Hill (1997).
- [3] I.E. Idel'cik, Mémento des pertes de charge, EYROLLES (1986), 494 p.
- [4] G.L. Morini, Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. Short survey. *International Journal of Thermal Sciences* 43 (2004), Issue 7, 631-651.
- [5] B. Agostini, B. Watel, A. Bontemps, B. Thonon, Liquid flow friction factor and heat transfer coefficient in small channels: an experimental investigation. *Experimental Thermal and Fluid Science* 28 (2004), 97-103.
- [6] R. Bavière, S. Le Person, M. Favre-Marinet, F. Ayela, Les lois de l'hydrodynamique et des transferts thermiques par convection forcée aux microéchelles : Nouvelles théories ou erreurs expérimentales ? 665-670, SFT.2006, 16-19 mai 2006, Ile de Ré, France.
- [7] F. Poggi, H. Macchi, A. Bontemps, Etude expérimentale : Distribution d'écoulements mono- et diphasique, et pertes de pression dans un échangeur à mini-canaux. 995-1000, SFT 2007, 29 mai-1 juin 2007, Île des Embiez, France.
- [8] J.M. Yin, C.W. Bullard, P.S. Hrnjak, Single-phase pressure drop measurements in a microchannel heat exchanger, *Heat Transfer Engineering*, 23 (2002), 3-12.