

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie mécanique

Option: Systèmes Energétiques et Développement Durable

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme de:**

**MASTER**

*Thème*

**L'influence des nervures et rainures sur les pertes de charge dans une conduite rectangulaire**

**Présenté par:**

**Imane DJIMAOUI**

**Proposé et dirigé par:**

**Mr. Nacer CHOUCANE**

**Promotion : Juin 2017**

***Introduction***

***Générale***

*Conclusion*

*Générale*

*References*

*Bibliographiques*

# *Chapitre I*

## *Etude bibliographique*

# *Chapitre II*

## *Etude expérimentale*

# *Chapitre III*

*Etablissement des modèles*

*de calcul des*

*Pertes de charge*

## **Remerciement**

*Mes remerciements vont premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donnée durant toutes ces années d'étude.*

*J'exprime mes profondes gratitude a mes parent et ma famille pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciement a mon*

*Encadreur **Dr Nacer Chouchane** pour avoir*

*d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire , et qui n'a pas cessé de me donne ses conseils et remarques.*

*Mes sincères remerciement aux messieurs les membres de jury pour*

*l'honneur qu'il me fait en participant au jugement de ce travail.*

*Je tien à remercier vivement toutes les personnes qui m'ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui m'ont aidés, de près ou de loin,*

*à accomplir ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué a ma formation.*

*Enfin je tiens à exprimer mes remerciement a tous mes amis et collègues pour le soutien moral.*

**IMANE**

## *Liste des figures*

<b>Figure (I.1) : Régimes d'écoulement.....</b>	4
<b>Figure (I.2) : Diagramme de Moody.....</b>	7
<b>Figure (I.3) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils transversaux contenus.....</b>	11
<b>Figure (I.4) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques transversaux discontinus.....</b>	11
<b>Figure (I.5) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques inclinés continus.....</b>	12
<b>Figure (I.6) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme de V continus.....</b>	13
<b>Figure (I.7) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme de V discontinus.....</b>	14
<b>Figure (I.8) : Schéma d'un canal rectangulaire muni de petits fils de métal.....</b>	15
<b>Figure (I.9) : Schéma d'un canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés.....</b>	15
<b>Figure (I.10) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc.....</b>	16
<b>Figure (I.11) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des nervures chanfreinées.....</b>	17
<b>Figure (I.12) : Schéma des nervures en forme de cales (dent de scie).....</b>	18
<b>Figure (I.13) : Combinaison des nervures et rainures transversales.....</b>	19
<b>Figure (I.14) : Schéma d'un canal rectangulaire de type grille métallique étendue.....</b>	20
<b>Figure (I.15) : Canal rectangulaire avec rugosités types bosses (alvéoles).....</b>	21
<b>Figure (I.16) : Rugosités type chicanes.....</b>	22
<b>Figure (I.17) : Rugosités type ailette en forme de diamant.....</b>	23
<b>Figure (I.18) : Plaque d'absorbeur munie des ailettes rectangulaires.....</b>	23
<b>Figure (I.19) : Configuration des chicanes étudiées.....</b>	24
<b>Figure (II.1) : Dispositif expérimental.....</b>	34
<b>Figure (II.2) : Aspirateur.....</b>	35
<b>Figure (II.3) : Variateur de vitesse.....</b>	35

<b>Figure (II.4) : Capteur différentiel de pression.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure (II.5) : Anémomètre à hélice.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure(II.6) : Nervures et rainures en bois.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure (II.7) : Nervures et rainures disposées en rangées.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure (II.8) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en rangées comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 2\text{ cm}, \varepsilon_n = 2\text{ cm}, L_n = 50\text{ cm}, P_{e-r} = 5, 10, 17\text{ cm}, P_{e-n} = 10, 15, 22\text{ cm}</math>).....</b>	<b>42</b>
<b>Figure (II.9) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en rangées comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 3, 2, 1\text{ cm}, \varepsilon_n = 2\text{ cm}, L_n = 50\text{ cm}, P_{e-r} = 17\text{ cm}, P_{e-n} = 22\text{ cm}</math>).....</b>	<b>43</b>
<b>Figure (II.10) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en rangées comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 2\text{ cm}, \varepsilon_n = 2.5, 2, 1.5\text{ cm}, L_n = 50\text{ cm}, P_{e-r} = 10\text{ cm}, P_{e-n} = 15\text{ cm}</math>).....</b>	<b>44</b>
<b>Figure (II.11) : Nervures et rainures disposées en forme inclinée.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure (II.12) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 2\text{ cm}, \varepsilon_n = 2\text{ cm}, L_n = 52\text{ cm}, P_{e-r} = 4.6, 10, 14.7\text{ cm}, P_{e-n} = 9.5, 15, 19.5\text{ cm}, i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>51</b>
<b>Figure (II.13) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 3, 2, 1\text{ cm}, \varepsilon_n = 2\text{ cm}, L_n = 52\text{ cm}, P_{e-r} = 14.7\text{ cm}, P_{e-n} = 19.5\text{ cm}, i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>52</b>
<b>Figure (II.14) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 2\text{ cm}, \varepsilon_n = 2.5, 2, 1.5\text{ cm}, L_n = 52\text{ cm}, P_{e-r} = 4.6\text{ cm}, P_{e-n} = 9.5\text{ cm}, i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>53</b>
<b>Figure (II.15) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse. (<math>E_n = 2\text{ cm}, \varepsilon_n = 2\text{ cm}, L_n = 52, 56, 60\text{ cm}, P_{e-r} = 14.7\text{ cm}, P_{e-n} = 19.5\text{ cm}, i = 70^\circ, 50^\circ, 30^\circ</math>).....</b>	<b>54</b>
<b>Figure (II.16) : Nervures et rainures disposées en forme de V.....</b>	<b>55</b>

**Figure (II.17) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme de V comparativement à un conduit lisse.**

**( $E_n = 2\text{ cm}$ ,  $\varepsilon_n = 2\text{ cm}$ ,  $L_n = 50, 60\text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 2\text{ cm}$ ,  $P_{e-n} = 7\text{ cm}$ ,**

**$i = 45^\circ, 135^\circ, 30^\circ, 150^\circ$ )..... 58**



## *Liste des tableaux*

<b>Tableau (I.1) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en rangées.....</b>	25
<b>Tableau (I.2) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en quinconce.....</b>	26
<b>Tableau (I.3) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaires disposées en rangées.....</b>	27
<b>Tableau (I.4) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaires disposées en quinconce.....</b>	28
<b>Tableau (I.5) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en rangées.....</b>	29
<b>Tableau (I.6) : coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en quinconce.....</b>	30
<b>Tableau (I.7) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en rangées.....</b>	31
<b>Tableau (I.8) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en quinconce.....</b>	32
<b>Tableau (II.1) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal sans nervures et rainures.....</b>	38
<b>Tableau (II.2) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par : (<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 5\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 10\text{ cm}</math>).....</b>	38
<b>Tableau (II.3) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par : (<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 10\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 15\text{ cm}</math>).....</b>	39
<b>Tableau (II.4) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par : (<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 17\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 22\text{ cm}</math>).....</b>	39

<b>Tableau (II.5) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 3\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 17\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 22\text{ cm}</math>).....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau (II.6) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 1\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 17\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 22\text{ cm}</math>).....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau (II.7) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par:</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2.5\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 10\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 15\text{ cm}</math>).....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau (II.8) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par:</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 1.5\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 10\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 15\text{ cm}</math>).....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau (II.9) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 4.6\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 9.5\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau (II.10) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 10\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 15\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau (II.11) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 14.7\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 19.5\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau (II.12) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 3\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 14.7\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 19.5\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau (II.13) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 1\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 14.7\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 19.5\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau (II.14) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2.5\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 4.6\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 9.5\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>48</b>
<b>Tableau (II.15) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 1.5\text{ cm}</math>, <math>L_n = 52\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 4.6\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 9.5\text{ cm}</math>, <math>i = 70^\circ</math>).....</b>	<b>49</b>

<b>Tableau (II.16) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 56\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 14.7\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 19.5\text{ cm}</math>, <math>i = 50^\circ</math>).....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau (II.17) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 60\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 14.7\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 19.5\text{ cm}</math>, <math>i = 30^\circ</math>).....</b>	<b>50</b>
<b>Tableau (II.18) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 2\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 7\text{ cm}</math>, <math>i = 45^\circ</math>).....</b>	<b>56</b>
<b>Tableau (II.19) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 50\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 2\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 7\text{ cm}</math>, <math>i = 135^\circ</math>).....</b>	<b>56</b>
<b>Tableau (II.20) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 60\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 2\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 7\text{ cm}</math>, <math>i = 30^\circ</math>).....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau (II.21) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :</b>	
<b>(<math>E_n = 2\text{ cm}</math>, <math>\varepsilon_n = 2\text{ cm}</math>, <math>L_n = 60\text{ cm}</math>, <math>P_{e-r} = 2\text{ cm}</math>, <math>P_{e-n} = 7\text{ cm}</math>, <math>i = 150^\circ</math>).....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau (III.1) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en rangées en régime laminaire.....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau (III.2) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en rangées en régime turbulent.....</b>	<b>65</b>
<b>Tableau (III.3) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme inclinée en régime laminaire.....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau (III.4) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme inclinée en régime turbulent.....</b>	<b>72</b>
<b>Tableau (III.5) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme de V en régime laminaire.....</b>	<b>75</b>
<b>Tableau (III.6) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme de V en régime turbulent.....</b>	<b>77</b>



## *Nomenclature des symboles*

### *Symboles*

---

$\Delta P$	Pertes de charge par frottement	[Pascal]
$D_H \Leftrightarrow D$	Diamètre hydraulique	[m]
$e$	Hauteur d'une nervure	[m]
$e^+$	Nombre de Reynolds de rugosité	
$E_n$	L'épaisseur des nervures	[m]
$f \Leftrightarrow \lambda$	Coefficient des pertes de pression	
$f_c$	Facteur de frottement pour un canal à section circulaire	
$g$	Accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Coefficient de transfert thermique	[w/m <sup>2</sup> .k]
$H$	Hauteur du canal	[m]
$i$	Angle d'attaque	[degré]
$k$	Coefficient des pertes de charge singulière	
$l$	Largueur du canal	[m]
$L$	Longueur du canal	[m]
$L_{ch}$	Longueur des chicanes	[m]
$L_n$	Longueur des nervures	[m]
$N_u$	Nombre de Nusselt	
$P_r$	Nombre de Prandtl	
$P$	Périmètre mouillé	[m]
$P_{e-r}$	pas entre les rainures	[m]
$P_{e-n}$	pas entre les nervures	[m]
$P_{e-ch}$	pas entre les chicanes	[m]
$P_{e-s-ch}$	pas entre les sommets des chicanes	[m]
$Q_V$	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ]
$Re$	Nombre de Reynolds	
$S$	Section de passage de fluide actuel	[m <sup>2</sup> ]
$S_t$	Nombre de Stanton	
$V$	Vitesse de l'air	[m/s]
$V_{ext}$	Vitesse extérieure	[m/s]
$V_{int}$	Vitesse intérieure	[m/s]

## *Symboles grecs*

---

$\pi$	Indique un produit	
$\lambda$	Coefficient des pertes de pression	
$\rho$	Masse volumique du fluide (air)	$[kg/m^3]$
$\mu$	Viscosité dynamique	$[kg/m.s]$
$\nu$	Viscosité cinématique	$[m^2/s]$
$\varepsilon$	Rugosité absolue	$[m]$
$\varepsilon_n$	Rugosité artificielle des nervures	$[m]$
$\emptyset$	Angle d'ouverture d'encoche ou angle de chanfrein d'une nervure	$[degré]$

### *Introduction générale*

Le transfert thermique entre l'absorbeur et l'air dans un capteur solaire à air peut être amélioré en augmentant la superficie de la surface thermique sans augmenter le coefficient de transfert thermique, ou en augmentant ce dernier, par l'utilisation des promoteurs de turbulence sous forme de rugosité artificielle dans la veine d'air dynamique.

Il est bien connu que même dans un écoulement turbulent, une sous-couche laminaire (visqueuse) existe dans le voisinage immédiat de la paroi. La rugosité artificielle sur la surface de transfert thermique détruit la sous-couche laminaire de l'écoulement turbulent et rend l'écoulement turbulent près de la paroi.

La rugosité artificielle bien qu'elle permette une augmentation souhaitable du transfert thermique a également comme conséquence indésirable la chute de pression due au frottement. Par conséquent, la conception du conduit d'écoulement et de la surface de l'absorbeur dans les capteurs solaires à air doit avoir pour objectif d'améliorer le transfert thermique pour un minimum de pertes par frottements.

Le travail présent consiste à effectuer une étude sur l'effet aérodynamique imposé par les nervures et rainures en bois dans une conduite rectangulaire en bois, dans le but d'aboutir à des corrélations empiriques permettant d'estimer les pertes de charge occasionnées en présence des nervures et rainures, en fonction des paramètres géométriques de ces nervures et rainures de leur configuration de disposition et des régimes d'écoulement.

Le présent travail est structuré en trois chapitres.

Au premier chapitre, nous présentons une revue bibliographique des travaux disponibles dans la littérature qui traitent la perspective thermique et dynamique, en particulier, les modifications géométriques effectuées sur les capteurs solaires plans à air.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une description détaillée du prototype d'une conduite rectangulaire et les appareils associés. Ce chapitre comporte aussi l'ensemble des mesures effectuées sur le modèle expérimental pour les différentes configurations et les différentes valeurs des paramètres géométriques que nous avons utilisés dans notre étude expérimentale.

Le troisième chapitre comporter les données expérimentales pour élaborer un modèle empirique qui regroupe l'ensemble des paramètres géométriques et hydrodynamiques relatifs aux rugosités artificielles.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale précisant les perspectives ouvertes par ce travail.

.

## Introduction

Nous exposons dans ce chapitre les différentes expressions du coefficient de frottement pour les différents régimes d'écoulement. On a tenté aussi dans cette partie de catégoriser et rapporter les différentes gammes de géométries de rugosités utilisées a été présenté par différents chercheurs pour l'amélioration du transfert de chaleur et le coefficient de frottement dans les capteurs solaires à air et de donner une nouvelle approche à d'autres recherches pour des surfaces avec une rugosité à grande échelle.

### I.1. Les différents régimes d'écoulement et le nombre de Reynolds

On distingue trois régimes d'écoulement :

- **Le régime laminaire** : dans lequel l'écoulement est calme et régulier.
- **Le régime turbulent** : dans lequel l'écoulement est une suite de tourbillons et de remous.
- **Le régime de transition** : qui se situe entre les deux précédents et dans lequel l'écoulement est incertain ou instable pouvant être soit laminaire, soit turbulent soit passer d'un régime à l'autre. La nature du régime d'écoulement se détermine par « le nombre de Reynolds ».

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en (1883) par Osborne Reynolds. Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses [1].

On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{V \cdot D_H}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_H}{\mu} \quad (I.1)$$

Avec :

$V$  : Vitesse caractéristique du fluide [ $m/s$ ].

$D_H$  : Diamètre de la conduite (diamètre hydraulique) [ $m$ ].

$\nu$  : Viscosité cinématique du fluide :  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  [ $m^2/s$ ].

$\rho$  : Masse volumique du fluide [ $kg/m^3$ ].

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide [ $Pa \cdot s$ ] = [ $kg/m \cdot s$ ].

- Régime laminaire  $Re < 2000$
- Régime de transition  $2000 < Re < 3000$
- Régime turbulent  $Re > 3000$



Figure (I.1) : Régimes d'écoulement [1].

## I.2. Notion et les différents types des pertes de charge

Les pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement: les actions de cisaillement occasionnent en effet des pertes énergétiques.

Les pertes de charge peuvent être :

- **Pertes de charge systématiques (linéaires ou régulières) :**

Les pertes de charge régulières (chute de pression  $\Delta P = P1 - P2$ ) résultent du frottement exercé entre le fluide et la surface intérieure de la canalisation. Entre deux points séparés par une longueur  $L$ , dans un tuyau de diamètre  $D_H$  apparaît une perte de pression  $\Delta P$ . Exprimée sous les deux formes suivantes :

$$\Delta P = \lambda \frac{\rho V^2}{2} \frac{L}{D_H} \quad \text{Différence de pression (Pa)} \quad (I.2)$$

$$\Delta h = \lambda \frac{V^2}{2g} \quad \text{Perte de charge exprimée en mètre de colonne de fluide (mCF)} \quad (I.3)$$

Avec

$V$  : Vitesse moyenne du fluide.

$\lambda$  : Coefficient de perte de charge linéaire.

- **Pertes de charge singulières :**

Les pertes de charges singulières résultent de la présence de coudes, raccords, branchements, robinets, etc. Tous ces éléments (singularités), installés le long des canalisations, constituent des obstacles qui freinent le passage du fluide et amènent des pertes

de charge. Les pertes de charge singulières sont proportionnelles au carré de la vitesse, elles sont exprimées sous les deux formes suivantes [1] :

$$\Delta P = k \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{Différence de pression (Pa)} \quad (\text{I.4})$$

$$\Delta h = k \frac{V^2}{2g} \quad \text{Perte de charge exprimée en mètre de colonne de fluide (mCF)} \quad (\text{I.5})$$

Où  $k$  est appelé coefficient de perte de charge singulière (sans dimension).

### **I.3. Coefficient de perte de charge pour les différents régimes d'écoulement**

Est un coefficient sans dimension appelé coefficient de perte de charge linéaire dit aussi coefficient de friction. Le calcul des pertes de charge linéaires repose entièrement sur la détermination de ce coefficient. L'expression désigné par Darcy-Weisbach pour les écoulements dans les conduites tel que :

$$f = 2\Delta P \frac{D_H}{L\rho V^2} \quad (\text{I.6})$$

La valeur de  $f$  dépend du régime d'écoulement, dont la formule est aussi valable pour les canaux ouverts que pour les conduites fermés [2].

Il ya plusieurs travaux expérimentaux ceux de Blasius, Prandtl et Nikuradse ont permis d'établir des abaques donnant  $f$  en fonction de nombre de Reynolds et la rugosité relative, qui est exprimée par le rapport entre la rugosité absolue  $\mathcal{E}$  de la conduite et son diamètre hydraulique équivalent  $D_H$ , l'abaque la plus utilisée est celle de Moody [3].

#### **I.3.1. Coefficient de frottement dans le cas d'un régime laminaire**

Dans ce cas on peut montrer que le coefficient de frottement  $f$  est uniquement fonction du nombre de Reynolds, l'état de la surface n'intervient pas et donc  $f$  ne dépend pas de la rugosité relative, ni de la nature de la tuyauterie et est donné pour une section circulaire par l'expression suivante [1] :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{I.7})$$

### I.3.2. Coefficient de frottement dans le cas d'un régime turbulent

#### I.3.2.1. Le cas des conduits lisses

En régime turbulent dans le cas des conduits lisses, plusieurs expressions peuvent être utilisées pour le calcul de coefficient de frottement, tel que [3] :

L'expression de Karman-Prandtl :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log Re \sqrt{f} - 0.8 \quad (\text{I.8})$$

L'expression de Nikuradse :

$$f = \frac{0.221}{Re^{2.237}} + 0.0032 \quad (\text{I.9})$$

L'expression de Blasius valable pour  $Re < 10^5$  :

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (\text{I.10})$$

#### I.3.2.2. Le cas des conduits rugueux

En régime d'écoulement turbulent dans le cas des conduits rugueux, la formule de Colebrook-White (1939) est celle qui est largement adoptée pour le calcul du coefficient de frottement  $f$ . Celui-ci s'exprime par :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\frac{\varepsilon}{D_H}}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (\text{I.11})$$

L'équation implicite est valable pour peu que le nombre de Reynolds soit supérieur à 2300. L'écoulement turbulent est non seulement caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds mais aussi par celle de la rugosité relative  $\varepsilon/D_H$  [3].

Plusieurs travaux de recherches ont été publiés, des relations qui sont plus précises mais plus complexes tel que [2] :

L'équation de Pecornic (1963) :

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{15}{Re} + \frac{\varepsilon}{3.715 D_H} \right) \right]^2} \quad (\text{I.12})$$

L'équation est valable pour  $4 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^8$  et  $\frac{\varepsilon}{D_H} = 0.01$  à  $5 \times 10^{-5}$ , l'erreur maximale est de 6% .

L'équation de Haaland (1983) :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3.7 D_H} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \quad (I.13)$$

L'erreur est environ de 2% par rapport à l'équation de Colebrook.

### I.4. Diagramme de Moody

En se basant sur les observations de Nikuradse et de Colebrook-White ainsi que sur un grand nombre d'expériences réalisées sur des conduites industrielles, Moody (1944) a élaboré un diagramme logarithmique dans lequel est représenté le coefficient de frottement  $f$  en fonction du nombre de Reynolds pour diverses valeurs de la rugosité relative  $\varepsilon/D_H$  [3].

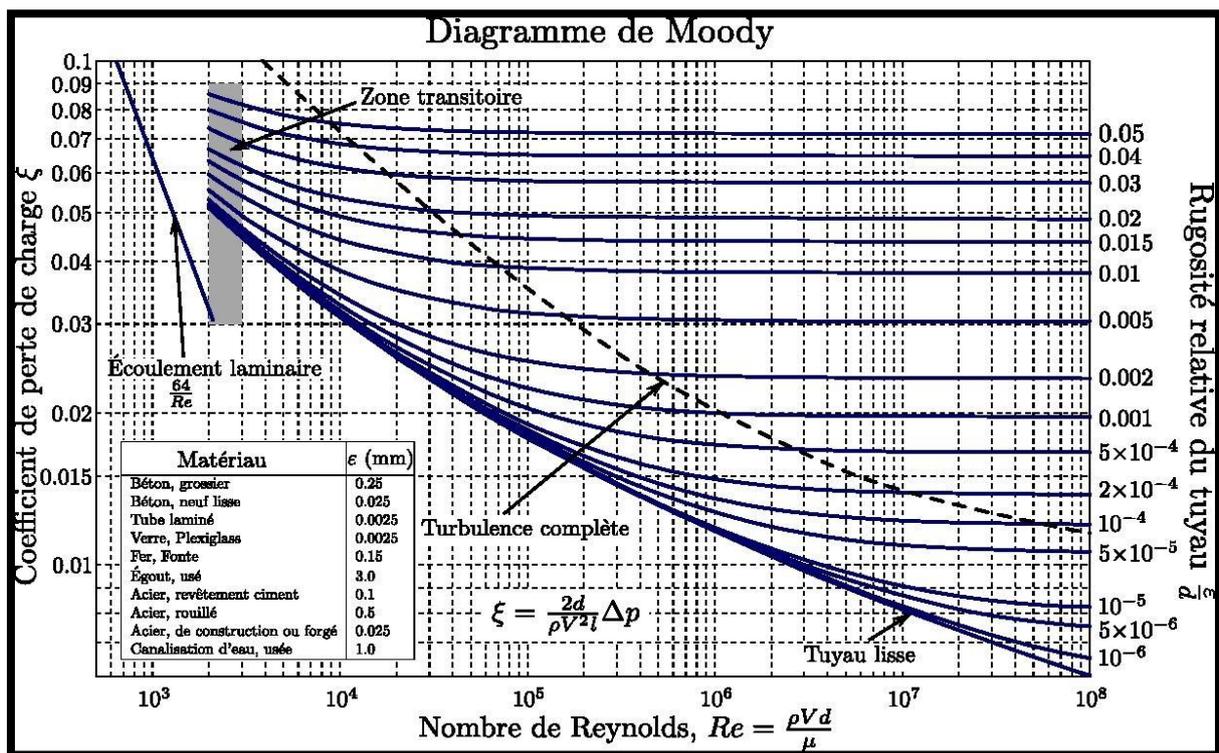


Figure (I.2) : Diagramme de Moody [3].

Dans la zone de transition, le coefficient de frottement est fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative par l'expression suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\frac{\varepsilon}{D_H}}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (\text{I.14})$$

Dans la zone pratiquement lisse, le coefficient de frottement n'est fonction que du nombre de Reynolds tel que :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (\text{I.15})$$

Le coefficient de frottement dans la zone de l'écoulement turbulent rugueux prend une valeur déterminée pour une rugosité relative par l'expression suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\frac{\varepsilon}{D_H}}{3.7} \right] \quad (\text{I.16})$$

## I.5. Coefficient de perte de charge pour les canaux non cylindriques

L'analyse développée et utilisée pour le cas de conduits circulaires est applicable dans ce cas aussi pourvu que la conception d'un diamètre équivalent ou diamètre hydraulique soit utilisé. Le diamètre hydraulique est défini comme :

$$D_H = \frac{4S}{P}$$

Où  $S$  = la section de passage de fluide actuelle et  $P$  = le périmètre sur lequel le cisaillement visqueux agit [2].

### I.5.1. Ecoulement dans les canaux à section rectangulaire

Pour caractériser l'écoulement dans le canal, d'un point de vue dynamique et thermique on utilise classiquement les nombres adimensionnels suivants [4] :

- Le nombre de Reynolds :  $Re = \frac{vD_H}{\nu}$
- Le nombre de Nusselt :  $N_u = h \frac{D_H}{\lambda}$
- Le nombre de Stanton :  $S_t = \frac{N_u}{RePr}$

### I.5.1.1. Canal rectangulaire lisse (sans chicanes)

Généralement les écoulements dans les canaux lisses servent de référence pour toutes les études d'amélioration des échanges convectifs avec des perturbateurs. Le nombre de Nusselt est utilisé pour caractériser les échanges convectifs entre les parois chaudes et les fluides caloporteurs utilisés tel que l'air ou l'eau qui circule dans le canal.

Il est important de souligner que l'amélioration des échanges convectifs par des perturbateurs telle que les chicanes, se manifeste par un accroissement des pertes de charge qui sont dues aux forces de frottement à proximités des parois solides en question. Dans notre présente étude nous nous intéressons uniquement aux effets aérodynamiques des rugosités sur les caractéristiques dynamiques des écoulements [4].

La corrélation la plus répandue pour l'expression du coefficient de frottement à la paroi est celle de Blasius modifiée.

$$f = 0.084Re^{-0.25} \quad (I.17)$$

La corrélation de BHATTI et SHAH et semble mieux se comporter pour les faibles nombres de Reynolds que la corrélation de BLASIUS modifiée, en effet elle coïncide mieux avec les points expérimentaux, son expression est la suivante :

$$f = \left(1.0875 - 0.1125 \frac{H}{W}\right) f_c \quad (I.18)$$

Où  $\frac{H}{W}$  représente le rapport d'aspect du canal,  $f$  est le facteur de frottement pour un canal à section circulaire tel que :

$$\begin{aligned} f_c &= 0.0054 + 2.3 \times 10^{-8} Re^{1.5} && \text{Pour } 2300 \leq Re \leq 4000 \\ f_c &= 1.28 + 0.1143 Re^{1.5} && \text{Pour } 4000 \leq Re \leq 10^7 \end{aligned}$$

La corrélation employée qui est à l'issu des travaux de TANDA est de la forme suivante :

$$f = 0.046Re^{-0.2} \quad (I.19)$$

**I.5.1.2. Canal rectangulaire muni de rugosité artificielle**

Dans les échangeurs de chaleur et les isolateurs solaires plans à air et à eau, différentes configurations des chicanes sont placés sur la paroi chauffée, qui ont pour rôles d'augmenter les échanges convectifs. D'un point de vue industriel, il est important de regarder aussi l'évolution du coefficient de frottement et des pertes de charge qui peuvent être occasionnées par ces chicanes [4].

Il existe plusieurs géométries de rugosité rapportées par les différents chercheurs dans la littérature de la manière suivante :

**I.5.1.2.1. Rugosité en fils métalliques**

Plusieurs chercheurs ont étudié l'amélioration du transfert de chaleur et le coefficient de frottement en fixant des fils métalliques de différentes formes, tailles et orientations comme un élément de rugosité artificielle sur la plaque absorbante.

**I.5.1.2.1.1. Fils transversaux continus**

Prasad et Saini (1988) [5] ont développé des corrélations empiriques pour le coefficient de transfert de chaleur ainsi que le coefficient de frottement, dans le cas d'un écoulement turbulent dans un capteur solaire à air ayant une plaque absorbante garnie de rugosités artificielles de type fils métalliques d'un petit diamètre.

L'étude expérimentale est effectuée en utilisant un pas de rugosité relative ( $P/e$ ) de 10, 15 et 20 et une hauteur de rugosité relative ( $e/D$ ) de 0.020, 0.027 et 0.033 pour des nombres de Reynolds compris dans la plage 5000 et 50000 pour détecter l'effet de hauteur et le pas de rugosité sur le transfert de chaleur et le frottement. La corrélation du coefficient de frottement présenté par Prasad et Saini :

$$f = \frac{2}{\left[0.95\left(\frac{P}{e}\right)^{0.53} + 2.5 \ln\left(\frac{D}{2e}\right) - 3.75\right]^2} \quad (I.20)$$

La valeur maximale du nombre de Nusselt et du facteur de frottement est rapportée à 2.38 et à 4.25 respectivement au pas de 10. Le type et l'orientation de la géométrie de rugosité utilisée sont illustrés dans la figure (I.3).

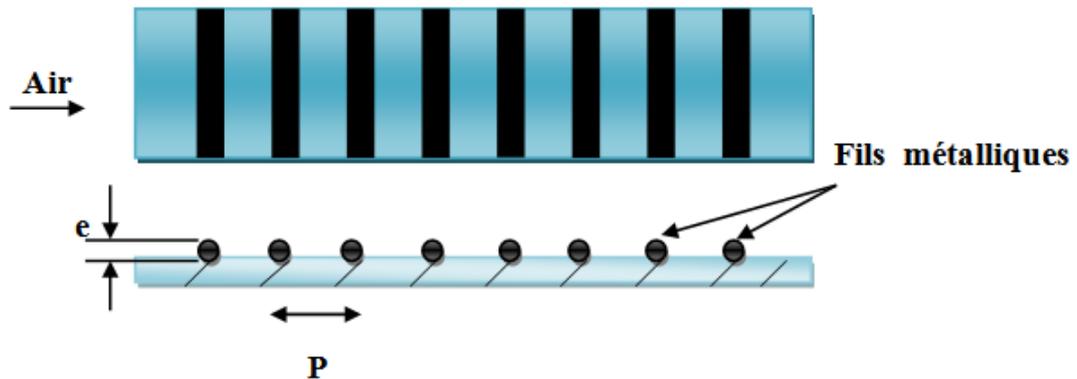


Figure (I.3) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils transversaux contenus [5].

#### I.5.1.2.1.2. Fils transversaux discontinus

Sahu et Bhagoria [6] ont étudié l'effet des rugosités discontinues sur la performance thermique d'un capteur solaire à air figure (I.4). Les rugosités ont une hauteur ( $e$ ) égale à 1.5 mm, un facteur d'aspect ( $W/H$ ) de 8, un pas entre rangées ( $P$ ) variant de 10 à 30 mm. Les expérimentations ont été menées pour les nombres de Reynolds dans la gamme de 3000 à 12000. La présence des rugosités a augmenté le coefficient de transfert thermique de 1.25 à 1.4 fois par rapport à un capteur solaire avec un absorbeur lisse, dans les conditions de fonctionnement semblables. Une efficacité thermique maximale de l'ordre de 83.5 % a été obtenue.

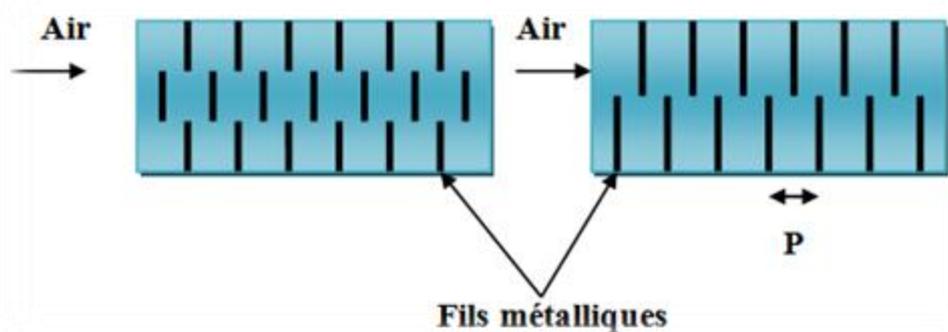


Figure (I.4) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques transversaux discontinus [6].

## I.5.1.2.1.3. Fils inclinés continus

Gupta et al. (1993) [7] ont étudié expérimentalement avec la géométrie de rugosité des fils inclinés continus comme il est représenté sur la figure (I.5). Les paramètres utilisés pour l'étude sont :

$$\begin{cases} \frac{e}{D} = \frac{\varepsilon}{D_H} = 0.020 - 0.053 \\ \frac{P}{e} = \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} = 7.5 \text{ et } 10 \\ \alpha = 30^\circ - 90^\circ \\ Re = 5000 - 30000 \end{cases}$$

Une amélioration du transfert de chaleur et du coefficient de frottement a été obtenue de l'ordre de 1.8 et 2.7 fois, respectivement. Les valeurs maximales du coefficient de frottement et du coefficient de transfert thermique ont été obtenues avec un angle d'attaque égal à  $60^\circ$  et  $70^\circ$  respectivement dans la gamme de paramètres étudiés. Ils ont défini le coefficient de frottement pour ce cas par :

$$f = 0.1911 \left(\frac{e}{D}\right)^{0.196} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.093} \cdot Re^{-0.165} \cdot \exp\left[-0.993 \left(1 - \frac{\alpha}{70}\right)^2\right] \quad (\text{I.21})$$

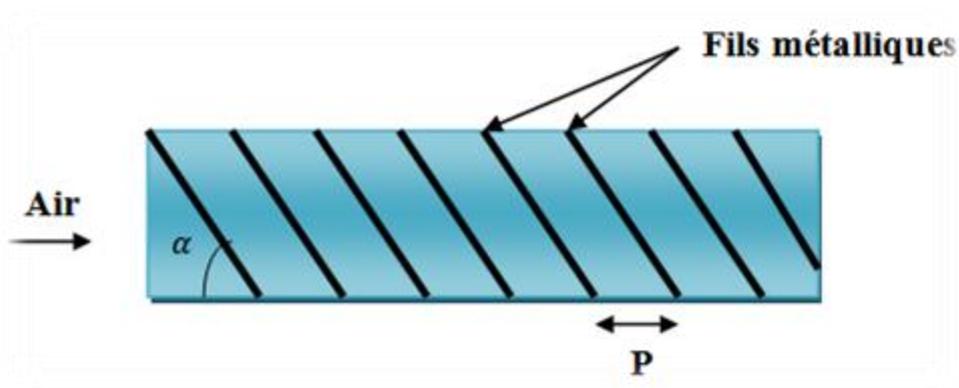


Figure (I.5) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques inclinés continus [7].

## I.5.1.2.1.4. Fils en forme de V continus

Momin et al. (2002) [8] ont étudié la rugosité des fils en forme de V comme il est illustré dans la figure (I.6). Ils ont travaillé sur cette gamme des paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = \frac{\varepsilon}{D_H} = 0.02 - 0.034 \\ \frac{P}{e} = \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} = 10 \\ \alpha = 30^\circ - 90^\circ \\ Re = 2500 - 18000 \end{array} \right.$$

L'expression du coefficient de frottement était donnée par :

$$f = 6.266 Re^{-0.425} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.565} \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.093} \times \exp \left[ -0.719 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60}\right)\right)^2 \right] \quad (I.22)$$

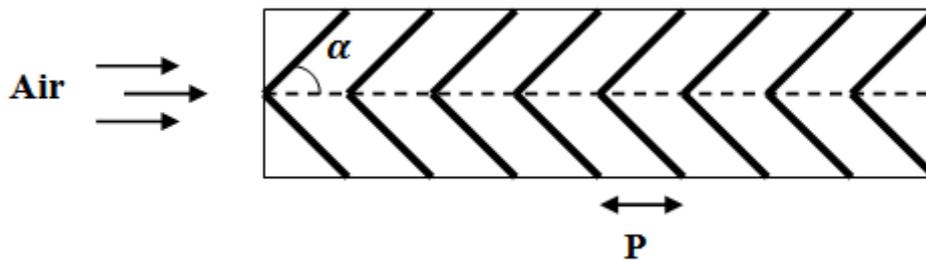


Figure (I.6) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme de V continus [8].

## I.5.1.2.1.5. Fils en forme de V discontinus

Muluwork et al. (1998) [9] ont comparé les performances thermiques du haut et du bas du V discret décalé avec des fils distinctes décalées transversales correspondantes. Le rapport de longueur de rugosité relative a été considéré comme des paramètres géométriques sans dimension de l'élément de rugosité pour comparer trois configurations distinctes. Comme le montre la figure (I.7). Ils ont travaillé sur cette gamme des paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = 0.02 \\ \frac{P}{S} = 3 - 9 \\ \alpha = 60^\circ \\ Re = 2000 - 15500 \end{array} \right.$$

L'expression du coefficient de frottement était donnée par :

$$f = 0.7117Re^{-2.991} \cdot \left(\frac{P}{S}\right)^{0.0636} \tag{I.23}$$

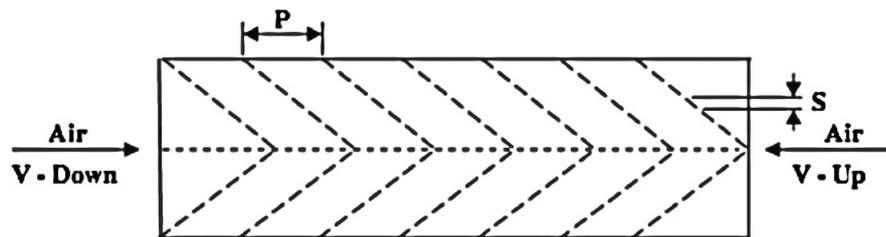


Figure (I.7) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme de V discontinus [9].

#### I.5.1.2.1.6. Canal rectangulaire de petit fils du métal

Karmare and Tikekar [10] ont étudié le coefficient de transfert de chaleur et les caractéristiques du facteur de frottement d'un conduit muni de rugosités artificielles, avec de petits fils de métal comme le montre la figure (I.8). L'étude a été faite sur cette gamme des paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = 0.035, 0.038, 0.044 \\ \frac{P}{e} = 12.5, 15, 17.5, 24, 36 \\ \frac{L}{S} = 1, 1.23, 1.72 \\ Re = 4000 - 17000 \end{array} \right.$$

Le coefficient de frottement pour cette configuration était donné par l'expression suivante :

$$f = 15.55 \times (Re)^{-0.26} \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.91} \times \left(\frac{L}{S}\right)^{-0.27} \times \left(\frac{P}{e}\right)^{-0.51} \tag{I.24}$$

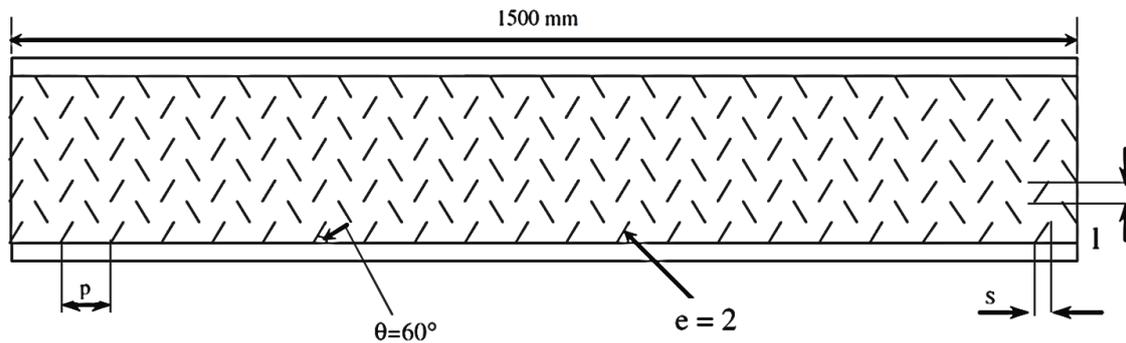


Figure (I.8) : Schéma d'un canal rectangulaire muni de petits fils de métal [10].

#### I.5.1.2.1.7. Canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés

Varun et al. (2008) [11] ont étudié expérimentalement la géométrie de rugosité de la combinaison transversale et inclinée des fils comme le montre la figure (I.9). Les paramètres utilisés pour l'étude étaient la hauteur de rugosité relative ( $e/D$ ) de 0.030, le pas de rugosité relative ( $P/e$ ) de 3 à 8 et le nombre de Reynolds variant de 2000 à 14000. Les meilleures performances ont été obtenues au pas de rugosité relative 8. L'expression du coefficient de frottement est :

$$f = 1.0858 \times Re^{-0.3685} \times \left(\frac{P}{e}\right)^{0.0114} \quad (I.25)$$

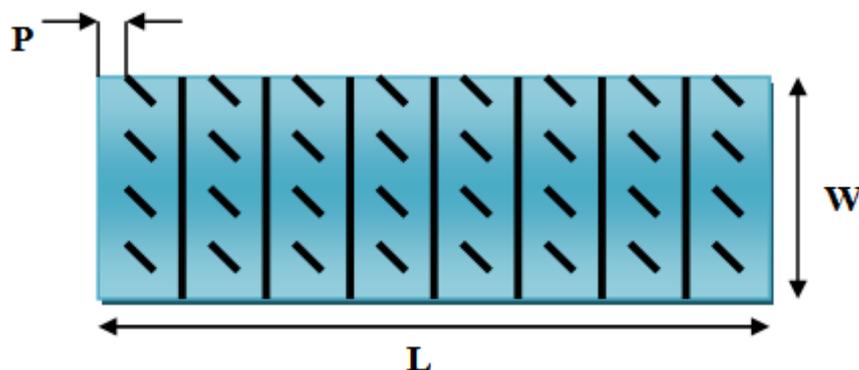


Figure (I.9) : Schéma d'un canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés [11].

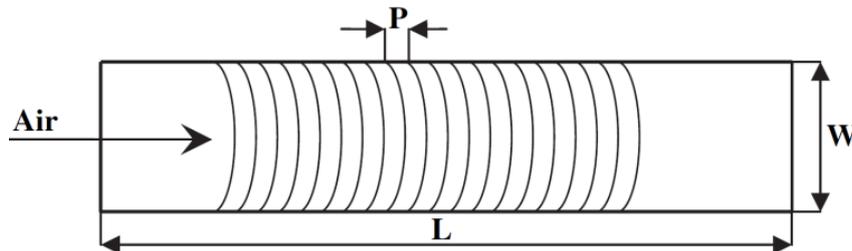
**I.5.1.2.1.8. Canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc**

Saini SK et Saini RP (2008) [12] ont étudié expérimentalement l'effet des fils en forme d'arc sur le coefficient de frottement d'un conduit rectangulaire, comme représenté sur la figure (I.10). L'étude a été faite sur cette gamme des paramètres :

$$\begin{cases} \frac{e}{D} = 0.0213 - 0.0422 \\ \frac{P}{e} = 10 \\ \frac{\alpha}{90} = 0.333 - 0.666 \\ Re = 2000 - 17000 \end{cases}$$

L'augmentation maximale de Nu a été obtenue comme 3.80 fois celle du conduit lisse pour l'angle d'attaque relatif ( $\alpha/90$ ) de 0.333 et la hauteur de rugosité relative ( $e/D$ ) de 0.0422. Cependant, l'augmentation du facteur de frottement correspondant à ces paramètres a été observée 1.75 fois seulement. Le coefficient de frottement pour cette configuration était donné par l'expression suivante :

$$f = 0.14408 \times Re^{-0.17103} \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.1765} \times \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{0.1185} \tag{I.26}$$



**Figure (I.10) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc [12].**

**I.5.1.2.2. Nervures formées par usinage**

Des études expérimentales ont été rapportées dans la littérature pour étudier le transfert de chaleur et le coefficient de frottement en utilisant des nervures usinées et conçues sur la plaque absorbante. Différentes formes, tailles et orientations des nervures ont été étudiées pour concevoir de la rugosité artificielle sur l'absorbeur comme nous le verrons dans les sections suivantes :

I.5.1.2.2.1. Nervures chanfreinées

Karwa et al. [13] ont étudié l'effet des nervures chanfreinées comme une rugosité artificielle, comme représenté sur la figure (I.11). Ces études ont couvert les paramètres suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = 0.014 - 0.0328 \\ \frac{P}{e} = 4.5 - 8.5 \\ \frac{W}{H} = 4.8, 6.1, 7.8, 9.66, 12 \\ \phi = -15^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 18^\circ \\ Re = 3000 - 20000 \end{array} \right.$$

Le facteur de frottement et le nombre de Stanton ont augmenté respectivement jusqu'à 3 et 2 fois. Valeur maximale obtenue à la fois pour le nombre de Stanton et le facteur de frottement à un angle de 15°. Leurs expressions de coefficient de frottement sont :

$$f = 1.66e^{-0.0078\phi} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.4} \left(\frac{P}{e}\right)^{2.695} \times \exp \left[ -0.762 \left\{ \ln \left(\frac{P}{e}\right) \right\}^2 \right] (e^+)^{-0.075} \quad (I.27)$$

Pour  $7 \leq e^+ \leq 2$

$$f = 1.325e^{-0.0078\phi} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.4} \left(\frac{P}{e}\right)^{2.695} \times \exp \left[ -0.762 \left\{ \ln \left(\frac{P}{e}\right) \right\}^2 \right] (e^+)^{-0.075} \quad (I.28)$$

Pour  $20 \leq e^+ \leq 60$

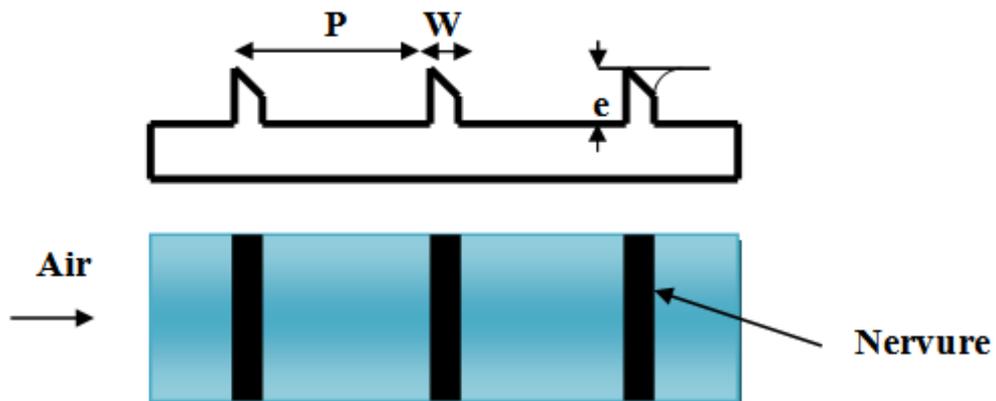


Figure (I.11) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des nervures chanfreinées [13].

I.5.1.2.2.2. Nervures en forme de cales

Bhagoria et al. [11] ont étudié expérimentalement une géométrie de rugosité en forme de cale transversale comme le montre la figure (I.12). L'étude a été faite sur cette gamme des paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = 0.015 - 0.033 \\ \frac{P}{e} = 60.17\phi^{-1.0264} \\ et \frac{P}{e} < 12.12 \\ \phi = 8^\circ - 15^\circ \\ Re = 3000 - 18000 \end{array} \right.$$

L'amélioration maximale de la valeur du facteur de frottement et du nombre de Nusselt était de 5.3 et 2.4 par rapport à la plaque lisse dans des conditions similaires. La valeur maximale du transfert de chaleur s'est produite à un pas de rugosité relative (P/e) de 7.57, à un angle de cale de 10 °. L'expression du coefficient de frottement est :

$$f = 12.44Re^{-0.18} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.99} \left(\frac{P}{e}\right)^{-0.52} \left(\frac{\phi}{10}\right)^{0.49} \tag{I.29}$$

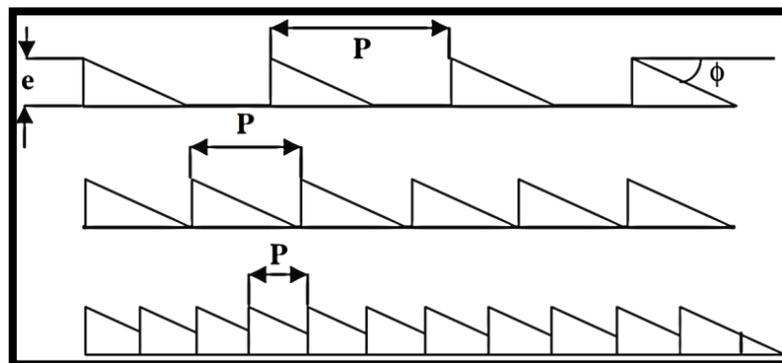


Figure (I.12) : Schéma des nervures en forme de cales (dent de scie) [11].

## I.5.1.2.2.3. Nervures combinées avec d'autres formes de rugosités

Jaurker et al. (2006) [14] ont étudié expérimentalement l'effet sur le transfert de chaleur et le facteur de frottement ou les caractéristiques d'écoulement de fluide du pas de rugosité relative ( $P/e$ ), hauteur de rugosité relative ( $e/D$ ) et position relative de la rainure par fournissant une rugosité artificielle rainurée sur la plaque absorbante dans un conduit rectangulaire comme le montre la figure (I.13). Les paramètres géométriques considérés dans cette étude expérimentale sont les suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = 0.0181 - 0.0363 \\ \frac{P}{e} = 4.5 - 10 \\ \frac{g}{P} = 0.3 - 0.7 \\ Re = 3000 - 21000 \end{array} \right.$$

L'expression du coefficient de frottement est :

$$f = 0.001227 Re^{-0.199} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.585} \left(\frac{P}{e}\right)^{7.19} \times \exp \left[ -1.854 \left\{ \ln \left(\frac{P}{e}\right) \right\}^2 \right] \left(\frac{g}{P}\right)^{0.645} \times \exp \left[ 1.513 \left\{ \ln \left(\frac{g}{P}\right) \right\}^2 + 0.8662 \left\{ \ln \left(\frac{g}{P}\right) \right\}^3 \right] \quad (I.30)$$

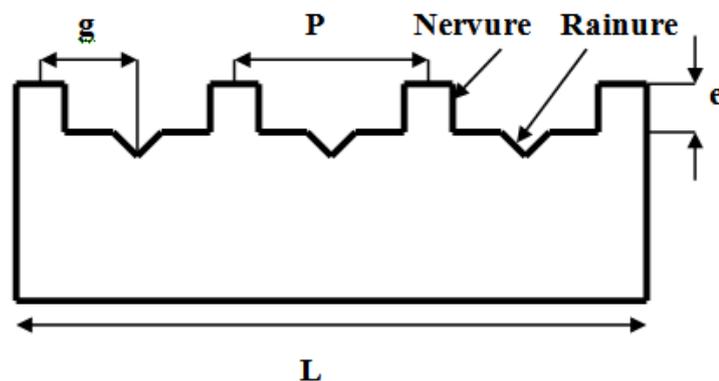


Figure (I.13) : Combinaison des nervures et rainures transversales [14].

## I.5.1.2.3. Grillage ou grille métallique étendue

Saini RP Saini JS [15] ont étudié expérimentalement les caractéristiques de transfert de chaleur et de frottement pour l'écoulement à l'intérieur d'un grand rapport d'aspect, sous la forme de grillage métallique déployée comme le montre la figure (I.14). L'étude a été faite sur cette gamme des paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = \frac{\varepsilon}{D_H} = 0.012 - 0.039 \\ \frac{S}{e} = 15.62 - 46.87 \\ \frac{L}{e} = 25.00 - 71.87 \\ Re = 1900 - 13000 \end{array} \right.$$

Ils ont trouvé l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur et du facteur de frottement de l'ordre 4 et 5 fois sur un conduit lisse correspondant à l'angle d'attaque de  $61.9^\circ$  et  $72^\circ$  respectivement. L'expression du coefficient de frottement est :

$$f = 0.815 Re^{-0.63} \left(\frac{L}{e}\right)^{0.266} \left(\frac{S}{10e}\right)^{-0.19} \left(\frac{10e}{D}\right)^{0.591} \quad (\text{I.31})$$

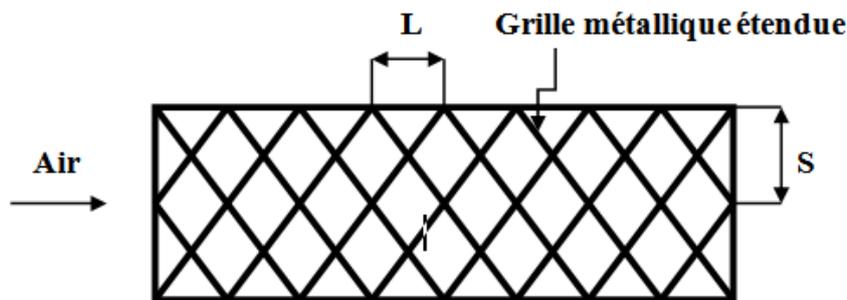


Figure (I.14) : Schéma d'un canal rectangulaire de type grille métallique étendue [15].

I.5.1.2.4. Bosses (alvéoles)

Saini et Verma [16] ont réalisé une étude expérimentale pour déterminer l'écoulement de l'air et les caractéristiques du transfert de chaleur dans un conduit, d'un collecteur solaire à air ayant une rugosité artificielle en forme de bosse, la géométrie étudiée est comme indiqué sur la figure (I.15). L'étude est caractérisé par :

$$\begin{cases} P = P_{e-ch} = 12,15,18 \text{ mm} \\ e = \varepsilon = 0,8,1,3,1,5,1,7 \text{ mm} \\ Re = 2000 - 12000 \end{cases}$$

Le transfert de chaleur maximum se produit à une hauteur de rugosité relative de 0.0379 et un degré de rugosité relative de 10. Le facteur de frottement est égal à une hauteur de rugosité relative de 0.0289 et un degré de rugosité relative de 10. L'expression du coefficient de frottement est :

$$f = 0.642Re^{-0.423} \left(\frac{P}{e}\right)^{-0.465} \left[ \exp\left\{-(0.054) \times \log\left(\frac{P}{e}\right)^2\right\} \times \left(\frac{e}{D}\right)^{-0.0214} \left[ \exp\left\{-(0.840) \times \log\left(\frac{e}{D}\right)^2\right\} \right] \right] \quad (I.32)$$

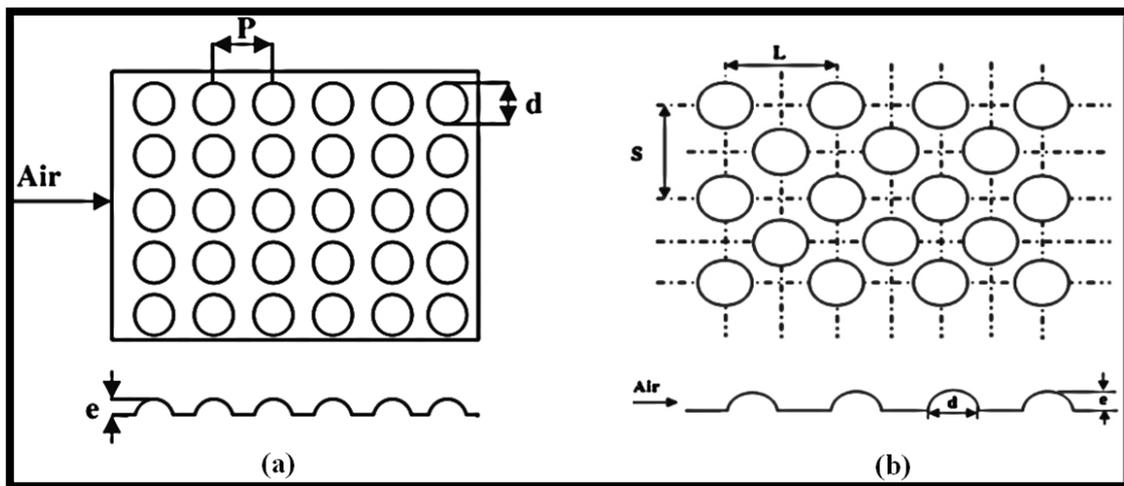
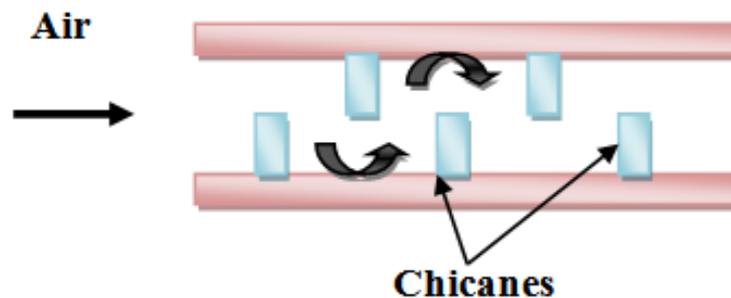


Figure (I.15) : Canal rectangulaire avec rugosités types bosses (alvéoles) [16].

**I.5.1.2.5. Ailettes et chicanes**

Yeh et Chou [17] ont étudié expérimentalement les performances d'un capteur solaire à air muni d'ailettes tel que le montre la figure (I.16). Ils ont amélioré considérablement l'efficacité du capteur solaire à air par la création de la turbulence de l'air et des zones de transfert de chaleur prolongées en utilisant des ailettes et des chicanes.



**Figure (I.16) : Rugosités type chicanes [17].**

Sripattanapipat et Promvongse [18] ont également analysé numériquement l'écoulement laminaire et le transfert de chaleur autour des ailettes en forme de diamant placées en disposition quinconce dans un canal horizontal avec des parois isothermes figure (I.17).

Ils ont constaté une augmentation de l'ordre de 200 à 680 % des performances dans le cas d'un canal équipé de deux ailettes en forme de diamant transversales en quinconce. Mais cette augmentation a été suivie par des pertes de charge de 20 à 220 fois par rapport à un canal lisse. Ils ont étudié aussi l'effet de l'interaction des tourbillons provoqués par deux types d'ailettes, où ils ont trouvé une amélioration du transfert de chaleur de l'ordre de 6% pour la forme de diamant ( $5^\circ$ ) en comparaison à une ailette de forme plate.

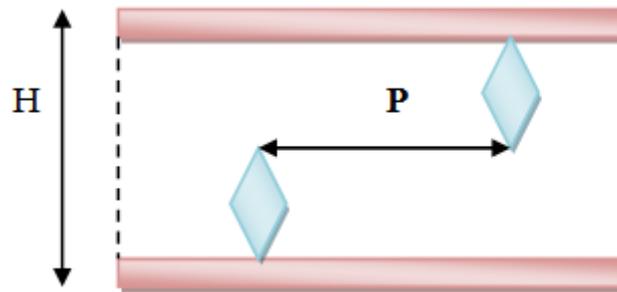


Figure (I.17) : Rugosités type ailette en forme de diamant [18].

Youcef-Ali et al. [19] ont élaboré une étude expérimentale en utilisant des collecteurs solaires munis d'ailettes de formes rectangulaires, qui sont utilisés dans les échangeurs de chaleur comme représenté sur la figure (I.18). Les ailettes à plaque rectangulaire montées en quinconces, sont orientées parallèlement à l'écoulement du fluide et se sont soudées à la partie inférieure de la plaque de l'absorbeur dont l'objectif principal est d'augmenter la surface d'échange totale afin d'améliorer les performances thermiques.

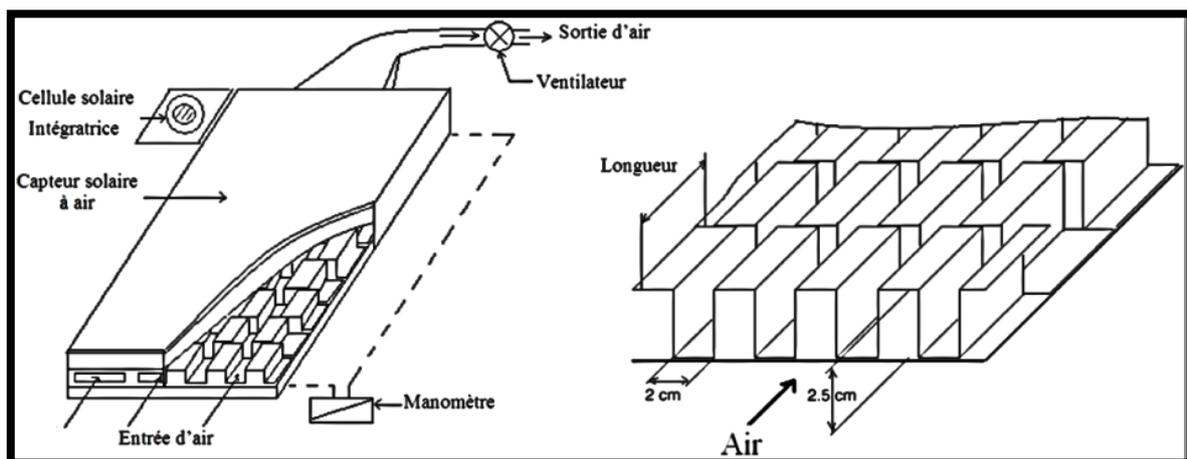
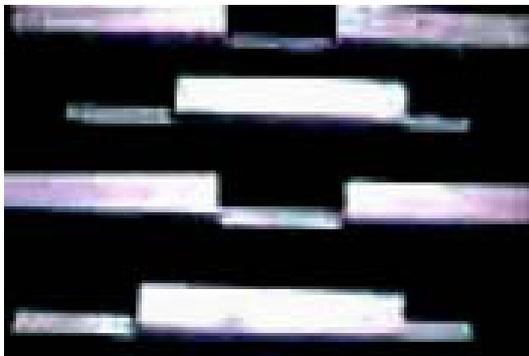


Figure (I.18) : Plaque d'absorbeur munie des ailettes rectangulaires [19].

Chouchane et al. [4] ont établi des modèles empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des rugosités artificielles de formes diverses, dites chicanes et à différents modes de dispositions de celles-ci dans le conduit utile d'un canal rectangulaire figure (I.19). 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 résultats obtenus, montrent que la chute de pression entre l'amont et l'aval du conduit est 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.



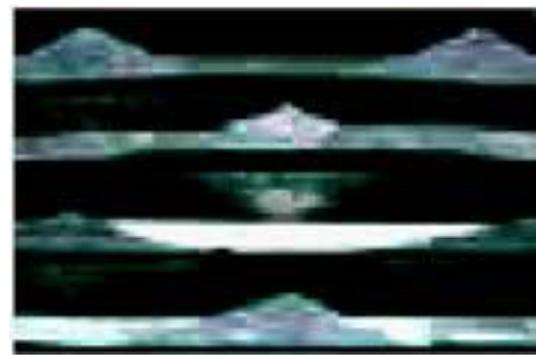
a- Chicane rectangulaire



b- Chicane rectangulo-trapézoïdale



c- Chicane rectangulo-triangulaire



d- Chicane triangulaire

**Figure (I.19) : Configuration des chicanes étudiées [4].**

Les différentes corrélations de coefficient de frottement pour les configurations des chicanes étudiées par (chouchane et al). Nous résumons dans les tableaux suivants :



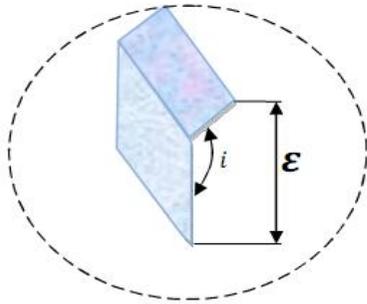
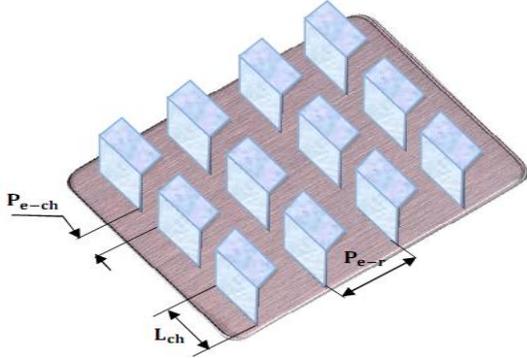
	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
Régime laminaire		$\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}$ $i = 30^\circ, 150^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ $P_{e-ch} = 3,5, 7, 10 \text{ cm}$ $P_{e-r} = 5, 10, 14, 18, 25 \text{ cm}$ $L_{ch} = 5, 7, 10 \text{ cm}$	$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0,2928} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0,7984} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2,2582} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-1,3196} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0,264} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0,2928} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0,7984} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2,2582} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-1,3196} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0,264} \right]$
Régime turbulent		$\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}$ $i = 30^\circ, 150^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ $P_{e-ch} = 3,5, 7, 10 \text{ cm}$ $P_{e-r} = 5, 10, 14, 18, 25 \text{ cm}$ $L_{ch} = 5, 7, 10 \text{ cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0,2985} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,7452} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0,0299} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,3975} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0,3246} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0,2985} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,7452} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0,0299} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,3975} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0,3246} \right]$

Tableau (I.1) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en rangées [4].

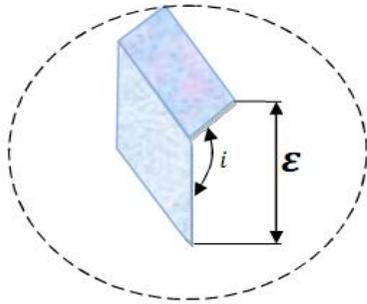
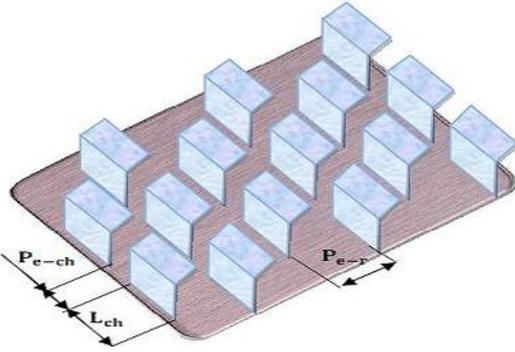
	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
Régime laminaire		$\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}$ $i = 30^\circ, 150^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ $P_{e-ch} = 3,5, 7, 10 \text{ cm}$ $P_{e-r} = 5, 10, 14, 18, 25 \text{ cm}$ $L_{ch} = 5, 7, 10 \text{ cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.2697} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-3.8416} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{3.2451} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3260} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-3.33346} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.2697} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-3.8416} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{3.2451} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3260} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-3.33346} \right]$
Régime turbulent		$\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}$ $i = 30^\circ, 150^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ $P_{e-ch} = 3,5, 7, 10 \text{ cm}$ $P_{e-r} = 5, 10, 14, 18, 25 \text{ cm}$ $L_{ch} = 5, 7, 10 \text{ cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.4150} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-1.2540} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.2820} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1972} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0.0415} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0.4150} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-1.2540} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.2820} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1972} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0.0415} \right]$

Tableau (I.2) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en quinconce [4].

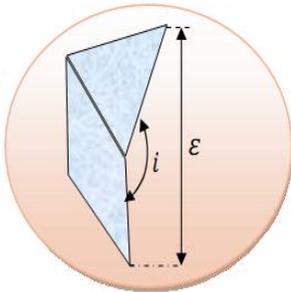
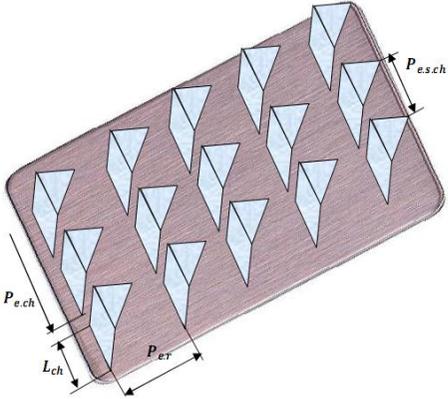
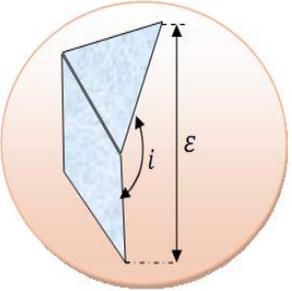
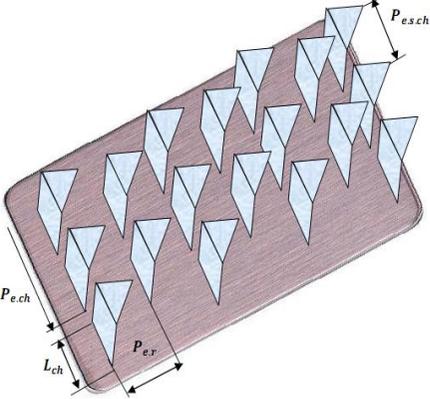
	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
Régime laminaire		$\varepsilon = 1,75, 2,29\text{cm}$ $i = 30^\circ, 60^\circ$ $P_{e-ch} = 5,10\text{cm}$ $P_{e-r} = 5,10, 18, 25\text{cm}$ $L_{ch} = 5,10\text{cm}$ $P_{e-s-ch} = 10,15\text{cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.1972} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7207} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-6.7089} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3428} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-6.3749} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{11.2249} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.1972} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7207} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-6.7089} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3428} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-6.3749} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{11.2249} \right]$
Régime turbulent		$\varepsilon = 1,75, 2,29\text{cm}$ $i = 30^\circ, 60^\circ$ $P_{e-ch} = 5,10\text{cm}$ $P_{e-r} = 5,10, 18, 25\text{cm}$ $L_{ch} = 5,10\text{cm}$ $P_{e-s-ch} = 10,15\text{cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.2060} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0043} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-7.1129} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0949} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-7.2345} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{12.3519} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.2060} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0043} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-7.1129} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0949} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-7.2345} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{12.3519} \right]$

Tableau (I.3) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaires disposées en rangées [4].

	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
<p><b>Régime laminaire</b></p>		<p><math>\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}</math>  <math>i = 30^\circ, 60^\circ</math>  <math>P_{e-ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-r} = 5,10, 18,25 \text{ cm}</math>  <math>L_{ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-s-ch} = 10,15 \text{ cm}</math></p>	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.6915} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.6319} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-9.6765} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1881} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-9.2643} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{16.4783} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.6915} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.6319} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-9.6765} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1881} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-9.2643} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{16.4783} \right]$
<p><b>Régime turbulent</b></p>		<p><math>\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}</math>  <math>i = 30^\circ, 60^\circ</math>  <math>P_{e-ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-r} = 5,10, 18,25 \text{ cm}</math>  <math>L_{ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-s-ch} = 10,15 \text{ cm}</math></p>	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.3921} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.0244} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-8.7666} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.0805} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-8.8184} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{15.0836} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.3921} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.0244} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-8.7666} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.0805} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-8.8184} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{15.0836} \right]$

**Tableau (I.4) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaires disposées en quinconce [4].**

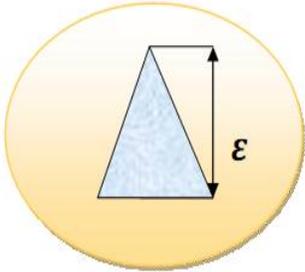
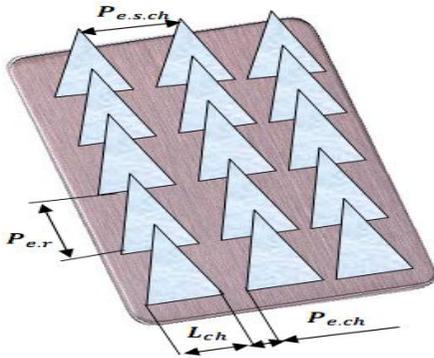
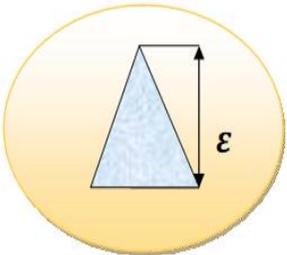
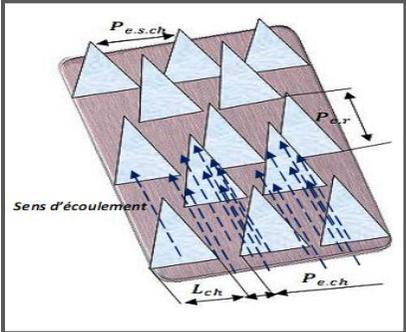
	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
Régime laminaire		$\varepsilon = 2.5cm$ $i = 180^\circ$ $P_{e-ch} = 0,5,10cm$ $P_{e-r} = 5,10,18,25cm$ $L_{ch} = 5,10cm$ $P_{e-s-ch} = 5,10,15cm$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.1467} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-5.5799} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-2.9986} \right] \cdot V^2$ $\times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3370} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{4.9329} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.2758} \right]$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.1467} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-5.5799} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-2.9986} \right]$ $\times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3370} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{4.9329} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.2758} \right]$
Régime turbulent		$\varepsilon = 2.5cm$ $i = 180^\circ$ $P_{e-ch} = 0,5,10cm$ $P_{e-r} = 5,10,18,25cm$ $L_{ch} = 5,10cm$ $P_{e-s-ch} = 5,10,15cm$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.2378} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0496} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-1.4725} \right] \cdot V^2$ $\times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1446} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0.3576} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.3689} \right]$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0.2378} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0496} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-1.4725} \right]$ $\times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1446} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0.3576} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.3689} \right]$

Tableau (I.5) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en rangées [4].

	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
<p><b>Régime laminaire</b></p>		<p> <math>\varepsilon = 2.5\text{cm}</math>  <math>i = 180^\circ</math>  <math>P_{e-ch} = 5,10\text{cm}</math>  <math>P_{e-r} = 5,10,18,25\text{cm}</math>  <math>L_{ch} = 5,10\text{cm}</math>  <math>P_{e-s-ch} = 10,15\text{cm}</math> </p>	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-1.9598} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.89259} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{8.6893} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.58804} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{7.4395} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.30883} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-1.9598} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.89259} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{8.6893} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.58804} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{7.4395} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.30883} \right]$
<p><b>Régime turbulent</b></p>		<p> <math>\varepsilon = 2.5\text{cm}</math>  <math>i = 180^\circ</math>  <math>P_{e-ch} = 5,10\text{cm}</math>  <math>P_{e-r} = 5,10,18,25\text{cm}</math>  <math>L_{ch} = 5,10\text{cm}</math>  <math>P_{e-s-ch} = 10,15\text{cm}</math> </p>	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.90603} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.56980} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2.89080} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.24040} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{2.58700} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.002617} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0.90603} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.56980} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2.89080} \right] \times \left[ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.24040} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{2.58700} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.002617} \right]$

**Tableau (I.6) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en quinconce [4].**

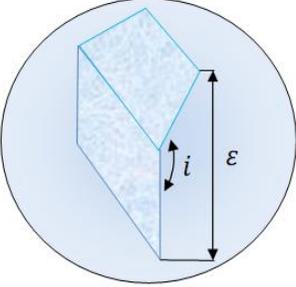
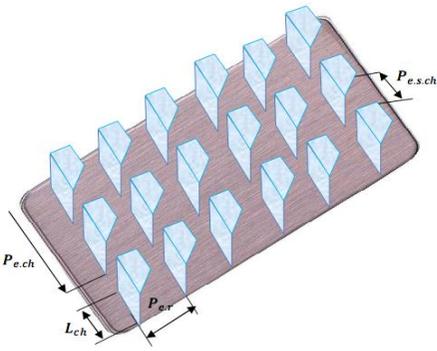
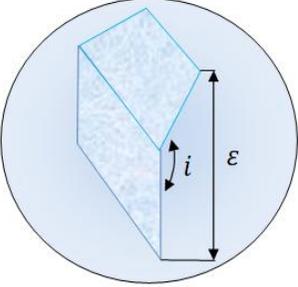
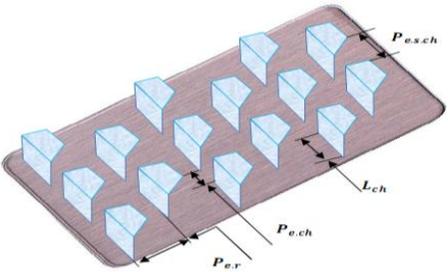
	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
Régime laminaire		$\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}$ $i = 30^\circ, 60^\circ$ $P_{e-ch} = 5,10 \text{ cm}$ $P_{e-r} = 5,10, 18,25 \text{ cm}$ $L_{ch} = 5,10 \text{ cm}$ $P_{e-s-ch} = 8,10, 15 \text{ cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0,9494} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,4095} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-4,7993} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,3016} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2,7847} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{8,4554} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0,9494} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,4095} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-4,7993} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,3016} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2,7847} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{8,4554} \right]$
Régime turbulent		$\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}$ $i = 30^\circ, 60^\circ$ $P_{e-ch} = 5,10 \text{ cm}$ $P_{e-r} = 5,10, 18,25 \text{ cm}$ $L_{ch} = 5,10 \text{ cm}$ $P_{e-s-ch} = 8,10, 15 \text{ cm}$	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0,7902} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,4748} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-4,0636} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,0787} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2,5227} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{7,3355} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0,7902} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,4748} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-4,0636} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,0787} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2,5227} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{7,3355} \right]$

Tableau (I.7) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en rangées [4].

	Configuration	Gamme des paramètres	Coefficient de frottement
<p><b>Régime laminaire</b></p>		<p> <math>\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}</math>  <math>i = 30^\circ, 60^\circ</math>  <math>P_{e-ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-r} = 5,10, 18,25 \text{ cm}</math>  <math>L_{ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-s-ch} = 8,10, 15 \text{ cm}</math> </p>	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0,0048} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0,6724} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0,4630} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,7872} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-1,0012} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0,2933} \right] V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0,0048} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0,6724} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0,4630} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,7872} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-1,0012} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0,2933} \right]$
<p><b>Régime turbulent</b></p>		<p> <math>\varepsilon = 1,75, 2,29 \text{ cm}</math>  <math>i = 30^\circ, 60^\circ</math>  <math>P_{e-ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-r} = 5,10, 18,25 \text{ cm}</math>  <math>L_{ch} = 5,10 \text{ cm}</math>  <math>P_{e-s-ch} = 8,10, 15 \text{ cm}</math> </p>	$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0,2819} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,3563} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0,5277} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,1789} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0,0295} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0,6415} \right] \cdot V^2$ $\lambda = \left[ (Re)^{-0,2819} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0,3563} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0,5277} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0,1789} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0,0295} \cdot \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0,6415} \right]$

**Tableau (I.8) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en quinconce [4].**



### Conclusion

À travers cette étude bibliographique, il ressort que la rugosité artificielle continue de susciter un intérêt tout aussi important sur le plan fondamental et appliqué du domaine de la transformation de l'énergie solaire vers l'énergie thermique. L'un des résultats essentiels de cette étude reste l'amélioration des performances thermiques et le coefficient de perte de charge des capteurs solaires à air, qui repose sur plusieurs techniques. Parmi elles on cite, le choix judicieux des formes adéquates ainsi que les paramètres de conception.

**Introduction**

Dans ce chapitre qui concerne L'étude expérimentale, on présentera en premier lieu la description du dispositif expérimental et les différents instruments de mesure utilisés pour prélèvement des pertes de charge, et représentation graphique des pertes de charge en fonction du débit pour les différentes configurations et les paramètres géométriques des nervures et rainures.

**II.1. Description du dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental est réalisé au département de génie mécanique de l'université Mohamed khider de Biskra. Il s'agit d'une conduite de forme rectangulaire en bois de 1.5 m de longueur, 0.5 m de largeur et d'une hauteur égale à 0.05 m.

La rugosité artificielle se représente sous forme des nervures et rainures en bois, a l'intérieur de la conduite les nervures et rainures sont disposés en trois principales configurations : la disposition en rangée, en forme inclinée et en forme de V.

L'écoulement de l'air est assuré par un aspirateur et les pertes de charge seront mesurées à l'aide d'un capteur différentiel de pression. Le principe de cette étude expérimentale consiste à effectuer des prises de mesure des pertes de charge entre l'amant et l'aval du conduite en fonction de différentes valeur de débit volumique de l'air, et ceci pour diverses mode de disposition et configuration des nervures et rainures considérées.



**Figure (II.1) : Dispositif expérimental.**

**Les différents éléments associés au canal :**

- 1- Aspirateur : pour le pompage de l'air. Figure (II.2).
- 2- Variateur de vitesse : pour varier la vitesse d'écoulement de l'air. Figure (II.3).
- 3- Capteur différentiel de pression : pour la mesure de la perte de charge. Figure (II.4).
- 4- Anémomètre à hélice : pour la mesure de la vitesse de l'air. Figure (II.5).
- 5- Nervures et rainures en bois : représentent la rugosité artificielle implantée sur le plan d'écoulement du canal. Figure (II.6).



**Figure (II.2) : Aspirateur.**



**Figure (II.3) : Variateur de vitesse.**



**Figure (II.4) : Capteur différentiel de pression.**

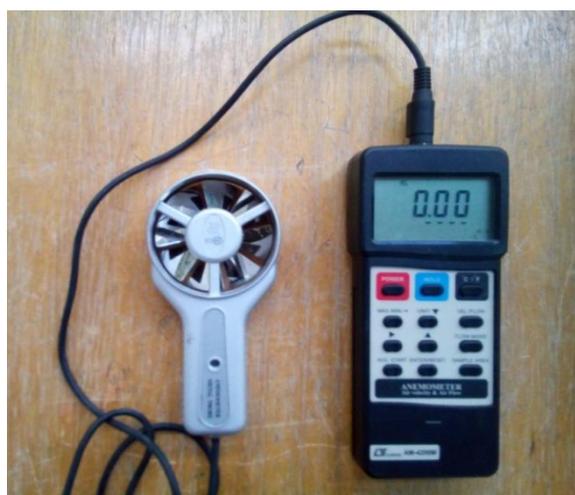


Figure (II.5) : Anémomètre à hélice.



Figure(II.6) : Nervures et rainures en bois.

## II.2. Types des configurations des nervures et rainures étudiées

### II.2.1. Nervures et rainures disposées en rangées

Nous avons étudié 9 cas de configuration des nervures et rainures. Ces nervures et rainures sont fixées sur le plan découlement disposées en rangées, voir figure (II.7).



**Figure (II.7) : Nervures et rainures disposées en rangées.**

On considère les cas suivants :

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 5\text{cm}, P_{e-n} = 10\text{cm})$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 10\text{cm}, P_{e-n} = 15\text{cm})$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 17\text{cm}, P_{e-n} = 22\text{cm})$$

$$(E_n = 3\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 17\text{cm}, P_{e-n} = 22\text{cm})$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 17\text{cm}, P_{e-n} = 22\text{cm})$$

$$(E_n = 1\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 17\text{cm}, P_{e-n} = 22\text{cm})$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2.5\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 10\text{cm}, P_{e-n} = 15\text{cm})$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 10\text{cm}, P_{e-n} = 15\text{cm})$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 1.5\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 10\text{cm}, P_{e-n} = 15\text{cm})$$

## II.2.1.1. Tableaux des mesures des pertes de charge enregistrées

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0123	3.74	0.492
2	0.0181	5.47	0.724
3	0.0227	6.89	0.908
4	0.0264	7.99	1.056
5	0.0296	8.98	1.184
6	0.0319	9.67	1.276
7	0.0339	10.27	1.356
8	0.0354	10.74	1.416

Tableau (II.1) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal sans nervures et rainures.

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0064	1.94	1.28
3	0.0095	2.89	1.9
5	0.0115	3.47	2.3
6	0.0125	3.8	2.5
8	0.0143	4.32	2.86
10	0.0163	4.94	3.26
12	0.0179	5.42	3.58
14	0.0194	5.88	3.88
17	0.0213	6.46	4.26
19	0.0224	6.8	4.48
23	0.0247	7.48	4.94
28	0.0267	8.09	5.34

Tableau (II.2) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 5cm, P_{e-n} = 10cm)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.008	2.41	1.6
3	0.0104	3.15	2.08
5	0.0125	3.79	2.5
7	0.0148	4.49	2.96
9	0.0168	5.08	3.36
12	0.0189	5.73	3.78
14	0.0206	6.23	4.12
17	0.023	6.97	4.6
19	0.0246	7.46	4.92
22	0.0264	7.99	5.28
25	0.0278	8.42	5.56
28	0.0295	8.95	5.9

**Tableau (II.3) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 10cm, P_{e-n} = 15cm)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0059	1.79	1.18
2	0.0097	2.93	1.94
3	0.012	3.65	2.4
5	0.0149	4.5	2.98
7	0.0179	5.41	3.58
10	0.0207	6.27	4.14
14	0.0243	7.35	4.86
17	0.0268	8.11	5.36
19	0.0282	8.55	5.64
22	0.0305	9.23	6.1
25	0.033	10.01	6.6
28	0.0351	10.65	7.02

**Tableau (II.4) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 17cm, P_{e-n} = 22cm)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0046	1.39	0.92
2	0.0079	2.39	1.58
3	0.0099	2.99	1.98
5	0.0135	4.1	2.7
7	0.0165	5.01	3.3
10	0.0189	5.72	3.78
14	0.0229	6.95	4.58
17	0.0254	7.71	5.08
19	0.0269	8.15	5.38
22	0.0291	8.83	5.82
25	0.0313	9.49	6.26
28	0.0333	10.09	6.66

**Tableau (II.5) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 3cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 17cm, P_{e-n} = 22cm)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0074	2.23	1.48
2	0.0113	3.43	2.26
3	0.0135	4.09	2.7
5	0.0167	5.06	3.34
7	0.0197	5.98	3.94
10	0.0228	6.92	4.56
13	0.0256	7.76	5.12
15	0.0271	8.21	5.42
19	0.0302	9.14	6.04
22	0.0319	9.67	6.38
25	0.0347	10.53	6.94
28	0.0371	11.23	7.42

**Tableau (II.6) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 1cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 17cm, P_{e-n} = 22cm)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0071	2.16	2.84
3	0.0096	2.9	3.84
5	0.0117	3.54	4.68
7	0.0137	4.15	5.48
9	0.0157	4.75	6.28
12	0.0181	5.48	7.24
14	0.0197	5.98	7.88
17	0.0222	6.72	8.88
19	0.0235	7.13	9.4
22	0.0255	7.74	10.2
25	0.027	8.17	10.8
28	0.0287	8.7	11.48

**Tableau (II.7) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par:**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2.5cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 10cm, P_{e-n} = 15cm)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0088	2.66	1.17
2	0.0104	3.15	1.39
4	0.0125	3.78	1.67
6	0.015	4.55	2
7	0.016	4.86	2.13
10	0.0186	5.63	2.48
12	0.0203	6.14	2.71
15	0.0228	6.91	3.04
19	0.0254	7.71	3.39
22	0.0272	8.24	3.63
26	0.0294	8.91	3.92
28	0.0306	9.27	4.08

**Tableau (II.8) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par:**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 1.5cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 10cm, P_{e-n} = 15cm)$$

## II.2.1.2. Représentation graphiques des pertes de charge en fonction du débit

Il s'agit de montrer graphiquement l'évolution des pertes de charge en fonction du débit pour la première configuration (disposition des nervures et rainures en rangées) voir figure ci après :

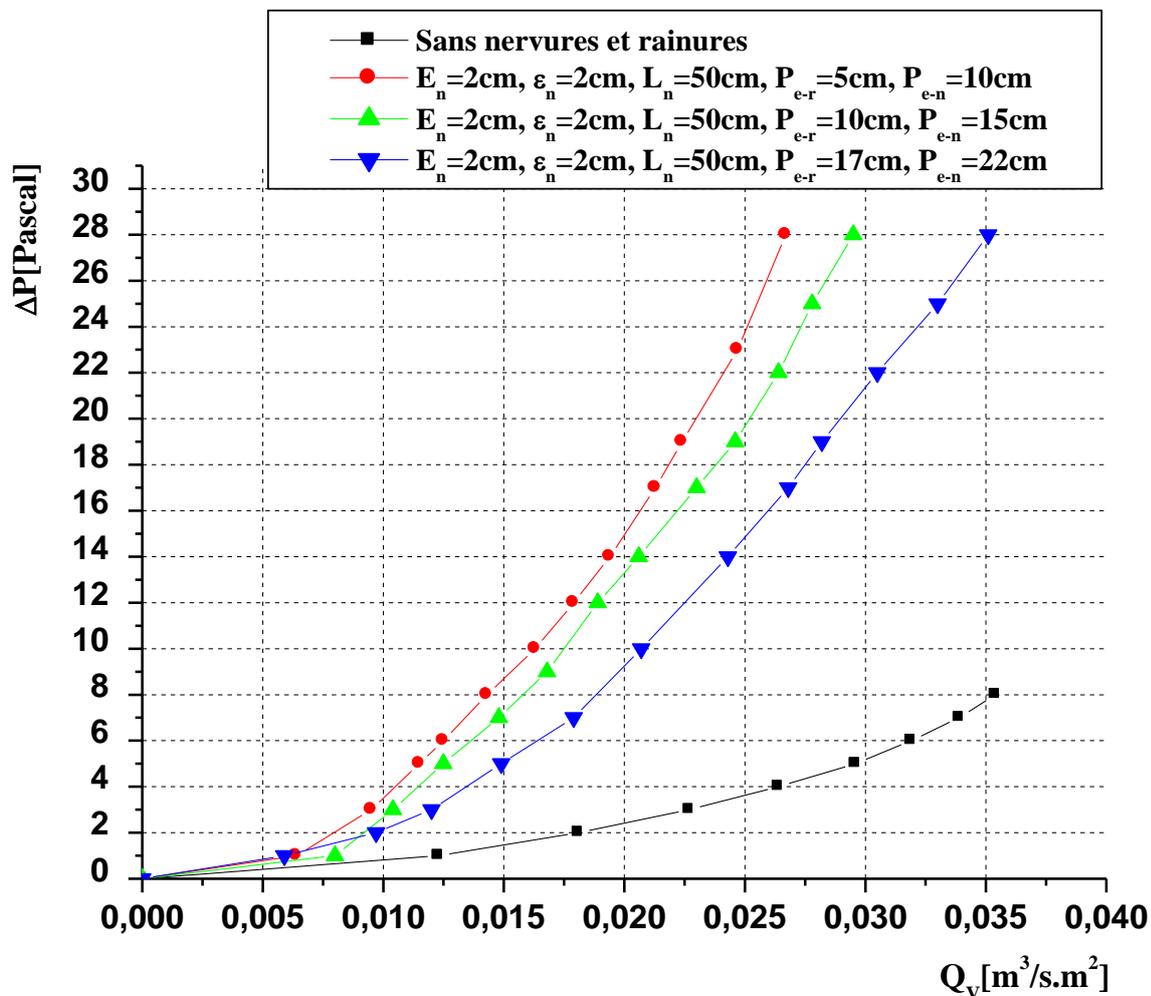


Figure (II.8) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en rangées comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 5, 10, 17\text{cm}, P_{e-n} = 10, 15, 22\text{cm}$ )

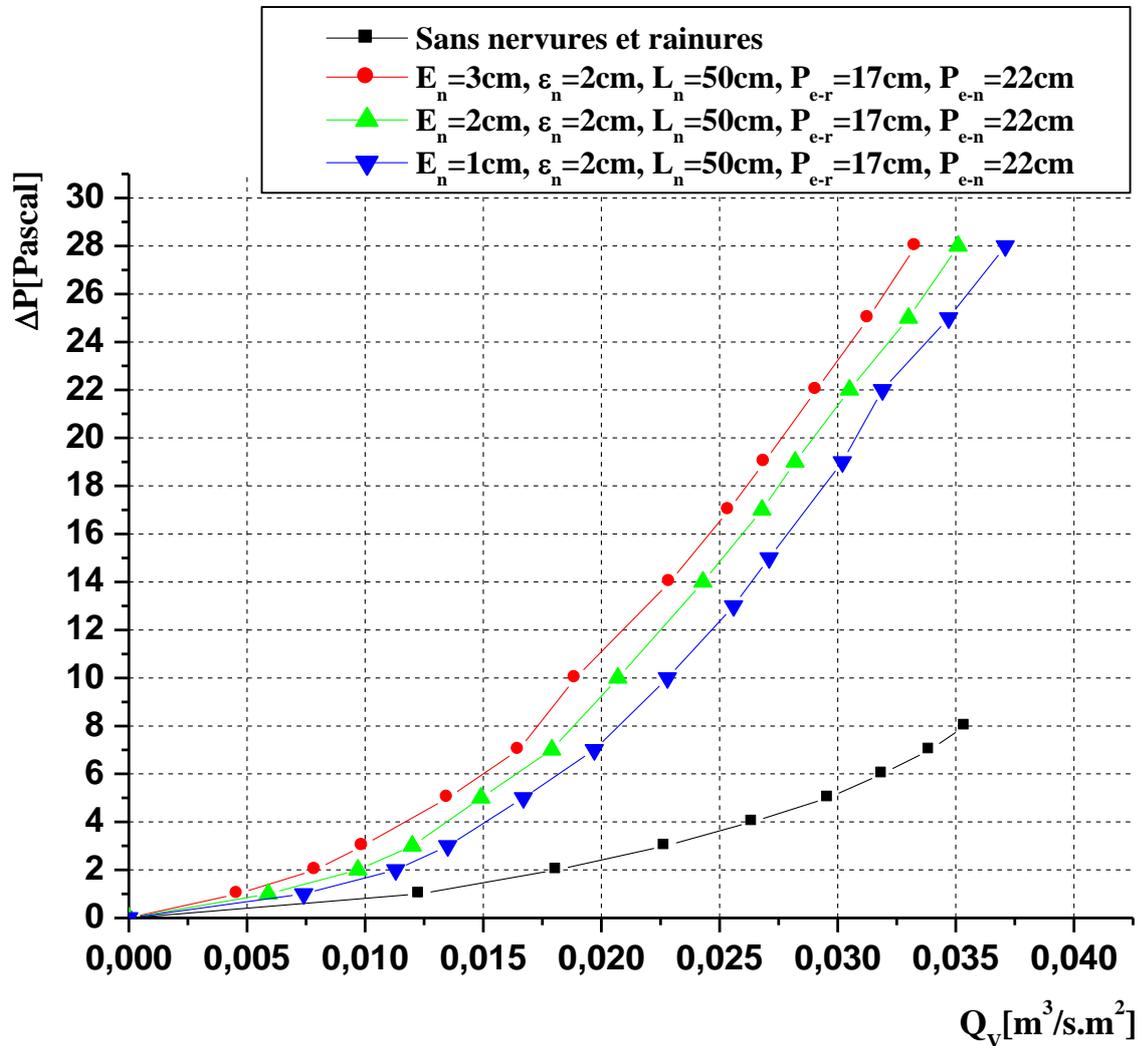


Figure (II.9) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en rangées comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 3, 2, 1\text{cm}$ ,  $\varepsilon_n = 2\text{cm}$ ,  $L_n = 50\text{cm}$ ,  $P_{e-r} = 17\text{cm}$ ,  $P_{e-n} = 22\text{cm}$ )

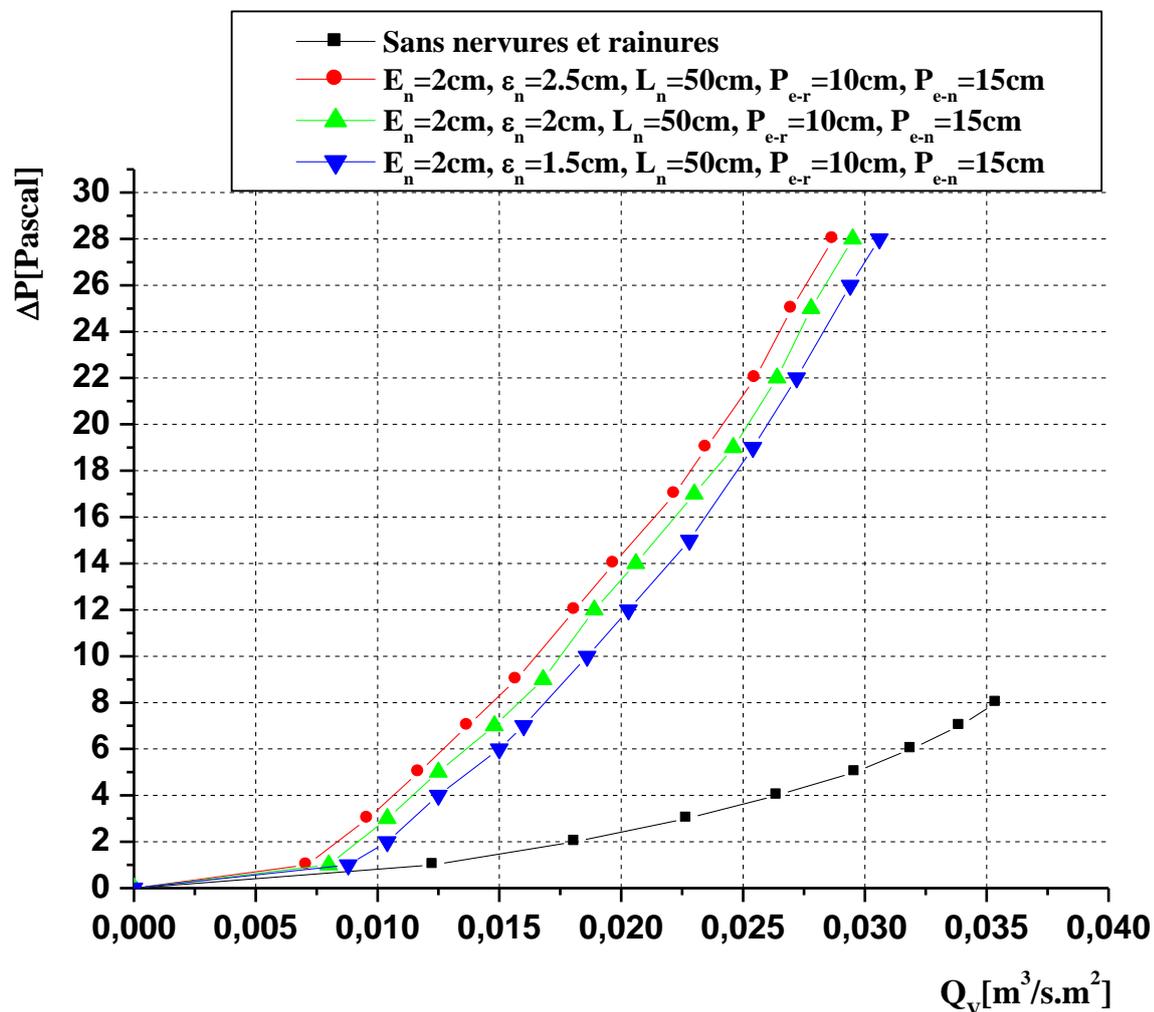


Figure (II.10) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en rangées comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2.5, 2, 1.5\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 10\text{cm}, P_{e-n} = 15\text{cm}$ )

### II.2.2. Nervures et rainures disposées en forme inclinée

Nous avons étudié 12 cas de configuration des nervures et rainures. Ces nervures et rainures sont fixées sur le plan découlement disposées en forme inclinée, voir figure (II.11).



**Figure (II.11) :** *Nervures et rainures disposées en forme inclinée.*

On considère les cas suivants :

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 4.6\text{cm}, P_{e-n} = 9.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 10\text{cm}, P_{e-n} = 15\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 3\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 1\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2.5\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 4.6\text{cm}, P_{e-n} = 9.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 4.6\text{cm}, P_{e-n} = 9.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 1.5\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 4.6\text{cm}, P_{e-n} = 9.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 70^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 56\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 50^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 60\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 30^\circ)$$

## II.2.2.1. Tableaux des mesures des pertes de charge enregistrées

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0076	2.30	1.52
2	0.0114	3.44	2.28
3	0.014	4.23	2.8
4	0.0166	5.03	3.32
5	0.0187	5.68	3.74
6	0.0204	6.19	4.08
8	0.0232	7.04	4.64
9	0.0247	7.48	4.94
11	0.0272	8.23	5.44
13	0.0294	8.92	5.88
14	0.0305	9.24	6.1
16	0.0328	9.93	6.56

**Tableau (II.9) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 4.6cm, P_{e-n} = 9.5cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0062	1.89	1.24
2	0.0104	3.15	2.08
3	0.0137	4.14	2.74
4	0.0161	4.88	3.22
5	0.0182	5.51	3.64
6	0.02	6.07	4
7	0.0217	6.58	4.34
8	0.0235	7.12	4.7
10	0.0263	7.96	5.26
12	0.0291	8.83	5.82
14	0.0316	9.57	6.32
16	0.0337	10.22	6.74

**Tableau (II.10) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 10cm, P_{e-n} = 15cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0076	2.3	1.52
2	0.0127	3.86	2.54
3	0.0163	4.95	3.26
4	0.0188	5.69	3.76
5	0.021	6.35	4.2
7	0.025	7.58	5
8	0.0267	8.09	5.34
9	0.0279	8.45	5.58
11	0.0306	9.28	6.12
12	0.0316	9.59	6.32
14	0.0333	10.09	6.66
16	0.0348	10.55	6.96

**Tableau (II.11) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 14.7cm, P_{e-n} = 19.5cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0063	1.9	1.26
2	0.0114	3.46	2.28
3	0.015	4.55	3
4	0.0175	5.29	3.5
5	0.0196	5.95	3.92
7	0.0237	7.18	4.74
8	0.0254	7.69	5.08
9	0.0269	8.15	5.38
11	0.0293	8.88	5.86
12	0.0303	9.19	6.06
14	0.032	9.69	6.4
16	0.0335	10.15	6.7

**Tableau (II.12) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 3cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 14.7cm, P_{e-n} = 19.5cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0089	2.7	1.78
2	0.0141	4.26	2.82
3	0.0177	5.35	3.54
4	0.0201	6.09	4.02
5	0.0223	6.75	4.46
7	0.0263	7.98	5.26
8	0.028	8.49	5.6
9	0.0292	8.85	5.84
11	0.0319	9.68	6.38
12	0.033	9.99	6.6
14	0.0346	10.49	6.92
16	0.0361	10.95	7.22

**Tableau (II.13) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 1cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 14.7cm, P_{e-n} = 19.5cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0067	2.02	2.68
2	0.0101	3.05	4.04
3	0.0129	3.91	5.16
4	0.0155	4.71	6.2
5	0.0176	5.33	7.04
7	0.0207	6.27	8.28
8	0.0224	6.79	8.96
9	0.0234	7.1	9.36
11	0.0263	7.97	10.52
13	0.0285	8.63	11.4
14	0.0295	8.93	11.8
16	0.0311	9.42	12.44

**Tableau (II.14) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2.5cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 4.6cm, P_{e-n} = 9.5cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0082	2.47	1.09
2	0.0122	3.7	1.63
3	0.0148	4.49	1.97
4	0.0177	5.37	2.36
5	0.0199	6.02	2.65
7	0.023	6.98	3.07
9	0.0258	7.82	3.44
11	0.0281	8.53	3.75
12	0.0291	8.83	3.88
13	0.0304	9.21	4.05
14	0.0314	9.51	4.19
16	0.0338	10.24	4.51

**Tableau (II.15) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 1.5cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 4.6cm, P_{e-n} = 9.5cm, i = 70^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0102	3.1	2.04
2	0.0154	4.66	3.08
3	0.019	5.75	3.8
4	0.0214	6.49	4.28
5	0.0236	7.15	4.72
7	0.0277	8.38	5.54
8	0.0293	8.89	5.86
9	0.0305	9.25	6.1
11	0.0333	10.08	6.66
12	0.0343	10.39	6.86
14	0.0359	10.89	7.18
16	0.0375	11.35	7.5

**Tableau (II.16) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 56cm, P_{e-r} = 14.7cm, P_{e-n} = 19.5cm, i = 50^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0129	3.9	2.58
2	0.018	5.46	3.6
3	0.0216	6.55	4.32
4	0.0241	7.29	4.82
5	0.0262	7.95	5.24
7	0.0303	9.18	6.06
8	0.032	9.69	6.4
9	0.0332	10.05	6.64
11	0.0359	10.88	7.18
12	0.0369	11.19	7.38
14	0.0386	11.69	7.72
16	0.0401	12.15	8.02

**Tableau (II.17) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 60\text{cm}, P_{e-r} = 14.7\text{cm}, P_{e-n} = 19.5\text{cm}, i = 30^\circ)$$

### II.2.2.2. Représentation graphiques des pertes de charge en fonction du débit

Il s'agit de montrer graphiquement l'évolution des pertes de charge en fonction du débit pour la deuxième configuration (disposition des nervures et rainures en forme inclinée) voir figure ci-après :

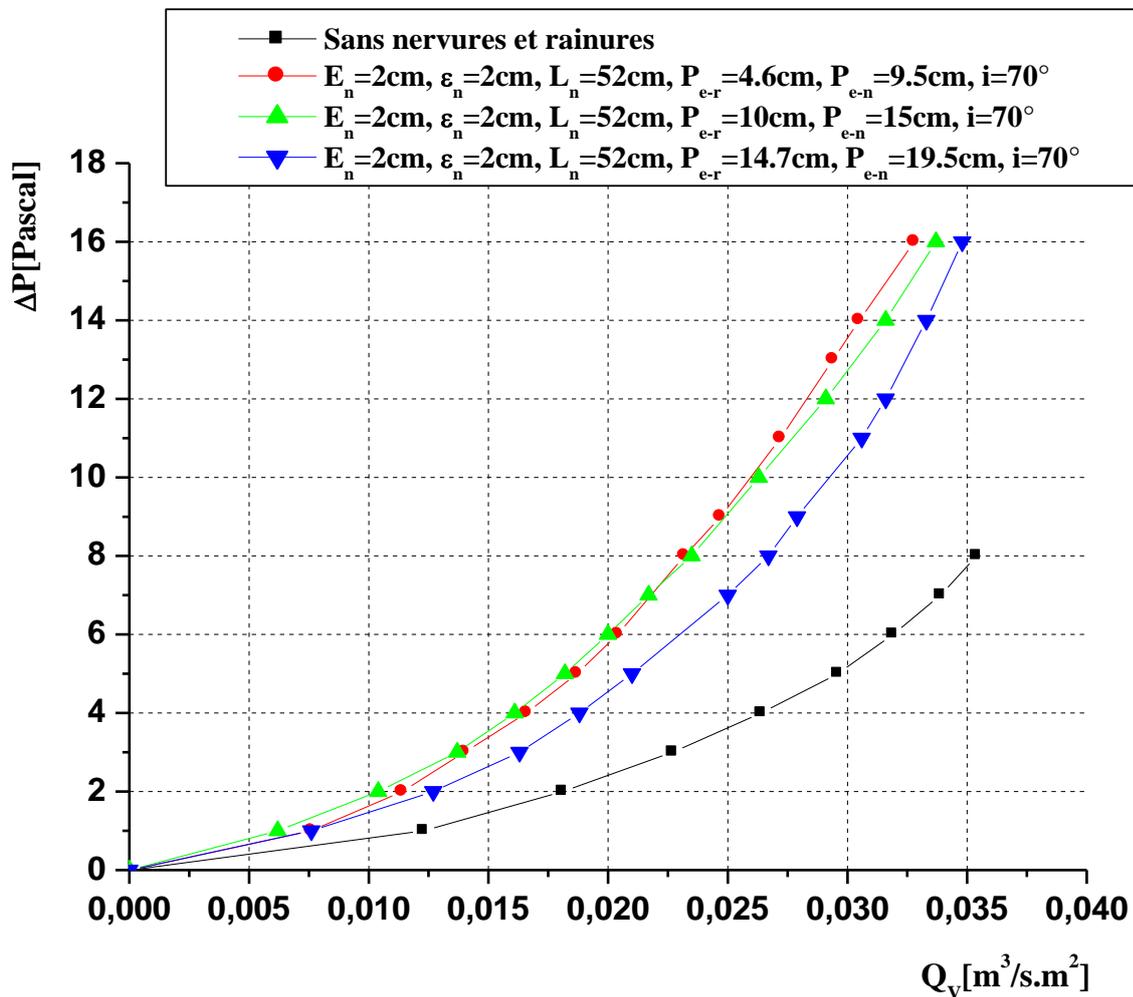


Figure (II.12) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 2cm, \epsilon_n = 2cm, L_n = 52cm, P_{e-r} = 4.6, 10, 14.7cm, P_{e-n} = 9.5, 15, 19.5cm, i = 70^\circ$ )

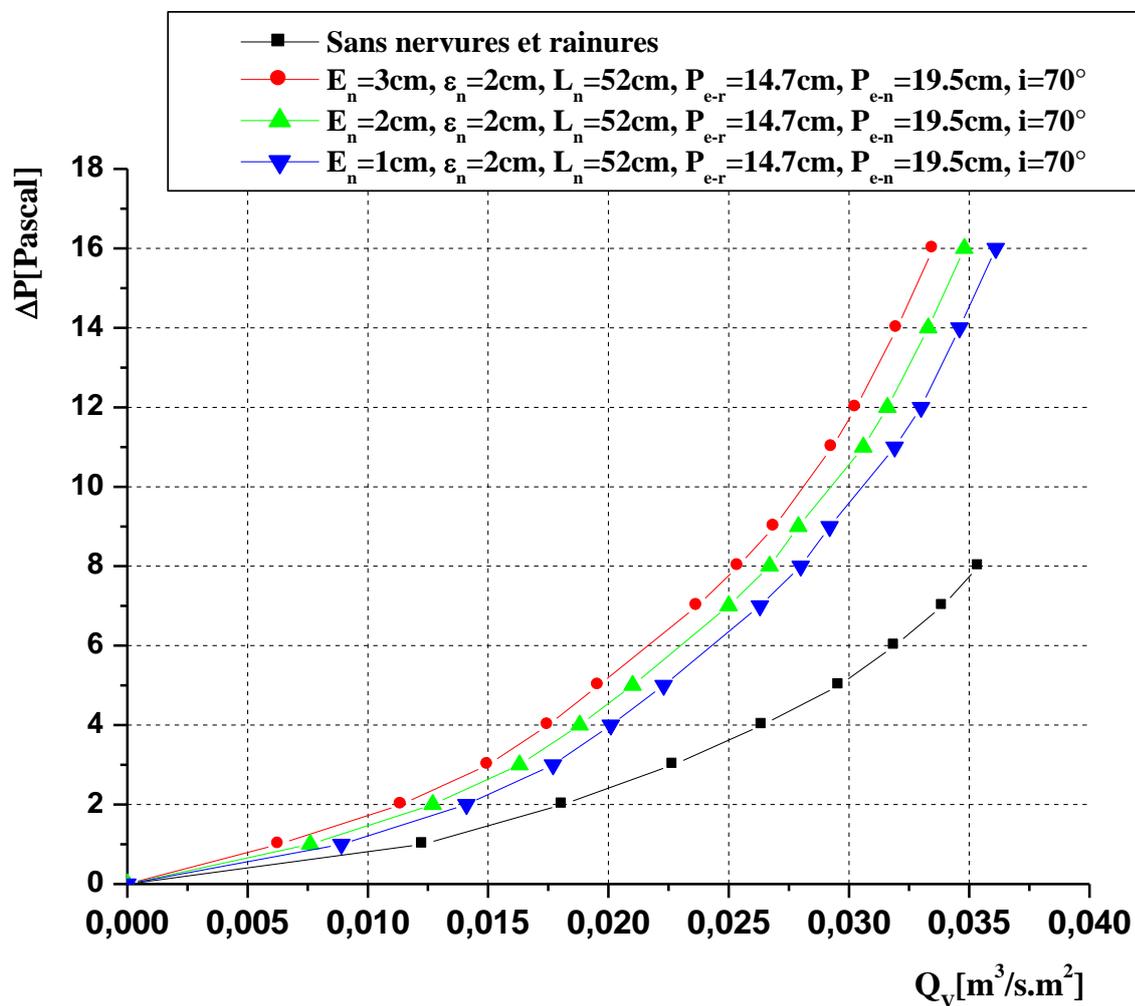


Figure (II.13) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 3, 2, 1cm$ ,  $\varepsilon_n = 2cm$ ,  $L_n = 52cm$ ,  $P_{e-r} = 14.7cm$ ,  $P_{e-n} = 19.5cm$ ,  $i = 70^\circ$ )

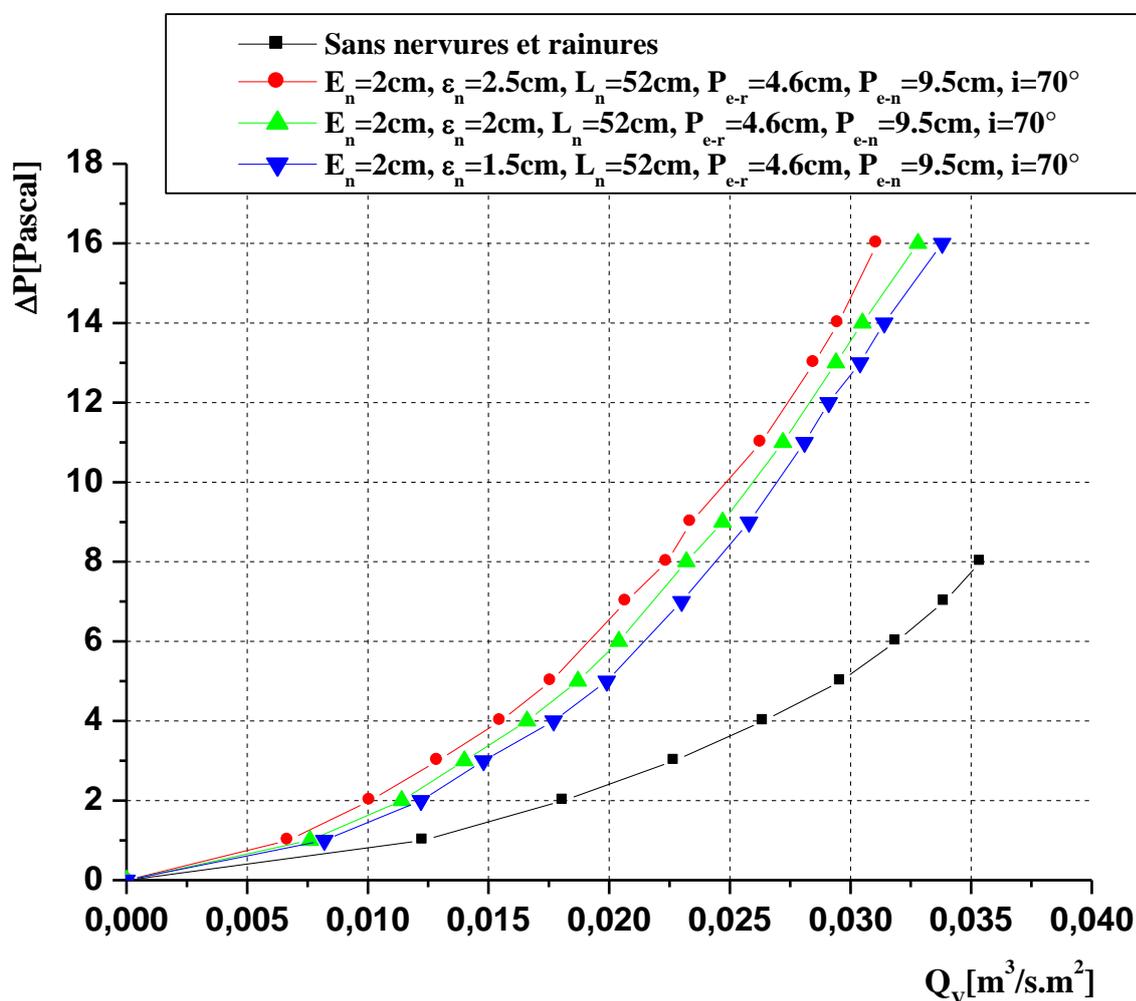


Figure (II.14) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2.5, 2, 1.5\text{cm}, L_n = 52\text{cm}, P_{e-r} = 4.6\text{cm}, P_{e-n} = 9.5\text{cm}, i = 70^\circ$ )

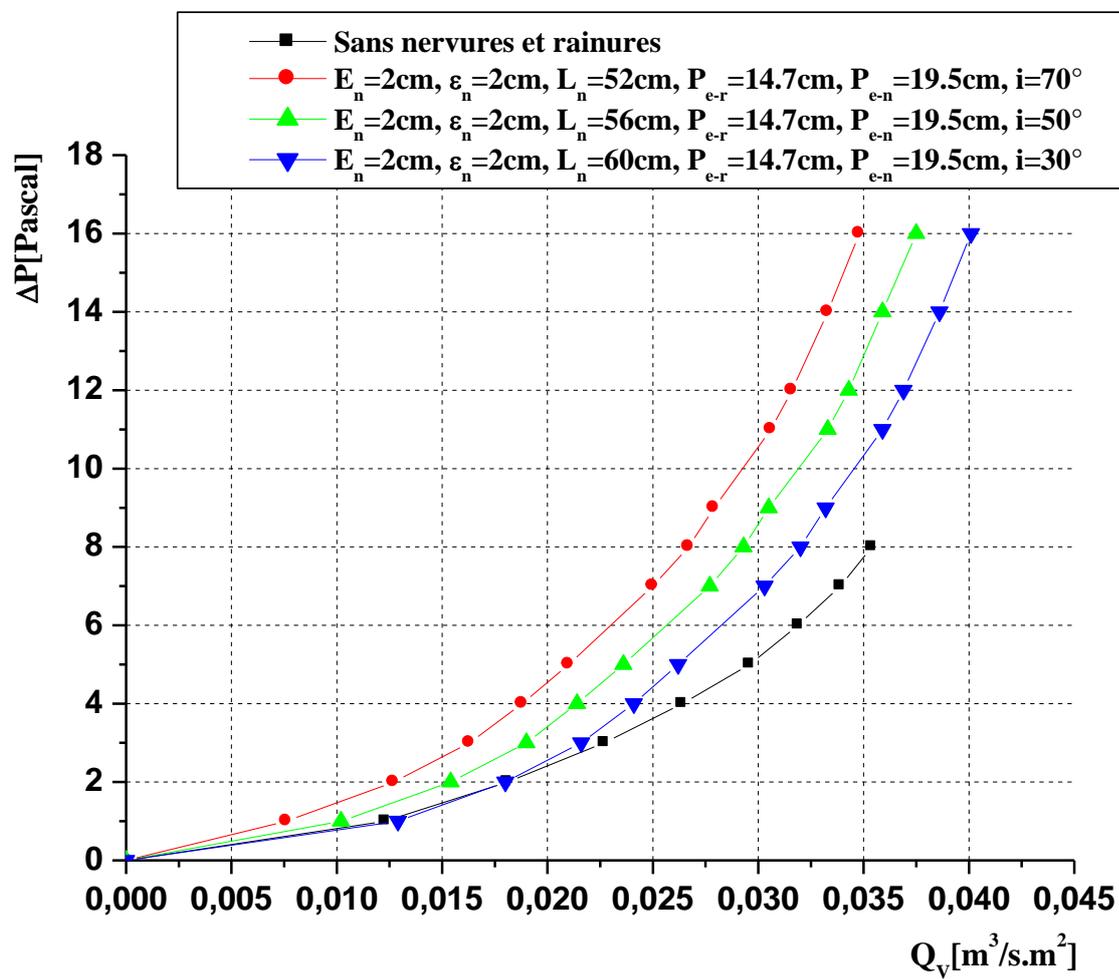


Figure (II.15) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme inclinée comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 2\text{cm}$ ,  $\varepsilon_n = 2\text{cm}$ ,  $L_n = 52, 56, 60\text{cm}$ ,  $P_{e-r} = 14.7\text{cm}$ ,  $P_{e-n} = 19.5\text{cm}$ ,

$i = 70^\circ, 50^\circ, 30^\circ$ )

### II.2.3. Nervures et rainures disposées en forme de V

Nous avons étudié 4 cas de configuration des nervures et rainures. Ces nervures et rainures sont fixées sur le plan découlement disposées en forme de V, voir figure (II.16).



**Figure (II.16) :** *Nervures et rainures disposées en forme de V.*

On considère les cas suivants :

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 2\text{cm}, P_{e-n} = 7\text{cm}, i = 45^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 50\text{cm}, P_{e-r} = 2\text{cm}, P_{e-n} = 7\text{cm}, i = 135^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 60\text{cm}, P_{e-r} = 2\text{cm}, P_{e-n} = 7\text{cm}, i = 30^\circ)$$

$$(E_n = 2\text{cm}, \varepsilon_n = 2\text{cm}, L_n = 60\text{cm}, P_{e-r} = 2\text{cm}, P_{e-n} = 7\text{cm}, i = 150^\circ)$$

## II.2.3.1. Tableaux des mesures des pertes de charge enregistrées

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0085	2.59	1.7
2	0.0125	3.8	2.5
3	0.0158	4.8	3.16
4	0.0183	5.54	3.66
5	0.0205	6.2	4.1
6	0.0221	6.7	4.42
7	0.0234	7.1	4.68
8	0.0250	7.58	5
9	0.0264	8	5.28
10	0.0271	8.2	5.42

Tableau (II.18) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 2cm, P_{e-n} = 7cm, i = 45^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0049	1.47	0.98
2	0.0071	2.14	1.42
3	0.0084	2.56	1.68
4	0.0103	3.11	2.06
5	0.0117	3.54	2.34
6	0.0129	3.92	2.58
7	0.0141	4.26	2.82
8	0.0154	4.66	3.08
9	0.0162	4.9	3.24
10	0.0169	5.12	3.38

Tableau (II.19) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 50cm, P_{e-r} = 2cm, P_{e-n} = 7cm, i = 135^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0103	3.13	2.06
2	0.0158	4.8	3.16
3	0.0201	6.08	4.02
4	0.0229	6.94	4.58
5	0.0251	7.61	5.02
6	0.0270	8.18	5.4
7	0.0286	8.66	5.72
8	0.0301	9.11	6.02
9	0.0311	9.43	6.22

**Tableau (II.20) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 60cm, P_{e-r} = 2cm, P_{e-n} = 7cm, i = 30^\circ)$$

$\Delta P [Pas]$	$Q_V [m^3/s.m^2]$	$V_{ext} [m/s]$	$V_{int} [m/s]$
0	0	0	0
1	0.0069	2.08	1.38
2	0.0095	2.87	1.9
3	0.0120	3.64	2.4
4	0.0141	4.27	2.82
5	0.0158	4.8	3.16
6	0.0172	5.21	3.44
7	0.0185	5.61	3.7
8	0.0198	6	3.96
9	0.0210	6.37	4.2
10	0.0221	6.69	4.42

**Tableau (II.21) : Evolution des pertes de charge en fonction du débit pour un canal muni des nervures et rainures définie par :**

$$(E_n = 2cm, \varepsilon_n = 2cm, L_n = 60cm, P_{e-r} = 2cm, P_{e-n} = 7cm, i = 150^\circ)$$

## II.2.3.2. Représentation graphiques des pertes de charge en fonction du débit

Il s'agit de montrer graphiquement l'évolution des pertes de charge en fonction du débit pour la troisième configuration (disposition des nervures et rainures en forme de V) voir figure ci-après :

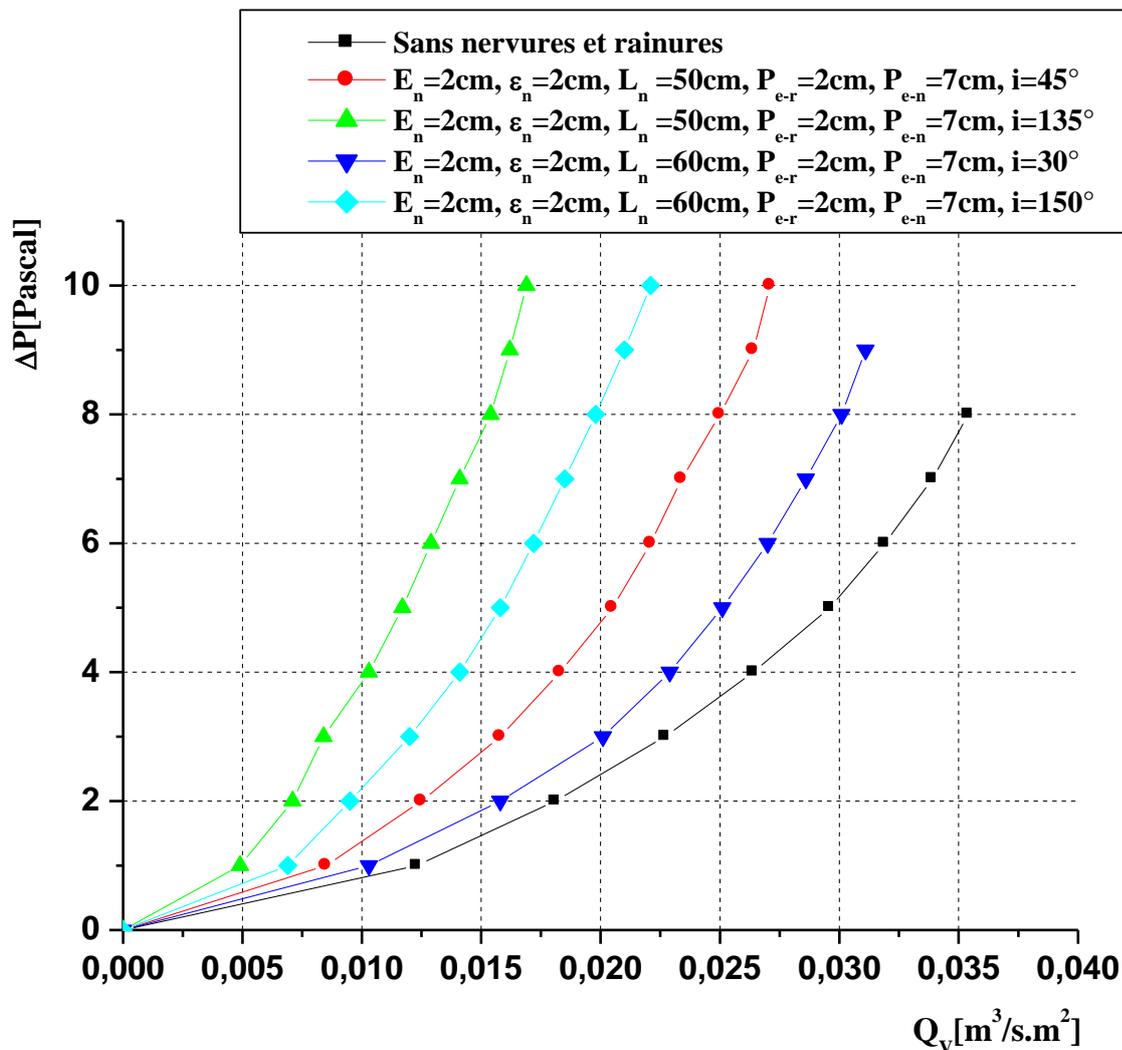


Figure (II.17) : Pertes de charge en fonction du débit volumique en présence des nervures et rainures disposées en forme de V comparativement à un conduit lisse.

( $E_n = 2\text{cm}$ ,  $\varepsilon_n = 2\text{cm}$ ,  $L_n = 50, 60\text{cm}$ ,  $P_{e-r} = 2\text{cm}$ ,  $P_{e-n} = 7\text{cm}$ ,  
 $i = 45^\circ, 135^\circ, 30^\circ, 150^\circ$ )

### II.3. Interprétation des résultats expérimentaux

À partir des graphes représentant l'évolution des pertes de charge en fonction du débit volumique pour les trois configurations des nervures et rainures étudiées, la chute de pression est plus importante en présence des nervures et rainures comparativement à celle du conduit lisse (sans nervures et rainures).

Et mettre en évidence l'effet des paramètres géométriques sur l'évolution des pertes de charge en fonction du débit volumique, à partir des courbes.

L'analyse de l'évolution des pertes de charge dans les configurations des nervures et rainures disposées en rangées et en forme inclinées montre qu'une augmentation dans le pas entre les rainures et le pas entre les nervures fait démultiplier la chute de pression et montre qu'une augmentation dans l'épaisseur et la rugosité artificielle des nervures fait augmenter la chute de pression.

Quelques exemples, pour un débit volumique commun  $Q_V = 0.0125[m^3/s.m^2]$  et pour un pas entre des rainures  $P_{e-r} = 5cm$  et un pas entre des nervures  $P_{e-n} = 10cm$ , la chute de pression atteint une valeur de  $6[pa]$ , lorsque le pas entre les rainures devient  $P_{e-r} = 10cm$  et le pas entre les nervures  $P_{e-n} = 15cm$  on constate une diminution dans la perte de charge prend la valeur de  $5[pa]$  voir figure (II.8).

Pour un débit volumique commun  $Q_V = 0.0135[m^3/s.m^2]$  et pour une épaisseur des nervures  $E_n = 1cm$ , la perte de charge est de  $3[pa]$ , mais lorsque l'épaisseur s'augmente  $E_n = 3cm$  la perte de charge augmente aussi jusqu'à  $5[pa]$  par analyse comparative entre les données de figure (II.9).

Pour un débit volumique commun  $Q_V = 0.0104[m^3/s.m^2]$  et pour une rugosité artificielle des nervures  $\epsilon_n = 1.5cm$ , la perte de charge est de  $2[pa]$ , mais lorsque la rugosité artificielle s'augmente  $\epsilon_n = 2cm$  la perte de charge augmente aussi jusqu'à  $3[pa]$  par analyse comparative entre les données de figure (II.10).

L'analyse de l'évolution des pertes de charge dans la configuration des nervures et rainures disposées en forme inclinée montre qu'une augmentation dans l'angle d'attaque fait augmenter la chute de pression. Par exemple, pour un débit volumique commun  $Q_V = 0.0333[m^3/s.m^2]$  et pour un angle de  $50^\circ$ , la perte de charge est de  $11[pa]$ , mais lorsque

l'angle s'augmente est de 70° la perte de charge augmente aussi jusqu'à 14[*pas*] par analyse comparative entre les données de figure (II.15).

L'analyse de l'évolution des pertes de charge dans la configuration des nervures et rainures disposées en forme de V montre par deux phénomènes : freinage de l'air pour les angles de 30° et 45° et glissement de l'air pour les angles de 150° et 135°. A titre d'exemple, pour un débit volumique commun  $Q_V = 0.0085[m^3/s.m^2]$  la perte de charge enregistrée est de 1[*pas*] pour 45° et la perte de charge enregistrée est de 3[*pas*] pour 135°. Ainsi, pour un débit volumique commun  $Q_V = 0.0158[m^3/s.m^2]$  la perte de charge enregistrée est de 2[*pas*] pour 30° et la perte de charge enregistrée est de 5[*pas*] pour 150° voir figure (II.17).

## **Conclusion**

Par l'analyse des résultats, nous concluons que l'évolution de la perte de charge en fonction du débit volumique est influencée par différents paramètres géométriques pour les trois configurations des nervures et rainures étudiées.



### Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'illustrer la méthode et le mode de calcul et qu'on a utilisé pour trouver les corrélations empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des trois dispositions des rugosités artificielles considérées, en rangées puis en forme inclinée et en forme de V en régime découlement laminaire et turbulent.

### III.1. Méthode de calcul

#### III.1.1. Premier cas : Nervures et rainures disposées en rangées

Pour trouver la relation entre les caractéristiques géométriques des rugosités artificielles et les paramètres physiques, on a utilisé la méthode de l'analyse dimensionnelle.

$$\Delta P = \Delta P(\rho, D_H, V, \mu, L, \varepsilon_n, P_{e-r}, P_{e-n}, E_n, L_n) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$\Delta P$  : Perte de charge par frottement en [Pascal].

$\rho$  : Masse volumique de l'air en [ $kg/m^3$ ].

$D_H$  : Diamètre hydraulique en [ $m$ ].

$V$  : La vitesse de l'air en [ $m/s$ ].

$\mu$  : La viscosité dynamique en [ $kg/m.s$ ].

$L$  : Longueur du canal en [ $m$ ].

$\varepsilon_n$  : La rugosité artificielle des nervures en [ $m$ ].

$P_{e-r}$  : Le pas entre les rainures en [ $m$ ].

$P_{e-n}$  : Le pas entre les nervures en [ $m$ ].

$E_n$  : L'épaisseur des nervures en [ $m$ ].

$L_n$  : Longueur des nervures en [ $m$ ].

D'après le théorème de  $\pi$  (de Vaschy-Buckingham) on ne peut avoir que 6 groupements indépendants, en adoptant l'écriture suivante avec  $L = C^{ste}$ , on peut écrire alors :

$$\frac{\Delta P}{L} = \pi \cdot k \cdot \rho^\alpha \cdot D_H^\beta \cdot V^\gamma \cdot \mu^x \cdot \varepsilon_n^y \cdot P_{e-r}^z \cdot P_{e-n}^t \cdot E_n^u \cdot L_n^w \quad (III.2)$$

$\pi$  : indique un produit.

On peut déduire donc une relation basée sur les dimensions fondamentales, tel que :

$$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2} = \pi \cdot k (M \cdot L^{-3})^\alpha \cdot (L)^\beta \cdot (L \cdot T^{-1})^\gamma \cdot (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1})^x \cdot (L)^y \cdot (L)^z \cdot (L)^t \cdot (L)^u \cdot (L)^w \quad (III.3)$$

Après développement on a :

$$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2} = \pi \cdot k \cdot (M)^{\alpha+x} \cdot (T)^{(-\gamma-x)} \cdot (L)^{-3\alpha+\beta+\gamma-x+y+z+t+u+w} \quad (III.4)$$

Après identification on obtient un système de 3 équations de la forme :

$$\begin{cases} \alpha + x = 1 & (1) \\ -\gamma - x = -2 & (2) \\ -3\alpha + \beta + \gamma - x + y + z + t + u + w = -2 & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 - x & (4) \\ \gamma = 2 - x & (5) \end{cases}$$

Remplaçant (4) et (5) dans (3) on obtient :

$$\beta = -1 - x - y - z - t - u - w \quad (6)$$

D'autre part, en remplaçant (4), (5) et (6) dans (III.2) on obtient :

$$\frac{\Delta P}{L} = \pi \cdot k \cdot \rho^{1-x} \cdot D_H^{-1-x-y-z-t-u-w} \cdot V^{2-x} \cdot \mu^x \cdot \varepsilon_n^y \cdot P_{e-r}^z \cdot P_{e-n}^t \cdot E_n^u \cdot L_n^w \quad (III.5)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{2} \frac{\rho V^2}{D_H} \left[ \rho^{-x} \cdot D_H^{-x-y-z-t-u-w} \cdot V^{-x} \cdot \mu^x \cdot \varepsilon_n^y \cdot P_{e-r}^z \cdot P_{e-n}^t \cdot E_n^u \cdot L_n^w \right]$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot V^2 \left[ \left( \frac{\rho \cdot V \cdot D_H}{\mu} \right)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \right]$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \right] \cdot V^2 \quad (III.6)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[ \lambda \left( (R_e), \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right), \left( \frac{E_n}{D_H} \right), \left( \frac{L_n}{D_H} \right) \right) \right] \cdot V^2$$

Compte tenu de cette dernière relation, le coefficient de perte de charge (de frottement) prend l'expression suivante :

$$\lambda = \lambda \left( (R_e), \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right), \left( \frac{E_n}{D_H} \right), \left( \frac{L_n}{D_H} \right) \right) \quad (\text{III.7})$$

### III.1.1.1. Régime laminaire

Cette analyse est basée sur les données suivantes :

$\Delta P$ [Pas]	$V_{int}$ [m/s]	$\varepsilon_n$ [cm]	$P_{e-r}$ [cm]	$P_{e-n}$ [cm]	$E_n$ [cm]	$L_n$ [cm]	$D_H$ [m]	$\rho$ $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$\nu$ $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
1	1.28	2	5	10	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.6	2	10	15	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.18	2	17	22	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	0.92	2	17	22	3	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
2	1.58	2	17	22	3	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.48	2	17	22	1	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	2.84	2.5	10	15	2	50	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.17	1.5	10	15	2	50	0.0291	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau (III.1) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en rangées en régime laminaire.**

Sachant que :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \right] \cdot V^2$$

$$\frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} = \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \right]$$

$$\ln \left( \frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} \right) = \ln \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \right]$$

$$\ln \left( \frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} \right) = -x \ln(R_e) + y \ln \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right) + z \ln \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right) + t \ln \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right) + u \ln \left( \frac{E_n}{D_H} \right)$$

$$+ w \ln \left( \frac{L_n}{D_H} \right) \quad (\text{III.8})$$

On remplace les données correspondant aux pertes de charge tableau (III.1) précédentes dans (III.8), on obtient :

$$\begin{bmatrix} -7.4221 & 0.0202 & 0.9365 & 1.6296 & 0.0202 & 3.2391 \\ -7.6452 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2391 \\ -7.3407 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.0202 & 3.2391 \\ -7.0919 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.4257 & 3.2391 \\ -7.6327 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.4257 & 3.2391 \\ -7.5673 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & -0.6729 & 3.2391 \\ -7.5360 & 0.9263 & 2.3126 & 2.7181 & 0.7032 & 3.9221 \\ -7.7274 & -0.6627 & 1.2344 & 1.6399 & -0.3750 & 2.8439 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \\ u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.3206 \\ -4.7669 \\ -4.1579 \\ -3.6601 \\ -4.0486 \\ -4.6109 \\ -6.5975 \\ -3.7457 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse  $x = \text{pinv}(a) \cdot (b)$ .

La solution de ce système d'équations permet d'obtenir :

$$\begin{cases} x = 0.5101 \\ y = -2.6248 \\ z = -9.4433 \\ t = 14.8787 \\ u = 0.5804 \\ w = -4.9081 \end{cases}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.5101} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-2.6248} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-9.4433} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{14.8787} \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.5804} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-4.9081} \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.9})$$

Et par conséquent le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \left[ (Re)^{-0.5101} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-2.6248} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-9.4433} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{14.8787} \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.5804} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-4.9081} \right] \quad (\text{III.10})$$

Cette expression est valable pour les nervures et rainures disposées en rangées pour un régime d'écoulement laminaire.

### III.1.1.2. Régime turbulent

De la même façon que le cas précédent, pour le régime turbulent on considère les données de départs suivants :

$\Delta P$ [Pas]	$V_{int}$ [m/s]	$\varepsilon_n$ [cm]	$P_{e-r}$ [cm]	$P_{e-n}$ [cm]	$E_n$ [cm]	$L_n$ [cm]	$D_H$ [m]	$\rho$ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\nu$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
28	5.34	2	5	10	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
23	4.94	2	5	10	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
19	4.48	2	5	10	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
17	4.26	2	5	10	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
28	5.6	2	10	15	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
25	5.56	2	10	15	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
22	5.28	2	10	15	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
19	4.92	2	10	15	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
28	7.02	2	17	22	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
25	6.6	2	17	22	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
22	6.1	2	17	22	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
19	5.64	2	17	22	2	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
28	6.66	2	17	22	3	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
25	6.26	2	17	22	3	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
22	5.82	2	17	22	3	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
19	5.38	2	17	22	3	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
28	7.42	2	17	22	1	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
25	6.94	2	17	22	1	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
22	6.38	2	17	22	1	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
19	6.04	2	17	22	1	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
28	11.48	2.5	10	15	2	50	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
25	10.8	2.5	10	15	2	50	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
22	10.2	2.5	10	15	2	50	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
19	9.4	2.5	10	15	2	50	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau (III.2) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en rangées en régime turbulent.**

## Chapitre III Établissement des modèles de calcul des pertes de charge

On remplace les données correspondant aux pertes de charge tableau (III.2) précédentes dans (III.8), on obtient :

$$\begin{bmatrix}
 -8.8505 & 0.0202 & 0.9365 & 1.6296 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.7726 & 0.0202 & 0.9365 & 1.6296 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.6749 & 0.0202 & 0.9365 & 1.6296 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.6245 & 0.0202 & 0.9365 & 1.6296 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.9502 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.8908 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.8392 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.7685 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -9.1240 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -9.0623 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.9835 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -8.9051 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.0202 & 3.2391 \\
 -9.0714 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.4257 & 3.2391 \\
 -9.0094 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.4257 & 3.2391 \\
 -8.9365 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.4257 & 3.2391 \\
 -8.8579 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & 0.4257 & 3.2391 \\
 -9.1794 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & -0.6729 & 3.2391 \\
 -9.1125 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & -0.6729 & 3.2391 \\
 -9.0284 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & -0.6729 & 3.2391 \\
 -8.9736 & 0.0202 & 2.1603 & 2.4181 & -0.6729 & 3.2391 \\
 -8.9328 & 0.9263 & 2.3126 & 2.7181 & 0.7032 & 3.9221 \\
 -8.8718 & 0.9263 & 2.3126 & 2.7181 & 0.7032 & 3.9221 \\
 -8.8146 & 0.9263 & 2.3126 & 2.7181 & 0.7032 & 3.9221 \\
 -8.7329 & 0.9263 & 2.3126 & 2.7181 & 0.7032 & 3.9221
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 x \\
 y \\
 z \\
 t \\
 u \\
 w
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -3.8451 \\
 -3.8861 \\
 -3.8817 \\
 -3.8922 \\
 -4.0446 \\
 -4.0392 \\
 -4.0637 \\
 -4.0690 \\
 -4.3922 \\
 -4.3821 \\
 -4.3524 \\
 -4.3422 \\
 -4.2869 \\
 -4.2763 \\
 -4.2584 \\
 -4.2478 \\
 -4.5030 \\
 -4.4826 \\
 -4.4422 \\
 -4.4792 \\
 -6.0589 \\
 -6.0501 \\
 -6.0636 \\
 -6.0468
 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse  $x = \text{pinv}(a) * (b)$ .

La solution de ce système d'équations permet d'obtenir :

$$\begin{cases}
 x = 0.0617 \\
 y = -1.3098 \\
 z = 1.0397 \\
 t = -2.1956 \\
 u = 0.1813 \\
 w = -0.2193
 \end{cases}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.0617} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-1.3098} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{1.0397} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-2.1956} \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.1813} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-0.2193} \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.11})$$

Et par conséquent le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \left[ (Re)^{-0.0617} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-1.3098} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{1.0397} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-2.1956} \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.1813} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-0.2193} \right] \quad (\text{III.12})$$

Cette expression est valable pour les nervures et rainures disposées en rangées pour un régime d'écoulement turbulent.

### III.1.2. deuxième cas : Nervures et rainures disposées en forme inclinée

Pour trouver la relation entre les caractéristiques géométriques des rugosités artificielles et les paramètres physiques, on s'est servi de la méthode de l'analyse dimensionnelle.

Pour résoudre ce système on a :

$$\Delta P = \Delta P(\rho, D_H, V, \mu, L, \varepsilon_n, P_{e-r}, P_{e-n}, E_n, L_n, l) \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$\Delta P$  : Perte de charge par frottement en [Pascal].

$\rho$  : Masse volumique de l'air en [ $kg/m^3$ ].

$D_H$  : Diamètre hydraulique en [ $m$ ].

$V$  : La vitesse de l'air en [ $m/s$ ].

$\mu$  : La viscosité dynamique en [ $kg/m.s$ ].

$L$  : Longueur du canal en [ $m$ ].

$\varepsilon_n$  : La rugosité artificielle des nervures en [ $m$ ].

$P_{e-r}$  : Le pas entre les rainures en [ $m$ ].

$P_{e-n}$  : Le pas entre les nervures en [ $m$ ].

$E_n$  : L'épaisseur des nervures en [ $m$ ].

$L_n$  : Longueur des nervures en [ $m$ ].

$l$  : Largueur du canal en [ $m$ ].

D'après le théorème de  $\pi$  (de Vaschy-Buckingham) on ne peut avoir que 7 groupements indépendants, en adoptant l'écriture suivante avec  $L = C^{ste}$ , on peut écrire alors :

$$\frac{\Delta P}{L} = \pi \cdot k \cdot \rho^\alpha \cdot D_H^\beta \cdot V^\gamma \cdot \mu^x \cdot \varepsilon_n^y \cdot P_{e-r}^z \cdot P_{e-n}^t \cdot E_n^u \cdot L_n^w \cdot l^c \quad (\text{III.14})$$

$\pi$  : indique un produit.

On peut déduire donc une relation basée sur les dimensions fondamentales, tel que :

$$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2} = \pi \cdot k (M \cdot L^{-3})^\alpha \cdot (L)^\beta \cdot (L \cdot T^{-1})^\gamma$$

$$\times (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1})^x \cdot (L)^y \cdot (L)^z \cdot (L)^t \cdot (L)^u \cdot (L)^w \cdot (L)^c \quad (\text{III.15})$$

Après développement on a :

$$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2} = \pi \cdot k \cdot (M)^{\alpha+x} \cdot (T)^{(-\gamma-x)} \cdot (L)^{-3\alpha+\beta+\gamma-x+y+z+t+u+w+c} \quad (\text{III.16})$$

Après identification on obtient un système de 3 équations de la forme :

$$\begin{cases} \alpha + x = 1 & (7) \\ -\gamma - x = -2 & (8) \\ -3\alpha + \beta + \gamma - x + y + z + t + u + w + c = -2 & (9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 - x & (10) \\ \gamma = 2 - x & (11) \end{cases}$$

Remplaçant (10) et (11) dans (9) on obtient :

$$\beta = -1 - x - y - z - t - u - w - c \quad (12)$$

D'autre part, en remplaçant (10), (11) et (12) dans (III.14) on obtient :

$$\frac{\Delta P}{L} = \pi \cdot k \cdot \rho^{1-x} \cdot D_H^{-1-x-y-z-t-u-w-c} \cdot V^{2-x} \cdot \mu^x \cdot \varepsilon_n^y \cdot P_{e-r}^z \cdot P_{e-n}^t \cdot E_n^u \cdot L_n^w \cdot l^c \quad (\text{III.17})$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{2} \frac{\rho V^2}{D_H} \left[ \rho^{-x} \cdot D_H^{-x-y-z-t-u-w-c} \cdot V^{-x} \cdot \mu^x \cdot \varepsilon_n^y \cdot P_{e-r}^z \cdot P_{e-n}^t \cdot E_n^u \cdot L_n^w \cdot l^c \right]$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \left[ \left( \frac{\rho \cdot V \cdot D_H}{\mu} \right)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \cdot (i)^c \right]$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \cdot (i)^c \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.18})$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[ \lambda \left( (R_e), \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right), \left( \frac{E_n}{D_H} \right), \left( \frac{L_n}{D_H} \right), (i) \right) \right] \cdot V^2$$

Compte tenu de cette dernière relation le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \lambda \left( (R_e), \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right), \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right), \left( \frac{E_n}{D_H} \right), \left( \frac{L_n}{D_H} \right), (i) \right) \quad (\text{III.19})$$

### III.1.2.1 Régime laminaire

Cette analyse est basée sur les données suivantes :

$\Delta P$ [Pas]	$V_{int}$ [m/s]	$\varepsilon_n$ [cm]	$P_{e-r}$ [cm]	$P_{e-n}$ [cm]	$E_n$ [cm]	$L_n$ [cm]	$i$ [°]	$D_H$ [m]	$\rho$ $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$\nu$ $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$
1	1.52	2	4.6	9.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.24	2	10	15	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.52	2	14.7	19.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.26	2	14.7	19.5	3	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	2.68	2.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.09	1.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0291	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau (III.3) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme inclinée en régime laminaire.**

Sachant que :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \cdot \rho \cdot \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \cdot (i)^c \right] \cdot V^2$$

$$\frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} = \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \cdot (i)^c \right]$$

$$\ln \left( \frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} \right) = \ln \left[ (R_e)^{-x} \cdot \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right)^y \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^z \cdot \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right)^t \cdot \left( \frac{E_n}{D_H} \right)^u \cdot \left( \frac{L_n}{D_H} \right)^w \cdot (i)^c \right]$$

$$\ln \left( \frac{2\Delta P D_H}{L \rho V^2} \right) = -x \ln(R_e) + y \ln \left( \frac{\varepsilon_n}{D_H} \right) + z \ln \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right) + t \ln \left( \frac{P_{e-n}}{D_H} \right) + u \ln \left( \frac{E_n}{D_H} \right)$$

$$+ w \ln \left( \frac{L_n}{D_H} \right) + c \ln(i) \quad (\text{III.20})$$

## Chapitre III      Etablissement des modèles de calcul des pertes de charge

---

On remplace les données correspondant aux pertes de charge tableau (III.3) précédentes dans (III.20), on obtient :

$$\begin{bmatrix} -7.5939 & 0.0202 & 0.8531 & 1.5783 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -7.3903 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -7.5939 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -7.4063 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.4257 & 3.2783 & 4.3048 \\ -7.4781 & 0.9263 & 1.5361 & 2.2613 & 0.7032 & 3.9613 & 4.3048 \\ -7.6566 & -0.6627 & 0.4579 & 1.1831 & -0.3750 & 2.8831 & 4.3048 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \\ u \\ w \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.6643 \\ -4.2571 \\ -4.6643 \\ -4.2891 \\ -6.4815 \\ -3.6040 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse  $x = \text{pinv}(a) \cdot (b)$ .

La solution de ce système d'équations permet d'obtenir :

$$\begin{cases} x = 1.8232 \\ y = -0.0062 \\ z = 0.9330 \\ t = -1.5072 \\ u = 0.0818 \\ w = -2.4692 \\ c = 4.3804 \end{cases}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ \begin{array}{cccc} (Re)^{-1.8232} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-0.0062} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.9330} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-1.5072} \\ \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.0818} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-2.4692} \cdot (i)^{4.3804} \end{array} \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.21})$$

Et par conséquent le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \left[ \begin{array}{cccc} (Re)^{-1.8232} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-0.0062} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.9330} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-1.5072} \\ \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.0818} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-2.4692} \cdot (i)^{4.3804} \end{array} \right] \quad (\text{III.22})$$

Cette expression est valable pour les nervures et rainures disposées en forme inclinée pour un régime d'écoulement laminaire.

### III.1.2.2. Régime turbulent

De la même façon que le cas précédent, pour le régime turbulent on considère les données de départs suivants :

$\Delta P$ [Pas]	$V_{int}$ [m/s]	$\varepsilon_n$ [cm]	$P_{e-r}$ [cm]	$P_{e-n}$ [cm]	$E_n$ [cm]	$L_n$ [cm]	$i$ [°]	$D_H$ [m]	$\rho$ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\nu$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
16	6.56	2	4.6	9.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	6.1	2	4.6	9.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
13	5.88	2	4.6	9.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	6.74	2	10	15	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	6.32	2	10	15	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
12	5.82	2	10	15	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	6.96	2	14.7	19.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	6.66	2	14.7	19.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
12	6.32	2	14.7	19.5	2	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	6.7	2	14.7	19.5	3	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	6.4	2	14.7	19.5	3	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
12	6.06	2	14.7	19.5	3	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	7.22	2	14.7	19.5	1	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	6.92	2	14.7	19.5	1	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
12	6.6	2	14.7	19.5	1	52	70	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	12.44	2.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	11.8	2.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
13	11.4	2.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
3	5.16	2.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0099	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	4.51	1.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0291	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
14	4.19	1.5	4.6	9.5	2	52	70	0.0291	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
16	7.5	2	14.7	19.5	2	56	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
8	5.86	2	14.7	19.5	2	56	50	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
5	5.24	2	14.7	19.5	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau (III.4) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme inclinée en régime turbulent.**

## Chapitre III Établissement des modèles de calcul des pertes de charge

On remplace les données correspondant aux pertes de charge tableau (III.4) précédentes dans (III.20), on obtient :

$$\begin{bmatrix} -9.0562 & 0.0202 & 0.8531 & 1.5783 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -8.9835 & 0.0202 & 0.8531 & 1.5783 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -8.9468 & 0.0202 & 0.8531 & 1.5783 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0833 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0190 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -8.9365 & 0.0202 & 1.6296 & 2.0351 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.1154 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0714 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0190 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0773 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.4257 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0315 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.4257 & 3.2783 & 4.3048 \\ -8.9769 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.4257 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.1521 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & -0.6729 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.1097 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & -0.6729 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0623 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & -0.6729 & 3.2783 & 4.3048 \\ -9.0132 & 0.9263 & 1.5361 & 2.2613 & 0.7032 & 3.9613 & 4.3048 \\ -8.9603 & 0.9263 & 1.5361 & 2.2613 & 0.7032 & 3.9613 & 4.3048 \\ -8.9259 & 0.9263 & 1.5361 & 2.2613 & 0.7032 & 3.9613 & 4.3048 \\ -8.1332 & 0.9263 & 1.5361 & 2.2613 & 0.7032 & 3.9613 & 4.3048 \\ -9.0767 & -0.6627 & 0.4579 & 1.1831 & -0.3750 & 2.8831 & 4.3048 \\ -9.0031 & -0.6627 & 0.4579 & 1.1831 & -0.3750 & 2.8831 & 4.3048 \\ -9.1901 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.3524 & 4.1469 \\ -8.9434 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.3524 & 4.1469 \\ -8.8316 & 0.0202 & 2.0149 & 2.2975 & 0.0202 & 3.4214 & 4.0332 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \\ u \\ w \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.8163 \\ -4.8044 \\ -4.8050 \\ -4.8704 \\ -4.8752 \\ -4.8646 \\ -4.9346 \\ -4.9800 \\ -5.0294 \\ -4.8585 \\ -4.9004 \\ -4.9454 \\ -5.0080 \\ -5.0566 \\ -5.1161 \\ -6.7791 \\ -6.8070 \\ -6.8121 \\ -6.6931 \\ -3.6717 \\ -3.6580 \\ -5.0841 \\ -5.2837 \\ -5.5301 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse  $x = \text{pinv}(a) * (b)$ .

La solution de ce système d'équations permet d'obtenir :

$$\begin{cases} x = 0.0135 \\ y = -0.1748 \\ z = 1.0392 \\ t = -1.8783 \\ u = 0.1421 \\ w = -1.9354 \\ c = 0.8660 \end{cases}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.0135} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-0.1748} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{1.0392} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-1.8783} \right. \\ \left. \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.1421} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-1.9354} \cdot (i)^{0.8660} \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.23})$$

Et par conséquent le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \left[ (Re)^{-0.0135} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-0.1748} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{1.0392} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-1.8783} \right. \\ \left. \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.1421} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-1.9354} \cdot (i)^{0.8660} \right] \quad (\text{III.24})$$

Cette expression est valable pour les nervures et rainures disposées en forme inclinée pour un régime d'écoulement turbulent.

**III.1.3. troisième cas : Nervures et rainures disposées en forme de V**

Dans cette disposition on a suivi les mêmes étapes de méthode de l'analyse dimensionnelle que nous avons suivie dans la disposition inclinée pour trouver l'expression de coefficient de frottement.

**III.1.3.1. Régime laminaire**

Cette analyse est basée sur les données suivantes :

$\Delta P$ [Pas]	$V_{int}$ [m/s]	$\epsilon_n$ [cm]	$P_{e-r}$ [cm]	$P_{e-n}$ [cm]	$E_n$ [cm]	$L_n$ [cm]	$i$ [°]	$D_H$ [m]	$\rho$ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\nu$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
1	1.7	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	0.98	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
2	1.42	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
1	1.38	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau (III.5) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme de V en régime laminaire.**

On remplace les données correspondant aux pertes de charge tableau (III.5) précédentes dans (III.20), on obtient :

$$\begin{bmatrix} -7.7059 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\ -7.1550 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\ -7.5259 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\ -7.4973 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \\ u \\ w \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.8881 \\ -3.7865 \\ -3.8350 \\ -4.4710 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse  $x = \text{pinv}(a) \cdot (b)$ .

La solution de ce système d'équations permet d'obtenir :

$$\begin{cases} x = 0.1308 \\ y = 0.0478 \\ z = 0.0478 \\ t = 3.0153 \\ u = 0.0478 \\ w = -3.3227 \\ c = 0.7427 \end{cases}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{-0.1308} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{0.0478} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.0478} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{3.0153} \right. \\ \left. \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.0478} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-3.3227} \cdot (i)^{0.7427} \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.25})$$

Et par conséquent le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \left[ (Re)^{-0.1308} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{0.0478} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.0478} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{3.0153} \right. \\ \left. \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{0.0478} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-3.3227} \cdot (i)^{0.7427} \right] \quad (\text{III.26})$$

Cette expression est valable pour les nervures et rainures disposées en forme de V pour un régime d'écoulement laminaire.

### III.1.3.2. Régime turbulent

De la même façon que le cas précédent, pour le régime turbulent on considère les données de départs suivants :

$\Delta P$ [Pas]	$V_{int}$ [m/s]	$\epsilon_n$ [cm]	$P_{e-r}$ [cm]	$P_{e-n}$ [cm]	$E_n$ [cm]	$L_n$ [cm]	$i$ [°]	$D_H$ [m]	$\rho$ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\nu$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
10	5.42	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
9	5.28	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
8	5	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
7	4.68	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
6	4.42	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
5	4.1	2	2	7	2	50	45	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
10	3.38	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
9	3.24	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
8	3.08	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
7	2.82	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
6	2.58	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
5	2.34	2	2	7	2	50	135	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
9	6.22	2	2	7	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
8	6.02	2	2	7	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
7	5.72	2	2	7	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
6	5.4	2	2	7	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
5	5.02	2	2	7	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
4	4.58	2	2	7	2	60	30	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
10	4.42	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
9	4.2	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
8	3.96	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
7	3.7	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
6	3.44	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$
5	3.16	2	2	7	2	60	150	0.0196	1.2	$1.5 \cdot 10^{-5}$

**Tableau (III.6) : Pertes de charge prélevées pour la variante des nervures et rainures disposées en forme de V en régime turbulent.**

## Chapitre III Établissement des modèles de calcul des pertes de charge

On remplace les données correspondant aux pertes de charge tableau (III.6) précédentes dans (III.20), on obtient :

$$\begin{bmatrix}
 -8.8653 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\
 -8.8392 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\
 -8.7847 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\
 -8.7185 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\
 -8.6614 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\
 -8.5862 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 4.0943 \\
 -8.3931 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\
 -8.3508 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\
 -8.3002 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\
 -8.2120 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\
 -8.1230 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\
 -8.0254 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.2391 & 5.4806 \\
 -9.0030 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 3.8969 \\
 -8.9703 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 3.8969 \\
 -8.9192 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 3.8969 \\
 -8.8616 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 3.8969 \\
 -8.7887 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 3.8969 \\
 -8.6969 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 3.8969 \\
 -8.6614 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348 \\
 -8.6103 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348 \\
 -8.5515 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348 \\
 -8.4836 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348 \\
 -8.4107 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348 \\
 -8.3258 & 0.0202 & 0.0202 & 1.2730 & 0.0202 & 3.4214 & 5.4348
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 x \\
 y \\
 z \\
 t \\
 u \\
 w \\
 c
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -4.9045 \\
 -4.9575 \\
 -4.9663 \\
 -4.9676 \\
 -5.0074 \\
 -5.0394 \\
 -3.9600 \\
 -3.9808 \\
 -3.9973 \\
 -3.9544 \\
 -3.9307 \\
 -3.9177 \\
 -5.2852 \\
 -5.3376 \\
 -5.3689 \\
 -5.4079 \\
 -5.4443 \\
 -5.4840 \\
 -4.4966 \\
 -4.4998 \\
 -4.4999 \\
 -4.4976 \\
 -4.5060 \\
 -4.5186
 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse  $x = \text{pinv}(a) * (b)$ .

La solution de ce système d'équations permet d'obtenir :

$$\begin{cases}
 x = 0.0370 \\
 y = -0.0021 \\
 z = -0.0021 \\
 t = -0.1301 \\
 u = -0.0021 \\
 w = -2.1695 \\
 c = 0.6354
 \end{cases}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \cdot \left[ (Re)^{0.0370} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-0.0021} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0021} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-0.1301} \right. \\ \left. \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{-0.0021} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-2.1695} \cdot (i)^{0.6354} \right] \cdot V^2 \quad (\text{III.27})$$

Et par conséquent le coefficient de frottement prend l'expression suivante :

$$\lambda = \left[ (Re)^{0.0370} \cdot \left(\frac{\varepsilon_n}{D_H}\right)^{-0.0021} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0021} \cdot \left(\frac{P_{e-n}}{D_H}\right)^{-0.1301} \right. \\ \left. \cdot \left(\frac{E_n}{D_H}\right)^{-0.0021} \cdot \left(\frac{L_n}{D_H}\right)^{-2.1695} \cdot (i)^{0.6354} \right] \quad (\text{III.28})$$

Cette expression est valable pour les nervures et rainures disposées en forme de V pour un régime d'écoulement turbulent.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes qu'on a suivies pour aboutir à l'établissement des modèles empiriques, lier les pertes de charge par des caractéristiques géométriques des nervures et rainures des différents types des dispositions étudiées, par l'emploi de la méthode de l'analyse dimensionnelle, dite aussi théorème de (Vaschy-Buckingham). Qui permet de donner le nombre de groupements sans dimension indépendante.

## *Conclusion générale*

L'objectif essentiel de ce travail est d'étudier l'influence des rugosités artificielles qui peuvent être insérées sur les pertes de charge. Pour cela on a élaboré un modèle des nervures et rainures, conçues de telle sorte à répondre à certaines conditions d'utilisation, en vue d'améliorer la qualité de transfert de chaleur.

Une série de manipulations expérimentales a été effectuée en présence des configurations des nervures et rainures, ce qui nous a permis d'obtenir un nombre important des tableaux des mesures à traiter qui exprime la chute de pression engendrée en fonction du débit volumique. La comparaison des graphes montre que la configuration des nervures et rainures disposées en forme de V le moins de perte de charge.

Pour mettre en corrélation les caractéristiques géométriques des configurations des nervures et rainures testées en fonction du régime d'écoulement et des paramètres physiques de l'air, nous avons eu recours à la méthode de l'analyse dimensionnelle. Cette analyse nous a permis d'obtenir des relations empiriques, qui expriment les pertes et le coefficient correspondant, qui vérifient les résultats expérimentaux trouvés. Pour chaque type de configuration on a établi deux modèles empiriques selon la nature et le régime d'écoulement.

La relation (III.10) est valable pour les nervures et rainures disposées en rangées pour un régime d'écoulement laminaire et (III.12) est valable pour les nervures et rainures disposées en rangées pour un régime d'écoulement turbulent.

La relation (III.22) est valable pour les nervures et rainures disposées en forme inclinée pour un régime d'écoulement laminaire et (III.24) est valable pour les nervures et rainures disposées en forme inclinée pour un régime d'écoulement turbulent.

La relation (III.26) valable pour les nervures et rainures disposées en forme de V pour un régime d'écoulement laminaire et (III.28) est valable pour les nervures et rainures disposées en forme de V pour un régime d'écoulement turbulent.

Par les résultats expérimentaux des valeurs des pertes de charge montrent que l'adjonction de ces rugosités artificielles (nervures et rainures) dans le conduit utile se manifeste par une diminution des pertes de charge.



*Références bibliographiques*

- [1] S. Bejaoui, M.F. Karoui, S. Bellelah, M. Chouchéne. Cours mécanique des fluides 2. IZET Nabeul, (2005).
- [2] D. Huilier. Ecoulements en conduites – Généralités. Année 2009 / 2010.
- [3] B. Achour, Calcul des conduites et canaux par le MMR. Larhyss édition, Algérie, (2007).
- [4] N. Chouchane. Etude globale et locale de l'influence de la géométrie sur les pertes de charge occasionnées par des obstacles métalliques de formes diverses dans un conduit rectangulaire, cas d'un fluide incompressible. Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie, 2012.
- [5] B.N. Prasad, J.S. Saini. Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar air heater. *Sol Energy*, 41 (6): 555–60, 1988.
- [6] M.M. Sahu, J.L. Bhagoria. Augmentation of heat transfer coefficient by using 90° broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater. *Renew Energy*, 30:2057–63, 2005.
- [7] D. Gupta, S.C. Solanki, J.S. Saini. Heat and fluid flow in rectangular solar air heater ducts having transverse rib roughness on absorber plates. *Solar Energy* 51, 31-37, 1993.
- [8] A.M.E. Momin, J.S. Saini, S.C. Solanki. Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate. *Int J Heat Mass Transfer*, 45, 3383-3396, 2002.
- [9] K.B. Muluwork, J.S. Saini, S.C. Solanki. Studies on discrete RIB roughened solar air heaters. In: *Proceedings of National Solar Energy Convention, Roorkee*; pp. 75–84, 1998.
- [10] S.V. Karmare, A.N. Tikekar. Heat transfer and friction factor correlation for artificially roughened duct with metal grit ribs. *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol. 50, 4342-4351, 2007.

- [11] A. Kumar, A. Lanjewar. Effect on Nusselt Number and Friction Factor by Variation in Roughness Geometry-A Review. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 03 Issue: 06 / June-2016.
- [12] S.K. Saini, R.P. Saini. Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having arc-shaped wire as artificial roughness. Solar Energy, Vol. 83(12), 1118-1130, 2008.
- [13] R. Karwa, S.C. Solanki, J.S. Saini. Heat transfer coefficient and friction factor correlations for the transitional flow regime in rib-roughened rectangular ducts. Int J Heat Mass Transf, 42, 1597-1615, 1999.
- [14] A.R. Jaurker , J.S. Saini, B.K. Gandhi. Heat transfer and friction characteristics of Energy, 80(8):895–907, 2006.
- [15] R.P. Saini, J.S. Saini. Heat transfer and friction factor correlations for artificially roughened ducts with expended metal mesh as roughness element. Int J Heat Mass Transfer, 40(4), 973-986, 1997.
- [16] R.P. Saini, J. Verma. Heat transfer and friction factor correlations for a duct having dimple-shape artificial roughness for solar air heaters. Energy, 33, 1277-1287, 2008.
- [17] H.M. Yeh, W.H. Chou. Efficiency of solar air heaters with baffles. Energy, 16:983–7,1991.
- [18] S. Sripattanapipat, P. Promvonge. Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond shaped baffles. Int Commun Heat Mass Transfer, 36:32–8,2009.
- [19] Youcef–Ali S. Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing. Renew Energy, 30:271–280, 2005.

## **Résumé :**

L'objectif de ce travail consiste à établir des modèles empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des rugosités artificielles dites nervures et rainures en bois et aux différents modes de dispositions de celle-ci dans une conduite rectangulaire. Pour cela, un dispositif expérimental a été mis au point pour mesurer les pertes de charge occasionnées par les nervures et rainures 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 nervures et rainures pour différents régimes d'écoulement.

**Mot clés :** corrélation, pertes de charge, rugosités artificielles, dispositions, nervures, rainures.

## **Abstract :**

The objective of this work is to find empirical models linking load losses to the geometric characteristics of artificial roughness called ribs and grooves and different modes of provisions of this in rectangular channel, for this an experimental design was set up to measure the load caused by ribs and grooves between the upstream and downstream of the channel. The experimental measurement made have enabled us to establish empirical relationships to evaluate losses in accordance with load losses configuration and arrangement of ribs and grooves for different flow regimes.

**Key words :** losses, correlation, artificial roughness, ribs, grooves.

## **ملخص :**

الهدف من هذا العمل المنجز هو إيجاد نماذج رقمية تربط الضياع في الشحنتات بالخصائص الهندسية للخشونة الاصطناعية على شكل أضلاع و أخاديد من خشب ذات تموضعات متعددة داخل قناة مستطيلة الشكل، و لتحقيق هذا الهدف اعدنا القناة وقمنا بتجهيزها بعوائق اصطناعية (أضلاع و أخاديد) ذات أبعاد مختلفة و من اجل قياس فرق الضغط أوصلنا مدخل و مخرج القناة بجهاز قياس فرق الضغط. النتائج التجريبية سمحت لنا من انجاز علاقات رقمية تسمح بتقييم الضياع في الطاقة بدلالة هندسة العوائق و تموضعها و ذلك لمختلف أنواع التدفقات .

## **الكلمات المفتاحية:**

نماذج رقمية، الضياع في الشحنتات، خشونة اصطناعية، أضلاع، أخاديد، تموضعات.