

Modèles empiriques de calcul des pertes de charge dans un conduit rectangulaire muni de rugosités artificielles – Cas des insolateurs à air

Nacer Chouchane¹, Abdelhafid Moumimi^{1*}, Bachir Achour² et Nouredine Moumimi¹

¹ Laboratoire de Génie Mécanique, 'LGM', Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider, B.P. 145, Biskra, Algérie

² Laboratoire de Recherche en Hydraulique de Surface, 'Larhyss', Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider, B.P. 145, Biskra, Algérie

(reçu le 20 Juin 2009 – accepté le 25 Septembre 2009)

Résumé - L'objectif de ce travail, consiste à établir des modèles empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des rugosités artificielles de formes diverses dites chicanes et aux différents modes de dispositions de celles-ci dans le conduit utile d'un canal rectangulaire. Pour réaliser ce travail, un dispositif expérimental a été mis au point pour mesurer les pertes de charge occasionnées par les chicanes entre l'amont et l'aval du conduit utile. Les mesures expérimentales effectuées nous ont permis d'établir des relations empiriques permettant d'estimer les pertes de charge en fonction de la géométrie de configuration et de disposition de ces chicanes pour différents régimes d'écoulements.

Abstract - The purpose of this work is to find empirical models connecting losses burden to the geometric characteristics of artificial roughness said baffles and different modes of provisions of these fluid in the vein of a rectangular channel. An experimental device was developed to measure the burden of losses caused by squabbles between the upstream and downstream of the channel. The experimental measurements made have allowed us to establish empirical relationships to estimate losses due to load a configuration and arrangement of baffles and for different flow regime.

Mots clés: Pertes de charge - Corrélations - Rugosités artificielles - Capteur solaire - Echanges convectifs.

1. INTRODUCTION

En vue d'optimiser les échanges convectifs et les performances thermiques des échangeurs de chaleur et des capteurs solaires à eau et à air, on introduit dans le conduit utile des ailettes de formes diverses dites chicanes.

Les chicanes contribuent à la réduction des zones mortes dans l'espace utile du fluide en écoulement et améliorent le transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement. Cependant, leur présence est induite par une augmentation considérable des pertes de charge qui nécessitent une puissance mécanique importante pour le pompage du fluide.

Dans ce travail expérimental, on s'est intéressé à quatre configurations de chicanes (Fig. 2). Plusieurs rangées sont introduites à l'intérieur du canal rectangulaire (Fig. 1). Les chicanes sont munies d'une partie supérieure inclinée (Fig. 2), qui ont pour rôle [4],

* moumi99dz@yahoo.fr

la création des écoulements désordonnés et à structure tourbillonnaire développée, à axe vertical et horizontal due aux rétrécissements et aux élargissements brusques, notamment en présence de la disposition en quinconce, (Fig. 4-b).

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental utilisé est conçu au Département de Génie Mécanique de l'Université de Biskra. Il s'agit d'un conduit rectangulaire de 2,5 m de longueur, 0,5 m de largeur et d'une hauteur égale à 0,025 m dans lequel sont introduites des chicanes de longueur respectivement 5, 7 et 10 cm, disposées dans l'espace utile d'écoulement du fluide (eau).

Les chicanes en acier galvanisé sont découpées avec une épaisseur de 0,4 mm, disposées en rangées et en quinconce (Fig. 4). Les pas relatifs entre deux rangées successives considérées sont égaux à 25, 18, 20 et 05 cm, et d'autre part, les pas relatifs entre les sommets de deux chicanes successives de la même rangée sont de 15, 10 et 08 cm. Les pas entre deux chicanes d'une même rangée sont de 10, 07, 05 et 03 cm.

Les chicanes comportent deux parties solidaires, une partie fixée orthogonalement au plan d'écoulement de 01 cm de longueur, par contre la partie inclinée est de 1,5 cm (Fig. 2). Les incidences de la partie supérieure sont de 30° , 60° , 120° et 150° .

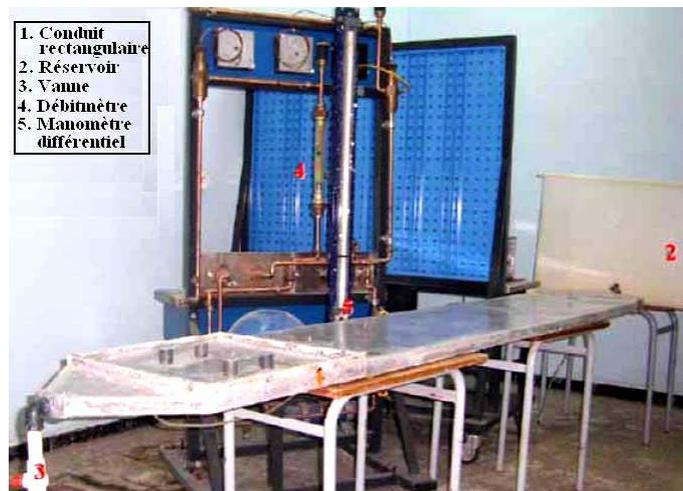


Fig. 1: Dispositif expérimental de mesure des pertes de charge



a- Chicane rectangulaire

b- Chicane rectangulo-trapézoïdale

c- Chicane rectangulo-triangulaire

d- Chicane triangulaire

Fig. 2: Configuration des chicanes étudiées

Les mesures des pertes de charge ont été prises dans un premier temps pour un canal lisse (sans chicanes) pour différentes valeurs de débit.

En deuxième étape, les mêmes mesures ont été prises pour les configurations considérées de chicanes disposées en rangée, puis en quinconce, (Fig. 2).

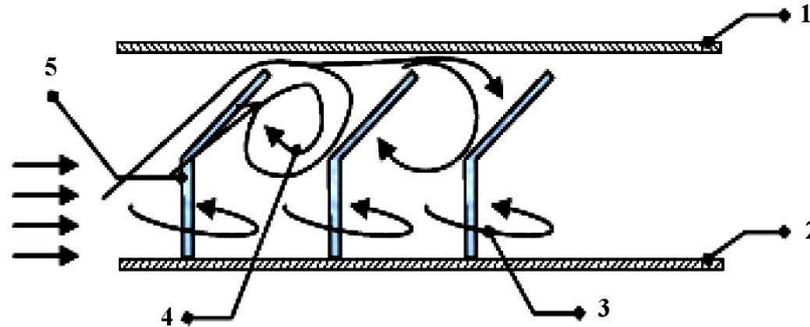


Fig. 3: Schématisation de l'impact du fluide au voisinage des chicanes [5]

- 1- Plan supérieur; 2- Plan inférieur; 3- Tourbillon à axe vertical;
- 4 Tourbillon à axe horizontal; 5- Chicane

3. MODELE EMPIRIQUE DE CALCUL DES PERTES DE CHARGE

Les résultats obtenus montrent que les pertes de charge enregistrées sont de plus en plus accentuées avec le nombre de rangées des chicanes, notamment pour les incidences de 60° et de 120° de la partie supérieure inclinée, lorsque le pas relatif entre les chicanes et les rangées se trouve réduit, particulièrement elles sont plus importantes en présence de la disposition en quinconce, (Fig. 4-b), que lorsque celles-ci sont alignées en rangées, (Fig. 4-a).

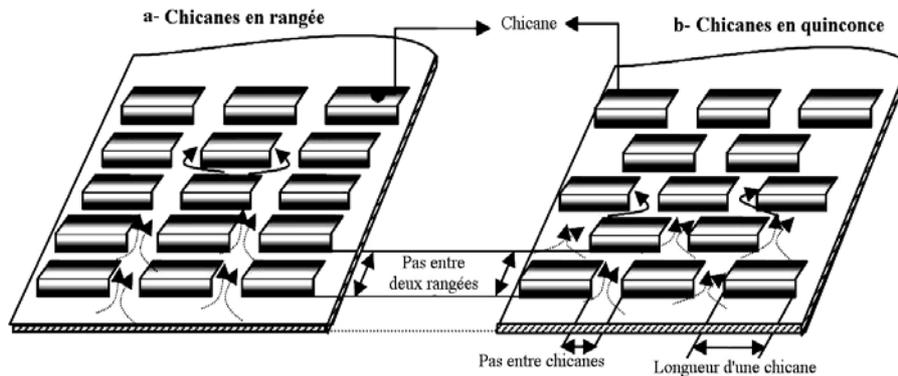


Fig. 4: Disposition en rangée et en quinconce des chicanes

Pour corrélérer les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des chicanes, aux paramètres physiques du fluide en écoulement, et à la géométrie de dispositions dans le conduit utile, on s'est servi de la méthode de l'analyse dimensionnelle (Théorème de Vashy Buckingham) [1], ce qui a permis d'obtenir une relation générale basée sur les dimensions fondamentales de la forme:

$$\Delta P = \Delta P(\rho, D_H, V, \mu, \varepsilon, L, P_{e-ch}, P_{e-r}, L_{ch}, P_{e-s.ch}) \quad (1)$$

D'après le théorème de π (Vashy-Bukingham), on ne peut avoir que sept (07) groupements indépendants.

Adoptons alors l'écriture suivante, et sachant que la longueur du conduit rectangulaire L est constante.

$$\frac{\Delta P}{L} = \pi \times k \times \rho^\alpha \times D_H^\beta \times V^\gamma \times \mu^x \times \varepsilon^y \times P_{e-ch}^z \times P_{e-r}^t \times L_{ch}^w \times P_{e-s.ch}^n \quad (2)$$

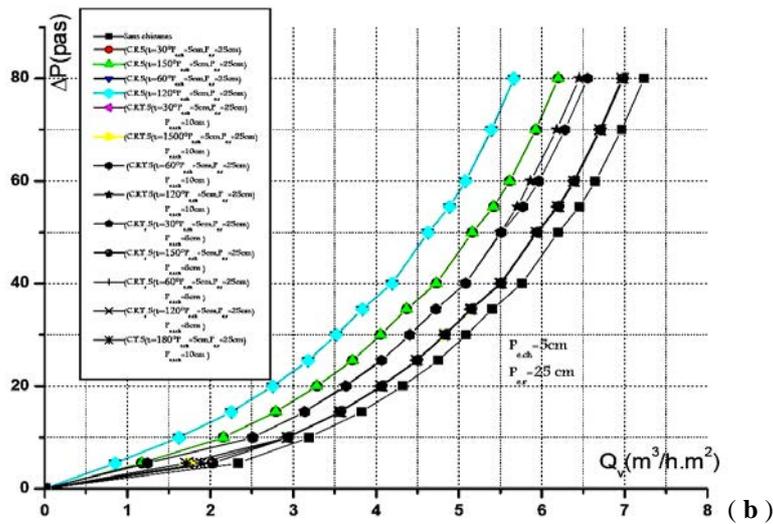
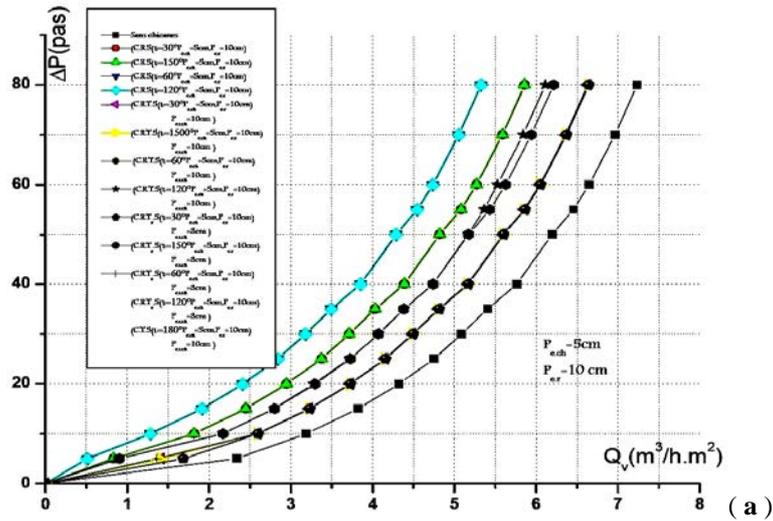


Fig. 5: Pertes de charge en fonction du débit volumique pour les incidences de 30°, 60°, 120 et 150° de la partie inclinée des chicanes, disposées en quinconce par rapport à un conduit lisse

L'écriture de l'équation (2), compte tenu les dimensions fondamentales, après développement et identification permet d'obtenir un système de 03 équations, dont la résolution aboutit à une expression générale de la forme:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot V^2 \left[\left(\frac{\rho \cdot V \cdot D_H}{\mu} \right)^{-x} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^y \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^z \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^t \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^w \cdot \left(\frac{P_{e-s.ch}}{D_H} \right)^n \right] \quad (3)$$

En introduisant le nombre de Reynolds, l'expression (3) devient:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot V^2 \left[(Re)^{-x} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^y \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^z \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^t \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^w \cdot \left(\frac{P_{e-s.ch}}{D_H} \right)^n \right] \quad (3')$$

Le terme entre crochet représente le coefficient des pertes de charge λ exprimé par:

$$\lambda = \left[(Re)^{-x} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^y \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^z \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^t \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^w \cdot \left(\frac{P_{e-s.ch}}{D_H} \right)^n \right] \quad (4)$$

Un simple développement de l'équation (3') nous donne:

$$\ln \frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} = -x \ln(Re) + y \ln \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right) + z \ln \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right) + t \ln \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right) + w \ln \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right) + n \ln \left(\frac{P_{e-s.ch}}{D_H} \right) \quad (5)$$

3.1 Cas des chicanes rectangulo-triangulaire disposées en rangées en régime turbulent

Par identification aux paramètres géométriques des chicanes et en se référant aux résultats expérimentaux, la relation (5) sous sa forme développée nous donne le **Tableau 1**, qui pour chaque valeur de ΔP mesurée correspond à une configuration des chicanes étudiée, ce qui permet d'obtenir un système d'équations à résoudre.

Tableau 1: Pertes de charge enregistrées en fonction des paramètres géométriques considérés en présence de la disposition en rangée des chicanes (régime turbulent)

ΔP (Pa)	80	70	80	70	60	80	
V (m/s)	0.2138	0.2080	0.2107	0.2053	0.1883	0.1880	...
ε (m)	0.0175	0.0299	0.0299	0.0175	0.0299	0.0175	...
L_{ch} (m)	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.05	...
P_{e-ch} (m)	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	...
P_{e-r} (m)	0.25	0.25	0.25	0.18	0.18	0.05	...
$P_{e-s.ch}$ (m)	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.1	...
D_H (m)	0.0317	0.0288	0.0329	0.0301	0.0269	0.0317	...

En utilisant les données du **Tableau 1**, et en se reportant à la relation (5), on obtient le système d'équations suivant:

$$\begin{bmatrix} -8.7747 & -0.5963 & 0.4535 & 2.0629 & 0.4535 & 1.1466 \\ -8.6931 & -0.2267 & 0.5502 & 2.1596 & 0.5502 & 1.2433 \\ -8.8422 & -0.3613 & 0.4535 & 1.7344 & 0.4535 & 1.1466 \\ -8.4228 & 0.5419 & 0.5078 & 1.7887 & 1.2010 & 1.6064 \\ -0.5882 & -0.1597 & 0.6172 & 1.8981 & 1.3104 & 1.7158 \\ -8.6904 & -0.5963 & 0.4535 & 0.4535 & 0.4535 & 1.1466 \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \\ w \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.1129 \\ -3.2420 \\ -2.0164 \\ -3.0442 \\ -3.1720 \\ -3.2768 \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \end{bmatrix}$$

Il s'agit d'une matrice composée de 120 lignes ($n = 120$) et de 06 colonnes ($j = 6$), qui peut être écrite sous la forme ci-après:

$$\begin{aligned} A_{i,j} \times X &= B \\ i &= 1, \dots, n & / n &= 120 \\ j &= 1, \dots, 6 \end{aligned}$$

La matrice $A_{i,j}$ n'est pas carrée, dont la résolution est faite par la méthode des moindres carrées, par conséquent:

$$\begin{aligned} A_{i,j}^T \times A_{i,j} \times X &= B \\ i &= 1, \dots, n & / n &= 120 \\ j &= 1, \dots, 6 \end{aligned}$$

Avec: $A_{i,j}^T$ est la matrice transposée de $A_{i,j}$.

On obtient un système d'équations de la forme:

$$\begin{cases} C_{i,j} \times X = B \\ i = 1, \dots, 6 \\ j = 1, \dots, 6 \end{cases}$$

La solution de ce système est obtenue par la méthode de l'élimination de Gauss.

Après substitution des solutions dans l'équation (3'), on obtient la corrélation suivante qui peut être appliquée pour la disposition en rangée des chicanes en régime turbulent:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[(\text{Re})^{-1.2060} \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^{-0.0043} \left(\frac{P_{e\text{-ch}}}{D_H} \right)^{-7.1129} \left(\frac{P_{e\text{-r}}}{D_H} \right)^{-0.0949} \left(\frac{L_{\text{ch}}}{D_H} \right)^{-7.2345} \left(\frac{P_{e\text{-s.ch}}}{D_H} \right)^{12.3519} \right] \cdot V^2 \quad (6)$$

avec, le coefficient des pertes de charge:

$$\lambda = (\text{Re})^{-1.2060} \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^{-0.0043} \left(\frac{P_{e\text{-ch}}}{D_H} \right)^{-7.1129} \left(\frac{P_{e\text{-r}}}{D_H} \right)^{-0.0949} \left(\frac{L_{\text{ch}}}{D_H} \right)^{-7.2345} \left(\frac{P_{e\text{-s.ch}}}{D_H} \right)^{12.3519} \quad (7)$$

Pour le régime laminaire $Re \leq 2100$, en présence de la même configuration des chicanes, on aboutit à l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \left[(Re)^{-1.1972} \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^{0.7207} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^{-6.7089} \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^{-0.3428} \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^{-6.3749} \left(\frac{P_{e-sch}}{D_H} \right)^{11.2249} \right] \cdot V^2 \quad (8)$$

Dont le coefficient λ des pertes de charge correspond au terme entre crochet.

3.2 Cas des chicanes rectangulo-triangulaire disposées en quinconce

De façon analogue, on procède avec la disposition en quinconce, ce qui nous donne:

◆ Régime turbulent

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \left[(Re)^{-1.1312} \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^{0.0244} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^{-8.7666} \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^{-0.0805} \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^{-8.81849} \left(\frac{P_{e-sch}}{D_H} \right)^{15.0836} \right] \cdot V^2 \quad (9)$$

◆ Régime laminaire

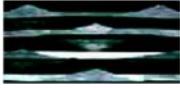
$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \left[(Re)^{-1.16915} \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^{0.6319} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^{-9.6765} \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^{-0.1881} \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^{-9.2643} \left(\frac{P_{e-sch}}{D_H} \right)^{16.4783} \right] \cdot V^2 \quad (10)$$

Pour les autres configurations, les valeurs des exposants tel que exprimés par l'équation (3) correspondants à chaque configuration de chicane, figurent d'après le **Tableau 2** récapitulatif.

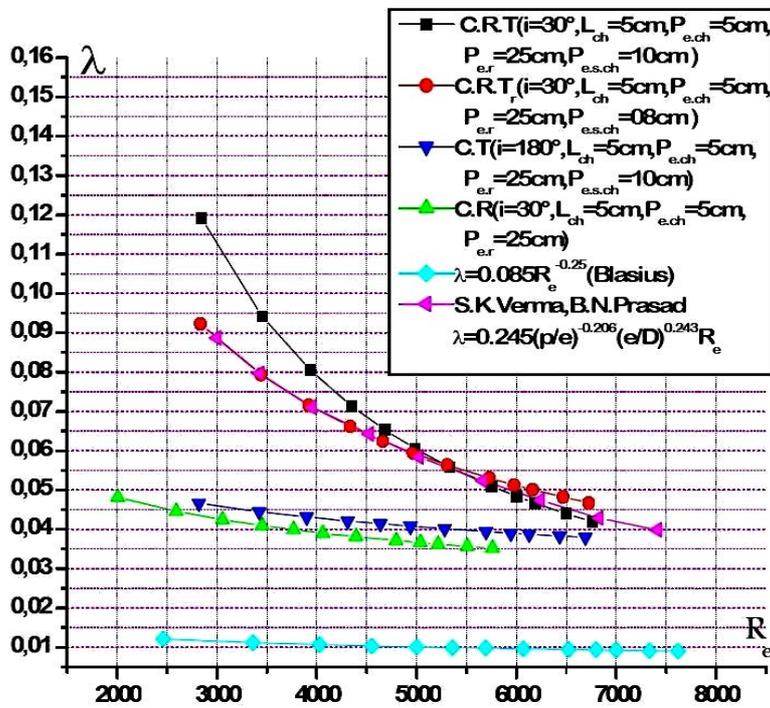
L'analyse des courbes de l'évolution des coefficients de pertes de charge λ , en fonction de Reynolds (Fig. 6), des configurations des chicanes étudiées, montre la bonne concordance avec les modèles de Blasius [1] pour un conduit lisse et de S.K.Verma [11], ce qui montre l'affinité des approches empiriques développés avec ceux cités dans la littérature.

Tableau 2: Valeurs des exposants correspondants aux configurations des chicanes considérées

Configuration des chicanes	$(Re)^{-x} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H} \right)^y \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^z \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^t \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H} \right)^w \cdot \left(\frac{P_{e-sch}}{D_H} \right)^n$				
		Disposition en rangée		Disposition en quinconce	
		Régime laminaire	Régime turbulent	Régime laminaire	Régime turbulent
Rectangulo-Trapézoïdales	x	- 0.9494	- 0.7902	- 0.0048	- 0.2819
	y	0.4095	- 0.4748	0.6724	- 0.3563
	z	- 4.7993	- 4.0636	0.4630	0.5277
	t	- 0.3016	- 0.0787	- 0.7872	- 0.1789
	w	- 2.7847	- 2.5227	- 1.0012	0.0295
	n	8.4554	7.3355	0.2933	- 0.6415

Triangulaire 	x	- 1.1467	- 0.2378	- 1.9598	- 0.9060
	y	- 5.5799	- 0.0496	- 0.8925	- 5.5698
	z	- 2.9986	- 1.4725	- 8.6893	2.8908
	t	- 0.3370	- 0.1446	- 0.5880	- 0.2404
	w	4.9329	0.3576	7.4395	2.5870
	n	0.2758	- 0.3689	0.3088	0.0026

Rectangulaire 	x	- 0.2928	- 0.2985	- 1.2679	- 0.4150
	y	0.7984	- 0.7452	- 3.8416	- 1.2540
	z	2.2582	- 0.0299	- 3.2451	- 0.2820
	t	- 1.3196	- 0.3975	- 0.3260	- 0.1972
	w	- 0.2640	- 0.3246	- 3.3346	- 0.0415



Pertes de charge en fonction du Re

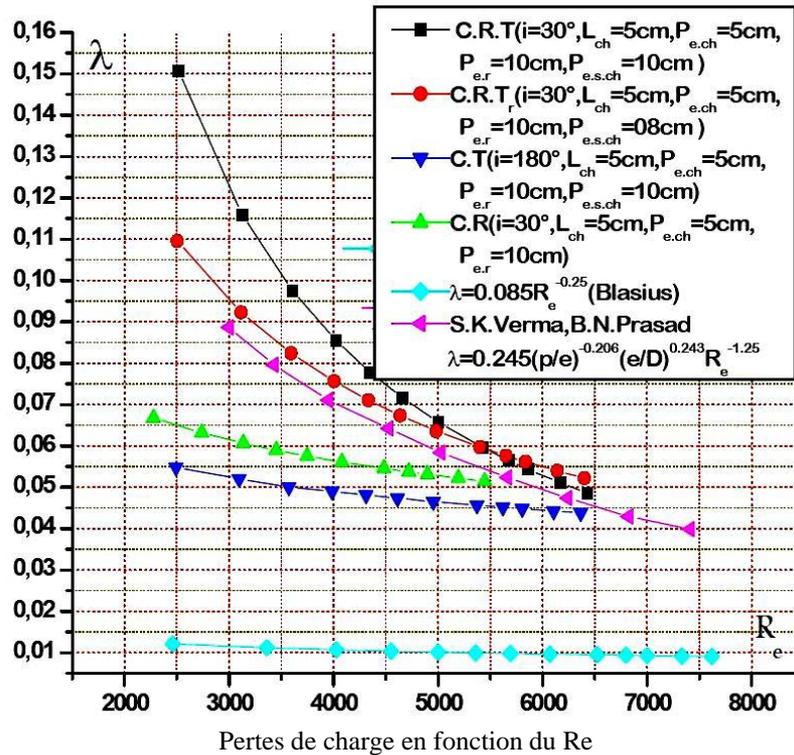


Fig. 6. Coefficient des pertes de charge λ en fonction de Reynolds des modèles empiriques développés, en comparaison avec les modèles de Blasius et de S.K.Verma, (chicanes en rangées)

4. CONCLUSION

A partir de ce travail expérimental on a pu mettre en évidence des relations empiriques entre les pertes de charge et les propriétés géométriques de quatre configurations de chicanes. Ces corrélations permettent d'estimer la chute de pression dans un conduit rectangulaire muni des chicanes étudiées.

Les résultats obtenus, montrent que la chute de pression entre l'amont et l'aval du conduit est d'autant plus importante en présence de la disposition en quinconce, notamment avec les fortes incidences de la partie inclinée.

L'optimisation des échanges convectifs par ajout de rugosités artificielles est en dépit de la puissance mécanique pour le pompage du fluide caloporteur. Cependant, il est intéressant d'étudier d'autres configurations de formes optimales, qui réalisent le meilleur compromis entre performance énergétique et perte de puissance mécanique.

NOMENCLATURE

ΔP : Pertes de charge, [Pa]

- ρ : Masse volumique, [kg/m³]
 D_H : Diamètre hydraulique, [m]
 V : Vitesse du fluide dans le conduit, [m/s]
 μ : Viscosité dynamique, [kg/m.s]
 ε : Rugosité absolue, [m]
 L : Longueur du canal [m]
 P_{e-ch} : Pas entre chicanes, [m]
 $P_{e-s.ch}$: Pas ente les sommets des chicanes, [m]
 P_{e-r} : Pas entre deux rangées successives de chicanes, [m]
 L_{ch} : Longueur d'une chicane, [m]
 C.R.T: Chicane rectangulaire triangulaire
 C.R.Tr: Chicane rectangulaire trapézoïdale
 C.R: Chicane rectangulaire
 C.T: Chicane triangulaire

REFERENCES

- [1] M. Carlier, '*Hydraulique Générale et Appliquée*', Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [2] B.N. Prasad and J.S. Saini, '*Optimal Thermohydraulic Performance of Artificially Roughened Solar Air Heaters*', Solar Energy, Vol. 47, N°2, pp. 91 – 96, 1991.
- [3] B.N. Prasad and J.S. Saini, '*Effect of Artificial Roughness on Heat Transfer and Friction Factor in Solar Air-Heaters*', Solar Energy, Vol. 41, N°6, pp. 505 – 560, 1980.
- [4] A. Moumami, '*Etude Globale et Locale du Rôle de la Géométrie dans l'Optimisation des Capteurs Solaires Plans à Air*', Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, France, 1994.
- [5] N. Chouchane, '*Modélisation des Pertes de Charge dans un Conduit Rectangulaire Garni de Rugosités Artificielles avec une Partie Supérieure Inclinée*', Mémoire de Magister, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [6] R.L. Webb, '*Air-Side Heat Transfer Correlations for Flat and Wavy Plate Fin-and-Tube Geometries*', ASHRAE Transaction, Vol. 96, N°2, pp. 445 – 449, 1990.
- [7] C.-C. Wang, Y.-M. Hwang and Y.-T. Lin, '*Empirical Correlations for Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Herringbone wavy Fin-and-Tube Heat Exchangers*', International Journal of Refrigeration, Vol. 25, N°5, pp. 673 – 680, 2002.
- [8] M. Mahfoud, S. Benhadid and M. Lebouché, '*Frottements et Pertes de Charge des Fluides Viscoélastiques dans des Conduites Rectangulaires*', International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, N°5, pp. 580 – 590, 2006.
- [9] C.C. Wang, J.Y. Jang and N.F. Chioub, '*A Heat Transfer and Friction Correlation for Wavy Fin-and-Tube Heat Exchangers*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42, N°10, pp. 1919 -1924, 1999.
- [10] D. Junqi, C. Jiangping, C. Zhijiu, Z. Yimin and Z. Wenfeng, '*Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Wavy Fin and Flat Tube Heat Exchangers*', Applied Thermal Engineering, Vol. 27, N°11-12, pp. 2066 – 2073, 2007.
- [11] S.K. Verma and B.N. Prasad, '*Investigation for the Optimal Thermohydraulic Performance of Artificially Roughened Solar Air Heaters*', Renewable Energy, Vol. 20, N°1, pp.19 – 36, 2000.