

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Calculs des pertes de charges dans les conduites de
transport des gaz : élaboration d'un logiciel

Devant le jury composé de :

BORKAN Houda Président
ATIA Abdlmalek Examineur
Dr.BOUKHARI Ali Encadreur

Présenté par :

- HEBAL Mohammed Alamin
- TOUAHRI Abdallah Abbes
- AL CHARABI Amjad

2018-2019

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Nomenclature :i

Liste des tableaux:ii

Liste des figures:ii

Résumé:v

Abstract:vi

ملخص:vii

Introduction générale:1

Chapitre I :

Généralités et ressources bibliographiques

I. Introduction : 3

I.1. Définition d'une canalisation : 3

I.2. Les caractéristiques de la canalisation : 3

I.3. Les types de canalisation : 4

I.4. Description du gaz naturel : 4

I.5. Les gazoducs : 5

I.6. Description du réseau de transport du gaz : 6

I.7. Calculs hydrauliques : 7

I.8. Quelques définitions : 9

I.9. Thermodynamique et physique du son : 10

I.9.1. Propagation des ondes sonores : 10

I.10. Nombre de Mach : 12

I.11. Equations de base d'un écoulement compressible unidimensionnel : 13

I.12. La perte de charge :.....	15
I.13. Ecoulement compressible dans les conduites avec friction (Théorie deFANNO) :	16

Chapitre II

Modèles et corrélations utilisés dans les calculs des pertes de charge

II. Expressions des pertes de charge :	18
II.1. Influence des différentes grandeurs :.....	18
II.2. Pertes de charge régulières :	19
II.2.1. Détermination du facteur de frottement :	19
II.3. Pertes de charges locales :	24
II.3.1. Changements de section :	24
II.3.2. Changements de direction :	28
II.4. Pertes de charge moyenne entre deux sections droites :.....	32

Chapitre III

Méthodes numériques, algorithmes et établissement du code de calculs

II.5. Méthode du point fixe pour les équations non-linéaires :	35
II.6. Formules du coefficient de frottement :	36
II.7. Choix du langage et programmation des différentes méthodes numériques :	37
II.8. Algorithme de calcul des pertes de charge dans les conduites :.....	37
II.9. Relations de nombre de Mach :	40
III.1. Le programme de calculateur de perte de charge en un clin d'œil :	42

Chapitre IV

Validation du programme, résultats et discussions

IV.1. Validation du programme calculateur de perte de charge :	46
IV.2. Résultats de programme et leurs discussions:.....	48
IV.3. Étude de cas : Application aux stations SCB et SCC de Sonatrach :.....	54
IV.3.1. Résumé des résultats d'application.....	56

Conclusion générale

Conclusion générale	59
Référence bibliographie	60

Nomenclature

Lettres grecques :

ρ	Masse volumique.	[kg/m ³]
τ	Contraintes de cisaillement.	[N/m ²]
μ	Viscosité dynamique.	[kg.m/s]
ν	Viscosité cinématique.	[m ² /s]
ε	Rugosité absolue.	[m ² /s]
θ	Angle.	

Lettres latines :

Q_m	Débit massique.	[kg/s]
Q_v	Débit volumique.	[m ³ /s]
V	Vitesse.	[m/s]
D	Diamètre de la conduite.	[m]
D_h	Diamètre hydraulique.	[m]
L	Longueur de la conduite.	[m]
M	Nombre de Mach.	
R_e	Nombre de Reynolds.	
C_p	Capacité calorifique à pression constante.	[J/k]
C_v	Capacité calorifique à volume constante.	[J/k]
P	Pression.	[Par]
T	Température.	[k]
ΔU	Variation d'énergie interne.	[J]
ΔH	Variation d'enthalpie.	[J]
h	hauteur.	[m]
f	Facteur de frottement.	
K	Coefficient de perte de charge singulière.	
R_c	Rayon de courbure.	[m]

Liste des tableaux

<i>Tableau I- 1: la célérité sonore pour divers matériaux à 60°F (15.5°C) et 1 atm.....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau II- 1: rugosité interne du tuyau.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau II- 2: liste des coefficients K pour un type de valve.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau IV- 1: la relation entre la température et la perte de charge.....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau IV- 2: Le rapport entre la longueur de la conduite, le nombre de Mach et perte de charge.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau IV- 3: l'effet du nombre de Mach sur la perte de charge.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau IV- 4: Résumé sur étude de cas.....</i>	<i>56</i>

Liste des figures

<i>Figure I- 1: La production de gaz naturel en 2014.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I- 2: Chaîne de transport par gazoduc.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I- 3: Carte du réseau de transport du gaz naturel.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I- 4: Schéma d'un tube.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I- 5: Propagation de l'onde de compression.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I- 6: Volume de contrôle.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I- 7: Phénomène de perte de charge.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I-8: Volume de contrôle élémentaire pour un écoulement avec friction dans une conduite de section constante.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure II-1: Types de perte de charge.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure II- 2: Le diagramme de Moody.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II- 3: Comme une rugosité de la surface.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II-4: Écoulement d'un fluide dans l'élargissement brusque d'une canalisation. Évolution de la charge du fluide.....</i>	<i>25</i>

Figure II- 5: <i>Écoulement dans un rétrécissement brusque. Évolution de la charge du fluide.</i>	26
Figure II- 6: <i>Écoulement dans un coude de conduite.</i>	29
Figure II- 7: <i>changement des profils des vitesses et de la pression dans le coude et dans la section rectiligne que le suit.</i>	29
Figure II- 8: <i>l'écoulement dans un coude 90° [17].</i>	29
Figure II- 9: <i>Géométries typiques des valves commerciales : (a) valve de porte; (b) valve sphérique; (c) valve angulaire; (d) valve de contrôle d'oscillation; (e) valve de porte de type de disque.</i>	31
Figure II- 10: <i>Écoulement d'un fluide dans une canalisation quelconque reliant deux portions cylindriques contenant les sections droites de référence S_1 et S_2.</i>	33
Figure II- 11: <i>Évolution de la hauteur piézométrique du fluide dans un écoulement de fluide incompressible dans une conduite strictement cylindrique.</i>	34
Figure III- 1: <i>Influence du transfert de chaleur sur le nombre de Mach.</i>	40
Figure III- 2: <i>La partie du calcul de la perte de la charge linéaire du programme.</i>	42
Figure III- 3: <i>A propos du programme de calculateur de perte de charge.</i>	43
Figure III- 4: <i>L'interface utilisateur principale du programme calculateur de perte de charge.</i>	44
Figure III- 5: <i>Les sous-fenêtres du programme calculateur de perte de charge.</i>	45
Figure IV- 1: <i>Quelques courbes extraites des résultats du programme calculateur de perte de charge (Similaire au diagramme de Moody).</i>	47
Figure IV- 2: <i>Pertes de charge variant en fonction de la température du gaz.</i>	49
Figure IV- 3: <i>Courbe de perte de charge en fonction de la longueur de tuyauterie.</i>	51
Figure IV- 4: <i>La courbe du nombre mach en termes de longueur.</i>	52
Figure IV-5: <i>Effet du nombre de Mach sur la perte de charge.</i>	53
Figure IV- 6: <i>Image satellite du tube du gaz naturel entre SCB et SCC (Biskra).</i>	54

Figure IV-7: Introduction d'une spécifié (robinet boisseau sphérique).....55

Figure IV-8:Caractéristiques techniques et physiques du cas étudié.....55

Résumé

Le transport du gaz est très important pour l'état et son économie, et est la bouée de sauvetage de son économie. Il existe de nombreuses façons de le transporter, le plus important transport de gaz naturel par pipeline. Il est exempt de défauts dans ce monde et constitue l'un des problèmes les plus importants auxquels doit faire face le transport de pipelines "la perte de charge".

Nous devons étudier ce phénomène dans le cadre d'une étude numérique, théorique et pratique en complétant un programme pour le calculer "La perte de charge" et en l'appliquant à une situation réelle, ce qui rend notre travail très important du point de vue pratique, industrielle et économique.

Mots-clés :

Perte de charges, Reynoldes ,programme applyque

Abstract

Transport of gas is very important for the state and its economy, it is the lifeline of the national economy and there are many ways to transport it, the most important transport of natural gas through pipelines, and is free of defects in this world and one of the most important problems facing the transport of pipelines is the "pressure or head loss".

In this work, we have to study this phenomenon in a numerical, theoretical and practical way by implementing a program for the calculation of gas pressure losses as well as applying it to a real situation and this makes our work very important from a practical, industrial and economical viewpoints.

key words :

Loss of charge , Reynolds , Application Program

ملخص

نقل الغاز أمر بالغ الأهمية بالنسبة للدولة واقتصادها فهو شريان حياة للاقتصاد الوطني ويوجد طرق عديدة لنقل من أهمها نقل الغاز الطبيعي عبر الأنابيب, ولا يخلو شيء من عيوب في هذا العالم ومن أهم المشاكل التي تواجه النقل عبر الأنابيب الضياع في الشحنة. ولهذا كان الواجب علينا هو دراسة هذه الظاهرة دراسة عديدة ونظرية وتطبيقية من خلال انجاز برنامج لحساب الضياع في الشحنة وكذلك تطبيقه على حالة حقيقية وهذا يجعل عملنا هذا ذا أهمية بالغة من الناحية العملية, الصناعية و الاقتصادية.

الكلمات المفتاحية :

ضياع في الشحنة, رينولدز, برنامج تطبيقي

Introduction générale

Le secteur économique de l'énergie en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie du pays: les hydrocarbures à eux seuls représentent 60 % des recettes du budget et 98 % des recettes d'exportation. L'Algérie est en 2015 le 18^{ème} producteur de pétrole, le 10^{ème} producteur de gaz naturel et le 6^{ème} exportateur de gaz naturel au monde, qui lui donne l'opportunité de jouer un rôle primordial dans le marché international. En 2015, les exportations de gaz naturel de l'Algérie par gazoduc ont atteint 25.0 Mds m³, destinées surtout à l'Espagne : 12.0 Mds m³ et à l'Italie : 6.6 Mds m³. Ses exportations par voie maritime sous forme de GNL ont atteint 16.2 Mds m³, destinées surtout à la France : 4.3 Mds m³, à la Turquie : 3.8 Mds m³ et à l'Espagne : 3.7 Mds m³.

L'Algérie n'a pu exporter ces quantités énormes de ses produits qu'après la mise en place d'une infrastructure solide pour le transport des hydrocarbures (liquides et gazeux), aux niveaux national et international. Cette infrastructure est un réseau vaste de canalisations de tailles différentes selon l'exploitation, qui coûtent d'énormes sommes à la trésorerie nationale, ainsi que l'importance stratégique et la précision technique de sa construction, Malgré ça les problèmes ne sont pas parfaitement évités, dont le plus important est "la perte de charge", ce qui nous oblige à donner l'importance de l'étude de technologie et développement afin d'accroître l'efficacité du transport.

Le réseau de gazoducs est largement répandu sur le territoire national, notamment sur les lignes de transport de HassiRaml-Skikda, GK1, GK2, GK3, HassiRaml-Arzio, GZO, GZ1, GZ2, GZ3 et HassiRaml-L'EuropeGPDF / GME etc. En raison de leur importance, ils ne lâchent pas les problèmes et la plus célèbre perte de charge. Par conséquent, afin d'étudier ce phénomène, nous avons recherché une étude numérique de tous les facteurs contrôlant et interférant avec ce phénomène en complétant un programme nous permettant de calculer la perte de charge. La question est de savoir comment contrôler le phénomène?

Dans note projet de fin d'étude, on a détaillé les méthodes de calcul des différents types de perte de charge, selon quatre chapitres répartis comme suit :

Chapitre I : Généralité et ressources bibliographiques.

Ce chapitre traite des généralités du transport par canalisation, de leurs caractéristiques et de leurs types. Le type de gaz et ses propriétés, les expressions physiques de la dynamique des gaz.

Chapitre II : Modèles et corrélations utilisés dans les calculs de pertes de charge.

Ce chapitre est destiné à parler du phénomène de perte de charge, des types et méthodes de calcul et des facteurs contribuant au phénomène.

Chapitre III : Méthodes numériques, algorithme et établissement du code de calculs.

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les relations numériques et mathématiques entre la perte de charge dans les conduites de transmission de gaz et leur programmation à l'aide du langage de programmation VB.net. Nous avons aussi montré l'interface du programme et les codes de chaque expression.

Chapitre IV : Validation du programme, résultats et discussions.

Nous avons consacré cette partie à confirmer l'efficacité du programme et sa fiabilité dans l'étude du phénomène de "perte de charge" au sein des canaux de transport de gaz. Nous avons tracé les courbes des facteurs impliqués dans ce phénomène et les avons commentées après avoir confirmé la fiabilité du programme. Nous avons également étudié une situation réaliste et comparé celle-ci aux résultats du programme.

I. Introduction :

Cette introduction traite quelques concepts de la discipline de l'aérodynamique des écoulements de fluide visqueux compressible. Quand un fluide se meurt à des vitesses comparables à sa vitesse de son, les variations en densités seront considérable et l'écoulement sera nommé compressible. Ce type d'écoulements est difficile de le réaliser pour les liquides, puisque la génération des vitesses soniques nécessite de hautes pressions de l'ordre de 1000 *atm*. Cependant dans les gaz, un doublement de pression peut causer un écoulement sonique, de ce fait que la science qui étudie l'écoulement compressible des gaz est souvent appelée Gazodynamique [1].

I.1. Définition d'une canalisation :

Une canalisation ou un pipeline(en anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, ou poly-phasiques, d'un endroit à un autre.

Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'aciers soudés de bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol.

Ces pipelines s'avèrent couteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés (c'est le cas sous l'eau) [2].

I.2. Les caractéristiques de la canalisation :

Les caractéristiques de la canalisation ainsi définies, diamètre et épaisseur permettant de fixer pression de service et perte de charges, conduisant à la détermination de l'énergie de pression à fournir au fluide par pompage ou par compression, le problème simple pour les fluides incompressibles, pour lesquels la perte de charges est proportionnelle à la distance, devient évidemment plus complexe pour les gaz, pour lesquels la perte de charge dépend de la pression moyenne dans le tronçon de la canalisation, donc l'espacement des points d'injection de puissance, c'est-à-dire des station de compression.

I.3. Les types de canalisation :

Le nom et le type d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, on parle de **gazoduc**.
- Pour le pétrole, on parle **d'oléoduc**.
- Pour l'eau on parle **d'aqueduc**.
- Pour l'eau salée, on utilise le terme de **saumoduc**.
- Pour l'oxygène, on utilise le terme d'oxygénoduc ou **d'oxyduc**.
- Pour l'hydrogène, on utilise le terme **d'hydrogénoduc** [2].

I.4. Description du gaz naturel :

Le gaz naturel est incolore, inodore, insipide, sans forme particulière et plus léger que l'air. Il se présente sous sa forme gazeuse au-dessus de -161°C . Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers comprenant du méthane, de l'éthane, du propane, des butanes et des pentanes. Cependant, son composant principal est le méthane (au moins 84.87%).

Issu de la dégradation d'anciens organismes vivants, il est souvent présent dans les mêmes zones de production que le pétrole à des profondeurs allant de 1000 à 6000 mètres sous terre, il est extrait par forage[3].

Les caractéristiques principales du gaz naturel sont les suivantes :

- Densité : 0.656 par rapport à l'air.
- Masse volumique : 0.78 kg/ m^3 .
- La capacité énergétique du gaz naturel est appelée Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) : 9482 kCal= m^3 .

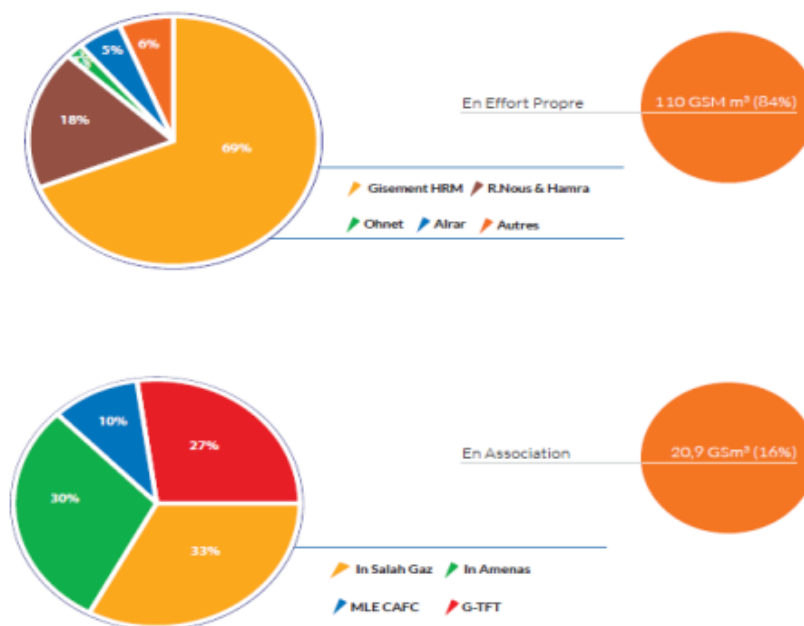


Figure I- 1: La production de gaz naturel en 2014.

I.5. Les gazoducs :

Ils sont le moyen de transport du gaz naturel le plus utilisé car ils sont fiables et rentables. Des tubes d'acier sont soudés pour former une canalisation pouvant atteindre plus de 3 000kilomètres de long. Le diamètre de ces tubes varie entre 20 à 48 pouces (1 pouce =2.54cm).Pour des raisons de sécurité et d'environnement, les gazoducs sont le plus souvent enterrés (de1 à 1.5 mètre).

Cependant, dans les régions désertiques ou lorsque le sol est gelé (ex : pergélisol), le gazoduce est installé à même le sol. Les gazoducs sous-marins sont posés au fond de l'océan.

Chaque gazoduc à sa particularité c'est pour cela qu'il faut affecter à chaque conduite ses propres caractéristiques tels que :

- Les tronçons.
- La longueur en kilomètres.
- Le diamètre en pouce.
- le produit qu'il transporte.
- Le nombre de stations de compression.
- La provenance et la destination.

Il existe deux types de gazoducs :

- **Gazoducs Amont :**

Les lignes amont transportent le gaz produit par les gisements vers les Centres de Dispatching.

- **Gazoducs Aval :**

Les lignes Aval transportent le gaz acheminé par les Gazoducs Amont vers les principales installations gazières nationales au nord ainsi que les clients de SONATRACH (Italie) [4].

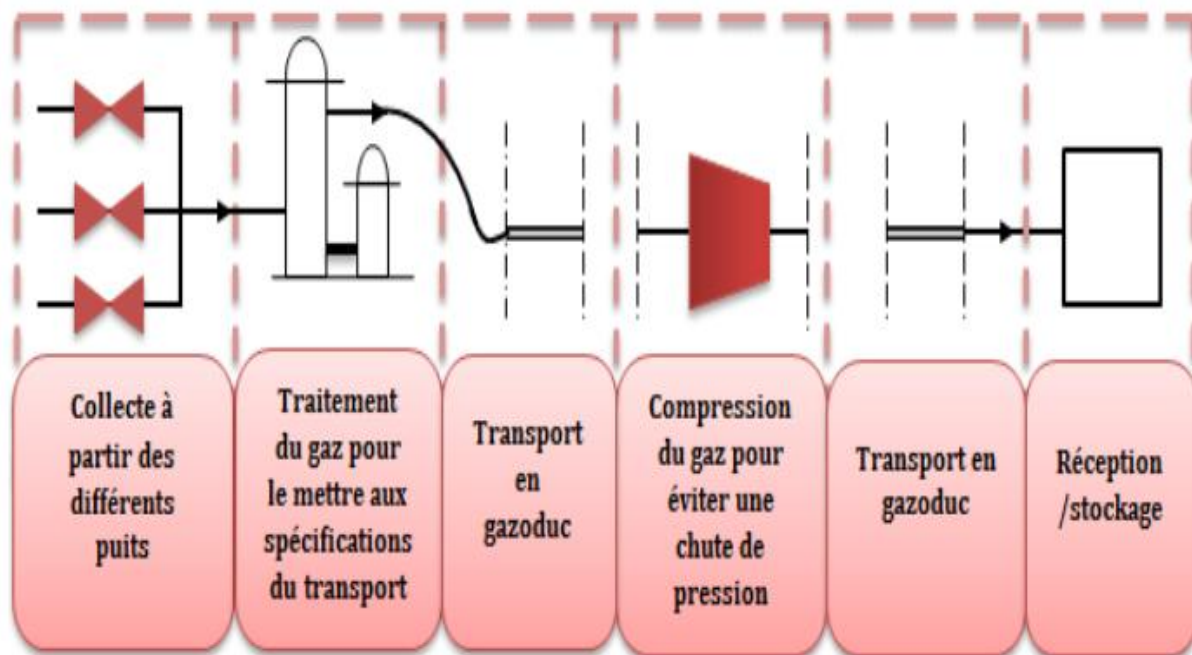


Figure I- 2:Chaîne de transport par gazoduc.

I.6. Description du réseau de transport du gaz :

Le transport du gaz consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution.

A l'échelle nationale ou internationale, le transport du gaz relie les gisements aux réseaux de distribution de manière efficace, généralement invisible et en toute sécurité, les moyens de transport du gaz doivent parfois couvrir de longues distances et traverser plusieurs frontières afin de relier les pays producteurs aux pays consommateurs [3].

Il existe deux moyens complémentaires pour transporter le gaz efficacement :

- les gazoducs.
- la transformation en gaz naturel liquéfié (GNL).

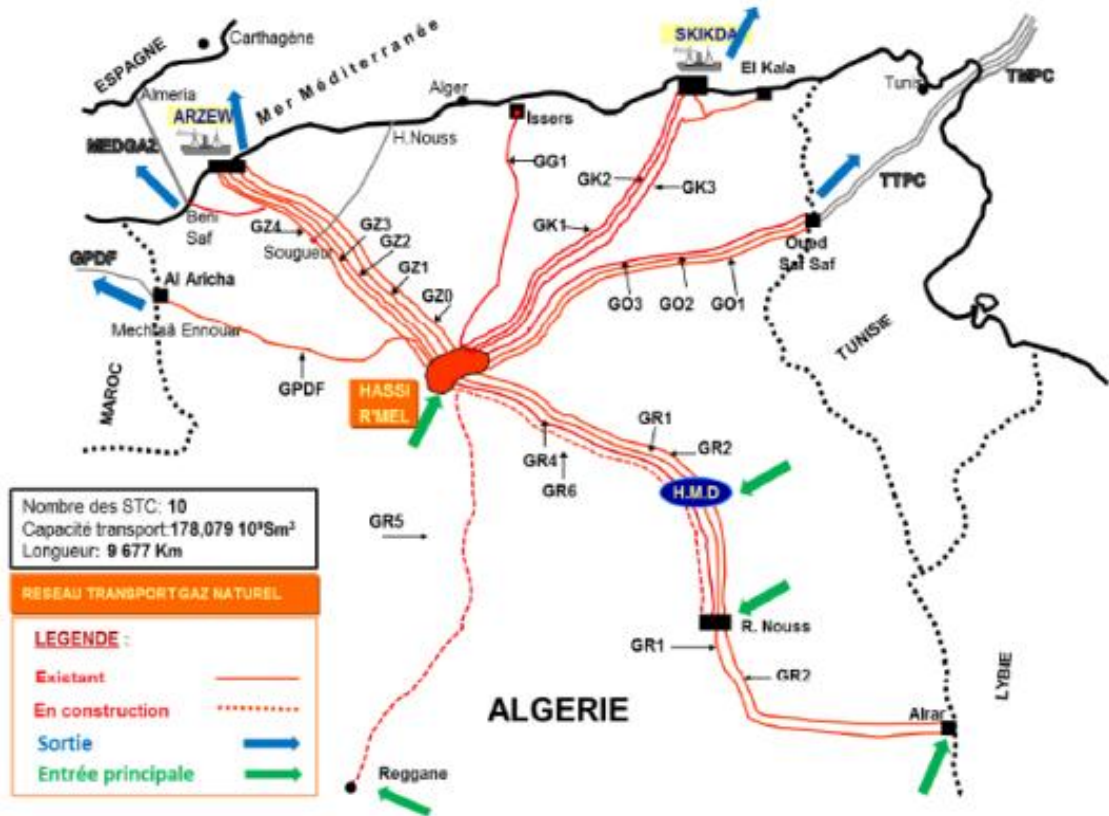


Figure I- 3: Carte du réseau de transport du gaz naturel [4].

I.7. Calculs hydrauliques :

Débit : Un débit est le quotient de la quantité du fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement, on a deux types de débit :

Débit massique M : si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt de cet écoulement, le débit massique est défini comme suit :

$$M = \frac{\Delta m}{\Delta t} [Kg / s] \quad I- 1$$

Débit volumique Q : Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt de cet écoulement, le débit volumique est défini comme suit :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[m^3 / s \right] \quad I-2$$

Le diamètre D : On définit le diamètre d'un gazoduc par la formule suivante :

$$D = \left[D_{ext} \cdot \frac{2.54}{100} \right] - 2.e \quad I-3$$

Où

D : Le diamètre intérieur du tube en mètre.

D_{ext} : Le diamètre extérieur du tube qui est donné en pouces.

e : Épaisseur de la paroi du tube en mètre.

Il faut aussi préciser que : 1 pouce=0.0254 m

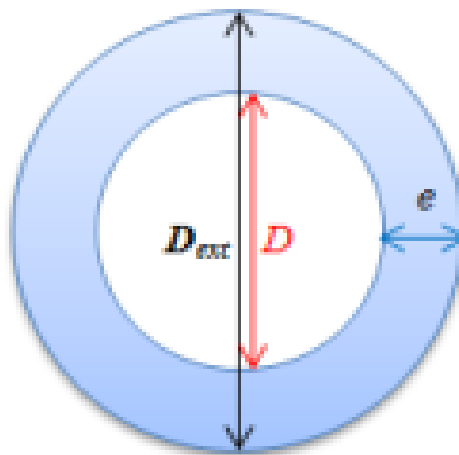


Figure I- 4: Schéma d'un tube.

Diamètre hydraulique : Le diamètre hydraulique D_h et le rayon hydraulique R_h sont communément utilisés pour le calcul des écoulements dans un tube, une conduite hydraulique ou un canal. En utilisant ce diamètre particulier, on peut faire des calculs similaires à ceux d'un tube circulaire. Ces deux grandeurs sont homogènes à une longueur.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad I-4$$

où A est l'aire de la section de passage du tube et P est le périmètre mouillé de cette section. Par exemple, pour un tube de section circulaire de diamètre D , on retrouve [6] :

$$D_h = \frac{4 \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D}$$

Pour un tube de section carrée de côté a , on obtient :

$$D_h = \frac{4a^2}{4a} = a$$

I.8. Quelques définitions :

La gazodynamique :est la branche de la dynamique qui occupe du mouvement de l'air et d'autres fluides gazeux, et des forces réagissant sur un corps en mouvement relatif aux pareils fluides. De tels écoulements compressibles se rencontrent dans les conduites transportant du gaz naturel, ou à travers le diffuseur d'un turboréacteur d'un avion, aux seins des turbines et des compresseurs. Probablement, les deux effets les plus importants de la compressibilité de l'écoulement sont :

1. La suffocation : où la vitesse de l'écoulement dans la conduite (interne) est étroitement limitée par la condition sonique.
2. Les ondes de choc : qui sont des petites discontinuités dans les propriétés de l'écoulement supersonique.

De tels phénomènes pourront être quantifiés en utilisant les équations fondamentales suivantes :

- équation de continuité.
- équations de quantité de mouvement (Navier Stokes).
- équation de l'énergie.
- équation d'état des gaz.

Et en les résolvant simultanément pour quatre inconnues ; pression, densité (masse volumique), température et la vitesse d'écoulement (p, ρ, T, V). Toutefois la théorie des écoulements compressibles est assez compliquée, notamment c'est la raison de supposer la réversibilité et l'adiabaticité de l'écoulement [1].

Alors, la gazodynamique étudie les cas où le parcours libre moyen (Ω) (Mean free path) des particules du gaz est négligeable devant la longueur caractéristique du domaine de

l'écoulement (L). Si $\Omega/L \ll 1/100$ le gaz est considéré comme milieu continu. Ce rapport $\Omega/L \equiv Kn$ est appelé nombre de Knudsen.

Gaz : est un type de fluides qui déplacent sous l'action des contraintes de cisaillement $\tau \equiv \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ et l'influence de la compressibilité est plus importante en comparaison avec l'état de repos.

Viscosité : est définie par le quotient de la contrainte de cisaillement τ au gradient de vitesse ($\frac{\partial u}{\partial y}$; aussi c'est la tension): $\tau \equiv \mu \frac{\partial u}{\partial y} \left[\frac{Kg}{m.s} \right]$, et mesure la résistance du fluide aux cisaillements.

Viscosité cinématique: est définie par $\nu \equiv \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right]$, qui mesure la propagation du mouvement au sein du fluide en mouvement [1].

I.9. Thermodynamique et physique du son :

I.9.1. Propagation des ondes sonores :

Il est bien connu que lorsqu'une minuscule perturbation se développe dans un gaz, la variation résultant de la pression se propage dans toutes les directions sous forme d'une onde de compression (onde longitudinale), c'est ce que l'on entend comme du son. Sa vitesse de propagation est la vitesse du son.

Pour des raisons de simplification, on suppose une onde plane dans un fluide stationnaire (au repos) dans un tube de section uniforme A (Figure I-5).

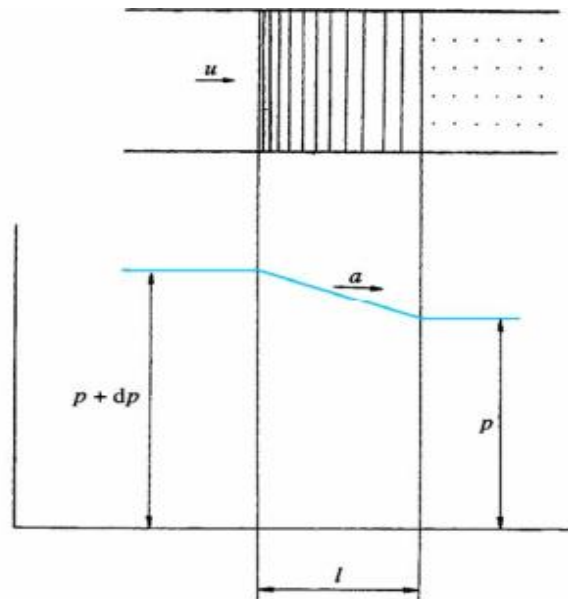


Figure I- 5: Propagation de l'onde de compression.

Des augmentations de la vitesse, le pression et la densité ($u, dp, d\rho$) résultent de ladite perturbation. Entre le front d'onde qui avance à la vitesse sonique a et l'autre plan où elle était née cette perturbation, il y'en a une section de longueur l où la pression était augmentée.

Puisque la durée de l'augmentation de la pression dans l'onde est : $t=l/a$, la masse par unité du temps confinée dans cette section est augmentée par : $Al dp/dt = Aad\rho$. Donc, le gaz de masse $Au(\rho+d\rho) = Au\rho$ s'écoule à travers cette section et l'équation de continuité sera :

$$Aad\rho = Au\rho$$

Ou $ad\rho = u\rho$ I- 5

La vitesse du fluide dans cette section change de 0 à u dans un laps du temps t , de ce fait

on peut la regarder comme ayant une accélération uniforme $\frac{u}{t} = \frac{ua}{l}$.

Puisque la masse est $Al\rho$ en négligeant dp de vanta ρ ; l'équation du mouvement (2^{ème} loi de Newton) sera :

$$Al\rho \cdot \frac{ua}{l} = Adp \Rightarrow$$

$$\rho ua = dp$$
 I- 6

En éliminant u des équations (4) et (5) nous obtenons :

$$a = \sqrt{dp/d\rho}$$

Mais puisque le soudain changement de la pression est considéré comme adiabatique (pas de gradients de température sauf à l'intérieur de l'onde) ; donc ce processus est isentropique, et l'expression de la vitesse sonore sera [7]:

$$a = \sqrt{\left. \frac{dp}{d\rho} \right|_s} \quad \text{I- 7}$$

Valide pour tout fluide, gaz ou liquide, et même pour un solide (voir tableau suivant).

Tableau I- 1: la célérité sonore pour divers matériaux à 60°F (15.5°C) et 1 atm.

	Substance	a [m/s]
Gaz	H ₂	1294
	He	1000
	Air	340
	CO ₂	266
	CH ₄	185
Liquides	Glycérine	1860
	Eau	1490
	Mercure	1450
solides	Aluminium	5150
	Acier	5060

I.10. Nombre de Mach :

Le rapport de la vitesse V à la vitesse du son a , c.-à-d. $M=V/a$, est appelé nombre de Mach. Donc, si on considère un corps placé à la direction d'un écoulement uniforme de vitesse V , au

point de stagnation (d'arrêt), la pression augmente de $\Delta p = \rho V^2/2$ ce qui implique une augmentation de la densité de $\Delta \rho = \Delta p/a^2$; par conséquent :

$$M = \frac{V}{a} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho a^2}} \quad \text{I- 8}$$

En d'autres termes, le nombre de Mach est un nombre adimensionnel qui exprime l'effet de compressibilité d'un fluide en écoulement. D'après l'équation (I.1), le nombre de Mach correspondant à une variation de 5% est environ 0.3, pour cette raison un écoulement stationnaire peut être supposé incompressible jusqu'à un Mach de 0.3.

I.11. Equations de base d'un écoulement compressible unidimensionnel :

En appliquant le premier principe de la thermodynamique à un gaz s'écoulant à travers un volume de contrôle comme représenté sur la (Figure I-6), nous pouvons écrire l'équation de l'énergie entre les deux sections comme suit [8]:

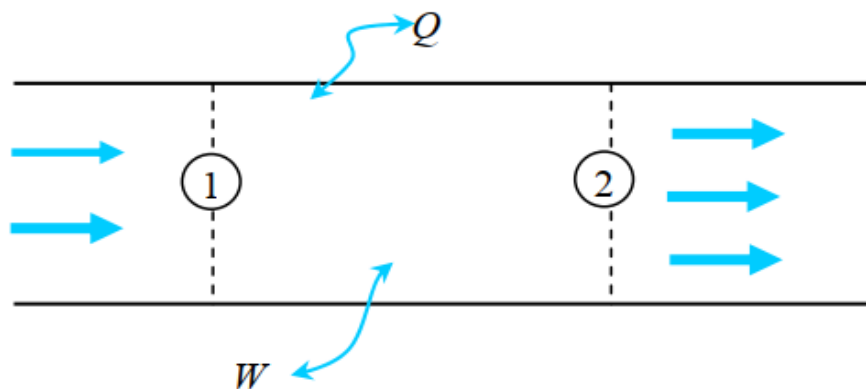


Figure I- 6:Volume de contrôle.

$$C_1 + u_1 + p_1 v_1 + g z_1 + \frac{1}{2} V_1^2 + Q_1 + W_1 = C_2 + u_2 + p_2 v_2 + g z_2 + \frac{1}{2} V_2^2 + Q_2 + W_2$$

Où :

$\Delta C = C_2 + C_1$: La variation de l'énergie chimique.

Δu : La variation de l'énergie interne.

$\Delta W = W_2 - W_1$: La quantité de chaleur échangée.

$g \Delta z$: La variation de l'énergie potentielle.

$p_2 v_2 - p_1 v_1$: La variation du travail spécifique (énergie de pression).

Si on suppose un écoulement sans échanges de chaleur avec l'extérieur, de travail mécanique ou de l'énergie chimique (c'est le cas des écoulements dans les conduites), on obtient :

$$u_1 + p_1 v_1 + g z_1 + \frac{1}{2} V_1^2 = u_2 + p_2 v_2 + g z_2 + \frac{1}{2} V_2^2$$

D'où :

$$u + \frac{p}{\rho} + g z + \frac{1}{2} V^2 = Cte \quad \text{I-9}$$

Cette équation décrit l'énergie totale d'un écoulement de fluide interne (dans les conduites).

Si le fluide en écoulement est incompressible ($\rho = Cte$) avec une négligeable variation de la température qui entraîne une constance de l'énergie interne ; et l'équation (I-9) sera :

$$\frac{p}{\rho} + g z + \frac{1}{2} V^2 = Cte$$

Que l'on appelle l'équation de Bernoulli, ou sous une autre forme :

$$p_t = p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \text{I-10}$$

Où: p : la pression statique.

$\frac{1}{2} \rho V^2$: La pression dynamique.

$\rho g z$: la pression de potentiel (de la pesanteur).

$p_t = Cte$: la pression totale.

Pour un fluide compressible, sans transfert de chaleur, et en introduisant le concept de l'enthalpie on a :

$$h_t = h + g z + \frac{1}{2}V^2 = Cte$$

avec : $h = u + \frac{p}{\rho}$: est l'enthalpie statique

et $h_t = Cte$: est l'enthalpie totale (ou de stagnation).

Donc :
$$h_t = h_1 + g z_1 + \frac{1}{2}V_1^2 = h_2 + g z_2 + \frac{1}{2}V_2^2$$

Mais comme, les variations de l'énergie potentielle sont extrêmement petites devant celles de l'enthalpie et l'énergie cinétique, on peut négliger les termes gz_1 et gz_2 dans nos analyses gazodynamiques, donc l'équation de l'énergie sera finalement :

$$h_t = h + \frac{1}{2}V^2 = Cste \tag{I- 11}$$

Qui donne l'énergie totale d'un écoulement d'un gaz dans les conduites [1].

I.12. La perte de charge :

Lors de son transport dans les gazoducs, le gaz subit des frottements avec les parois des canalisations. Ce qui fait perdre de la pression au gaz et cette perte est appelée perte de charge. C' est le phénomène le plus problématique du transport de gaz et de là provient une des difficultés du problème. En effet, sans la perte de pression induite par ce phénomène, le gaz circulerait très facilement dans les gazoducs.

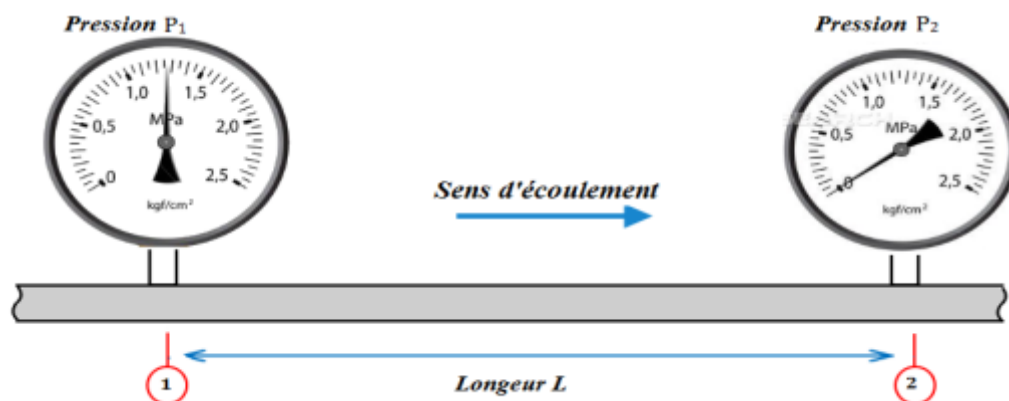


Figure I- 7:Phénomène de perte de charge.

I.13. Ecoulement compressible dans les conduites avec friction (Théorie de FANNO) :

Dance l'effet de changement de section sur un écoulement compressible en négligeant le transfert de chaleur et (le frottement) la friction. Nous pourrions maintenant ajouter la friction et le transfert de chaleur au changement de section et considérer les effets couplés, qui sont faits dans des textes avancés. Au lieu de cela, comme une introduction élémentaire, cette section traite seulement l'effet de la friction, en négligeant le changement de la section et le transfert de chaleur. Les suppositions de base sont :

1. Ecoulement unidimensionnel, stationnaire et adiabatique.
2. Gaz parfait avec des chaleurs spécifiques constantes.
3. Conduite à section droite constante.
4. Travail mécanique et changements d'énergie potentielle négligeables.
5. Contrainte de cisaillement pariétale corrélée par un facteur de friction de Darcy.

En effet, nous étudions un problème de friction des tuyauteries de type Moody, mais avec de grands changements de l'énergie cinétique, l'enthalpie et la pression dans le courant fluide.

Considérons le volume de contrôle élémentaire de la conduite de section A et la longueur dx dans la (Figure I-8).La section est constante, mais d'autres propriétés de flux (p, ρ, T, h, V) peuvent varier avec x [9].

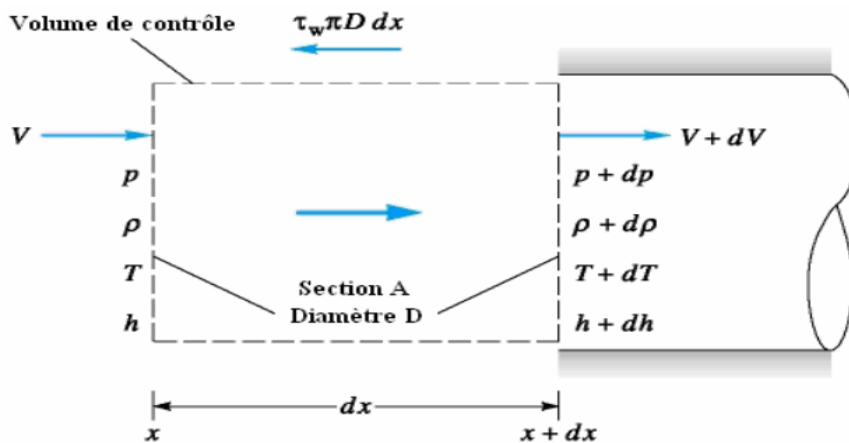


Figure I- 8: Volume de contrôle élémentaire pour un écoulement avec friction dans une conduite de section constante.

L'application des trois lois de conservation à ce volume de contrôle donne trois équations différentielles

Continuité :

$$\rho V = \frac{m}{A} = G = \text{const}$$

Ou
$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0$$

Quantité de mouvement suivant x :

$$pA - (p + dp)A - \tau_w \pi D dx = m(V + dV - V)$$

Ou
$$dp + \frac{4\tau_w dx}{D} + \rho V dV = 0$$

Énergie :
$$h + \frac{1}{2}V^2 = h_0 = c_p T + \frac{1}{2}V^2 \quad \text{I-12}$$

Ou
$$c_p dT + V dV = 0$$

Puisque ces trois équations ont quatre inconnues (p, ρ, T, V).

II. Expressions des pertes de charge :

II.1. Influence des différentes grandeurs :

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes d'énergie spécifiques ou bien **pertes de charge** dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide mais non pas de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

La différence de pression $\Delta p = p_1 - p_2$ entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique a pour origine :

- Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie; on les appelle **pertes de charge régulières ou systématiques**.
- La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc.) ; ce sont les **pertes de charge accidentelles ou singulières**.

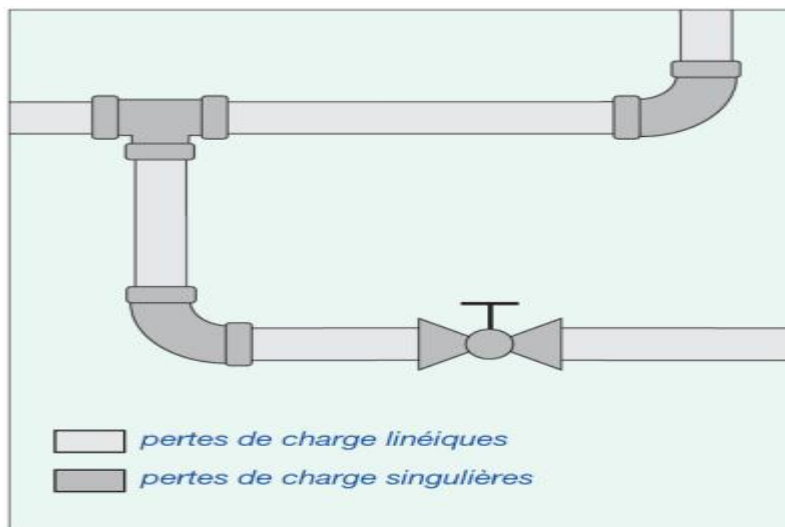


Figure II-1: Types de perte de charge.

Le problème du calcul de ces pertes de charge met en présence les principales grandeurs suivantes:

Le fluide caractérisé par :

- sa masse volumique ρ .

- sa viscosité cinématique ν .

Un tuyau caractérisé par :

- sa section (forme et dimension) en général circulaire (diamètre **D**).
- sa longueur **L**.
- sa rugosité **K** (hauteur moyenne des aspérités de la paroi).

Ces éléments sont liés par des grandeurs comme la vitesse moyenne d'écoulement v ou le débit Q et le nombre de Reynolds **Re** qui joue un rôle primordial dans le calcul des pertes de charge.

II.2. Pertes de charge régulières :

Ce genre de perte est causé par le frottement intérieur qui se produit dans les liquides; il se rencontre dans les tuyaux **lisses** aussi bien que dans les tuyaux **rugueux**.

Entre deux points séparés par une longueur L , dans un tuyau de diamètre D apparaît une perte de pression Δp exprimée sous la forme suivante :

Différence de pression (Pa):

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \text{ [Pa]} \quad \text{II- 1}$$

Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide (m.C.F) :

$$h = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{II- 2}$$

f Est un coefficient sans dimension appelé coefficient de perte de charge linéaire.

Le calcul des pertes de charge repose entièrement sur la détermination de ce coefficient f [10].

II.2.1. Détermination du facteur de frottement :

- **Cas de l'écoulement laminaire : $Re < 2000$:**

Dans ce cas, on peut montrer que le coefficient f est uniquement fonction du nombre de Reynolds Re ; l'état de la surface n'intervient pas et donc f ne dépend pas de k (hauteur moyenne des aspérités du tuyau), ni de la nature de la tuyauterie [11].

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

II- 3

• **Cas de l'écoulement turbulent : $\text{Re} > 2000$:**

Les phénomènes d'écoulement sont beaucoup plus complexes et la détermination du coefficient de perte de charge résulte de mesures expérimentales. C'est ce qui explique la diversité des formules anciennes qui ont été proposées pour sa détermination.

En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re est grand. Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient f en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité k du tuyau [11].

Deux méthodes principales sont utilisées pour déterminer le facteur de frottement :

➤ **Calcul par la méthode de Swamee-Jain :**

Cette méthode est simple, rapide et peu précise.

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln \left(\frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} + \frac{\varepsilon}{3.7D} \right) \right]^2}$$

II- 4

➤ **Calcul par la méthode de White-Colebrook :**

Cette relation est plus compliquée mais elle permet l'évaluation du facteur de frottement dans des méthodes de calcul utilisant des moyens électroniques.

La formule de Colebrook est actuellement considérée comme celle qui traduit le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent. Elle est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2. \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

II- 5

L'utilisation directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives ; on emploie aussi en pratique des représentations graphiques (abaques). Pour simplifier cette relation, on peut chercher à savoir si l'écoulement est hydrauliquement lisse ou rugueux pour évaluer la prédominance des deux termes entre parenthèses dans la relation de Colebrook.

ε : Rugosité (dimension moyenne des aspérités de la paroi).

Plusieurs chercheurs ont travaillé et publié des relations qui sont ou bien plus précises mais plus complexes ou bien simples mais moins précises. Entre autres, on peut mentionner l'équation de Pecornic (1963) et de Haaland (1983).

Moody (1944) a publié un diagramme tracé à partir de l'équation de Colebrook, qui s'appelle le diagramme de Moody (illustré sur la Figure II-2), Il a une précision de $\pm 15\%$ dans la région utilisée.

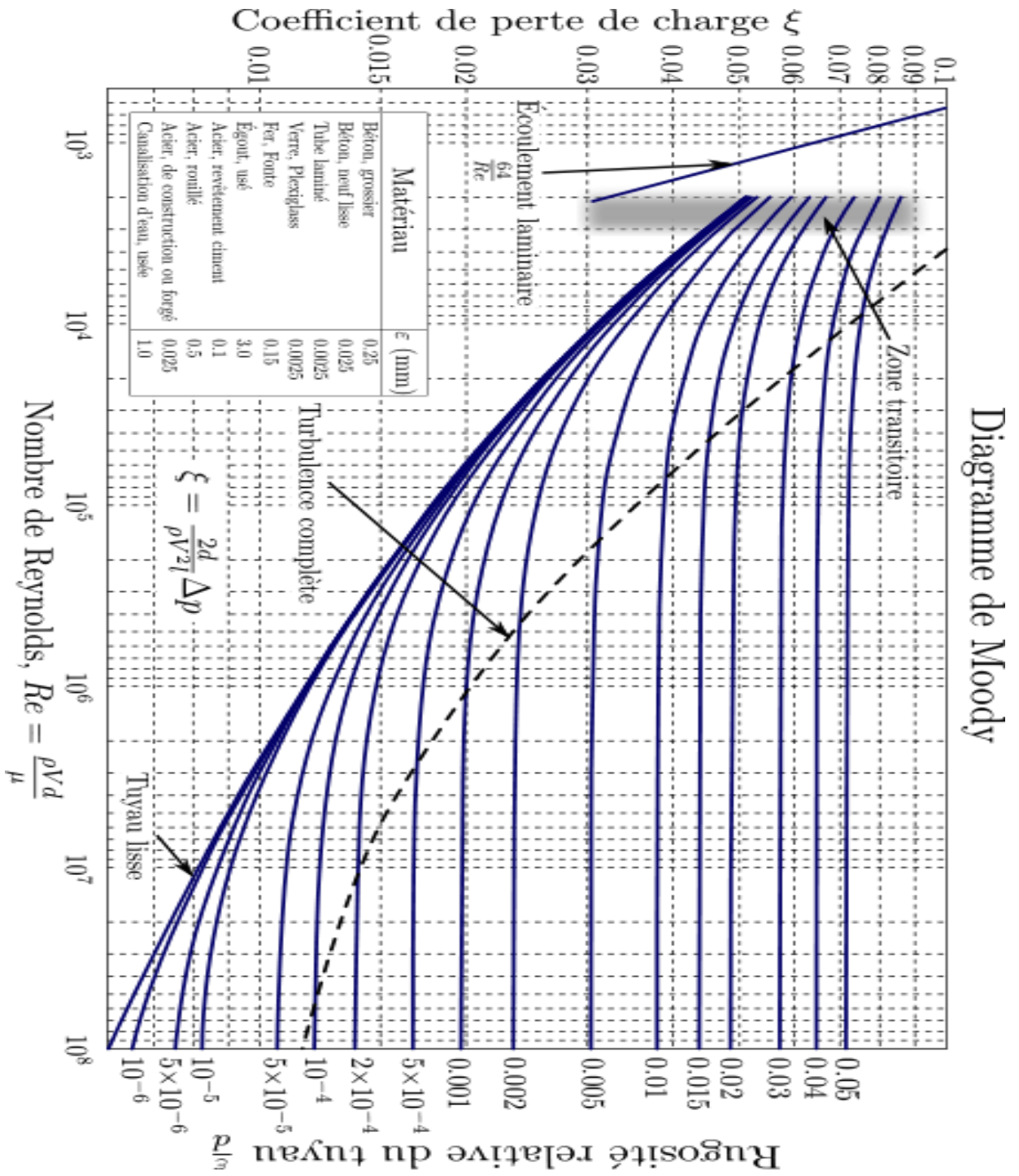


Figure II- 1: Le diagramme de Moody.

La rugosité relative ε_r est le rapport entre la rugosité absolue ε de la conduite et son diamètre D : $\varepsilon_r = \varepsilon/D$ La rugosité absolue ε représente la hauteur des aspérités présentes dans toutes les conduites industrielles, on donne quelques valeurs de ε qui dépendent essentiellement du matériau en contact avec le fluide.

La rugosité absolue représente l'épaisseur moyenne des aspérités de surface des matériaux composant la conduite, on la note ε , et on exprime le plus souvent en mm [12].



Figure II- 2: Comme une rugosité de la surface.

Pour une conduite de diamètre D donné, on appelle rugosité relative le rapport ε / D .

Tableau II- 1: rugosité interne du tuyau [13].

matériau du tuyau	Rugosité in	Rugosité Mm
Acier riveté	0.0354 à 0.354	0.9 à 9.0
Acier commercial / acier soudé	0.0018	0.045
Fonte de fer	0.0102	0.26
Fer galvanisé	0.0053	0.15
Fonte asphaltée	0.0047	0.12
Fer forgé	0.0018	0.045
PVC, tube étiré, verre	0.000059	0.0015
Béton	0.0118 à 0.118	0.3 à 3.0

Point Important : Dans l'industrie et dans certains pays, on utilise le coefficient de friction défini d'une autre façon dit le coefficient de friction de Fanning C_f . Ce coefficient est différent du celui de Darcy-Weisbach par un facteur de 4 :

$$f = 4C_f \quad \text{II- 6}$$

II.3. Pertes de charges locales :

Les pertes de charges locales sont causées par les frottements et les décollements de la couche limite dans des accessoires tels que des coudes, des raccords, des té, des réductions ou expansions, des clapets, des robinets-vannes... etc.

Chaque accessoire possède un coefficient, déterminé expérimentalement par le fabricant, qui dépend essentiellement de sa forme et de son matériau [14].

La perte causée par un des accessoires s'écrit :

$$h = K \frac{V^2}{2g} \quad \text{II- 7}$$

K : Coefficient de perte de charge singulière.

Lorsque la géométrie de la pièce comporte une entrée et une sortie de section différente, les vitesses d'entrée et de sortie sont différentes. Il est important de connaître par rapport à laquelle de ces deux vitesses le coefficient K est associé.

II.3.1. Changements de section :

- **Élargissement brusque:**

L'élargissement brusque dans une canalisation est représenté sur la (Figure II-4). Étudions l'écoulement du fluide entre deux sections : la section AA' et la section CC'.

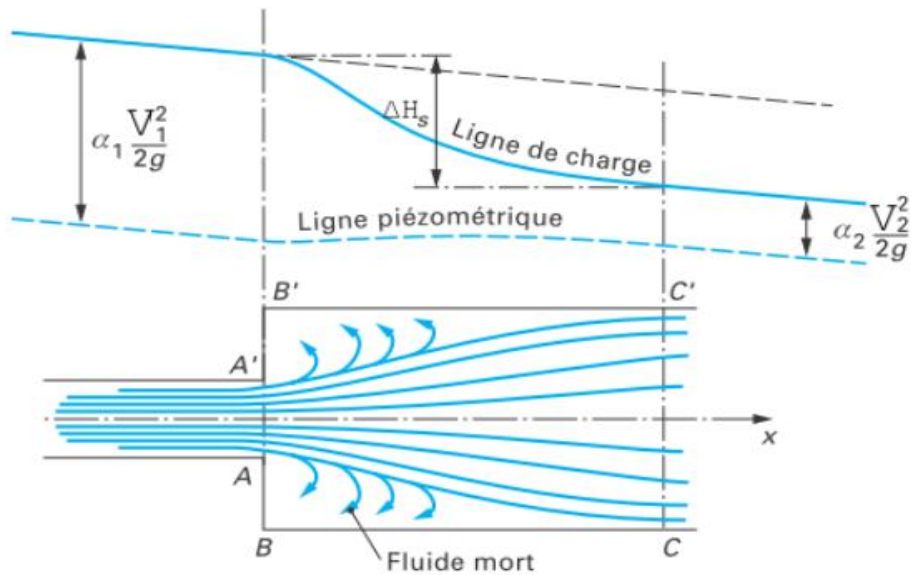


Figure II- 3: Écoulement d'un fluide dans l'élargissement brusque d'une canalisation. Évolution de la charge du fluide.

L'élargissement étant situé à l'aval de AA', dans cette section les trajectoires sont encore rectilignes. Pour qu'elles soient rectilignes en CC', il faut que cette section soit suffisamment éloignée de AA', c'est-à-dire à une distance de l'ordre de 20 fois le diamètre [15].

La perte de charge singulière d'un élargissement brusque est due à la transformation en chaleur d'une partie de l'énergie par les chocs et les tourbillons qui sont produits par l'éclatement de la veine fluide à l'aval de AA'. En effet, on constate, entre AA' et CC', une zone tourbillonnaire extérieure à la veine d'écoulement que l'on appelle **zone de fluide mort**. Il s'ensuit immédiatement que la contrainte de cisaillement habituelle à la paroi n'existe quasiment pas entre AA' et CC' puisque sur BC le fluide au contact n'a pratiquement pas de mouvement global dans le sens de l'axe. Dans les sections BB d'une part, CC' d'autre part, les pressions étoilées restent constants (filets fluides rectilignes en CC', filets fluides rectilignes sur AA' et fluide quasi immobile sur la section en couronne entre BB' et AA'). Si on fait l'hypothèse simplificatrice que la vitesse a un profil constant sur une section droite (ce qui s'écarte peu de la réalité en régime turbulent), l'équation intégrée de la quantité de mouvement (appelée aussi équation d'Euler) appliquée à l'élément de fluide compris entre BB' et CC' s'écrit :

$$R = Q_m (V_2 - V_1) \tag{II- 8}$$

Si cette hypothèse n'est pas acceptable, il suffit de multiplier chacun des vectrices vitesses moyennes de l'équation (II-8) par le coefficient d'impulsion de la section considérée.

Les vitesses étant dirigées selon l'axe de la canalisation, la résultante R des forces, qui s'appliquent sur le fluide, a la même direction.

Donc pour l'élargissement brutal :

$$\Delta H = K \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{II- 9}$$

Avec $K = 2 - \frac{8 S_1}{3 S_2} + \frac{2 S_1^2}{3 S_2^2}$ si l'écoulement est laminaire, et

$$K = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad \text{II- 10}$$

S'il est turbulent (profil de vitesse uniforme). On emploie S_1 pour la section amont et S_2 pour l'aval.

- l'entrée d'un réservoir se déduit en prenant $S_2 \rightarrow \infty$.
- **Rétrécissement brusque:**

L'expérience montre que, au passage d'un rétrécissement brusque, un fluide accuse une certaine perte de charge. Une visualisation de l'écoulement montre que la veine fluide se contracte après son passage au droit même du rétrécissement (Figure II-5). A l'aval.

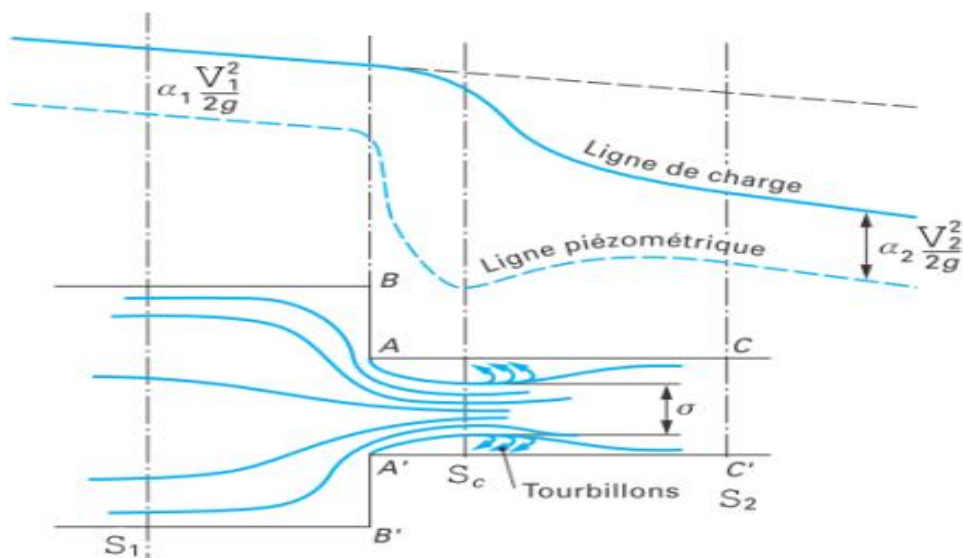


Figure II- 4: Écoulement dans un rétrécissement brusque. Évolution de la charge du fluide.

De ce col, on rencontre des zones tourbillonnaires analogues à celles rencontrées dans le cas des élargissements brusques. De plus, l'expérience montre qu'entre S_1 et S_2 la perte de charge est très faible (de l'ordre des pertes de charge linéaires) devant la perte de charge qui a lieu après le col de section $\sigma = C_c S_2$ (avec C_c coefficient de contraction). La section C_c correspond à l'endroit où les filets du fluide « recollent » à la paroi [15].

Le problème d'un rétrécissement brusque est ainsi analogue à celui d'un élargissement brusque de la section S_2 à la section S_1 . En faisant toujours la même hypothèse sur les profils de vitesse, on peut écrire pour le rétrécissement brutal :

$$\Delta H = K \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{II- 11}$$

Avec :

$$K = \left(1 - \frac{1}{0.59 + 0.41(s_2/s_1)^3} \right)^2 \quad \text{II- 12}$$

Pour un écoulement à l'entrée dans une canalisation on prendra $K=0.5$; c'est la formule de borda pour une canalisation à bord vif.

En réalité, K est légèrement différent de la valeur ci-dessus, à cause notamment de la non-uniformité de vectrices vitesses sur une section droite. Il s'approche d'autant mieux de cette valeur que S_1/S_2 est grand et que le nombre de Reynolds Re est élevé. Les évolutions qualitatives des lignes de charge et ligne piézométrique.

Le coefficient de contraction $C_c = 0.59 + 0.41 \left(\frac{s_2}{s_1} \right)^3$ est toujours inférieur à 1. Il dépend du rapport S_1/S_2 et de l'angle de raccordement, au niveau de la section B entrées deux canalisations. C_c varie de 0,6 à 1 quand S_1/S_2 varie de l'infini à 1. Si le raccordement est arrondi en forme de tuyère, ce coefficient est toujours égal à 1 et, dans ce cas, le changement de section se fait sans perte de charge singulière. Pour ce cas également, les évolutions qualitatives de la ligne de charge et de la ligne piézométrique sont tracées sur la (Figure II-5).

II.3.2. Changements de direction :

- **Coude arrondi :**

Dans un coude (Figure II-7), les lignes de courant ne sont plus rectilignes. Il n'est donc plus possible d'écrire que $P^* = Cte$ en tout point d'une section droite. La projection de l'équation de Navier sur la normale à la trajectoire s'écrit :

$$\rho \frac{V^2}{R_c} = -\frac{\partial P^*}{\partial n} - f_n \quad \text{II- 13}$$

avec, R_c : le rayon de courbure.

f_n : La composante, selon la normale, des forces visqueuses

n : La normale dirigée vers le centre de courbure.

Si le fluide est parfait, f_n est nulle. L'expression (II-12) montre que, le membre de gauche étant essentiellement positif, la pression étoilée diminue quand le point considéré se rapproche du centre de courbure. Ce résultat reste qualitativement valable dans le cas d'un fluide réel pour lequel $f_n \neq 0$. La pression en B est donc supérieure à celle qui règne en A.

Considérons alors ce qui se passe dans une section droite. La différence de pression entre B' et A' se fait sentir davantage sur les particules voisines de la paroi, qui ont une vitesse normale au plan de la section droite faible, que sur celles de la partie médiane qui ont une vitesse normale plus forte. Les particules de la circonférence se déplacent alors de la pression la plus élevée vers la pression la plus basse, c'est-à-dire de B' vers A'. En contrepartie, les particules de la zone médiane vont de B' vers A' comme cela est indiqué sur la (Figure II-7). Ce mouvement crée des pertes de charge supplémentaires qui peuvent encore, lorsque θ de vient grand, être aggravées par des décollements à la paroi dans la partie aval du coude [16].

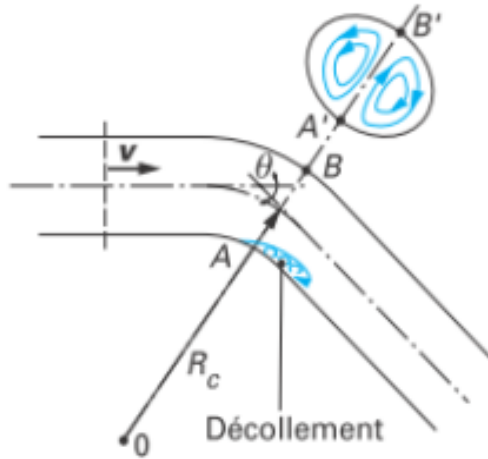


Figure II- 5:Écoulement dans un coude de conduite.

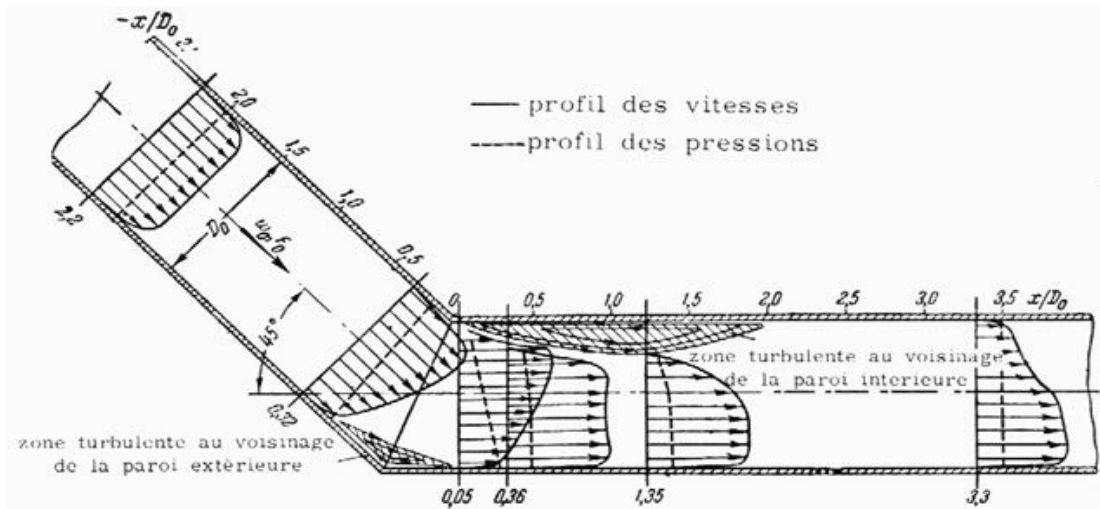


Figure II- 6: changement des profils des vitesses et de la pression dans le coude et dans la section rectiligne que le suit.

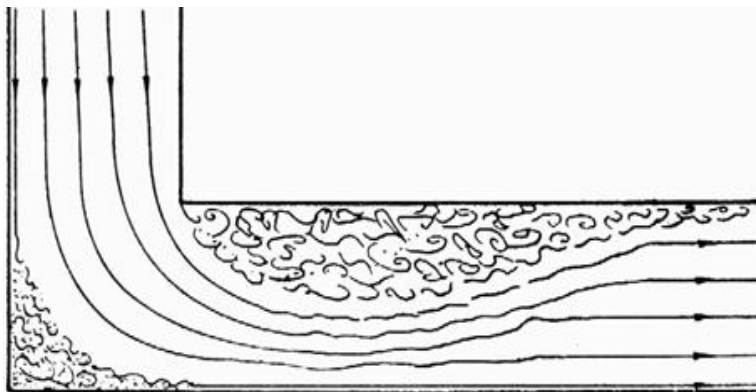


Figure II- 7: l'écoulement dans un coude 90° [17].

Comme pour toutes les pertes de charge singulières, on écrit :

$$\Delta H_s = K \frac{V^2}{2g} \quad \text{II- 14}$$

Avec : $k = f \left(\frac{D}{R_c}, \theta, \text{Re} \right)$ II- 15

Pour des écoulements turbulents, K est indépendant du nombre de Reynolds dès que ce nombre devient assez important ($\cong 10^5$).

Pour un coude de section circulaire et de courbure progressive, on peut utiliser la formule empirique suivante :

$$K = \left[0.13 + 1.85 \left(\frac{D}{2R_c} \right)^{7/2} \right] \frac{\theta}{\pi} \quad \text{II- 16}$$

- **Coude à angle vif :**

Les pertes de charge pour un coude à angle vif sont plus importantes que pour un coude arrondi. Diverses relations pour K ont été proposées. Citons, par exemple, celle de Weisbach :

$$K = 0.9547 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.047 \sin^2 \frac{\theta}{2} \cong 1 - \cos \theta \quad \text{II- 17}$$

Pour un angle droit, $K \cong 1$, ce qui signifie que le coude fait perdre au fluide une quantité d'énergie égale à son énergie cinétique.

- **Valves :**

Il y a beaucoup de conceptions de valve différentes dans l'utilisation commerciale.

La (Figure II-9) montre cinq conceptions typiques : **(a)** la porte, qui descend en glissant à travers la section; **(b)** le globe (ou sphérique), qui se ferme dans une insertion spéciale; **(c)** l'angle, semblable à une valve sphérique mais avec tournée de 90° ; **(d)** La valve de contrôle d'oscillation, qui permet seulement l'écoulement à sens unique; et **(e)** le disque, qui ferme la section avec une porte circulaire. La valve sphérique, avec son chemin de flux tortueux, a les pertes les plus élevées quand s'ouvrent entièrement. On donne beaucoup d'excellents détails de ceux-ci et d'autres valves dans le manuel par Lyon [18].

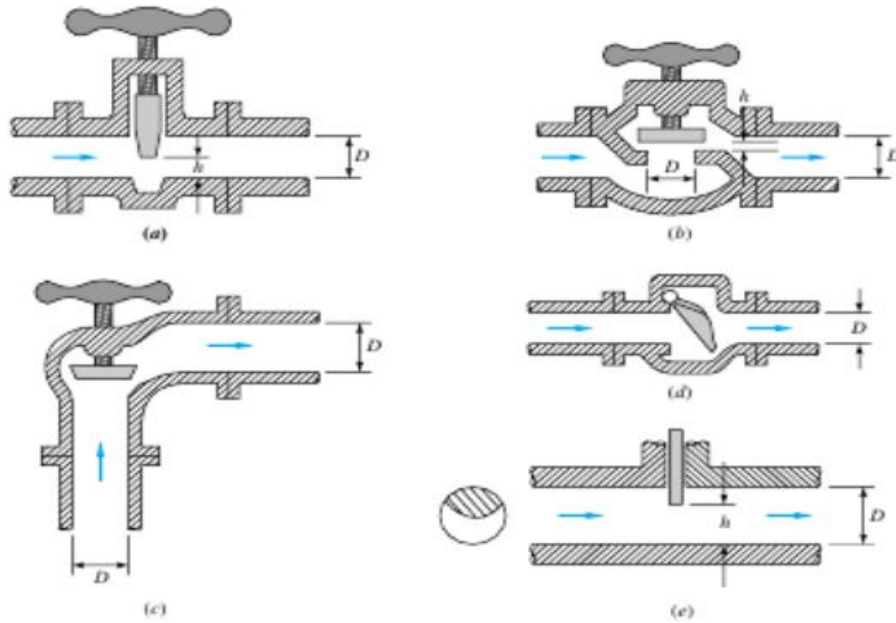


Figure II- 8: Géométries typiques des valves commerciales : (a) valve de porte; (b) valve sphérique; (c) valve angulaire; (d) valve de contrôle d'oscillation; (e) valve de porte de type de disque.

Tableau II- 2: liste des coefficients K pour un type de valve.

		L/D	K
Valve	Totalement ouverte	0.15	7.5
	$\frac{3}{4}$ ouverte	40	1
	$\frac{1}{2}$ ouverte	200	4
	$\frac{1}{4}$ ouverte	800	16

Les pertes de charge dans les valves dans la (Tableau II-2) sont pour différentes conditions d'ouverture. Les pertes peuvent être beaucoup plus élevées pour une valve partiellement ouverte. De nouveau nous devons avertir d'une incertitude possible de ± 50 pour cent. De toutes les pertes mineures (singulières), les valves, à cause de leur géométrie complexe, sont les plus sensibles aux détails de conception des fabricants. Pour plus d'exactitude, on doit consulter la conception particulière et le fabricant.

II.4. Pertes de charge moyenne entre deux sections droites :

Ayant défini une charge moyenne dans une section droite d'un écoulement (laminaire ou turbulent), on peut, comme dans le cas de la charge entre deux points d'une même ligne de courant, définir la perte de charge moyenne entre deux sections droites 1 et 2 d'une canalisation. En effet, la division de l'équation (II-13)

$$\int_{s_1} \left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 \right) V_1 dS_1 = \int_{s_2} \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \right) V_2 dS_2 - \frac{W_t}{\rho g} + \Delta H_{12}$$

Où de sa valeur moyenne par le débit volumique Q_v , s'écrit :

$$\overline{C}_{m1} = \overline{C}_{m2} - \frac{\overline{W}_t}{g} + \frac{\Delta H_{12}}{Q_v} \quad \text{II- 18}$$

Avec W_t , le travail technique, qui correspond à l'énergie mécanique échangée entre l'unité de masse de fluide et les éléments mobiles de la machine.

Si aucune machine n'est située entre les sections 1 et 2, $W_t = 0$ on a :

$$\frac{\Delta H_{12}}{Q_v} = \Delta H_{12} = \overline{C}_{m1} - \overline{C}_{m2} \quad \text{II- 19}$$

Où ΔH_{12} est la perte de la charge moyenne entre les sections 1 et 2. On l'appellera simplement perte de charge entre 1 et 2. La quantité ΔH_{12} représente la perte d'énergie mécanique (énergie cinétique et énergie potentielle de pression et de position) de l'écoulement total lors de son passage de la section 1 (amont) à la section 2 (aval) du fait de la viscosité moléculaire et de la viscosité turbulente cette énergie mécanique, ramenée à l'unité de poids de fluide, est transformée en chaleur et doit donc être considérée comme perdue du point de vue mécanique. Elle correspond, thermodynamiquement à des irréversibilités.

- Dans certains ouvrages le produit $\rho g \Delta H_{12}$ est appelé perte de pression puisque ce produit est dimensionnellement homogène à une pression. Il faut alors bien faire la différence entre la notion de perte de pression (transformation d'énergie mécanique par unité de volume en énergie thermique par unité de volume) et la variation de pression ΔP dont les causes

peuvent être diverses et notamment dues à une transformation d'énergie potentielle de pression en énergie cinétique volumique.

- Il n'est pas nécessaire que la canalisation soit cylindrique en totalité entre les sections envisagées. Il suffit, pour que les résultants précédents et ceux qui seront obtenus par la suite soient valables, que la canalisation soit cylindrique sur une certaine longueur de part et d'autre des sections droites considérées (Figure II-10).
- L'équation (II-15) n'est valable, a priori, que si l'écoulement est permanent puisque son terme inertiel, qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique est nul. Dans le cas d'un écoulement pseudo-permanent, ce terme inertiel est également nul car on peut admettre que la variation dans le temps de la moyenne de la valeur quadratique de la fluctuation est nulle [10].

En explicitant la charge moyenne équation (II-15), l'équation (II-16) s'écrit :

$$\overline{C}_m = \alpha \frac{V^2}{2g} + \frac{\overline{P}^*}{\rho g} \quad \text{II- 20}$$

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{\overline{P}_1^*}{\rho g} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\overline{P}_2^*}{\rho g} + \Delta H_{12} \quad \text{II- 21}$$

Où α_i a la définition donnée par l'équation (II-15). C'est l'équation de Bernoulli applicable entre deux sections droites prises dans des portions rectilignes d'une même canalisation. Comme cela a été souligné plus haut, elle diffère de l'équation de Bernoulli applicable entre deux points d'une même ligne de courant par l'utilisation des vitesses capables du débit α_i .

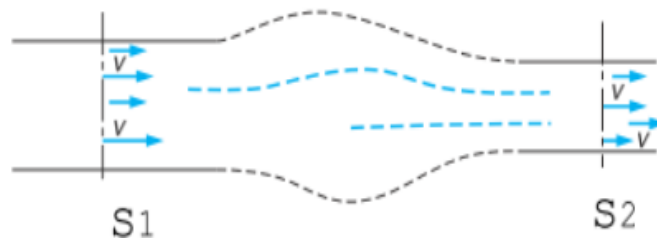


Figure II- 9:Écoulement d'un fluide dans une canalisation quelconque reliant deux portions cylindriques contenant les sections droites de référence S_1 et S_2 .

C'est l'équation qui est universellement appliquée dans les études d'écoulements permanents (ou pseudo permanents) en conduites. Dans le cas où une machine se trouve entre les sections 1 et 2, si cette machine échange l'énergie moyenne \overline{W}_t avec l'unité de masse de fluide, l'équation devient :

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{\overline{P}_1^*}{\rho g} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\overline{P}_2^*}{\rho g} - \frac{\overline{W}_t}{g} + \Delta H_{12}$$

ou encore :

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + \frac{\overline{P}_1^*}{\rho g} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\overline{P}_2^*}{\rho g} - H_e + \Delta H_{12}$$

Avec $H_e = \overline{W}_t / g$ la hauteur effective (moyenne) de la machine.

À ces équations, on joint celle de continuité qui, le fluide étant incompressible, s'écrit en utilisant les vitesses capables du débit :

$$\overline{V} = V_1 S_1 = V_2 S_2$$

II- 22

Un cas d'étude particulier est celui où les sections 1 et 2 ont une aire identique. Si les coefficients de vitesse dans les deux sections sont analogues et s'il n'y a pas de machine entre les sections droites, la perte de charge correspond à la différence de hauteur piézométrique entre les deux sections. Elle peut être mesurée directement par la différence de hauteur du fluide dans les tubes piézométriques correspondants (Figure II-11).

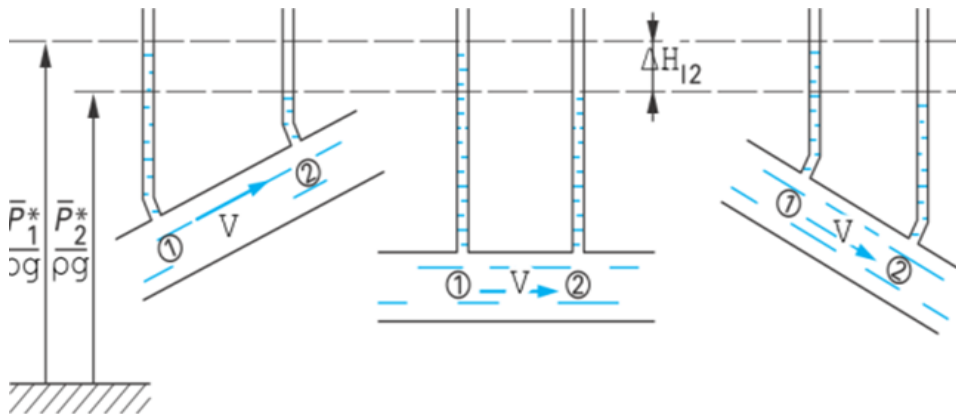


Figure II- 10: Évolution de la hauteur piézométrique du fluide dans un écoulement de fluide incompressible dans une conduite strictement cylindrique.

Méthodes numériques utilisées pour la détermination du coefficient de frottement :

II.5. Méthode du point fixe pour les équations non-linéaires :

Nous donnons dans cette section le procédé général pour trouver les racines d'une équation non linéaire. La méthode est fondée sur le fait qu'il est toujours possible, pour

$f : [a, b] \rightarrow R$, de transformer le problème $f(x) = 0$ en un problème équivalent $x - \varphi(x) = 0$, où la fonction auxiliaire $\varphi : [a, b] \rightarrow R$ a été choisie de manière à ce que $\varphi(\alpha) = \alpha$ quand $f(\alpha) = 0$. Approcher les zéros de f se ramène donc au problème de la détermination des points fixes de φ , ce qui se fait en utilisant l'algorithme itératif suivant :

Étant donné $x^{(0)}$, on pose

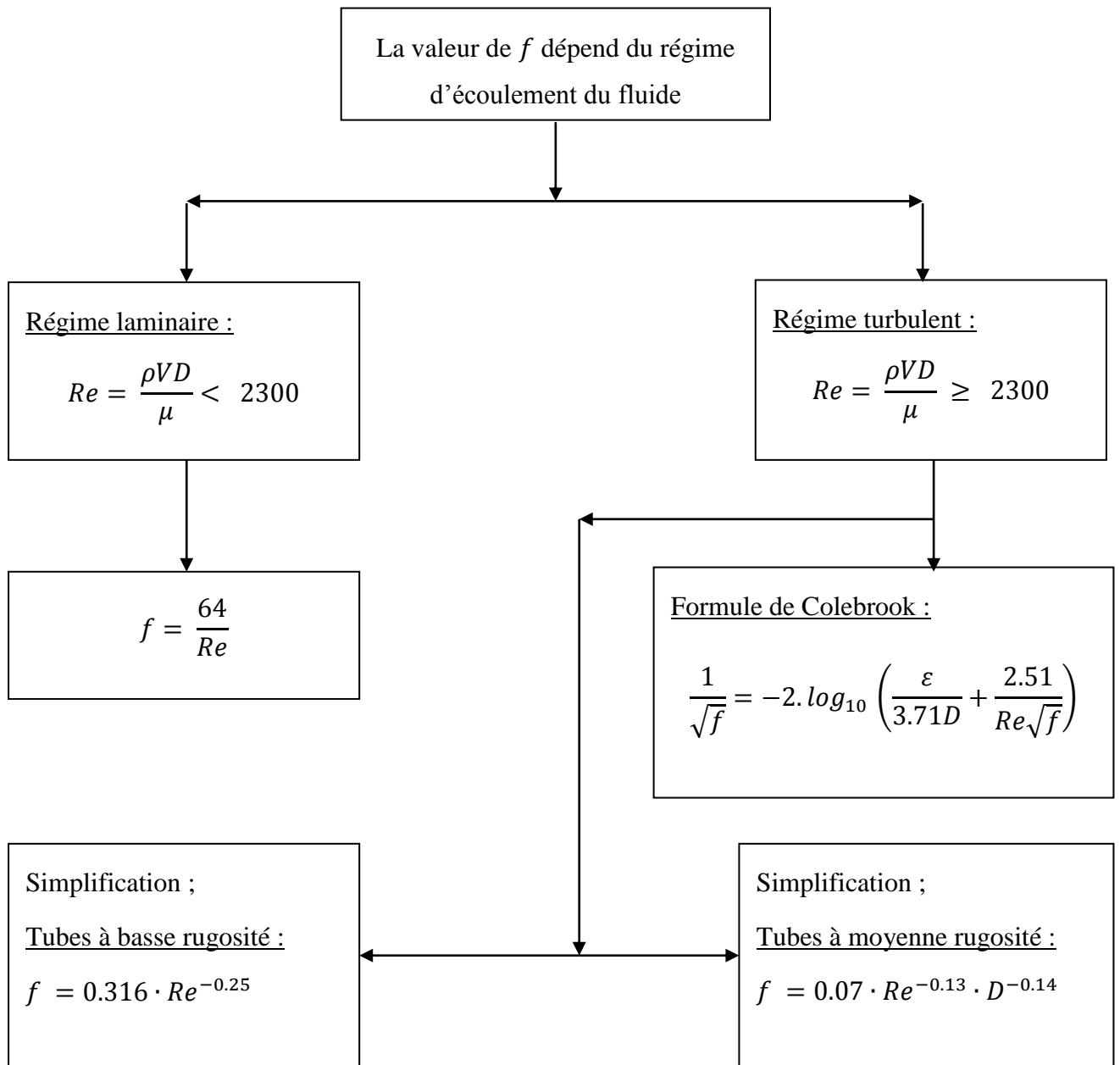
$$x^{(K+1)} = \varphi(x^{(K)}), \quad K \geq 0.$$

On dit que (3.1) est une itération de point fixe et φ la fonction d'itération associée. On appelle parfois (3.1) itération de Picard ou itération fonctionnelle pour la résolution de $f(x) = 0$. Remarquer que, par construction, la méthode du point fixe (appelée aussi méthode des itérations successives) est auto-correctrice c.-à-d. qu'elle converge vers la racine de l'équation $f(x) = 0$, même si on commet une erreur dans les calculs.

Le choix de φ n'est pas unique. Par exemple, toute fonction de la forme $\varphi(x) = x + F(f(x))$, où F est une fonction continue telle que $F(0) = 0$, est une fonction d'itération possible [19].

Exemple : Soit $\varphi = x - x^3$ qui admet $\alpha = 0$ comme point fixe. Bien que $\varphi'(\alpha) = 1$, si $x^{(0)} \in [-1, 1]$ alors $x^{(K)} \in]-1, 1[$ pour $K \geq 1$ et la suite converge (très lentement) vers α (si $x^{(0)} = \pm 1$, on a même $x^{(K)} = \alpha$ pour tout $K \geq 1$). En partant de $x^{(0)} = 1/2$, l'erreur absolue après 2000 itérations vaut 0.0158. Considérons maintenant $\varphi = x - x^3$ qui a aussi $\alpha = 0$ comme point fixe. A nouveau, $\varphi'(\alpha) = 1$ mais dans ce cas la suite $\{x^{(K)}\}$ diverge pour tout choix $x^{(0)} \neq 0$ [20].

II.6. Formules du coefficient de frottement :



II.7. Choix du langage et programmation des différentes méthodes numériques :

Afin d'établir notre code de calcul des pertes de charges dans les conduites nous avons adopté le langage Visual Basic.NET comme langage et le Microsoft Visual Studio « express » comme environnement de programmation (développement intégré), en raison de sa facilité en apprentissage et de sa simplicité de mise en œuvre sous différentes conditions d'utilisation (débugage et maintenance du code). Alors une possible amélioration de l'interface d'utilisateur graphique (GUI) est prévue dans les éventuelles futures révisions et modifications du présent code de calcul.

II.8. Algorithme de calcul des pertes de charge dans les conduites :

En basant sur les données suivantes :

- Le débit massique, $Q_m [Kg/s]$ ou volumique, $Q_v [m^3/s]$ du fluide traversant la tuyauterie.
- Le diamètre de la conduite, $D [m]$.
- Sa longueur, $L [m]$.
- Sa rugosité absolue, $\varepsilon [m]$.
- La viscosité cinématique, $\nu [m^2/s]$.
- Ou la viscosité dynamique, $\mu [Pa.s]$ et la densité, $\rho [Kg/m^3]$ du fluide en écoulement.

Les calculs s'effectueront ainsi :

- 1- Détermination de la vitesse d'écoulement V d'après le débit (massique ou volumique) :

$$V = \frac{4Q_m}{\pi D^2 \rho} \quad ; \text{ou} \quad V = \frac{4Q_v}{\pi D^2} \left[\frac{m}{s} \right].$$

- 2- Calcul du nombre de Reynolds de l'écoulement :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad ; \text{ou} \quad Re = \frac{V D}{\nu}.$$

Try

```
V = Q1 / (((D1 ^ 2) / 4) * Math.PI) ' Calcule Vitesse d'écoulement  
Re = R01 * V * D1 / μ1 'Calcul du nombre de Reynolds de l'écoulement
```

3- Détermination du coefficient de perte de charge selon le régime d'écoulement laminaire:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{III-1}$$

```
If Re < 2300 Then
```

```
F = 64 / Re 'coefficient de frottement dans le régime laminaire
```

4- Détermination du coefficient de perte de charge selon le régime d'écoulement :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{III-2}$$

```
ElseIf Re >= 2300 Then'
```

```
ε = K1 / D1 'Rugosité relative
```

```
n = 0 'Nombre d'itérations successives.
```

```
x = 0 'Estimée initiale
```

```
x0 = 1
```

```
While (Math.Abs(x - x0) >= 0.001)
```

```
x0 = x
```

```
x = (-2.0 * Math.Log10(ε / (3.71) + 2.51 * x0 / (Re))) ' Eq. de Colebrook
```

```
n = n + 1
```

```
EndWhile
```

```
F = 1 / (x * x) 'Output du coefficient de frottement le régime turbulent
```

```
EndIf
```

- 5- Calcul de la perte de charge régulière (linéaire) d'après la formule de Darcy dans la conduite en question :

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2} [Pa]. \quad \text{III- 3}$$

```
Dp1 = (F * L1 / (2 * D1) * R01 * V ^ 2)      'Formule de perte de charge linéaire
```

- 6- Calcul de la perte de charge singulière en considérant les éléments présents dans l'installation (valves, rétrécissements, élargissements, coudes,...):

$$\Delta p_s = K_i \frac{\rho V^2}{2} [Pa] \quad \text{III- 4}$$

```
'La perte de charge de chaque VANNE
KFT = 340 * FT
DPS = (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(vn1.Text)
KFT = 8 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(vn2.Text)
KFT = 3 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(vn3.Text)
'La perte de charge de chaque CLAPET
KFT = 50 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(c11.Text)
KFT = 600 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(c12.Text)
KFT = 40 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(c13.Text)
KFT = 30 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(c14.Text)
KFT = 20 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(c15.Text)
'La perte de charge de chaque COUDE
KFT = 30 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(cd1.Text)
KFT = 16 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(cd2.Text)
KFT = 16 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(cd3.Text)
KFT = 9 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(cd4.Text)
'La perte de charge de chaque TE
KFT = 60 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(TE1.Text)
KFT = 20 * FT
DPS = DPS + (KFT * R01 * V ^ 2 / 2) * Val(TE2.Text)
```

7- Détermination de la perte de charge totale :

$$\Delta H_{totale} = \frac{V^2}{2g} \left\{ \left(f \frac{L}{D} \right) + \left(\sum i K_i \right) \right\} [m] \quad III- 5$$

```
DpT.Text = Str(Dp1 + DPS)
```

II.9. Relations de nombre de Mach :

La limite supérieure est le point sonique, s'il est en réalité ou pas atteint dans l'écoulement de la conduite. La limite inférieure est arbitrairement placée de la position $x = 0$, où le nombre de Mach est M . Le résultat de l'intégration est

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2} \quad III- 6$$

Où \bar{f} est la valeur moyenne du coefficient de friction entre 0 et L^* . En pratique, un f moyen est toujours supposé, et aucune tentative n'est faite pour représenter les légers changements du nombre de Reynolds le long de la conduite. Pour des conduites non circulaires, D est remplacé par le diamètre hydraulique $D_h = (4 \times \text{section}) / \text{périmètre}$.

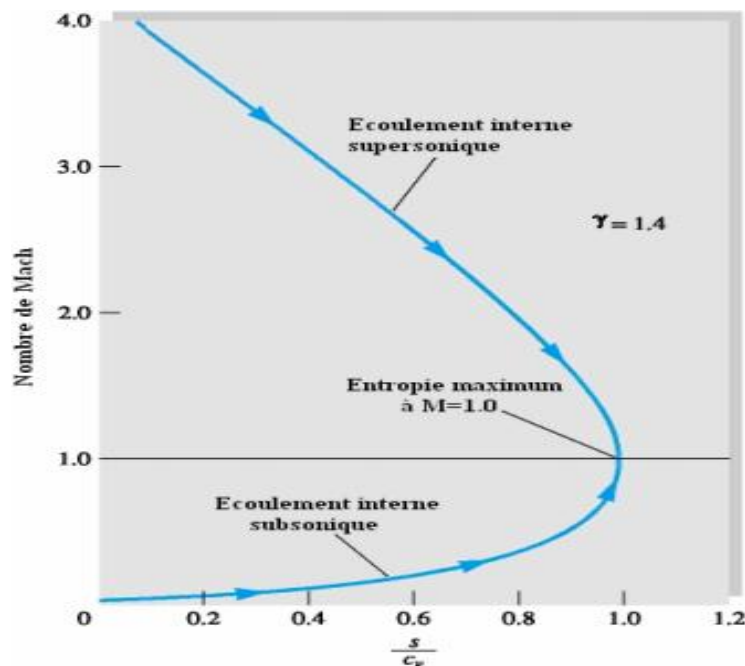


Figure III- 1: Influence du transfert de chaleur sur le nombre de Mach.

La longueur L^* est la longueur de conduite exigée pour développer un écoulement dans la conduite partant du nombre de Mach M jusqu'au point sonique. Beaucoup de problèmes impliquent les conduites courtes qui ne deviennent jamais soniques, pour lequel la solution emploie les différences des longueurs "maximums", ou soniques tabulées. Par exemple, on donne la longueur ΔL exigée pour se développer de M_1 à M_2 par :

$$\bar{f} \frac{\Delta L}{D} = \left(\frac{\bar{f} L^*}{D} \right)_1 - \left(\frac{\bar{f} L^*}{D} \right)_2 \quad \text{III- 7}$$

Cela évite le besoin de tabulations séparées pour des conduites courtes.

Il est recommandé que le coefficient de friction \bar{f} soit estimé du diagramme de Moody pour le nombre de Reynolds moyen et le rapport de la rugosité pariétale du conduit.

```
'Le nombre de Mach
      MAK = V / Math.Sqrt(GM * rs * T1)
Dim qq1, qq2, qq3 AsDouble

qq1 = (1 - MAK ^ 2) / (GM * MAK ^ 2)
qq2 = (GM + 1) / (2 * GM)
      qq3 = Math.Log(((GM + 1) * MAK ^ 2) / (2 + (GM - 1) * MAK ^ 2))

DL.Text = Str((D1 / F) * (qq1 + qq2 * qq3))
```

III.1. Le programme de calculateur de perte de charge en un clin d'œil :

- 1- **Algorithme adopté pour les calculs** : L'algorithme comprend trois parties, une partie qui calcule la perte de la charge linéaire, une partie qui calcule la perte de la charge singulière et une partie finale qui calcule la perte totale. Il peut également calculer la longueur du tube à partir du nombre de Mach en amont (introduit comme input).

```
Form1.vb
Button1 Click
*****PROGRAMME DE CALCUL DES PERTES DE CHARGE POUR LES CANALISATIONS DE TRANSPORT DES GAZ
*****PAR /HEBAL Mohammed Alamin, TOUAHRI Abdallah Abbes, AL CHARABI Amjad
*****VERSION 1.0
*****Copyright 2019
*****Company Name Département de Génie Mécanique
Imports System

Public Class Form1
    Dim Re, V, F, ε, x, x0, Dpl, MAK, FT, KFT, ROV, DPS As Double
    Dim Q1, D1, Fr, RO1, μ1, K1, L1, T1, R0, rs, GM, RM As Double
    Dim n As Integer
    Dim tbl As New DataTable
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1.Click
    Dim II As Int32
    Q1 = Val(Q.Text)
    II = D.SelectedIndex
    D1 = (Cdbl(tbl(II).Item("Diamètre"))) * 0.0254
    Fr = Cdbl(tbl(II).Item("Fr"))
    RO1 = Val(R0.Text)
    μ1 = Val(μ.Text)
    K1 = Val(K.Text) * 0.001
    L1 = Val(L.Text)
    T1 = Val(T.Text) + 273.15
    Try
        V = Q1 / (((D1 ^ 2) / 4) * Math.PI) ' Calcule Vitesse d'écoulement
        Re = RO1 * V * D1 / μ1 'Calcul du nombre de Reynolds de l'écoulement
        If Re < 2300 Then
            F = 64 / Re 'coefficient de frottement dans le régime laminaire
            ' fonction [f,n]=Colebrook(x0,rug,D,Re)
        ElseIf Re >= 2300 Then '
            ε = K1 / D1 'Rugosité relative
            n = 0 'Nombre d'itérations successives.
            x = 0 'Estimée initiale
            x0 = 1
            While (Math.Abs(x - x0) >= 0.001)
                x0 = x
                x = (-2.0 * Math.Log10(ε / (3.71) + 2.51 * x0 / (Re))) ' Eq. de Colebrook
                n = n + 1
            End While

            F = 1 / (x * x) 'Output du coefficient de frottement le régime turbulent
        End If
        Dpl = (F * L1 / (2 * D1) * RO1 * V ^ 2) 'Formule de perte de charge linéaire
    End Try
End Sub
End Class
```

Figure III- 2: La partie du calcul de la perte de la charge linéaire du programme.

2- La boîte de dialogue « A propos de » programme de calculateur de perte de charge : L'interface ouverte du programme contient toutes les informations de base et les définitions pour ce programme dans la boîte de dialogue dite « A propos de » (About Box).

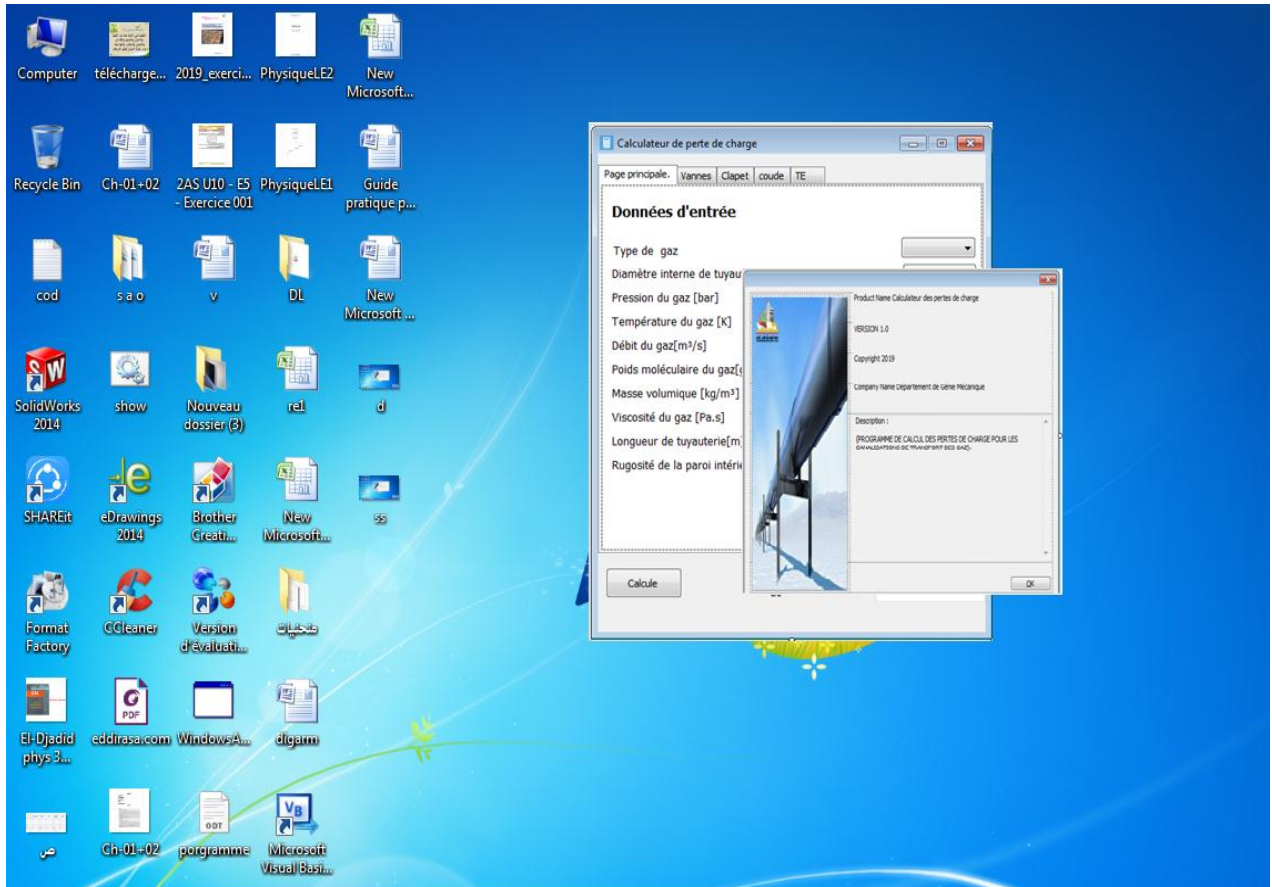


Figure III- 3:A propos du programme de calculateur de perte de charge.

3- **L'interface principale du programme calculateur de perte de charge** : L'interface principale du programme contient toutes les caractéristiques et les quantités physiques décrivant le type d'écoulement du gaz dans le conduit, Il contient également une boîte de dialogue spéciale ci-dessous pour extraire la valeur de la somme des pertes singulières et linéaires et la valeur de la longueur de la conduite que ce gaz peut passer.

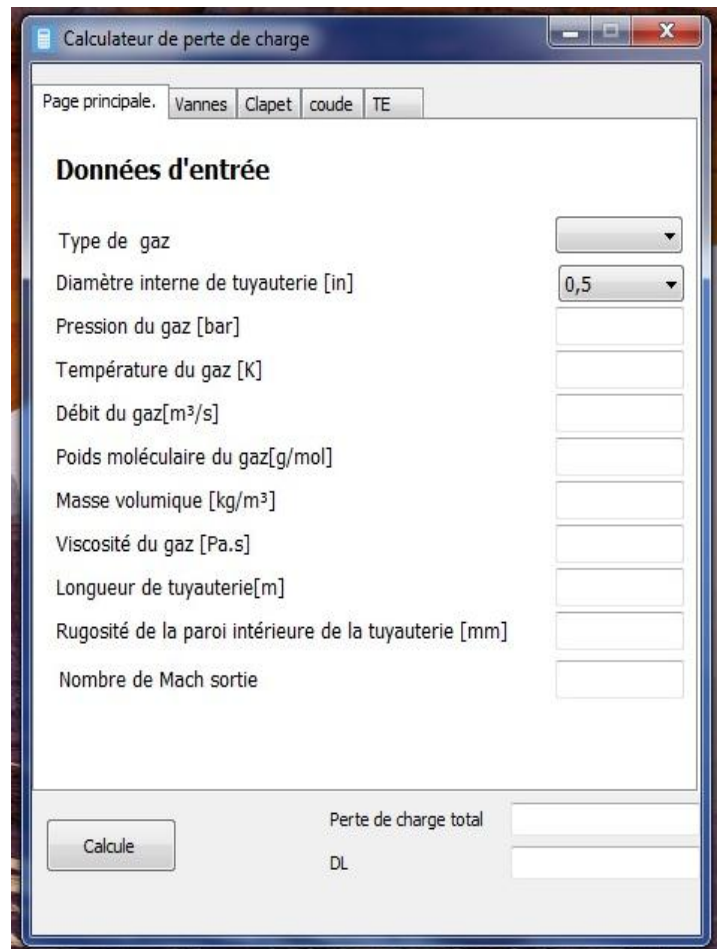


Figure III- 4: L'interface utilisateur principale du programme calculateur de perte de charge.

4- Les sous-fenêtres contiennent des composants contribuant à la perte de pression singulière, tels que : vannes, clapets, coudes et té.

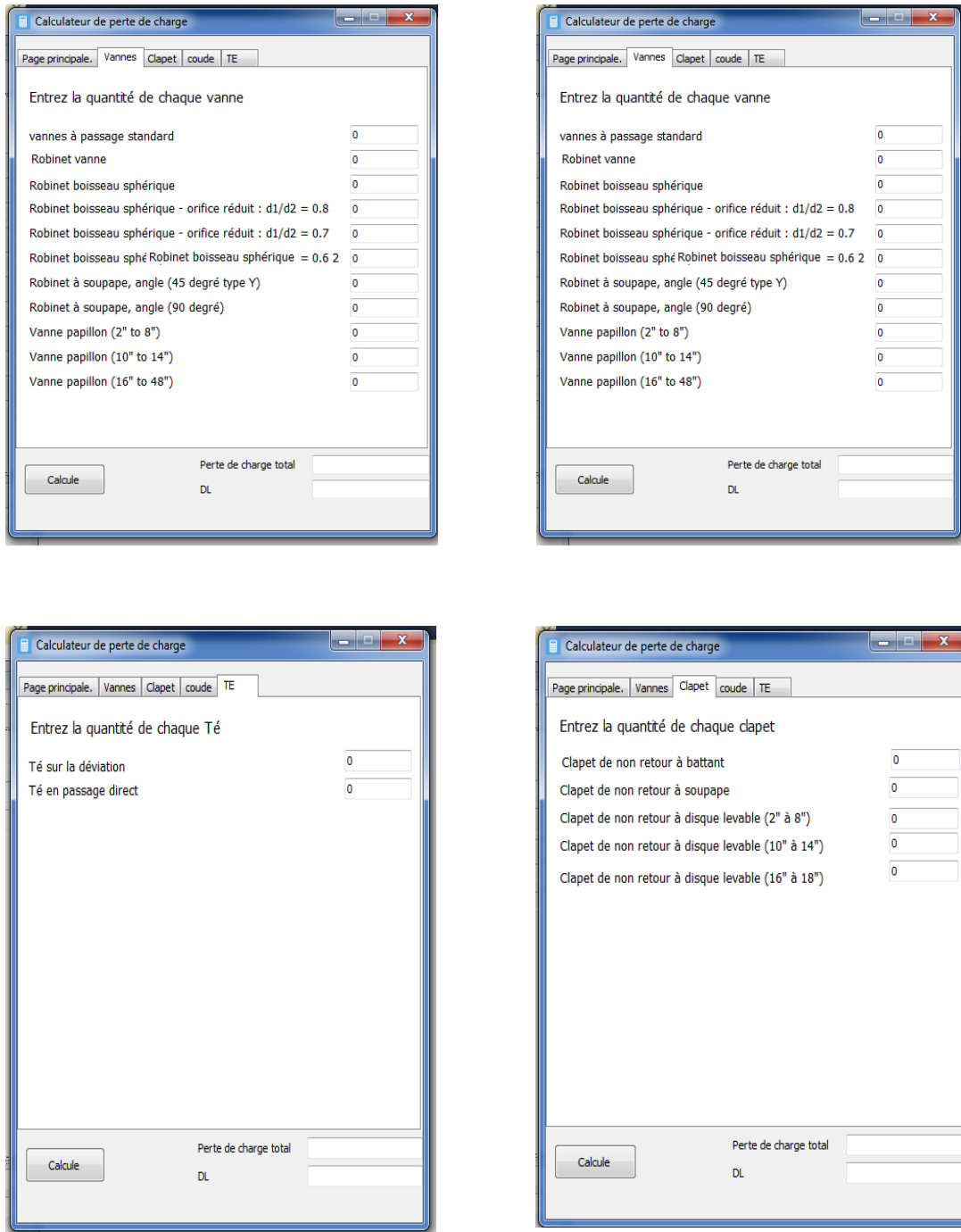


Figure III- 5: Les sous-fenêtres du programme calculateur de perte de charge.

IV.1. Validation du programme calculateur de perte de charge :

Pour vérifier et garantir la fiabilité du programme établi, nous avons calculé le coefficient de frottement f selon l'équation de Colebrook pour les nombres de Reynolds allant de 1 jusqu'à 10^7 , et une plage des débits volumétriques de 0.111 jusqu'à 111×10^5 [m³/s] pour des valeurs de la rugosité absolue de $\varepsilon = 0.05$, $\varepsilon = 0.002$ et $\varepsilon = 5 \times 10^{-6}$ mm.

Ensuite, nous avons converti les résultats en un graphique en utilisant un script écrit en langage Matlab[®], et l'ai comparé au diagramme de Moody voir la (Figure II- 2).

Colebrook équation :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right). \quad \text{IV- 1}$$

Quand l'écoulement est laminaire, l'équation du coefficient de friction a la forme ($f = 64/\text{Re}$) :

$$\log f = \log 64 - \log \text{Re}$$

Si nous posons : $\log f = Y$, $\log \text{Re} = X$, nous obtenons l'équation linéaire suivante :

$$Y = -X + \log 64$$

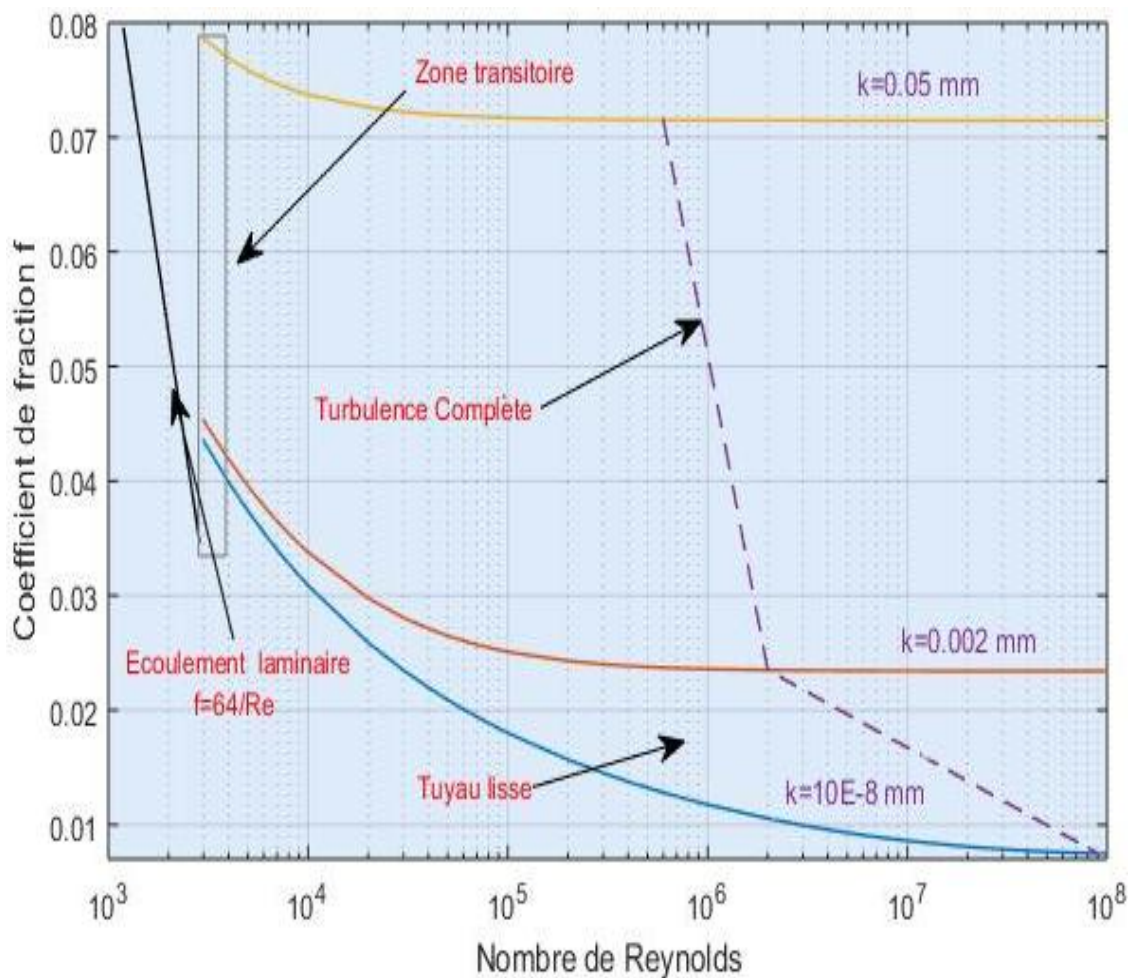


Figure IV- 1: Quelques courbes extraites des résultats du programme calculateur de perte de charge (Similaire au diagramme de Moody).

On peut observer clairement l'accord parfait entre nos résultats extraites par exécution du programme Calculateur de perte de charge et le fameux diagramme de Moody présentédans la (Figure II.2).

IV.2. Résultats de programme et leurs discussions:

Cette étude concerne le méthane $\gamma = 1.29$, $\rho = 0.68 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 178 \text{ m}$ et $D = 0.8 \text{ m}$.

IV.2.1. Corrélation entre la température et la perte de charge : Pour déterminer l'effet de la température sur la perte de charge, nous définissons différents degrés de chaleur et calculons la perte de charge.

Méthode de calcul : Nous fixons la vitesse à 50 m/s et la longueur de la conduite à 10000 m puis nous avons calculé le nombre Mach correspondant à chaque température des régleurs selon les équations:

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma r T}} \quad \text{IV- 2}$$

$$f = \frac{D}{L} \left(\frac{1-M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right) \quad \text{IV- 3}$$

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2} \quad \text{IV- 4}$$

Tableau IV- 1: Pertes de charge pour différentes températures du gaz.

T [K]	L [m]	V [m/s]	M	f	ΔP [Pa]
268.15	10000	50	0.1178	0.12	42500
273.15	10000	50	0.1167	0.0538	43562.5
278.15	10000	50	0.1157	0.0307	44625
283.15	10000	50	0.1146	0.0198	45687.5
288.15	10000	50	0.1136	0.0139	46750
293.15	10000	50	0.1127	0.0103	46750
298.15	10000	50	0.1117	0.0079	47812.5
303.15	10000	50	0.1108	0.0063	48875
308.15	10000	50	0.1099	0.0051	49937.5
313.15	10000	50	0.1090	0.0043	51000
318.15	10000	50	0.1082	0.0035	51000
323.15	10000	50	0.1073	0.003	53868.75

Les précédents résultats issant de l'exécution du programme sont représentés graphiquement en diagramme en barres via un script en Matlab, et nous ont donné la figure suivante :

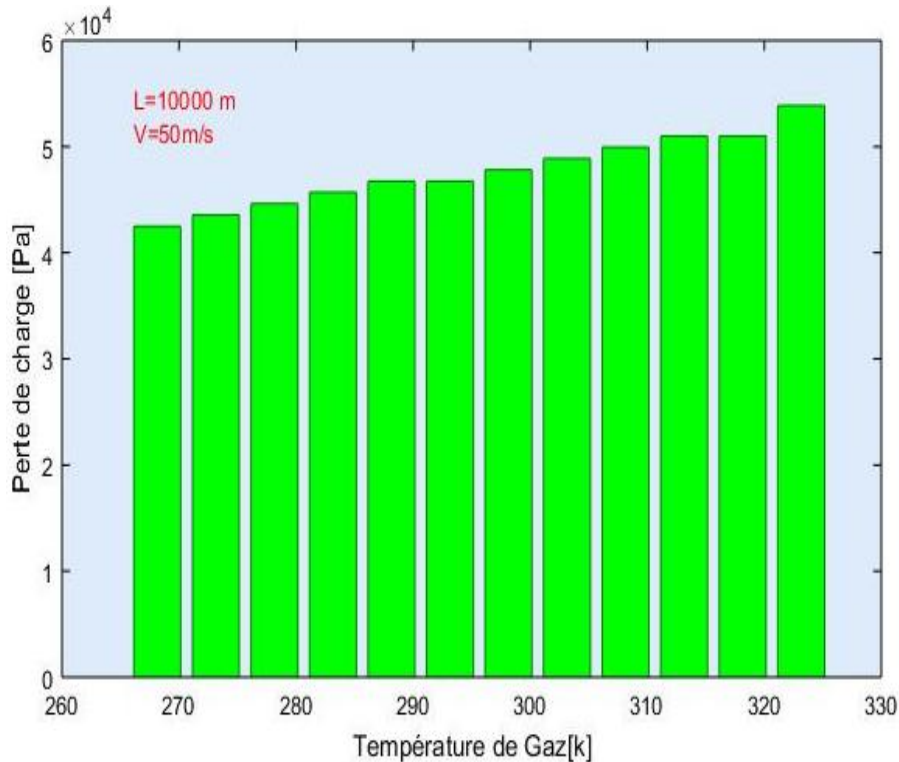


Figure IV- 2: Pertes de charge variant en fonction de la température du gaz.

On note que lorsque la température augmente, la perte de charge augmente d'une façon proportionnelle, ce qui conduit à conjecturer l'existence d'une expression d'allure linéaire probablement entre ces deux quantités caractéristiques.

IV.2.2. Effet de la longueur de la conduite et le nombre de mach sur la perte de charge :

Pour déterminer l'effet de la longueur sur la perte de charge, nous avons fixé la température à la valeur de 313.15K, et en variant la vitesse de 400 [m/s] jusqu'à 455[m/s]. Nous avons calculé le nombre de Mach, le coefficient de frottement f et la perte de charge ΔP selon les équations intégrées dans notre programme déjà établi.

Tableau IV- 2: Le rapport entre la longueur de la conduite et le nombre de Mach et perte de charge.

T [K]	V [m/s]	M	f	L [m]	ΔP [Pa]
313.15	400	0.8746	0.0302	7205	1479.902
313.15	405	0.8856	0.0298	5940	1235.323
313.15	410	0.8965	0.0295	4800	1010.564
313.15	415	0.9074	0.0291	3812	812.3439
313.15	420	0.9184	0.0288	2926	631.0482
313.15	425	0.9293	0.0284	2180	475.7561
313.15	430	0.9402	0.0281	1543	340.7009
313.15	435	0.9512	0.0492	574	227.1143
313.15	440	0.9621	0.0490	340	137.0785
313.15	445	0.9730	0.0489	169	69.5511
313.15	450	0.9840	0.0487	58	24.30921
313.15	455	0.9949	0.0486	5	2.1380

Après avoir traduit les résultats en une graphique en courbe via le script Matlab :

- 1- La courbe de perte de charge variant en termes de longueur :** Cette courbe représente une variation de la perte de charge en fonction de la longueur de tube (ou canalisation) de diamètre nominale de 0.8 m, et à la température de 313.15K en écoulement laminaire puis en écoulement turbulent.

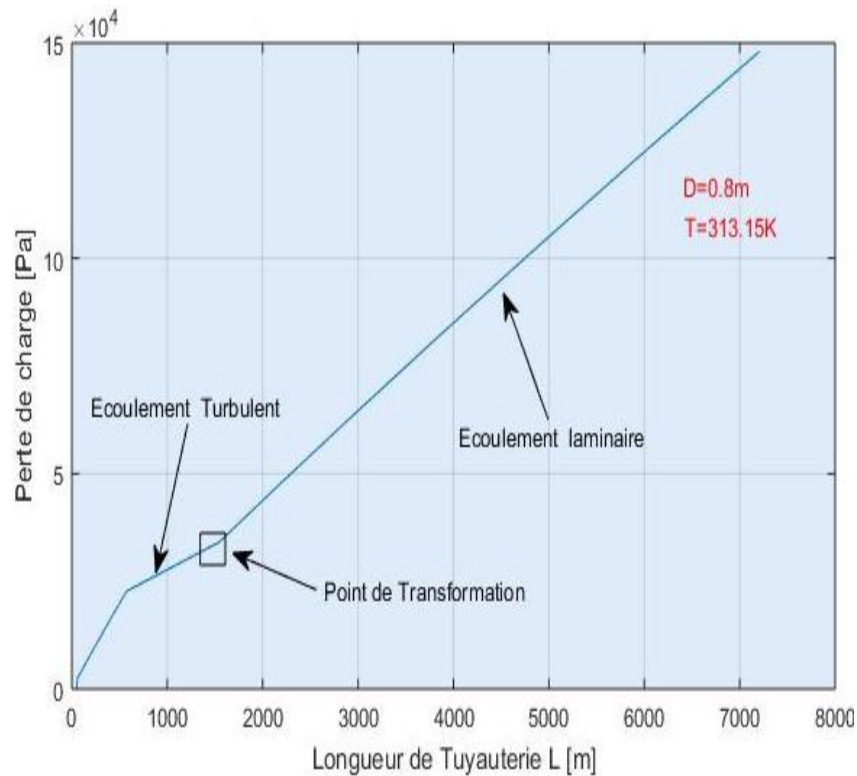


Figure IV- 3: Courbe de perte de charge en fonction de la longueur de tuyauterie.

Sachant que la longueur induite dans nos calculs est la longueur critique (L^*) séparant par définition la section du nombre de Mach donné à la section critique (où l'écoulement devient sonique), nous constatons une diminution de la valeur de perte de charge en fonction de la diminution de la longueur (critique), portant que la vitesse ou le débit de gaz dans le tuyau est augmentée jusqu'à l'atteinte d'une valeur proche de la vitesse du son ($M=1$), cela confirme plus au moins la réalité physique que la vitesse d'écoulement et le débit vont atteindre de valeurs limites (maximales) qui ne seront jamais dépassées même si les pertes de charges totale seront équivalentes à la pression en amont de l'écoulement gazeux.

2- La courbe du nombre Mach variant en termes de longueur de tuyauterie : Cette courbe représente les variations du nombre de Mach le long de la canalisation, en changeant la vitesse du gaz dans la tuyauterie ayant la température fixe de 313.15K.

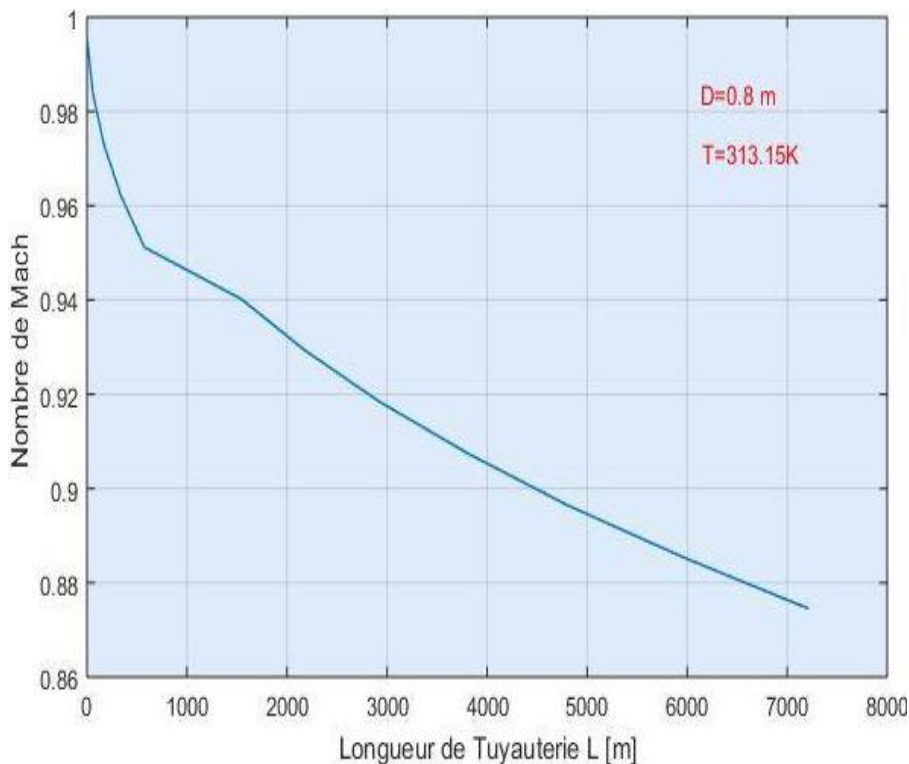


Figure IV- 4:La courbe du nombre Mach en termes de longueur.

D’après la figure IV-4, on remarque bien que la diminution du nombre de Mach avec l’augmentation de longueur de tube de gaz est évidente, ce qui conduit à la conclusion de la présence d’une relation de proportionnalité inverse entre ces deux grandeurs caractérisant l’installation de transport du gaz (et de caractère non-linéaire en outre).

3- Effet du nombre de Mach sur la perte de charge: Pour déterminer cet effet, nous avons donné différentes valeurs pour le nombre de Mach et tirer les valeurs correspondantes du programme de calcul de la perte de charge, avec une vitesse de 10 m/s, une longueur de 10 km et un coefficient de frottement de 0.12.

Les résultats sont les suivants :

Tableau IV- 3: Effet du nombre de Mach sur la perte de charge.

ΔP	M	ΔP	M	ΔP	M
2	0.825	980	0.2101	200000	0.0132
6	0.729	1960	0.1551	250000	0.0114
15	0.6264	5880	0.1116	300000	0.0102
60	0.5386	17640	0.0659	350000	0.0093
120	0.4474	50000	0.0384	400000	0.0086
240	0.3588	100000	0.0229	450000	0.0081
480	0.2758	150000	0.0162	500000	0.0072

Les résultats ont été traduits en une courbe dans le programme Matlab, et donnaient ce qui suit :

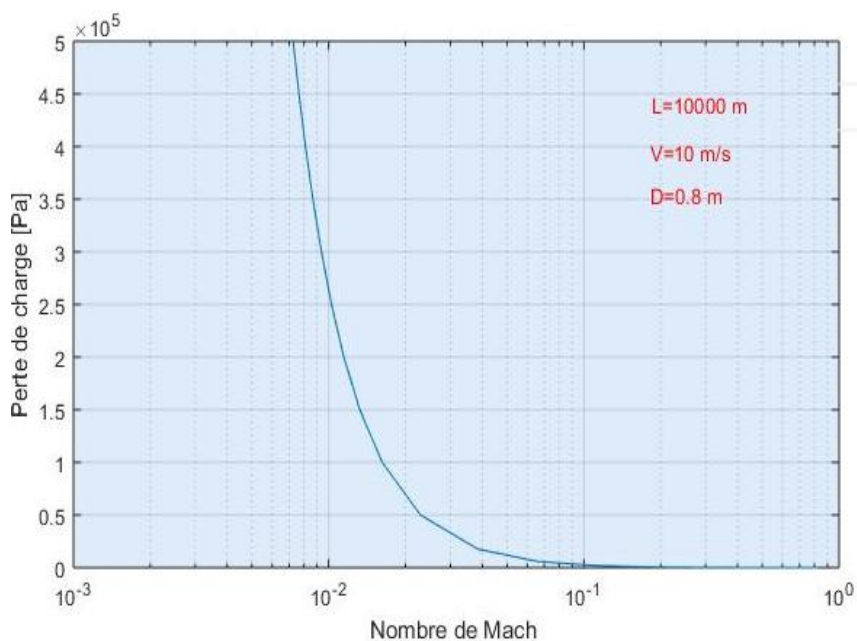


Figure IV- 5: Effet du nombre de Mach sur la perte de charge.

Nous pouvons constater clairement que la diminution de la perte de la charge avec l'augmentation du nombre de Mach en amont est de comportement non-linéaire, et cela est dû à l'expression inverse de l'équation (IV. 3) et nous en concluons qu'il existe une relation inverse entre eux.

IV.3. Étude de cas : Application aux stations SCB et SCC de Sonatrach :

À ce stade, nous avons étudié l'application du calcul de la perte de charge à l'aide du programme déjà élaboré, et nous avons comparé aux résultats réels de l'acheminement du gazoduc pour assurer le transport du gaz naturel entre les deux stations de pression SCB en Ras Al-Miad (Biskra) et SCC Chaiba (Biskra).

La longueur de cette conduite est de 91 km, ayant 40" de diamètre et comprend une vanne à boisseau sphérique, et le matériau constituant de cette conduite est de l'acier x60 où la pression maximale est de 71 bars. Le débit de gaz atteint $196.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en cas de libre écoulement (les stations de compression sont arrêtées) et la perte est estimée de 2 à 4 bars.

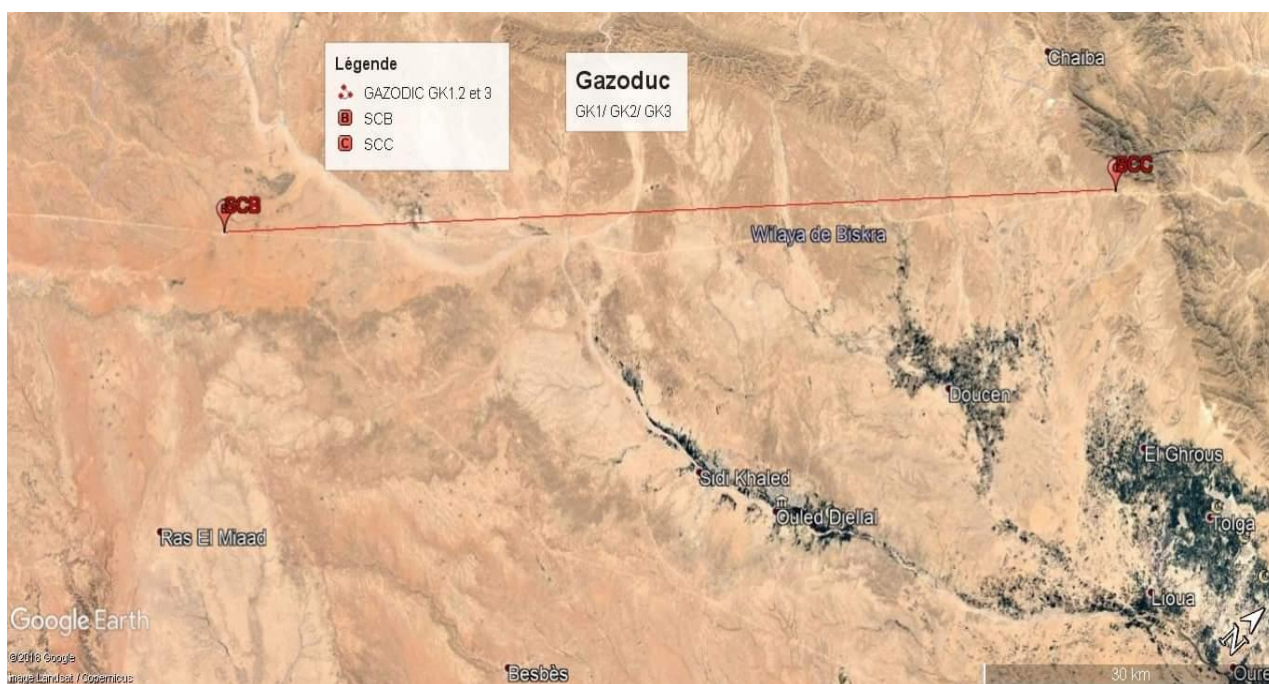


Figure IV- 6: Image satellite du tube du gaz naturel entre SCB et SCC (Biskra).

Exécution : Nous avons introduit les données du gaz naturel transporté entre les deux stations de pression (SCB et SCC) pour l'étudier dans le programme et calculons la perte de charge induite par ce mouvement fluide.

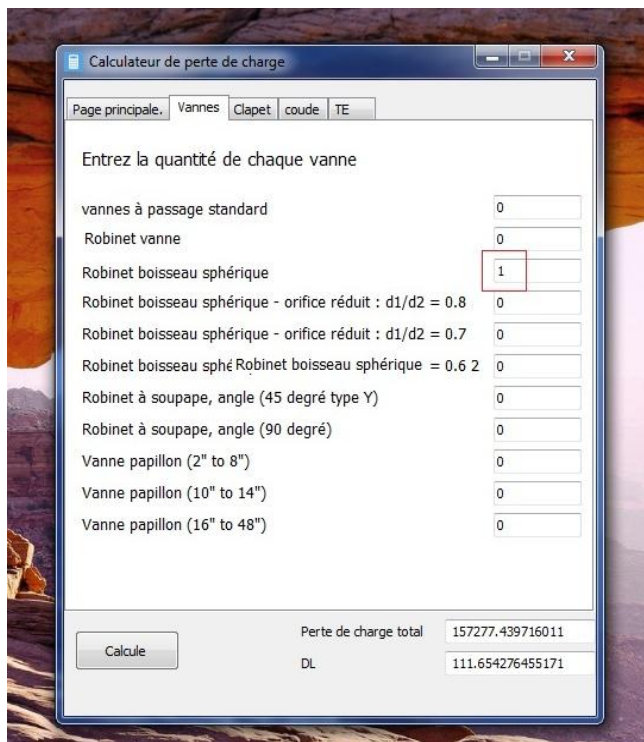


Figure IV- 7: Introduction d'une spécifié (robinet boisseau sphérique).

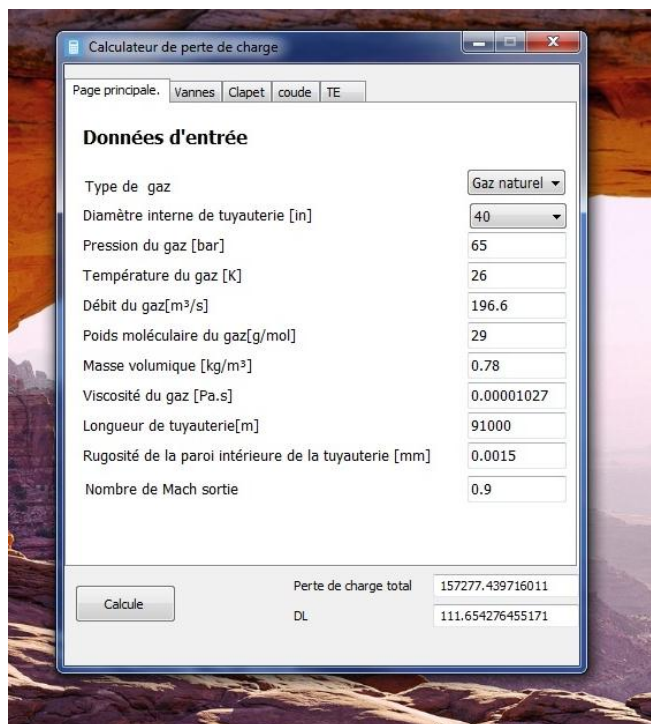


Figure IV- 8: Caractéristiques techniques et physiques du cas étudié.

IV.3.1. Résumé des résultats d'application:

Nous avons calculé la perte de charge à partir d'utilisation de programme et nous avons obtenu le résultat suivant:

Tableau IV- 1: Récapitulation de la présente étude de cas.

Type de gaz	Gaz Naturel
Diamètre interne de tuyauterie [in]	40
Débit du gaz [m ³ /s]	196.6
Masse volumique [kg/m ³]	0.78
Viscosité du gaz [Pa.s]	0.00001027
Longueur de tuyauterie[m]	91000
Rugosité de la paroi intérieure de la tuyauterie [mm]	0.0015
Pression du gaz [bar]	65
Nombre de Mach	0.543
Coefficient de perte de charge singulière	0.2
Nombre de Mach sortie	0.8
Vitesse d'écoulement [m/s]	242.497
Coefficient de frottement	0.00766
Perte de charge linéaire [Pa]	157270.56
Perte de charge singulière [Pa]	688.016
Perte de charge totale [Pa]	157277.44
DL [m]	102.248

Notons que le résultat donné est proche de la réalité et cela est dû à plusieurs facteurs, notamment:

- Etat du pipeline (rugosité de la paroi du tube).
- Ondulations de tuyaux.
- La différence de hauteur entre les deux stations.
- Branches dans le tube.

Conclusion générale :

Dans ce travail, un programme spécialisé a été réalisé dans le calcul de la perte de charge (de pression) dans le gazoduc de tous types, en utilisant le langage de programmation VB.net et de l'utilisation de plusieurs méthodes numériques spécialisées dans ce domaine.

Nous avons tracé des courbes de coefficient de frottement en termes de nombre de Reynolds pour différents types de tuyaux en fonction du type de matériau fabriqué, car ils sont différents par rapport aux résultats obtenus par le programme et comparés à ceux tirés du digramme de Moody agréés et spécialisés dans ce domaine. Nous avons obtenu des résultats identiques, ce qui nous permet de compter sur le programme pour étudier le phénomène de perte de charge.

Sur la base des résultats du programme, nous avons mené une étude approfondie de tous les facteurs en cause dans le phénomène de la perte de la pression et de l'ampleur de son impact et de sa contribution.

Où nous avons tracé différentes courbes pour tous ces facteurs qui sont comme suit:

- Courbe de perte de charge en termes de longueur.
- Courbe de perte de charge en température.
- Courbe de perte de charge en termes du nombre de Mach.
- Nombre de Mach en fonction de la longueur de tuyauterie.

Nous avons commenté ces résultats numériques et graphiques d'une façon qualitative essentiellement pour chaque spécifié.

Enfinement et à l'égard de notre souci de valoriser ce travail et d'en tirer parti et de se débarrasser de son ambition théorique, nous avons étudié le pipeline entre les stations de pression SCB et SCC SONATRACH Biskra.

Dans ce dernier cas, nous espérons que cette question sera encore améliorée et développée.

Références bibliographiques :

- [1] :A. BOUKHARI : « Notes de cours de Gazodynamique », Dept. GenieMecanique, Univ. El-Oued, 2017.
- [2] :A.ROJEY, B.DURAND, C.JAFFRET, S. JULLIAN, M. VALAIS ; «Le gaz naturel : production, traitement, transport» ; Editions Technip-Paris ; 1994.
- [3] :E.Shashi, Menon, Gas Pipeline Hydraulics, CRC Press, Boca Raton, FL 2005.
- [4] :SONATRACH, PetroGasConsult, Calcul thermohydraulique des gazoducs.
- [5] :D. COBOS ZALETA, « Modelos de Optimización Entera Mixta no Lineal en Sistemas de Transporte de Gas Natural », Tesis en opción al grado de mastero en ciencias en ingenía de sistemas,2003.
- [6]:https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_diameter.
- [7]:J. M. POWERS : “Aerospace Engineering 360”, Aerodynamics II, Spring 1997.
- [8]:F. M. WHITE:“Fluid mechanics”, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [9]:Y.NAKAYAMA,R.F.BOUCHER:“Introduction to Fluid Mechanics”, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [10]:I.E.IDEL’CIK, « Mémento des pertes de charge ». Collection de la Direction des Études et recherches d’Électricité de France, Eyrolles, 1986.
- [11]:A.BOUSSICAUD, « Calcul des pertes de charge ». Éditionsparisiennes, 1990.
- [12]: J.CARVILL, Mechanical Engineer’s Data Handbook, Butterworth-Heineman, 2003.
- [13]:E. SHASHI MENON,“Gas PipelineHydraulics”,Taylor & Francis Group, 2005.
- [14]:L. MESSAOUDI,« Réalisation d’un module de calcul en M.D.F », Mémoire d’ingénieur d’état,2002.
- [15]:A.LALLEMAND, « Écoulement des fluides- Écoulements en conduites. Réseaux », Techniques de l’ingénieur, Traité Génie énergétique.

[16]:M.CARLIER, Hydraulique générale et appliquée. Collection du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou, Eyrolles, 1972.

[17]:B. R. MUNSON, D.F.YOUNG, T. H. OKIISHI, "*Fundamentals of Fluid Mechanics*", John Wiley and Sons, Inc, 1998.

[18]:J.ALBROW (BSI), "Petroleum and natural gas industries. Pipeline transportation systems. Pipeline valves", 389 Chiswick High Road London W4 4AL.

[19]:A.QUARTERONI, R.SACCO, F.SALERI, « Méthodes Numériques ; Algorithmes, analyse et applications », Springer-Verlag, 2007.

[20]:M.GILLI, « Méthodes numériques ; Recueil d'exercices (avec corrigés) », Dépt. d'économétrie, Université de Genève, 2003.