



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de génie mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**Chaïma TOUMI**

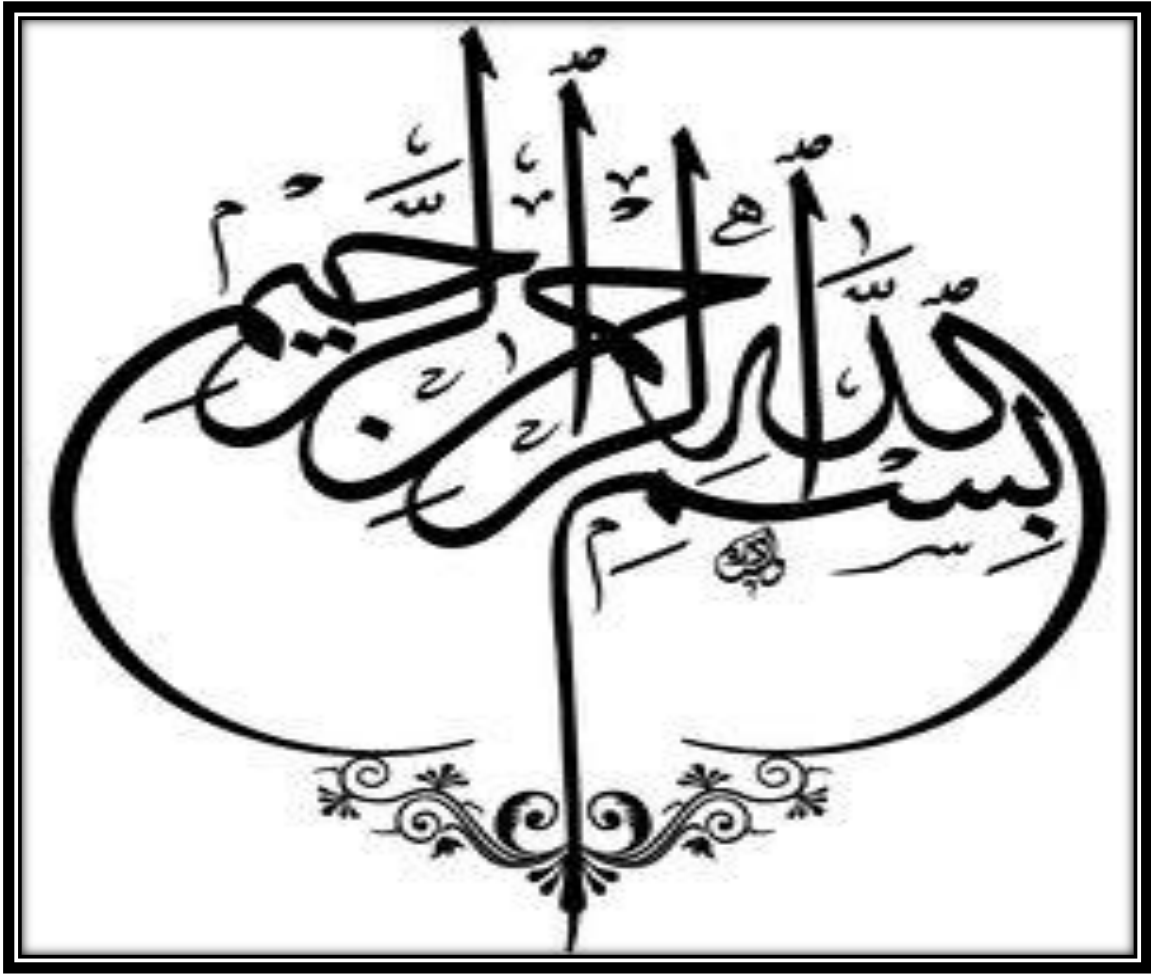
Le : mercredi 10 juillet 2019

## **Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire plan à air muni des chicanes**

---

### **Jury :**

|     |             |     |                      |            |
|-----|-------------|-----|----------------------|------------|
| Dr. | M.N. AMRANE | Pr  | Université de Biskra | Président  |
| Dr. | N. CHOUCANE | MCA | Université de Biskra | Rapporteur |
| Dr. | A. MOUMMI   | Pr  | Université de Biskra | Examineur  |



"شَهِدَ اللَّهُ أَنَّهُ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ وَالْمَلَائِكَةُ وَأُولُو الْعِلْمِ قَائِمًا  
بِالْقِسْطِ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ الْعَزِيزُ الْحَكِيمُ"

صدق الله العظيم



## *Dédicace*

*En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce travail :  
D'abord à mes parents :*

*A l'homme de ma vie, mon soutien moral et source de joie et de bonheur*

*Mon très cher père SAAD, pour ses sacrifices, ses conseils, qui m'a  
Encouragé à aller de l'avant tout au long de mes études.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon  
bonheur.*

*À ma très chère mère FATIHA qui m'a tout donnée : qui m'a soutenue par ses prières, son  
amour, sa tendresse et qui est toujours présente, et continue de l'être pour faire mon bonheur.  
Maman que j'adore.*

*À mes chers frères :*

*Ils sont mon deuxième père, Mon aide après Dieu dans la vie :*

*TAHA et ADEM*

*Et mes belles chères sœurs : Mon amour éternel :*

*AMEL et FIRDOUS*

*À mes amis et particulièrement les plus intimes, en témoignage des moments inoubliables, des  
sentiments sincères, et des liens solides qui nous unissent : ROMAÏSSA, SARA, AYMEN,  
QUSAI.*

*Et je dédie ce travail aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours  
à mes côtés et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin.*

*I am grateful to those who answered " NO "; thanks to them,*

*I made it myself ". Albert.E*

**CHAIMA TOUMI**



## Remerciement

*En premier lieu, je remercie DIEU tout puissant, qui j'ai donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Mon vifs remerciements, accompagnés de toute mon gratitude, vont tout d'abord à mon encadreur **DR. Nacer CHOUCANE**, pour m'avoir proposé ce sujet et dirigé mon travail, pour toute son aide, je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de ce mémoire. Les conseils qu'il m'a prodigués, la patience, la confiance qu'il m'a témoignée ont été déterminants dans la réalisation de ce travail de recherche.*

*Je tiens à remercier les ingénieurs et techniciens du hall technologique de génie mécanique de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Biskra pour son aide à achever la partie expérimentale.*

*Je tiens également à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Enfin, merci à ma famille, à vous qui m'avez soutenu et avez su être mon inspiration. Merci à mes chers parents qui sans eux je ne serais parvenu là où je suis. Un grand merci à mes chers frères et mes sœurs.*

**CHAIMA TOUMI**

RESUME

L'objectif de cette étude consiste à établir des modèles empiriques de calcul du coefficient d'échange par convection et le nombre de Nusselt, lors de l'écoulement de l'air dans un conduit rectangulaire, dont le plan inférieure est muni des chicanes perforées de formes V. Par la méthode de l'analyse dimensionnelle, on a pu mettre en relation tous les paramètres physiques (le fluide), thermo-physiques et les caractéristiques géométriques (les chicanes + canal) et en fonction du régime d'écoulement en estime un coefficient d'échange thermique dans l'espace d'écoulement du fluide.

**Mots clés :** capteur solaire à air, corrélation, le coefficient d'échange thermique, convection, rugosités artificielles, les chicanes.

ABSTRACT

The objective of this study consists in establishing an empirical models calculation of the coefficient of thermal exchange by convection and Nusselt number, during the air flow in a rectangular conduit, whose lower plan is provided with V-shaped perforated baffles. By the method of the dimensional analysis, one could connect all the physical (fluid), thermo-physical parameters and the geometrical characteristics (baffles + canal) and according to the mode of flow one estimates a coefficient of thermal exchange in the space of flow of the fluid.

**Key words:** solar air flat plate, correlations, the coefficient of thermal exchange, convection, artificial roughness, baffles.

الخلاصة

إن هذه الدراسة تهدف إلى إنشاء نماذج عددية لمعامل الحمل الحراري ومحدد نسلت لسريان هواء داخل قناة مستطيلة الشكل سطحها السفلي مزود بخشونة إسطناعية على شكل V تحتوي على ثقبوب. وبأسلوب التحليل البعدي تمكنا من وضع علاقة تربط معامل الحمل الحراري بالخصائص الفيزيائية (المائع) والثرموديناميكية والتمييزات الهندسية (العوائق + القناة) حسب طبيعة السريان.

**الكلمات المفتاحية:** لاقط شمسي هوائي، نماذج رقمية، معامل التبادل الحراري، حمل حراري، خشونة إسطناعية، عوائق.

# **SOMMAIRE**

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>Dédicace.....</b>              | <b>I</b>   |
| <b>Remerciements.....</b>         | <b>II</b>  |
| <b>Résumé.....</b>                | <b>III</b> |
| <b>Abstract.....</b>              | <b>III</b> |
| <b>المخلص.....</b>                | <b>III</b> |
| <b>Sommaire.....</b>              | <b>IV</b>  |
| <b>Listes des figures.....</b>    | <b>VII</b> |
| <b>Liste des tableaux.....</b>    | <b>XI</b>  |
| <b>Nomenclature.....</b>          | <b>XIX</b> |
| <b>Introduction générale.....</b> | <b>01</b>  |

## **CHAPITRE I : Aperçu théorique sur les capteurs.**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 03 |
| I.1. Les capteurs solaires.....   | 03 |
| I.1.1. Les panneaux solaires photovoltaïques solaire plan.....                          | 03 |
| I.1.2. Les capteurs solaires thermiques.....  | 04 |
| I.1.2.1. Les capteurs plans.....  | 04 |
| I.1.2.1.1. Les différents composants d'un capteur.....                                  | 05 |
| I.1.2.2. Capteurs concentrateurs.....   | 10 |
| I.2. Rendements d'un capteur solaire.....   | 11 |
| I.2.1. Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan..... | 12 |
| I.2.1.1. Les paramètres externes.....   | 12 |
| I.2.1.2. Les paramètres internes.....   | 12 |
| I.3. Concept de la rugosité artificielle.....   | 14 |

Conclusion..... 16

**CHAPITRE II : Synthèse bibliographique sur Les différentes rugosités utilisées pour les capteurs solaires à air dans la littérature.**

Introduction..... 17

II.1. Les différentes rugosités utilisées pour les capteurs solaires à air dans la littérature..... 17

II.1.1. Fixation à fil métallique..... 17

II.1.1.1. Fils transversaux continus..... 17

II.1.1.2. Fils transversaux discontinus..... 19

II.1.1.3. Fils inclinés continus ..... 20

II.1.1.4. Fils inclinés discontinus..... 21

II.1.1.5. Fils inclinés et en forme de **V** (continus, discontinus)..... 22

II.1.1.6. Canal rectangulaire de petit fils du métal ..... 26

II.1.1.7. Canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés ..... 27

II.1.1.8. Canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc ..... 27

II.1.2. Nervures formées par usinage..... 29

II.1.2.1. Nervures en forme de cales..... 30

II.1.2.2. Nervures chanfreinées..... 30

II.1.2.3. Nervures combinées avec d'autres formes de rugosités..... 32

II.1.3. Nervures de type Bosses (alvéoles)/ saillies..... 33

II.1.4. Grillage ou grille métallique étendue..... 37

II.1.5. Nervures en forme de **K**..... 38

II.1.6. Nervure en forme de **U** inversés ..... 39

II.1.7. Les chicane..... 39

II.1.7.1. Chicanes rectangulaire avec une partie supérieure inclinée..... 39

II.1.7.2. Chicanes en forme diverses..... 41

Conclusion..... 51



**CHAPITRE III : Etude expérimentale.**

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 52 |
| III.1. Description du dispositif expérimental.....                       | 52 |
| III.2. Types de configurations de chicane étudiées.....                  | 56 |
| III.3. Tableaux des mesures des échanges thermiques enregistrées.....    | 58 |
| III.4. Représentation graphique des rendements en fonction du débit..... | 75 |
| III.5. Discussions et interprétations des résultats.....                 | 81 |
| Conclusion.....  | 82 |

**CHAPITRE IV : Etablissement des modèles de calcul des coefficients d'échange par convection.**

|  |            |
|--|------------|
| Introduction.....  | 83         |
| IV.1. Méthode de calcul.....   | 83         |
| IV.1.1. Les chicanes en forme de V.....  | 83         |
| IV.2. Régime turbulent ( $Re > 2300$ ).....  | 86         |
| IV.3. Régime laminaire ( $Re < 2300$ ).....  | 92         |
| IV.4. Représentation graphique de nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds..... | 98         |
| IV.4.1. Pour un régime turbulent.....  | 98         |
| IV.4.2. Pour le régime laminaire.....  | 100        |
| IV.5. Discussions et interprétations des résultats.....                                    | 102        |
| Conclusion.....  | 103        |
| <b>Conclusions générale.....</b>   | <b>104</b> |
| <b>Bibliographie.....</b>  | <b>105</b> |



**Liste des figures**

| <b>N<sup>o</sup></b>  | <b>Le titre</b>  | <b>La page</b> |
|---|--|----------------|
| <b>CHAPITRE I : Aperçu théorique sur les capteurs</b>   |  |                |
| <b>Figure (I.1)</b>   | <i>Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque</i>  | <b>04</b>      |
| <b>Figure (I.2)</b>   | <i>Schéma de principe d'un capteur solaire plan</i>  | <b>05</b>      |
| <b>Figure (I.3)</b>   | <i>Transparence du verre</i>   | <b>07</b>      |
| <b>Figure (I.4)</b>   | <i>Schéma simple d'un capteur solaire concentrateur</i>  | <b>11</b>      |
| <b>CHAPITRE II : Synthèse bibliographique sur Les différentes rugosités utilisées pour les capteurs solaires à air dans la littérature.</b> |  |                |
| <b>Figure (II.1)</b>  | <i>Schéma d'une conduite rectangulaire muni des fils transversaux continus</i>                                       | <b>18</b>      |
| <b>Figure (II.2)</b>  | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques transversaux discontinus</i>                            | <b>20</b>      |
| <b>Figure (II.3)</b>  | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques inclinés continus</i>                                   | <b>20</b>      |
| <b>Figure (II.4)</b>  | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques inclinés discontinus</i>                                | <b>21</b>      |
| <b>Figure (II.5)</b>  | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme de V continus</i>                              | <b>22</b>      |
| <b>Figure (II.6)</b>  | <i>(a) nervure en forme V ; (b) nervure en forme de multi-V ; (c) nervure en forme de multi- V avec écart (Trou)</i> | <b>23</b>      |
| <b>Figure (II.7)</b>  | <i>Schéma d'absorbeur muni de fils métalliques discontinus en V -Down et V -Up</i>                                   | <b>24</b>      |
| <b>Figure (II.8)</b>  | <i>Rugosité multiple en forme de V</i>   | <b>25</b>      |
| <b>Figure (II.9)</b>  | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni de petit fils de métal</i>   | <b>26</b>      |
| <b>Figure (II.10)</b>   | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés</i>           | <b>27</b>      |
| <b>Figure (II.11)</b>   | <i>Détails du contour du fil</i>   | <b>28</b>      |

## **LISTE DES FIGURES**

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| <b>Figure (II.12)</b>                      | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc</i>                      | <b>29</b> |
| <b>Figure(II.13)</b>                       | <i>Schéma des nervures en forme de cales (dent de scie)</i>  | <b>30</b> |
| <b>Figure(II.14)</b>                       | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des nervures chanfreinées</i>                                | <b>31</b> |
| <b>Figure (II.15)</b>                      | <i>Combinaison des nervures et rainures transversales</i>  | <b>32</b> |
| <b>Figure (II.16)</b>                      | <i>Schéma d'un canal rectangulaire muni des nervures chanfreinées</i>                                | <b>33</b> |
| <b>Figure (II.17)</b>                      | <i>Schéma de la géométrie en forme de bosse</i>  | <b>34</b> |
| <b>Figure (II.18)</b>                      | <i>Plaques dures de différents angles d'apex</i>   | <b>35</b> |
| <b>Figure (II.19)</b>                      | <i>Schéma d'un canal rectangulaire avec rugosités type bosses (alvéoles)</i>                         | <b>36</b> |
| <b>Figure (II.20)</b>                      | <i>Schéma d'un canal rectangulaire de type grille métallique étendue</i>                             | <b>37</b> |
| <b>Figure (II.21)</b>                      | <i>Schéma de la plaque absorbante rugueuse en forme <b>K</b></i>                                     | <b>38</b> |
| <b>Figure (II.22)</b>                      | <i>Schéma des nervures en forme de <b>U</b> inversé</i>  | <b>39</b> |
| <b>Figure (II.23)</b>                      | <i>Disposition en ligne et en quinconce des chicanes dans la veine d'air mobile</i>                  | <b>40</b> |
| <b>CHAPITRE III : Étude expérimentale.</b> |  |           |
| <b>Figure (III.1)</b>                      | <i>Dispositif expérimental</i>   | <b>53</b> |
| <b>Figure (III.2)</b>                      | <i>Aspirateur</i>  | <b>54</b> |
| <b>Figure (III.3)</b>                      | <i>Thermomètre</i>   | <b>54</b> |
| <b>Figure (III.4)</b>                      | <i>Variateur de vitesse</i>  | <b>54</b> |
| <b>Figure (III.5)</b>                      | <i>Anémomètre à hélice</i>   | <b>54</b> |
| <b>Figure (III.6)</b>                      | <i>Pyranomètre</i>   | <b>54</b> |
| <b>Figure (III.7)</b>                      | <i>Les barrettes des chicanes :<br/><math>D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, L_{ch} = 30\text{cm}</math></i>   | <b>55</b> |
| <b>Figure (III.8)</b>                      | <i>Les barrettes des chicanes :<br/><math>D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, L_{ch} = 30\text{cm}</math></i>   | <b>55</b> |
| <b>Figure (III.9)</b>                      | <i>Les barrettes des chicanes :<br/><math>D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, L_{ch} = 28 \text{ cm}</math></i> | <b>55</b> |

## LISTE DES FIGURES

|                            |   |           |
|----------------------------|---|-----------|
| <b>Figure<br/>(III.10)</b> | <i>Chicanes en forme de V :</i><br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, L_{ch} = 30 \text{ cm}$  | <b>55</b> |
| <b>Figure<br/>(III.11)</b> | <i>Chicanes en forme de V :</i><br>$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, L_{ch} = 30 \text{ cm}$  | <b>55</b> |
| <b>Figure<br/>(III.12)</b> | <i>Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.</i><br>$(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 19 \text{ cm}, 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},$<br>$\varepsilon = 1.75 \text{ cm}, \phi = 30^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm})$                          | <b>75</b> |
| <b>Figure<br/>(III.13)</b> | <i>Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.</i><br>$(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 19 \text{ cm}, 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},$<br>$\varepsilon = 1.75 \text{ cm}, \phi = 150^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm})$                         | <b>76</b> |
| <b>Figure<br/>(III.14)</b> | <i>Figure (III.14) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.</i><br>$(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 19 \text{ cm}, 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},$<br>$\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, \phi = 60^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm})$ | <b>77</b> |
| <b>Figure<br/>(III.15)</b> | <i>Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.</i><br>$(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 19 \text{ cm}, 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},$<br>$\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, \phi = 120^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm})$                  | <b>78</b> |

## LISTE DES FIGURES

|   |   |            |
|---|---|------------|
| <b>Figure<br/>(III.16)</b>  | <p><i>Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.</i></p> <p><math>(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},</math><br/> <math>\varepsilon = 1.75 \text{ cm}, 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>\emptyset = 30^\circ, 150^\circ, 60^\circ, 120^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm})</math></p>         | <b>79</b>  |
| <b>Figure<br/>(III.17)</b>  | <p><i>Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.</i></p> <p><math>(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm},</math><br/> <math>\varepsilon = 1.75 \text{ cm}, 2.299038106 \text{ cm}, \emptyset = 60^\circ, 120^\circ,</math><br/> <math>L_{ch} = 30 \text{ cm}, 28 \text{ cm})</math></p> | <b>80</b>  |
| <b>CHAPITRE IV : Établissement des modèles de calcul des coefficients d'échange par convection.</b> |   |            |
| <b>Figure (IV.1)</b>  | <i>Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (<math>R_e &gt; 2300</math>) pour le régime turbulent</i>   | <b>98</b>  |
| <b>Figure (IV.2)</b>  | <i>Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (<math>R_e &gt; 2300</math>) pour le régime turbulent</i>   | <b>99</b>  |
| <b>Figure (IV.3)</b>  | <i>Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (<math>R_e &lt; 2300</math>) pour le régime laminaire</i>   | <b>100</b> |
| <b>Figure (IV.4)</b>  | <i>Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds (<math>R_e &lt; 2300</math>) pour le régime laminaire</i>   | <b>101</b> |

**Liste des tableaux**

| <b>N<sup>o</sup></b>   | <b>Le titre</b>  | <b>La page</b> |
|--|--|----------------|
| <b>CHAPITRE I : Aperçu théorique sur les capteurs</b>  |  |                |
| <b>Tableau (I.1)</b>   | <i>Conductivité thermique de quelque matériau</i>  | <b>09</b>      |
| <b>Tableau (I.2)</b>   | <i>Géométries des rugosités et les paramètres caractéristiques</i>   | <b>15</b>      |
| <b>CHAPITRE II : Synthèse bibliographique sur les différentes rugosités utilisées pour les capteurs solaires à air dans la littérature</b> |  |                |
| <b>Tableau (II.1)</b>  | <i>Les conditions expérimentales</i>   | <b>19</b>      |
| <b>Tableau (II.2)</b>  | <i>Coefficient de transfert de chaleur et corrélations des coefficients de frottement pour différentes géométries de rugosité utilisées dans les gaines de réchauffeur d'air solaire</i> | <b>23</b>      |
| <b>Tableau (II.3)</b>  | <i>La gamme des paramètres</i>   | <b>28</b>      |
| <b>Tableau (II.4)</b>  | <i>La gamme des paramètres</i>   | <b>38</b>      |
| <b>Tableau (II.5)</b>  | <i>Les différents configurations des chicanes</i>  | <b>42</b>      |
| <b>Tableau (II.6)</b>  | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en rangées</i>  | <b>43</b>      |
| <b>Tableau (II.7)</b>  | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en quinconce</i>  | <b>44</b>      |
| <b>Tableau (II.8)</b>  | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaire disposées en rangée</i>  | <b>45</b>      |
| <b>Tableau (II.9)</b>  | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaire disposées en quinconce</i>   | <b>46</b>      |
| <b>Tableau (II.10)</b>   | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en rangée</i>  | <b>47</b>      |
| <b>Tableau (II.11)</b>   | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en quinconce</i>   | <b>48</b>      |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| <b>Tableau<br/>(II.12)</b>                | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en rangée</i>  | <b>49</b> |
| <b>Tableau<br/>(II.13)</b>                | <i>Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en quinconce</i>   | <b>50</b> |
| <b>CHAPITRE III : Etude expérimentale</b> |   |           |
| <b>Tableau<br/>(III.1)</b>                | <i>Configuration des chicanes en forme V (cas 1)</i>  | <b>56</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.2)</b>                | <i>Configuration des chicanes en forme V (cas 2)</i>  | <b>57</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.3)</b>                | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal sans chicanes (lisse).</i>   | <b>58</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.4)</b>                | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 30^\circ)$ | <b>58</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.5)</b>                | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 7.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 10 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 30^\circ)$  | <b>59</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.6)</b>                | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 30^\circ)$ | <b>59</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|                             |  |           |
|-----------------------------|--|-----------|
| <b>Tableau<br/>(III.7)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 39.5 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 30^\circ)$        | <b>60</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.8)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>60</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.9)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$  | <b>61</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.10)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>61</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.11)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>62</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.12)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>62</b> |



## LISTE DES TABLEAUX

|                             |  |           |
|-----------------------------|--|-----------|
| <b>Tableau<br/>(III.13)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$  | <b>63</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.14)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>63</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.15)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>64</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.16)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$   | <b>64</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.17)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 10 \text{ cm}, P_{e-s} = 9.6 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$  | <b>65</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.18)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 20 \text{ cm}, P_{e-s} = 19.2 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$ | <b>65</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|                             |   |           |
|-----------------------------|---|-----------|
| <b>Tableau<br/>(III.19)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 40 \text{ cm}, P_{e-s} = 38.4 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ)$  | <b>66</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.20)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ)$        | <b>66</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.21)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 7.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 10 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ)$         | <b>67</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.22)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ)$        | <b>67</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.23)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm},$<br>$P_{e-s} = 39.5 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$<br>$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ)$        | <b>68</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.24)</b> | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)$ | <b>68</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|                             |   |           |
|-----------------------------|---|-----------|
| <b>Tableau<br/>(III.25)</b> | <p><i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i></p> <p><math>(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)</math></p>  | <b>69</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.26)</b> | <p><i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i></p> <p><math>(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ)</math></p> | <b>69</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.27)</b> | <p><i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i></p> <p><math>(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)</math></p> | <b>70</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.28)</b> | <p><i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i></p> <p><math>(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)</math></p> | <b>70</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.29)</b> | <p><i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i></p> <p><math>(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)</math></p>  | <b>71</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.30)</b> | <p><i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i></p> <p><math>(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm},</math><br/> <math>P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)</math></p> | <b>71</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| <b>Tableau<br/>(III.31)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)$ | <b>72</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.32)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)$   | <b>72</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.33)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 10 \text{ cm}, P_{e-s} = 9.6 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)$  | <b>73</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.34)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 20 \text{ cm}, P_{e-s} = 19.2 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)$ | <b>73</b> |
| <b>Tableau<br/>(III.35)</b>  | <i>Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :</i><br>$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm},$<br>$P_{e-r} = 40 \text{ cm}, P_{e-s} = 38.4 \text{ cm},$<br>$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ)$ | <b>74</b> |
| <b>CHAPITRE IV : Etablissement des modèles de calcul des coefficients d'échange par convection</b> |   |           |
| <b>Tableau (IV.1)</b>  | <i>Unité et dimension des grandeurs physiques</i>   | <b>84</b> |
| <b>Tableau (IV.2)</b>  | <i>Le coefficient d'échange par convection prélevés pour la variante des chicanes pour le régime turbulent</i>  | <b>88</b> |

## ***LISTE DES TABLEAUX***

---

|                              |  |           |
|------------------------------|--|-----------|
| <b><i>Tableau (IV.3)</i></b> | <i>Le coefficient d'échange par convection prélevés pour la variante des chicanes pour le régime laminaire</i> | <b>93</b> |
|------------------------------|--|-----------|

*Nomenclature*

| <b>Symboles</b>                    | <b>Désignation</b>   | <b>L'unité</b>                |
|------------------------------------|--|-------------------------------|
| <b><math>G</math></b>              | <i>Rayonnement globale incident</i>                                  | <b><math>[w/m^2]</math></b>   |
| <b><math>S</math></b>              | <i>Surface de la paroi absorbante</i>                                | <b><math>[m^2]</math></b>     |
| <b><math>G(i, \gamma)^*</math></b> | <i>Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur</i> | <b><math>[w/m^2]</math></b>   |
| <b><math>p/e</math></b>            | <i>Le pas de rugosité relatif</i>                                    | <b>/</b>                      |
| <b><math>e/D_H</math></b>          | <i>La hauteur de rugosité relative</i>                               | <b>/</b>                      |
| <b><math>g/p</math></b>            | <i>Rapport entre la position de la rainure et le pas</i>             | <b>/</b>                      |
| <b><math>W/H</math></b>            | <i>Le rapport d'aspect</i>   | <b>/</b>                      |
| <b><math>W/w</math></b>            | <i>La position relative de l'intervalle</i>                          | <b>/</b>                      |
| <b><math>B/S</math></b>            | <i>La longueur de rugosité relative</i>                              | <b>/</b>                      |
| <b><math>l/s</math></b>            | <i>Le paramètre de rugosité</i>                                      | <b>/</b>                      |
| <b><math>e^+</math></b>            | <i>Nombre de Reynolds de rugosité</i>                                | <b>/</b>                      |
| <b><math>m</math></b>              | <i>Le débit massique</i>   | <b><math>[kg/s]</math></b>    |
| <b><math>Q_u</math></b>            | <i>La chaleur fournie à l'air</i>                                    |                               |
| <b><math>Q_v</math></b>            | <i>Débit volumique du capteur</i>                                    | <b><math>m^3/s.m^2</math></b> |
| <b><math>A_0</math></b>            | <i>Zone de la gorge de la plaque d'orifice</i>                       | <b><math>[m^2]</math></b>     |
| <b><math>C_d</math></b>            | <i>Coefficient de décharge pour débit mètre à orifice</i>            | <b>/</b>                      |
| <b><math>\delta p</math></b>       | <i>Chute de pression dans la section d'essai</i>                     | <b><math>[Pa]</math></b>      |
| <b><math>k</math></b>              | <i>Conductivité thermique d'air</i>                                  | <b><math>[w/m.K]</math></b>   |
| <b><math>V</math></b>              | <i>La vitesse de l'air</i>   | <b><math>[m/s]</math></b>     |
| <b><math>f = \lambda</math></b>    | <i>Le coefficient de frottement</i>                                  | <b>/</b>                      |
| <b><math>h_c</math></b>            | <i>Coefficient d'échange par convection</i>                          | <b><math>[w/m^2.K]</math></b> |
| <b><math>D_H</math></b>            | <i>Diamètre hydraulique</i>  | <b><math>[m]</math></b>       |
| <b><math>D_{tr}</math></b>         | <i>Diamètre du trou</i>  | <b><math>[m]</math></b>       |
| <b><math>C_p</math></b>            | <i>Chaleur massique de l'air</i>                                     | <b><math>[J/kg.K]</math></b>  |
| <b><math>V_{exp}</math></b>        | <i>La vitesse expérimentale</i>                                      | <b><math>[m/s]</math></b>     |
| <b><math>V_{int}</math></b>        | <i>La vitesse intérieure</i>   | <b><math>[m/s]</math></b>     |
| <b><math>L_{ch}</math></b>         | <i>Longueur du chicane</i>   | <b><math>[m]</math></b>       |

## NOMENCLATURE

|            |  |                     |
|------------|--|---------------------|
| $l_c$      | <i>Largeur du canal</i>  | [m]                 |
| $L_c$      | <i>Longueur du canal</i>   | [m]                 |
| $A_c$      | <i>Surface du capteur solaire</i>  | [m <sup>2</sup> ]   |
| $P_{e-r}$  | <i>Le pas entre les rangées</i>  | [m]                 |
| $P_{e-s}$  | <i>Le pas entre les sommets</i>  | [m]                 |
| $P_{e-tr}$ | <i>Le pas entre les trous</i>  | [m]                 |
| $I$        | <i>Flux solaire reçu par la face supérieur du conduit<br/>(capteur solaire plan)</i> | [w/m <sup>2</sup> ] |
| $\Delta T$ | <i>L'écart de température entrée-sortie du fluide</i>                                | [K]                 |

### Les nombres adimensionnels

| Symboles | Désignation               | L'unité |
|----------|---------------------------|---------|
| $P_r$    | <i>Nombre de Prandlt</i>  | /       |
| $N_u$    | <i>Nombre de Nusselt</i>  | /       |
| $R_e$    | <i>Nombre de Reynolds</i> | /       |
| $E_c$    | <i>Nombre d'Eckert</i>    | /       |
| $B_r$    | <i>Nombre de Brinkman</i> | /       |
| $S_t$    | <i>Nombre de Stanton</i>  | /       |

### Les lettres Grecques

| Lettres Grecques          | Désignation  | L'unité |
|---------------------------|--|---------|
| $\eta$                    | <i>Rendement</i>   | [%]     |
| $\varphi_u$               | <i>Flux utile transmis au fluide caloporteur</i>                 | [w]     |
| $\varphi_{sa}$            | <i>Flux solaire absorbé par la surface exposé</i>                | [w]     |
| $\varphi_{p \rightarrow}$ | <i>La déperdition thermique du capteur</i>                       | [w]     |
| $\bar{\eta}$              | <i>Rendement globale</i>   | [%]     |
| $\bar{\eta}_I$            | <i>Rendement interne</i>   | [%]     |
| $\bar{\eta}_o$            | <i>Rendement optique</i>   | [%]     |
| $\beta$                   | <i>Rapport de diamètre de l'orifice au diamètre du<br/>tuyau</i> | /       |



## ***NOMENCLATURE***

---

|               |   |                           |
|---------------|---|---------------------------|
| $\alpha$      | <i>L'angle d'attaque</i>                              | <b>Degré</b>              |
| $\varepsilon$ | <i>La rugosité artificielle des chicane</i>           | <b>[m]</b>                |
| $\varnothing$ | <i>L'angle incliné des chicane</i>                    | <b>Degré</b>              |
| $\rho$        | <i>Masse volumique de l'air</i>                       | <b>[kg/m<sup>3</sup>]</b> |
| $\pi$         | <i>Indique un produit</i>                             | <b>/</b>                  |
| $\mu$         | <i>Viscosité dynamique</i>                            | <b>[kg/m.s]</b>           |
| $\lambda$     | <i>Coefficient de conductivité thermique de l'air</i> | <b>[w/m.K]</b>            |

***INTRODUCTION  
GENERALE***

### *Introduction générale*

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres: le soleil surtout, pour la chaleur et la lumière, mais aussi la lune (marées) et la terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se régénère.

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « Sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique [1].

Parmi les énergies renouvelables, nous citons l'énergie solaire, une énergie exploitée depuis les millénaires. Les techniques d'exploitation de cette ressource ont vu ces dernières années une mutation remarquable faisant intervenir une technologie de pointe, rendant ainsi les coûts d'exploitation de plus en plus attractifs, notamment dans la production l'énergie thermique.

Les capteurs solaires plans à air dont la veine fluide au sein du capteur n'est équipée d'aucun type de promoteur de turbulence c'est les capteurs plans à air sans chicanes. Ce type de capteurs date depuis les premiers travaux initiés dans ce domaine. Le rendement faible de ce type des capteurs à ramener les chercheurs à investigué d'autres moyens afin d'améliorer les performances du capteur, d'où la naissance du deuxième type de capteur solaire plan à air munis de chicanes comme promoteurs de turbulence favorisant ainsi un meilleur transfert de chaleur entre l'absorbeur et fluide caloporteur (l'air) [2].

Pour cela, l'objectif principal de notre étude consiste à établir des modèles empiriques reliant le nombre de Nusselt ou le coefficient d'échange globale thermique aux caractéristiques géométriques (les chicanes + canal) et physique (le fluide) dans un capteur solaire plan à air muni des chicanes.

## *INTRODUCTION GENERALE*

---

Après une introduction générale, ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous avons présenté un aperçu théorique sur les capteurs solaires, ses composants et ses applications.
- Au deuxième chapitre, nous avons présenté 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 troisième chapitre, nous nous sommes intéressés dans un premier temps au prototype de canal rectangulaire (dispositif expérimental) qui a été réalisé. Nous avons fait ainsi une description détaillée du prototype et de l'appareillage associé. Dans un deuxième temps, nous avons montré les différentes configurations et les différentes valeurs des paramètres géométriques que nous avons utilisés dans notre étude expérimentale.
- Le quatrième chapitre consiste en une synthèse des données expérimentales pour élaborer un modèle numérique qui regroupe l'ensemble des paramètres géométriques et hydrodynamiques relatifs aux rugosités artificielles.

Enfin on a terminé notre travail par une conclusion générale.

# *CHAPITRE I*

*Aperçu théorique  
sur les capteurs  
solaires*

---

**Introduction**

Le capteur solaire est un échangeur de chaleur qui fonctionne entre une source radiante le soleil et un fluide. Son rôle est la conversion de l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation [3].

Dans ce présent chapitre, nous présentons un aperçu théorique sur les capteurs solaires, ses composants et ses applications.

**I.1. Les capteurs solaires**

Le capteur solaire fait le lien entre le rayonnement solaire incident et le consommateur de chaleur. Il a pour tâche de convertir le plus efficacement possible la lumière solaire en chaleur. L'absorbeur, de couleur foncée, est le cœur du capteur; il s'échauffe sous l'action du rayonnement solaire. Il comprend un ensemble de tubes qui permettent de transporter, par le biais d'un caloporteur, la chaleur produite. Toutefois, ce n'est pas toute cette chaleur qui suit ce cheminement, car il y a diverses pertes par convection, conduction et rayonnement thermique. Le capteur doit être pourvu d'une isolation thermique afin de réduire ces pertes. En général, de la laine minérale est appliquée derrière le capteur et sur ses côtés, tandis qu'un vitrage de couverture est appliqué sur l'avant. Lorsqu'il s'agit de capteurs tubulaires, c'est le vide qui enveloppe les tubes qui forme une isolation thermique (très efficace).

Le capteur plan avec couverture est le type de capteur le plus utilisé. Il existe aussi des capteurs plans qui concentrent le rayonnement solaire à l'aide de plusieurs réflecteurs cylindro-paraboliques et le projettent sur un absorbeur cylindrique. Aujourd'hui, pratiquement tous les capteurs sous vide sont de forme tubulaire [4].

**I.1.1. Les panneaux solaires photovoltaïques**

Le premier type de panneaux solaires est les panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent les rayons du soleil en courant électrique (Figure I.1).

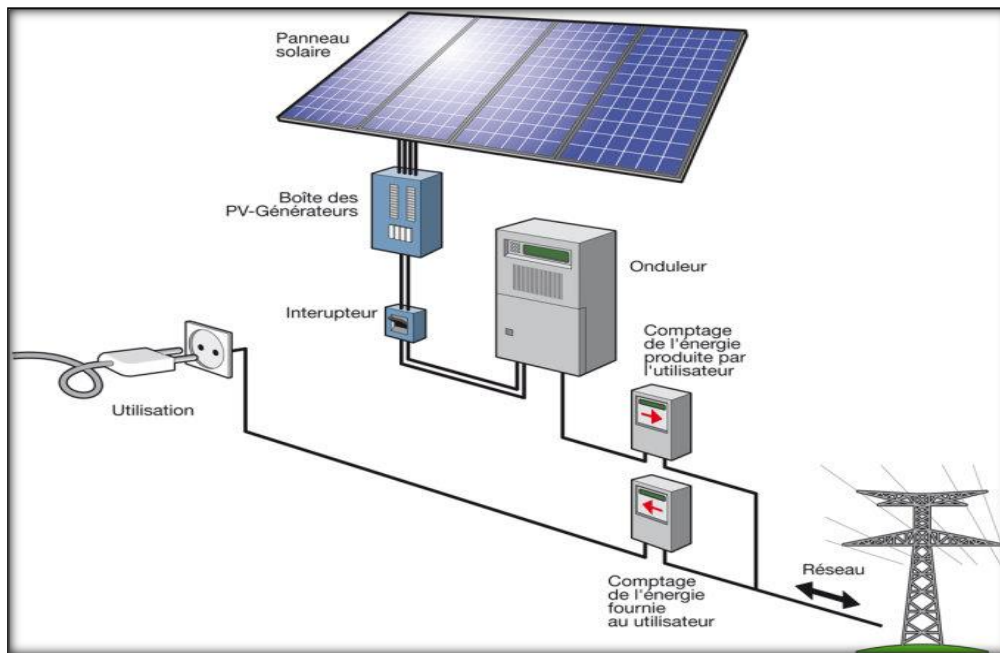


Figure (I.1) : Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque [5].

### I.1.2. Les capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils permettant la conversion de l'énergie de rayonnement en énergie thermique, en se basant sur l'effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge, un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre [6].

Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- Les capteurs plans.
- Les capteurs par concentration [7].

#### I.1.2.1. Les capteurs plans

Les capteurs plans {Figures (I.2)} absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduits, sa température (liquide ou air) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Comme une serre, les capteurs plans sont munis d'un vitrage transparent, qui piège le rayonnement calorifique s'échappant de la plaque absorbante. Ils peuvent chauffer les fluides caloporteurs à des températures légèrement supérieures à  $80^{\circ}\text{C}$ , avec un rendement variant entre (40%) et (80%) [8].



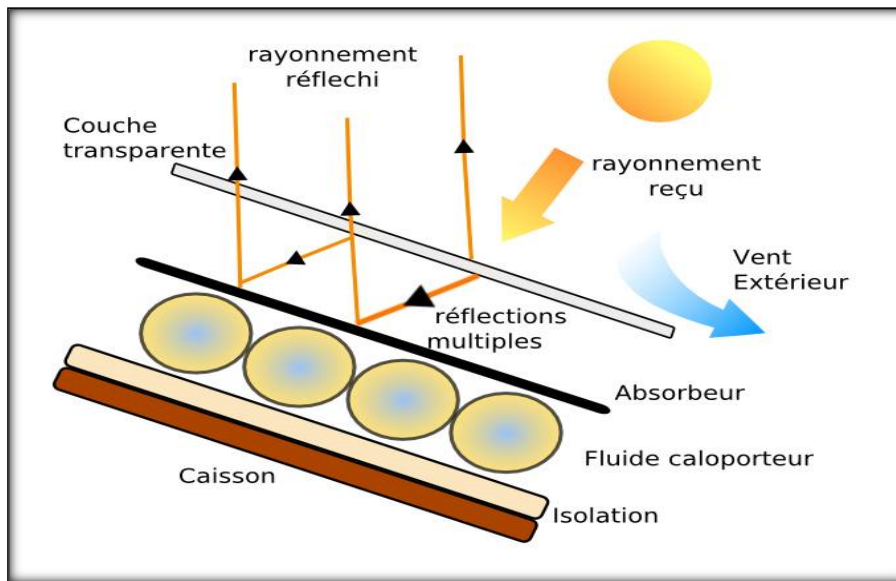


Figure (I.2) : Schéma de principe d'un capteur solaire plan [9].

### I.1.2.1.1. Les différents composants d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants :

- ✓ Une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire et transmette au fluide caloporteur.
- ✓ Une couverture transparente généralement en verre à simple ou à double qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbteur en protégeant de vent.
- ✓ Une isolation thermique.

#### ▪ L'absorbteur

Un absorbteur solaire, c'est tout simplement un capteur solaire thermique, élément de base indispensable à toute installation, que le chauffage solaire soit destiné à une maison, une piscine ou une douche. Il peut prendre la forme d'une plaque de métal, d'un serpentin vitré ou non, d'un tube sous vide, d'une bâche en plastique, ou d'un simple réservoir en plastique/métal. Il doit être nécessairement foncé (le noir, et les couleurs sombres d'une manière générale, attirent et retiennent la chaleur), et de préférence renforcé par un petit système de "serre" (la chaleur restera plus longtemps) afin de capter et transmettre au mieux la chaleur [10].

#### ▪ La couverture transparente

La couverture a une fonction de protection de l'absorbteur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le verre comme couverture transparente.

Un tel dispositif représente donc un véritable piègé au rayonnement solaire, qui peut être

amélioré en munissant le capteur d'une double couverture [2].

Comme couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaire plans, on distingue :

❖ **Le verre**

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre. La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées.

Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières :

- Le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques ;
- Il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer ;
- Il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission  $\zeta$  qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence  $i$  et de la nature du rayonnement (direct ou diffus) (valeur habituelle de  $\zeta$ : 0,91).

Actuellement, un nouveau verre, dit « anti reflet », équipe certains capteurs. Ce verre à un taux de transmission de l'ordre de (96%) et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale [2].

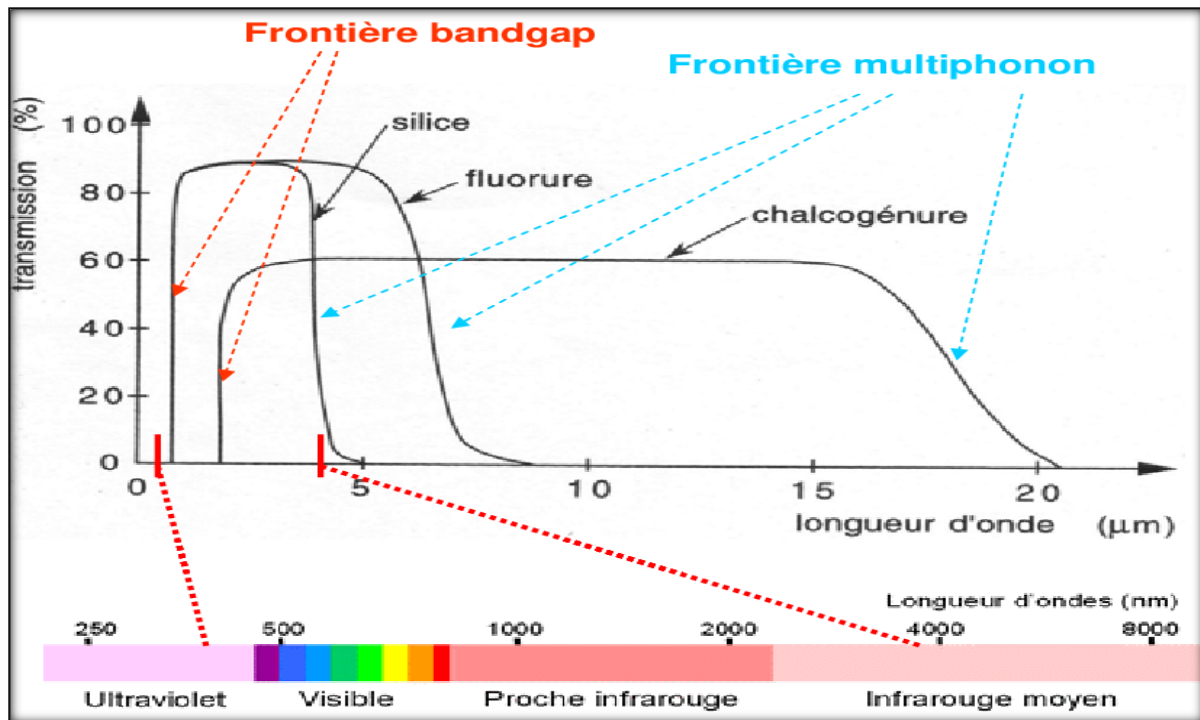


Figure (I.3) : Transparence du verre [11].

#### ❖ Les polycarbonates

Le polycarbonate est un matériau plastique composé de plaques transparentes superposées. Ce plastique possède la principale caractéristique d'être extrêmement résistant, difficilement déformable et difficilement inflammable. Il a vu le jour dans les années 50 en Europe (découvert par des chercheurs allemands). Utilisé pour un grand nombre de surface vitrée, c'est aussi un matériel particulièrement approprié pour tous les objets demandant une résistance aux chocs et aux rayures [12].

Le polycarbonate sont aussi des dérivés de matière plastique à double et à triple lame très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant. Leur coefficient de transmission au rayonnement solaire, est de l'ordre de (83%) sous une incidence normale à l'état neuf, qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans). Il faut noter que l'effet de serre est nettement meilleur avec des couvertures transparentes en verre et en particulier avec des plaques alvéolaires à double paroi. Les polycarbonates, en comparaison avec des couvertures en verre, présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs thermomécanique [2].

**▪ L'isolant**

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur.

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs, mais il faut veiller à la tenue de la température, car une coupure de circulation du fluide caloporteur peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de (150°C).

Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de (4 à 8 cm).

Un bon isolant doit les qualités suivantes :

- ✓ Une faible conductivité thermique.
- ✓ Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- ✓ La chaleur massique doit être basse.
- ✓ Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

On distingue trois types d'isolants :

**❖ Isolants minéraux**

- ✓ La laine de verre constituée de fibres de verre très fines, commercialisée sous de nombreuses formes : en plaques, en rouleaux et enrobée dans du plâtre. Sa conductivité varie entre (0,034  $w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$  à 0 °C) et (0,053  $w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$  à 200°C).
- ✓ La vermiculite connue aussi sous le nom de mica, dont la conductivité varie de (0,12 à 0,60  $w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ ) et qui se présente sous forme de granulés très légers.

**❖ Isolants d'origine végétale**

- ✓ Le bois bien sec, sa conductivité varie entre (0,13 et 0,4  $w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ ), ses qualités isolantes peuvent être améliorées, s'il est utilisé sous forme de fibres agglomérées ( $\lambda = 0,05 w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$  à 0,10  $w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ ).
- ✓ La sciure de bois ( $\lambda = 0,11 w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ ), qui a deux inconvénients: son inflammabilité et sa conductivité qui ont tendance à augmenter avec la chaleur, ce qui la rend inadéquate pour la calorifugation.

**❖ Isolants organiques**

- ✓ Les matières plastiques, sont de mauvaises conductrices de la chaleur. Leurs propriétés isolantes peuvent être améliorées en insufflant un gaz durant l'étape de solidification, ce qui leur donnent la consistance d'une mousse, telle que les mousses phénoliques ( $\lambda = 0,44 w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ ) et la mousse de chlorure de polyvinyle ( $\lambda = 0,033 w \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ ).

➤ La mousse de polyuréthane existe sous deux aspects :

- ✓ Haute densité ( $d = 0,6$ ) suffisamment rigide pour servir à la fabrication

Des caissons de capteurs, tout en constituant un bon isolant ( $\lambda = 0,08 \text{ w.m}^{-1}.k^{-1}$ ).

- ✓ Basse densité ( $d = 0,03$ ) qui est plus fragile, mais meilleure, pour l'isolation ( $\lambda = 0,025 \text{ w.m}^{-1}.k^{-1}$ ). Il convient de recouvrir ce type de matériau d'un isolant plus résistant à la chaleur si la température dépasse la valeur de ( $90^{\circ}\text{C}$ ).

Le polystyrène est très léger, fragile, de couleur blanche, utilisé généralement pour l'emballage. Ses propriétés isolantes sont légèrement moins bonnes que le polyuréthane, sa conductibilité thermique est de l'ordre de ( $0,04 \text{ w.m}^{-1}.k^{-1}$ ), mais il est nettement moins cher et il se sublime partir de ( $90^{\circ}\text{C}$ ) [2].

| Désignation     | $\lambda(\text{w.m}^{-1}.K^{-1})$ | $\rho(\text{Kg.m}^{-3})$ | Température<br>maxi<br>d'utilisation | Observation           |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Laine de verre  | 0.034 à 0.053                     | 70                       | 150                                  | Sensible à l'humidité |
| Mousse de verre | 0.057                             | 123                      | 150                                  | Sensible à l'humidité |
| Bois            | 0.13 à 0.4                        | 123                      | 150                                  | /                     |
| Liège exposé    | 0.045                             | 100                      | /                                    | /                     |
| Polystyrène     | 0.042                             | 15                       | 85                                   | Moulé comprimé        |
| Polyuréthane    | 0.035                             | 35                       | 85                                   | Moulé comprimé        |

**Tableau (I.1) : Conductivité thermique de quelque matériau [2].**

▪ **Le fluide caloporteur**

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire a pour rôle de véhiculer la chaleur cédée par l'absorbeur, différents fluides peuvent être utilisée mais doit satisfaire à des certaines conditions :

1. Grande capacité calorifique ;
2. Faible viscosité ;
3. Coefficient de transfert thermique élevé ;
4. Haute point de d'ébullition est bas point de congélation ;
5. Degré d'agressivité faible devant les matériaux constituant le capteur.

Les fluides caloporteurs plus utilisés sont :

- **L'air**

L'air comme agent de transport de calories à un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie est moins de travaux d'entretien.

Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut utiliser des volumes d'air très importants [1].

- **L'eau**

Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des problèmes.

La naissance des couches de tartre dans les canalisations au fil de temps diminue la quantité de chaleur échangées [1].

- **Les gylthermes**

Des liquides organiques à base de polyphényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires traités pour ne pas présenter les mêmes défauts que l'eau, leur chaleur massique est ( $0,5 \text{ Kcal. Kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$ ). Ces hydrocarbures se détériorent en présence des traces d'eau ou d'air et combustibles à haute température [1].

### **I.1.2.2. Capteurs concentrateurs**

Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration, mais ils sont plus complexes et plus onéreux.

Il s'agit de réflecteurs en demi-cercle qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines voire même plusieurs milliers de degrés Celsius [8].

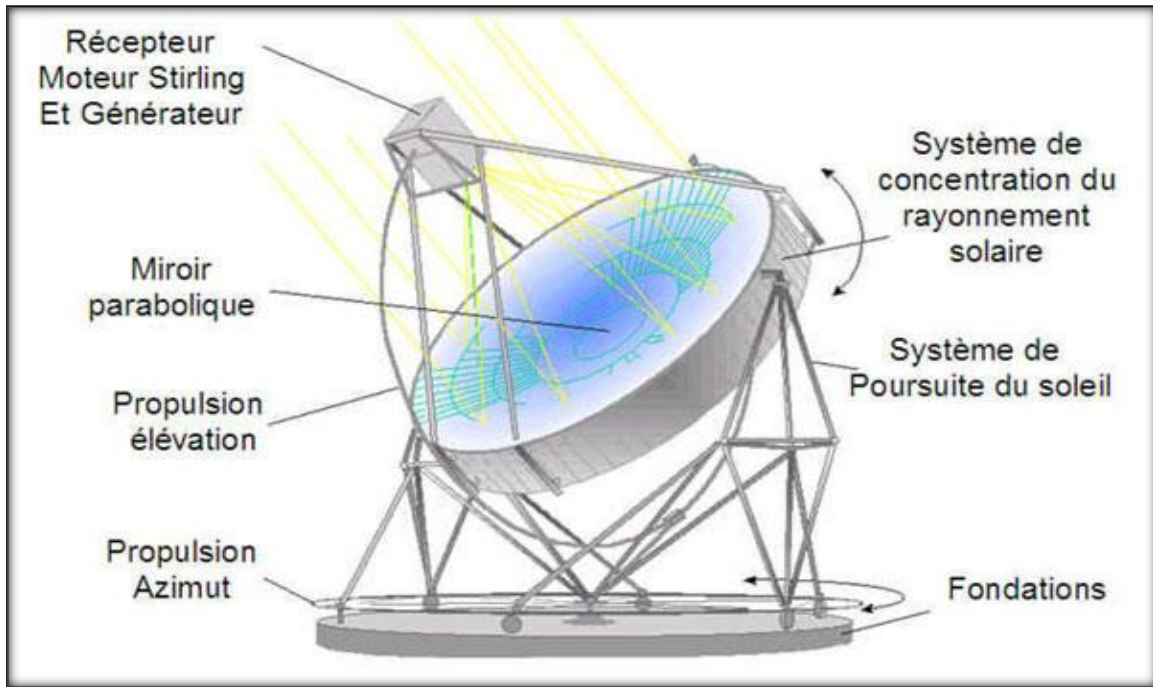


Figure (I.4) : Schéma simple d'un capteur solaire concentrateur [13].

## I.2. Rendements d'un capteur solaire

- ✓ Le rendement global:

$$\eta = \frac{\varphi_u}{G(i, \gamma)^* \times S}$$

- ✓ Le rendement interne:

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{sa}}$$

- ✓ Le rendement optique:

$$\eta_o = \frac{\varphi_{sa}}{G^*(i, \gamma)^S}$$

On définit également des rendements moyens sur une période (jour, mois, année.). Pour ce faire, on intègre la relation du bilan présentée ci-dessous sur la période choisie:

$$\varphi_{sa} = \varphi_{p \rightarrow} + \varphi_u + \varphi_{st}(W)$$

Donc :

$$\int_0^t \varphi_{sa} dt = \int_0^t \varphi_u + \int_0^t \varphi_{p \rightarrow}$$

Soit :  $Q_{sa} = Q_u + Q_{p \rightarrow}$



On définit alors les rendement globale  $\bar{\eta}$ , interne  $\bar{\eta}_i$ , optique  $\bar{\eta}_o$  moyens du capteur sur la période considérée par :

$$\bar{\eta} = \frac{Q_u}{\int_0^t G^*(i, \gamma)^S dt}$$
$$\bar{\eta}_i = \frac{Q_u}{Q_{sa}}$$

Et

$$\bar{\eta}_o = \frac{Q_{sa}}{\int_0^t G^*(i, \gamma)^S dt}$$

Ces rendements sont à considérer lors d'un calcul de dimensionnement d'un capteur solaire. Il ne faut pas les confondre avec les rendements instantanés qui sont toujours plus élevés (un rendement journalier moyen tient compte du refroidissement nocturne par exemple) [1].

### **I.2.1. Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan[14]**

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres.

On distingue :

#### **I.2.1.1. Les paramètres externes**

1. Les paramètres d'ensoleillement
  - Eclairement énergétique dû au rayonnement global ;
  - Position du soleil et durée d'insolation ;
  - L'heure de la journée et la saison ;
  - La position géographique du lieu considéré (latitude).
2. Température ambiante ;
3. Vitesse du vent.

#### **I.2.1.2. Les paramètres internes**

1. Les paramètres de position.
  - Orientation, inclinaison et emplacement du capteur ;
  - Capteur fixe ou suiveur du soleil.
2. Les paramètres de construction.

Parmi lesquels nous citons :

**✓ L'absorbeur**

- Les propriétés thermo-physiques et optiques ;
- Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes ;
- Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective ;
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre ;
- Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire) ;
- Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur ;
- Température de l'absorbeur ;
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

**✓ La surface sélective**

- Propriétés optiques.

**✓ Couverture transparente**

- Propriétés optiques et thermo-physiques ;
- Epaisseur ;
- Le nombre de vitrage et la forme.

**✓ L'isolant**

- Propriétés thermo-physiques et optiques ;
- Epaisseur.

**✓ Fluide caloporteur**

- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit ;
- Température d'entrée ;
- Propriétés thermo-physiques.

### I.3. Concept de la rugosité artificielle [15]

Comme l'air circule dans la veine mobile du capteur solaire à air, une sous-couche laminaire (couche limite) est formée sur la surface de l'absorbeur qui empêche le transfert de chaleur à l'air circulant, de ce fait, nuire aux performances thermiques du capteur solaire à air. Les principaux mécanismes pour affaiblir la couche limite sont l'augmentation de la vitesse libre de l'écoulement et le mélange turbulent. La rugosité artificielle, sur la face inférieure de la plaque de l'absorbeur, crée de la turbulence locale près de la paroi. La recirculation secondaire de l'écoulement renforce le transfert de chaleur par convection. L'écoulement en provenance du noyau des tourbillons vers la surface inférieure de la plaque de l'absorbeur réduit l'épaisseur de la couche limite et l'écoulement secondaire de la surface inférieure de la plaque de l'absorbeur à l'écoulement de base favorise le mélange turbulent. Ainsi, il devient nécessaire que la turbulence doit être créée en sous-couche laminaire dans la région où le transfert de chaleur a eu lieu. Afin de sélectionner la hauteur de l'élément de rugosité artificielle, il devient impératif de connaître l'épaisseur de la couche limite laminaire qui est exprimée par l'équation suivante :

$$\delta_t = 5 \times \frac{\nu}{u_t}$$

Où :

$$u_t = \frac{u_m}{f/2}$$

$\nu$  : viscosité cinématique de fluide caloporteur [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] ;

$u_t$  : Vitesse de frottement [ $m \cdot s^{-1}$ ] ;

$u_m$  : vitesse moyenne ;

$f$  : Coefficient de frottement.

Les différents types d'éléments de rugosité et les paramètres qui caractérisent la géométrie des éléments de rugosité qui influencent les performances sont données dans le tableau (I.5) :

| N°  | Géométrie de la rugosité                                 | Paramètres                              |
|-----|--|---|
| 1.  | Rugosités transversales                                  | $(e/d), (p/e)$                          |
| 2.  | Rugosités inclinées continues                            | $(e/d), (p/e), \alpha$                  |
| 3.  | Rugosités brisées inclinées                              | $(e/d), (p/e), \alpha, g/p, d/W$        |
| 4.  | Rugosité en forme de <b>V</b>                            | $(e/d), (p/e), \alpha$                  |
| 5.  | Rugosité en forme de <b>V</b> discrétisées, en quinconce | $(e/d), (p/e), \alpha, B/S, p'/p, S'/S$ |
| 6.  | Rugosités chanfreinées                                   | $(e/d), (p/e), \Phi$                    |
| 7.  | Rugosités en rainures                                    | $(e/d), (p/e), g/p$                     |
| 8.  | Rugosités en arc de cercle                               | $(e/d), (p/e), \alpha$                  |
| 9.  | Rugosités discrétisées en forme <b>W</b>                 | $(e/d), (p/e), \alpha$                  |
| 10. | Rugosité en forme de maillage                            | $(e/d), (p/e), L/e, S/e$                |

*Tableau (I.2) : Géométries des rugosités et les paramètres caractéristiques [15].*

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse bibliographique sur les différents types des capteurs solaires et tous qui dépendent de ses types, ses composantes, les facteurs influant sur leur efficacité, et le domaine d'utilisation de chaque un.

# **CHAPITRE II**

*Synthèse  
bibliographique sur  
les différentes  
rugosités utilisées  
pour les capteurs*

---

**Introduction :**

Afin d'améliorer le taux de transfert de chaleur vers un fluide caloporteur (air) dans le conduit utile des capteurs solaires à air, diverses géométries de rugosités artificielles ont été considérées comme génératrices de turbulence (tabulateurs), à savoir les nervures, les chicanes, les ailettes et plusieurs autres formes considérées comme efficaces. Dans la littérature, les chercheurs ont signalé différents types de générateurs de turbulence pour l'étude du transfert thermique, les caractéristiques du frottement et la configuration de l'écoulement dans les capteurs solaires à air [16].

Dans ce chapitre on cite les différentes expressions du coefficient de frottement et de transfert thermique pour les différents régimes d'écoulement, et quelques travaux effectués par les chercheurs afin de développer le coefficient de frottement et de transfert thermique en fonction de différente géométrie de rugosité artificielle.

**II.1. Les différentes rugosités utilisées pour les capteurs solaires à air dans la littérature****II.1.1. Fixation à fil métallique**

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 [16].

**II.1.1.1. Fils transversaux continus**

Prasad et Saini (1988) [16, 17] 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 entièrement développé dans un capteur solaire à air ayant une plaque absorbante garnie de rugosités artificielles de type fils métalliques, d'un petit diamètre comme un illustré sur {la figure (II.1)}. Ils ont travaillé sur la gamme des paramètres suivants:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{e}{D} = \frac{\varepsilon}{D_H} = 0.02 - 0.033 \\ \frac{P}{e} = \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} = 10 - 20 \\ Re = 5000 - 50000 \end{array} \right.$$

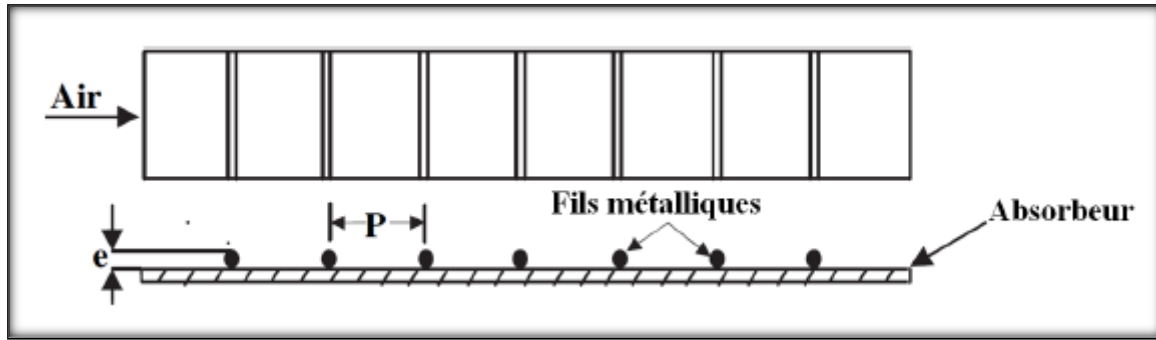


Figure (II.1.) : Schéma d'une conduite rectangulaire munie des fils transversaux contenus[17].

Leur expression du coefficient de frottement était donnée par :

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

Ils ont trouvé aussi une corrélation concernons le nombre de Stanton :

$$St = \frac{\frac{f}{2}}{\left[1 + \frac{\sqrt{f}}{2} [4.5(e +)^{0.28} \cdot Pr^{0.57} \cdot 0.95 \left(\frac{P}{e}\right)^{0.55}]\right]}$$

Ils ont constaté que le coefficient de frottement augmente avec la hauteur relative de la rugosité. Pour une valeur de la hauteur relative ( $e/D_H$ ) égale à **0.033** et à un pas relatif ( $p/e$ ) égal à **10**, l'amélioration maximale du nombre de Nusselt et le coefficient de frottement est de **2.38** et **4.25** fois plus grands respectivement par rapport à un conduit lisse.

**Verma et Prasad (2000) [18]** ont étudié expérimentalement la géométrie de rugosité transversale du fil métallique fixé sur la face inférieure de la conduite lisse {figure (II.1)}. Les paramètres utilisés pour son étude sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_e = 3032 - 17652 \\ \frac{e}{D_H} = 0.02 - 0.034 \\ \frac{p'}{p} = 0.2 - 0.8 \\ \frac{S'}{S} = 1.1 - 2.3 \\ \frac{B}{S} = 3 - 9 \\ \alpha = 60^\circ - 90^\circ \end{array} \right.$$



Leur expression du coefficient de frottement était donnée par :

$$f = 0.245. (P/e)^{-0.206}. (e/D)^{0.243}. Re^{-1.25}$$

$$N_u = 0.08596. (P/e)^{-0.054}. (e/D)^{0.0722}. Re^{0.723}$$

Pour :  $e^+ \leq 24$

$$N_u = 0.02954. (P/e)^{-0.016}. (e/D)^{0.021}. Re^{0.802}$$

Pour :  $e^+ > 24$

**II.1.1.2. Fils transversaux discontinus**

**Sahu and Bhagoria (2005) [19]** ont effectué une étude expérimentale pour étudier le coefficient de transfert de chaleur en utilisant  $90^\circ$  sur les nervures transversales brisées sur la plaque absorbante d'un réchauffeur d'air solaire; la paroi rugueuse étant chauffée alors que les trois autres parois sont isolées. La paroi rugueuse a une rugosité avec la hauteur ( $p/e$ ), allant de **10 à 30 mm**, une hauteur de nervure de **1.5 mm** et un rapport d'aspect de conduit de **8**. Le débit d'air correspond au nombre de Reynolds entre **3000** et **12 000**.

| Les paramètres                              | Les gammes des paramètres |
|---|---------------------------|
| Nombre de Reynolds ( $Re$ )                 | <b>3000 – 12000</b>       |
| Ratio d'aspect de conduit ( $W/H$ )         | <b>8.0</b>                |
| longueur d'essai $L$ ( $mm$ )               | <b>1500</b>               |
| La hauteur de rugosité $e$ ( $mm$ )         | <b>1.5</b>                |
| La hauteur de rugosité relative ( $e/D_H$ ) | <b>0.0338</b>             |
| Le diamètre hydraulique $D_H$ ( $mm$ )      | <b>44.44</b>              |
| Le pas de rugosité ( $mm$ )                 | <b>10, 20 et 30</b>       |
| Isolation $I$ ( $w/m^2$ )                   | <b>750 – 880</b>          |

*Tableau (II.1) : Les conditions expérimentales [19].*

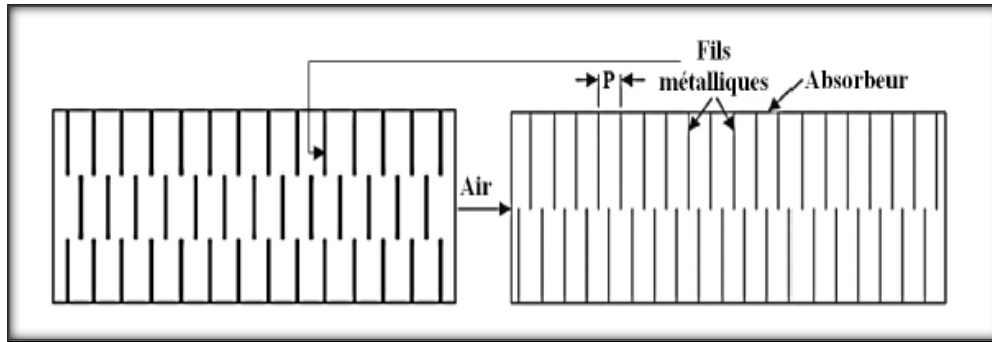


Figure (II.2) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques transversaux discontinus [19].

### II.1.1.3. Fils inclinés continus

Gupta et al. (1993) [20] ont réalisé une étude expérimentale avec la géométrie de rugosité des fils inclinés continus comme il est représenté sur {la figure (II.3)}. Les paramètres utilisés pour l'étude sont :

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

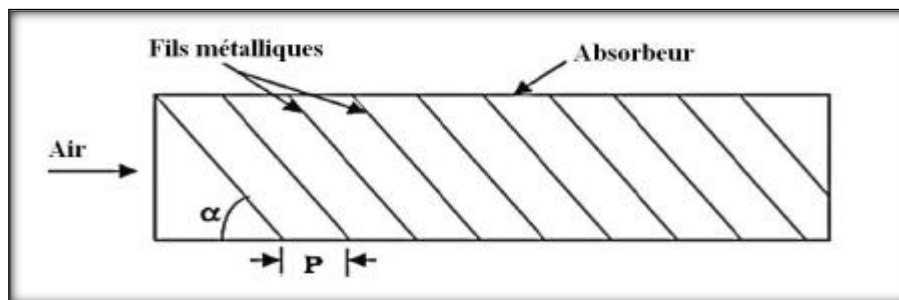


Figure (II.3) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques inclinés continus[20].

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°** et de **70°** respectivement dans la gamme de paramètres étudiés. Ils ont défini le coefficient de frottement pour ce cas par :

$$f = 0.1911 \left(\frac{e}{D}\right)^{0.196} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.093} \cdot Re^{1.084} \cdot \exp\left[-0.993 \left(1 - \frac{\alpha}{70}\right)^2\right]$$

$$Nu_u = 0.0024 \left(\frac{e}{D}\right)^{0.01} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.06} \cdot Re^{1.084} \cdot \exp\left[-0.004 \left(1 - \frac{\alpha}{60}\right)^2\right]$$

Pour :  $e^+ < 35$

$$Nu_u = 0.0071 \left(\frac{e}{D}\right)^{-0.24} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.028} \cdot Re^{0.88} \cdot \exp\left[-0.475 \left(1 - \frac{\alpha}{60}\right)^2\right]$$

Pour :  $e^+ \geq 35$

#### II.1.1.4. Fils inclinés discontinus

Aharwal et al (2008) [21] ont développé des corrélations empiriques pour le coefficient de transfert de chaleur ainsi que le coefficient de frottement, dans le cas la rugosité discontinues inclinées {figure (II.4)}. Les paramètres utilisés pour l'étude étaient la hauteur de rugosité relative ( $e/D_H = 0.0377$ ), le rapport d'aspect ( $d/W = 5.84$ ), l'angle d'attaque  $60^\circ$ , le pas de rugosité relatif ( $P/e = 10$ ) et le nombre de Reynolds variant entre ( $Re = 3000$  et  $18000$ ), la largeur de l'intervalle ( $g/e$ ) et la position de l'entrefer étaient dans l'intervalle de  $0.5$  à  $2$  et de  $0.1667$  à  $0.667$  respectivement.

Ils ont constaté que la valeur maximale du nombre de Nusselt et du facteur de frottement a été obtenue  $2.59$  et  $2.87$  fois par rapport à la plaque lisse Performances thermo-hydrauliques maximales obtenues pour la position de l'entrefer relatif et la largeur de l'entrefer relatif de  $0.25$  et  $1.0$  respectivement.

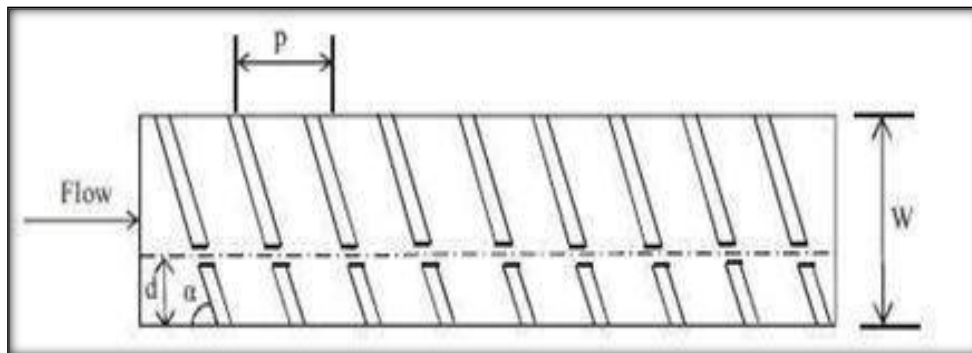


Figure (II.4) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques inclinés discontinus [21].

Leurs expressions du coefficient de frottement et le nombre du Nusselt étaient donnée par :

$$Nu = 3 \times 10^{-3} Re^{0.947} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.29} \left(\frac{P}{e}\right)^{3.883} \left(\frac{d}{W}\right)^{0.225} \times \exp\left[-1.237 \left\{\ln\left(\frac{P}{e}\right)^2\right\}\right]$$

$$f = 0.0014 Re^{-0.22} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.804} \left(\frac{P}{e}\right)^{4.518} \left(\frac{d}{W}\right)^{0.097} \times \exp\left[-0.944 \left\{\ln\left(\frac{P}{e}\right)^2\right\}\right]$$

### II.1.1.5. Fils inclinés et en forme de V (continus, discontinus)

Momin et al (2002) [22] ont fait une étude expérimentale sur la géométrie de rugosité des nervures en forme V continue pour de meilleures performances que les nervures transversales. Cette étude expérimentale a été menée sur la gamme du nombre de Reynolds **2500 – 18000**, avec une hauteur relative de la rugosité ( $e/D_H$ ) de **0.02 à 0.034** et un angle d'attaque ( $\alpha$ ) de **30° à 90°**, l'ensemble pour un pas relatif entre rugosités ( $p/e$ ) fixe égal à **10**. Ils ont signalé que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

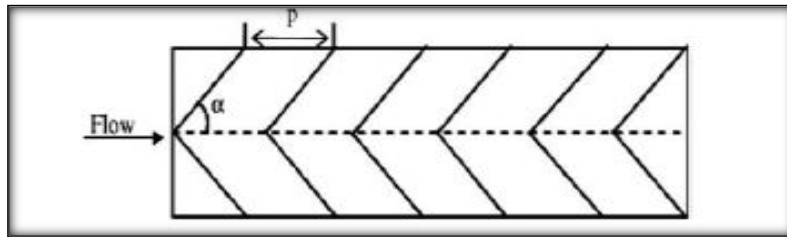


Figure (II.5) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme de V continus [23].

La formule de coefficient de frottement est :

$$f = 6.266 \times Re^{-0.425} \left(\frac{e}{D_H}\right)^{0.565} \times \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.093} \times \exp\left(-0.719 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60}\right)\right)^2\right)$$

$$Nu_u = 0.067 \times Re^{0.888} \left(\frac{e}{D_H}\right)^{0.424} \times \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.077} \times \exp\left(-0.782 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60}\right)\right)^2\right)$$

Kumar (2014) [23] ont analysé à l'aide de CFD la performance d'un conduit de réchauffeur d'air solaire fourni avec la rugosité artificielle sous la forme de fil circulaire mince en forme de V, nervures en forme de V multiples et nervures en forme de V avec géométries d'écart. La performance d'un conduit de chauffage solaire à air muni d'une rugosité artificielle sous la forme d'un fil circulaire fin en forme de Côtes en forme de V multiples et nervures en

forme de V avec géométries d'écart.

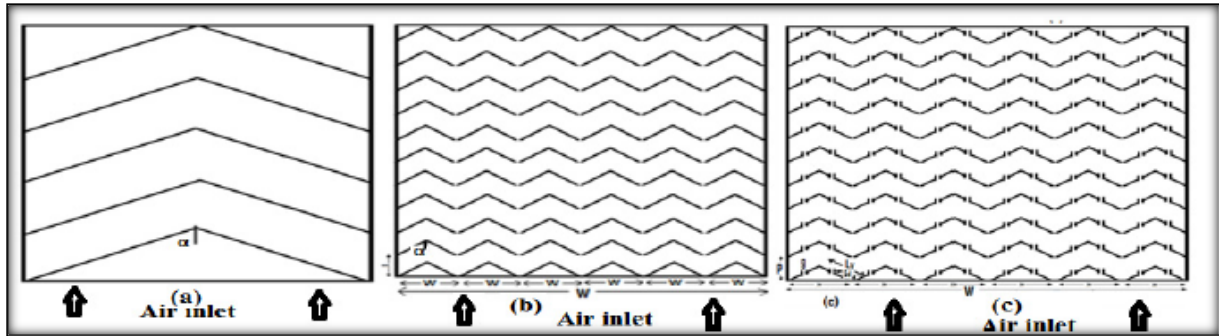


Figure (II.6) : (a) nervure en forme V ; (b) nervure en forme de multi-V ; (c) nervure en forme de multi-V avec écart (Trou) [23].

La gamme de paramètres:

Nervure en forme V :

$$\{(P/e) = 10, (e/D_H) = 0.043, \alpha = 60^\circ\}$$

Nervure en forme de multi-V :

$$\{(W/w) = 6, (P/e) = 10, (e/D_H) = 0.043, \alpha = 60^\circ\}$$

Nervure en forme de multi-V avec écart (Trou) :

$$\{(W/w) = 6, (P/e) = 10, (e/D_H) = 0.043, \alpha = 60^\circ, (g/e) = 1.0, (Gd/Lv) = 0.69\}$$

| Investigateurs              | Correlation heat transfer coefficient  | Correlation friction factor   |
|-----------------------------|--|---|
| Nervure en forme V          | $Nu = 0.067 \left(\frac{e}{D}\right)^{0.424} Re^{0.888} \left(\frac{\alpha}{60^\circ}\right)^{-0.077}$ $\left[ \exp - 0.782 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60^\circ}\right)\right)^2 \right]$  | $f = 6.266 \left(\frac{e}{D}\right)^{0.565} Re^{-0.425} \left(\frac{\alpha}{60^\circ}\right)^{-0.093}$ $\left[ \exp - 0.719 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60^\circ}\right)\right)^2 \right]$   |
| Nervure en forme de multi-V | $Nu = 3.35 \times 10^{-5} Re^{0.92} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.77} \left(\frac{W}{w}\right)^{0.43}$ $\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{0.49} \left[ \exp - 0.1177 \left(\ln\left(\frac{W}{w}\right)\right)^2 \right]$ $\times \exp\left(-0.61 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)\right)^2\right) \left(\frac{P}{e}\right)^{-8.54}$ $\times \exp\left(2.0407 \left(\ln\left(\frac{P}{e}\right)\right)^2\right)$ | $f = 4.47 \times 10^{-4} Re^{-0.3188} \left(\frac{e}{D}\right)^{-0.73} \left(\frac{W}{w}\right)^{-0.22}$ $\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{-0.39} \left[ \exp\left(-0.52 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)\right)^2\right) \right]$ $\times \left(\frac{P}{e}\right)^{8.9} \exp\left(-2.133 \left(\ln\left(\frac{P}{e}\right)\right)^2\right)$ |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <p><b>Nervure en forme de multi-V avec écart (Trou)</b></p> | $Nu = 8.532 \times 10^{-3} Re^{0.932} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.175} \left(\frac{W}{w}\right)^{0.506}$ $\left[ \exp - 0.0735 \left(\ln\left(\frac{W}{w}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{Gd}{Lv}\right)^{-0.0348}$ $653 \left(\ln\left(\frac{Gd}{Lv}\right)\right)^2 \left(\frac{g}{e}\right)^{-0.0708} \left[ \exp - 0.223 \left(\ln\left(\frac{g}{e}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.0239}$ $\left[ \exp - 0.223 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{p}{e}\right)^{1.196}$ $\left[ \exp - 0.223 \left(\ln\left(\frac{p}{e}\right)\right)^2 \right]$ | $f = 3.1934 \times Re^{-0.2151} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.268} \left(\frac{W}{w}\right)^{0.1122}$ $\left[ \exp - 0.0974 \left(\ln\left(\frac{W}{w}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{Gd}{Lv}\right)^{0.0610}$ $\left[ -0.1065 \left(\ln\left(\frac{Gd}{Lv}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{g}{e}\right)^{-0.1769} \left[ \exp - 0.6349 \left(\ln\left(\frac{g}{e}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{0.1552}$ $\left[ \exp - 0.1527 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{60}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.7941}$ $\left[ \exp - 0.1486 \left(\ln\left(\frac{p}{e}\right)\right)^2 \right]$ |
|   |  |   |

Tableau (II.2) : Coefficient de transfert de chaleur et corrélations des coefficients de frottement pour différentes géométries de rugosité utilisées dans les gaines de réchauffeur d'air solaire [23].

Mulluwork et al (1998) [24] ont traité expérimentalement la géométrie discrète de rugosité des nervures en forme de V sur la face inférieure de la plaque d'absorption. Ils ont comparé les performances thermiques d'une plaque absorbante rugueuse munie de rugosités discontinues en formes de V (Up et Down). Les paramètres utilisés étaient la longueur de rugosité relative (B/S) de 3 et 9, le pas de rugosité relatif (p/e) de 10.62, l'angle d'attaque de 60°, et le nombre de Reynolds de 2000 – 15500.

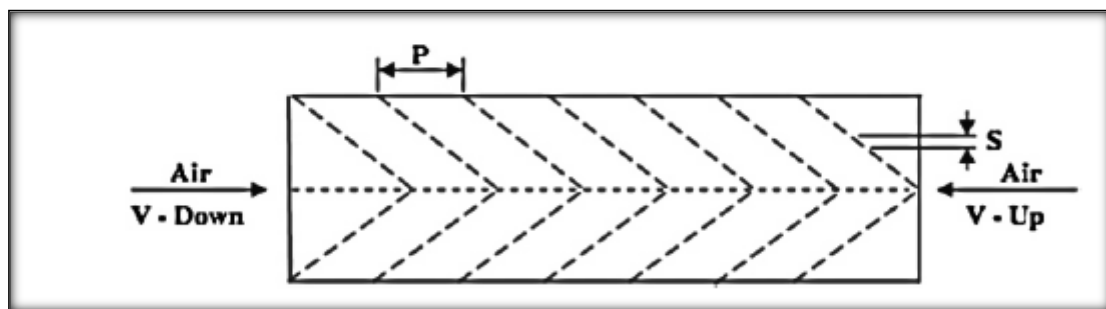


Figure (II.7) : Schéma d'absorbeur muni de fils métalliques discontinus en V-Down et V-Up [24].

Leur expression de nombre de Nusselt et le coefficient de frottement :

$$f = 0.7117 R_e^{-2.991} \left(\frac{B}{S}\right)^{0.0636}$$

$$N_u = 0.00534 R_e^{1.2991} \left(\frac{B}{S}\right)^{1.2496}$$

**Kumar and Prasad (2018) [25]** ont présenté l'analyse des performances de l'effet des paramètres géométriques ayant une rugosité multiple en forme de V sur le côté écoulement d'air des plaques absorbantes. Approche mathématique et procédure de solution pour l'analyse d'un tel réchauffeur d'air solaire a été développé théoriquement et code MATLAB généré pour la solution des équations mathématiques. L'effet de paramètres tels que le nombre de Reynolds et la hauteur de rugosité relative sur les performances thermo-hydrauliques ont été examinés et comparés avec le réchauffeur d'air solaire à plat conventionnel.

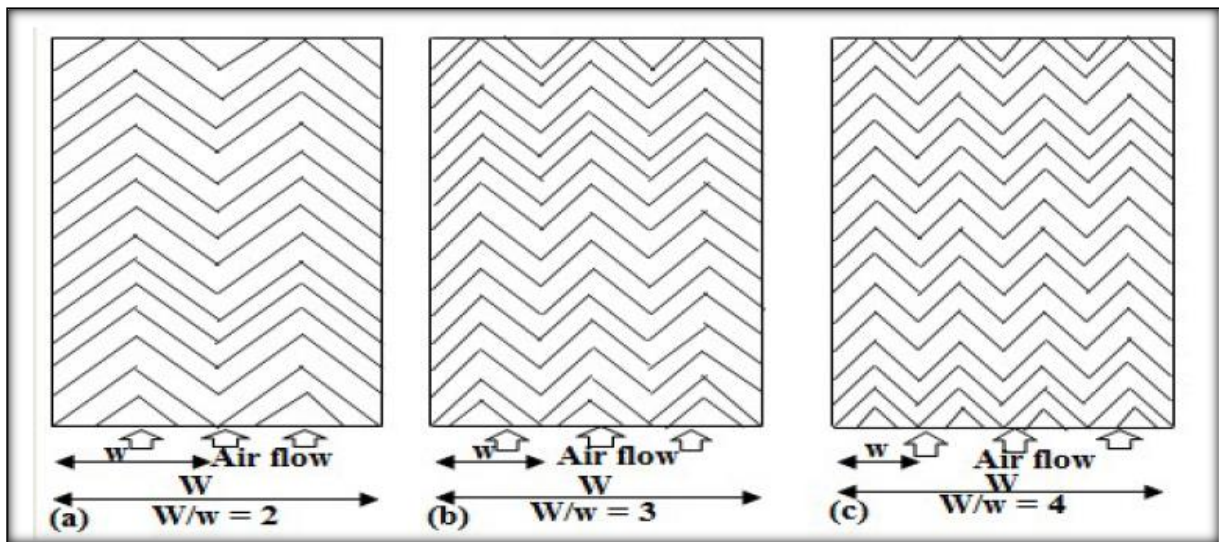


Figure (II.8) : Rugosité multiple en forme de V [25].

Le coefficient de frottement de frottement ( $f$ ) pour le capteur solaire à air rugueux est donné par :

$$f = 4.47 \times 10^{-1} R_e^{-0.3188} \times \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.73} \times \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{-0.39} \times \exp\left[-0.52\left(\ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)\right)^2\right] \times \exp\left[-2.133\left(\ln(P/e)\right)^2\right] \times \left(\frac{P}{e}\right)^{8.9}$$



Coefficient de transfert de chaleur pour les conduits de capteur solaire à air à nervures multiples en forme de V peut être calculé à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$N_u = 3.35 \times 10^{-5} R_e^{-0.92} \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.77} \times \left(\frac{W}{w}\right)^{0.43} \times \left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)^{-0.49} \times \exp\left[-0.61\left(\ln\left(\frac{\alpha}{90^\circ}\right)\right)^2\right] \\ \exp\left[-0.1177\left(\ln\left(\frac{W}{w}\right)\right)^2\right] \times \left(\frac{P}{e}\right)^{8.54} \times \exp\left[-2.0407\left(\ln(P/e)\right)^2\right]$$

### II.1.1.6. Canal rectangulaire de petit fils du métal

Karmare et Tikekar (2007) [26] ont étudié le coefficient de transfert de chaleur et les caractéristiques du facteur de frottement d'un conduit muni de rugosités artificielles. L'étude a été réalisée pour le nombre de Reynolds varie entre **4000** et **17000**. Ils ont constaté que la plaque ayant ces paramètres de rugosité ( $l/s$ ) de **1.72**, ( $e/D_H$ ) de **0.044** et ( $p/e$ ) de **17.5**.

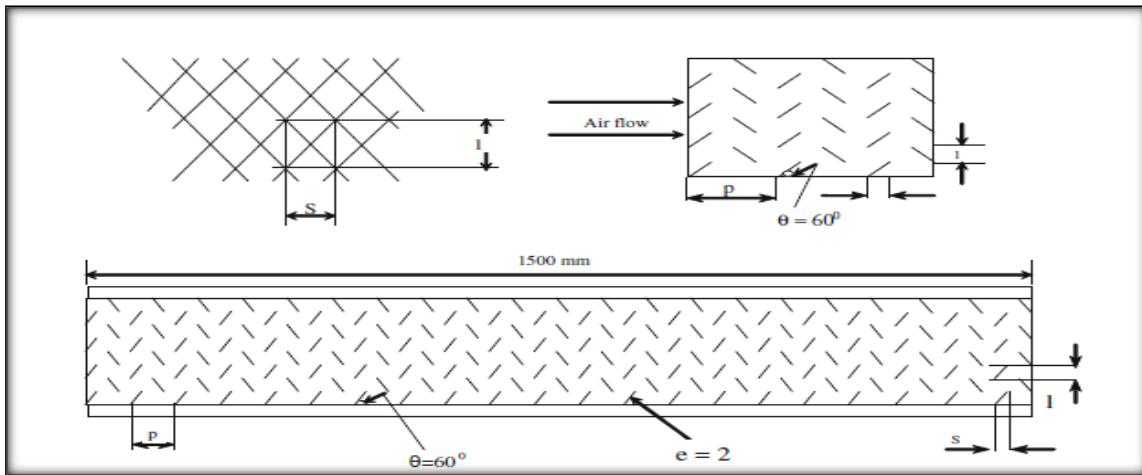


Figure (II.9) : Schéma d'un canal rectangulaire muni de petit fils de métal [26].

Les corrélations de nombre de Nusselt et le coefficient de frottement :

$$N_u = 2.4 \times 10^{-3} \times (R_e)^{1.3} \times (e/D_H)^{0.42} \times (l/s)^{-0.146} \times (p/e)^{-0.27} \\ f = 15.55 \times (R_e)^{-0.26} \times (e/D_H)^{0.91} \times (l/s)^{-0.27} \times (p/e)^{-0.51}$$



### II.1.1.7. Canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés

Varun et al (2008) [27] ont utilisé une combinaison entre des fils transversaux et de petits fils de métal {Figure (II.10)}. Ils ont trouvé que la plaque absorbante rugueuse ayant la hauteur de rugosité relative ( $e/D_H$ ) 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**.

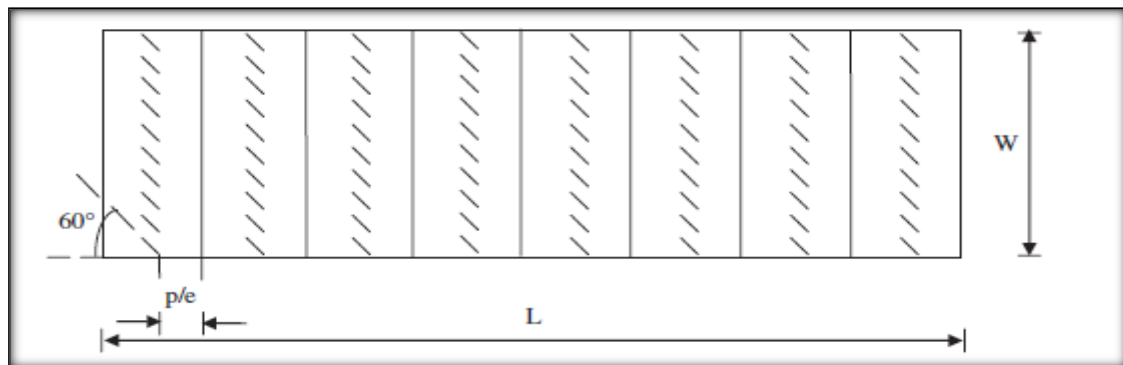


Figure (II.10) : Schéma d'un canal rectangulaire muni d'une combinaison entre fils de métal transversaux et inclinés [27].

Leurs corrélations obtenues à partir des résultats :

$$Nu = 0.0006 R_e^{1.213} \left(\frac{p}{e}\right)^{0.0104}$$

$$f = 0.0858 R_e^{-0.3685} \left(\frac{p}{e}\right)^{0.0104}$$

### II.1.1.8. Canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc

Saini and Saini (2008) [28] ont effectué une étude expérimentale pour l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur d'un réchauffeur d'air solaire ayant une conduite d'air rugueuse pourvue d'une rugosité artificielle sous forme de fil parallèle en forme d'arc comme élément de rugosité. L'effet des paramètres du système tels que la hauteur de rugosité relative ( $e/D_H$ ) et l'angle d'arc ( $\alpha/90$ ) ont été étudiés sur le nombre de Nusselt ( $Nu$ ) et le coefficient de frottement ( $f$ ) avec le nombre de Reynolds ( $R_e$ ) a varié de **2000 à 17000**.

Gamme des paramètres :

| No. | Les paramètres                             | Les gammes des paramètres |
|-----|--|---------------------------|
| 1.  | Ratio d'aspect de conduit ( $W/H$ )        | 12                        |
| 2.  | Le pas relatif ( $P/e$ )                   | 10                        |
| 3.  | La hauteur relative ( $e/D_H$ )            | 0.0213 – 0.0422           |
| 4.  | L'angle d'attaque relative ( $\alpha/90$ ) | 0.3333 – 0.6666           |
| 5.  | Nombre de Reynolds ( $R_e$ )               | 2000 – 17000              |

Tableau (II.3): La gamme des paramètres [28].

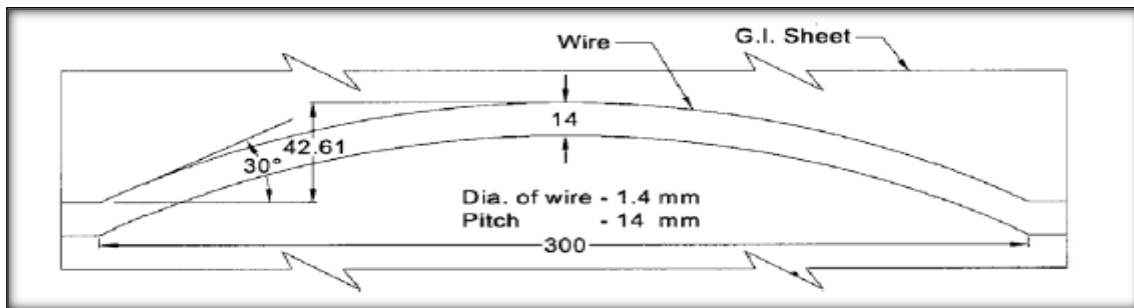


Figure (II.11) : Détails du contour du fil[28].

Le nombre de Nusselt et le facteur de frottement dépendent fortement des paramètres de rugosité ( $e/D_H$ ) ( $\alpha/90$ ) et du paramètre de fonctionnement ( $R_e$ ). Ainsi les équations pour le nombre de Nusselt et le coefficient de frottement peuvent être écrites comme suit :

$$Nu = f(R_e, e/D_H, \alpha/90)$$

$$f = f(R_e, e/D_H, \alpha/90)$$

La régression du meilleur ajustement donne la corrélation suivante pour le nombre de Nusselt :

$$Nu = 0.001047R_e^{1.13186} \left(\frac{e}{d}\right)^{0.3772} \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{-0.1198}$$

Et la forme finale de la corrélation pour le coefficient de frottement est obtenue comme suit :

$$f = 0.14408R_e^{-0.17103} \left(\frac{e}{d}\right)^{0.1765} \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{-0.1185}$$

Saini SK et Saini RP (2008) [29] ont réalisé une étude expérimentale l'effet des fils en forme d'arc Sur le coefficient de frottement d'un conduit rectangulaire, comme représenté sur {la figure (II.12)}. 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 ( $e/D_H$ ) de **0.0422**. Cependant, l'augmentation du facteur de frottement correspondant à ces paramètres a été observée **1.75** fois seulement.

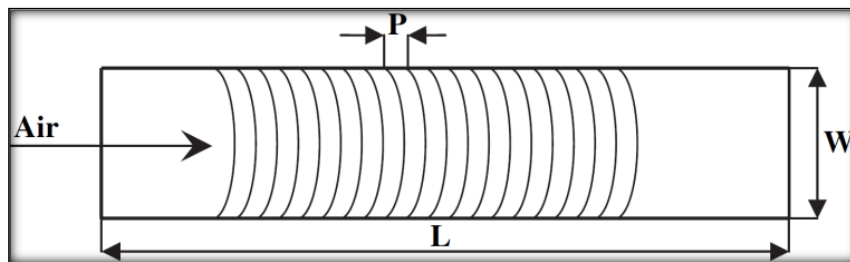


Figure (II.12) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des fils métalliques en forme d'arc [29].

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

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

$$Nu_u = 0.001047 \times Re^{1.3186} \times \left(\frac{e}{D}\right)^{0.3772} \times \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{-0.1198}$$

### II.1.2. 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 [16].

II.1.2.1. Nervures en forme de cales

Bhagoria et al (2002) [30] ont fait une étude expérimentale sur l'effet de la rugosité relative ( $p/e$ ) hauteur de rugosité relative ( $e/D_H$ ) et angle de coin sur le coefficient de transfert de chaleur et le facteur de frottement dans un capteur solaire à air avec une section rugueuse avec une courbe intégrale transversale en forme de cale représentée sur {la figure (II.13)}.

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

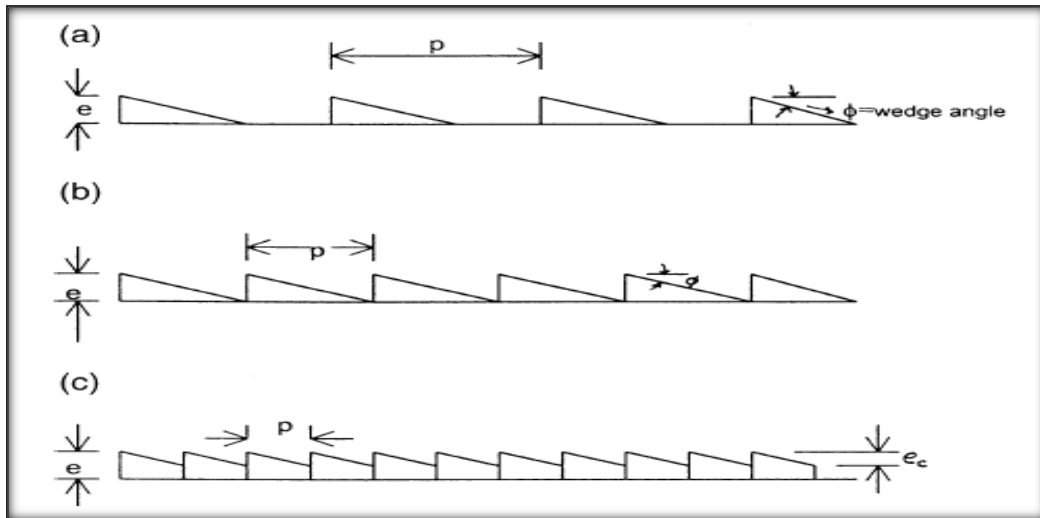


Figure (II.13) : Schéma des nervures en forme de cales (dent de scie) [30].

Leurs expressions du coefficient de frottement et transfert de chaleur étaient données par :

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

$$Nu = 1.89 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1.21} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.426} \left(\frac{P}{e}\right)^{2.94} \times \exp\left[-0.71 \left(\ln\left(\frac{p}{e}\right)\right)^2 \left(\frac{\phi}{10}\right)\right]$$

$$\times \exp\left[-1.5 \left(\ln\left(\left(\frac{\phi}{10}\right)\right)\right)\right]$$

II.1.2.2. Nervures chanfreinées

Karwa et al (1999) [31] ont étudié l'effet des nervures chanfreinées comme une rugosité artificielle, comme représenté sur {figure (II.14)}. Ces études ont couvert les paramètres suivants :

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

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°**.

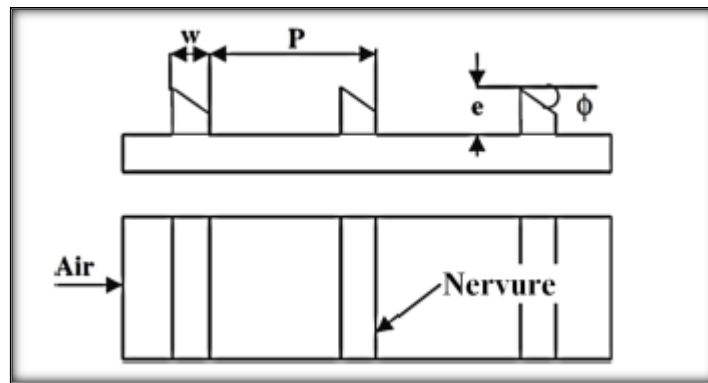


Figure (II.14) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des nervures chanfreinées [31].

Leurs expressions de coefficient de frottement sont :

$$f = 103.77 e^{-0.006\phi} \left(\frac{W}{H}\right)^{0.5} \left(\frac{P}{e}\right)^{-2.56} \times \exp\left[-0.7343 \left\{\ln\left(\frac{P}{e}\right)\right\}^2\right] (e^+)^{-0.31}$$

$$f = 103.77 e^{-0.006\phi} \left(\frac{W}{H}\right)^{0.5} \left(\frac{P}{e}\right)^{-2.56} \times \exp\left[-0.7433 \left\{\ln\left(\frac{P}{e}\right)\right\}^2\right] (e^+)^{-0.08}$$

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

Pour  $5 \leq e^+ \leq 20$

$$N_u = 1.325e^{-0.0078\phi} \left(\frac{W}{H}\right)^{-0.4} \left(\frac{P}{e}\right)^{2.695} \times \exp\left[-0.762 \left\{\ln\left(\frac{P}{e}\right)\right\}^2\right]$$

Pour  $20 \leq e^+ \leq 6$

II.1.2.3. Nervures combinées avec d'autres formes de rugosités

Jauker et al (2006) [32] ont étudié 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 ( $e/D_H$ ) et position relative de la rainure par fournissant une rugosité artificielle rainurée sur la plaque absorbante dans un conduit rectangulaire comme le montre {les figures (II.15), (II.16)}. Les paramètres géométriques considérés dans cette étude expérimentale sont les suivants : le nombre de Reynolds varie de 3000 à 21.000, la hauteur de rugosité relative ( $e/D_H$ ) 0.0181–0.0363, le pas de rugosité relatif ( $p/e$ ) (4.5–10.0), et la position de la rainure par rapport au taux de pas (0.3–0.7).

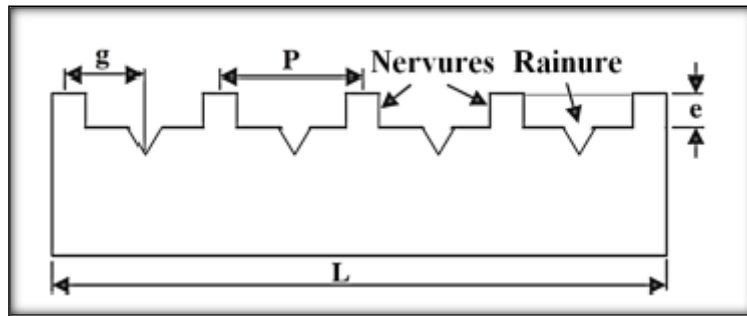


Figure (II.15) : Combinaison des nervures et rainures transversales [32].

L'expression du nombre de Nusselt défini par :

$$Nu = 0.002062Re^{0.349} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.349} \left(\frac{p}{e}\right)^{3.318} \times \exp \left[ -0.868 \left\{ \ln \left( \frac{p}{e} \right) \right\}^2 \right] \left(\frac{g}{p}\right)^{1.108} \\ \times \exp \left[ 2.486 \left\{ \ln \left( \frac{g}{p} \right) \right\}^2 + 1.406 \left\{ \ln \left( \frac{g}{p} \right) \right\}^3 \right]$$

Et l'expression du coefficient de frottement défini par :

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

Layek et al (2007) [33] ont étudié le transfert de chaleur et les caractéristiques de l'écoulement dans un canal muni de rugosités combinées de rainures avec des nervures chanfreinées transversales intégrées {figure (II.17)}, pour la gamme du nombre de Reynolds **3000 – 21000**. Les paramètres géométriques considérés sont un pas relatif entre rugosités **4.5 à 10**, l'angle de chanfrein de **5 à 30°**, la position relative de la rainure est de **0.3 à 0.6** et la hauteur relative de la rugosité de **0.022 à 0.04**. Les auteurs ont indiqué que le nombre de Nusselt et le coefficient de frottement ont augmenté de **3.24** et **3.78** fois respectivement par rapport à un conduit lisse. Cette amélioration maximale du nombre de Nusselt et le coefficient de frottement a été obtenue pour une position relative de la rainure de **0.4**.

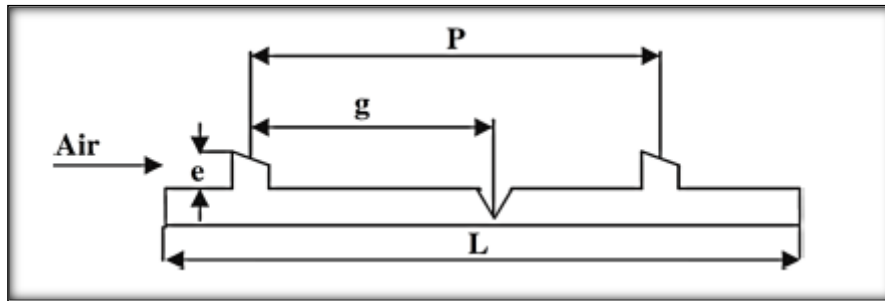


Figure (II.16) : Schéma d'un canal rectangulaire muni des nervures chanfreinées [33].

Ils ont utilisé les équations du coefficient de frottement et le nombre de Nusselt :

$$Nu = 0.0028R_e^{0.93} \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.528} \left(\frac{p}{e}\right)^{2.17} \left(\frac{g}{p}\right)^{-1.054} \times \phi^{0.77} [\exp(0.138(\ln \phi)^2)]$$

$$\times \left[ \exp \left\{ -0.57 \left( \ln \frac{p}{e} \right)^2 \right\} \right] \times \left[ \exp \left\{ -0.649 \left( \ln \frac{g}{p} \right)^2 \right\} \right]$$

$$f = 0.00276R_e^{0.1279} \left(\frac{e}{D_H}\right)^{0.3632} \left(\frac{p}{e}\right)^{4.255} \left(\frac{g}{p}\right)^{-0.976}$$

$$\times \exp[0.00575\phi] \exp \left[ -1.066 \left( \ln \frac{P}{e} \right)^2 \right] \times \exp \left[ -0.583 \left( \ln \frac{g}{P} \right)^2 \right]$$

### II.1.3. Nervures de type Bosses (alvéoles)/ saillies

Saini and Verma (2008) [34] ont effectué une étude expérimentale pour étudier l'effet de la rugosité et des paramètres de fonctionnement sur le transfert de chaleur et le coefficient de frottement dans un conduit rugueux muni d'une géométrie de rugosité en forme de bosse.

L'étude a couvert la gamme du nombre de Reynolds ( $R_e$ ) de **2000** à **12000**, la hauteur relative de rugosité ( $e/D_H$ ) de **0.018** à **0.037** et le pas relatif ( $p/e$ ) de **8** à **12**. Sur la base des données expérimentales, les valeurs du nombre de Nusselt ( $Nu$ ) et du facteur de frottement ( $f$ ) ont été déterminées pour différentes valeurs de rugosité et paramètres de fonctionnement.

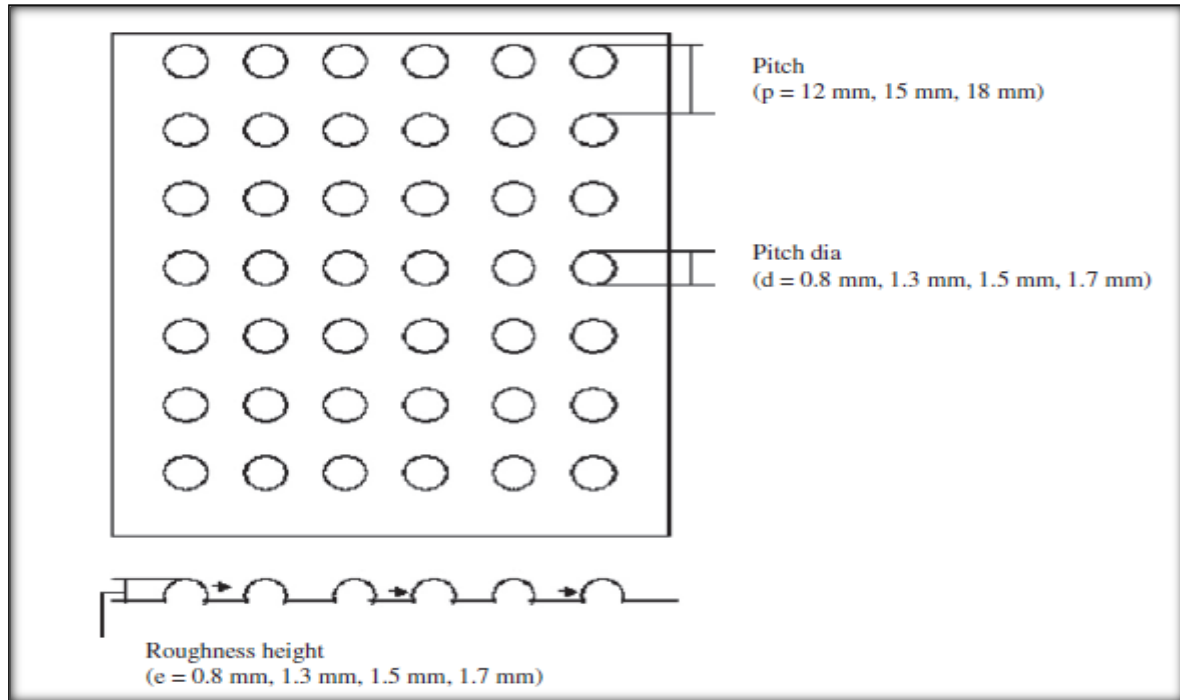


Figure (II.17) : Schéma de la géométrie en forme de bosse [34].

Les corrélations sont :

$$Nu = 5.2 \times 10^{-4} R_e^{1.27} \left(\frac{p}{e}\right)^{3.15} \times \left[ \exp(-2.12) \left(\log\left(\frac{p}{e}\right)\right)^2 \right] \left(\frac{e}{D}\right)^{0.033} \\ \times \left[ \exp(-1.30) \left(\log\left(\frac{e}{D}\right)\right)^2 \right]$$

$$f = 0.642 R_e^{-0.423} \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.465} \left[ \exp(0.054) \left(\log\left(\frac{e}{D}\right)\right)^2 \right] \\ \times \left(\frac{e}{D}\right)^{-0.0214} \left[ \exp(0.840) \left(\log\left(\frac{e}{D}\right)\right)^2 \right]$$



Nagaraju and Gowd (2015) [35] ont étudié expérimentalement afin d'améliorer le taux de transfert thermique des appareils d'un réchauffeur d'air solaire, des saillies triangulaires sont prévues sur la surface de la plaque absorbante en aluminium pour agir comme rugosité artificielle. Trois types de plaques absorbantes autres qu'une plaque absorbante lisse avec des saillies de différents angles d'apex sont choisis pour le travail. Les angles d'apex respectifs des saillies sur les trois plaques absorbantes sont de **300**, **450** et **600**. Le débit massique est maintenu entre **0,017 – 0,0182 Kg.s<sup>-1</sup>**. Le débit d'air correspond au nombre de Reynolds ( $Re$ ) allant de **10500** à **12000**, le nombre de Nusselt est de **50** à **110**, le coefficient de frottement est de **4.5 – 6.7 × 10<sup>-3</sup>** et le nombre de Stanton est de **6 – 14 × 10<sup>-5</sup>**. Le taux de transfert de chaleur et les performances thermo-hydrauliques obtenues sont **45°**. Une corrélation mathématique est développée sous la forme de nombre de Nusselt  $Nu = Re^a.Pr^b.Tan(\alpha^c)$  et le facteur de frottement  $f = Re^d.Tan(\alpha^e)$ .



Figure (II.18) : Plaques dures de différents angles d'apex [35].

Les corrélation obtenue sont:

$$Nu = Re^a Pr^b \tan \alpha^c$$

Ou :  $a = 1.1853, b = 19.3005, c = -0.0955$

$$f = Re^d \tan \alpha^e$$

Ou :  $d = 0.1961, e = 0.0040$

Bhusametal (2011) [36] ont réalisé une étude expérimentale pour déterminer l'écoulement de l'air et les caractéristiques du transfert de chaleur dans un conduit, la plaque absorbante de l'aérotherme solaire a été rendue rugueuse par la formation de bosses comme représenté sur {figure (II.20)}. Dans la gamme des paramètres suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_e = 4000 - 22000 \\ \frac{e}{D_H} = 0.03 \\ \frac{d}{D_H} = 0.0147 - 0.367 \\ \frac{l}{e} = 25 - 37.50 \\ \frac{S}{e} = 18.75 - 37.50 \\ \frac{W}{H} = 10 \end{array} \right.$$

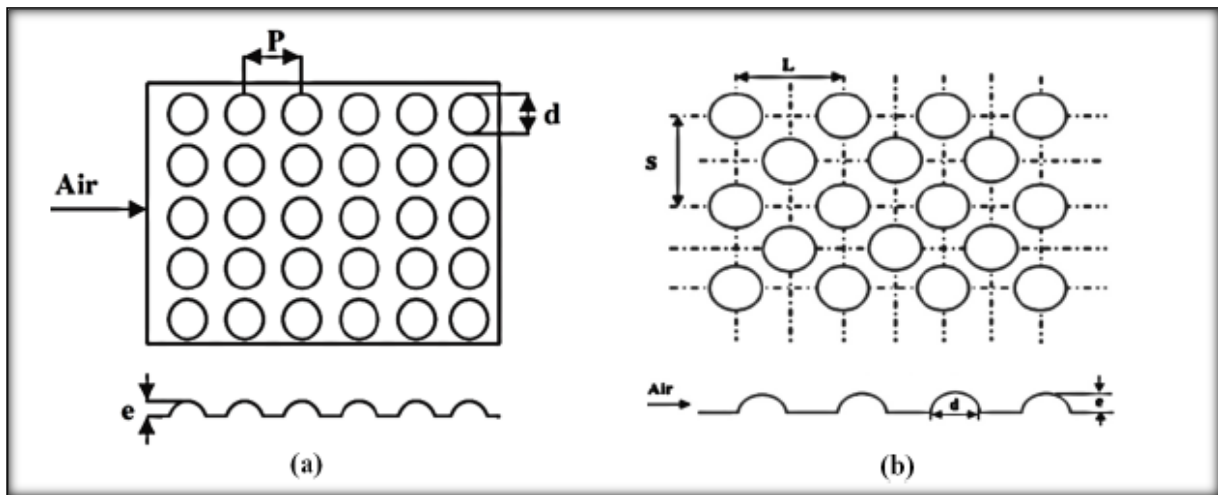


Figure (II.19) : Schéma d'un canal rectangulaire avec rugosités type bosses (alvéoles) [36].

Les formules de coefficient des frottements et le nombre de Nusselt donné par les expressions suivantes :

$$Nu = 2.1 \times 10^{-88} \left(\frac{S}{e}\right)^{12.94} \left(\frac{L}{e}\right)^{99.2} \left(\frac{d}{D_H}\right)^{-3.9} \exp\left[-10.4 \left(\log\left(\frac{S}{e}\right)\right)^2\right] \exp\left[-77.2 \left(\log\left(\frac{L}{e}\right)\right)^2\right] \exp\left[-7.83 \left(\log\left(\frac{d}{D_H}\right)\right)^2\right]$$

$$f = 2.32 Re^{-0.201} \left(\frac{S}{e}\right)^{-0.383} \left(\frac{L}{e}\right)^{-0.484} \left(\frac{d}{D_H}\right)^{0.133}$$

II.1.4. Grillage ou grille métallique étendue

Saini RP et Saini JS (1997) [37] 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 sur {figure (II.21)}. 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° et 72° respectivement.

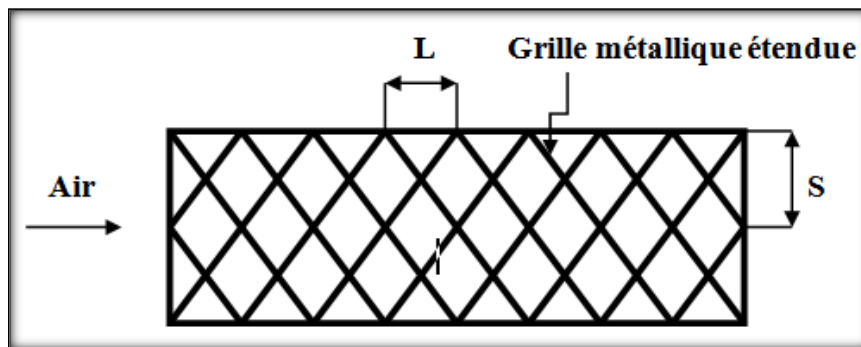


Figure (II.20) : Schéma d'un canal rectangulaire de type grille métallique étendue [37].

L'expression du coefficient de frottement est :

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

L'expression du nombre de Nusselt est :

$$N_u = 4 \times 10^{-4} \times Re^{1.22} \times \left(\frac{e}{D_H}\right)^{0.623} \times \left(\frac{S}{10e}\right)^{2.22} \times \exp\left[-1.25 \left(\ln \frac{2}{10e}\right)^2\right] \times \left(\frac{l}{10e}\right)^{2.66} \times \exp\left[-1.25 \left(\frac{-0.824}{10e}\right)^2\right]$$

II.1.5. Nervures en forme de K

Soi et al (2010) [38] ont réalisé une enquête par CFD visant à étudier l’effet du pas de l’élément de rugosité sur le transfert de chaleur et les caractéristiques de frottement de la gaine du réchauffeur d’air solaire pour une gamme de paramètres de système et de fonctionnement.

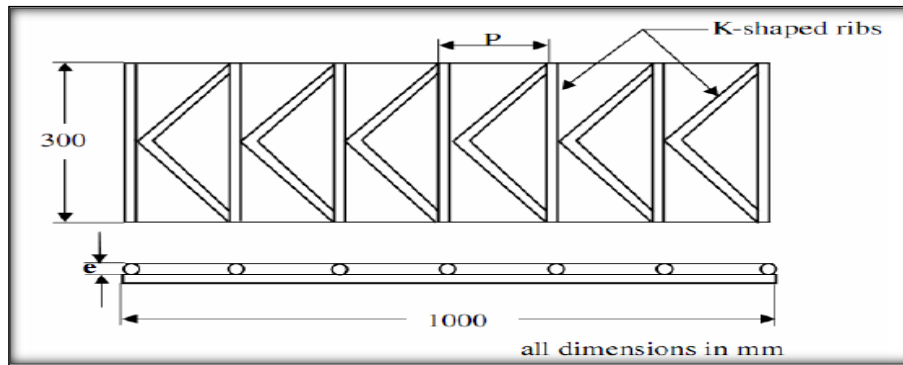


Figure (II.21) : Schéma de la plaque absorbante rugueuse en forme K [38].

| No. | Les paramètres                               | Les gammes des paramètres |
|-----|--|---------------------------|
| 1.  | Nombre de Reynolds ( $R_e$ )                 | 4000 – 16000              |
| 2.  | Le pas de rugosité relatif ( $p/e$ )         | 7.5 – 10.7                |
| 3.  | La hauteur de régosité relative ( $e/D_H$ )  | 0.029                     |
| 4.  | Le diamètre hydraulique de conduit ( $D_H$ ) | 54.54mm                   |
| 5.  | Ratio d'aspect de conduit ( $W/H$ )          | 10                        |

Tableau (II.4) : La gamme des paramètres [38].

Leur formule de coefficient de frottement et du nombre de Nusselt donnée par l’expression suivant :

$$N_u = 1 \times 10^{-5} \times R_e^{1.01} \times \left(\frac{p}{e}\right)^{5.7} \exp\left(-7.13 \left(\log\left(\frac{p}{e}\right)\right)^2\right)$$

$$f = 0.368 \times R_e^{-0.13} \times \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.64}$$

**II.1.6. Nervure en forme de U inversés :**

Bopche et al (2009) [39] ont développé des corrélations expérimentales pour le coefficient de transfert de chaleur ainsi que le coefficient de frottement, ont utilisé une rugosité artificielle sous la forme de tabulateur en forme de U inversés, comme représenté sur {figure (II.23)}. Ils ont travaillé sur la gamme des paramètres suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_e = 3800 - 18000 \\ \frac{e}{D_H} = 0.0186 - 0.03986 \\ \frac{p}{e} = 6.67 - 57.14 \\ \alpha = 90^\circ \end{array} \right.$$

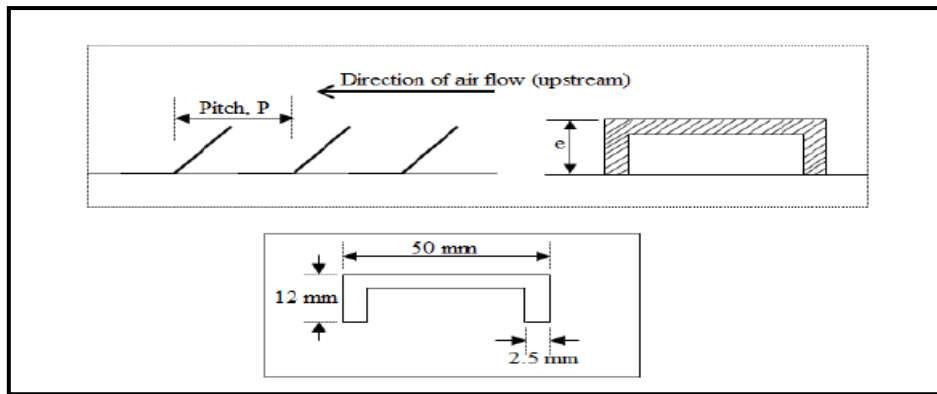


Figure (II.22) : Schéma des nervures en forme de U inversé [39].

Leurs corrélations étaient données par :

$$Nu = 0.5429(R_e)^{0.7054} \left(\frac{P}{e}\right)^{-0.1592} \left(\frac{e}{D_H}\right)^{0.3619}$$

$$f = 1.2134(R_e)^{-0.2076} \left(\frac{P}{e}\right)^{-0.4259} \left(\frac{e}{D_H}\right)^{0.3285}$$

**II.1.7. Les chicanes**

**II.1.7.1. Chicanes rectangulaire avec une partie supérieure incliné**

F.Menasria et al (2011) ont étudié expérimentalement l'optimisation des échanges convectifs dans le conduit utile du capteur. Le travail consiste à établir des modèles empiriques de calcul du coefficient d'échange thermique par convection, lors de l'écoulement de l'air dans

un conduit utile rectangulaire d'un capteur solaire plan à air, dont le plan inférieur est muni de rugosités artificielles dites chicanes de formes rectangulaires disposées en quinconce.

En régime d'écoulement laminaire  $Re < 2100$ , l'effet du nombre de Reynolds sur le coefficient d'échange thermique convectif est significatif, le coefficient d'échange ( $h_c$ ) varie dans l'intervalle de 4 à  $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  pour le premier cas où le pas entre rangée  $P_{e-r} = 10 \text{ cm}$ , D'autre part, il ne varie que de 4 à  $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  dans le deuxième cas, où le pas entre rangée est le double  $P_{e-r} = 10 \text{ cm}$ .

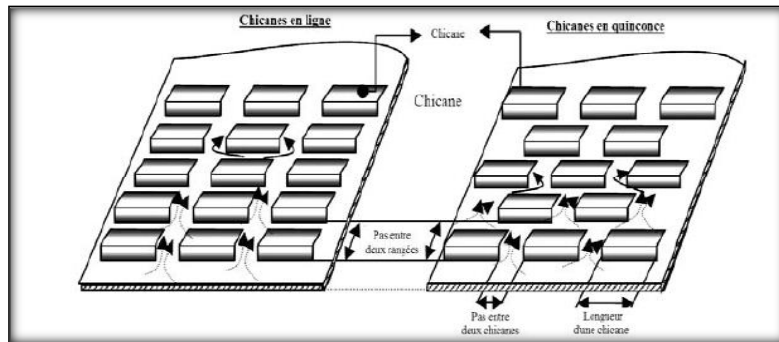


Figure (II.23) : Disposition en ligne et en quinconce des chicanes dans la veine d'air mobile [40].

a) Régime laminaire :

➤ Première cas :

$$h_c = \left[ \frac{A_c \cdot \rho \cdot C_p \cdot u}{D_H^2} \times Re^{-9.7311} \times P_e^{10.9725} \times E_c^{-0.5811} \times \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.1074} \right] \left[ \left(\frac{P_{e-c}}{D_H}\right)^{-0.3022} \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.6246} \times \left(\frac{l_{ch}}{D_H}\right)^{-0.4991} \times \left(\frac{I}{\rho \cdot u^3}\right)^{-0.0375} \right]$$

➤ Deuxième cas :

$$h_c = \left[ \frac{A_c \cdot \rho \cdot C_p \cdot u}{D_H^2} \times Re^{-0.5611} \times P_e^{1.6560} \times E_c^{-0.3195} \times \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0627} \right] \left[ \left(\frac{P_{e-c}}{D_H}\right)^{-0.3195} \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.5067} \times \left(\frac{l_{ch}}{D_H}\right)^{-0.2912} \times \left(\frac{I}{\rho \cdot u^3}\right)^{-0.1416} \right]$$

b) Régime turbulent :

➤ Première cas :

$$h_c = \left[ \frac{A_c \cdot \rho \cdot C_p \cdot u}{D_H^2} \times R_e^{-3.0582} \times P_e^{-2.6059} \times E_c^{-0.9945} \times \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.1449} \right. \\ \left. \left(\frac{P_{e-c}}{D_H}\right)^{-0.4078} \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.8424} \times \left(\frac{l_{ch}}{D_H}\right)^{-0.6735} \times \left(\frac{I}{\rho \cdot u^3}\right)^{-0.5927} \right]$$

➤ Deuxième cas :

$$h_c = \left[ \frac{A_c \cdot \rho \cdot C_p \cdot u}{D_H^2} \times R_e^{-3.6897} \times P_e^{-2.7715} \times E_c^{-0.5105} \times \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0401} \right. \\ \left. \left(\frac{P_{e-c}}{D_H}\right)^{-0.1130} \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3246} \times \left(\frac{l_{ch}}{D_H}\right)^{-0.1866} \times \left(\frac{I}{\rho \cdot u^3}\right)^{-0.0891} \right]$$

II.1.7.2. Chicanes en forme diverses

CHOUCHANE, N. (2012) [41] ont réalisé une étude expérimentale consiste à établir des modèles empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des rugosités artificielles de formes diverses dites chicanes et aux différents modes de dispositions de celles-ci dans le conduit utile d'un canal rectangulaire. Pour réaliser le travail, un dispositif expérimental a été mis au point pour mesurer les pertes de charge occasionnées par les chicanes entre l'amont et l'aval du conduit utile.

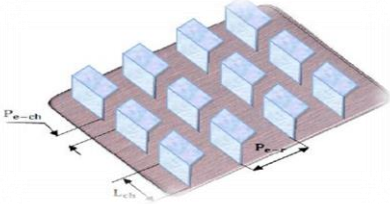
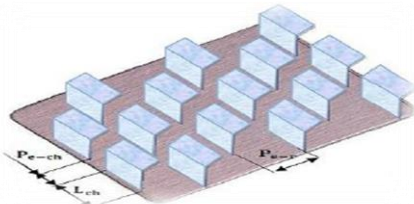
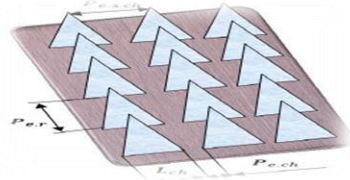
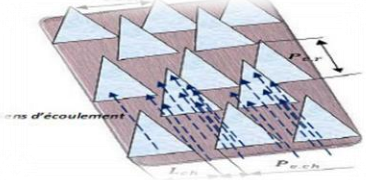
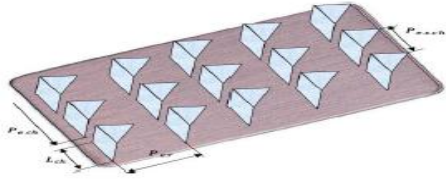
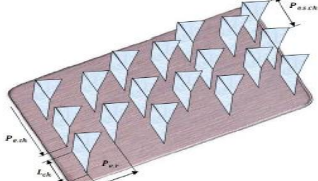
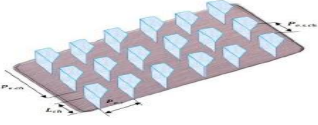
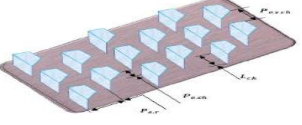
| <b>Chicanes rectangulaire</b>   |  |
|---|--|
|    |    |
| <i>Chicanes disposées en rangé</i>  | <i>Chicanes disposées en quinconce</i>   |
| <b>Chicanes triangulaire</b>  |  |
|    |    |
| <i>Chicanes disposées en rangé</i>  | <i>Chicanes disposées en quinconce</i>   |
| <b>Chicanes rectangulaire-triangulaire</b>  |  |
|  |  |
| <i>Chicanes disposées en rangé</i>  | <i>Chicanes disposées en quinconce</i>   |
| <b>Chicanes rectangulaire-trapézoïdale</b>  |  |
|  |  |
| <i>Chicanes disposées en rangé</i>  | <i>Chicanes disposées en quinconce</i>   |

Tableau (II.5) : Les différents configurations des chicanes [41].



Coefficient des frottements données par les expressions suivantes :

1. Les chicanes rectangulaires :

➤ Cas 1 : Disposées en rangées :

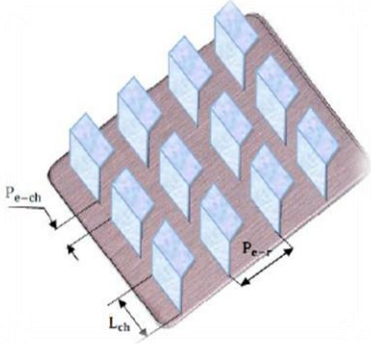
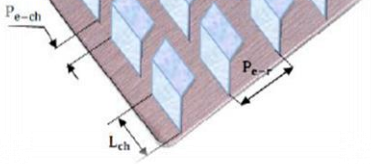
| Les régimes             | Configuration   | Coefficient de frottement   |
|-------------------------|---|---|
| <p>Régime laminaire</p> |   | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.2928} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7984} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2.2582} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-1.3196} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2.264} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.2928} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7984} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2.2582} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-1.3196} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2.264} \end{matrix} \right]$     |
| <p>Régime turbulent</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.2928} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7452} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0.0299} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3975} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0.3246} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.2928} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7452} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0.0299} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3975} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0.3246} \end{matrix} \right]$ |

Tableau (II.6) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en rangées [41].

➤ Cas 2 : Disposées en quinconce :

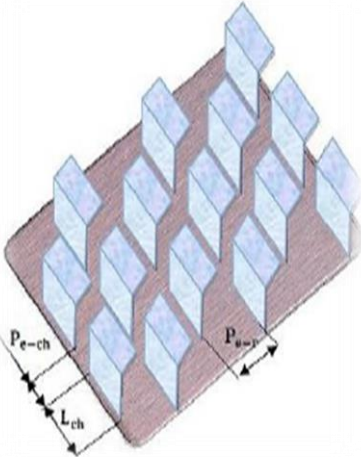
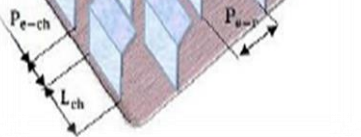
| Les régimes      | Configuration   | Coefficient de frottement   |
|------------------|---|---|
| Régime laminaire |   | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{array}{c} (R_e)^{-1.2697} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-3.8416} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{3.2451} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3260} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{3.2451} \end{array} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{array}{c} (R_e)^{-1.2697} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-3.8416} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{3.2451} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3260} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{3.2451} \end{array} \right]$   |
| Régime turbulent |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{array}{c} (R_e)^{-0.4150} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-1.2540} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.2820} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1972} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0.0415} \end{array} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{array}{c} (R_e)^{-0.4150} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-1.2540} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.2820} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1972} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-0.0415} \end{array} \right]$ |

Tableau (II.7) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires disposées en quinconce [41].

2. Les chicanes rectangulaires-triangulaire :

➤ Cas 1 : Disposées en rangées :

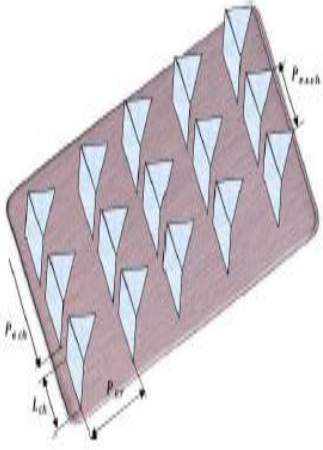
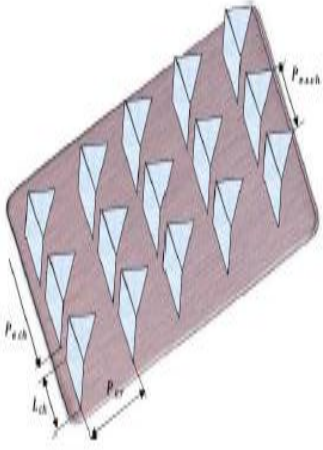
| Les régimes             | Configuration  | Coefficient de frottement   |
|-------------------------|--|---|
| <p>Régime laminaire</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.1972} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7270} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-6.7089} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3428} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{6.3749} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{11.2249} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.1972} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.7270} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-6.7089} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3428} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{6.3749} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{11.2249} \end{matrix} \right]$ |
| <p>Régime turbulent</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.2060} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0043} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-7.1129} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0949} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-7} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{12.3519} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.2060} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0043} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-7.1129} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0949} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-7} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{12.3519} \end{matrix} \right]$       |

Tableau (II.8) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaire disposées en rangée [41].

➤ Cas 2 : Disposées en quinconce :

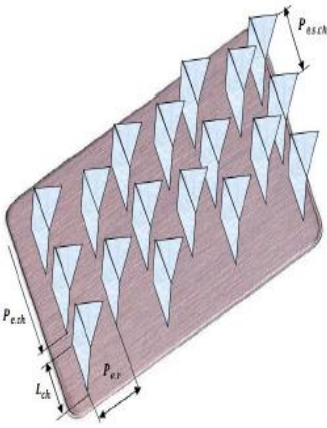
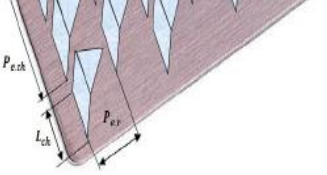
| Les régimes             | Configuration  | Coefficient de frottement   |
|-------------------------|--|---|
| <p>Régime laminaire</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.6915} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.6319} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-9.6765} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1881} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-9.2643} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{16.4783} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.6915} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.6319} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-9.6765} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1881} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-9.2643} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{16.4783} \end{matrix} \right]$ |
| <p>Régime turbulent</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.2060} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0043} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-7.1129} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0949} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-7} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{12.3519} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.2060} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0043} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-7.1129} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.0949} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-7} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{12.3519} \end{matrix} \right]$         |

Tableau (II.9) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-triangulaire disposées en quinconce [41].

3. Les chicanes triangulaires :

➤ Cas 1 : Disposées en rangées :

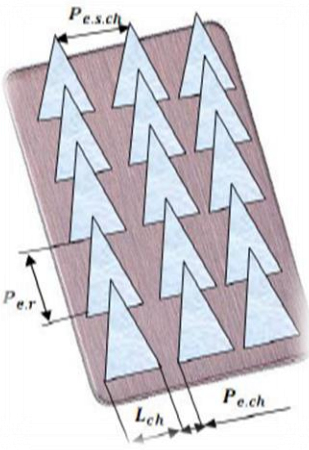
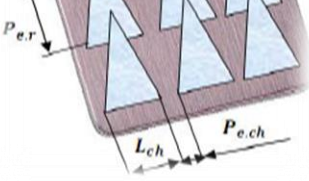
| Les régimes      | Configuration   | Coefficient de frottement   |
|------------------|---|---|
| Régime laminaire |   | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.1467} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-5.5799} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-2.9986} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3370} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{4.9329} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.2758} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.1467} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-5.5799} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-2.9986} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.3370} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{4.9329} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.2758} \end{matrix} \right]$   |
| Régime turbulent |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.2378} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0496} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-1.4725} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1446} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0.3576} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.3689} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.2378} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.0496} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-1.4725} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1446} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0.3576} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.3689} \end{matrix} \right]$ |

Tableau (II.10) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en rangée [41].

➤ Cas 2 : Disposées en quinconce :

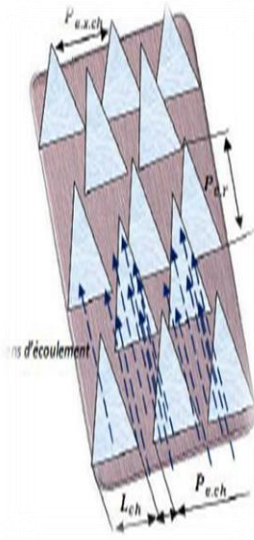
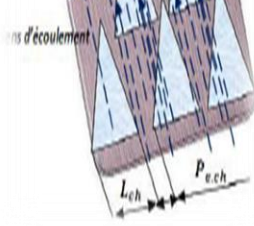
| Les régimes             | Configuration  | Coefficient de frottement   |
|-------------------------|--|---|
| <p>Régime laminaire</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.9598} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.89259} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{8.6893} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.58804} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{7.4395} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.30883} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-1.9598} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.89259} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{8.6893} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.58804} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{7.4395} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.30883} \end{matrix} \right]$         |
| <p>Régime turbulent</p> |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.90603} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.56980} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2.89080} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.24040} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{2.58700} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.002617} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.90603} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.56980} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{2.89080} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.24040} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{2.58700} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{0.002617} \end{matrix} \right]$ |

Tableau (II.11) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes triangulaires disposées en quinconce [41].

4. Les chicanes rectangulaires-trapézoïdales :

➤ Cas 1 : Disposées en rangées :

| Les régimes      | Configuration | Coefficient de frottement   |
|------------------|---------------|---|
| Régime laminaire |               | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.9494} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.4095} \left(\frac{Pe-ch}{D_H}\right)^{-4.7993} \\ \left(\frac{Pe-r}{D_H}\right)^{-0.3016} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2.7847} \left(\frac{Pe-s-ch}{D_H}\right)^{8.4554} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.9494} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.4095} \left(\frac{Pe-ch}{D_H}\right)^{-4.7993} \\ \left(\frac{Pe-r}{D_H}\right)^{-0.3016} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2.7847} \left(\frac{Pe-s-ch}{D_H}\right)^{8.4554} \end{matrix} \right]$ |
| Régime turbulent |               | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.7902} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.4748} \left(\frac{Pe-ch}{D_H}\right)^{-4.0636} \\ \left(\frac{Pe-r}{D_H}\right)^{-0.0787} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2.5227} \left(\frac{Pe-s-ch}{D_H}\right)^{7.3355} \end{matrix} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{matrix} (Re)^{-0.7902} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.4748} \left(\frac{Pe-ch}{D_H}\right)^{-4.0636} \\ \left(\frac{Pe-r}{D_H}\right)^{-0.0787} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-2.5227} \left(\frac{Pe-s-ch}{D_H}\right)^{7.3355} \end{matrix} \right]$ |

Tableau (II.12) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en rangée [41].

➤ Cas 2 : Disposées en quinconce :

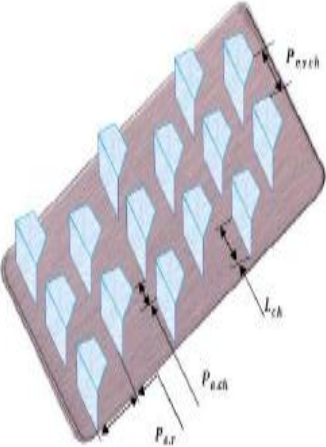
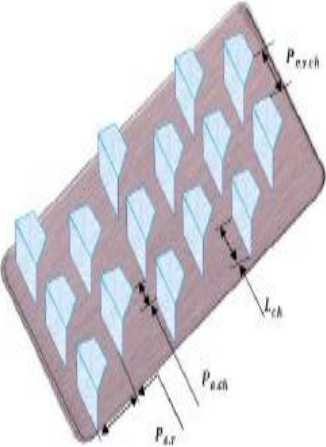
| Les régimes      | Configuration  | Coefficient de frottement   |
|------------------|--|---|
| Régime laminaire |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{array}{ccc} (Re)^{-0.0048} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.6724} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.4630} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.7872} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-1.0012} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.2933} \end{array} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{array}{ccc} (Re)^{-0.0048} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.6724} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.4630} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.7872} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-1.0012} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.2933} \end{array} \right]$ |
| Régime turbulent |  | $\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho \left[ \begin{array}{ccc} (Re)^{-0.2819} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.3563} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.5277} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1789} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0.0295} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.6415} \end{array} \right] V^2$ $\lambda = \left[ \begin{array}{ccc} (Re)^{-0.2819} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-0.3563} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{0.5277} \\ \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.1789} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{0.0295} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{-0.6415} \end{array} \right]$ |

Tableau (II.13) : Coefficient de frottement pour la configuration des chicanes rectangulaires-trapézoïdales disposées en quinconce [41].



**Conclusion**

A partir de cette étude bibliographique des travaux menés par les chercheurs, nous avons atteint que l'efficacité et le performance des capteurs solaires à air est liée aux paramètres géométriques et physiques.

Alors en utilise la rugosité artificielle pour l'amélioration de l'efficacité thermique et thermo-hydraulique au niveau de réchauffeur à air solaire.

# *CHAPITRE III*

## *Étude expérimentale*

---

**Introduction**

Dans ce chapitre qui est consacré à l'étude expérimentale, on a présenté en premier lieu le dispositif expérimental et les instruments de mesure employés pour le prélèvement des températures (entrées et sorties), la vitesse d'air et le flux solaire reçu par le capteur, ainsi que la forme et les propriétés des chicanes qui sont en aluminium et en forme des barrettes perforés sous forme **V** dont les caractéristiques géométriques sont affichées sous formes des tableaux pour montrer le nombre de configurations testées durant les expériences.

**III.1. Description du dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental est réalisé dans le hall technologique au département du génie mécanique de l'université Mohamed Khider – Biskra. Il s'agit d'un capteur solaire plan à air à simple passe entre l'absorbeur et la plaque absorbante en acier galvanisé. Ce capteur de forme rectangulaire en **1.50 m** de longueur, **0.50 m** de largeur et d'une hauteur égale à **0.025 m** [5].

La rugosité artificielle se présente sous des obstacles (des chicanes) en aluminium, à l'intérieur du conduit du capteur solaire plan à air les chicanes sont disposées en forme **V**. L'entrée et la sortie de l'air se font à l'aide d'un aspirateur relié au capteur solaire. Les températures seront mesurées avec des sondes.

Dans cette étude expérimentale, on s'intéresse à la modélisation des pertes thermiques dans le conduit utile, avec une rugosité artificielle qui sont découpés aluminium de formes **V**.

Dans notre étude on a utilisé deux configurations principales.

- Cas ou la longueur des chicanes est égal à **30 cm**, les pas entre deux rangées sont égaux à **4.8, 10, 19** et **39.5 cm** et les pas relatifs entre les sommets de deux chicanes successives de la même rangée sont de **3.5, 7.5, 14.5** et **30 cm**.
- Cas des chicanes sa longueur est égale à **28 cm**, les pas entre deux rangées à **5, 10, 20** et **40 cm** et les pas relatifs entre les sommets de deux chicanes successives de la même rangée sont de **4.8, 9.6, 19.2** et **38.4 cm**

Dans les deux cas les chicanes comportent deux parties solidaires, une partie fixe orthogonale au plan d'écoulement de **01 cm** de longueur, par contre la partie inclinée est de **1.5 cm**, les incidences de la partie supérieure inclinée sont de **30°, 60°, 120°** et **150°**.



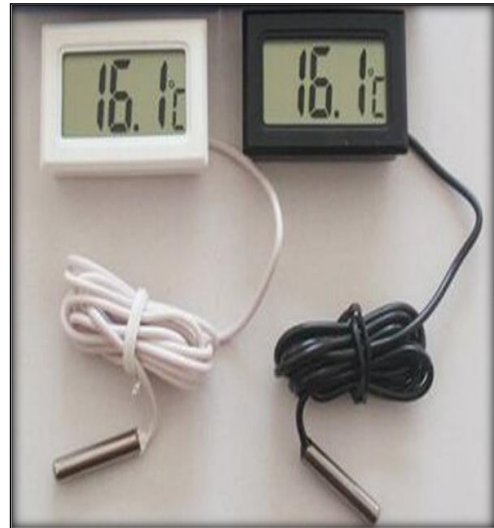
*Figure (III.1) : Dispositif expérimental.*

Le dispositif expérimental comporte les éléments suivants :

1. **Aspirateur** : pour le pompage de l'air (Figure III.2).
2. **Thermomètre** : pour les mesures de la température à l'entrée et la sortie du capteur solaire à air (Figure III.3).
3. **Variateur de vitesse** : pour varier la vitesse d'écoulement de l'air (Figure III.4).
4. **Anémomètre à hélice** : pour les mesures de vitesse extérieure (Figure III.5).
5. **Pyranomètre** : pour mesurer le rayonnement solaire (Figure III.6).



*Figure (III.2) : Aspirateur.*



*Figure (III.3) : Thermomètre.*



*Figure (III.4) : Variateur de vitesse.*



*Figure (III.5) : Anémomètre à hélice.*



*Figure (III.6) : Pyranomètre.*





**Figure (III.7) : Les barrettes des chicanes :**

$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, L_{ch} = 30 \text{ cm}.$

**Figure (III.8) : Les barrettes des chicanes :**

$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, L_{ch} = 30 \text{ cm}.$

**Figure (III.9) : Les barrettes des chicanes :**

$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, L_{ch} = 28 \text{ cm}.$



**Figure (III.10) : Chicanes en forme de V :**

$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, L_{ch} = 30 \text{ cm}.$



**Figure (III.11) : Chicanes en forme de V :**

$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, L_{ch} = 30 \text{ cm}.$

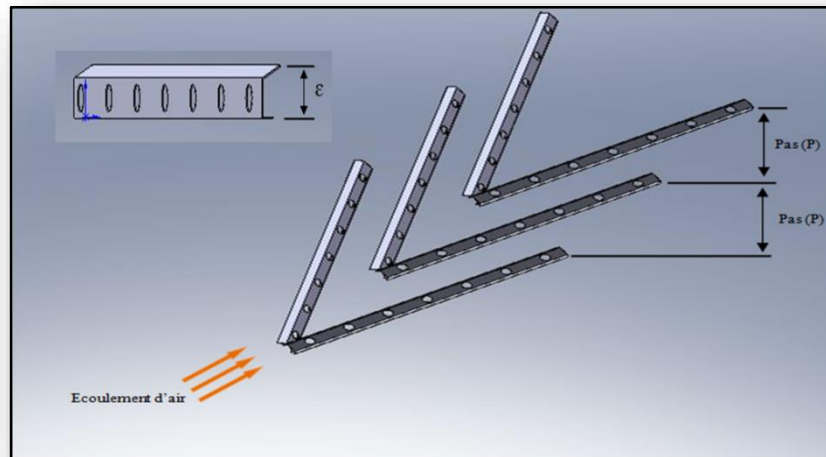
Le principe de cette étude expérimentale consiste à effectuer des prises de mesure des pertes thermiques du canal pour différentes valeurs de débit volumique, et ceci pour diverses modes de dispositions et configurations de chicanes considérées.

**III.2. Types de configurations de chicanes étudiées**

| <i>Chicanes en forme de V</i>  |                |               |               |                |              |        |
|--------------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|--------------|--------|
|                                |                |               |               |                |              |        |
| <i>Paramètres géométriques</i> |                |               |               |                |              |        |
| $L_{ch}$ [m]                   | $\epsilon$ [m] | $P_{e-r}$ [m] | $P_{e-s}$ [m] | $P_{e-tr}$ [m] | $D_{tr}$ [m] | $\phi$ |
| 0.30                           | 0.0175         | 0.035         | 0.048         | 0.0376         | 0.0024       | 30°    |
| 0.30                           | 0.0175         | 0.075         | 0.10          | 0.0376         | 0.0024       | 30°    |
| 0.30                           | 0.0175         | 0.145         | 0.19          | 0.0376         | 0.0024       | 30°    |
| 0.30                           | 0.0175         | 0.30          | 0.395         | 0.0376         | 0.0024       | 30°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.035         | 0.048         | 0.0376         | 0.0024       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.075         | 0.10          | 0.0376         | 0.0024       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.145         | 0.19          | 0.0376         | 0.0024       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.30          | 0.395         | 0.0376         | 0.0024       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.035         | 0.048         | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.075         | 0.10          | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.145         | 0.19          | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.30                           | 0.02299038106  | 0.30          | 0.395         | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.28                           | 0.02299038106  | 0.05          | 0.048         | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.28                           | 0.02299038106  | 0.10          | 0.096         | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.28                           | 0.02299038106  | 0.20          | 0.192         | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |
| 0.28                           | 0.02299038106  | 0.40          | 0.384         | 0.0345         | 0.0055       | 60°    |

**Tableau (III.1) : Configuration des chicanes en forme V (cas 1).**

*Chicanes en forme de V*



*Paramètres géométriques*

| $L_{ch}$ [m] | $\varepsilon$ [m] | $P_{e-r}$ [m] | $P_{e-s}$ [m] | $P_{e-tr}$ [m] | $D_{tr}$ [m] | $\varnothing$ |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|--------------|---------------|
| 0.30         | 0.0175            | 0.035         | 0.048         | 0.0376         | 0.0024       | 150°          |
| 0.30         | 0.0175            | 0.075         | 0.10          | 0.0376         | 0.0024       | 150°          |
| 0.30         | 0.0175            | 0.145         | 0.19          | 0.0376         | 0.0024       | 150°          |
| 0.30         | 0.0175            | 0.30          | 0.395         | 0.0376         | 0.0024       | 150°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.035         | 0.048         | 0.0376         | 0.0024       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.075         | 0.10          | 0.0376         | 0.0024       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.145         | 0.19          | 0.0376         | 0.0024       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.30          | 0.395         | 0.0376         | 0.0024       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.035         | 0.048         | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.075         | 0.10          | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.145         | 0.19          | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.30         | 0.02299038106     | 0.30          | 0.395         | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.28         | 0.02299038106     | 0.05          | 0.048         | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.28         | 0.02299038106     | 0.10          | 0.096         | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.28         | 0.02299038106     | 0.20          | 0.192         | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |
| 0.28         | 0.02299038106     | 0.40          | 0.384         | 0.0345         | 0.0055       | 120°          |

*Tableau (III.2) : Configuration des chicanes en forme V (cas 2).*



III.3. Tableaux des mesures des échanges thermiques enregistrés

➤ Cas sans chicanes (lisse)

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:30      | 29,9          | 35,9          | 6                  | 1,92               | 0,0150796                                    | 1,2063716          | 573                        |
| 09:45      | 30,5          | 37            | 6,5                | 1,84               | 0,0144513                                    | 1,1561061          | 635                        |
| 10:00      | 31            | 37,8          | 6,8                | 1,75               | 0,0137445                                    | 1,0995574          | 658                        |
| 10:15      | 31,1          | 38,6          | 7,5                | 1,74               | 0,0136659                                    | 1,0932742          | 722                        |
| 10:30      | 31,8          | 39,8          | 8                  | 1,51               | 0,0118595                                    | 0,948761           | 754                        |
| 10:45      | 31,8          | 39,3          | 7,5                | 2,43               | 0,0190852                                    | 1,526814           | 780                        |
| 11:00      | 32,1          | 40,4          | 8,3                | 2,36               | 0,0185354                                    | 1,4828317          | 812                        |
| 11:15      | 32,9          | 41,2          | 8,3                | 2,53               | 0,0198706                                    | 1,5896459          | 810                        |
| 11:30      | 32,9          | 41,3          | 8,4                | 2,45               | 0,0192423                                    | 1,5393804          | 851                        |
| 11:45      | 33,1          | 41,4          | 8,3                | 2,92               | 0,0229336                                    | 1,8346901          | 871                        |

Tableau (III.3) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal sans chicanes (lisse).

➤ Cas avec chicanes

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 11:45      | 23,5          | 51,1          | 27,6               | 2,95               | 0,0231692                                    | 6,1194073          | 1020                       |
| 12:00      | 24,6          | 51,4          | 26,8               | 3,1                | 0,0243473                                    | 6,4305636          | 1002                       |
| 12:15      | 24,5          | 51,8          | 27,3               | 3                  | 0,0235619                                    | 6,2231261          | 1030                       |
| 12:30      | 25,1          | 53,2          | 28,1               | 2,94               | 0,0230907                                    | 6,0986636          | 1064                       |
| 12:45      | 25,6          | 53,7          | 28,1               | 2,8                | 0,0219911                                    | 5,808251           | 1064                       |
| 13:00      | 26            | 54,5          | 28,5               | 2,85               | 0,0223838                                    | 5,9119698          | 1043                       |
| 13:15      | 25,5          | 53,2          | 27,7               | 2,58               | 0,0202633                                    | 5,3518884          | 1025                       |
| 13:30      | 25,6          | 52,7          | 27,1               | 2,73               | 0,0214414                                    | 5,6630447          | 992                        |
| 13:45      | 26,4          | 52,3          | 25,9               | 2,83               | 0,0222268                                    | 5,8704823          | 975                        |
| 14:00      | 26,6          | 51,9          | 25,3               | 2,84               | 0,0223053                                    | 5,891226           | 962                        |

Tableau (III.4) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$$

$$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 30^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 25,2          | 39,9          | 14,7               | 3,6                | 0,0282743                                    | 7,4677513          | 664                        |
| 09:15      | 22,3          | 36,9          | 14,6               | 3,7                | 0,0290597                                    | 7,6751888          | 687                        |
| 09:30      | 22,7          | 38,9          | 16,2               | 3,8                | 0,0298451                                    | 7,8826264          | 735                        |
| 09:45      | 23,5          | 40,5          | 17                 | 3,6                | 0,0282743                                    | 7,4677513          | 787                        |
| 10:00      | 23,5          | 41,8          | 18,3               | 3,7                | 0,0290597                                    | 7,6751888          | 815                        |
| 10:15      | 24,7          | 44,3          | 19,6               | 3,6                | 0,0282743                                    | 7,4677513          | 850                        |
| 10:30      | 25,3          | 45,7          | 20,4               | 3,6                | 0,0282743                                    | 7,4677513          | 877                        |
| 10:45      | 25,9          | 47,7          | 21,8               | 3,6                | 0,0282743                                    | 7,4677513          | 900                        |
| 11:00      | 26,4          | 48,4          | 22                 | 3,5                | 0,0274889                                    | 7,2603138          | 935                        |
| 11:15      | 27,8          | 50,3          | 22,5               | 3,5                | 0,0274889                                    | 7,2603138          | 945                        |

Tableau (III.5) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 1.75 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 10 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}$ ,

$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}$ ,  $\phi = 30^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 11,9          | 25,6          | 13,7               | 5,1                | 0,0400553                                    | 10,579314          | 454                        |
| 08:45      | 11,8          | 24,2          | 12,4               | 5,3                | 0,0416261                                    | 10,994189          | 508                        |
| 09:00      | 18,5          | 25            | 6,5                | 5,2                | 0,0408407                                    | 10,786752          | 541                        |
| 09:15      | 19,1          | 26,5          | 7,4                | 5,4                | 0,0424115                                    | 11,201627          | 604                        |
| 09:30      | 19,5          | 26,8          | 7,3                | 5,7                | 0,0447677                                    | 11,82394           | 617                        |
| 09:45      | 20,2          | 28,3          | 8,1                | 5,5                | 0,0431969                                    | 11,409064          | 681                        |
| 10:00      | 21            | 29,8          | 8,8                | 5,4                | 0,0424115                                    | 11,201627          | 716                        |
| 10:15      | 21,2          | 31            | 9,8                | 5,8                | 0,0455531                                    | 12,031377          | 742                        |
| 10:30      | 22,1          | 32,2          | 10,1               | 5,3                | 0,0416261                                    | 10,994189          | 768                        |
| 10:45      | 21,7          | 32,9          | 11,2               | 5,9                | 0,0463385                                    | 12,238815          | 809                        |

Tableau (III.6) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 1.75 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 19 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}$ ,

$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}$ ,  $\phi = 30^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 11:45      | 23,9          | 38,5          | 14,6               | 5                  | 0,0392699                                    | 10,371877          | 900                        |
| 12:00      | 25,6          | 37,8          | 12,2               | 5,5                | 0,0431969                                    | 11,409064          | 922                        |
| 12:15      | 25,4          | 37,4          | 12                 | 5,2                | 0,0408407                                    | 10,786752          | 929                        |
| 12:30      | 25            | 37,6          | 12,6               | 5,5                | 0,0431969                                    | 11,409064          | 935                        |
| 12:45      | 25,5          | 38,8          | 13,3               | 5,8                | 0,0455531                                    | 12,031377          | 934                        |
| 13:00      | 25,7          | 37,8          | 12,1               | 5,5                | 0,0431969                                    | 11,409064          | 930                        |
| 13:15      | 25,3          | 38,5          | 13,2               | 5,8                | 0,0455531                                    | 12,031377          | 912                        |
| 13:30      | 27,8          | 38,8          | 11                 | 5,9                | 0,0463385                                    | 12,238815          | 915                        |
| 13:45      | 27,4          | 38,3          | 10,9               | 6,3                | 0,0494801                                    | 13,068565          | 881                        |
| 14:00      | 27,4          | 38,1          | 10,7               | 6,4                | 0,0502655                                    | 13,276002          | 883                        |

Tableau (III.7) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 30^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 10:30      | 25,9          | 36,8          | 10,9               | 4,3                | 0,0337721                                    | 32,442552          | 620                        |
| 10:45      | 26,9          | 37,7          | 10,8               | 4,6                | 0,0361283                                    | 34,705985          | 855                        |
| 11:00      | 26,9          | 38            | 11,1               | 4,7                | 0,0369137                                    | 35,460463          | 871                        |
| 11:15      | 27,3          | 38,9          | 11,6               | 4,8                | 0,0376991                                    | 36,214941          | 917                        |
| 11:30      | 27,8          | 41            | 13,2               | 4,3                | 0,0337721                                    | 32,442552          | 930                        |
| 11:45      | 27,9          | 41,5          | 13,6               | 4,2                | 0,0329867                                    | 31,688074          | 932                        |
| 12:00      | 28,6          | 40,4          | 11,8               | 4,7                | 0,0369137                                    | 35,460463          | 941                        |
| 12:15      | 28,9          | 41,4          | 12,5               | 4,1                | 0,0322013                                    | 30,933596          | 997                        |
| 12:30      | 29,3          | 40,8          | 11,5               | 4,8                | 0,0376991                                    | 36,214941          | 1001                       |
| 12:45      | 29,2          | 40,4          | 11,2               | 5                  | 0,0392699                                    | 37,723897          | 956                        |

Tableau (III.8) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 60^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 13:00      | 29,8          | 41,1          | 11,3               | 4,9                | 0,0384845                                    | 36,969419          | 958                        |
| 13:15      | 29,9          | 40,9          | 11                 | 5,2                | 0,0408407                                    | 39,232853          | 928                        |
| 13:30      | 30,6          | 40,6          | 10                 | 5,5                | 0,0431969                                    | 41,496287          | 926                        |
| 13:45      | 30,3          | 40,2          | 9,9                | 5,8                | 0,0455531                                    | 43,759721          | 801                        |
| 14:00      | 30,6          | 40,2          | 9,6                | 5,7                | 0,0447677                                    | 43,005243          | 902                        |
| 14:15      | 31,4          | 39,7          | 8,3                | 5,9                | 0,0463385                                    | 44,514199          | 918                        |
| 14:30      | 30            | 36,5          | 6,5                | 6,1                | 0,0479093                                    | 46,023155          | 602                        |
| 14:45      | 29,8          | 35,7          | 5,9                | 5,8                | 0,0455531                                    | 43,759721          | 587                        |
| 15:00      | 30,2          | 35,2          | 5                  | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 525                        |
| 15:15      | 30,5          | 34,6          | 4,1                | 5,1                | 0,0400553                                    | 38,478375          | 511                        |

Tableau (III.9) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 10 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}$ ,  $D_{tr} = 2.4 \text{ mm}$ ,  $\phi = 60^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 13:30      | 28,5          | 44,8          | 16,3               | 4,2                | 0,0329867                                    | 31,688074          | 906                        |
| 13:45      | 29,1          | 43,5          | 14,4               | 4,5                | 0,0353429                                    | 33,951508          | 880                        |
| 14:00      | 28,9          | 42,8          | 13,9               | 4,7                | 0,0369137                                    | 35,460463          | 876                        |
| 14:15      | 29,3          | 42,6          | 13,3               | 4,9                | 0,0384845                                    | 36,969419          | 839                        |
| 14:30      | 29,1          | 41,4          | 12,3               | 5,1                | 0,0400553                                    | 38,478375          | 835                        |
| 14:45      | 29            | 40,8          | 11,8               | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 793                        |
| 15:00      | 29            | 40,2          | 11,2               | 5,2                | 0,0408407                                    | 39,232853          | 756                        |
| 15:15      | 30            | 39,6          | 9,6                | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 706                        |
| 15:30      | 29,1          | 38,6          | 9,5                | 5,5                | 0,0431969                                    | 41,496287          | 674                        |
| 15:45      | 29,2          | 36,3          | 7,1                | 5,7                | 0,0447677                                    | 43,005243          | 459                        |

Tableau (III.10) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 19 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}$ ,  $D_{tr} = 2.4 \text{ mm}$ ,  $\phi = 60^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 22,2          | 30,1          | 7,9                | 4,8                | 0,0376991                                    | 36,214941          | 648                        |
| 09:15      | 22,8          | 31,7          | 8,9                | 4,9                | 0,0384845                                    | 36,969419          | 686                        |
| 09:30      | 22,9          | 32,4          | 9,5                | 5,1                | 0,0400553                                    | 38,478375          | 728                        |
| 09:45      | 23,4          | 32,5          | 9,1                | 5,2                | 0,0408407                                    | 39,232853          | 742                        |
| 10:00      | 24            | 33,5          | 9,5                | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 760                        |
| 10:15      | 24,2          | 35            | 10,8               | 5,4                | 0,0424115                                    | 40,741809          | 800                        |
| 10:30      | 24            | 35,2          | 11,2               | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 814                        |
| 10:45      | 25            | 36,5          | 11,5               | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 850                        |
| 11:00      | 25,4          | 37            | 11,6               | 5,4                | 0,0424115                                    | 40,741809          | 878                        |
| 11:15      | 25,8          | 38,3          | 12,5               | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 888                        |

Tableau (III.11) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 60^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 22            | 29            | 7                  | 4,4                | 0,0345575                                    | 28,921431          | 409                        |
| 09:15      | 21,2          | 26,4          | 5,2                | 4,6                | 0,0361283                                    | 30,236042          | 237                        |
| 09:30      | 22            | 28,2          | 6,2                | 4,9                | 0,0384845                                    | 32,207958          | 648                        |
| 09:45      | 21,6          | 26,9          | 5,3                | 5,2                | 0,0408407                                    | 34,179873          | 686                        |
| 10:00      | 22,4          | 29,7          | 7,3                | 5,4                | 0,0424115                                    | 35,494484          | 728                        |
| 10:15      | 22,3          | 28,4          | 6,1                | 5,5                | 0,0431969                                    | 36,151789          | 446                        |
| 10:30      | 22,6          | 30,5          | 7,9                | 5,8                | 0,0455531                                    | 38,123705          | 488                        |
| 10:45      | 22,6          | 32,5          | 9,9                | 6,1                | 0,0479093                                    | 40,095621          | 512                        |
| 11:00      | 21,7          | 27,3          | 5,6                | 6,3                | 0,0494801                                    | 41,410231          | 359                        |
| 11:15      | 22,2          | 27,5          | 5,3                | 6,5                | 0,0510509                                    | 42,724842          | 401                        |

Tableau (III.12) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 22,3          | 28,3          | 6                  | 2,5                | 0,019635                                     | 16,4326315         | 514                        |
| 08:45      | 23            | 28            | 5                  | 2,6                | 0,0204204                                    | 17,0899367         | 611                        |
| 09:00      | 22,5          | 29,1          | 6,6                | 2,8                | 0,0219911                                    | 18,4045472         | 682                        |
| 09:15      | 22,9          | 29,5          | 6,6                | 3                  | 0,0235619                                    | 19,7191577         | 729                        |
| 09:30      | 22,8          | 29,8          | 7                  | 3,3                | 0,0259181                                    | 21,6910735         | 778                        |
| 09:45      | 23,2          | 30,9          | 7,7                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,3483788         | 834                        |
| 10:00      | 23,6          | 31            | 7,4                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,3483788         | 868                        |
| 10:15      | 23,8          | 30,7          | 6,9                | 3,6                | 0,0282743                                    | 23,6629893         | 911                        |
| 10:30      | 23,4          | 31,5          | 8,1                | 3,8                | 0,0298451                                    | 24,9775998         | 902                        |
| 10:45      | 23,6          | 31,2          | 7,6                | 3,9                | 0,0306305                                    | 25,6349051         | 887                        |

Tableau (III.13) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 10 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}$ ,

$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}$ ,  $\phi = 60^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 12:00      | 26,7          | 32            | 5,3                | 3,3                | 0,0259181                                    | 21,6910735         | 934                        |
| 12:15      | 26,8          | 32,7          | 5,9                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,3483788         | 952                        |
| 12:30      | 26,7          | 33,5          | 6,8                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,005684          | 961                        |
| 12:45      | 27,2          | 33,3          | 6,1                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,005684          | 965                        |
| 13:00      | 27,7          | 33,1          | 5,4                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,3483788         | 967                        |
| 13:15      | 28,1          | 34,4          | 6,3                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,005684          | 950                        |
| 13:30      | 29,6          | 34,7          | 5,1                | 3,6                | 0,0282743                                    | 23,6629893         | 900                        |
| 13:45      | 28,5          | 32,5          | 4                  | 3,8                | 0,0298451                                    | 24,9775998         | 892                        |
| 14:00      | 27,5          | 32,5          | 5                  | 4,1                | 0,0322013                                    | 26,9495156         | 890                        |
| 14:15      | 27,7          | 32,3          | 4,6                | 4,2                | 0,0329867                                    | 27,6068208         | 850                        |

Tableau (III.14) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 19 \text{ cm}$ ,

$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}$ ,  $D_{tr} = 5.5 \text{ mm}$ ,  $\phi = 60^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 21,8          | 27,1          | 5,3                | 2,6                | 0,0204204                                    | 17,089937          | 650                        |
| 09:15      | 20,3          | 28,7          | 8,4                | 2,8                | 0,0219911                                    | 18,404547          | 695                        |
| 09:30      | 21,5          | 29,2          | 7,7                | 2,7                | 0,0212058                                    | 17,747242          | 712                        |
| 09:45      | 22,2          | 29,5          | 7,3                | 2,9                | 0,0227765                                    | 19,061852          | 748                        |
| 10:00      | 22,3          | 29,7          | 7,4                | 3                  | 0,0235619                                    | 19,719158          | 790                        |
| 10:15      | 22,7          | 31            | 8,3                | 3,1                | 0,0243473                                    | 20,376463          | 840                        |
| 10:30      | 23            | 31,2          | 8,2                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,033768          | 863                        |
| 10:45      | 23,1          | 32,5          | 9,4                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,033768          | 893                        |
| 11:00      | 23,6          | 33            | 9,4                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,348379          | 900                        |
| 11:15      | 23,9          | 33,6          | 9,7                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,005684          | 910                        |

Tableau (III.15) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:45      | 20,2          | 25,9          | 5,7                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,460477          | 542                        |
| 09:00      | 20,5          | 26,2          | 5,7                | 3,9                | 0,0306305                                    | 26,154957          | 586                        |
| 09:15      | 20,8          | 27,2          | 6,4                | 4,4                | 0,0345575                                    | 29,508156          | 656                        |
| 09:30      | 21,4          | 28,1          | 6,7                | 4,7                | 0,0369137                                    | 31,520076          | 695                        |
| 09:45      | 21,3          | 29            | 7,7                | 4,8                | 0,0376991                                    | 32,190716          | 748                        |
| 10:00      | 22,5          | 30,5          | 8                  | 4,2                | 0,0329867                                    | 28,166877          | 775                        |
| 10:15      | 22            | 31            | 9                  | 4,8                | 0,0376991                                    | 32,190716          | 784                        |
| 10:30      | 22,9          | 31,5          | 8,6                | 5                  | 0,0392699                                    | 33,531996          | 854                        |
| 10:45      | 23            | 32,3          | 9,3                | 5,2                | 0,0408407                                    | 34,873276          | 871                        |
| 11:00      | 23,2          | 32,5          | 9,3                | 5,8                | 0,0455531                                    | 38,897115          | 898                        |

Tableau (III.16) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm},$$

$$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 12:45      | 21,3          | 27,4          | 6,1                | 3,6                | 0,0282743                                    | 24,143037          | 937                        |
| 13:00      | 22,4          | 27,7          | 5,3                | 3,8                | 0,0298451                                    | 25,484317          | 943                        |
| 13:15      | 22,6          | 28,5          | 5,9                | 3,9                | 0,0306305                                    | 26,154957          | 953                        |
| 13:30      | 23,1          | 29,3          | 6,2                | 4                  | 0,0314159                                    | 26,825597          | 905                        |
| 13:45      | 23,7          | 28,9          | 5,2                | 4,2                | 0,0329867                                    | 28,166877          | 890                        |
| 14:00      | 23,4          | 28,5          | 5,1                | 4,1                | 0,0322013                                    | 27,496237          | 875                        |
| 14:15      | 23,8          | 28,7          | 4,9                | 4,2                | 0,0329867                                    | 28,166877          | 841                        |
| 14:30      | 24,3          | 27,8          | 3,5                | 4,3                | 0,0337721                                    | 28,837516          | 822                        |
| 14:45      | 24,5          | 27,2          | 2,7                | 4,4                | 0,0345575                                    | 29,508156          | 791                        |
| 15:00      | 24,7          | 26,6          | 1,9                | 4,5                | 0,0353429                                    | 30,178796          | 769                        |

Tableau (III.17) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 28 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 10 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 9.6 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}$ ,

$D_{tr} = 5.5 \text{ mm}$ ,  $\phi = 60^\circ$ ).

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 20,4          | 26,2          | 5,8                | 2,6                | 0,0204204                                    | 17,436638          | 537                        |
| 08:45      | 20,7          | 26,5          | 5,8                | 2,8                | 0,0219911                                    | 18,777918          | 583                        |
| 09:00      | 21,5          | 26,8          | 5,3                | 2,7                | 0,0212058                                    | 18,107278          | 654                        |
| 09:15      | 21,4          | 27,5          | 6,1                | 2,9                | 0,0227765                                    | 19,448558          | 691                        |
| 09:30      | 21,8          | 27,9          | 6,1                | 3,1                | 0,0243473                                    | 20,789837          | 753                        |
| 09:45      | 22,1          | 28,2          | 6,1                | 3                  | 0,0235619                                    | 20,119198          | 786                        |
| 10:00      | 22,6          | 28,7          | 6,1                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,460477          | 791                        |
| 10:15      | 23,3          | 30,2          | 6,9                | 3,3                | 0,0259181                                    | 22,131117          | 842                        |
| 10:30      | 24,2          | 30,6          | 6,4                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,801757          | 868                        |
| 10:45      | 23,9          | 31,1          | 7,2                | 3,3                | 0,0259181                                    | 22,131117          | 892                        |

Tableau (III.18) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

( $L_{ch} = 28 \text{ cm}$ ,  $\varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}$ ,  $P_{e-r} = 20 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 19.2 \text{ cm}$ ,

$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}$ ,  $D_{tr} = 5.5 \text{ mm}$ ,  $\phi = 60^\circ$ ).



| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 11:30      | 19,1          | 24,3          | 5,2                | 2,3                | 0,0180642                                    | 15,424718          | 890                        |
| 11:45      | 19,5          | 24,9          | 5,4                | 2,2                | 0,0172788                                    | 14,754078          | 910                        |
| 12:00      | 19,7          | 25,5          | 5,8                | 1,3                | 0,0102102                                    | 8,7183189          | 914                        |
| 12:15      | 20,1          | 25,6          | 5,5                | 1,6                | 0,0125664                                    | 10,730239          | 920                        |
| 12:30      | 20,8          | 25,8          | 5                  | 1,8                | 0,0141372                                    | 12,071519          | 936                        |
| 12:45      | 21,2          | 26,2          | 5                  | 1,9                | 0,0149226                                    | 12,742158          | 940                        |
| 13:00      | 21,5          | 26,8          | 5,3                | 2                  | 0,015708                                     | 13,412798          | 968                        |
| 13:15      | 22,3          | 27,1          | 4,8                | 1,4                | 0,0109956                                    | 9,3889588          | 943                        |
| 13:30      | 23,5          | 27,7          | 4,2                | 1,5                | 0,011781                                     | 10,059599          | 927                        |
| 13:45      | 23,7          | 28,2          | 4,5                | 1,7                | 0,0133518                                    | 11,400879          | 890                        |

Tableau (III.19) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 40 \text{ cm}, P_{e-s} = 38.4 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 60^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 23            | 52,3          | 29,3               | 2,1                | 0,0164934                                    | 4,3561883          | 1020                       |
| 09:15      | 24,4          | 52,5          | 28,1               | 2,3                | 0,0180642                                    | 4,7710633          | 1002                       |
| 09:30      | 24,3          | 53            | 28,7               | 2,5                | 0,019635                                     | 5,1859384          | 1030                       |
| 09:45      | 25,1          | 53,4          | 28,3               | 2,7                | 0,0212058                                    | 5,6008135          | 1064                       |
| 10:00      | 25,3          | 54,1          | 28,8               | 2,5                | 0,019635                                     | 5,1859384          | 1043                       |
| 10:15      | 26            | 55,1          | 29,1               | 2,4                | 0,0188496                                    | 4,9785009          | 1025                       |
| 10:30      | 25,2          | 54,4          | 29,2               | 2,8                | 0,0219911                                    | 5,808251           | 992                        |
| 10:45      | 26,2          | 53,8          | 27,6               | 2,3                | 0,0180642                                    | 4,7710633          | 975                        |
| 11:00      | 26,3          | 53,6          | 27,3               | 2,9                | 0,0227765                                    | 6,0156886          | 962                        |
| 11:15      | 25,1          | 53,1          | 28                 | 3,1                | 0,0243473                                    | 6,4305636          | 900                        |

Tableau (III.20) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$$

$$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s. m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|----------------------------|
| 11:15      | 25,1          | 40,3          | 15,2               | 2,3                | 0,0180642                                     | 4,7710633          | 664                        |
| 11:30      | 22,2          | 38,2          | 16                 | 2,5                | 0,019635                                      | 5,1859384          | 687                        |
| 11:45      | 23            | 40,1          | 17,1               | 2,7                | 0,0212058                                     | 5,6008135          | 735                        |
| 12:00      | 23,6          | 43,4          | 19,8               | 2,8                | 0,0219911                                     | 5,808251           | 787                        |
| 12:15      | 23,8          | 45,5          | 21,7               | 3,1                | 0,0243473                                     | 6,4305636          | 815                        |
| 12:30      | 24,1          | 46,3          | 22,2               | 3,2                | 0,0251327                                     | 6,6380012          | 850                        |
| 12:45      | 25,3          | 48,7          | 23,4               | 3,6                | 0,0282743                                     | 7,4677513          | 877                        |
| 13:00      | 25,7          | 49,8          | 24,1               | 3,7                | 0,0290597                                     | 7,6751888          | 900                        |
| 13:15      | 26,2          | 51,5          | 25,3               | 3,7                | 0,0290597                                     | 7,6751888          | 935                        |
| 13:30      | 26,6          | 50,2          | 23,6               | 3,9                | 0,0306305                                     | 8,0900639          | 945                        |

Tableau (III.21) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$$

$$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s. m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|---|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 11,5          | 26,3          | 14,8               | 4,1                | 0,0322013                                     | 8,5049391          | 454                        |
| 08:45      | 11,2          | 25,5          | 14,3               | 4,3                | 0,0337721                                     | 8,9198141          | 508                        |
| 09:00      | 18,1          | 26,1          | 8                  | 4,2                | 0,0329867                                     | 8,7123766          | 541                        |
| 09:15      | 18,8          | 27,5          | 8,7                | 4,3                | 0,0337721                                     | 8,9198141          | 604                        |
| 09:30      | 19            | 27,9          | 8,9                | 4,5                | 0,0353429                                     | 9,334689           | 617                        |
| 09:45      | 19,5          | 29            | 9,5                | 4,8                | 0,0376991                                     | 9,9570018          | 681                        |
| 10:00      | 19,9          | 30,7          | 10,8               | 5                  | 0,0392699                                     | 10,371877          | 716                        |
| 10:15      | 21,3          | 32,2          | 10,9               | 5,1                | 0,0400553                                     | 10,579314          | 742                        |
| 10:30      | 21,7          | 33,8          | 12,1               | 5,4                | 0,0424115                                     | 11,201627          | 768                        |
| 10:45      | 22,2          | 34,6          | 12,4               | 5,2                | 0,0408407                                     | 10,786752          | 809                        |

Tableau (III.22) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$$

$$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 12:00      | 23,6          | 40,1          | 16,5               | 4,8                | 0,0376991                                    | 9,9570017          | 900                        |
| 12:15      | 25,3          | 39,7          | 14,4               | 4,5                | 0,0353429                                    | 9,3346891          | 922                        |
| 12:30      | 25,1          | 40,3          | 15,2               | 4,8                | 0,0376991                                    | 9,9570017          | 929                        |
| 12:45      | 25,3          | 41,1          | 15,8               | 4,9                | 0,0384845                                    | 10,164439          | 935                        |
| 13:00      | 25,7          | 41,1          | 15,4               | 4,9                | 0,0384845                                    | 10,164439          | 934                        |
| 13:15      | 25,9          | 40,7          | 14,8               | 5                  | 0,0392699                                    | 10,371877          | 930                        |
| 13:30      | 25,7          | 39,8          | 14,1               | 5,2                | 0,0408407                                    | 10,786752          | 912                        |
| 13:45      | 26,2          | 39,7          | 13,5               | 5,3                | 0,0416261                                    | 10,994189          | 915                        |
| 14:00      | 26,5          | 39,7          | 13,2               | 5,4                | 0,0424115                                    | 11,201627          | 881                        |
| 14:15      | 26,4          | 39,5          | 13,1               | 5,5                | 0,0431969                                    | 11,409064          | 883                        |

Tableau (III.23) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 1.75 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm},$$

$$D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 23,8          | 53,1          | 29,3               | 2,8                | 0,0219911                                    | 21,125382          | 674                        |
| 09:15      | 22,3          | 53,7          | 31,4               | 3,5                | 0,0274889                                    | 26,406728          | 686                        |
| 09:30      | 24,1          | 53,9          | 29,8               | 3,6                | 0,0282743                                    | 27,161206          | 725                        |
| 09:45      | 24,8          | 54,2          | 29,4               | 3,8                | 0,0298451                                    | 28,670162          | 739                        |
| 10:00      | 25,5          | 55,5          | 30                 | 3,7                | 0,0290597                                    | 27,915684          | 764                        |
| 10:15      | 26,9          | 56,7          | 29,8               | 4,3                | 0,0337721                                    | 32,442552          | 811                        |
| 10:30      | 26,8          | 55,3          | 28,5               | 4,5                | 0,0353429                                    | 33,951508          | 824                        |
| 10:45      | 27,4          | 54,7          | 27,3               | 4,4                | 0,0345575                                    | 33,19703           | 854                        |
| 11:00      | 27,5          | 54,4          | 26,9               | 4,2                | 0,0329867                                    | 31,688074          | 871                        |
| 11:15      | 28            | 54            | 26                 | 4,4                | 0,0345575                                    | 33,19703           | 898                        |

Tableau (III.24) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 22,5          | 32,2          | 9,7                | 3,6                | 0,0282743                                    | 27,161206          | 553                        |
| 08:45      | 22,4          | 32,9          | 10,5               | 3,7                | 0,0290597                                    | 27,915684          | 564                        |
| 09:00      | 22,8          | 33,5          | 10,7               | 3,8                | 0,0298451                                    | 28,670162          | 646                        |
| 09:15      | 23,1          | 34,3          | 11,2               | 3,7                | 0,0290597                                    | 27,915684          | 689                        |
| 09:30      | 23,6          | 34,8          | 11,2               | 3,9                | 0,0306305                                    | 29,42464           | 702                        |
| 09:45      | 23,4          | 35,5          | 12,1               | 4                  | 0,0314159                                    | 30,179118          | 780                        |
| 10:00      | 24,2          | 35,7          | 11,5               | 4,1                | 0,0322013                                    | 30,933596          | 808                        |
| 10:15      | 24,7          | 36,6          | 11,9               | 4,3                | 0,0337721                                    | 32,442552          | 852                        |
| 10:30      | 24,7          | 37,1          | 12,4               | 4,4                | 0,0345575                                    | 33,19703           | 898                        |
| 10:45      | 25            | 38,9          | 13,9               | 4,4                | 0,0345575                                    | 33,19703           | 902                        |

Tableau (III.25) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 12:00      | 27,8          | 42,5          | 14,7               | 4,5                | 0,0353429                                    | 33,951508          | 931                        |
| 12:15      | 28,2          | 42,8          | 14,6               | 4,5                | 0,0353429                                    | 33,951508          | 939                        |
| 12:30      | 28,5          | 43,3          | 14,8               | 4,7                | 0,0369137                                    | 35,460463          | 906                        |
| 12:45      | 29            | 43,9          | 14,9               | 4,8                | 0,0376991                                    | 36,214941          | 880                        |
| 13:00      | 29,3          | 44,7          | 15,4               | 5                  | 0,0392699                                    | 37,723897          | 876                        |
| 13:15      | 29,1          | 45,8          | 16,7               | 5,3                | 0,0416261                                    | 39,987331          | 839                        |
| 13:30      | 29,5          | 46,5          | 17                 | 5,5                | 0,0431969                                    | 41,496287          | 835                        |
| 13:45      | 29,7          | 44,8          | 15,1               | 5,5                | 0,0431969                                    | 41,496287          | 793                        |
| 14:00      | 29,9          | 44,5          | 14,6               | 5,6                | 0,0439823                                    | 42,250765          | 756                        |
| 14:15      | 30,5          | 43,7          | 13,2               | 5,7                | 0,0447677                                    | 43,005243          | 706                        |

Tableau (III.26) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 150^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 22            | 31,3          | 9,3                | 1,9                | 0,0149226                                    | 14,335081          | 648                        |
| 08:45      | 22,3          | 32,5          | 10,2               | 1,8                | 0,0141372                                    | 13,580603          | 686                        |
| 09:00      | 22,5          | 33,2          | 10,7               | 1,7                | 0,0133518                                    | 12,826125          | 728                        |
| 09:15      | 22,8          | 33,7          | 10,9               | 1,6                | 0,0125664                                    | 12,071647          | 742                        |
| 09:30      | 23,2          | 34,1          | 10,9               | 1,5                | 0,011781                                     | 11,317169          | 760                        |
| 09:45      | 23,8          | 34,6          | 10,8               | 1,4                | 0,0109956                                    | 10,562691          | 800                        |
| 10:00      | 24            | 35            | 11                 | 1,3                | 0,0102102                                    | 9,8082133          | 814                        |
| 10:15      | 24,5          | 36,2          | 11,7               | 1,2                | 0,0094248                                    | 9,0537353          | 850                        |
| 10:30      | 24,9          | 37,4          | 12,5               | 1,1                | 0,0086394                                    | 8,2992574          | 878                        |
| 10:45      | 25,4          | 38,5          | 13,1               | 1                  | 0,007854                                     | 7,5447794          | 888                        |

Tableau (III.27) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:45      | 21            | 26,2          | 5,2                | 3,3                | 0,0259181                                    | 21,691074          | 539                        |
| 09:00      | 21,3          | 27,5          | 6,2                | 3,3                | 0,0259181                                    | 21,691074          | 577                        |
| 09:15      | 21,6          | 27,7          | 6,1                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,005684          | 658                        |
| 09:30      | 22,2          | 29,1          | 6,9                | 3,6                | 0,0282743                                    | 23,662989          | 670                        |
| 09:45      | 22            | 29,8          | 7,8                | 3,6                | 0,0282743                                    | 23,662989          | 738                        |
| 10:00      | 22,4          | 30,5          | 8,1                | 3,8                | 0,0298451                                    | 24,9776            | 779                        |
| 10:15      | 23,3          | 30,9          | 7,6                | 3,7                | 0,0290597                                    | 24,320295          | 787                        |
| 10:30      | 23,6          | 31,6          | 8                  | 3,8                | 0,0298451                                    | 24,9776            | 856                        |
| 10:45      | 24,1          | 32,5          | 8,4                | 3,9                | 0,0306305                                    | 25,634905          | 879                        |
| 11:00      | 23,8          | 33,2          | 9,4                | 4,1                | 0,0322013                                    | 26,949516          | 895                        |

Tableau (III.28) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 11:45      | 25            | 28,5          | 3,5                | 2,3                | 0,0180642                                    | 15,118021          | 845                        |
| 12:00      | 25,2          | 29,1          | 3,9                | 2,4                | 0,0188496                                    | 15,775326          | 852                        |
| 12:15      | 24,8          | 29,6          | 4,8                | 2,5                | 0,019635                                     | 16,432631          | 863                        |
| 12:30      | 25,6          | 30            | 4,4                | 2,6                | 0,0204204                                    | 17,089937          | 870                        |
| 12:45      | 25,9          | 30,2          | 4,3                | 2,8                | 0,0219911                                    | 18,404547          | 910                        |
| 13:00      | 26,3          | 31,1          | 4,8                | 3                  | 0,0235619                                    | 19,719158          | 940                        |
| 13:15      | 26,2          | 31,6          | 5,4                | 3,1                | 0,0243473                                    | 20,376463          | 946                        |
| 13:30      | 26,4          | 31,8          | 5,4                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,033768          | 971                        |
| 13:45      | 26,6          | 32,3          | 5,7                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,033768          | 960                        |
| 14:00      | 26,8          | 32,9          | 6,1                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,348379          | 965                        |

Tableau (III.29) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 7.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 10 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 22,1          | 26,5          | 4,4                | 3,8                | 0,0298451                                    | 24,9776            | 640                        |
| 08:45      | 21,5          | 26,8          | 5,3                | 4,1                | 0,0322013                                    | 26,949516          | 680                        |
| 09:00      | 22,3          | 27,3          | 5                  | 4,2                | 0,0329867                                    | 27,606821          | 730                        |
| 09:15      | 22,7          | 27,9          | 5,2                | 4,4                | 0,0345575                                    | 28,921431          | 739                        |
| 09:30      | 23            | 28,7          | 5,7                | 4,5                | 0,0353429                                    | 29,578737          | 767                        |
| 09:45      | 23,7          | 29,6          | 5,9                | 4,7                | 0,0369137                                    | 30,893347          | 810                        |
| 10:00      | 23,5          | 29,8          | 6,3                | 4,9                | 0,0384845                                    | 32,207958          | 821                        |
| 10:15      | 24            | 30,5          | 6,5                | 5                  | 0,0392699                                    | 32,865263          | 854                        |
| 10:30      | 24,3          | 31,6          | 7,3                | 5,4                | 0,0424115                                    | 35,494484          | 882                        |
| 10:45      | 23,9          | 31,5          | 7,6                | 5,3                | 0,0416261                                    | 34,837179          | 898                        |

Tableau (III.30) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 14.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 19 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 21,3          | 26,3          | 5                  | 2,8                | 0,0219911                                    | 18,404547          | 674                        |
| 09:15      | 21,6          | 26,8          | 5,2                | 2,6                | 0,0204204                                    | 17,089937          | 654                        |
| 09:30      | 21,5          | 27,6          | 6,1                | 2,7                | 0,0212058                                    | 17,747242          | 711                        |
| 09:45      | 21,8          | 28,4          | 6,6                | 2,9                | 0,0227765                                    | 19,061852          | 782                        |
| 10:00      | 22,5          | 28,7          | 6,2                | 3,1                | 0,0243473                                    | 20,376463          | 818                        |
| 10:15      | 22,7          | 29,2          | 6,5                | 3,3                | 0,0259181                                    | 21,691074          | 846                        |
| 10:30      | 23,3          | 29,6          | 6,3                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,033768          | 873                        |
| 10:45      | 22,9          | 29,7          | 6,8                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,348379          | 908                        |
| 11:00      | 23,5          | 30,1          | 6,6                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,005684          | 930                        |
| 11:15      | 23,4          | 30,4          | 7                  | 3,6                | 0,0282743                                    | 23,662989          | 946                        |

Tableau (III.31) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 30 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 30 \text{ cm}, P_{e-s} = 39.5 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 08:30      | 21,2          | 27,7          | 6,5                | 3,3                | 0,0259181                                    | 22,131117          | 539                        |
| 08:45      | 21,5          | 28,3          | 6,8                | 3,5                | 0,0274889                                    | 23,472397          | 582                        |
| 09:00      | 21,8          | 29,1          | 7,3                | 3,7                | 0,0290597                                    | 24,813677          | 595                        |
| 09:15      | 22,2          | 30,3          | 8,1                | 3,6                | 0,0282743                                    | 24,143037          | 664                        |
| 09:30      | 22,4          | 31,4          | 9                  | 3,8                | 0,0298451                                    | 25,484317          | 674                        |
| 09:45      | 23,5          | 32,5          | 9                  | 4                  | 0,0314159                                    | 26,825597          | 721                        |
| 10:00      | 23,6          | 32,8          | 9,2                | 4,2                | 0,0329867                                    | 28,166877          | 754                        |
| 10:15      | 23,8          | 33,3          | 9,5                | 4,6                | 0,0361283                                    | 30,849436          | 790                        |
| 10:30      | 24,4          | 33,6          | 9,2                | 4,8                | 0,0376991                                    | 32,190716          | 844                        |
| 10:45      | 24,8          | 34,7          | 9,9                | 5                  | 0,0392699                                    | 33,531996          | 875                        |

Tableau (III.32) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 11:30      | 22,1          | 28,1          | 6                  | 2,4                | 0,0188496                                    | 16,095358          | 665                        |
| 11:45      | 22,6          | 28,4          | 5,8                | 2,6                | 0,0204204                                    | 17,436638          | 688                        |
| 12:00      | 22,9          | 28,7          | 5,8                | 2,9                | 0,0227765                                    | 19,448558          | 737                        |
| 12:15      | 23,2          | 28,6          | 5,4                | 3                  | 0,0235619                                    | 20,119198          | 789                        |
| 12:30      | 23,5          | 29            | 5,5                | 3,3                | 0,0259181                                    | 22,131117          | 816                        |
| 12:45      | 24,3          | 29,5          | 5,2                | 3,2                | 0,0251327                                    | 21,460477          | 853                        |
| 13:00      | 23,9          | 29,8          | 5,9                | 3,4                | 0,0267035                                    | 22,801757          | 879                        |
| 13:15      | 24,5          | 30,1          | 5,6                | 3,6                | 0,0282743                                    | 24,143037          | 902                        |
| 13:30      | 24,3          | 30,5          | 6,2                | 3,7                | 0,0290597                                    | 24,813677          | 937                        |
| 13:45      | 23,6          | 29,6          | 6                  | 3,6                | 0,0282743                                    | 24,143037          | 946                        |

Tableau (III.33) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 10 \text{ cm}, P_{e-s} = 9.6 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 21            | 25,1          | 4,1                | 1,3                | 0,0102102                                    | 8,7183189          | 456                        |
| 09:15      | 21,3          | 25,7          | 4,4                | 1,5                | 0,011781                                     | 10,059599          | 510                        |
| 09:30      | 21,5          | 26,3          | 4,8                | 1,7                | 0,0133518                                    | 11,400879          | 543                        |
| 09:45      | 21,9          | 26,7          | 4,8                | 1,9                | 0,0149226                                    | 12,742158          | 606                        |
| 10:00      | 22,3          | 27,1          | 4,8                | 1,2                | 0,0094248                                    | 8,047679           | 620                        |
| 10:15      | 22,7          | 27,5          | 4,8                | 1,1                | 0,0086394                                    | 7,3770391          | 683                        |
| 10:30      | 22,5          | 27,9          | 5,4                | 2                  | 0,015708                                     | 13,412798          | 719                        |
| 10:45      | 23,1          | 28,2          | 5,1                | 2,1                | 0,0164934                                    | 14,083438          | 745                        |
| 11:00      | 23,5          | 28,6          | 5,1                | 1,6                | 0,0125664                                    | 10,730239          | 771                        |
| 11:15      | 23,5          | 28,5          | 5                  | 1,4                | 0,0109956                                    | 9,3889588          | 811                        |

Tableau (III.34) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :

$$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 20 \text{ cm}, P_{e-s} = 19.2 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$



| $t$<br>[s] | $T_e$<br>[C°] | $T_s$<br>[C°] | $\Delta T$<br>[C°] | $V_{exp}$<br>[m/s] | $Q_v$<br>[m <sup>3</sup> /s.m <sup>2</sup> ] | $V_{int}$<br>[m/s] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] |
|------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 09:00      | 19,3          | 24,1          | 4,8                | 1,6                | 0,0125664                                    | 10,730239          | 610                        |
| 09:15      | 19,7          | 24,7          | 5                  | 1,1                | 0,0086394                                    | 7,3770391          | 685                        |
| 09:30      | 20            | 25,3          | 5,3                | 1,5                | 0,011781                                     | 10,059599          | 708                        |
| 09:45      | 20,1          | 25,7          | 5,6                | 1,6                | 0,0125664                                    | 10,730239          | 741                        |
| 10:00      | 20,3          | 26,1          | 5,8                | 1,8                | 0,0141372                                    | 12,071519          | 804                        |
| 10:15      | 20,6          | 26,5          | 5,9                | 1,9                | 0,0149226                                    | 12,742158          | 817                        |
| 10:30      | 20,8          | 26,7          | 5,9                | 1,9                | 0,0149226                                    | 12,742158          | 881                        |
| 10:45      | 21,5          | 27,2          | 5,7                | 1,7                | 0,0133518                                    | 11,400879          | 900                        |
| 11:00      | 21,6          | 27,6          | 6                  | 2                  | 0,015708                                     | 13,412798          | 916                        |
| 11:15      | 21,8          | 27,5          | 5,7                | 1,7                | 0,0133518                                    | 11,400879          | 942                        |

**Tableau (III.35) : Evolution des températures en fonction du débit pour un canal muni des chicanes définie par :**

$$(L_{ch} = 28 \text{ cm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, P_{e-r} = 40 \text{ cm}, P_{e-s} = 38.4 \text{ cm},$$

$$P_{e-tr} = 3.45 \text{ cm}, D_{tr} = 5.5 \text{ mm}, \phi = 120^\circ).$$

III.4. Représentation graphiques des rendements en fonction du débit

Il s'agit de montrer graphiquement l'évolution des rendements en fonction du débit pour les configurations des chicanes sous forme V (Voir les figures ci-après).

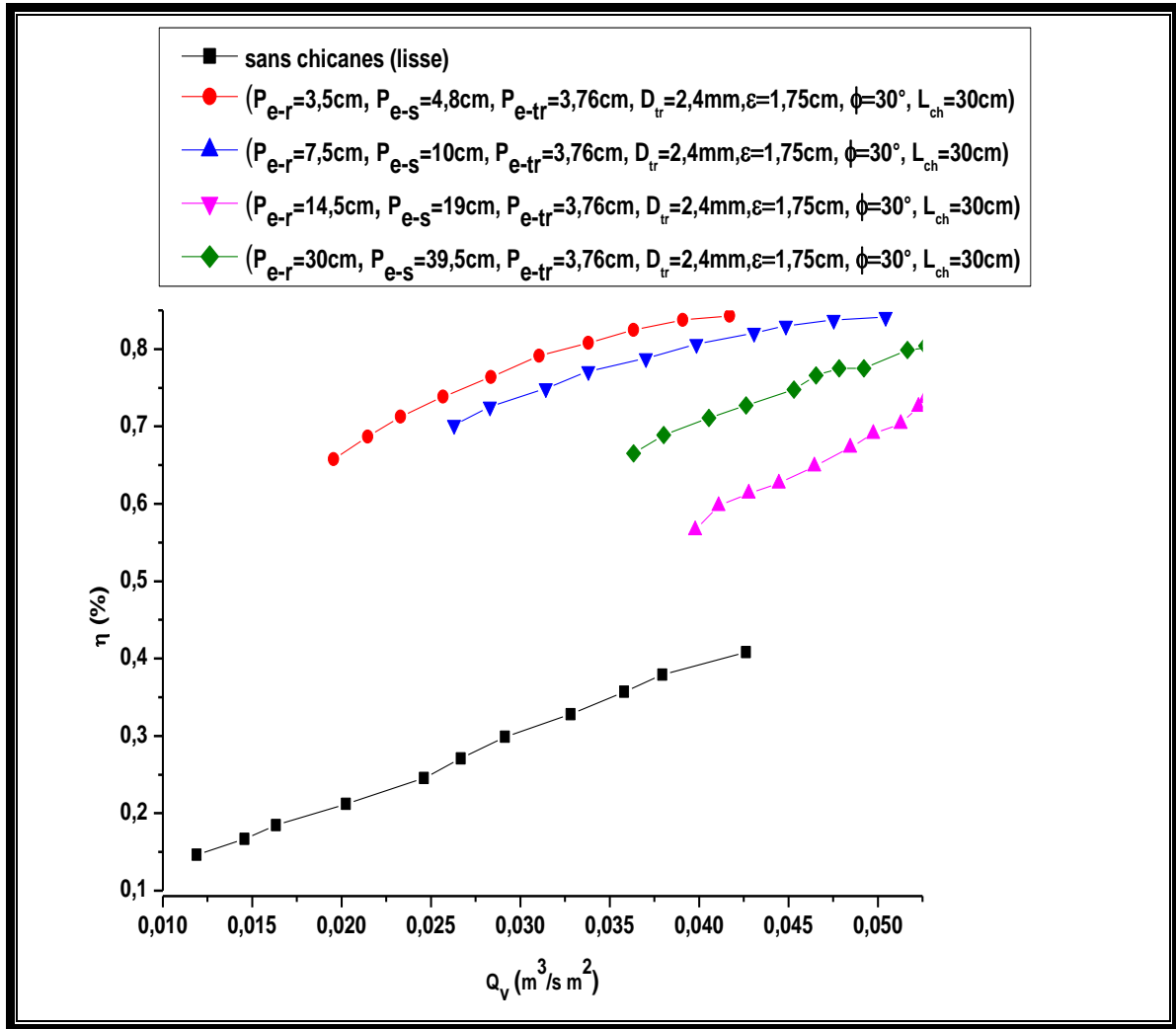


Figure (III.12) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.

(P<sub>e-r</sub> = 3.5 cm, 7.5 cm, 14.5 cm, 30cm ,

P<sub>e-s</sub> = 4.8 cm, 10cm, 19 cm, 39.5cm, P<sub>e-tr</sub> = 3.76 cm, D<sub>tr</sub> = 2.4 mm,

ε = 1.75 cm, φ = 30°, L<sub>ch</sub> = 30 cm).

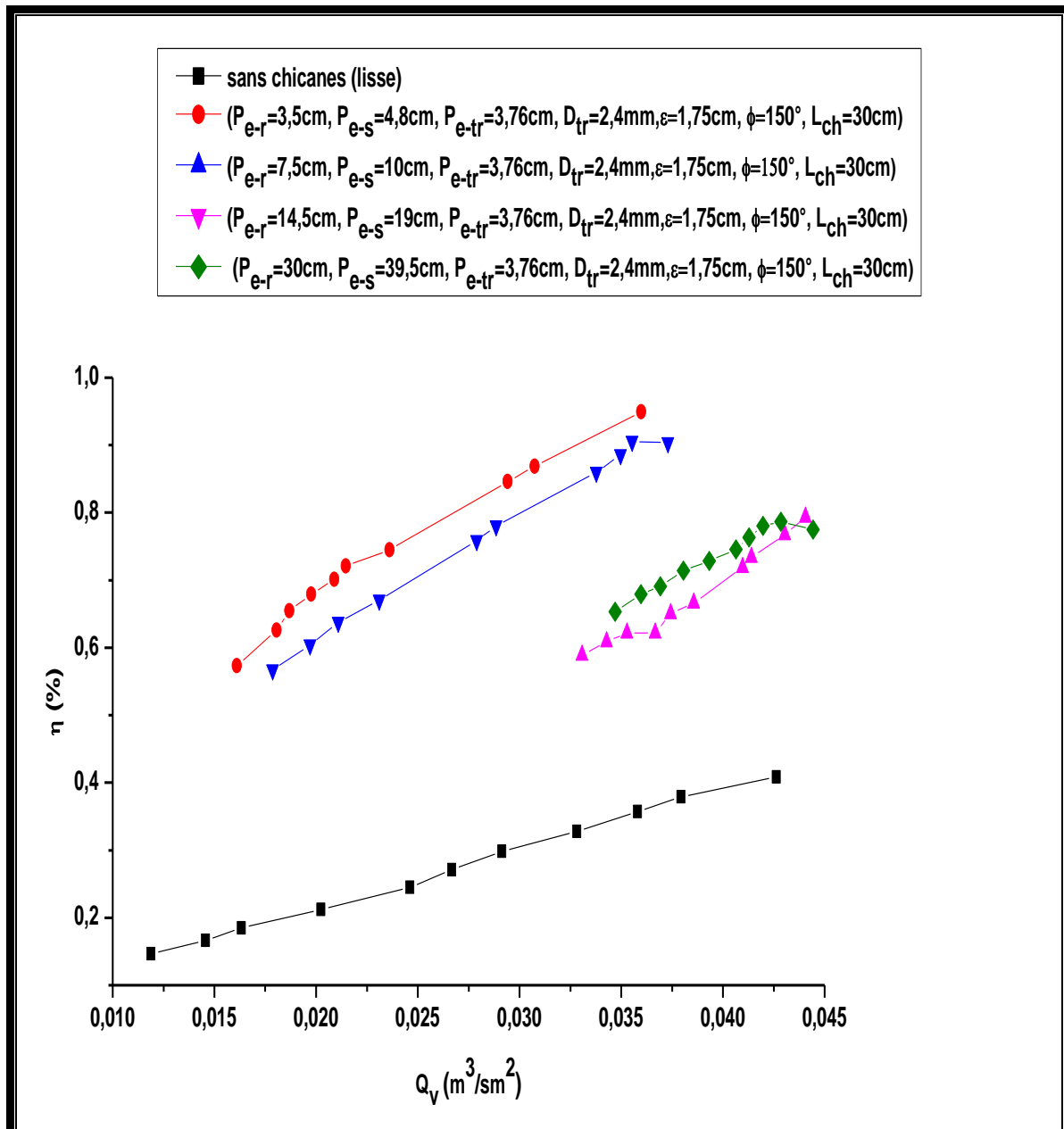


Figure (III.13) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.

( $P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30\text{cm},$

$P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10\text{cm}, 19 \text{ cm}, 39.5\text{cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},$

$\varepsilon = 1.75 \text{ cm}, \phi = 150^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ).

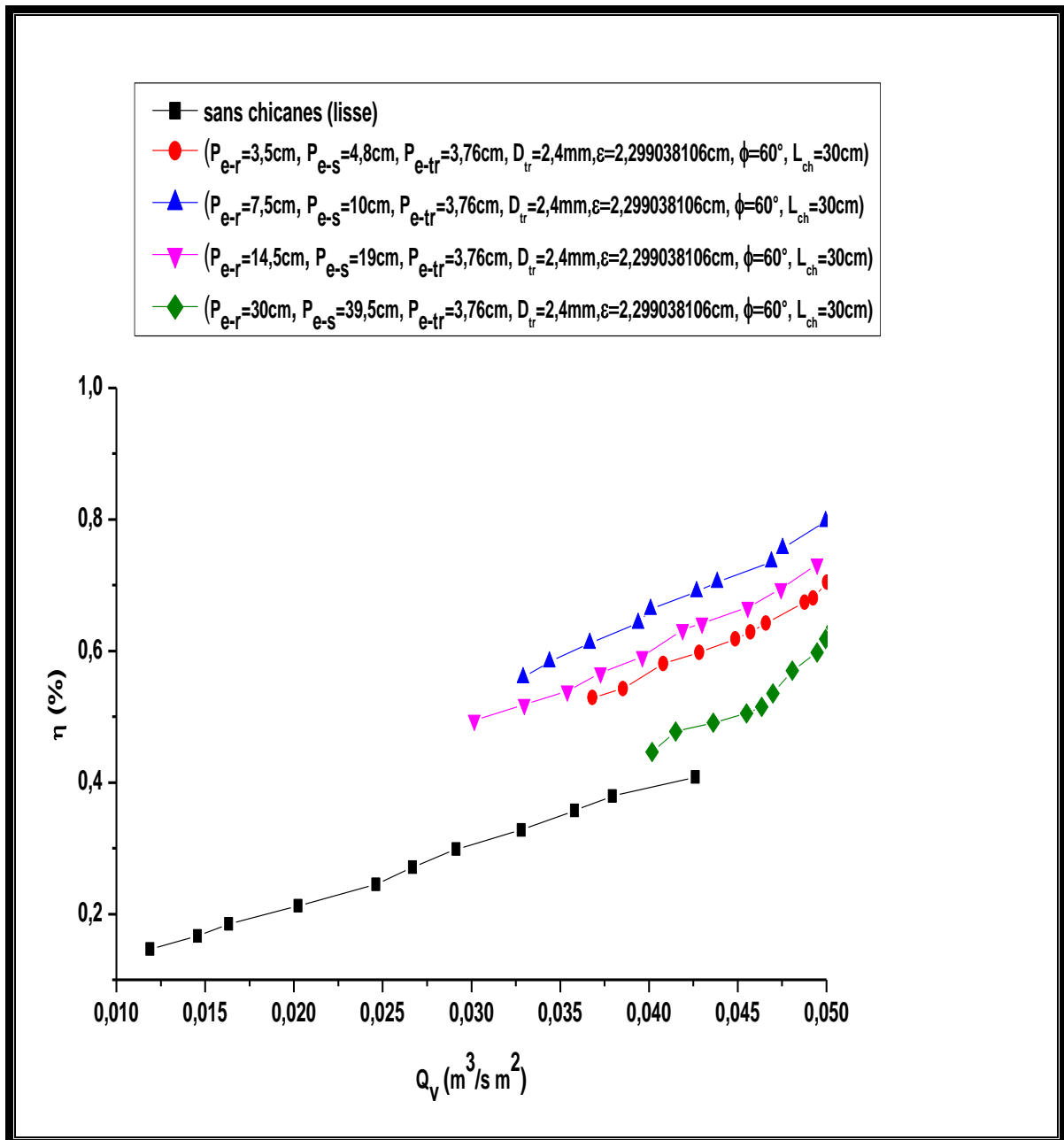


Figure (III.14) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.

( $P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30 \text{ cm}$   $P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 19 \text{ cm}, 39.5 \text{ cm}$ ,

$P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, \phi = 60^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ).

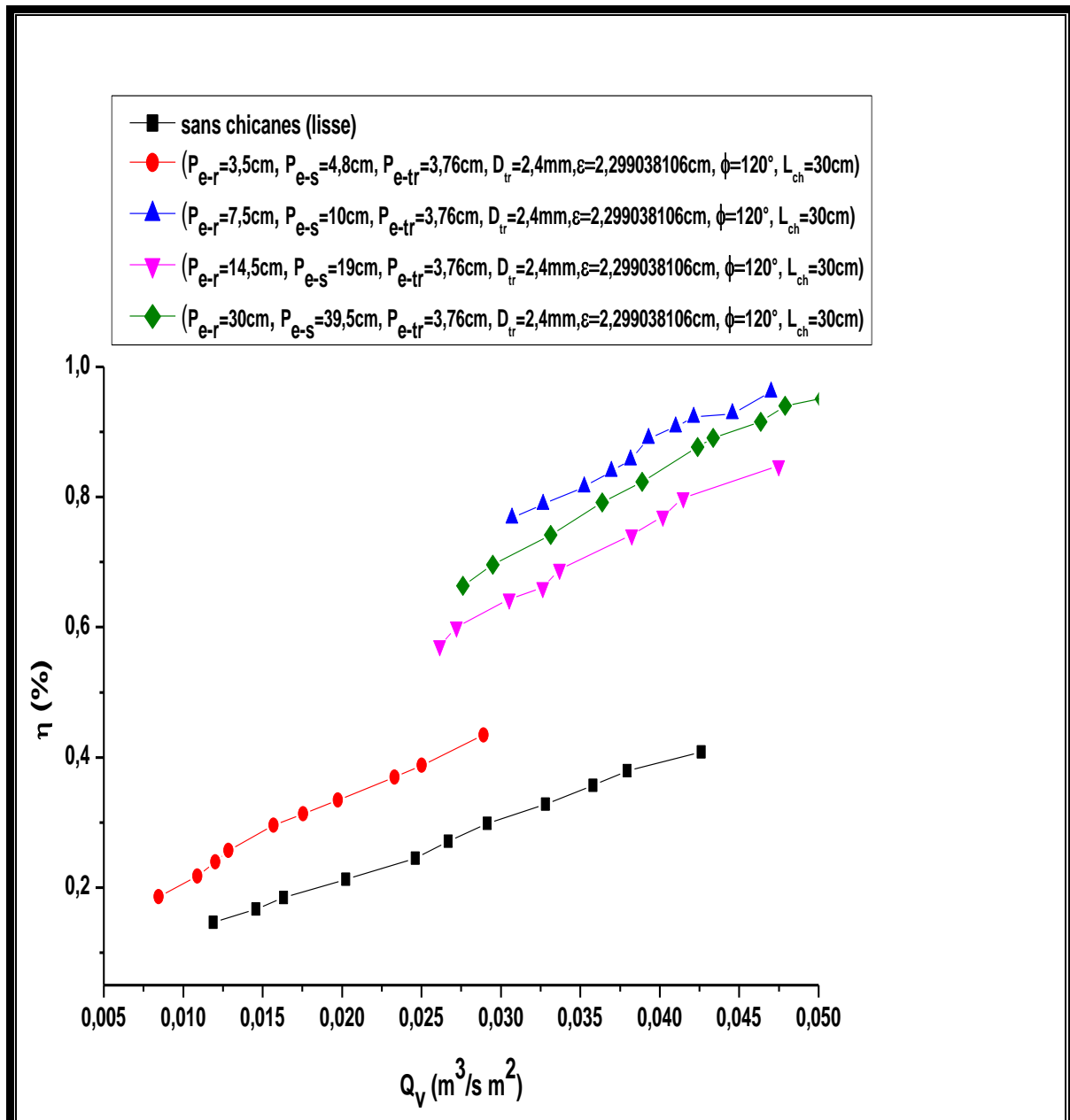


Figure (III.15) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.

( $P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}, 14.5 \text{ cm}, 30 \text{ cm}$ ,  $P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 19 \text{ cm}, 39.5 \text{ cm}$ ,  $P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm}, \varepsilon = 2.299038106 \text{ cm}, \phi = 120^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm}$ ).

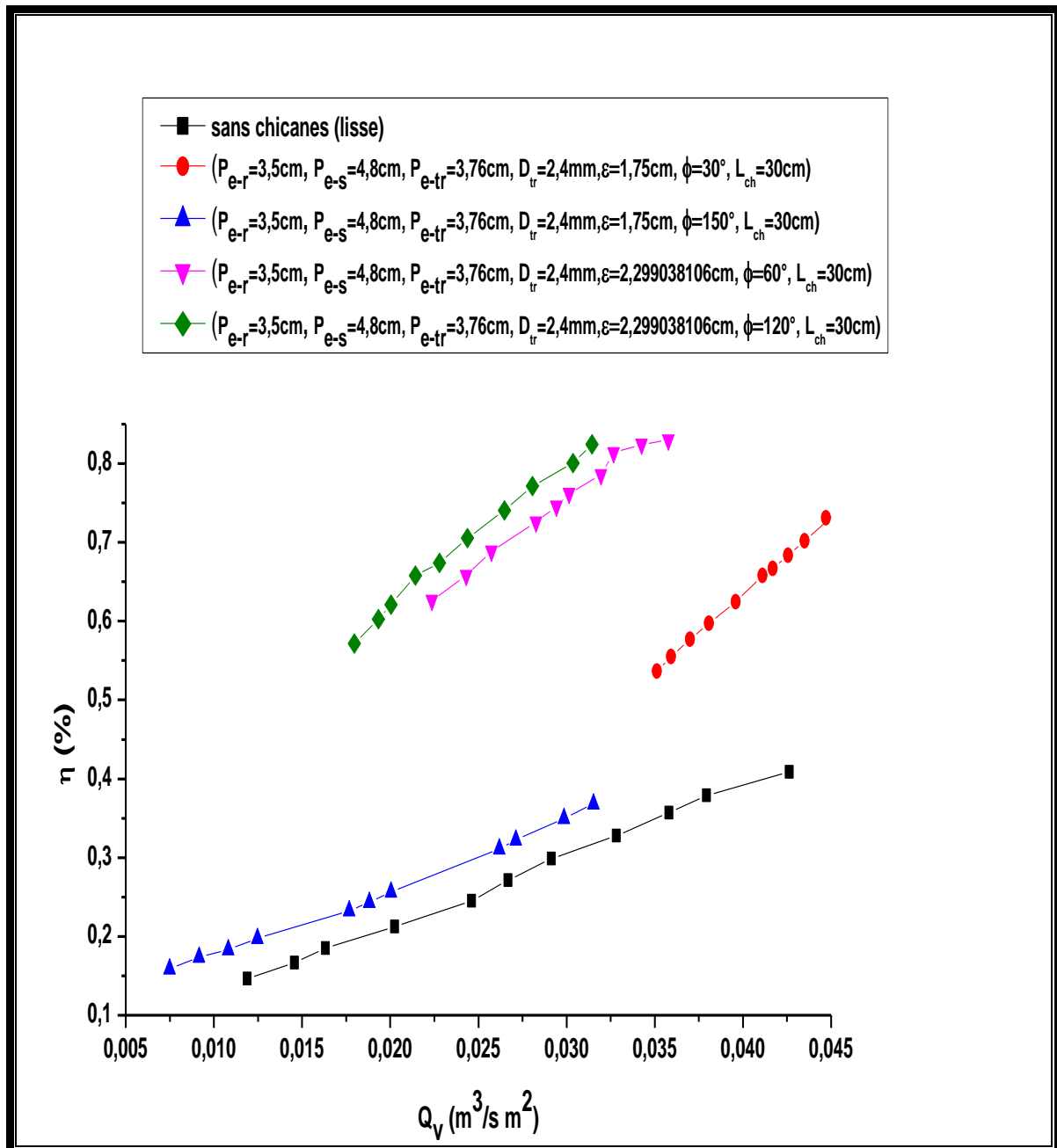


Figure (III.16) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.

$(P_{e-r} = 3.5 \text{ cm}, P_{e-s} = 4.8 \text{ cm}, P_{e-tr} = 3.76 \text{ cm}, D_{tr} = 2.4 \text{ mm},$   
 $\varepsilon = 1.75 \text{ cm}, 2.299038106 \text{ cm}, \phi = 30^\circ, 150^\circ, 60^\circ, 120^\circ, L_{ch} = 30 \text{ cm}).$

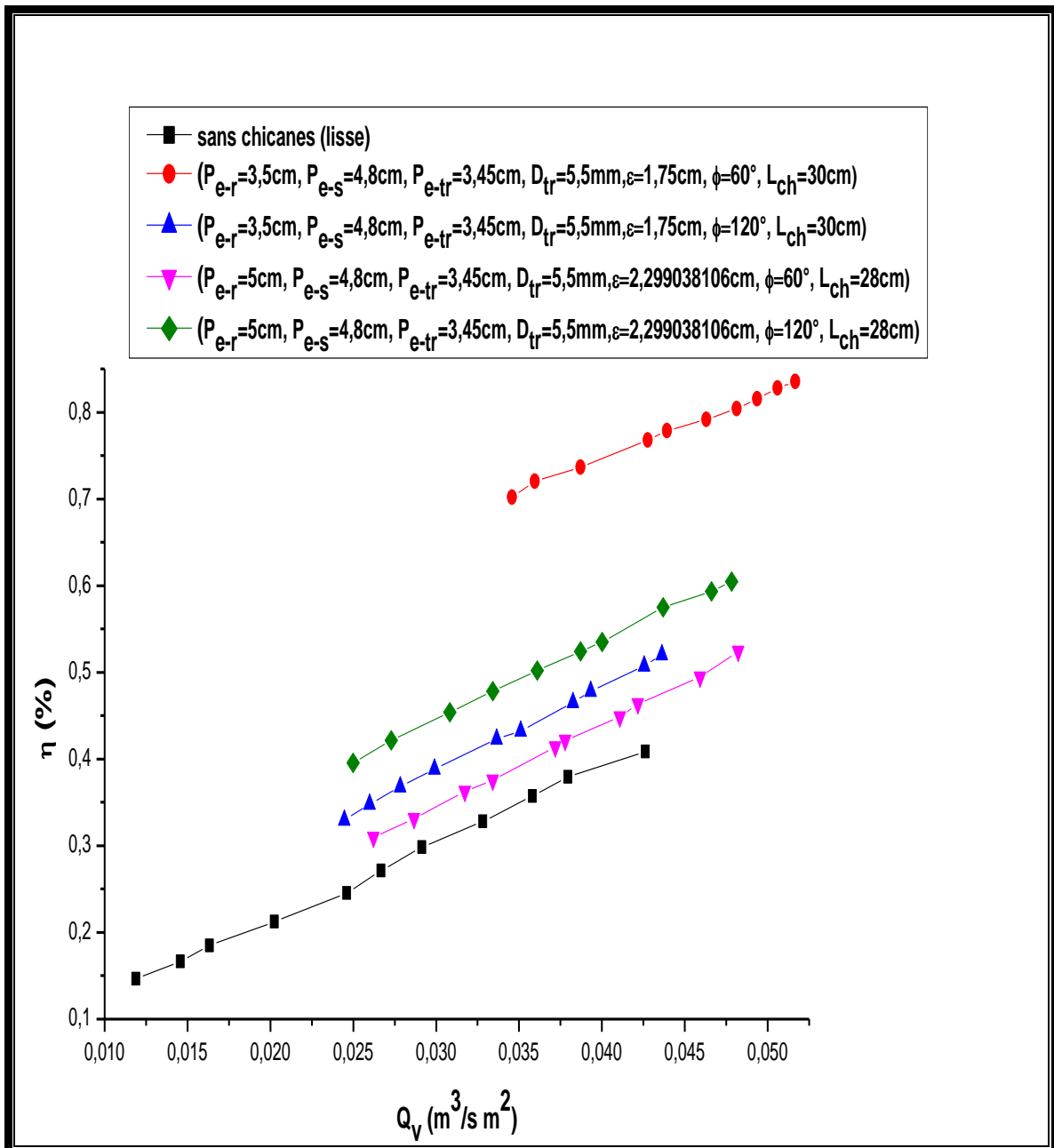


Figure (III.17) : Le rendement en fonction du débit volumique en présence des chicanes sous formes V comparativement à un conduit lisse.

(P<sub>e-r</sub> = 3.5 cm, 5 cm, P<sub>e-s</sub> = 4.8 cm, P<sub>e-tr</sub> = 3.45 cm, D<sub>tr</sub> = 5.5 mm,  
 ε = 1.75 cm, 2.299038106 cm, φ = 60°, 120°, L<sub>ch</sub> = 30 cm, 28 cm).

## II.5. Discussions et interprétations des résultats

A partir des graphes du rendement en fonction du débit volumique, nous pouvons constater que le rendement devient plus important aux présences des chicanes par rapport à une conduite lisse (sans chicanes).

L'analyse de l'évolution de rendement pour les configurations des chicanes de forme **V**, on remarque que pour :

$$\diamond P_{e-tr} = 3.76cm, D_{tr} = 2.4mm, \varepsilon = 1.75cm, \phi = 30^\circ, L_{ch} = 30cm$$

Au première cas lorsque ( $P_{e-r} = 3.5cm, P_{e-s} = 4.8cm$ ) le rendement atteint une valeur de  $\eta = 0.842$ .

Et lorsque le pas entre les rangées atteint la valeur  $P_{e-r} = 7.5cm$ , il y'a une diminution dans le rendement qui prend la valeur de  $\eta = 0.841$ , aussi pour les autres pas de  $P_{e-r} = 14.5cm$  et  $P_{e-r} = 30cm$ , on remarque la diminution jusqu'à  $\eta = 0.7$ . Voir figure (III.12).

$$\diamond P_{e-tr} = 3.76cm, D_{tr} = 2.4mm, \varepsilon = 1.75cm, \phi = 150^\circ, L_{ch} = 30cm$$

Dans ce cas on remarque la même chose que la configuration précédente mais dans ces configurations le rendement atteint une valeur jusqu'à 0.949 pour  $P_{e-r} = 3.5cm$  et diminué :

$$P_{e-r} = 7.5cm, \eta = 0.903$$

$$P_{e-r} = 14.5cm, \eta = 0.793$$

$$P_{e-r} = 30cm, \eta = 0.775. \text{ Voir figure (III.13).}$$

$$\diamond \varepsilon = 2.99038106cm, \phi = 60^\circ; 120^\circ, L_{ch} = 30cm$$

Dans ce cas, nous pouvons dire que la relation entre le pas entre les rangées et l'augmentation du rendement est une relation inverse. Voir figure (III.14) et figure (III.15).

$$\diamond P_{e-r} = 3.5cm, P_{e-s} = 4.8cm, P_{e-tr} = 3.45cm, D_{tr} = 5.5mm, \\ \varepsilon = 1.75cm; 2.99038106cm, \phi = 60^\circ; 120^\circ, L_{ch} = 30cm$$

On remarque que l'augmentation de la longueur des chicanes atteint une diminution au l'angle d'attaque et le rendement sera augmenté et pour le cas de l'angle d'incidence est égale  $120^\circ$  et  $150^\circ$  le  $\eta$  est le meilleur par rapport l'angle d'incidence est égale  $30^\circ$  et  $60^\circ$ . Voir figure (III.17). On peut dire que le débit augmente, le  $\eta$  sera augmenté aussi.



**Conclusion**

A partir des manipulations effectuées sur le banc d'essai expérimental réalisé dans le hall technologique, et aussi à partir des configurations considérées qui permettront d'obtenir des graphes, on a conclu que :

- ✓ Lorsque le pas entre les rangées est diminué, le rendement augmente.
- ✓ L'augmentation du rendement atteint une augmentation aux longueurs des chicanes.
- ✓ Au cas de l'angle d'incidence est égale  $120^\circ$  et  $150^\circ$  le  $\eta$  est le meilleur par rapport l'angle d'incidence est égale  $30^\circ$  et  $60^\circ$ .
- ✓ Enfin, quand le débit volumique augmente, le rendement sera augmenté aussi.

# **CHAPITRE IV**

*Établissement des  
modèles de calcul  
des coefficients  
d'échange par  
convection*

---

## Introduction

L'objectif principal de ce quatrième chapitre est d'illustrer la méthode et le mode de calcul qu'on a utilisé pour trouver les corrélations empiriques reliant les coefficients d'échanges thermiques aux caractéristiques géométriques des chicanes et aux paramètres physiques par la méthode d'analyse dimensionnelle (la méthode de **Vaschy-Bukingham**), pour le régime d'écoulement turbulent et laminaire.

### IV.1. Méthode de calcul

#### IV.1.1. Les chicanes en forme de V

Pour trouver la relation entre les caractéristiques géométriques des rugosités artificielles et les paramètres physiques, on a utilisé la méthode de l'analyse dimensionnelle, dont l'inventaire des dimensions caractéristiques des principaux paramètres intervenant permet d'établir une expression de la perte thermique regroupant 17 paramètres de la forme :

$$h_c = (\rho \cdot V \cdot \mu \cdot D_H \cdot \varepsilon \cdot P_{e-r} \cdot P_{e-s} \cdot P_{e-tr} \cdot L_{ch} \cdot L_c \cdot l_c \cdot D_{tr} \cdot \lambda \cdot I \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot \phi) \quad (IV.1)$$

Avec :

$h_c$  : Coefficient d'échange par convection [ $w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ].

$\rho$  : Masse volumique du fluide en écoulement (l'air dans notre cas) [ $kg \cdot m^{-3}$ ].

$V$  : Vitesse de l'air [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$\mu$  : Viscosité dynamique [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ].

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

$\varepsilon$  : Rugosité artificielle des chicanes [ $m$ ].

$P_{e-r}$  : Pas entre deux rangées successives de chicanes [ $m$ ].

$P_{e-s}$  : Pas entre les sommets des chicanes [ $m$ ].

$P_{e-tr}$  : Pas entre les trous des chicanes [ $m$ ].

$L_{ch}$  : Longueur d'une chicane [ $m$ ].

$L_c$  : Longueur du capteur [ $m$ ].

$l_c$  : Largeur du capteur [ $m$ ].

$D_{tr}$  : Diamètre des trous des chicane [m].

$\lambda$  : Coefficient de conductivité thermique de l'air [ $w. m^{-1}. K^{-1}$ ].

$I$  : Flux solaire reçu par la face supérieur du conduit (capteur solaire plan) [ $w. m^{-2}$ ].

$C_p$  : Chaleur massique de l'air [ $J. kg^{-1}. K^{-1}$ ].

$\Delta T$  : L'écart de température entrée-sortie du fluide [K].

$\emptyset$  : L'angle inclinée des chicane.

$A_c = L_c. l_c$  : La surface de l'absorbeur [ $m^2$ ].

D'après le théorème de  $\pi$  (de Vashy- Buckingham) on ne peut avoir que 13groupements indépendants. En adoptant l'écriture suivante avec  $A_c = L_c. l_c = C^{st}$ . on peut écrire alors :

$$\frac{h_c}{A_c} = \pi. k. \rho^a. V^b. D_H^c. \mu^d. \varepsilon^e. P_{e-r}^f. P_{e-s}^g. L_{ch}^h. D_{tr}^i. I^j. \lambda^k. C_p^m. \Delta T^n. \emptyset^r. P_{e-tr}^w \quad (IV.2)$$

Où  $\pi$ : Indique un produit.

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

| Grandeur   | Unité                    | Dimension                   |
|--|--------------------------|-----------------------------|
| $h_c$  | [ $w. m^{-2}. K^{-1}$ ]  | $M. T^{-3}. \theta^{-1}$    |
| $\rho$   | [ $kg. m^{-3}$ ]         | $M. L^{-3}$                 |
| $V$  | [ $m. s^{-1}$ ]          | $L. T^{-1}$                 |
| $\mu$  | [ $kg. m^{-1}. s^{-1}$ ] | $M. L^{-1}T^{-1}$           |
| $D_H. \varepsilon. P_{e-r}. P_{e-s}. P_{e-tr}. L_{ch}. L_c. l_c. D_{tr}$ | [m]                      | $L$                         |
| $\lambda$  | [ $w. m^{-1}. K^{-1}$ ]  | $M. L. T^{-3}. \theta^{-1}$ |
| $I$  | [ $w. m^{-2}$ ]          | $M. T^{-3}$                 |
| $C_p$  | [ $J. kg^{-1}. K^{-1}$ ] | $L^2. T^2. \theta^{-1}$     |
| $\Delta T$   | [K]                      | $\theta$                    |

Tableau (IV.1) : Unité et dimension des grandeurs physiques.

Alors l'équation précédente avec les dimensions fondamentales devient :

$$(M. T^{-3}. \theta^{-1}) = \pi. k (M. L^{-3})^a. (L. T^{-1})^b . (L)^c . (M. L^{-1}T^{-1})^d. (L)^e . (L)^f . (L)^g. (L)^h. (L)^i (M. T^{-3})^j. (M. L. T^{-3}. \theta^{-1})^k . (L^2. T^2. \theta^{-1})^m. (\theta)^n(\emptyset)^r . (L)^w \quad (IV.3)$$

$$\begin{cases} a + d + j + k = 1 & (1) \\ -b - d - 3j - 3k - 2m = -3 & (2) \\ -3a + b + c - d + e + f + g + h + i + k + 2m + w = -2 & (3) \\ -k - m - n = -1 & (4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = 1 - d - j - k & (5) \\ b = 3 - d - 3j - 3k - 2m & (6) \\ e = -d - c - f - h - i - k - 2 - g & (7) \\ n = 1 + k + m & (8) \end{cases}$$

D'autre part, en remplaçant (5), (6), (7) et (8) dans (IV.3) on obtient :

$$\frac{h_c}{A_c} = \left[ \pi \cdot k \cdot \rho^{1-d-j-k} \cdot V^{3-d-3j-3k-2m} \cdot D_H^c \cdot \mu^d \cdot \varepsilon^{-d-c-f-h-i-k-2-g} \cdot P_{e-r}^f \cdot P_{e-s}^g \cdot L_{ch}^h \cdot D_{tr}^i \cdot I^j \cdot \lambda^k \cdot C_p^m \cdot \Delta T^{-1+k+m} \cdot \phi^r \cdot P_{e-tr}^w \right] \quad (IV.4)$$

$$\frac{h_c}{A_c} = \left[ (\rho \cdot V^3 \cdot \varepsilon^{-2} \cdot \Delta T^{-1}) \left( \frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot \varepsilon} \right)^d \cdot \left( \frac{I}{\rho \cdot V^3} \right)^j \cdot \left( \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\varepsilon \cdot \rho \cdot V^3} \right)^k \cdot \left( \frac{\Delta T \cdot C_p}{V^2} \right)^m \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^c \cdot \left( \frac{D_{tr}}{\varepsilon} \right)^i \cdot \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right)^h \cdot \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right)^g \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right)^f \cdot \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right)^w \cdot (\phi)^r \right] \quad (IV.5)$$

L'expression du nombre de Nusselt prend la forme suivante :

$$N_u = \left[ \left( \frac{A_c}{\varepsilon^2} \right) \cdot R_e \cdot B_r \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^d \cdot R_e^{-d} \cdot \left( \frac{I}{\rho \cdot V^3} \right)^j \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^k \cdot R_e^{-k} \cdot B_r^{-k} \cdot E_c^{-m} \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^c \cdot \left( \frac{D_{tr}}{\varepsilon} \right)^i \cdot \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right)^h \cdot \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right)^g \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right)^f \cdot \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right)^w \cdot (\phi)^r \right] \quad (IV.6)$$

$$N_u = \left[ \left( \frac{A_c}{\varepsilon^2} \right) \cdot R_e^{1-d-k} \cdot B_r^{1-k} \cdot \left( \frac{I}{\rho \cdot V^3} \right)^j \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^{d+c+k} \cdot E_c^{-m} \cdot \left( \frac{D_{tr}}{\varepsilon} \right)^i \cdot \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right)^h \cdot \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right)^g \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right)^f \cdot \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right)^w \cdot (\phi)^r \right] \quad (IV.7)$$

**IV.2. Régime turbulent ( $Re > 2300$ )**

Pour ce régime, on se fixe le coefficient de conductivité thermique de l'air ( $\lambda$ ), la chaleur massique de l'air ( $C_p$ ), masse volumique du fluide ( $\rho$ ) (l'air dans notre cas) et la viscosité dynamique de l'air ( $\mu$ ).

| $h_c$<br>[w/m <sup>2</sup> K] | $V_{int}$<br>[m/s] | $\varepsilon$<br>[m] | $L_{ch}$<br>[m] | $P_{e-r}$<br>[m] | $P_{e-s}$<br>[m] | $P_{e-tr}$<br>[m] | $\lambda$<br>[w/m.K] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] | $C_p$<br>[J/kg.K] | $\Delta T$<br>[K] | $D_H$<br>[m] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\mu$<br>[kg/m.s]    | $D_{tr}$<br>[m] | $\phi$ |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|----------------------|-----------------|--------|
| 37,08572386                   | 6.11943665         | 0.0175               | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 1020                       | 1004              | 300.6             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 30°    |
| 43.49017429                   | 7.467787099        | 0.0175               | 0.3             | 0.075            | 0.1              | 0.0376            | 0.025                | 664                        | 1004              | 287.7             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 30°    |
| 57.46524842                   | 10.57936506        | 0.0175               | 0.3             | 0.145            | 0.19             | 0.0376            | 0.025                | 454                        | 1004              | 286.7             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 30°    |
| 56.56205126                   | 10.37192653        | 0.0175               | 0.3             | 0.3              | 0.395            | 0.0376            | 0.025                | 900                        | 1004              | 287.6             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 30°    |
| 30.39005012                   | 4.771086202        | 0.0175               | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 1020                       | 1004              | 302.3             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 150°   |
| 28.25690446                   | 4.356209141        | 0.0175               | 0.3             | 0.075            | 0.1              | 0.0376            | 0.025                | 664                        | 1004              | 313.3             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 150°   |
| 48.25876825                   | 8.504979751        | 0.0175               | 0.3             | 0.145            | 0.19             | 0.0376            | 0.025                | 454                        | 1004              | 287.8             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 150°   |
| 54.74470721                   | 9.957049465        | 0.0175               | 0.3             | 0.3              | 0.395            | 0.0376            | 0.025                | 900                        | 1004              | 289.5             | 0,01408438   | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 150°   |
| 198.7058332                   | 36.21494134        | 0.0175               | 0.3             | 0.3              | 0.395            | 0.0376            | 0.025                | 878                        | 1004              | 284.6             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 60°    |
| 178.5735198                   | 31.68807367        | 0.0175               | 0.3             | 0.145            | 0.19             | 0.0376            | 0.025                | 839                        | 1004              | 286.3             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 60°    |
| 205.3022127                   | 37.72389723        | 0.0175               | 0.3             | 0.075            | 0.1              | 0.0376            | 0.025                | 917                        | 1004              | 284.6             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 60°    |
| 240.7029953                   | 46.02315462        | 0.0175               | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 511                        | 1004              | 277.1             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 60°    |
| 94.67177231                   | 14.33508095        | 0.0175               | 0.3             | 0.3              | 0.395            | 0.0376            | 0.025                | 878                        | 1004              | 285.5             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 120°   |
| 221.5683779                   | 41.49628695        | 0.0175               | 0.3             | 0.145            | 0.19             | 0.0376            | 0.025                | 793                        | 1004              | 288.1             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 120°   |
| 157.8554669                   | 27.161206          | 0.0175               | 0.3             | 0.048            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 686                        | 1004              | 304.4             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 120°   |
| 185.3445276                   | 33.19702956        | 0.0175               | 0.3             | 0.075            | 0.1              | 0.0376            | 0.025                | 898                        | 1004              | 285.4             | 0,003912225  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0024          | 120°   |
| 192.9254267                   | 35.49448395        | 0.0299038106         | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0345            | 0.025                | 728                        | 1004              | 280.3             | 0,004184291  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055          | 60°    |
| 130.1024915                   | 21.69107352        | 0.0299038106         | 0.3             | 0.075            | 0.1              | 0.0345            | 0.025                | 778                        | 1004              | 280               | 0,004184291  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055          | 60°    |
| 139.4814528                   | 23.6629893         | 0.0299038106         | 0.3             | 0.145            | 0.19             | 0.0345            | 0.025                | 900                        | 1004              | 278.1             | 0,004184291  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055          | 60°    |
| 107.511059                    | 17.08993671        | 0.0299038106         | 0.3             | 0.3              | 0.395            | 0.0345            | 0.025                | 650                        | 1004              | 278.3             | 0,004184291  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055          | 60°    |
| 142.5725249                   | 24.32029456        | 0.0299038106         | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0345            | 0.025                | 787                        | 1004              | 280.6             | 0,004184291  | 1.225                          | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055          | 120°   |

|             |             |              |      |       |       |        |       |     |      |       |             |       |                      |        |      |
|-------------|-------------|--------------|------|-------|-------|--------|-------|-----|------|-------|-------------|-------|----------------------|--------|------|
| 126.9388163 | 21.03376826 | 0.0299038106 | 0.3  | 0.075 | 0.1   | 0.0345 | 0.025 | 971 | 1004 | 278.4 | 0,004184291 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |
| 190.0619398 | 34.83717869 | 0.0299038106 | 0.3  | 0.145 | 0.19  | 0.0345 | 0.025 | 898 | 1004 | 280.6 | 0,004184291 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |
| 136.3731578 | 23.00568404 | 0.0299038106 | 0.3  | 0.3   | 0.395 | 0.0345 | 0.025 | 930 | 1004 | 279.6 | 0,004184291 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |
| 98.58390313 | 15.29171388 | 0.0299038106 | 0.28 | 0.05  | 0.048 | 0.0345 | 0.025 | 871 | 1004 | 282.3 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 60°  |
| 154.5541213 | 26.82559667 | 0.0299038106 | 0.28 | 0.1   | 0.096 | 0.0345 | 0.025 | 905 | 1004 | 279.2 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 60°  |
| 74.25549262 | 10.73023867 | 0.0299038106 | 0.28 | 0.4   | 0.384 | 0.0345 | 0.025 | 920 | 1004 | 278.5 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 60°  |
| 132.5085035 | 22.13111725 | 0.0299038106 | 0.28 | 0.2   | 0.192 | 0.0345 | 0.025 | 892 | 1004 | 280.2 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 60°  |
| 178.8239103 | 32.190716   | 0.0299038106 | 0.28 | 0.05  | 0.048 | 0.0345 | 0.025 | 844 | 1004 | 280.2 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |
| 142.0609119 | 24.143037   | 0.0299038106 | 0.28 | 0.1   | 0.096 | 0.0345 | 0.025 | 902 | 1004 | 278.6 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |
| 70.51891223 | 10.05959875 | 0.0299038106 | 0.28 | 0.2   | 0.192 | 0.0345 | 0.025 | 510 | 1004 | 277.4 | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |
| 88.76803245 | 13.41279833 | 0.0299038106 | 0.28 | 0.4   | 0.384 | 0.0345 | 0.025 | 916 | 1004 | 279   | 0,004137332 | 1.225 | 1.8.10 <sup>-5</sup> | 0,0055 | 120° |

*Tableau (IV.2) : Le coefficient d'échange par convection prélevés pour la variante des chicanes pour le régime turbulent.*



A partir de l'équation (IV.5) on trouve :

$$\ln\left(\frac{h_c \cdot \varepsilon^2 \cdot \Delta T}{A_c \cdot \rho \cdot V^3}\right) = \left[ \begin{array}{l} d \cdot \ln\left(\frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot \varepsilon}\right) + j \cdot \ln\left(\frac{l}{\rho \cdot V^3}\right) + k \cdot \ln\left(\frac{\lambda \cdot \Delta T}{\varepsilon \cdot \rho \cdot V^3}\right) \\ + m \cdot \ln\left(\frac{C_p \cdot \Delta T}{V^2}\right) + c \cdot \ln\left(\frac{D_H}{\varepsilon}\right) + i \cdot \ln\left(\frac{L_{ch}}{\varepsilon}\right) \\ + h \cdot \ln\left(\frac{P_{e-s}}{\varepsilon}\right) + g \cdot \ln\left(\frac{P_{e-s}}{\varepsilon}\right) \\ + f \cdot \ln\left(\frac{P_{e-r}}{\varepsilon}\right) + w \cdot \ln\left(\frac{P_{e-tr}}{\varepsilon}\right) + r \cdot \ln(\emptyset) \end{array} \right] \quad (IV.8)$$

Pour calculer le Coefficient d'échange thermique par convection on a utilisé la corrélation de *Dittus-Boelter* pour les deux régimes laminaire et turbulent.

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (IV.9)$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression suivante du  $h_c$ :

$$h_c = 3.711805 \cdot V_{int}^{0.8} \cdot D_H^{-0.2} \quad (IV.10)$$

Pour obtenir la corrélation empirique on a remplacé les données du tableau (IV.2) dans l'équation (IV.8) et (IV.10), on obtient la matrice sur déterminée suivante :

$$\begin{bmatrix}
 -8.8939 & 1.2902 & 0.4251 & 8.9945 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 1.0090 & 0.6931 & 0.7648 & -0.6470 \\
 -9.0931 & 0.2635 & -0.2161 & 8.5524 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 1.7429 & 1.4552 & 0.7648 & -0.6470 \\
 -9.4414 & -1.1615 & -1.2645 & 7.8523 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 2.3848 & 2.1145 & 0.7648 & -0.6470 \\
 -9.4216 & -0.4178 & -1.2020 & 7.8951 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 3.1166 & 2.8415 & 0.7648 & -0.6470 \\
 -8.6450 & 2.0368 & 1.1774 & 9.4980 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 1.0090 & 0.6931 & 0.7648 & 0.9624 \\
 -8.5541 & 1.8805 & 1.4860 & 9.7157 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 1.7429 & 1.4552 & 0.7648 & 0.9624 \\
 -9.2231 & -0.5067 & -0.6059 & 8.2927 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 2.3848 & 2.1145 & 0.7648 & 0.9624 \\
 -9.3808 & -0.2953 & -1.0729 & 7.9833 & -0.2171 & -1.9867 & 2.8415 & 3.1166 & 2.8415 & 0.7648 & 0.9624 \\
 -10.6719 & -4.1937 & -4.9635 & 5.3838 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 3.1166 & 2.8415 & 0.7648 & 0.0461 \\
 -10.5384 & -3.8385 & -4.5570 & 5.6569 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 2.3848 & 2.1145 & 0.7648 & 0.0461 \\
 -10.7128 & -4.2727 & -5.0860 & 5.3022 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 1.7429 & 1.4552 & 0.7648 & 0.0461 \\
 -10.9116 & -5.4540 & -5.7093 & 4.8778 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 1.0090 & 0.6931 & 0.7648 & 0.0461 \\
 -9.7452 & -1.4134 & -2.1801 & 7.2405 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 3.1166 & 2.8415 & 0.7648 & 0.7392 \\
 -10.8081 & -4.7039 & -5.3597 & 5.1238 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 2.3848 & 2.1145 & 0.7648 & 0.7392 \\
 -10.3843 & -3.5774 & -4.0332 & 6.0265 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 1.0090 & 1.0090 & 0.7648 & 0.7392 \\
 -10.5849 & -3.9101 & -4.6997 & 5.5607 & -1.4980 & -1.9867 & 2.8415 & 1.7429 & 1.4552 & 0.7648 & 0.7392 \\
 -11.1876 & -4.3207 & -5.4543 & 5.4088 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 0.4732 & 0.1573 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -10.6952 & -2.7769 & -3.9779 & 6.3927 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 1.2071 & 0.9195 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -10.7822 & -2.8922 & -4.2458 & 6.2119 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 1.8490 & 1.5787 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -10.4568 & -2.2414 & -3.2688 & 6.8634 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 2.5808 & 2.3057 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -10.8096 & -3.1086 & -4.3190 & 6.1660 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 0.4732 & 0.1573 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -10.6644 & -2.4630 & -3.8913 & 6.4485 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 1.2071 & 0.9195 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -11.1689 & 4.0548 & -5.3971 & 5.4473 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 1.8490 & 1.5787 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -10.7540 & -2.7749 & -4.1559 & 6.2736 & -1.9666 & -1.6932 & 2.3057 & 2.5808 & 2.3057 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -10.3456 & -1.6152 & -2.9210 & 7.1000 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 0.4732 & 0.5140 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -10.9076 & -3.2630 & -4.6181 & 5.9649 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 1.1663 & 1.2071 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -9.9913 & -0.4977 & -1.8718 & 7.7950 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 2.5526 & 2.5934 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -10.71529 & -2.7004 & -4.0375 & 6.3532 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 1.8595 & 1.9003 & 0.1429 & 0.0461 \\
 -11.0899 & -3.8798 & -5.1544 & 5.6110 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 0.4732 & 0.5140 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -10.8023 & -2.9503 & -4.3042 & 6.1735 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 1.1663 & 1.2071 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -9.9268 & -0.8941 & -1.6821 & 7.9201 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 1.8595 & 1.9003 & 0.1429 & 0.7392 \\
 -10.2145 & -1.1715 & -2.5394 & 7.3505 & -1.9779 & -1.6932 & 2.2368 & 2.5526 & 2.5934 & 0.1429 & 0.7392
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 d \\
 j \\
 k \\
 m \\
 c \\
 i \\
 h \\
 g \\
 f \\
 w \\
 r
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -4.1217 \\
 -4.6037 \\
 -5.3734 \\
 -5.3267 \\
 -3.5685 \\
 -3.3326 \\
 -4.8894 \\
 -5.2303 \\
 -7.8318 \\
 -7.5321 \\
 -7.9216 \\
 -8.3858 \\
 -5.7898 \\
 -8.1191 \\
 -7.1317 \\
 -7.6376 \\
 -6.7447 \\
 -5.6623 \\
 -5.8606 \\
 -5.1439 \\
 -5.9119 \\
 -5.6004 \\
 -6.7025 \\
 -5.7932 \\
 -4.8828 \\
 -6.1303 \\
 -4.1170 \\
 -5.7036 \\
 -6.5208 \\
 -5.9007 \\
 -3.9790 \\
 -4.6061
 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse :

$$X = pinv(m) * (n)$$

Alors la solution est :

$$\begin{cases} d = -0.0382 \\ j = 0.2818 \\ k = 0.2003 \\ m = 0.7996 \\ c = -0.2000 \\ i = 6.2297 \\ h = -1.0752 \\ g = 4.7239 \\ f = -0.5736 \\ w = 1.2170 \\ r = -9.1999 \end{cases}$$

Après substitution des solutions dans l'équation (IV.7), on obtient la corrélation suivante qui peut être appliquée pour la disposition en rangée des chicane en régime turbulent:

$$N_u = \left[ \begin{array}{l} \left( \frac{A_c}{\varepsilon^2} \right) \cdot R_e \cdot B_r \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^{-0.0382} \cdot R_e^{0.0382} \cdot \left( \frac{I}{\rho \cdot V^3} \right)^{6.2297} \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^{0.2003} \cdot R_e^{-0.2003} \\ B_r^{-0.2003} E_c^{-0.7996} \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^{-0.2000} \cdot \left( \frac{D_{tr}}{\varepsilon} \right)^{6.2297} \cdot \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right)^{-1.0752} \cdot \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right)^{4.7239} \\ \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right)^{-0.5736} \cdot \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right)^{1.2170} \cdot (\varnothing)^{-9.1999} \end{array} \right] \quad (IV. 11)$$

$$N_u = \left[ \begin{array}{l} \left( \frac{A_c}{\varepsilon^2} \right) \cdot R_e^{0.7615} \cdot B_r^{0.7997} \cdot \left( \frac{I}{\rho \cdot V^3} \right)^{0.2818} \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^{-0.0379} \cdot E_c^{-0.7996} \cdot \left( \frac{D_{tr}}{\varepsilon} \right)^{0.2297} \\ \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right)^{-1.0752} \cdot \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right)^{4.7239} \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right)^{-0.5736} \cdot \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right)^{1.2170} \cdot (\varnothing)^{-9.1999} \end{array} \right] \quad (IV. 12)$$

Soit le nombre de Nusselt donné par l'expression :

$$N_u = \frac{h_c D_H}{\lambda} \quad (IV. 13)$$

Par conséquent l'expression du coefficient d'échange par convection prend la forme suivante :

$$h = \frac{\lambda}{D_H} \cdot \left[ \begin{array}{l} \left(\frac{A_c}{\varepsilon^2}\right) \cdot R_e^{0.7615} \cdot B_r^{0.7997} \cdot \left(\frac{I}{\rho \cdot V^3}\right)^{0.2818} \cdot \left(\frac{D_H}{\varepsilon}\right)^{-0.0379} \cdot E_c^{-0.7996} \\ \left(\frac{D_{tr}}{\varepsilon}\right)^{0.2297} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{\varepsilon}\right)^{-1.0752} \cdot \left(\frac{P_{e-s}}{\varepsilon}\right)^{4.7239} \cdot \left(\frac{P_{e-r}}{\varepsilon}\right)^{-0.5736} \\ \left(\frac{P_{e-tr}}{\varepsilon}\right)^{1.2170} \cdot (\phi)^{-9.1999} \end{array} \right] \quad (IV.14)$$

### IV.3. Régime laminaire ( $R_e < 2300$ )

De la même façon pour ce régime on considère les données de départ suivant :

| $h_c$<br>[w/m <sup>2</sup> K] | $V_{int}$<br>[m/s] | $\varepsilon$<br>[m] | $L_{ch}$<br>[m] | $P_{e-r}$<br>[m] | $P_{e-s}$<br>[m] | $P_{e-tr}$<br>[m] | $\lambda$<br>[w/m.K] | $I$<br>[w/m <sup>2</sup> ] | $C_p$<br>[J/kg.K] | $\Delta T$<br>[K] | $D_H$<br>[m] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\mu$<br>[kg/m.s] | $D_{tr}$<br>[m] | $\phi$ |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------|
| 69.88312357                   | 9.808213279        | 1.75                 | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 814                        | 1004              | 284               | 0.003912225  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0024          | 120°   |
| 65.54847972                   | 9.053735335        | 1.75                 | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 850                        | 1004              | 284.7             | 0.003912225  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0024          | 120°   |
| 61.1408926                    | 8.29925739         | 1.75                 | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 878                        | 1004              | 285.5             | 0.003912225  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0024          | 120°   |
| 56.65231048                   | 7.544779446        | 1.75                 | 0.3             | 0.035            | 0.048            | 0.0376            | 0.025                | 888                        | 1004              | 286.1             | 0.003912225  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0024          | 120°   |
| 60.70337825                   | 8.340934845        | 2.99038106           | 0.28            | 0.05             | 0.048            | 0.0345            | 0.025                | 542                        | 1004              | 278.7             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 60°    |
| 64.71762124                   | 9.036012748        | 2.99038106           | 0.28            | 0.05             | 0.048            | 0.0345            | 0.025                | 775                        | 1004              | 281               | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 60°    |
| 68.67051314                   | 9.731090652        | 2.99038106           | 0.28            | 0.05             | 0.048            | 0.0345            | 0.025                | 898                        | 1004              | 282.3             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 60°    |
| 66.73213595                   | 9.388958833        | 2.99038106           | 0.28            | 0.05             | 0.048            | 0.0345            | 0.025                | 943                        | 1004              | 277.8             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 60°    |
| 70.51891223                   | 10.05959875        | 2.99038106           | 0.28            | 0.2              | 0.192            | 0.0345            | 0.025                | 927                        | 1004              | 277.2             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 60°    |
| 62.89082317                   | 8.718318917        | 2.99038106           | 0.28            | 0.2              | 0.192            | 0.0345            | 0.025                | 456                        | 1004              | 277.1             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 60°    |
| 58.98989107                   | 8.047679           | 2.99038106           | 0.28            | 0.2              | 0.192            | 0.0345            | 0.025                | 620                        | 1004              | 277.8             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 120°   |
| 55.02331419                   | 7.377039083        | 2.99038106           | 0.28            | 0.2              | 0.192            | 0.0345            | 0.025                | 683                        | 1004              | 277.8             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 120°   |
| 66.73213595                   | 9.388958833        | 2.99038106           | 0.28            | 0.2              | 0.192            | 0.0345            | 0.025                | 811                        | 1004              | 278               | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 120°   |
| 55.02331419                   | 7.377039083        | 2.99038106           | 0.28            | 0.2              | 0.192            | 0.0345            | 0.025                | 685                        | 1004              | 278               | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 120°   |
| 70.51891223                   | 10.05959875        | 2.99038106           | 0.28            | 0.4              | 0.384            | 0.0345            | 0.025                | 708                        | 1004              | 278.3             | 0.004137332  | 1.225                          | 0.000018          | 0.0055          | 120°   |

Tableau (IV.3) : Le coefficient d'échange par convection prélevés pour la variante des chicanes pour le régime laminaire.

On remplace les données expérimentales du tableau (IV.3) dans l'équation (IV.8) et (IV.10).

$$\ln \left( \frac{h_c \cdot \varepsilon^2 \cdot \Delta T}{A_c \cdot \rho \cdot V^3} \right) = \left[ \begin{array}{l} d \cdot \ln \left( \frac{\mu}{\rho \cdot V \cdot \varepsilon} \right) + j \cdot \ln \left( \frac{l}{\rho \cdot V^3} \right) + k \cdot \ln \left( \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\varepsilon \cdot \rho \cdot V^3} \right) \\ + m \cdot \ln \left( \frac{C_p \cdot \Delta T}{V^2} \right) + c \cdot \ln \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right) + i \cdot \ln \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right) \\ + h \cdot \ln \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right) + g \ln \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right) \\ + f \cdot \ln \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right) + w \cdot \ln \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right) + r \cdot \ln(\emptyset) \end{array} \right] \quad (IV.8)$$

$$N_u = 0.023 \cdot R_e^{0.8} \cdot P_r^{0.4} \Rightarrow h_c = 3.711805 \cdot V_{int}^{0.8} \cdot D_H^{-0.2} \quad (IV.10)$$

On obtient la matrice non carrée suivante :

$$\begin{bmatrix}
 -13.9709 & -0.3506 & -5.6521 & 7.9943 & -6.1033 & -6.5919 & -1.7636 & -3.5962 & -3.9120 & -3.8404 & 0.7393 \\
 -13.9709 & -0.0672 & -5.4095 & 8.1568 & -6.1033 & -6.5919 & -1.7636 & -3.5962 & -3.9120 & -3.8404 & 0.7393 \\
 -13.8039 & 0.2262 & -5.1457 & 8.3337 & -6.1033 & -6.5919 & -1.7636 & -3.5962 & -3.9120 & -3.8404 & 0.7393 \\
 -13.7086 & 0.5235 & -4.8577 & 8.5264 & -6.1033 & -6.5919 & -1.7636 & -3.5962 & -3.9120 & -3.8404 & 0.7393 \\
 -14.3447 & -0.2712 & -5.7206 & 8.2995 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -4.1320 & -4.0911 & -4.4622 & 0.0461 \\
 -14.3447 & -0.1537 & -5.9525 & 8.1477 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -4.1320 & -4.0911 & -4.4622 & 0.0461 \\
 -14.4988 & -0.2287 & -6.1702 & 8.0041 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -4.1320 & -4.0911 & -4.4622 & 0.0461 \\
 -14.4630 & -0.0725 & -6.0789 & 8.0596 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -4.1320 & -4.0911 & -4.4622 & 0.0461 \\
 -14.5320 & -0.2966 & -6.2881 & 7.9194 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.7457 & -2.7048 & -4.4622 & 0.0461 \\
 -14.3889 & -0.5767 & -5.8591 & 8.2053 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.7457 & -2.7048 & -4.4622 & 0.0461 \\
 -14.3089 & -0.0294 & -5.6165 & 8.3679 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.7457 & -2.7048 & -4.4622 & 0.7393 \\
 -14.2219 & 0.3284 & -5.3554 & 8.5419 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.7457 & -2.7048 & -4.4622 & 0.7393 \\
 -14.4630 & -0.2233 & -6.0782 & 8.0603 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.7457 & -2.7048 & -4.4622 & 0.7393 \\
 -14.2219 & 0.3314 & -5.3547 & 8.5426 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.7457 & -2.7048 & -4.4622 & 0.7393 \\
 -14.5320 & -0.5661 & -6.2841 & 7.9234 & -6.5831 & -6.2984 & -2.3684 & -2.0525 & -2.0117 & -4.4622 & 0.7393
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 d \\
 j \\
 k \\
 m \\
 c \\
 i \\
 h \\
 g \\
 f \\
 w \\
 r
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 12.2142 \\
 12.2192 \\
 12.2248 \\
 12.2290 \\
 13.2481 \\
 13.2646 \\
 13.2738 \\
 13.2417 \\
 13.2373 \\
 13.2366 \\
 13.2417 \\
 13.2417 \\
 13.2431 \\
 13.2431 \\
 13.2453
 \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse :

$$X = pinv(m) * (n)$$

Alors la solution est :

$$\begin{cases} d = -0.1483 \\ j = -0.4531 \\ k = -3.8516 \\ m = 5.8516 \\ c = 3.2752 \\ i = 4.8632 \\ h = 0.1851 \\ g = -0.3962 \\ f = 0.3962 \\ w = 1.5384 \\ r = -2.1009 \end{cases}$$

Après substitution des solutions dans l'équation (IV.7), on obtient la corrélation suivante qui peut être appliquée pour la disposition en rangée des chicanes en régime laminaire:

$$Nu = \left[ \begin{array}{cccc} \left(\frac{Ac}{\varepsilon^2}\right) \cdot Re \cdot Br \cdot \left(\frac{DH}{\varepsilon}\right)^{-0.1483} & \cdot Re^{0.1483} \cdot \left(\frac{I}{\rho \cdot V^3}\right)^{-0.4531} & \cdot \left(\frac{DH}{\varepsilon}\right)^{-3.8516} & \cdot Re^{3.8516} \\ Br^{3.8516} Ec^{-5.8516} \cdot \left(\frac{DH}{\varepsilon}\right)^{3.2752} & \cdot \left(\frac{Dtr}{\varepsilon}\right)^{4.8632} & \cdot \left(\frac{Lch}{\varepsilon}\right)^{0.1851} & \cdot \left(\frac{Pe-s}{\varepsilon}\right)^{-0.3962} \\ \left(\frac{Pe-r}{\varepsilon}\right)^{0.3962} & \cdot \left(\frac{Pe-tr}{\varepsilon}\right)^{1.5384} & & (\emptyset)^{-2.1009} \end{array} \right] \quad (IV.15)$$

$$Nu = \left[ \begin{array}{cccc} \left(\frac{Ac}{\varepsilon^2}\right) \cdot Re^{4.9999} \cdot Br^{4.8516} \cdot \left(\frac{I}{\rho \cdot V^3}\right)^{-0.4531} & \cdot \left(\frac{DH}{\varepsilon}\right)^{-0.7247} & Ec^{-5.8516} \cdot \left(\frac{Dtr}{\varepsilon}\right)^{4.8632} & \\ \left(\frac{Lch}{\varepsilon}\right)^{0.1851} & \left(\frac{Pe-s}{\varepsilon}\right)^{-0.3962} & \cdot \left(\frac{Pe-r}{\varepsilon}\right)^{0.3962} & \cdot \left(\frac{Pe-tr}{\varepsilon}\right)^{1.5384} \cdot (\emptyset)^{-2.1009} \end{array} \right] \quad (IV.16)$$

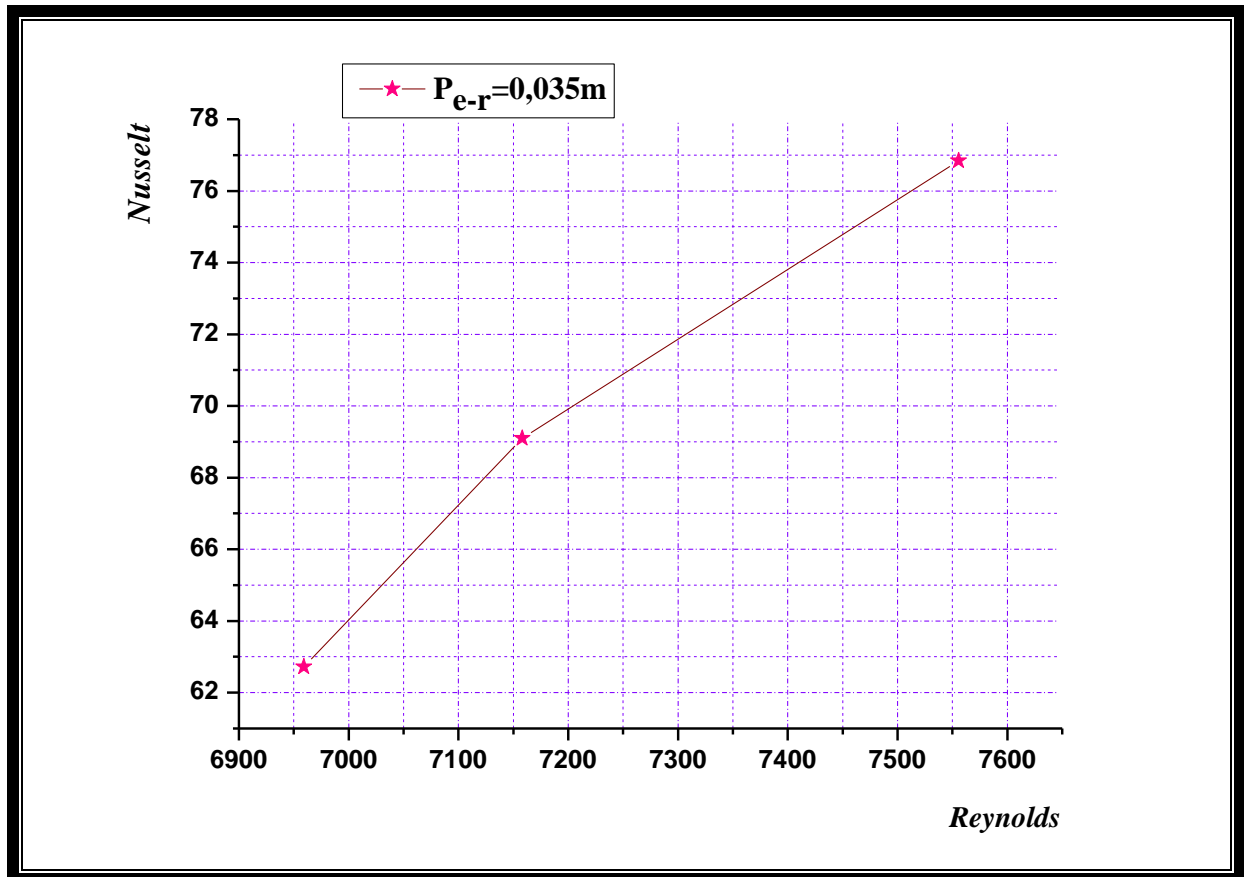
Soit le nombre de Nusselt donné par l'expression :

$$Nu = \frac{h_c D_H}{\lambda} \quad (IV.20)$$



Par conséquent l'expression du coefficient d'échange par convection prend la forme suivante :

$$h = \frac{\lambda}{D_H} \left[ \left( \frac{A_c}{\varepsilon^2} \right) \cdot R_e^{0.7615} \cdot B_r^{0.7997} \cdot \left( \frac{l}{\rho \cdot V^3} \right)^{0.2818} \cdot \left( \frac{D_H}{\varepsilon} \right)^{-0.0379} E_c^{-0.7996} \right. \\ \left. \left( \frac{D_{tr}}{\varepsilon} \right)^{0.2297} \cdot \left( \frac{L_{ch}}{\varepsilon} \right)^{-1.0752} \cdot \left( \frac{P_{e-s}}{\varepsilon} \right)^{4.7239} \cdot \left( \frac{P_{e-r}}{\varepsilon} \right)^{-0.5736} \right. \\ \left. \left( \frac{P_{e-tr}}{\varepsilon} \right)^{1.2170} \cdot (\varnothing)^{-9.1999} \right] \quad (IV.17)$$

**IV.4. Représentation graphiques de nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds****IV.4.1. Pour un régime turbulent**

*Figure (IV.1) : Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds*

*( $R_e > 2300$ ) pour le régime turbulent.*

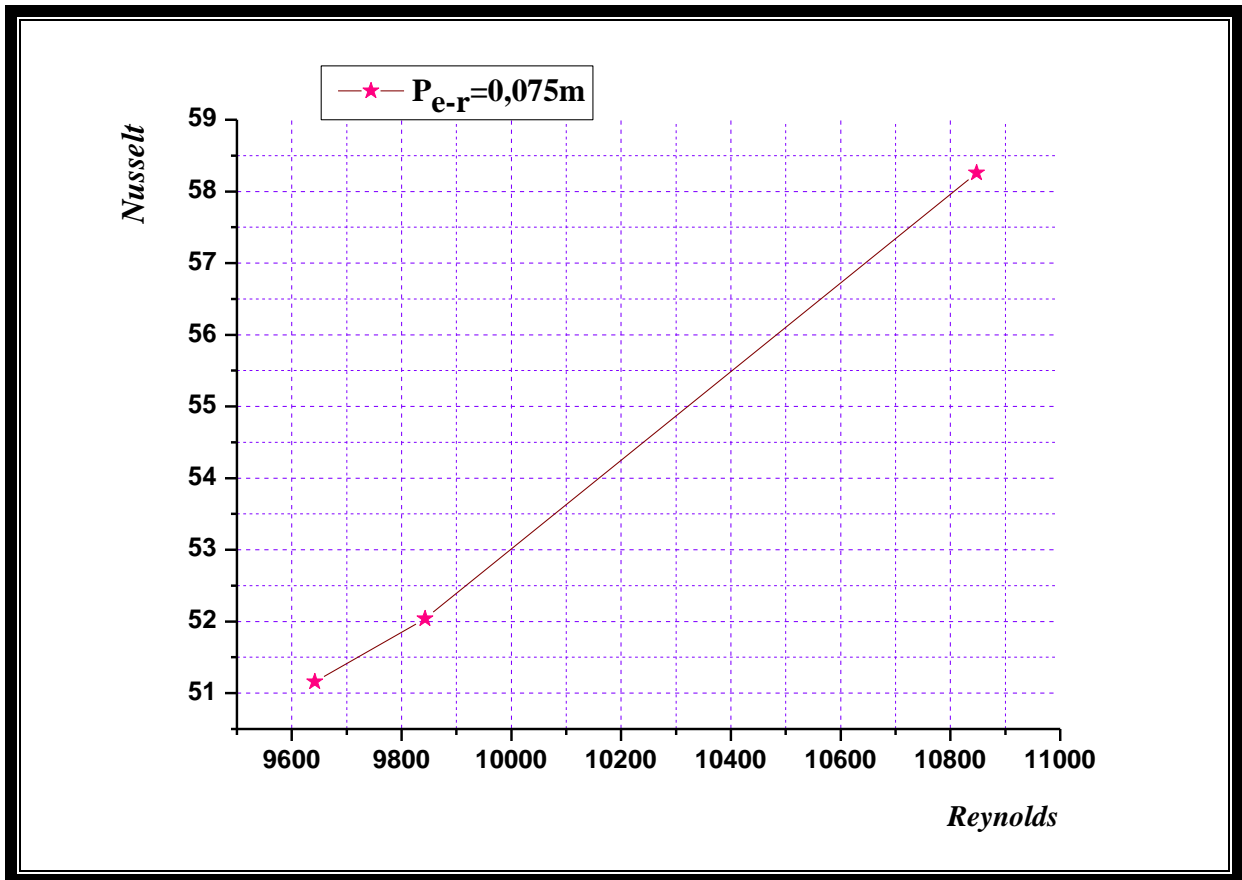


Figure (IV.2) : Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds  
( $R_e > 2300$ ) pour le régime turbulent.

IV.4.2. Pour le régime laminaire

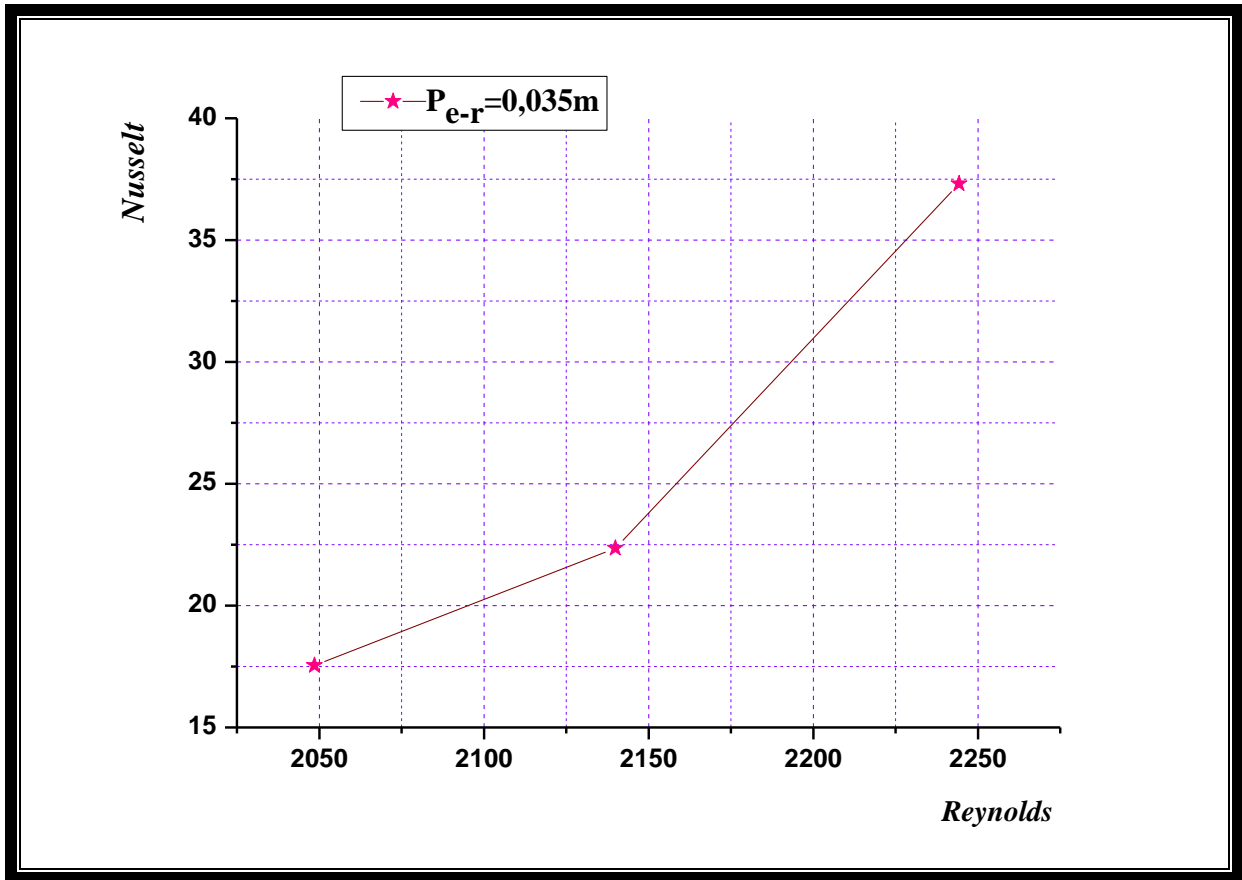


Figure (IV.3) : Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds  
( $Re < 2300$ ) pour le régime laminaire.

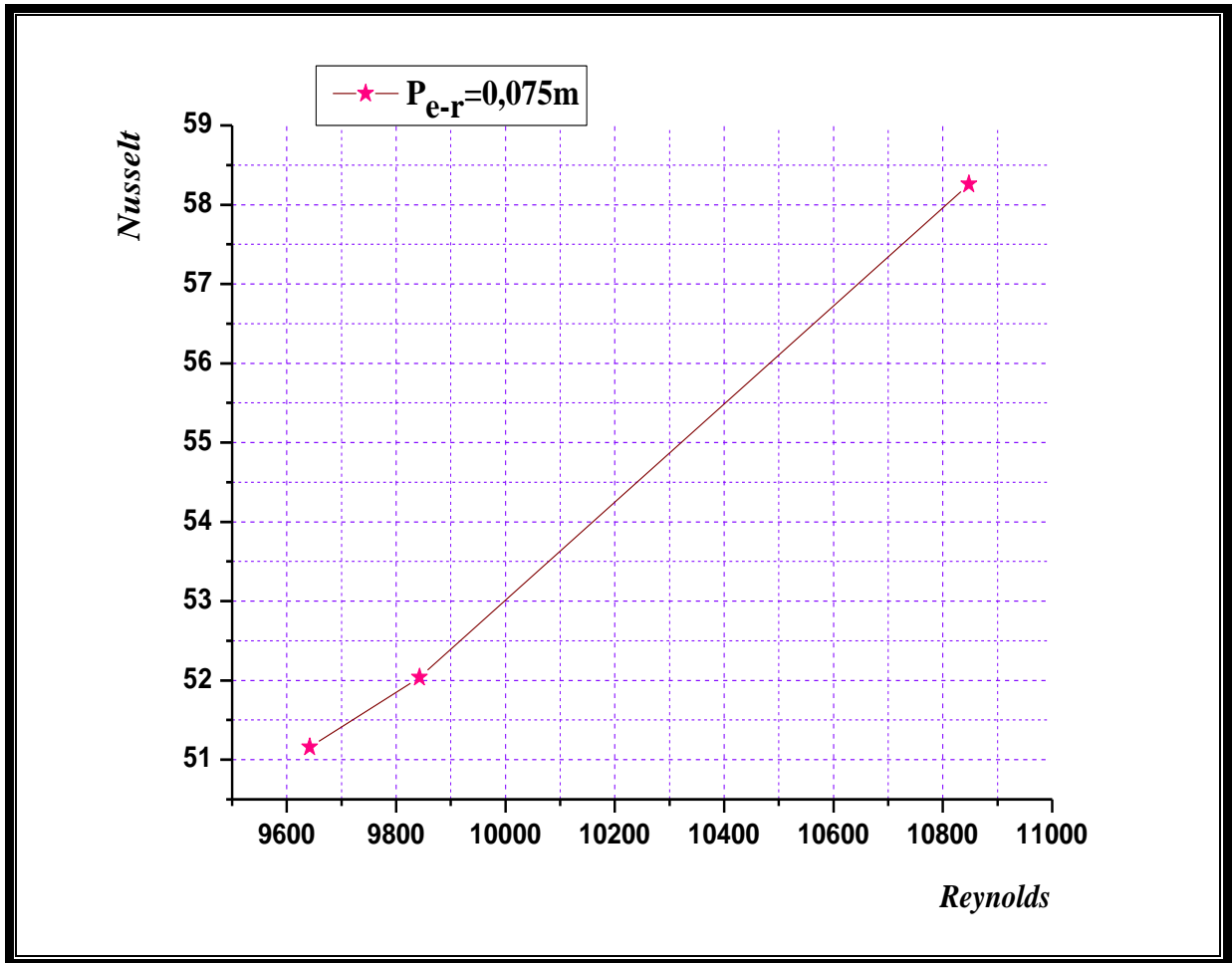


Figure (IV.4) : Evolution du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds  
( $R_e < 2300$ ) pour le régime laminaire.

**IV.5. Discussions et interprétations des résultats**

En régime d'écoulement turbulent ( $R_e > 2300$ ) concernant l'influence de nombre de Reynolds sur le nombre de Nusselt, nous pouvons constater que le nombre de Nusselt varie dans l'intervalle [62.7215 – 76.8375] pour le premier cas ou le pas entre les chicane  $P_{e-r} = 0.035m$ , comme montre la figure (IV.1), d'autre part il varie de [51.1591 – 58.2560] dans le deuxième cas ou le pas entre les chicane augmente  $P_{e-r} = 0.075m$ , comme le montre la figure (IV.2).

Ce qui montre que la relation entre le pas entre les chicane et le nombre de Nusselt est une relation inverse.

Dans le cas de régime laminaire ( $R_e < 2300$ ), on remarque que le nombre de Nusselt varie entre [17.5478 – 37.3067], pour le pas entre les chicane est  $P_{e-r} = 0.035m$ , comme montre la figure (IV.3) et dans le deuxième cas lorsque le pas entre les chicane est  $P_{e-r} = 0.05m$ , le nombre de Nusselt est varié dans l'intervalle [16.2291 – 37.2639], comme montre la figure (IV.4).

Dans ce cas, nous pouvons dire que lorsque le pas entre les chicane augmente, le nombre de Nusselt diminué.

L'analyse des résultats numériques montre que le nombre de Nusselt est plus important en régime turbulent et la relation entre le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds est une relation proportionnelle.

**Conclusion**

Dans ce dernier chapitre on a présenté les étapes qu'on a suivi pour trouver les corrélations empiriques utilisons la méthode d'analyse dimensionnelle ou (méthode de **Vaschy-Bukingham**) qui permet de définir le nombre de groupement sans dimension indépendante et aussi qui permet d'aboutir des systèmes des équations qui est résolu par la méthode de pseudo inverse.

***CONCLUSION  
GENERALE***



## *Conclusion générale*

Le présent travail constitue une étude expérimentale d'un capteur solaire plan à air pour traiter l'influence des chicanes sur les échanges thermiques.

Au premier lieu, nous avons présenté 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. Cette étude bibliographique montre que l'insertion des chicanes au niveau du conduit d'un capteur solaire plan à air est pour but d'améliorer les performances thermiques et thermo-hydrauliques et se manifeste aussi un accroissement des pertes de charges et une augmentation des échanges thermiques par convection.

Par la suite et pour effectuer ce travail on a élaboré un modèle des chicanes sous formes des barrettes perforées sous forme **V**, conçue de tel sorte à répondre à certaines condition d'utilisation, en vue d'améliorer le transfert de chaleur par convection.

Une série de manipulations expérimentales ont été réalisées dans le hall technologique du département de génie mécanique et ont présence des configurations des chicanes, ce qui nous a permis d'obtenir un nombre important des tableaux de mesures à traiter qui expriment le rendement en fonction de débit volumique.

On a pu mettre en relation tous les paramètres physiques (le fluide), thermo-physiques et les caractéristiques géométriques (les chicanes + canal) en fonction du régime d'écoulement aux corrélations à l'aide du théorème de  $\pi$  ou (**Vaschy-Buckingham**).

L'analyse des graphiques qui décrivent le rendement du capteur en fonction de débit, montrent que si le pas entre les chicanes est diminué, le rendement augmente (c-à-dire on peut obtenir de bonne performance dans le capteur solaire à air). Ces constatations aussi confirmées par les courbes de la variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds.

Les relations (IV.14) et (IV.17) sont valable pour les chicanes sous formes des barrettes perforées sous formes **V** pour les régimes des écoulements laminaire et turbulent respectivement.

***BIBLIOGRAPHIE***

## ***Bibliographie***

[1] : N. Nadji. Etude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique. Mémoire de master. Université Badji Mokhtar. Annaba. 2018.

[2] : M. A. Amraoui. Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen. 2012.

[3] : A. Benkhelifa. Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur. Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2012.

[4]: F. Zidane, S. Hammi, et A. Amri. Etude et Réalisation d'un séchoir solaire à capteur solaire plan. Diss. Université A/Mira de Bejaia. 2017.

[5] : L. Si Mohamed. Modélisation des températures dans un capteur solaire à air muni des nervures de formes diverses. Mémoire de Master. Université Mohamed Khider. Biskra. 2018.

[6] : N. Nadir. Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah. Ouargla. 2009.

[7] : A. Bahadj. Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah. Ouargla. 2014.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

[8] : N. Chalal. Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de Magister. Université Mentouri. Constantine. 2007.

[9] : Y. B. Assoa, Performances de capteurs solaires PV/T hybrides bi-fluides intégrables à l'enveloppe des bâtiments. Thèse de Doctorat. Lyon, INSA. 2008.

[10] : Durable prenons le temps, «Absorbeur solaire», «Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.», Consulter le : 17 Juin 2019.

[11] : Beggas, Azzeddine & Rehouma, F. (2010). État d'art des verres dopés aux ions terres rares: Application Amplificateur Optique. 10.13140/RG.2.2.29317.86244.

[12] : ALSOL. Maison & Jardin (Conception & Fabrication Française). «Qu'est-ce que le polycarbonate ?».«<https://www.alsol.fr/informations/19-quest-ce-que-le-polycarbonate>». Consulter le : 17 Juin 2019.

[13] : Q. Sylvain. Les centrales solaires à concentration. Faculté des sciences appliquées. Université de Liège (2007).

[14] : S. Saadi. Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan. Mémoire de magister. Université Mentouri. Constantine. 2010.

[15] : K. Aoues. Etude théorique et expérimentale de l'écoulement de l'air entre deux plans parallèles avec une surface chauffée. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider. Biskra. 2012.

[16] : O. Mahfoud. Etude dynamique et thermique de l'écoulement de l'air dans un collecteur solaire dont le conduit utile est garni de rugosités artificielles. Thèse doctorat. Université Mohammed Khidr. Biskra. 2015.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

[17]: Prasad BN, Saini JS. Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar air heater. *Sol Energy* 1988; 41:555–60.

[18]: Verma SK, Prasad BN. Investigation for the optimal thermo hydraulic performance of artificially roughened solar air heaters. *Renew Energy* 2000; 20:19–36.

[19]: SAHU, M. M. et BHAGORIA, J. L. Augmentation of heat transfer coefficient by using 90 broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater. *Renewable energy*, 2005, vol. 30, no 13, p. 2057-2073.

[20]: Gupta D, Solanki SC, Saini JS. Heat and fluid flow in rectangular solar air heater ducts having transverse rib roughness on absorber plates. *Sol Energy* 1993; 51:31–7.

[21]: Aharwal KR, Gandhi BK, Saini JS. Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater. *Renew Energy* 2008; 33:585–96.

[22]: Momin AME, Saini JS, Solanki SC. Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate. *Int J Heat Mass Transfer* 2002; 45:3383–96.

[23]: KUMAR, Anil. Analysis of heat transfer and fluid flow in different shaped roughness elements on the absorber plate solar air heater duct. *Energy Procedia*, 2014, vol. 57, p. 2102-2111.

[24]: Muluwork KB, Saini JS, Solanki SC. Studies on discrete rib roughened solar air heaters. In: *Proceedings of national solar energy convention*. 1998. p. 75–84.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

[25]: KUMAR, Dhananjay et PRASAD, Laljee. Thermo-hydraulic performance of solar air heater having multiple v-shaped rib roughness on absorber plates. *Carbon: Science and Technology*, 2018, vol. 10, no 1, p. 39-50.

[26]: Karmare SV, Tikekar AN. Heat transfer and friction factor correlation for artificially roughened duct with metal grit ribs. *Int J Heat Mass Transfer* 2007; 50:4342–51.

[27]: Varun, Saini, R. P., & Singal, S. K. (2008). Investigation of thermal performance of solar air heater having roughness elements as a combination of inclined and transverse ribs on the absorber plate. *Renewable Energy*, 33(6), 1398–1405.

[28]: SAINI, S. K. et SAINI, R. P. 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*, 2008, vol. 82, no 12, p. 1118-1130.

[29]: Saini SK, Saini RP. Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having arc-shaped wire as artificial roughness. *Sol Energy* 2008; 82:1118–30.

[30]: BHAGORIA, J. L., SAINI, J. S., et SOLANKI, S. C. Heat transfer coefficient and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate. *Renewable Energy*, 2002, vol. 25, no 3, p. 341-369.

[31]: Karwa R, Solanki SC, Saini JS. Heat transfer coefficient and friction factor correlations for the transitional flow regime in rib-roughened rectangular ducts. *Int J Heat Mass Transfer* 1999; 42:1597–615.

[32]: JAURKER, A. R., SAINI, J. S., et GANDHI, B. K. Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, no 8, p. 895-907.

[33]: LAYEK, Apurba, SAINI, J. S., et SOLANKI, S. C. Second law optimization of a solar air heater having chamfered rib-groove roughness on absorber plate. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, no 12, p. 1967-1980.

[34] : SAINI, R. P. et VERMA, Jitendra. Heat transfer and friction factor correlations for a duct having dimple-shape artificial roughness for solar air heaters. *Energy*, 2008, vol. 33, no 8, p. 1277-1287.

[35]: NAGARAJU, A. et GOWD, B. Uma Maheswar. nusselt number and friction factor correlations for solar air heater duct having triangular protrusions as roughness elements on absorber plate. *journal impact factor*, 2015, vol. 6, no 4, p. 35-44.

[36]: Bhushan B, Singh R. Nusselt number and friction factor correlations for solar air heater duct having artificially roughened absorber plate. *Sol Energy* 2011; 85:1109–18.

[37]: Saini RP, Saini JS. Heat transfer and friction factor correlations for artificially roughened ducts with expended metal mesh as roughness element. *Int J Heat Mass Transfer* 1997; 40(4):973–86.

[38]: SOI, Aman, SINGH, Ranjit, et BHUSHAN, Brij. Effect of roughness element pitch on heat transfer and friction characteristics of artificially roughened solar air heater duct. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2010, vol. 1, p. 339-346.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

[39]: Bopche SB, Tandale MS. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of a turbulator roughened solar air heater duct. *Int J Heat Mass Transfer* 2009; 52:2834–48.

[40] : Menasria, F., A. Moumami, et al. (2011). "Modélisation des échanges convectifs dans le conduit utile d'un capteur solaire plan à air muni de rugosités artificielles de formes rectangulaires." *Revue des Energies Renouvelables* 14(3): 369-379.

[41] : 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.



## RESUME

L'objectif de cette étude consiste à établir des modèles empiriques de calcul du coefficient d'échange par convection et le nombre de Nusselt, lors de l'écoulement de l'air dans un conduit rectangulaire, dont le plan inférieure est muni des chicane perforées de formes V. Par la méthode de l'analyse dimensionnelle, on a pu mettre en relation tous les paramètres physiques (le fluide), thermo-physiques et les caractéristiques géométriques (les chicanes + canal) et en fonction du régime d'écoulement en estime un coefficient d'échange thermique dans l'espace d'écoulement du fluide.

**Mots clés :** capteur solaire à air, corrélation, le coefficient d'échange thermique, convection, rugosités artificielles, les chicanes.

## ABSTRACT

The objective of this study consists in establishing an empirical models calculation of the coefficient of thermal exchange by convection and Nusselt number, during the air flow in a rectangular conduit, whose lower plan is provided with V-shaped perforated baffles. By the method of the dimensional analysis, one could connect all the physical (fluid), thermo-physical parameters and the geometrical characteristics (baffles + canal) and according to the mode of flow one estimates a coefficient of thermal exchange in the space of flow of the fluid.

**Key words:** solar air flat plate, correlations, the coefficient of thermal exchange, convection, artificial roughness, baffles.

## الخلاصة

إن هذه الدراسة تهدف إلى إنشاء نماذج عددية لمعامل الحمل الحراري ومحدد نسلت لسريان هواء داخل قناة مستطيلة الشكل سطحها السفلي مزود بخشونة إسطناعية على شكل V تحتوي على ثقبوب. وبأسلوب التحليل البعدي تمكنا من وضع علاقة تربط معامل الحمل الحراري بالخصائص الفيزيائية (المائع) والثرموديناميكية والمميزات الهندسية (العوائق + القناة) حسب طبيعة السريان.

**الكلمات المفتاحية:** لاقط شمسي هوائي، نماذج رقمية، معامل التبادل الحراري، حمل حراري، خشونة إسطناعية، عوائق.