



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 : Energétiques**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**DRAIDI Chaima**

Le : mardi 9 juillet 2019

## **Modélisation des pertes de charge dans un conduit rectangulaire occasionnées par des chicanes de forme rectangulaire.**

---

### **Jury :**

|     |                     |     |                      |            |
|-----|---------------------|-----|----------------------|------------|
| Pr. | DERFOUF Chemseddine | Pr  | Université de Biskra | Président  |
| Pr. | MOUMMI Abdelhafid   | Pr  | Université de Biskra | Rapporteur |
| M.  | ZELLOUF Miloud      | MAA | Université de Biskra | Examineur  |

# الإهداء

## الإهداء:

العلم يبني بيوتنا لا عماد لها و الجمل يمدح بيوتهم العز و الفرفنة.....

من هذا المنبر اهدي عملي المتواضع إلى:

من تملأ قلبي بندى الحب..إليك أُمي تكتب أجمل الكلمات..و تصاغ أروع العبارات..و على أعتاب فضلك تتكسر الأقلام..ويبكي الحرف لعجزه..عن إيفائك حقل العظيم.

إلى الذي أطلب منه نجمتان..فيأتي و هو يحمل على ظهره السماء..إلى أي ذلك العظيم الذي لا تكرر الحياة..و لا يسد غيابة احد.

إلى ذلك الشخص الذي اختارته لي الأقدار.. زوجي، لك مني أسمى عبارات الاحترام و العرفان.. على دعمك لي في الكبيرة و الصغيرة..

إلى سندي و رفعتي في الحياة، إخوتي: ضياء الدين ، حمزة، و مصعب.

إلى كل فرد من أفراد عائلتي كل واحد باسمه الخاص بدون إستثناء.

إليكن يامن جمعني بكم أجمل الأوقات : هاجر.. ليندة.. مريم..نجوى..رميسة..شياء..صارة و جهينة.

لكم يا من ترقدون تحت التراب، لأرواحكم الطاهرة الزكية..أسكنكم الله فسيح جنانه.

للوطن الغالي..دمت لنا سالما منعا و غانما مكرما.

وطبعا إلى كل من أحبطني..وإستمت كي لا أكون..و وضع كل العراقيل في دري لأتعثر بها..شكرا لقد ولدتم في نفسي حب المزيد..

و الشكر و التقدير لكل من ساندني و كان بجانبني في كل الأوقات..

# Remerciement

## Remerciement

Louange à " **ALLAH** " qui nous a donné la patience, la santé et le courage pour terminer  
ce modeste travail.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon encadreur

" **Moummi Abdelhafid** " pour les précieux conseils qui a bien voulu me fournir afin

De réaliser ce travail, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout

au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps

qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Ainsi que Dr : " **Chouchane Nacer** " pour leur valeureux conseils et sa direction de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements aux ingénieurs et techniciens

du Hall technologique, de Génie Mécanique, de la Faculté des Sciences et de la

Technologie de l'université de Biskra, pour leur aide à achever

la partie expérimentale.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont bien voulu accepter de valoriser

ce travail, aussi je remercie tous les enseignants de génie mécanique pour leur formation qu'ils m'ont

assurée au long de mes études universitaires.

De plus, je remercie également la bibliothèque de « El djalisse » pour leur aide

tout au long des cinq années d'études...



*D. Chaïma*

## Sommaire :

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| Dédicace.....              | I   |
| Remerciements.....         | II  |
| Sommaire.....              | III |
| Liste des figures.....     | V   |
| Liste des tableaux.....    | VII |
| Nomenclature.....          | X   |
| Introduction générale..... | 1   |

## Chapitre-I- Etude Théorique :

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 3  |
| I. Généralités sur les écoulements dans les conduites.....  | 3  |
| I.1. Les régimes d'écoulements.....   | 3  |
| I.1.1. Nombre de Reynolds.....  | 3  |
| I.1.2. Régime de Stokes.....  | 4  |
| I.1.3. Le régime laminaire.....   | 4  |
| I.1.4. Le régime turbulent.....   | 5  |
| I.2. Les Pertes de charge (pertes d'énergie).....   | 5  |
| I.2.1. Définition.....  | 5  |
| I.2.2. Evaluation des pertes de charge.....   | 6  |
| I.2.2.1. Théorème de Bernoulli (écoulement avec des pertes de charge).....                        | 6  |
| I.3. Les différents types des pertes de charge.....   | 8  |
| I.3.1. Les pertes de charge singulière.....   | 8  |
| I.3.2. Les pertes de charge linéaires.....  | 13 |
| I.3.2.1. Coefficient de Friction Pour écoulements Laminaire et turbulent.....                     | 14 |
| I.3.2.2. Détermination du coefficient de frottement.....  | 14 |
| a- Ecoulement laminaire.....  | 14 |
| b- Ecoulement turbulent.....  | 15 |
| I.4. Quelques travaux réalisés sur les pertes de charge dans les conduites<br>rectangulaires..... | 15 |
| Conclusion.....   | 18 |

## **Chapitre-II- Étude Expérimentale :**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 20 |
| II.1. Description du dispositif expérimental.....                                 | 20 |
| II.2. Types des configurations des chicanes étudiées.....                         | 23 |
| II.2.1 Chicanes alignées en quinconce.....  | 23 |
| II.2.1.1. Tableaux des mesures des pertes de charge.....                          | 24 |
| II.2.2. Représentations graphiques des pertes de charge en fonction de débit..... | 30 |
| II.3. Interprétation et discussions.....  | 34 |
| Conclusion.....   | 35 |

## **Chapitre-III : Modélisation des pertes de charge :**

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 37 |
| III-1- Méthode de calcul.....                                   | 37 |
| III-2- Expression des pertes de charge en régime laminaire..... | 39 |
| III-2- Expression des pertes de charge en régime turbulent..... | 42 |
| Conclusion.....   | 45 |
| Conclusion général.....   | 46 |
| Références bibliographiques.....                                | 47 |

# Liste des figures

---

## Liste des figures :

### Chapitre I :

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure I.1 :</b> Fluide s'écoulant à petite vitesse (régime laminaire) les lignes de courant sont de trajectoires parallèles..... | 4  |
| <b>Figure I.2 :</b> Fluide s'écoulant à grande vitesse : écoulement turbulent.....   | 5  |
| <b>Figure I.3 :</b> Représentation d'un écoulement dans un tube de courant.....  | 6  |
| <b>Figure I.4 :</b> Représentation graphique du théorème de Bernoulli (Ligne piézométrique).....                                     | 7  |
| <b>Figure I.5 :</b> Les configurations étudiées par : N. CHOUCANE, A.MOUMMI, B.ACHOUR et N.MOUMMI.....                               | 16 |
| <b>Figure I.6 :</b> Disposition en rangée et en quinconce des chicanes.....  | 16 |
| <b>Figure I.7 :</b> Configurations de chicanes rectangulo-trapézoïdale disposées en rangées et en quinconces.....                    | 17 |

### Chapitre II :

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.1 :</b> Dispositif expérimental réalisé.....  | 21 |
| <b>Figure II.2 :</b> Variateur de vitesse.....   | 21 |
| <b>Figure II.3 :</b> Aspirateur.....   | 21 |
| <b>Figure II.4 :</b> Capteur différentiel de pression.....   | 22 |
| <b>Figure II.5 :</b> Anémomètre a hélice.....  | 22 |
| <b>Figure II.6 :</b> rugosité artificielle rectangulaire.....  | 22 |
| <b>Figure II.7 :</b> pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 3 \text{ cm} ; \beta = 90^\circ\}$ .....  | 30 |
| <b>Figure II.8 :</b> pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 3 \text{ cm} ; \beta = 60^\circ\}$ .....  | 30 |
| <b>Figure II.9 :</b> pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 2 \text{ cm} ; \beta = 90^\circ\}$ .....  | 31 |
| <b>Figure II.10 :</b> pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 2 \text{ cm} ; \beta = 60^\circ\}$ ..... | 31 |

# Liste des figures

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.11</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 3 \text{ cm} ; \beta = 30^\circ\}$ ..... | 31 |
| <b>Figure II.12</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 2 \text{ cm} ; \beta = 30^\circ\}$ ..... | 31 |
| <b>Figure II.13</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 2.5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 90^\circ\}$ .....                | 32 |
| <b>Figure II.14</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 2.5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 60^\circ\}$ .....                | 32 |
| <b>Figure II.15</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 2.5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 30^\circ\}$ .....                | 32 |
| <b>Figure II.16</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 90^\circ\}$ .....                  | 32 |
| <b>Figure II.17</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 60^\circ\}$ .....                  | 33 |
| <b>Figure II.18</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 30^\circ\}$ .....                  | 33 |
| <b>Figure II.19</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 10 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 90^\circ\}$ .....                 | 33 |
| <b>Figure II. 20</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 10 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 60^\circ\}$ .....                | 33 |
| <b>Figure II.21</b> : pertes de charge en fonction du débit $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 10 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 30^\circ\}$ .....                 | 34 |

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux :

### Chapitre I :

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau I-1 :</b> Valeurs indicatives des coefficients pertes de charge singulières dans les entrées et sorties des conduites cylindriques.....            | 9  |
| <b>Tableau I-2 :</b> valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les coudes des conduites cylindriques.....                    | 10 |
| <b>Tableau I-3 :</b> Valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les dérivations et jonctions des conduites cylindriques.....  | 11 |
| <b>Tableau I-4 :</b> Valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les Dérivations et jonctions des conduites cylindriques.....  | 12 |
| <b>Tableau I-5 :</b> Valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les Dérivations et jonctions des conduites rectangulaire..... | 13 |

### Chapitre II :

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau II-1 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 2,5 cm, inclinaison = 90 °)..... | 24 |
| <b>Tableau II-2 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 2,5 cm, inclinaison = 60 °)..... | 24 |
| <b>Tableau II-3 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 2,5 cm, inclinaison = 30 °)..... | 24 |
| <b>Tableau II-4 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 90 °).....   | 25 |

# Liste des tableaux

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau II-5 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = $60^\circ$ ).....    | 25 |
| <b>Tableau II-6 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = $30^\circ$ ).....    | 25 |
| <b>Tableau II-7 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = $90^\circ$ ).....   | 26 |
| <b>Tableau II-8 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = $60^\circ$ ).....   | 26 |
| <b>Tableau II-9 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = $30^\circ$ ).....   | 26 |
| <b>Tableau II-10 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit lisse.....   | 27 |
| <b>Tableau II-11 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 2.5 cm, inclinaison = $90^\circ$ )..... | 27 |
| <b>Tableau II-12 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 2.5 cm, inclinaison = $60^\circ$ )..... | 27 |
| <b>Tableau II-13 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 2.5 cm, inclinaison = $30^\circ$ )..... | 28 |
| <b>Tableau II-14 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = $90^\circ$ ).....   | 28 |

# Liste des tableaux

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau II-15 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = $60^\circ$ ).....  | 28 |
| <b>Tableau II-16 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = $30^\circ$ ).....  | 29 |
| <b>Tableau II-17 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = $90^\circ$ )..... | 29 |
| <b>Tableau II-18 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = $60^\circ$ )..... | 29 |
| <b>Tableau II-19 :</b> pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane $L= 06$ cm, hauteur $h = 02$ cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = $30^\circ$ )..... | 30 |

# Nomenclature

---

## Nomenclature :

### Alphabet latin :

$c_f$  : Coefficient de frottement.

$D$  : Diamètre d'un canal en [m].

$D_H$  : Diamètre hydraulique en [m].

$D_{eq}$  : Diamètre équivalent en [m].

$g$  : Accélération de la pesanteur [ $m/s^2$ ].

$P$  : Pression en [pascal].

$\Delta P$  : Pertes de charge par frottement en [pascal].

$\Delta P_t$  : Pertes de charge singulières en [pascal].

$\Delta P_{totale}$  : Pertes de charge totale en [pascal].

$t$  : Temps [second].

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

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

$Q_V$  : Débit volumique en [ $m^3/s$ ].

$Q_m$  : Débit massique en [kg/s].

$P$  : Périmètre mouillé en [m].

$P_{e-ch}$  : Pas entre les chicanes en [m].

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

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

$S$  : Surface offerte devant le passage du fluide en [ $m^2$ ].

$d_\tau$  : Force élémentaire de frottement visqueux en [N].

$E_{mec}$  : Energie mécanique en [Joule].

$E_{pot}$  : Energie potentielle en [Joule].

$E_{cin}$  : Energie cinétique en [Joule].

# Nomenclature

---

$R_e$  : Nombre de Reynolds.

$J_{12}$  : Perte d'énergie entre les points (1) et (2) en [joule/kg].

$\pi$  : Indique un produit.

## Alphabet grec :

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

$\mu$  : Viscosité dynamique en [ $\text{kg}/\text{ms}$ ].

$\varepsilon$  : Rugosité absolue en [m].

$\nu$  : Coefficient de viscosité cinématique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

$\varepsilon_r$  : Rugosité relative en [m].

$\lambda$  : Coefficient de frottement.

$\beta$  : Inclinaison de chicane en [degré].

# Introduction générale

---

## Introduction :

La conception des échangeurs de chaleur repose sur plusieurs techniques afin d'améliorer le processus de transfert de chaleur, notamment vis-à-vis des surfaces d'échanges et le fluide caloporteur, parmi elles consistent essentiellement à augmenter les surfaces d'échanges d'une part et l'intensification de la turbulence au sein de l'écoulement de l'autre part ; Ceci est assuré par la création des surfaces rugueuses artificielles de forme diverses.

Plusieurs travaux ont été menés dans ce sens, qui ont porté intérêt sur le mode de disposition, le type et la forme de ces rugosités artificielles, dont le but est d'intensifier les échanges thermiques lors de la circulation du fluide caloporteur.

Le but de ce travail est de mettre en évidence les différents paramètres géométriques relatifs aux chicanes et leur impact sur le comportement aérodynamique. Ceci étant réalisé par évaluation des pertes de charges pour différents modes de dispositions, de formes et de types de rugosités artificielles dites « chicanes ».

En définitive une corrélation empirique reliant les pertes de charge aux différents paramètres géométriques caractéristiques, aux rugosités artificielles et aux régimes d'écoulements est mise en œuvre, valable pour ce type des chicanes mais qui très peut différente aux autres modèles.

Cette étude théorique et expérimentale comporte trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les pertes de charges linéaires et singulières et un aperçu sur quelques travaux réalisés sur les pertes de charge dans les conduits conduites rectangulaires.

Le second chapitre est dédié à l'étude expérimentale, comporte une description sur le banc expérimental et l'ensemble des mesures qui ont été effectuées sur le modèle de chicane rectangulaire pour un seul mode de disposition en quinconce.

Le troisième chapitre est consacré à l'établissement par la méthode de l'analyse dimensionnelle d'une expression semi-empirique des pertes de charge dans les conditions sans rugosités et avec rugosités de formes rectangulaires disposées en quinconce.

Enfin une conclusion générale qui rappelle l'objectif du travail réalisé et les résultats obtenus.

# **Chapitre I :**

## ***Etude bibliographique***

**Introduction :**

Ce premier chapitre est consacré en premier lieu à des généralités sur les écoulements dans les conduites et en second lieu à une recherche bibliographique sur quelques études et travaux menées par des chercheurs qui se sont intéressés à l'effet de la forme et de la géométrie de disposition des rugosités artificielles sur les pertes de charge dans les échangeurs et conduits rectangulaires pour différents régime d'écoulement. Dont l'objectif est de mettre en évidence des corrélations empiriques du coefficient de frottement en fonction des paramètres géométriques du conduit et des rugosités artificielles et des paramètres thermo-physiques du fluide en écoulement.

**I. Généralités sur les écoulements dans les conduites****I.1. Les régimes d'écoulements :****I.1.1. Nombre de Reynolds :**

Le nombre de Reynolds  $Re$  est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour la première fois et mis en ouvre en 1883 par Osborne Reynolds [1]. Ce nombre caractérise la nature de l'écoulement dit aussi régime d'écoulement qu'il soit laminaire, transitoire ou turbulent. Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inerties et les forces visqueuses. On le définit par le suivant [1].

$$Re = \frac{v.Dh}{\nu} = \frac{\rho.v.Dh}{\mu} ; \quad (I-1)$$

Tel que :  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

Avec :

- $Re$  : Nombre de Reynolds.
- $V$  : Vitesse moyenne du fluide en écoulement [ $m/s$ ].
- $D_h$  : Diamètre hydraulique intérieur du tube ou conduit [ $m$ ].
- $\nu$  : Viscosité cinématique du fluide [ $m^2/s$ ].
- $\mu$  : Viscosité dynamique du fluide [ $Pa.s$ ] = [ $kg/ms$ ].
- $\rho$  : Masse volumique du fluide [ $kg/m^3$ ].

**Remarque :**

Si la section n'est pas circulaire, on définit le diamètre hydraulique équivalent  $Dh$  donnée par la relation :

$$Dh = \frac{[4 \times \text{la section de la conduite}]}{[\text{le périmètre mouillé par fluide}]}$$

Il existe plusieurs régimes d'écoulement présentant entre eux des différences. Depuis longtemps les hydrauliciens ont constaté l'existence de ces différences, mais c'est à Osborne Reynolds qu'il appartenait de les mettre expérimentalement en évidence et d'élaborer le critère permettant de distinguer entre les différents régimes.

En fonction des nombres de Reynolds croissants on distingue quatre régimes principaux, régime de Stokes, régime laminaire, régime transitoire et régime turbulent.

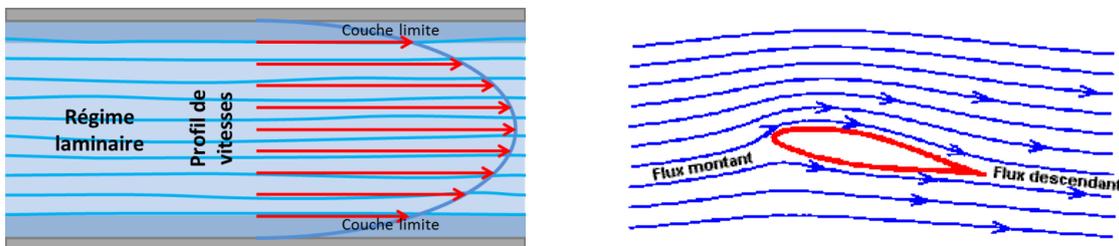
**I.1.2. Régime de Stokes :**

L'écoulement de Stokes correspond aux très faibles valeurs du Reynolds (inférieures à 1), dans ce cas les forces d'inertie liées aux vitesses étant négligeables, les forces visqueuses et les forces de pression s'équilibrent, qui correspond au domaine d'écoulement dit microfluidique [2].

**I.1.3. Le régime laminaire :**

Ce type d'écoulement est lié aux tubes capillaires, étudié autrefois par le physicien Allemand Hagen et le médecin Français Poiseuille (1840) appelé aussi « Régime de Navier » ou régime de Poiseuille.

Dans les régimes laminaires, les écoulements sont caractérisés par des lignes de courant confondues avec des trajectoires parallèles les unes aux autres. Les particules suivent des trajectoires régulières, dans l'écoulement laminaire les couches de fluides glissent les unes par rapport aux autres sans qu'il ait passage des particules fluides d'une couche à une autre [3].



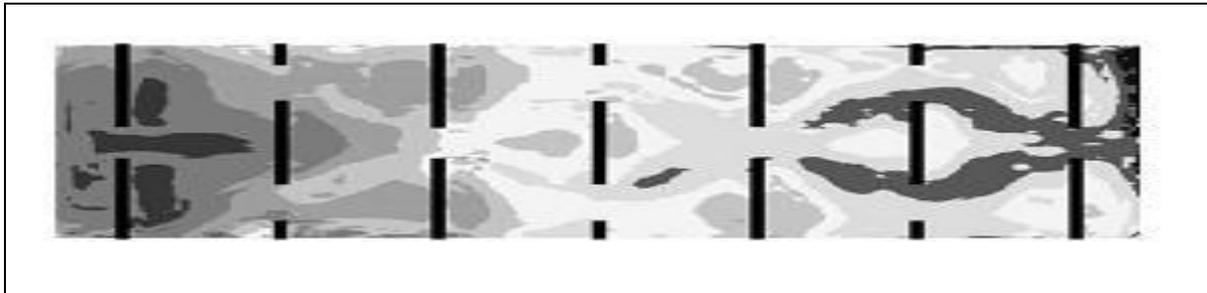
**Figure I-1 :** Fluide s'écoulant à petite vitesse (régime laminaire) les lignes de courant sont de trajectoires parallèles [3].

**I.1.4. Le régime turbulent :**

Appelé aussi régime de Venturi ou régime hydraulique ou régime tumultueux, Les deux dernières désignations sont impropres, couramment on adopté le terme turbulent.

Un régime est turbulent lorsque certaines de ces grandeurs caractéristiques comme la pression la vitesse présentent des variations rapides et aléatoires. Les particules fluides ne se déplacent plus sur des lignes de courant régulières, dans ce cas les particules ont des trajectoires compliquées et désordonnées. En régime d'écoulement tourbillonnaire, la vitesse varie en amplitude et en direction à la fois dans l'espace et dans le temps [4].

Les travaux de Reynolds ont montré que le régime est turbulent, lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 3000 ( $Re \geq 3000$ ). Pour des valeurs de Reynolds comprises entre 2300 et 3000, on dit que l'écoulement est transitoire ou turbulent lisse.



**Figure I-2 :** Fluide s'écoulant à grande vitesse : écoulement turbulent [4].

**I.2. Les Pertes de charge (pertes d'énergie) :****I.2.1. Définition :**

En hydraulique, la perte de charge correspond à l'énergie dissipée par frottement du liquide durant son déplacement. Cette énergie doit être compensée afin de permettre au liquide de se déplacer d'une section à une autre. On l'exprime couramment sous la forme d'une différence de pression, qui représente une dissipation d'énergie qui apparait dans l'équation de Bernoulli comme une hauteur de colonne d'eau.

Les pertes de charge se manifestent lors du mouvement d'un liquide ou d'un gaz réel se traduisant par une transformation irréversible de l'énergie mécanique en chaleur. Cette transformation est due à la viscosité moléculaire et turbulente du fluide en mouvement.

I.2.2. Evaluation des pertes de charge :

I.2.2.1. Théorème de Bernoulli (écoulement avec des pertes de charge) :

Considérons un écoulement entre deux points (1) et (2) d'un fluide réel dans une conduite, tel qu'entre les points (1) et (2) sans machine hydraulique. Supposant que le fluide est réel, incompressible et l'écoulement est permanent, avec existence de forces élémentaires de frottement visqueux  $d\tau$  qui contribue dans l'équation de bilan par un travail négatif et donne naissance à des pertes de charge.

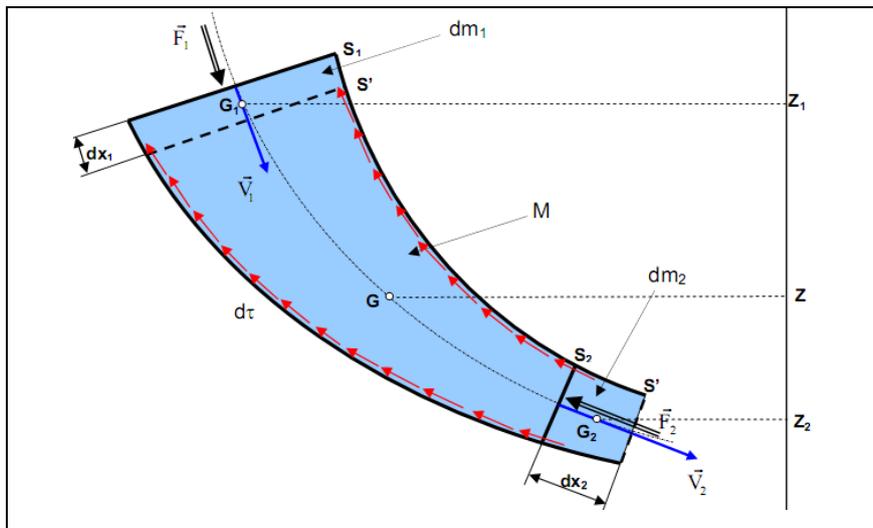


Figure-I-3 : Représentation d'un écoulement dans un tube de courant.

On considère un axe  $\check{Z}$  vertical vert le haut, avec  $Z_1, Z_2, Z$  respectivement les altitudes des centres de gravité des masses  $dm_1, dm_2$  et  $M$ .

On désigne par  $F_1$  et  $F_2$  respectivement les normes des forces de pression du fluide agissant au niveau des sections  $S_1$  et  $S_2$ . A l'instant  $t$  le fluide de masse  $(m_1 + dM)$  est compris entre  $S_1$  et  $S_2$ , son énergie mécanique est :

$$E_{mec} = E_{pot} + E_{cin} = (dm_1 \cdot g \cdot Z_1 + M g Z) + \frac{1}{2} dm_1 V_1^2 + \int_{S_2}^{S_1} \left( \frac{dm v^2}{2} \right). \quad (I-2)$$

A l'instant  $t' = (t + dt)$  de fluide de masse  $(M + dm_2)$  est compris entre  $s'_1$  et  $s'_2$ , son énergie mécanique est :

$$E'_{mec} = E'_{pot} + E'_{cin} = (dm_2 \cdot g \cdot Z_2 + M g Z) + \frac{1}{2} dm_2 V_2^2 + \int_{S_2}^{S_1} \left( \frac{dm v^2}{2} \right). \quad (I-3)$$

L'application du théorème de l'énergie mécanique au fluide entre  $t$  et  $t+dt$ , et en considérant cette fois ci le travail des forces de frottement visqueux  $d\tau$ .

$$E'_{mec} - E_{mec} = W_{forces\ de\ pression} + \sum W d\tau = F_1 dx_1 - F_2 dx_2 + \sum W d\tau \quad (I-4)$$

$$E'_{mec} - E_{mec} = p_1 s_1 dx_1 - p_2 s_2 dx_2 + \sum W d\tau = F_1 dV_1 - F_2 dV_2 + \sum W d\tau \quad (I-5)$$

Après simplification on obtient :

$$dm_2 \cdot g \cdot z_2 + \frac{1}{2} dm_1 V_2^2 \cdot g \cdot z_1 - \frac{1}{2} dm_2 V_1^2 \cdot g \cdot z_1 = \left[ \frac{p_1}{\rho_1} \cdot dm_1 - \frac{p_2}{\rho_2} \cdot dm_2 + \sum W d\tau \right] \quad (I-6)$$

Par conservation de la masse :  $dm_1 = dm_2 = dm$ , d'autre part, puisque le fluide est incompressible :  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , on aboutie à l'équation de Bernoulli :

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) = \frac{\sum W_{d\tau}}{dm} \quad (I-7)$$

On définit la perte de charge entre les points (1) et (2) par :  $J_{12} = \frac{\sum W d\tau}{dm}$  qui est la perte d'énergie par frottement visqueux par unité de masse en écoulement de (1) à (2) :

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) = J_{12} \quad (I-8)$$

Récrite sous une forme plus homogène, en divisant par g la relation (I-8) on obtient :

$$\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho} + z_2 = \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho} + z_2 + \frac{J_{12}}{g} \quad (I-9)$$

Elle peut être interprétée graphiquement de la manière suivante :

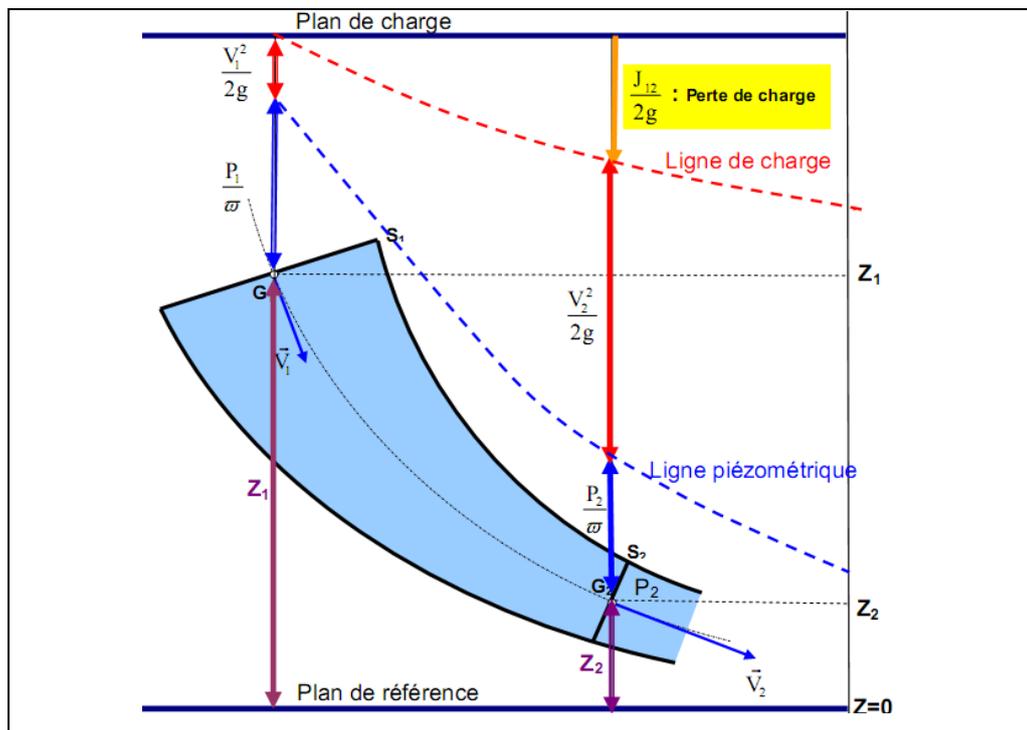


Figure I-4 : Représentation graphique du théorème de Bernoulli (Ligne piézométrique).

La perte de charge totale exprimée en hauteur de liquide depuis le début de l'écoulement, est égale à la distance entre la ligne de charge et le plan de charge, mesurée sur

la verticale passant par le point  $G_1$ . La perte de charge entre deux points  $G_1$  et  $G_2$  de l'écoulement est donnée par les points précédents [5].

La perte de charge  $j_{12}$  peut être due à une perte de charge linéaire et une perte de charge singulière :

$$J_{12} = J_s + J_L \quad (\text{I-10})$$

### **I.3. Les différents types des pertes de charge :**

On distingue deux aspects des pertes de charge :

- Les pertes de charge par frottement (régulières, continues, unitaires, linéique,...).
- Les pertes de charges singulières.

#### **I.3.1. Les pertes de charge singulière:**

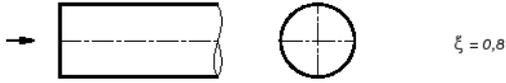
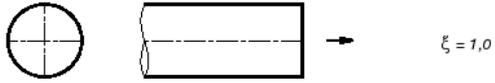
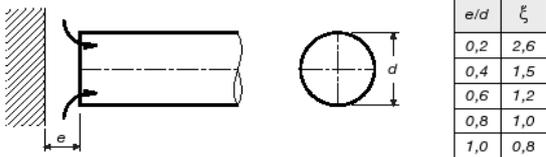
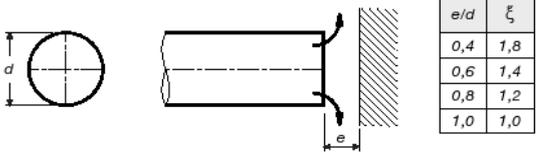
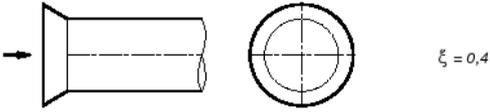
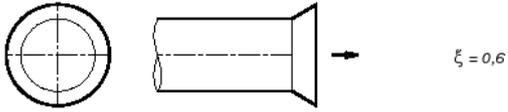
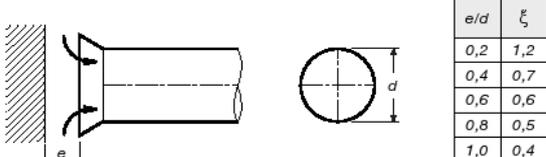
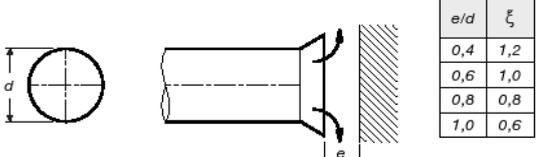
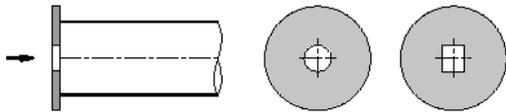
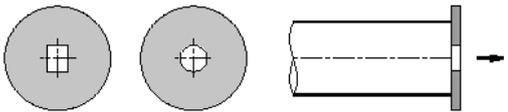
La perte de charge singulière, localisée dans une section de la conduite, est provoquée par un changement de direction et d'intensité de la vitesse. L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme. La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent. Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par :

- Un branchement de section de la conduite (élargissement ou rétrécissement brusque dans une conduite).
- Un changement de direction (coude).
- Un branchement ou raccordement.
- Un dispositif de mesure et contrôle de débit...

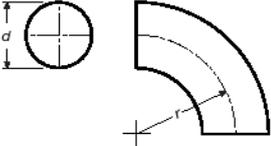
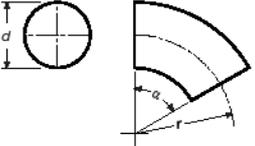
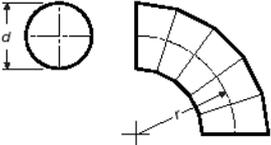
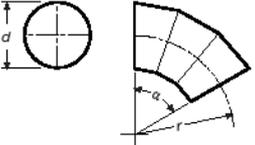
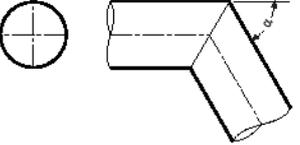
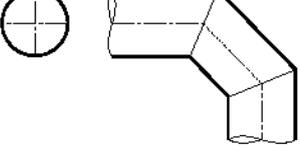
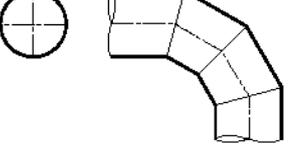
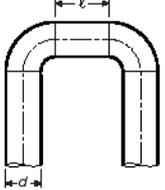
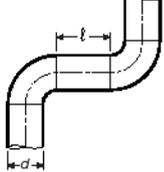
Comme pour les pertes de charge linéaire, les pertes de charge singulières se traduisent par la relation :

$$\Delta P = K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{I-11})$$

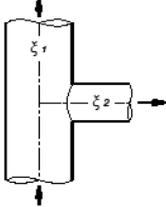
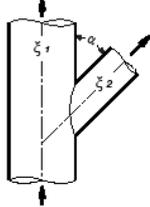
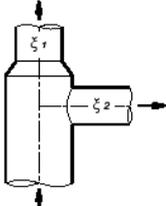
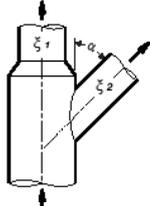
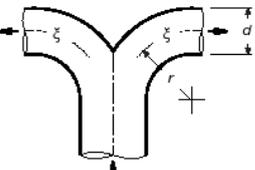
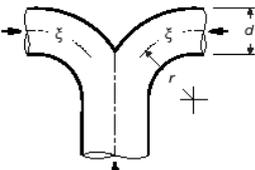
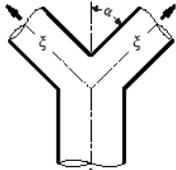
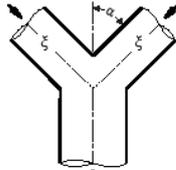
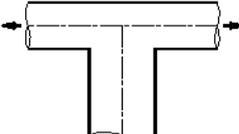
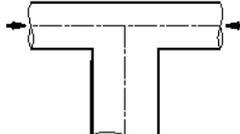
$K$  : étant un coefficient des pertes de charge singulière qui dépend des caractéristiques géométriques et du nombre de Reynolds. [6]. La valeur de  $K$  est donnée pour les différents cas les plus classiques dans les tableaux suivants :

| <p style="text-align: center;"><i>Entrée sans amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 0,8</math></p>   | <p style="text-align: center;"><i>Sortie sans amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 1,0</math></p> |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
|---|--|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|--|-------|-------|-----|--|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée sans amorce avec obstacle frontal</i></p>  <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th><math>e/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,2</td><td>2,6</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>1,5</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,8</td></tr> </tbody> </table>   | $e/d$  | $\xi$ | 0,2 | 2,6 | 0,4 | 1,5 | 0,6 | 1,2 | 0,8   | 1,0 | 1,0 | 0,8 | <p style="text-align: center;"><i>Sortie sans amorce avec obstacle frontal</i></p>  <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th><math>e/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,4</td><td>1,8</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>1,0</td></tr> </tbody> </table> | $e/d$ | $\xi$ | 0,4 | 1,8  | 0,6     | 1,4 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 1,0 |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d$   | $\xi$  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,2   | 2,6  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4   | 1,5  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6   | 1,2  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8   | 1,0  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0   | 0,8  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d$   | $\xi$  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4   | 1,8  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6   | 1,4  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8   | 1,2  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0   | 1,0  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée avec amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 0,4</math></p>   | <p style="text-align: center;"><i>Sortie avec amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 0,6</math></p> |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée avec amorce et obstacle frontal</i></p>  <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th><math>e/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,2</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>0,7</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>0,6</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>0,5</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,4</td></tr> </tbody> </table>   | $e/d$  | $\xi$ | 0,2 | 1,2 | 0,4 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,8   | 0,5 | 1,0 | 0,4 | <p style="text-align: center;"><i>Sortie avec amorce et obstacle frontal</i></p>  <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th><math>e/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,4</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,6</td></tr> </tbody> </table> | $e/d$ | $\xi$ | 0,4 | 1,2  | 0,6     | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,6 |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d$   | $\xi$  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,2   | 1,2  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4   | 0,7  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6   | 0,6  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8   | 0,5  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0   | 0,4  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d$   | $\xi$  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4   | 1,2  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6   | 1,0  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8   | 0,8  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0   | 0,6  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée avec diaphragme</i></p>  <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th><math>A^*/A</math></th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> <th>0,7</th> <th>0,8</th> <th>0,9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\xi</math></td> <td>24</td> <td>11</td> <td>6,2</td> <td>3,0</td> <td>2,2</td> <td>1,4</td> <td>1,2</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>A = section interieure conduite<br/>A* = aire passage diaphragme</small></p> | $A^*/A$  | 0,3   | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | $\xi$ | 24  | 11  | 6,2 | 3,0  | 2,2   | 1,4   | 1,2 | <p style="text-align: center;"><i>Sortie avec diaphragme</i></p>  <table border="1" style="float: right;"> <thead> <tr> <th><math>A^*/A</math></th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> <th>0,7</th> <th>0,8</th> <th>0,9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\xi</math></td> <td>28</td> <td>13</td> <td>7,8</td> <td>3,6</td> <td>2,6</td> <td>1,7</td> <td>1,4</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>A = section interieure conduite<br/>A* = aire passage diaphragme</small></p> | $A^*/A$ | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | $\xi$ | 28 | 13 | 7,8 | 3,6 | 2,6 | 1,7 | 1,4 |
| $A^*/A$   | 0,3  | 0,4   | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $\xi$   | 24   | 11    | 6,2 | 3,0 | 2,2 | 1,4 | 1,2 |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $A^*/A$   | 0,3  | 0,4   | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $\xi$   | 28   | 13    | 7,8 | 3,6 | 2,6 | 1,7 | 1,4 |     |       |     |     |     |  |       |       |     |  |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |

**Tableau I-1 :** Valeurs indicatives des coefficients pertes de charge singulières dans les entrées et sorties des conduites cylindriques [7].

| <p><b>Coude à 90°</b></p>  <table border="1" data-bbox="691 264 786 439"> <thead> <tr> <th><math>r/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table>          | $r/d$  | $\xi$               | 0,50                | 0,9 | 0,75                | 0,5                 | 1,00                | 0,4 | 1,50  | 0,3   | 2,00  | 0,2 | <p><b>Coude à 30°, 45° et 60°</b></p>  <table border="1" data-bbox="1182 264 1406 439"> <thead> <tr> <th rowspan="2"><math>r/d</math></th> <th colspan="3"><math>\xi</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>0,3</td> <td>0,5</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table>          | $r/d$ | $\xi$ |     |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,50 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,75 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 1,00 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 1,50 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 2,00 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
|---|--|---------------------|---------------------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|-----|---|-------|-------|-----|---|-------|-------|-----|-----|---------------------|---------------------|---------------------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| $r/d$   | $\xi$  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,50  | 0,9  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,75  | 0,5  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,00  | 0,4  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,50  | 0,3  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 2,00  | 0,2  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| $r/d$   | $\xi$  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
|   | $\alpha = 30^\circ$  | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,50  | 0,3  | 0,5                 | 0,7                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,75  | 0,2  | 0,3                 | 0,3                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,00  | 0,1  | 0,2                 | 0,3                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,50  | 0,1  | 0,2                 | 0,2                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 2,00  | 0,1  | 0,1                 | 0,1                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| <p><b>Coude 90° à secteurs</b></p>  <table border="1" data-bbox="691 504 786 678"> <thead> <tr> <th><math>r/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>1,1</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table> | $r/d$  | $\xi$               | 0,50                | 1,1 | 0,75                | 0,6                 | 1,00                | 0,4 | 1,50  | 0,3   | 2,00  | 0,2 | <p><b>Coude 30°, 45° et 60° à secteurs</b></p>  <table border="1" data-bbox="1182 504 1406 678"> <thead> <tr> <th rowspan="2"><math>r/d</math></th> <th colspan="3"><math>\xi</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>0,4</td> <td>0,6</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,1</td> <td>0,2</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> | $r/d$ | $\xi$ |     |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,50 | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,75 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 1,00 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 1,50 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 2,00 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| $r/d$   | $\xi$  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,50  | 1,1  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,75  | 0,6  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,00  | 0,4  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,50  | 0,3  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 2,00  | 0,2  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| $r/d$   | $\xi$  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
|   | $\alpha = 30^\circ$  | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,50  | 0,4  | 0,6                 | 0,7                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,75  | 0,2  | 0,3                 | 0,4                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,00  | 0,1  | 0,2                 | 0,3                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1,50  | 0,1  | 0,2                 | 0,2                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 2,00  | 0,1  | 0,1                 | 0,1                 |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| <p><b>Coude 90° à angle vif</b></p>  <p><math>\xi = 1,4</math></p>   | <p><b>Coude 30°, 45° et 60° à angle vif</b></p>  <table border="1" data-bbox="1238 779 1406 857"> <thead> <tr> <th colspan="3"><math>\xi</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,4</td> <td>0,7</td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table> | $\xi$               |                     |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,4 | 0,7   | 1,0   |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| $\xi$   |  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| $\alpha = 30^\circ$   | $\alpha = 45^\circ$  | $\alpha = 60^\circ$ |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 0,4   | 0,7  | 1,0                 |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| <p><b>Coude 90° à un segment</b></p>  <p><math>\xi = 1,3</math></p>   | <p><b>Coude 90° à deux segments</b></p>  <p><math>\xi = 1,2</math></p>  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| <p><b>Double coude</b></p>  <table border="1" data-bbox="691 1238 786 1361"> <thead> <tr> <th><math>l/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 1</td> <td>4,0</td> </tr> <tr> <td>1 = 2</td> <td>3,0</td> </tr> <tr> <td>&gt; 2</td> <td>2,0</td> </tr> </tbody> </table>  | $l/d$  | $\xi$               | < 1                 | 4,0 | 1 = 2               | 3,0                 | > 2                 | 2,0 | <p><b>Double coude inversé</b></p>  <table border="1" data-bbox="1294 1238 1390 1361"> <thead> <tr> <th><math>l/d</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 1</td> <td>3,5</td> </tr> <tr> <td>1 = 2</td> <td>2,7</td> </tr> <tr> <td>&gt; 2</td> <td>2,0</td> </tr> </tbody> </table> | $l/d$ | $\xi$ | < 1 | 3,5   | 1 = 2 | 2,7   | > 2 | 2,0 |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| $l/d$   | $\xi$  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| < 1   | 4,0  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1 = 2   | 3,0  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| > 2   | 2,0  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| $l/d$   | $\xi$  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| < 1   | 3,5  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| 1 = 2   | 2,7  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |
| > 2   | 2,0  |                     |                     |     |                     |                     |                     |     |   |       |       |     |   |       |       |     |     |                     |                     |                     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |

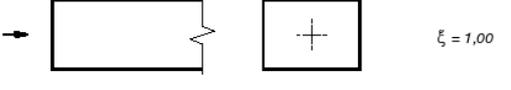
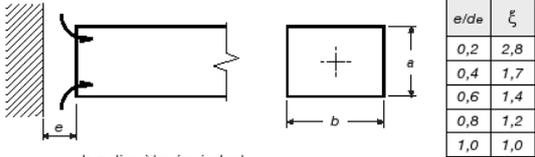
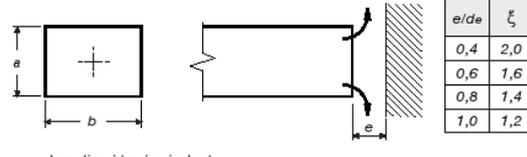
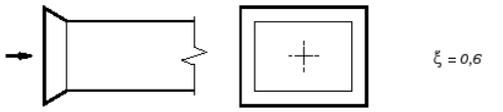
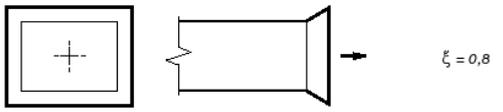
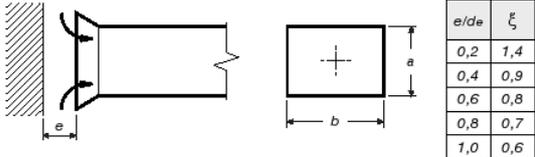
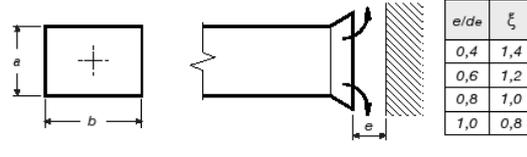
**Tableau I-2 :** valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les coudes des conduites cylindriques [7].

|  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation à 90°</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\xi_1 = 0,2 \quad \xi_2 = 1,3</math></p>   |  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation à 30°, 45° et 60°</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\xi_1 = 0,2</math></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="3"><math>\xi_2</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,4</td> <td>0,7</td> <td>0,9</td> </tr> </tbody> </table>              | $\xi_2$             |      |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,4 | 0,7   | 0,9      |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|--|---|---------------------|------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|-----|---|----------|-------|-----|---|-----|-------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| $\xi_2$  |   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha = 30^\circ$  | $\alpha = 45^\circ$   | $\alpha = 60^\circ$ |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,4  | 0,7   | 0,9                 |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation à 90° avec réduction</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\xi_1 = 0,4 \quad \xi_2 = 1,3</math></p>  |  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation 30°, 45° et 60° avec réduction</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\xi_1 = 0,4</math></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="3"><math>\xi_2</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,4</td> <td>0,7</td> <td>0,9</td> </tr> </tbody> </table> | $\xi_2$             |      |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,4 | 0,7   | 0,9      |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\xi_2$  |   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha = 30^\circ$  | $\alpha = 45^\circ$   | $\alpha = 60^\circ$ |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,4  | 0,7   | 0,9                 |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation à double coude</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>r/d</th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table> | r/d   | $\xi$               | 0,50 | 1,2 | 0,75                | 0,6                 | 1,00                | 0,4 | 1,50  | 0,3      | 2,00  | 0,2 |  <p style="text-align: center;"><b>Jonction à double coude</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>r/d</th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>1,1</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table> | r/d | $\xi$ | 0,50 | 1,1 | 0,75 | 0,5 | 1,00 | 0,3 | 1,50 | 0,2 | 2,00 | 0,2 |
| r/d  | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,50   | 1,2   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,75   | 0,6   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,00   | 0,4   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,50   | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 2,00   | 0,2   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| r/d  | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,50   | 1,1   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,75   | 0,5   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,00   | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,50   | 0,2   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 2,00   | 0,2   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation en Y</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th><math>\alpha</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30°</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>45°</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>60°</td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table>   | $\alpha$  | $\xi$               | 30°  | 0,3 | 45°                 | 0,7                 | 60°                 | 1,0 |  <p style="text-align: center;"><b>Jonction en Y</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th><math>\alpha</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30°</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>45°</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>60°</td> <td>0,9</td> </tr> </tbody> </table> | $\alpha$ | $\xi$ | 30° | 0,3   | 45° | 0,6   | 60°  | 0,9 |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha$   | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 30°  | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 45°  | 0,7   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 60°  | 1,0   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha$   | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 30°  | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 45°  | 0,6   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 60°  | 0,9   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|  <p style="text-align: center;"><b>Dérivation en T</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\xi_1 = 1,4</math></p>  |  <p style="text-align: center;"><b>Jonction en T</b></p> <p style="text-align: center;"><math>\xi_1 = 1,3</math></p>  |                     |      |     |                     |                     |                     |     |   |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |

**Tableau : I-3 :** Valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les dérivations et jonctions des conduites cylindriques [7].

| <p><b>Dérivation à 90°</b></p> <p><math>\xi_1 = 0,2</math><br/><math>\xi_2 = 1,3</math></p> <p><math>\xi_1 = 0,2</math><br/><math>\xi_2 = 0,5</math></p>  | <p><b>Dérivation à 30°, 45° et 60°</b></p> <p><math>\xi_1 = 0,2</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3"><math>\xi_2</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,4</td> <td>0,7</td> <td>0,9</td> </tr> </tbody> </table>                | $\xi_2$             |      |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,4 | 0,7  | 0,9      |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
|---|---|---------------------|------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|-----|--|----------|-------|-----|---|-----|-------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| $\xi_2$   |   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha = 30^\circ$   | $\alpha = 45^\circ$   | $\alpha = 60^\circ$ |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,4   | 0,7   | 0,9                 |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| <p><b>Dérivation 90° avec réduction</b></p> <p><math>\xi_1 = 0,1</math><br/><math>\xi_2 = 1,3</math></p> <p><math>\xi_1 = 0,4</math><br/><math>\xi_2 = 0,5</math></p>   | <p><b>Dérivation à 30°, 45° et 60° avec réduction</b></p> <p><math>\xi_1 = 0,4</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3"><math>\xi_2</math></th> </tr> <tr> <th><math>\alpha = 30^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 45^\circ</math></th> <th><math>\alpha = 60^\circ</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,4</td> <td>0,7</td> <td>0,9</td> </tr> </tbody> </table> | $\xi_2$             |      |     | $\alpha = 30^\circ$ | $\alpha = 45^\circ$ | $\alpha = 60^\circ$ | 0,4 | 0,7  | 0,9      |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\xi_2$   |   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha = 30^\circ$   | $\alpha = 45^\circ$   | $\alpha = 60^\circ$ |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,4   | 0,7   | 0,9                 |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| <p><b>Dérivation à double coude</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>r/a</th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> | r/a   | $\xi$               | 0,50 | 1,0 | 0,75                | 0,5                 | 1,00                | 0,3 | 1,50   | 0,1      | 2,00  | 0,1 | <p><b>Jonction à double coude</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>r/a</th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,50</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>0,75</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>1,00</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>1,50</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>2,00</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> | r/a | $\xi$ | 0,50 | 1,0 | 0,75 | 0,4 | 1,00 | 0,2 | 1,50 | 0,1 | 2,00 | 0,1 |
| r/a   | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,50  | 1,0   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,75  | 0,5   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,00  | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,50  | 0,1   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 2,00  | 0,1   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| r/a   | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,50  | 1,0   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 0,75  | 0,4   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,00  | 0,2   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 1,50  | 0,1   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 2,00  | 0,1   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| <p><b>Dérivation en Y</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\alpha</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30°</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>45°</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>60°</td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table>  | $\alpha$  | $\xi$               | 30°  | 0,3 | 45°                 | 0,7                 | 60°                 | 1,0 | <p><b>Jonction en Y</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\alpha</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30°</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>45°</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td>60°</td> <td>0,9</td> </tr> </tbody> </table> | $\alpha$ | $\xi$ | 30° | 0,3   | 45° | 0,6   | 60°  | 0,9 |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha$  | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 30°   | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 45°   | 0,7   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 60°   | 1,0   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| $\alpha$  | $\xi$   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 30°   | 0,3   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 45°   | 0,6   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 60°   | 0,9   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |
| <p><b>Dérivation en T</b></p> <p><math>\xi_1 = 1,4</math></p>   | <p><b>Jonction en T</b></p> <p><math>\xi_1 = 1,3</math></p>   |                     |      |     |                     |                     |                     |     |  |          |       |     |   |     |       |      |     |      |     |      |     |      |     |      |     |

**Tableau I-4 :** Valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les Dérivations et jonctions des conduites cylindriques [7].

| <p style="text-align: center;"><i>Entrée sans amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 1,00</math></p>   | <p style="text-align: center;"><i>Sortie sans amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 1,20</math></p> |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
|--|---|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|--|---------|-------|-----|---|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée sans amorce avec obstacle frontal</i></p>  <p style="text-align: center;"><math>d_e = \text{diamètre équivalent}</math></p> <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>e/d_e</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,2</td><td>2,8</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>1,7</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>1,0</td></tr> </tbody> </table>                                      | $e/d_e$   | $\xi$ | 0,2 | 2,8 | 0,4 | 1,7 | 0,6 | 1,4 | 0,8   | 1,2 | 1,0 | 1,0 | <p style="text-align: center;"><i>Sortie sans amorce avec obstacle frontal</i></p>  <p style="text-align: center;"><math>d_e = \text{diamètre équivalent}</math></p> <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>e/d_e</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,4</td><td>2,0</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,6</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>1,2</td></tr> </tbody> </table> | $e/d_e$ | $\xi$ | 0,4 | 2,0   | 0,6     | 1,6 | 0,8 | 1,4 | 1,0 | 1,2 |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d_e$  | $\xi$   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,2  | 2,8   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4  | 1,7   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6  | 1,4   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8  | 1,2   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0  | 1,0   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d_e$  | $\xi$   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4  | 2,0   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6  | 1,6   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8  | 1,4   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0  | 1,2   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée avec amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 0,6</math></p>  | <p style="text-align: center;"><i>Sortie avec amorce</i></p>  <p style="text-align: right;"><math>\xi = 0,8</math></p>  |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée avec amorce et obstacle frontal</i></p>  <p style="text-align: center;"><math>d_e = \text{diamètre équivalent}</math></p> <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>e/d_e</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,2</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>0,4</td><td>0,9</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>0,7</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,6</td></tr> </tbody> </table>                                       | $e/d_e$   | $\xi$ | 0,2 | 1,4 | 0,4 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,8   | 0,7 | 1,0 | 0,6 | <p style="text-align: center;"><i>Sortie avec amorce et obstacle frontal</i></p>  <p style="text-align: center;"><math>d_e = \text{diamètre équivalent}</math></p> <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>e/d_e</math></th> <th><math>\xi</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,4</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>0,6</td><td>1,2</td></tr> <tr><td>0,8</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,8</td></tr> </tbody> </table>  | $e/d_e$ | $\xi$ | 0,4 | 1,4   | 0,6     | 1,2 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 0,8 |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d_e$  | $\xi$   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,2  | 1,4   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4  | 0,9   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6  | 0,8   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8  | 0,7   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0  | 0,6   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $e/d_e$  | $\xi$   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,4  | 1,4   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,6  | 1,2   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 0,8  | 1,0   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| 1,0  | 0,8   |       |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| <p style="text-align: center;"><i>Entrée avec diaphragme</i></p>  <p><math>A = \text{section intérieure conduite}</math><br/><math>A^* = \text{aire passage diaphragme}</math></p> <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>A^*/A</math></th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> <th>0,7</th> <th>0,8</th> <th>0,9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\xi</math></td> <td>24</td> <td>11</td> <td>6,2</td> <td>3,0</td> <td>2,2</td> <td>1,4</td> <td>1,2</td> </tr> </tbody> </table> | $A^*/A$   | 0,3   | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | $\xi$ | 24  | 11  | 6,2 | 3,0  | 2,2     | 1,4   | 1,2 | <p style="text-align: center;"><i>Sortie avec diaphragme</i></p>  <p><math>A = \text{section intérieure conduite}</math><br/><math>A^* = \text{aire passage diaphragme}</math></p> <table border="1" style="float: right; margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>A^*/A</math></th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> <th>0,7</th> <th>0,8</th> <th>0,9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\xi</math></td> <td>28</td> <td>13</td> <td>7,8</td> <td>3,6</td> <td>2,6</td> <td>1,7</td> <td>1,4</td> </tr> </tbody> </table> | $A^*/A$ | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | $\xi$ | 28 | 13 | 7,8 | 3,6 | 2,6 | 1,7 | 1,4 |
| $A^*/A$  | 0,3   | 0,4   | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $\xi$  | 24  | 11    | 6,2 | 3,0 | 2,2 | 1,4 | 1,2 |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $A^*/A$  | 0,3   | 0,4   | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |
| $\xi$  | 28  | 13    | 7,8 | 3,6 | 2,6 | 1,7 | 1,4 |     |       |     |     |     |  |         |       |     |   |         |     |     |     |     |     |     |     |       |    |    |     |     |     |     |     |

**Tableau I-5 :** Valeurs indicatives des coefficients des pertes de charge singulières dans les Dérivations et jonctions des conduites rectangulaire [7].

### I.3.2. Les pertes de charge linéaires :

Les pertes de charge linéaires par frottement sont provoquées par la viscosité des liquides et des gaz réels, elles prennent naissance lorsqu'il y a mouvement entre les molécules (écoulement laminaire) ou entre les diverses particules (écoulement turbulent) des couches voisines du liquide ou du gaz qui se déplacent avec des vitesses différentes. Ces pertes ont lieu sur toute la longueur de la conduite à travers laquelle le fluide est mouvement.

**I.3.2.1. Coefficient de Friction Pour écoulements Laminaire et turbulent :**

Le coefficient de frottement ou de friction, dit aussi coefficient de friction de Darcy-Weisbach pour les écoulements dans les conduites droites, est exprimé par la relation suivante [8] :

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{L}{2DH} \rho V^2} \tag{I-12}$$

Le coefficient de frottement peut être évalué par diverses relations, selon la nature du régime d'écoulement. La relation (I-12) est aussi valable pour les canaux ouverts que pour les conduites fermées.

Où  $\Delta P$  est la chute de pression due au frottement en  $[N/m^2]$  ou  $[Pa]$ . La chute de pression peut être calculée par l'expression :

$$\Delta p = \frac{L}{2DH} f \rho V^2 \tag{I-13}$$

Ou bien, en utilisant  $\Delta p = \rho g h$  , où la chute de pression exprimée en mètre de colonne de fluide, telle que :

$$h = \frac{L}{2 g DH} f V^2 \tag{I-14}$$

**I.3.2.2. Détermination du coefficient de frottement:**

Plusieurs travaux expérimentaux effectués par Blasius, Prandtl et Nikuradse ont permis d'établir des abaques donnant le coefficient de frottement  $f$  en fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité relative qui est représenté le rapport entre la rugosité absolue  $\epsilon$  de la conduite et son diamètre hydraulique  $D_H$ .

Colebrook –White a proposé une corrélation pour calculer le coefficient de perte de charge  $f$  qui correspond aux données de l'abaque de Moody [9].

**a- Ecoulement laminaire :**

Dans le cas d'un régime laminaire et indépendant de la rugosité relative, le coefficient de frottement est exprimé uniquement en fonction du nombre de Reynolds, est donnée pour une section circulaire par l'expression telle que :

$$f = \frac{64}{Re} \tag{I-15}$$

**b- Ecoulement Turbulent :**

Pour les conduites lisses en régime laminaire, on retient l'expression du coefficient de frottement donnée par Nikuradse qui est valable pour  $Re < 10^5$  [10]:

$$f = \frac{0.221}{Re^{0.25}} + 0.0032 \tag{I-16}$$

Pour les conduites rugueuses en régime turbulent, généralement on utilise des relations empiriques et semi-empiriques qui sont généralement obtenus par analyse de l'écoulement turbulent dans les conduits rectilignes avec section circulaire. La relation empirique pour le coefficient de friction en fonction de Reynolds et la rugosité relative est dérivée par Colebrook en 1939. C'est une relation obtenue également par une série de résultats expérimentaux réalisés par plusieurs chercheurs en utilisant différents fluides. L'équation implicite de Colebrook –White valable pour  $Re_{cr} \ll 2300$  est la suivante [10].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\frac{\epsilon}{D_H}}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \tag{I-17}$$

Où  $\frac{\epsilon}{D_H}$  est la rugosité relative.

Depuis la publication de l'équation de Colebrook, plusieurs chercheurs ont travaillé et publié des relations qui sont plus au moins précises mais plus complexes, entre autres, on cite l'équation de Pecornic (1963) et de Haaland (1983) [11].

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{15}{Re} + \frac{\epsilon}{3.715 D_H} \right) \right]^2} \tag{I-18}$$

Qui est valable pour des nombres de Reynolds allant de  $Re = 4.10^3$  à  $Re = 1.10^8$  et pour rugosité relative  $\frac{\epsilon}{D_H} = 0.01$  à  $5.10^{-5}$ , avec une erreur maximale de l'ordre de 6%.

L'équation de Halland a environ 2% d'erreur par rapport à l'équation de Colebrook [11].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[ \left( \frac{\frac{\epsilon}{D_H}}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \tag{I-19}$$

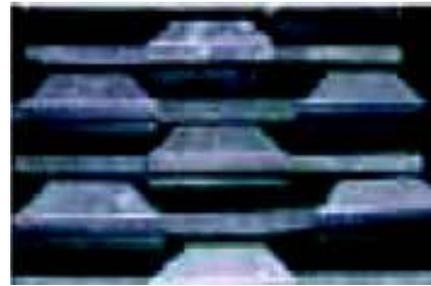
**I.4. Quelques travaux réalisés sur les pertes de charge dans les conduites rectangulaires :**

N. CHOUCANE, A.MOUMMI, B. Achour et N.MOUMMI [2009] [12] ont étudié quatre types de configurations de chicanes qui sont respectivement des chicanes

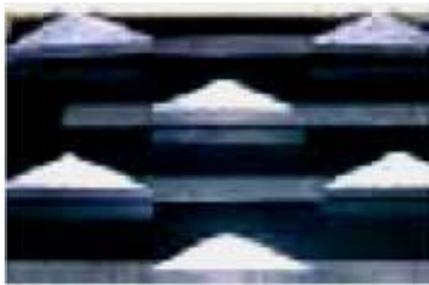
rectangulaires, Chicanes rectangulo-trapézoïdales, chicanes rectangulo-triangulaires et chicanes triangulaires figure (I.5), pour deux types de disposition en rangée et en quinconces figure (I.5).



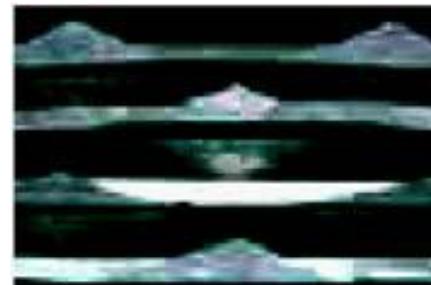
a- Chicane rectangulaire.



b- Chicane rectangulo-trapézoïdale.

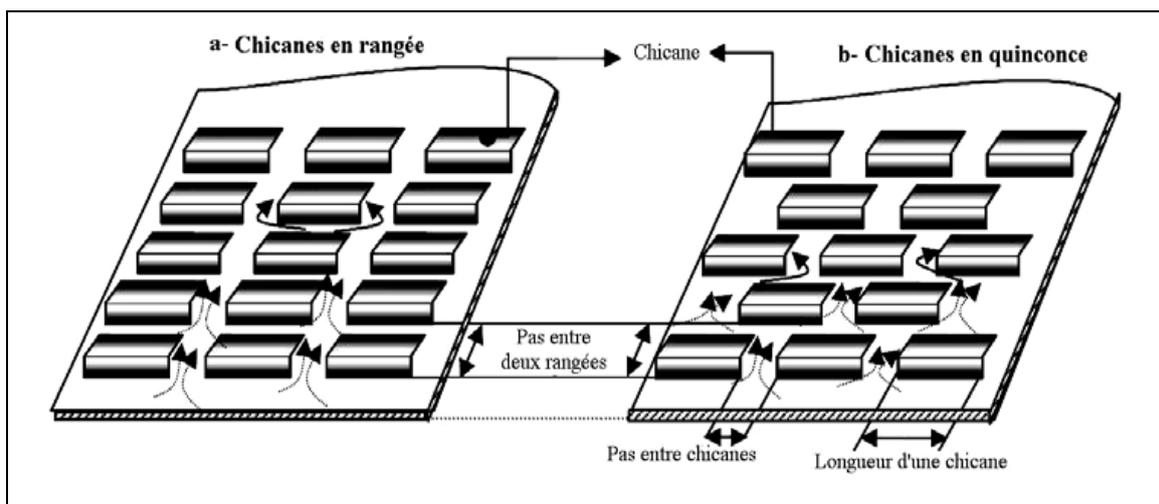


c- Chicane rectangulo-triangulaire.



d- Chicane triangulaire.

**Figure I.5 :** Configurations de chicanes étudiées [12].



**Figure I.6-** Disposition en rangée et en quinconce des chicanes [12].

En utilisant le principe de l'analyse dimensionnelle, les auteurs aboutissent à des relations empiriques qui ont déterminés expérimentalement, ce qui a permis d'évaluer des

coefficients de pertes de charges pour chaque type de configuration étudiée, respectivement pour la disposition en rangée et en quinconce en régime laminaire et turbulent. A titre d'exemple pour la configuration rectangulo-triangulaire, disposition en rangée, en régime laminaire, l'expression générale des pertes de charge est de la forme [12] :

$$\Delta P = \frac{L}{2D_H} \rho \left[ \begin{array}{l} (R_e)^{-1.3921} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.0244} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-8.7666} \\ \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.0805} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-8.8184} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{15.0836} \end{array} \right] V^2 \quad (I-20)$$

Dont le coefficient des pertes de charge correspondant à cette configuration est :

$$\lambda = \left[ \begin{array}{l} (R_e)^{-1.3921} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{0.0244} \cdot \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-8.7666} \\ \times \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{0.0805} \cdot \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{-8.8184} \left(\frac{P_{e-s-ch}}{D_H}\right)^{15.0836} \end{array} \right] \quad (I-21)$$

S.Hicher, A.E. Mazouzi [2011] [5] a étudié le cas des Chicanes rectangulo-trapézoïdale disposées en rangées et en quinconce.



Chicanes disposées en quinconce.



Chicanes disposées en rangées.

**Figure I.7 :** Configurations de chicanes rectangulo-trapézoïdale disposées en rangées et en quinconces.

De la même manière, en utilisant le principe de l'analyse dimensionnelle, et en réalisant un nombre important d'expérience, l'auteur [5] a pu aboutir à des corrélations empiriques qui donnent les expressions des pertes de charge et du coefficient de frottement en fonction des paramètres étudiés, en régime laminaire et turbulent respectivement pour les modes de disposition en rangés et en quinconce.

**Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, on essayé d'entamer une brève étude bibliographique sur certains types des rugosités artificielles mentionnés dans la littérature. A partir de cette étude, on a conclu également que les rugosités artificielles ont pour rôle d'améliorer le transfert de chaleur notamment lorsqu'on travail avec des fluides gazeux ayant des propriétés thermophysiques médiocre, malgré qu'elles se manifestent par des pertes de charge importantes, elles participent à l'intensification des échanges convectifs.

## **Chapitre II :**

### ***Étude Expérimentale***

**Introduction :**

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude expérimentale, on présentera le dispositif expérimental ainsi que les différents instruments de mesures utilisés pour le prélèvement des pertes de charge, pour diverses configurations de géométrie des chicanes et de disposition en quinconce ainsi que pour différentes valeurs de débits d'air véhiculés.

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

Le dispositif expérimental est réalisé dans le hall technologique du département de génie mécanique de l'université Mohamed Khider de Biskra. Il s'agit d'une conduite de forme rectangulaire conçue en bois de 1.5 m de longueur, 0.50 m de largeur et d'une hauteur égale à 0.025 m. La rugosité artificielle se représente sous forme des chicanes de forme rectangulaire en acier galvanisé.

Dans cette étude expérimentale on s'intéresse à la modélisation des pertes de charge, à l'intérieur d'une conduite munie par des rugosités artificielles découpées d'acier galvanisé de formes rectangulaires (des chicanes). Dans cette étude on a considéré uniquement la disposition en quinconce, d'autre part on a maintenu constant la longueur des chicanes égale à 06 cm. Par contre, les pas entre chicanes et entre deux rangées successives sont variables, ainsi que la rugosité absolue des chicanes où on a examiné trois inclinaisons par rapport au plan d'écoulement désigné par  $\beta$  qui sont de  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $\beta = 30^\circ$  respectivement.

L'écoulement de l'air est assuré par un aspirateur, les pertes de charge sont mesurées entre deux points à l'entrée et à la sortie du conduit dynamique à l'aide d'un manomètre différentiel électronique de type Kimo doté d'un écran à cristaux liquide. Cette étude expérimentale consiste à effectuer des prises de mesure des pertes de charge entre l'amont et l'aval de la conduite en fonction des différentes valeurs de débit volumique de l'air. L'ajustement du débit d'air en circulation est réalisé par un potentiomètre gradué qui permet de régler la rotation et la tension de la pompe à air.



Figure II.1 : Dispositif expérimental réalisé.

Le dispositif expérimental comporte les éléments suivants :

- 1- **Variateur de vitesse** : pour varier la vitesse d'écoulement de l'air. (Figure II.2)
- 2- **Aspirateur** : pour le pompage de l'air. (Figure II.3)
- 3- **Capteur différentiel de pression** : pour la mesure des pertes de charge. (Figure II.4)
- 4- **Anémomètre à hélice** : pour les mesures de vitesse extérieure de l'air. (Figure II.5)
- 5- **Chicanes en acier galvanisé**: représentent la rugosité artificielle implantée sur le plan d'écoulement de la conduite. (Figure II.6)

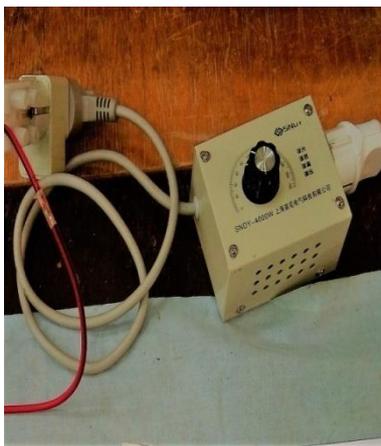


Figure II.2 : Variateur de vitesse.



Figure II.3 : Aspirateur.



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



**Figure II.5 :** Anémomètre à hélice.



**Figure II.6 :** rugosité artificielle rectangulaire.

L'étude expérimentale a été menée par un dispositif expérimental, constitué essentiellement d'un canal rectangulaire, dont le plan d'écoulement d'air est muni de rugosités artificielles dites « chicanes ».

Le principe de cette étude expérimentale consiste à effectuer des prises de mesure des pertes de charge enregistrées entre l'amont l'aval du canal pour différentes valeurs de débit volumique, dont le plan d'écoulement inférieur est muni de chicanes de formes rectangulaires d'une longueur égale à 06 cm, où on a considéré uniquement la configuration en quinconce. Pour mettre en évidence l'effet des paramètres géométriques, on a varié les pas entre deux chicanes de la même rangée et le pas entre deux rangés successives, ainsi que la rugosité absolue présentée par la hauteur d'une chicane, où la variation est obtenue par l'inclinaison des chicanes par rapport au plan d'écoulement horizontal. Une série de mesures est réalisée

dont les résultats sont obtenus sous forme de tableaux de mesures qui montrent l'évolution des pertes de charge en fonction du débit. Durant notre étude expérimentale on a considéré les cas suivants :

## II.2. Types des configurations des chicanes étudiées :

### II.2.1. Chicanes alignées en quinconce :

Nous avons étudié 09 cas de position des chicanes :

- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 2.5 \text{ cm}$ ;  $\beta = 90^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 2.5 \text{ cm}$ ;  $\beta = 60^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 2.5 \text{ cm}$ ;  $\beta = 30^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 5 \text{ cm}$ ;  $\beta = 90^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 5 \text{ cm}$ ;  $\beta = 60^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 5 \text{ cm}$ ;  $\beta = 30^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 10 \text{ cm}$ ;  $\beta = 90^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 10 \text{ cm}$ ;  $\beta = 60^\circ$ ]
- [ $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$ ;  $D_H = 0.0173 \text{ m}$ ;  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$ ;  $\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $P_{e-r} = 10 \text{ cm}$ ;  $\beta = 30^\circ$ ]

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

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 2.355                  | 14,99   | 68                      | 29.67  |
| 1.31    | 2.938                  | 15,34   | 73                      | 37.02  |
| 1.54    | 3.454                  | 16,28   | 76                      | 43.52  |
| 1.64    | 3.678                  | 16,75   | 79                      | 46.34  |
| 1.97    | 4.418                  | 20,02   | 81                      | 55.67  |
| 2.30    | 5.158                  | 25,40   | 90                      | 64.99  |
| 2.96    | 6.638                  | 38,26   | 94                      | 83.64  |
| 3.29    | 7.379                  | 46,30   | 96                      | 92.97  |
| 3.71    | 8.321                  | 58.52   | 98                      | 104.84   |

**Tableau (II-1) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 2,5 cm, inclinaison = 90 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.75                   | 13,59   | 66                      | 29.67  |
| 1.31    | 2.18                   | 14,17   | 67                      | 37.02  |
| 1.54    | 2.56                   | 15,49   | 72                      | 43.52  |
| 1.64    | 2.73                   | 16,25   | 79                      | 46.34  |
| 1.97    | 3.28                   | 19,83   | 80                      | 55.67  |
| 2.30    | 3.83                   | 23,93   | 84                      | 64.99  |
| 2.96    | 4.93                   | 36,43   | 89                      | 83.64  |
| 3.29    | 5.48                   | 45,05   | 92                      | 92.97  |
| 3.71    | 6.18                   | 58,18   | 93                      | 104.84   |

**Tableau (II-2) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 2,5 cm, inclinaison = 60 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.030                  | 06.81   | 61                      | 29.673   |
| 1.31    | 1.285                  | 06.89   | 66                      | 37.0206  |
| 1.54    | 1.511                  | 07.34   | 70                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.609                  | 07.61   | 72                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.933                  | 09.12   | 75                      | 55.6722  |
| 2.30    | 2.256                  | 11.55   | 80                      | 64.998   |
| 2.96    | 2.904                  | 17.11   | 82                      | 83.6496  |
| 3.29    | 3.228                  | 20.40   | 85                      | 92.9754  |
| 3.71    | 3.640                  | 25.52   | 89                      | 104.8446   |

**Tableau (II-3) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 2,5 cm, inclinaison = 30 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 2.355                  | 10.58   | 66                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.938                  | 11.03   | 72                      | 37.0206  |
| 1.54    | 3.454                  | 11.72   | 74                      | 43.5204  |
| 1.64    | 3.678                  | 12.27   | 76                      | 46.3464  |
| 1.97    | 4.418                  | 14.62   | 79                      | 55.6722  |
| 2.30    | 5.158                  | 17.71   | 83                      | 64.998   |
| 2.96    | 6.638                  | 26.96   | 89                      | 83.6496  |
| 3.29    | 7.379                  | 33.82   | 93                      | 92.9754  |
| 3.71    | 8.321                  | 55.39   | 95                      | 104.8446   |

**Tableau (II-4):** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 90 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.751                  | 09.82   | 62                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.185                  | 10.16   | 64                      | 37.0206  |
| 1.54    | 2.569                  | 10.91   | 69                      | 43.5204  |
| 1.64    | 2.735                  | 11.37   | 75                      | 46.3464  |
| 1.97    | 3.286                  | 13.87   | 78                      | 55.6722  |
| 2.30    | 3.836                  | 18.07   | 80                      | 64.998   |
| 2.96    | 4.937                  | 30.02   | 84                      | 83.6496  |
| 3.29    | 5.488                  | 37.25   | 86                      | 92.9754  |
| 3.71    | 6.188                  | 47.82   | 90                      | 104.8446   |

**Tableau (II-5) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 60 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.030                  | 02.89   | 58                      | 29.673   |
| 1.31    | 1.285                  | 02.96   | 64                      | 37.0206  |
| 1.54    | 1.511                  | 03.21   | 66                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.609                  | 03.57   | 68                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.933                  | 05.10   | 72                      | 55.6722  |
| 2.30    | 2.256                  | 07.64   | 75                      | 64.998   |
| 2.96    | 2.904                  | 13.92   | 80                      | 83.6496  |
| 3.29    | 3.228                  | 17.40   | 82                      | 92.9754  |
| 3.71    | 3.640                  | 22.72   | 86                      | 104.8446   |

**Tableau (II-6) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 30 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 2.355                  | 9.54    | 56                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.938                  | 9.59    | 66                      | 37.0206  |
| 1.54    | 3.454                  | 9.79    | 70                      | 43.5204  |
| 1.64    | 3.678                  | 9.98    | 72                      | 46.3464  |
| 1.97    | 4.418                  | 10.91   | 75                      | 55.6722  |
| 2.30    | 5.158                  | 13.43   | 80                      | 64.998   |
| 2.96    | 6.638                  | 22.99   | 86                      | 83.6496  |
| 3.29    | 7.379                  | 32.69   | 90                      | 92.9754  |
| 3.71    | 8.321                  | 41.25   | 91                      | 104.8446   |

**Tableau (II-7) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = 90 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.751                  | 06.86   | 60                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.185                  | 06.90   | 61                      | 37.0206  |
| 1.54    | 2.569                  | 07.15   | 64                      | 43.5204  |
| 1.64    | 2.735                  | 07.40   | 71                      | 46.3464  |
| 1.97    | 3.286                  | 08.68   | 74                      | 55.6722  |
| 2.30    | 3.836                  | 10.33   | 76                      | 64.998   |
| 2.96    | 4.937                  | 14.64   | 80                      | 83.6496  |
| 3.29    | 5.488                  | 17.27   | 82                      | 92.9754  |
| 3.71    | 6.188                  | 21.51   | 84                      | 104.8446   |

**Tableau (II-8) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = 60 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.030                  | 01.91   | 52                      | 29.673   |
| 1.31    | 1.285                  | 02.03   | 59                      | 37.0206  |
| 1.54    | 1.511                  | 02.30   | 62                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.609                  | 02.47   | 64                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.933                  | 03.23   | 66                      | 55.6722  |
| 2.30    | 2.256                  | 04.23   | 70                      | 64.998   |
| 2.96    | 2.904                  | 06.69   | 71                      | 83.6496  |
| 3.29    | 3.228                  | 08.29   | 72                      | 92.9754  |
| 3.71    | 3.640                  | 10.67   | 74                      | 104.8446   |

**Tableau (II-9) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 3 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = 30 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 0.659                  | 0.02    | 45                      | 29.673   |
| 1.31    | 0.822                  | 0.04    | 47                      | 37.0206  |
| 1.54    | 0.967                  | 0.13    | 50                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.029                  | 0.18    | 52                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.237                  | 0.47    | 56                      | 55.6722  |
| 2.30    | 1.444                  | 0.96    | 59                      | 64.998   |
| 2.96    | 1.858                  | 2.40    | 62                      | 83.6496  |
| 3.29    | 2.066                  | 3.31    | 63                      | 92.9754  |
| 3.71    | 2.329                  | 4.62    | 65                      | 104.8446   |

*Tableau (II-10) : pertes de charge en fonction du débit, conduit lisse.*

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 2.355                  | 20.99   | 67                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.938                  | 21.36   | 73                      | 37.0206  |
| 1.54    | 3.454                  | 22.12   | 78                      | 43.5204  |
| 1.64    | 3.678                  | 22.47   | 80                      | 46.3464  |
| 1.97    | 4.418                  | 25.36   | 82                      | 55.6722  |
| 2.30    | 5.158                  | 29.17   | 92                      | 64.998   |
| 2.96    | 6.638                  | 39.83   | 96                      | 83.6496  |
| 3.29    | 7.379                  | 47.04   | 98                      | 92.9754  |
| 3.71    | 8.321                  | 59.13   | 99                      | 104.8446   |

*Tableau (II-11) : pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 2.5 cm, inclinaison = 90 °).*

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.751                  | 16.67   | 68                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.185                  | 16.70   | 70                      | 37.0206  |
| 1.54    | 2.569                  | 17.50   | 75                      | 43.5204  |
| 1.64    | 2.735                  | 18.08   | 80                      | 46.3464  |
| 1.97    | 3.286                  | 21.56   | 83                      | 55.6722  |
| 2.30    | 3.836                  | 26.67   | 86                      | 64.998   |
| 2.96    | 4.937                  | 40.52   | 90                      | 83.6496  |
| 3.29    | 5.488                  | 49.16   | 93                      | 92.9754  |
| 3.71    | 6.188                  | 60.89   | 95                      | 104.8446   |

*Tableau (II-12) : pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 2.5 cm, inclinaison = 60 °).*

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.030                  | 11.44   | 63                      | 29.673   |
| 1.31    | 1.285                  | 11.58   | 68                      | 37.0206  |
| 1.54    | 1.511                  | 11.99   | 72                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.609                  | 12.30   | 74                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.933                  | 14.06   | 78                      | 55.6722  |
| 2.30    | 2.256                  | 16.96   | 82                      | 64.998   |
| 2.96    | 2.904                  | 26.06   | 86                      | 83.6496  |
| 3.29    | 3.228                  | 31.86   | 89                      | 92.9754  |
| 3.71    | 3.640                  | 40.89   | 91                      | 104.8446   |

**Tableau (II-13) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 2.5 cm, inclinaison = 30 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 2.355                  | 18.45   | 68                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.938                  | 19.06   | 74                      | 37.0206  |
| 1.54    | 3.454                  | 20.10   | 77                      | 43.5204  |
| 1.64    | 3.678                  | 20.61   | 79                      | 46.3464  |
| 1.97    | 4.418                  | 23.41   | 82                      | 55.6722  |
| 2.30    | 5.158                  | 26.96   | 84                      | 64.998   |
| 2.96    | 6.638                  | 36.85   | 86                      | 83.6496  |
| 3.29    | 7.379                  | 44.35   | 90                      | 92.9754  |
| 3.71    | 8.321                  | 56.69   | 92                      | 104.8446   |

**Tableau (II-14) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 90 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.751                  | 14.37   | 64                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.185                  | 14.49   | 68                      | 37.0206  |
| 1.54    | 2.569                  | 15.19   | 70                      | 43.5204  |
| 1.64    | 2.735                  | 15.70   | 76                      | 46.3464  |
| 1.97    | 3.286                  | 18.99   | 79                      | 55.6722  |
| 2.30    | 3.836                  | 23.44   | 83                      | 64.998   |
| 2.96    | 4.937                  | 35.49   | 86                      | 83.6496  |
| 3.29    | 5.488                  | 43.92   | 89                      | 92.9754  |
| 3.71    | 6.188                  | 54.82   | 92                      | 104.8446   |

**Tableau (II-15) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 60 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.030                  | 10.25   | 59                      | 29.673   |
| 1.31    | 1.285                  | 10.58   | 65                      | 37.0206  |
| 1.54    | 1.511                  | 11.17   | 68                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.609                  | 11.50   | 70                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.933                  | 12.98   | 74                      | 55.6722  |
| 2.30    | 2.256                  | 15.02   | 78                      | 64.998   |
| 2.96    | 2.904                  | 22.37   | 81                      | 83.6496  |
| 3.29    | 3.228                  | 27.63   | 83                      | 92.9754  |
| 3.71    | 3.640                  | 37.45   | 88                      | 104.8446   |

**Tableau (II-16) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 5 cm, inclinaison = 30 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 2.355                  | 14.31   | 59                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.938                  | 14.69   | 69                      | 37.0206  |
| 1.54    | 3.454                  | 15.39   | 74                      | 43.5204  |
| 1.64    | 3.678                  | 15.65   | 76                      | 46.3464  |
| 1.97    | 4.418                  | 17.39   | 80                      | 55.6722  |
| 2.30    | 5.158                  | 20.14   | 82                      | 64.998   |
| 2.96    | 6.638                  | 28.59   | 87                      | 83.6496  |
| 3.29    | 7.379                  | 33.81   | 90                      | 92.9754  |
| 3.71    | 8.321                  | 42.85   | 94                      | 104.8446   |

**Tableau (II-17) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = 90 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.751                  | 08.21   | 62                      | 29.673   |
| 1.31    | 2.185                  | 08.23   | 64                      | 37.0206  |
| 1.54    | 2.569                  | 08.69   | 65                      | 43.5204  |
| 1.64    | 2.735                  | 08.93   | 72                      | 46.3464  |
| 1.97    | 3.286                  | 10.39   | 76                      | 55.6722  |
| 2.30    | 3.836                  | 12.85   | 78                      | 64.998   |
| 2.96    | 4.937                  | 20.48   | 82                      | 83.6496  |
| 3.29    | 5.488                  | 24.69   | 84                      | 92.9754  |
| 3.71    | 6.188                  | 30.00   | 86                      | 104.8446   |

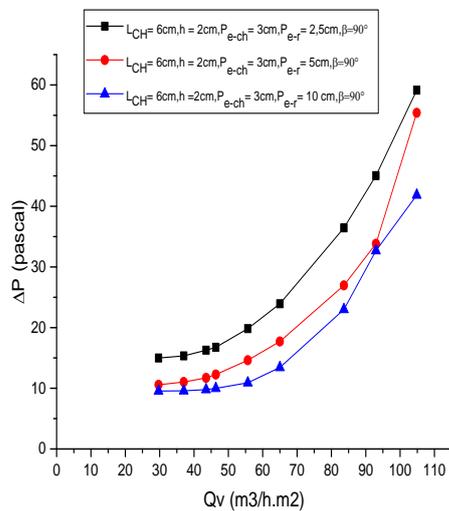
**Tableau (II-18) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaires (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = 60 °).

| V (m/s) | V <sub>int</sub> (m/s) | ΔP (Pa) | P <sub>éle</sub> (Watt) | Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) |
|---------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| 1.05    | 1.030                  | 05.90   | 54                      | 29.673   |
| 1.31    | 1.285                  | 06.07   | 61                      | 37.0206  |
| 1.54    | 1.511                  | 06.56   | 64                      | 43.5204  |
| 1.64    | 1.609                  | 06.74   | 67                      | 46.3464  |
| 1.97    | 1.933                  | 08.00   | 69                      | 55.6722  |
| 2.30    | 2.256                  | 10.29   | 71                      | 64.998   |
| 2.96    | 2.904                  | 16.63   | 73                      | 83.6496  |
| 3.29    | 3.228                  | 20.15   | 76                      | 92.9754  |
| 3.71    | 3.640                  | 25.06   | 78                      | 104.8446   |

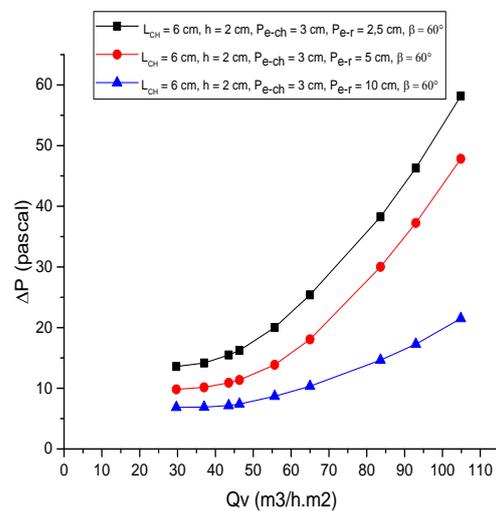
**Tableau (II-19) :** pertes de charge en fonction du débit, conduit avec chicanes rectangulaire (longueur chicane L= 06 cm, hauteur h = 02 cm, Pas entre chicanes = 2 cm, pas entre rangée = 10 cm, inclinaison = 30 °).

### II.2.1.2. Représentations graphiques des pertes de charge en fonction de débit :

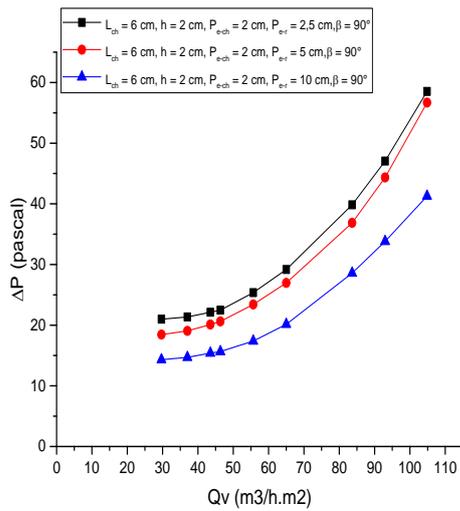
Il s'agit de montrer graphiquement l'évolution des pertes de charge en fonction du débit pour la configuration des chicanes disposées en quinconce, pour les différents cas étudiés dans ce travail expérimental.



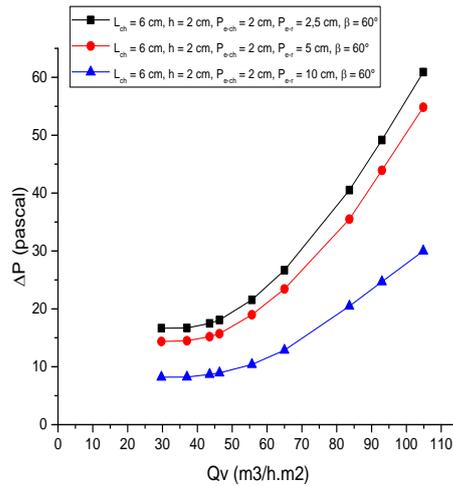
**Figure (II- 7) :** pertes de charge en fonction du débit {L<sub>ch</sub>= 6 cm ; h = 2 cm ; P<sub>e-r</sub> = (2.5 cm, 5 cm, 10 cm) ; P<sub>e-ch</sub> = 3 cm ; β = 90°}.



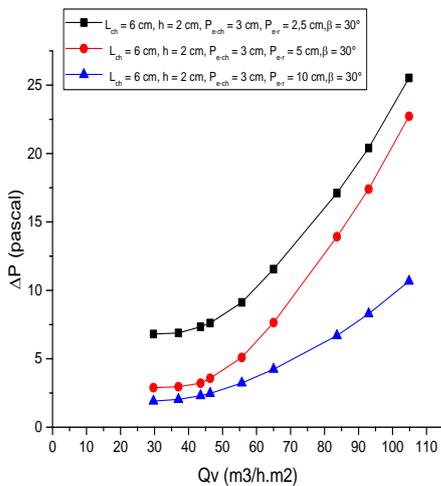
**Figure (II- 8) :** pertes de charge en fonction du débit {L<sub>ch</sub>= 6 cm ; h = 2 cm ; P<sub>e-r</sub> = (2.5 cm, 5 cm, 10 cm) ; P<sub>e-ch</sub> = 3 cm ; β = 60°}.



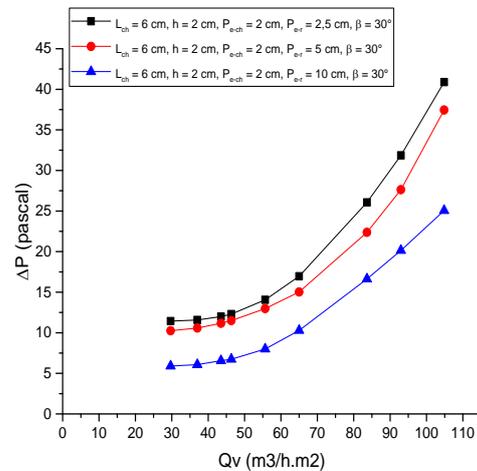
**Figure (II- 9) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 2 \text{ cm} ; \beta = 90^\circ\}$ .



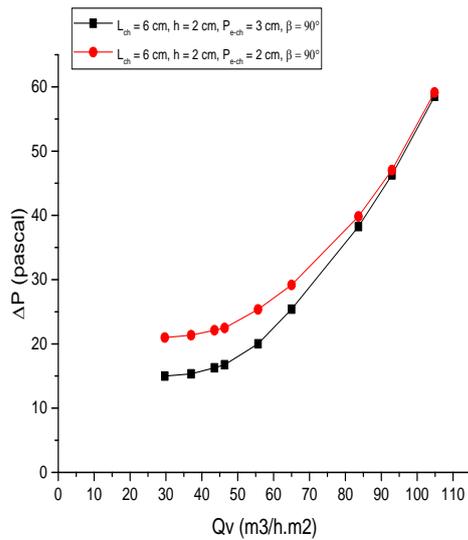
**Figure (II- 10) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 2 \text{ cm} ; \beta = 60^\circ\}$ .



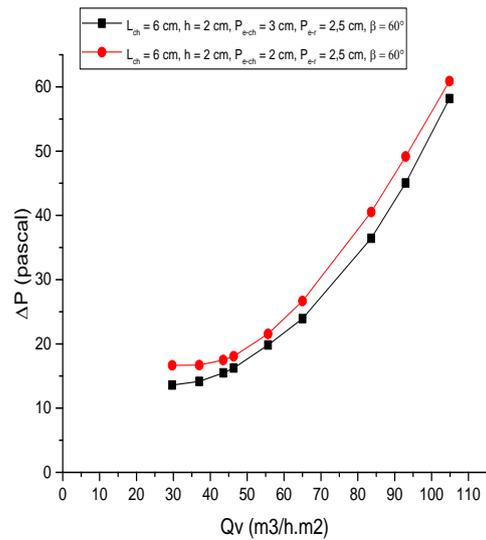
**Figure (II- 11) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 3 \text{ cm} ; \beta = 30^\circ\}$ .



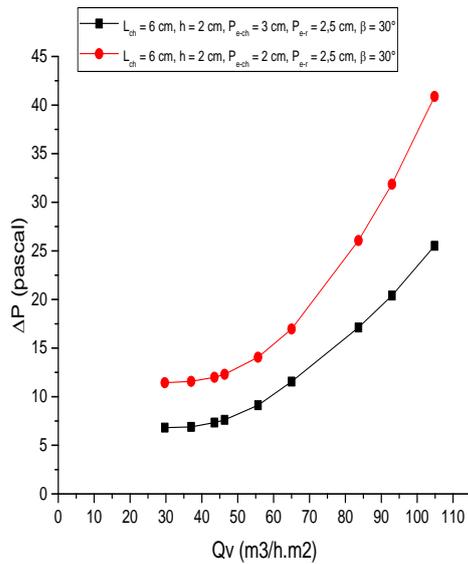
**Figure (II- 12) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = (2.5 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}) ; P_{e-ch} = 2 \text{ cm} ; \beta = 30^\circ\}$ .



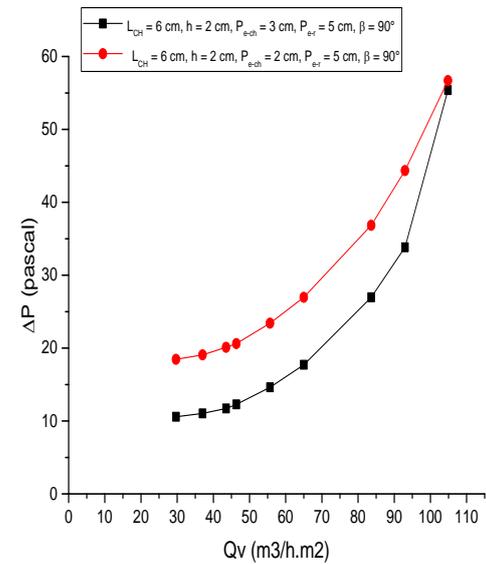
**Figure (II- 13) :** pertes de charge en fonction du débit { $L_{ch}= 6 \text{ cm}$  ;  $h = 2 \text{ cm}$  ;  $P_{e-r} = 2.5 \text{ cm}$  ;  $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$  ;  $\beta = 90^\circ$ }



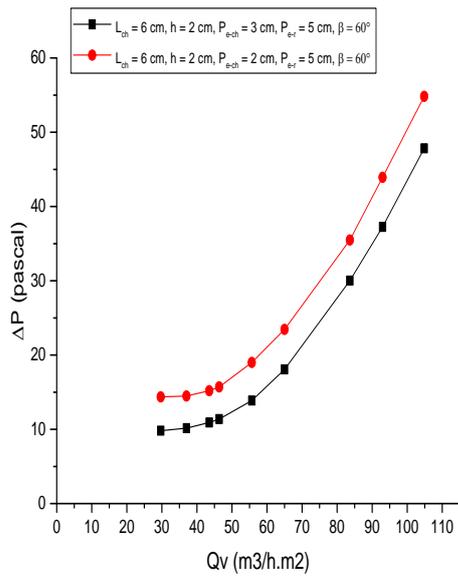
**Figure (II- 14) :** pertes de charge en fonction du débit { $L_{ch}= 6 \text{ cm}$  ;  $h = 2 \text{ cm}$  ;  $P_{e-r} = 2.5 \text{ cm}$  ;  $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$  ;  $\beta = 60^\circ$ }



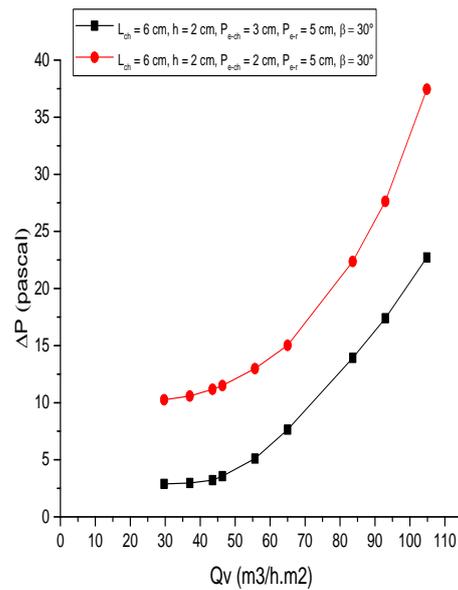
**Figure (II- 15) :** pertes de charge en fonction du débit { $L_{ch}= 6 \text{ cm}$  ;  $h = 2 \text{ cm}$  ;  $P_{e-r} = 2.5 \text{ cm}$  ;  $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$  ;  $\beta = 30^\circ$ }.



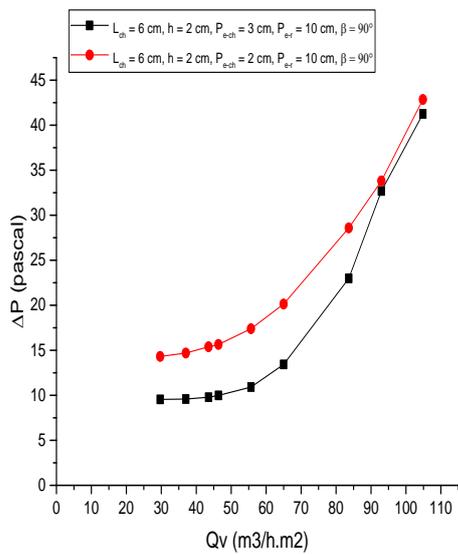
**Figure (II- 16) :** pertes de charge en fonction du débit { $L_{ch}= 6 \text{ cm}$  ;  $h = 2 \text{ cm}$  ;  $P_{e-r} = 5 \text{ cm}$  ;  $P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm})$  ;  $\beta = 90^\circ$ }.



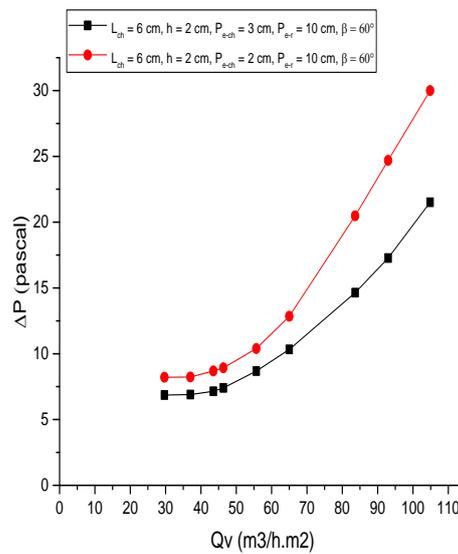
**Figure (II- 17) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 60^\circ\}$ .



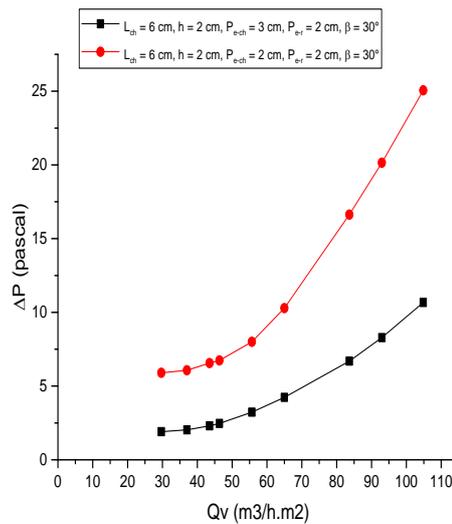
**Figure (II- 18) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 5 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 30^\circ\}$ .



**Figure (II-19) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 10 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 90^\circ\}$ .



**Figure (II- 20) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 10 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 60^\circ\}$ .



**Figure (II-21) :** pertes de charge en fonction du débit  $\{L_{ch}= 6 \text{ cm} ; h = 2 \text{ cm} ; P_{e-r} = 10 \text{ cm} ; P_{e-ch} = (3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}) ; \beta = 30^\circ\}$ .

### II.3. Interprétations et discussions des Résultats :

Les résultats expérimentaux, sont très nettement confirmés par les graphiques des pertes de charges en fonction du débit, ou on montre une augmentation significative de la différence des pertes de charge (désignée  $\Delta P$ ) par rapport à un canal lisse sans chicane.

A titre d'exemple pour un débit comparatif commun au voisinage de  $29.67 \text{ m}^3/\text{h}$  on a enregistré les valeurs des pertes de charge suivantes :

| $\Delta P$ [pascal]   | $Q_v$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] |
|---|---------------------------------|
|   | <b>29.673</b>                   |
| $\Delta P$ : Sans chicanes  | 0.02                            |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.025 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=90^\circ$ ) | 14,99                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.025 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=60^\circ$ ) | 13,59                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.025 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=30^\circ$ ) | 06.81                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.05 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=90^\circ$ )  | 10.58                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.05 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=60^\circ$ )  | 09.82                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.05 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=30^\circ$ )  | 02.89                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.1 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=90^\circ$ )   | 09.54                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.1 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=60^\circ$ )   | 06.86                           |
| $\Delta P$ : ( $L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.1 \text{ m}, P_{e-r}=0.03 \text{ m}, \beta=30^\circ$ )   | 01.91                           |

|   |       |
|---|-------|
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.025 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=90^\circ)$ | 20.99 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.025 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=60^\circ)$ | 16.67 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.025 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=30^\circ)$ | 11.44 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.05 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=90^\circ)$  | 18.45 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.05 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=60^\circ)$  | 14.37 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.05 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=30^\circ)$  | 10.25 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.1 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=90^\circ)$   | 14.31 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.1 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=60^\circ)$   | 08.21 |
| $\Delta P : (L_{ch}= 0.06 \text{ m}, h=0.02 \text{ m}, P_{e-ch}=0.1 \text{ m}, P_{e-r}=0.02 \text{ m}, \beta=30^\circ)$   | 05.90 |

On remarque que les pertes de charge sont de plus en plus importantes quand le pas entre deux rangées successives est réduit, de même sort quand la rugosité absolue est importante désignée par l'inclinaison des chicanes supérieures à  $30^\circ$  et  $60^\circ$ , avec une sensible différence nettement visible sur les courbes, d'autre part on a observé que les pertes de charges sont aussi de plus en plus importantes lorsque le pas entre deux chicanes d'une même rangée est minimum.

### Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, on a réalisé une série d'expériences durant lesquelles on a mesuré les pertes de charge avec la disposition en quinconce pour une forme des chicanes rectangulaires de longueur 06 cm, des tableaux de mesures sont obtenus pour toutes les aspects considérées, également on a identifié l'influence des dispositions des chicanes et les différentes caractéristiques géométriques sur les pertes de charge.

## Chapitre III :

### *Modélisation des pertes de charge*

**Introduction :**

Dans ce troisième chapitre on va illustrer la méthode de l'analyse dimensionnelle utilisée pour établir des relations empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des configurations des rugosités artificielles étudiées en fonction de la géométrie de disposition en quinconce, des pas relatifs entre les chicanes et entre deux rangées successives, ainsi que de la rugosité absolue représentée par la hauteur respectivement en régime d'écoulement laminaire et turbulent.

**III.1. Modèle des pertes de charge**

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

Pour cela, il faut établir l'inventaire de tous les paramètres physiques et géométriques intervenants, autrement on considère une expression des pertes de charge reliant un ensemble des paramètres suivants :

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

Avec :

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

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

$D_H$  : Diamètre hydraulique en [m].

$V$ : Vitesse de l'air en écoulement [m/s].

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

$\varepsilon$  : Rugosité absolue en [m].

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

$P_{e.ch}$  : Pas entre les chicanes en [m].

$P_{e.r}$  : Pas entre les rangées en [m].

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

D'après le théorème de  $\pi$  (de Vashy-Buckingham) on peut avoir que 6 groupements indépendants, par conséquent on peut adopter l'écriture simplifiée suivante, sachant que la longueur du conduit dynamique  $L$  étant constante ( $L = c^{ste}$ ), on peut écrire alors :

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

$\Pi$  : indique un produit.

On peut déduire donc une relation basée sur les dimensions fondamentales.

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

Après développement on aura :

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

Après identification on obtient un système de 3 équations :

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

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

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

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

Remplaçant (4), (5) et (6) dans (III-2) on obtient :

$$\frac{\Delta P}{L} = \pi.k.\rho^{1-x}.D_H^{-1-x-y-z-t-w-h}.V^{2-x}.\mu^x.\varepsilon^y.P_{e-r}^z.P_{e-ch}^t.L_{ch}^w \quad (III-5)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1}{2} \frac{\rho.V^2}{D_H} [\rho^{-x} . D_H^{-x-y-z-t-w} . V^{-x} . \mu^x . \varepsilon^y . P_{e-r}^z . P_{e-ch}^t . L_{ch}^w]$$

Après réarrangement on obtient :

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

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho [(R_e)^{-x} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^y \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^z \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^t \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^w] \cdot V^2 \quad (\text{III-6})$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho [\lambda (R_e) \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right) \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right) \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right) \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)] \cdot V^2 \quad (\text{III-7})$$

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

$$\lambda = \lambda \left( R_e, \frac{\varepsilon}{D_H}, \frac{P_{e-ch}}{D_H}, \frac{P_{e-r}}{D_H}, \frac{L_{ch}}{D_H} \right) \quad (\text{III-8})$$

### III.2. Expression des pertes de charge en régime laminaire :

L'expression des pertes de charge est basée sur les données géométriques suivantes, sachant que dans cette analyse on a considéré uniquement la disposition en quinconce des chicanes, d'autre part la longueur des chicanes étant constante :

- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = 1.05$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0173$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0177$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0185$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0198$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = 1.05$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0173$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0177$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0185$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0198$  m).

- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = 1.05$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0173$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0177$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0185$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0198$  m).

De la même façon on obtient la relation suivante :

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

$$\implies \frac{2 \Delta P D_H}{L \rho V^2} = \left[ (R_e)^{-x} \left( \frac{\varepsilon}{D_H} \right)^y \left( \frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^z \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^t \left( \frac{L_{ch}}{D_H} \right)^w \right]$$

$$\implies \ln \frac{2 \Delta P D_H}{L \rho V^2} = \ln \left[ (R_e)^{-x} \left( \frac{\varepsilon}{D_H} \right)^y \left( \frac{P_{e-ch}}{D_H} \right)^z \left( \frac{P_{e-r}}{D_H} \right)^t \left( \frac{L_{ch}}{D_H} \right)^w \right]$$

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

On remplaçant les données précédentes dans l'équation (III-9), ce qui a permis d'obtenir un système d'équation par comparaison aux résultats expérimentaux effectués, on aura part conséquent :

$$\begin{bmatrix}
 -7.90461535 & 0.36816932 & 0.36816932 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -7.63046612 & 0.34531119 & 0.34531119 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -7.8518985 & 0.34531119 & 0.34531119 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -7.16314915 & 0.2797139 & 0.2797139 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.38435585 & 0.2797139 & 0.2797139 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.54636707 & 0.2797139 & 0.2797139 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.60920787 & 0.2797139 & 0.2797139 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.79264615 & 0.2797139 & 0.2797139 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.67327428 & 0.30110509 & 0.30110509 & 0.07796154 & 1.17657383 \\
 -7.89470576 & 0.30110509 & 0.30110506 & 0.07796154 & 1.17657383 \\
 -7.20882237 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.43002517 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.59203829 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.65487915 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.83833937 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.90461535 & 0.36816932 & 1.0613165 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -7.63046612 & 0.34531119 & 1.03845837 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -7.8518985 & 0.34531119 & 1.03845837 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -7.16314915 & 0.2797139 & 0.97286108 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.38435585 & 0.2797139 & 0.97286108 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.54636707 & 0.2797139 & 0.97286108 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.60920787 & 0.2797139 & 0.97286108 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.79267092 & 0.2797139 & 0.97286108 & 0.46203546 & 1.15518264 \\
 -7.67327428 & 0.30110509 & 0.99425227 & 0.07796154 & 1.17657383 \\
 -7.89470576 & 0.30110509 & 0.99425227 & 0.07796154 & 1.17657383 \\
 -7.20882237 & 0.23319389 & 0.92634107 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.43002517 & 0.23319389 & 0.92634107 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.59203829 & 0.23319389 & 0.92634107 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.65487915 & 0.23319389 & 0.92634107 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.83833937 & 0.23319389 & 0.92634107 & 0.01005034 & 1.10866262
 \end{bmatrix}
 * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 -2.97800569 \\
 -2.46048929 \\
 -2.86155401 \\
 -2.02457761 \\
 -2.45529848 \\
 -2.71605665 \\
 -2.80561469 \\
 -2.99152872 \\
 -2.21200673 \\
 -2.65306626 \\
 -1.45933373 \\
 -1.88957008 \\
 -2.17880251 \\
 -2.27895859 \\
 -2.51214463 \\
 -3.32642358 \\
 -2.7854024 \\
 -3.19422263 \\
 -2.88171323 \\
 -3.3001803 \\
 -3.54312456 \\
 -3.56251227 \\
 -3.57275799 \\
 -2.36047472 \\
 -2.79501622 \\
 -1.56917201 \\
 -1.97988412 \\
 -2.24964387 \\
 -2.34621018 \\
 -2.5920688
 \end{bmatrix}$$

Dont la résolution de ce système est obtenue par la méthode de pseudo inverse,

{X=pinv(a)\*(b)}, dont la résolution de ce système nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 x = 1.5339 \dots\dots\dots (1) \\
 y = -2.5700 \dots\dots\dots (2) \\
 z = -0.5369 \dots\dots\dots (3) \\
 t = -2.3675 \dots\dots\dots (4) \\
 w = 9.3068 \dots\dots\dots (5)
 \end{array} \right.$$

Finalement l'expression générale des pertes de charge en régime laminaire avec la disposition en quinconce des chicanes rectangulaires d'une longueur égale à 06 cm est de la forme :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho [(R_e)^{-1.5339} \left(\frac{\epsilon}{D_H}\right)^{-2.5700} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0.5369} \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-2.3675} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{9.3068}] \cdot V^2 \quad \text{(III-09)}$$

Donc le coefficient des pertes de charge ou de frottement est :

$$\lambda = [(R_e)^{-1.5339} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-2.5700} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0.5369} \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-2.3675} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{9.3068}] \quad (\text{III-10})$$

*A savoir que cette dernière relation empirique n'est valable que pour les chicanes rectangulaires disposées en quinconce pour un régime d'écoulement laminaire.*

### III.2. Expression des pertes de charge en régime turbulent :

De la même façon que pour le régime turbulent on considère les données de départ suivantes :

- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.31; 1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0173$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0177$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0185$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.025$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0198$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.31; 1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0173$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0177$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).

- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0185$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.05$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0198$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.31; 1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0173$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0177$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.03$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 90^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.05; 1.31; 1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0189$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 60^\circ$ ,  $v_{exp} = \{1.54; 1.64; 1.97; 2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0185$  m).
- ( $L_{ch} = 0.06$  m,  $h = 0.02$  m,  $P_{e-ch} = 0.02$  m,  $P_{e-r} = 0.1$  m,  $\beta = 30^\circ$ ,  $v_{exp} = \{2.3; 2.96; 3.29; 3.71\}$  m/s,  $\rho_{air} = 1.225$  [kg/m<sup>3</sup>],  $\mu_{air} = 18.5 \times 10^{-6}$  [kg/m.s],  $D_h = 0.0198$  m).

On procédant de la même façon que le cas du régime laminaire, on obtient la relation suivante :

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

$$\implies \frac{2 \Delta P D_H}{L \rho V^2} = [(R_e)^{-x} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^y \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^z \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^t \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^w]$$

$$\implies \ln \frac{2 \Delta P D_H}{L \rho V^2} = \ln [(R_e)^{-x} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^y \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^z \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^t \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^w]$$

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

On remplaçant les données précédentes dans la relation (III-9), de la même façon on aura le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix}
 -8.12580257 & 0.36816932 & 0.36816932 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.28760643 & 0.36816932 & 0.36816932 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.35044415 & 0.36816932 & 0.36816932 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.53376118 & 0.36816932 & 0.36816932 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.68862399 & 0.36816932 & 0.36816932 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.01379988 & 0.34531119 & 0.34531119 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -8.07641277 & 0.34531119 & 0.34531119 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -8.25995238 & 0.34531119 & 0.34531119 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -8.41471297 & 0.34531119 & 0.34531119 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -7.94646185 & 0.32296389 & 0.32296389 & 0.09982034 & 1.19843262 \\
 -8.1676499 & 0.32296389 & 0.32296389 & 0.09982034 & 1.19843262 \\
 -8.32945539 & 0.32296389 & 0.32296389 & 0.09982034 & 1.19843262 \\
 -8.30276158 & 0.30110509 & 0.30110509 & 0.07796154 & 1.17657383 \\
 -8.47124977 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -8.35112916 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -8.2453556 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -7.99286008 & 0.23319389 & 0.23319389 & 0.01005034 & 1.10866262 \\
 -8.12580257 & 0.36816932 & 1.0613165 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.28760643 & 0.36816932 & 1.0613165 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.35044415 & 0.36816932 & 1.0613165 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.53376118 & 0.36816932 & 1.0613165 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.68862399 & 0.36816932 & 1.0613165 & 0.55049088 & 1.24363806 \\
 -8.01379988 & 0.34531119 & 1.03845837 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -8.07641277 & 0.34531119 & 1.03845837 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -8.25995238 & 0.34531119 & 1.03845837 & 0.52763274 & 1.22077992 \\
 -8.1676499 & 0.32296389 & 1.01611107 & 0.09843262 & 1.19843262 \\
 -8.32945539 & 0.32296389 & 1.01611107 & 0.09843262 & 1.19843262 \\
 -8.39229188 & 0.32296389 & 1.01611107 & 0.09843262 & 1.19843262 \\
 -8.30276158 & 0.30110509 & 0.99425227 & 0.07796154 & 1.17657383 \\
 -8.2453556 & 0.23319389 & 0.92634107 & 0.01005034 & 1.10866262
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 * \\
 \begin{bmatrix}
 x \\
 y \\
 z \\
 t \\
 w
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -3.39730191 \\
 -3.66143615 \\
 -3.75864754 \\
 -3.94694999 \\
 -4.01865619 \\
 -3.09628819 \\
 -3.17361937 \\
 -3.34255951 \\
 -3.46317682 \\
 -2.59613743 \\
 -3.02104025 \\
 -3.3096859 \\
 -3.21374561 \\
 -2.71041394 \\
 -2.71970631 \\
 -2.70910874 \\
 -2.63366115 \\
 -3.72714687 \\
 -3.99007672 \\
 -4.06988854 \\
 -4.2612913 \\
 -4.37927591 \\
 -3.44680305 \\
 -3.53073397 \\
 -3.69906322 \\
 -3.13496837 \\
 -3.40544826 \\
 -3.50606397 \\
 -3.34067283 \\
 -2.86178953
 \end{bmatrix}$$

Dont la solution de ce système nous donne :

$$\begin{cases}
 x = 1.1523 \dots\dots\dots (1) \\
 y = -11.0080 \dots\dots\dots (2) \\
 z = -0.3924 \dots\dots\dots (3) \\
 t = -0.7528 \dots\dots\dots (4) \\
 w = 8.4926 \dots\dots\dots (5)
 \end{cases}$$

Ce qui nous permis d'obtenir l'expression des pertes de charge suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \frac{L}{D_H} \rho [(R_e)^{-1.1523} \left(\frac{\epsilon}{D_H}\right)^{-11.0080} \left(\frac{P_{e-ch}}{D_H}\right)^{-0.3924} \left(\frac{P_{e-r}}{D_H}\right)^{-0.7528} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{8.4926}] \cdot V^2 \quad (III-11)$$

Donc le coefficient de frottement est :

$$\lambda = [(Re)^{-1.1523} \left(\frac{\varepsilon}{D_H}\right)^{-11.0080} \left(\frac{Pe_{ch}}{D_H}\right)^{-0.3924} \left(\frac{Pe_r}{D_H}\right)^{-0.7528} \left(\frac{L_{ch}}{D_H}\right)^{8.4926}] \quad (\text{III-12})$$

*A savoir que cette dernière relation empirique n'est valable que pour les chicanes rectangulaires disposées en quinconce pour un régime d'écoulement turbulent.*

### Conclusion

Dans ce troisième chapitre, on a employé la méthode d'analyse dimensionnelle qui a permis à partir des groupements sans dimension indépendants, d'établir des relations empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques et aux paramètres physiques lors de l'écoulement de l'air dans un conduit dynamique rectangulaire muni avec des rugosités artificielles de formes rectangulaires.

Par retour aux résultats expérimentaux on a pu obtenir des corrélations empiriques qui permettent d'estimer les pertes de charge dans une conduite rectangulaire en régime laminaire et turbulent, à savoir que ces relations ne sont valables que pour la disposition en quinconce et pour des chicanes rectangulaires d'une longueur constante égale à 06 cm.

# *Conclusion générale*

---

## **Conclusion :**

Le but de ce présent travail est de mettre en évidence l'influence des caractéristiques géométriques des chicanes sur les pertes de charge occasionnées par celles-ci pour diverses configurations de disposition et pour différents régimes d'écoulement.

Pour achever ce travail on a conçu un modèle de chicane de forme rectangulaire de 06 cm de longueur, où l'effet de la rugosité absolue est représenté par plusieurs valeurs de l'angle d'inclinaison  $\beta$  respectivement égales à  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ .

A partir des résultats expérimentaux obtenus, on a utilisé la méthode de l'analyse dimensionnelle qui a permis d'avoir 06 groupements indépendants, par la suite on a pu établir des corrélations reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des chicanes (pas entre chicanes, pas entre deux rangées successives et rugosité absolue), à savoir que ces relations empiriques ne sont valables que pour la disposition en quinconce et pour des chicanes de forme rectangulaire ayant une longueur égale à 06 cm.

# Références Bibliographiques

- [1]. 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).
- [2]. S. Jurgen, " Mécanique des fluide", Alger (1994).
- [3]. T.T Touiri, M.Chetioui, Etude de l'effet de la géométrie sur les pertes de charge", Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Biskra (2008).
- [4]. R.Comolet, "Mécanique expérimentale des fluide", France (1999).
- [5]. S.Hicher, A.E. Mazouzi, "Effet de la géométrie des chicane sur les pertes de charge d'une conduite rectangulaire, cas des chicanes rectangulaires trapézoïdales, Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Biskra, (2011).
- [6]. PDF, MECA-FLU, Dynamique des fluides visqueux et incompressibles, site web consulté le 09/10/2018. <https://docplayer.fr/69096559-Dynamique-des-fluides-visqueux-incompressibles.html>
- [7]. A.E.H. Sererghissi, F.Merzoug, Modélisation des pertes de charge dans un conduit rectangulaire muni des chicanes rectangulo-triangulaires, Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Biskra, (juin 2011).
- [8]. PDF,"Régime d'écoulement", site web consulté le 20/12/2018. <https://www.ensh.dz/files/Cours/1011/Hydraulique/Chapitre%20IX%20R%C3%A9gimes%20d%E2%80%99Ecoulement.pdf>
- [9]. R.Ouziaux, J.Perrier, Mécanique des fluide appliquée, Dunod, Paris, (1998).
- [10]. J.P.Faroux, J.Renault, Mécanique des fluides et ondes mécanique, Dunod, Paris, (1999).
- [11]. J.L. Bhagoria, J.S.Saini, S.C.Solanki, Heat transfer coefficient and friction factor correlation for rectangular solar air heat duct having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate, Renewable Energy., Vol. 25, N°3, pp.341-369, (2009).
- [12]. N.Chouchane, A.Moumami, B. Achour et N.Moumami. Modèles empiriques de calcul des pertes de charge dans un conduit rectangulaire muni de rugosités artificielles – Cas des insolateurs à air. Revue des Energies Renouvelables. (2009).

## Résumé :

Le but de ce travail consiste à établir des modèles empiriques reliant les pertes de charge aux caractéristiques géométriques des rugosités artificielles sous formes d'ailettes dites chicanes découpées d'acier galvanisé d'épaisseur 0,5 mm lors de l'écoulement de l'air dans une conduite rectangulaire. Ces chicanes sont disposées à l'intérieur d'une conduite rectangulaire suivant différentes configurations où on a adoptée dans cette étude une seule disposition en quinconce. Pour atteindre cet objectif un dispositif expérimental a été conçu pour mesurer les pertes de charge occasionnées par des chicanes rectangulaires de 06 cm de longueur, entre l'amont et l'aval de la conduite pour différentes valeurs du pas entre les chicanes et entre deux rangées successives. Les mesures expérimentales effectuées ont permis d'établir des relations empiriques permettant d'estimer les pertes de charge en régime d'écoulement laminaire et turbulent en fonction de la géométrie de disposition des chicanes en quinconce, de la rugosité absolue, du pas entre les chicanes et du pas entre les rangées.

**Mot clés :** pertes de charge, rugosité artificielle, forme rectangulaire, disposition en quinconce, corrélation, chicane.

## ملخص:

الهدف من هذا العمل هو إنشاء نماذج رقمية تجريبية تربط بين فارق الضغط و الخصائص الهندسية للخشونة الاصطناعية في شكل رقايات تدعى عوارض قطعت من صفائح معدنية مقاومة للصدأ ذات سمك 0.5 مم أثناء تدفق الهواء داخل قناة مستطيلة الشكل. تم ترتيب هذه الحواجز داخل قناة السريان بأشكال و بخصائص مختلفة حيث اعتمدنا في هذه الدراسة ترتيب واحد (ترتيب متداخل). لتحقيق هذا الهدف ، تم تصميم جهاز تجريبي لقياس فرق الضغط الناتج عن عوارض مستطيلة بطول 06 سم، بين المنبع و المصب من القناة لقيم مختلفة بين العوارض و بين صفين متعاقبين. أتاحت القياسات بإعطاء علاقة تجريبية تمكن من حساب فرق الضغط في النظامين الصفحي و المظرب بدلالة الخصائص الهندسية للحواجز المتداخلة للخشونة المطلقة ، و الخطوة بين الحواجز و الخطوة بين الصفوف.

## الكلمات المفتاحية :

فرق الضغط، خشونة اصطناعية، شكل مستطيل، ترتيب متداخل، علاقات رقمية، رقاية.