République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليـــم العالـــي و البحـــث العلمـــي


UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL

Faculté des Sciences et de Technologie

Département de Génie Mécanique


# Projet de Fin d'Études

*Pour l'obtention du diplôme de Master*
*En Génie Mécanique*
*Option (Energétique)*

## Thème

# Etude comparative analytique et numérique des pertes de charges linéaires dans une conduite de distribution de gaz naturel


***Les membres du jury :***

| | |
|---|---|
| Mm. S. SAADI | Président |
| Mr. S. DJIMLI | Encadrant |
| Mr. A. BOUROUIS | Examinateur |

***Présenté par :***

LATRECHE Amir

TALEB Yasser


*Promotion 2021*

# *DEDICACES*

*A mes chers parents, mon frère et mes sœurs, mes amis et mes collègues d'étude…….. ;  Amir*

# *DEDICACES*

*A mes chers parents, mon frère et mes sœurs, mes amis et mes collègues d'étude…….. ; Yasser*

# *Remerciements*

*Tout d'abord,*

*On aimerait remercier Allah le tout-puissant, de nous avoir donné le courage et la patience de pouvoir réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur Mr S.Djimli pour nous avoir proposé ce sujet ,*

*de nous avoir encadrés tout le long de ce travail et pour*

*Ses conseils et ses orientations.*

*Nous tenons à remercier les membre de jury Mr A.Bourouis et Mme S.Saadi Pour nous avoir fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes*

*qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Amir Latreche*

*& Yasser Taleb*

# Table des matières

*Nomenclature* _____ *I*

*Liste des tableaux* _____ *III*

*Liste des figures* _____ *V*

*Résumé* _____ *VIII*

*Abstract* _____ *IX*

*ملخص* _____ *X*

*Introduction générale* _____ *1*

**Introduction générale** _____ **2**

*Chapitre I : Généralités sur le gaz naturel et les pertes de charge* _____ *4*

**I.1 Introduction et historique** _____ **5**

**I.2 Origine de gaz naturel** _____ **6**

**I.3 Compositions et types de gaz naturel** _____ **6**

I.3.1 Les gaz conventionnels _____ 7

I.3.2 Les gaz non conventionnels _____ 7

**I.4 Propriétés de gaz naturel** _____ **8**

I.4.1 Combustion _____ 8

I.4.2 Pouvoir calorifique _____ 8

I.4.3 Indice de Wobbe _____ 9

I.4.4 Masse volumique _____ 10

I.4.5 Densité relative _____ 10

I.4.6 Densité d'un mélange d'hydrocarbure _____ 10

I.4.7 Facteur de compression _____ 11

I.4.8 Limites d'inflammabilité _____ 11

I.4.9 Viscosité _____ 11

I.4.10 Odorisation _____ 12

**I.5 Le gaz naturel dans le monde et en Algérie** _____ **12**

I.5.1 Le gaz naturel dans le monde _____ 12

I.5.2 Le gaz naturel en Algérie _____ 12

**I.6 Transport de gaz naturel** _____ **13**

I.6.1 Les gazoducs _____ 13

I.6.2 Les méthaniers _____ 13

**I.7 Réseaux de distribution de gaz naturel** _____ **14**

I.7.1 Les différents types de réseaux _____ 14

I.7.2 Structure des réseaux de distribution _____ 15

I.7.3 Intérêt des réseaux M.P.B _____ 15

**I.8 Pertes de charge** _____ **16**

I.8.1 Charge totale _____ 16

I.8.2 Perte de charge linéaire _____ 17

I.8.3 Pertes de charge singulières _____ 17

*Chapitre II : Equations mathématiques* _____ *18*

**II.1 Introduction** 19

**II.2 Ecoulement d'un gaz dans les conduites** 19

II.2.1 Ecoulement laminaire 19
II.2.2 Ecoulement turbulent 20
II.2.3 Le nombre de Reynolds 20
II.2.4 Coefficient de frottement 20

**II.3 Géométrie du problème** 21

**II.4 Théorèmes fondamentaux** 21

II.3.1 L'équation de continuité 21
II.3.2 Principe de la conservation de l'énergie 22
II.3.3 Equation de BERNOULLI 23

**II.4 Calcul des pertes de charge par la méthode analytique** 24

II.4.1 Formule générale de la perte de charge 24
II.4.2 Calcul de la perte de charge dans une conduite horizontale 24
II.4.3 Calcul de la perte de charge par la formule simplifiée de Renouard 25

**II.5 Equations gouvernantes dans les simulations numériques** 26

II.5.1 Equation de continuité 26
II.5.2 Equations de quantité de mouvement 26

**II.6 Les modèles de turbulence** 27

II.6.1 L'hypothèse de Boussinesq 28
II.6.2 Le modèle k-ε 28

**II.7 Vitesse du gaz dans une conduite** 30

**II.8 Conclusion** 30

***Chapitre III : Simulation numérique*** *31*

**III.1 Introduction sur gambit et fluent** 32

**III.2 Réalisation de maillage sous Gambit** 32

**III.3 Construction de la géométrie** 33

III.3.1 Construction de la géométrie 2D 33
III.3.2 Construction de la géométrie 3D 37
III.3.3 Effet de maillage 40

**III.4 Simulation par fluent** 42

III.4.1 Démarrage de fluent 42
III.4.2 Chargement du modèle 43
III.4.3 Définition de modèle de turbulence, du matériau et des conditions aux limites 44
III.4.4 Initialisation et lancement des itérations 47
III.4.5 Visualisation des résultats 49

**III.5 Conclusion** 51

***Chapitre IV : Résultats et discussion*** *52*

**IV.1 Introduction** 53

**IV.2 Pertes de charge dans le réseau moyenne pression** 53

IV.2.1 Pour le PE250 53
IV.2.2 Pour le PE200 56
IV.2.3 Pour le PE125 58

IV.2.4 Pour le PE63 _____ 61
IV.2.5 Pour le PE40 _____ 63
IV.2.6 Perte de charge pour les différents calibres pour la pression 1bar _____ 66

**IV.3 Pertes de charge dans le réseau basse pression _____ 68**
IV.3.1 Pertes dans le réseau domestiques _____ 68
IV.3.2 Pertes dans le réseau industriel _____ 70

**IV.4 Conclusion _____ 75**

***Conclusion générale _____ 76***

**Conclusion générale _____ 77**

***Références Bibliographiques _____ 79***

# Nomenclature

| |
|---|
| A : analytique. |
| B.P : basse pression. |
| CU : conduite en cuivre. |
| CU16 : conduite en cuivre d'un calibre (diamètre) 16 mm . |
| $C_\mu, C_{l\varepsilon}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ : constantes du modèle de turbulence (k-ε). |
| CFD : computational fluid dynamics (mécanique des fluides numérique). |
| d : densité. |
| D : diamètre en [m]. |
| $d\tau_p$ : travail élémentaire exercé dans la conduite par les forces de pression en [J/kg]. |
| $\mathrm{dE}$ **:** variation de l'énergie interne du fluide par (kg) en [J/kg]. |
| dQ : énergie transmise sous forme de chaleur en [J/kg]. |
| dW : travail des forces de frottement [J/kg]. |
| e: la rugosité de la canalisation en [mm]. |
| EJ : exajoules (1EJ=$10^{18}$Joule). |
| $E_f$ : energie des forces de frottements en [Joule]. |
| $f$ : le coefficient de frottement. |
| $F_i$ : force de volume suivant la direction i en [N]. |
| g : accélération de la pesanteur [m/s]. |
| Gm3 : giga mètre cubes (1Gm$^3$ soit $10^9$ m$^3$). |
| GNL : gaz naturel liquéfier. |
| $G_k$ : taux de production. |
| HP : haute pression. |
| k : énergie cinétique turbulente. |
| L : longueur de la conduite en [m]. |
| L.I.I : limite d'inflammabilité inférieure. |
| L.I.S : limite d'inflammabilité supérieure. |
| m : la masse en [kg]. |
| M.P.B : moyenne pression type B. |
| M.P.C : moyenne pression type C. |
| MP : moyenne pression. |
| MW : méga watts. |
| P : pression absolue du gaz[Pa]. |
| $P_1$ : pression à l'entrée de la conduite en [Pa]. |
| $P_2$ : pression à la sortie de la conduite en [Pa]. |
| P$C_i$: pouvoir calorifique d'un constituant du mélange en [J/kg]. |
| PC : pouvoir calorifique en [J/kg]. |
| PE : conduite en Polyéthylène. |
| PE250 : conduite en Polyéthylène d'un calibre(diamètre) 250 mm . |
| $Q$ : débit volumique en [m$^3$/s]. |

| |
|---|
| $q_m$ : débit massique en [Kg/s]. |
| R : constante universelle des gaz parfaits en [j /mol.K]. |
| $R_e$ : le nombre de Reynolds. |
| S : densité fictive du gaz. |
| $s_{ij}$ : tenseur de Reynolds. |
| $t$ : variable de temps en [s]. |
| T : température absolue du gaz en [K]. |
| $T_0$ : température de référence à 15°C en [K]. |
| $u, v, w$ : composantes du vecteur vitesse [m/s]. |
| UdU : variation de l'énergie cinétique du fluide en [J/kg]. |
| $U$ : énergie potentielle en [J/kg]. |
| V : vitesse moyenne en m/s. |
| $V_m$ : volume molaire du gaz en [$m^3$/mol]. |
| Vp : composante principale du vecteur vitesse. |
| $W_{GN}$ : indice de Wobbe. |
| $x_i$ , $x_j$ : variables de l'espace en [m] . |
| $X_i$ : fraction molaire d'un constituant du mélange. |
| $Z$: facteur de compression**.** |
| $\Delta L$ : longueur d'un tronçon de la conduite en [m]. |
| $\Delta P$ : perte de charge en [Pa]. |
| 2D : deux dimensions. |
| 3D : trois dimensions. |
| ε : taux de dissipation. |
| λ : coefficient de perte de charge, nombre sans dimension fonction du nombre de Reynolds. |
| Ω : section droite en [$m^2$]. |
| $\mu$ : la viscosité dynamique du gaz [Kg/m.s]. |
| $\nu$ : viscosité cinématique en [$m^2$/s]. |
| $\rho$ : masse volumique en [kg/$m^3$]. |

# Liste des tableaux

Tableau I-1: composition moyenne du gaz naturel algérien

Tableau I-2: Limites d'inflammabilité pour deux types de gaz

Tableau II-1: Les différents diamétres utilisés

Tableau II-2: valeurs des constants du modèle k-ε

Tableau IV 1: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 1bar)

Tableau IV-2: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 2bar)

Tableau IV-3: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 3bar)

Tableau IV-4: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 4bar)

Tableau IV-5: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 1bar)

Tableau IV-6 : Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 2bar)

Tableau IV-7: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 3bar)

Tableau IV-8: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 4bar)

Tableau IV-9: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 1bar)

Tableau IV-10: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 2bar)

Tableau IV-11: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 3bar)

Tableau IV-12: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 4bar)

Tableau IV-13: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 1bar)

Tableau IV-14: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 2bar)

Tableau IV-15: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 3bar)

Tableau IV-16: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 4bar)

Tableau IV-17: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 1bar)

Tableau IV-18: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 2bar)

Tableau IV-19: Pertes de charge (PE40/ pression d’entrée 3bar)

Tableau IV-20: Pertes de charge (PE40/ pression d’entrée 4bar)

Tableau IV-21: Perte de charge pour différents calibres avec une pression d'entrée 1bar (Simulation 3D)

Tableau IV-22: Perte de charge pour différents calibres avec une pression d'entrée 1bar (Simulation 2D)

Tableau IV-23: Perte de charge pour différents calibres avec une pression d'entrée 1bar (Formule analytique)

Tableau IV-24: Pertes de charge (CU16/ pression d’entrée 21mbar)

Tableau IV-25: Pertes de charge (CU22/ pression d’entrée 21mbar)

Tableau IV-26: Pertes de charge (PE40/ pression d’entrée 21mbar)

Tableau IV-27: Pertes de charge (PE40/ pression d’entrée 300mbar)

Tableau IV-28: Pertes de charge (PE40/ pression d’entrée 1bar)

Tableau IV-29: Pertes de charge (PE63/ pression d’entrée 21mbar)

Tableau IV-30: Pertes de charge (PE63/ pression d’entrée 300mbar)

Tableau IV-31: Pertes de charge (PE63/ pression d’entrée 1bar)

# Liste des figures

Figure I-1: Gazoducs Maghreb-Europe installés ou en projet

Figure I-2: Déplacement d'un gaz dans une conduite

Figure II-1: Écoulements monodimensionnels de gaz

Figure II-2: Géométrie utilisé

Figure II-3: Déplacement dL d'un fluide en écoulement

Figure III-1: Lancement de gambit

Figure III-2: maillage avec nombre des mails =12500 avec un ratio=1

Figure III-3: Résultats de simulation 2D pour le 1er maillage

Figure III-4: maillage avec nombre des mails =800000 avec un ratio=1.05

Figure III-5: Résultats de simulation 2D pour le 2éme maillage

Figure IV-1: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 1bar

Figure IV-2: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 2bar

Figure IV-3: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 3bar

Figure IV-4: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 4bar

Figure IV-5: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 1bar

Figure IV-6: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 2bar

Figure IV-7: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 3bar

Figure IV-8: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 4bar

Figure IV-9: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 1bar

Figure IV-10: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 2bar

Figure IV-11: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 3bar

Figure IV-12: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 4bar

Figure IV-13: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 1bar

Figure IV-14: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 2bar

Figure IV-15: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur calculée par les 3 méthodes pour le PE63 avec la pression d'entrée 3bar

Figure IV-16: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 4bar

Figure IV-17: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 1bar

Figure IV-18: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 2bar

Figure IV-19: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 3bar

Figure IV-20: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 4bar

Figure IV-21: Développement de la perte de charge en fonction de la longueur pour les différents diamètres (Simulation 3D-1bar)

Figure IV-22: Développement de la perte de charge en fonction de la longueur pour les différents diamètres (Simulation 2D-1bar

Figure IV-23: Développement de la perte de charge en fonction de la longueur pour les différents diamètres (Formule Analytique-1bar)

Figure IV-24: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le CU16 avec une pression d'entrée 21mbar

Figure IV-25: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le CU22 avec une pression d'entrée 21mbar

Figure IV-26: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 21mbar

Figure IV-27: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 300mbar

Figure IV-28: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 1bar

Figure IV-29: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec la pression d'entrée 21mbar

Figure IV-30: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 300mbar

Figure IV-31: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 1bar

# Résumé

Ce modeste travail est dédié à l'étude comparative entre deux méthodes de calcul des pertes de charge linéaire dans le réseau de distribution du gaz naturel. Une méthode analytique basée sur les relations mathématiques utilisées par « Sonelgaz » et une méthode numérique qui est assimilé à la simulation 2D et 3D à l'aide du logiciel de CFD ANSYS Fluent. Afin d'évaluer les méthodes utilisées, plusieurs calibres ont été testé avec différents pressions d'entrées, pour les deux types de réseau (basse pression et moyenne pression). Les résultats montrent l'existence d'un écart entre les résultats de la simulation 3D et celle de la méthode analytique. cet écart augment avec l'augmentation de la pression d'entrée et la diminution du diamètre (les résultats des deux méthodes sont plus proche dans les basses pressions et pour les grand diamètres).

**Mots clés :** Perte de charge, réseau de distribution, Simulation Numérique, Ansys-Fluent.

# Abstract

This modest work is dedicated to the comparative study between two methods of calculating linear pressure drops in the natural gas distribution network. An analytical method based on the mathematical equations used by "Sonelgaz" and a numerical method, which is represented by 2D and 3D simulation using the CFD software, ANSYS Fluent. In order to evaluate the used methods, several calibers were tested with different inlet pressures, for the two types of network (low pressure and medium pressure network). The results show the existence of a difference between the results of the 3D simulation and that of the analytical method, this difference increases with the increase in the inlet pressure and the decrease in the diameter (the results of the two methods are closer to each other in the low pressures and for large diameters).

**Key words:** Pressure drop, Numerical simulation, Gas distribution network, Ansys-Fluent.

# ملخص

هذا العمل المتواضع مخصص لدراسة المقارنة بين طريقتين لحساب فقدان الضغط الخطي في شبكة توزيع الغاز الطبيعي. هذه المقارنة أجريت بين طريقة تحليلية تعتمد على العلاقات الرياضية التي تستخدمها "سونلغاز" وطريقة عددية تتمثل في محاكاة ثنائية وثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج ANSYS Fluent" CFD". من أجل تقييم الأساليب المستخدمة ، تم اختبار عدة عيارات بضغوط مختلفة لنوعي الشبكات (الضغط المنخفض والضغط المتوسط). أظهرت النتائج وجود فرق بين نتائج المحاكاة ثلاثية الأبعاد ونتائج الطريقة التحليلية ، يزداد هذا الفرق مع زيادة الضغط وانخفاض القطر (نتائج الطريقتين أقرب في حالة الضغوط المنخفضة والأقطار الكبيرة).

**الكلمات المفتاحيةّ:** فقدان الضغط الخطي ، شبكة توزيع الغاز، محاكاة عددية، برنامج "Ansys-Fluent".

# Introduction générale

# Introduction générale

Le gaz naturel est l'énergie fossile la plus récente dans l'histoire industrielle. Sa part dans le mix des énergies primaires mondiale n'a fait que croître au cours des dernières décennies, jusqu'à s'établir aujourd'hui à plus de 20 %, occupant la troisième place dans la production mondiale d'énergie primaire. En Algérie ou les hydrocarbures représentent 60 % des recettes du budget et 98 % des recettes d'exportation, le gaz naturel occupe une place prédominante dans l'économie du pays, telle que l'Agence internationale de l'énergie classait l'Algérie au 10$^{e}$ rang mondial des producteurs de gaz naturel en 2018 avec 2,4 % de la production mondiale et au 7$^{e}$ rang mondial des exportateurs de gaz naturel avec 5,2 % du total mondial . En 2019, l'Algérie a produit 86,2 milliards de m$^{3}$ de gaz naturel, soit 3,10 EJ (exajoules) et a consommé 45,2 milliards de m$^{3}$ de gaz naturel, soit 1,63 EJ. Elle se classe au 19$^{e}$ rang mondial avec 1,2 % de la consommation mondiale. Sa consommation absorbe 52 % de sa production. [1]

Selon l'Agence internationale de l'énergie la consommation intérieure de gaz naturel en Algérie est consacrée pour 44 % à la production d'électricité, pour 9 % aux besoins propres de l'industrie énergétique, pour 7,5 % aux usages non énergétiques (chimie) et pour 36 % à la consommation finale énergétique (secteur résidentiel ; 20,6 %, industrie : 11 %). Pour répondre aux besoins des consommateurs que ce soit du secteur résidentiel ou industriel la Société nationale de l'électricité et du gaz « Sonelgaz » est chargée de la mise en œuvre d'un réseau de distribution fiable, aujourd'hui la longueur de ce réseau a atteint 126 952 km avec un taux de pénétration du gaz à 65% pour 6 451 000 clients. Le réseau de distribution comprend des conduites, des postes de détentes, des branchements et des colonnes montantes, il se compose de réseau moyen pression et de réseau bas pression. [2]

Un des problèmes principaux qui font face à la distribution du gaz naturel par canalisation est la perte de charge, qui paraît comme une chute de pression au cours de l'écoulement. On distingue 2 types des pertes de charges qui sont les pertes de charge singulières et les pertes de charge linéaire. La connaissance de ces pertes est d'une importance primordiale afin d'assurer une bonne alimentation en gaz naturel des clients. Dans cette étude notre objectif est de comparer entre 3 méthodes de calcul des pertes de charge linéaire (simulation 2D, simulation 3D et la méthode analytique)

afin de pouvoir tirer les qualités et les défauts de chaque méthode et de faire une évaluation de précision de la méthode analytique utilisée par Sonelgaz dans les calculs de réseau. Le mémoire est réparti en quatre chapitres présentés comme suite :

Le premier chapitre présente des généralités sur le gaz naturel (son origine, son composition, ses propriétés physique et chimique, son importance comme énergie primaire en Algérie et dans le monde, son transport et distribution) ainsi que des notions sur les pertes de charge.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les équations mathématiques de base et les théorèmes fondamentaux nécessaires pour le calcul des pertes de charge que ce soit par la méthode analytique ou par les méthodes numériques (simulation 2D et 3D).

Nous avons présenté dans le troisième chapitre les logiciels de simulation utilisés (gambit et fluent) ainsi que les différentes étapes suivies à partir de la création de la géométrie sur gambit jusqu'aux étapes de calcul dans fluent passant par la création des différents maillages et son effet sur la simulation.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenue dans le chapitre précédent (calcul analytique et simulation numérique) afin de pouvoir comparer les résultats des trois méthodes et déduire une conclusion générale de ce travail.

# Chapitre I
# Généralités sur le gaz naturel et les pertes de charge

## I.1 Introduction et historique

Le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures présent naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse. Il est considéré comme étant une source d'énergie propre à l'exploitation et de plus en plus utilisée, elle pourrait remplacer à moyen terme l'utilisation du pétrole et du charbon car. Elle dispose de nombreuses qualités : abondance relative, souplesse d'utilisation, qualités écologiques, prix compétitifs et son excellente efficacité énergétique, par à port aux autre énergies fossile. La mise en œuvre de cette énergie repose sur la maîtrise technique de l'ensemble de la chaîne gazière, qui va de l'extraction à la consommation en passant par le stockage, le transport, et la distribution.

Le gaz naturel est considéré comme une énergie de premier choix pour le $21^{éme}$ siècle à cause de ça contribution essentielle à la production d'électricité. L'industrie du gaz naturel a passé par plusieurs étapes historiques débutant de $19^{éme}$ siècle jusqu'aujourd'hui on peut les résumer dans les points suivant:

- 1821, le démarrage de la production de gaz naturel, avec le premier puits foré à Fredonia dans l'état de New York. Ce gaz d'abord été utilisé pour l'éclairage.
- 1872, premier gazoduc de longue distance achevé en Pennsylvanie aux Etats-Unis.
- 1885, invention du bec Bunsen en Allemagne. Premières applications sures du gaz naturel pour le chauffage et la cuisson.
- 1915, première utilisation de réservoirs naturels pour le stockage de gaz naturel aux Etats-Unis
- 1936, premier turbine industrielle à gaz construite en Suisse indépendamment du turboréacteur.
- 1947, premier utilisation de la facturation hydraulique aux Etats-Unis
- 1951, premier production de gaz naturel à partir des gisements de charbon au Royaume-Uni
- 1959, méthane Pioneer transporte la première cargaison de GNL depuis les Etats-Unis vers le Royaume-Uni

- 1970, premier centrale à cycle combiné à gaz d'une Puissance d'environ 200MW construite aux Etats-Unis
- 1992, la délinéation du plus grand champ de gaz mondial, South Pars/ North Field, à cheval entre L'Iran et le Qatar est achevée
- 1995, la fracturation hydraulique et le forage horizontal conduise succès de l'exploitation de gaz de schiste dans les schistes de Barnett, au Texas
- 2000, en Iran, lancement de programmes de développement majeurs pour les véhicules au gaz naturel comprimé. [3]

## I.2 Origine de gaz naturel

Le gaz naturel est formé par la dégradation de la matière organique accumulée au cours des millions d'années passées. Deux mécanismes principaux sont responsables de cette dégradation :

- Le « gaz bactérien » ou biochimique a été formé par l'action des bactéries sur les débris organiques qui s'accumulent dans les sédiments. Un tel gaz est produit à des profondeurs qui, généralement, n'excédant pas quelques centaines de mètres et comprend du méthane relativement pur. Le méthane bactérien représente environ 20% des réserves actuellement connues ;
- Le « gaz thermique » est formé par la dégradation de la matière organique, appelée « kérogène », accumulée dans les sédiments fins, en particulier les argiles. Cette dégradation se produit sous l'effet combiné de la température et de la pression. [4]

## I.3 Compositions et types de gaz naturel

Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures dont le constituant principal est le méthane, $CH_4$, avec une teneur comprise entre 70 et 100 %, en présence d'autres hydrocarbures (propane, butane, éthane…), de diazote, de dioxyde de carbone, et de sulfure d'hydrogène…etc. [4]

On donne la composition moyenne de gaz naturel algérien de type Hassi R'mel et Adrar à titre indicatif ci-après :

| **Constituant** | **Formule** | **Hassi R'mel % Molaire** | **Adrar % Molaire** |
|---|---|---|---|
| Azote | N2 | 6,15 | 2,30 |
| Oxyde de carbone | CO2 | 0,19 | 6,12 |
| Méthane | CH4 | 85.10 | 88,31 |
| Ethane | C 2H 6 | 5,90 | 2,48 |
| Propane | C3H 8 | 1,92 | 0,61 |
| Iso-butane | i-C4 | 0,24 | 0,06 |
| N-butane | nC4 | 0,33 | 0,06 |
| N-pentane | nC5 | 0,17 | 0,06 |

**Tableau I-1: composition moyenne du gaz naturel algérien [5]**

On distingue les différents types de gaz suivant :

### I.3.1 Les gaz conventionnels

La proportion d'hydrocarbure plus lourd que le méthane détermine les différents types de gaz naturel conventionnel :

- **Gaz sec**: ne forme pas de phase liquide dans les conditions de production,
- **Gaz humide**: forme une phase liquide au cours de la production dans les conditions de surface,
- **Gaz à condensat**: forme une phase liquide dans le réservoir au cours de la production,
- **Gaz associé**: le gaz coexiste, dans le réservoir, avec une phase liquide (pétrole). Le gaz associé comprend le gaz de couverture (phase gazeuse présente dans le réservoir) et le gaz dissous. [4]

### I.3.2 Les gaz non conventionnels

Ils représentent d'importantes réserves souterraines dont l'exploitation demeure complexe et coûteuse.

- **Le gaz de schiste :** est un gaz piégé dans une roche-mère très peu poreuse et très peu imperméable.
- **Le gaz de charbon :** est naturellement présent dans les pores du charbon.

- **Le gaz compact :** est emprisonné dans des petits réservoirs souterrains difficiles d'accès.
- **Les hydrates de méthane :** sont piégés sous haute pression et à basse température. Ils se trouvent sous les océans et dans les zones de permafrost (Alaska, Russie). Aucune technique économiquement viable ne permet pour l'instant d'exploiter ces gisements. [4]

## I.4 Propriétés de gaz naturel

### I.4.1 Combustion

Le gaz distribué est utilisé comme énergie domestique et industrielle. Cette énergie résulte d'une réaction exothermique. La réaction des hydrocarbures se résume ainsi :

$$C_nH_m + (n + \frac{m}{4})O_2 \longrightarrow n\,CO_2 + \frac{m}{2}\,H_2O$$

**Pour le méthane :**

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

**Pour le Propane :**

$$C_3H_8 + 5O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O$$

Le gaz utilisé doit être brûlé dans des conditions favorables en aménageant les aérations nécessaires. Les aérations ont un double intérêt :

- **Technique :** bon rendement thermique,
- **Sécuritaire :** renouvellement de l'air (apport de l'air frais et évacuation des fumées). [5]

### I.4.2 Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est défini comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète à pression constante, le **Pouvoir calorifique d'un mélange d'hydrocarbure** peut être exprimé par la formule suivante : [5]

$$\mathrm{PC} = \Sigma X_i \mathrm{P}C_i$$

**Où :**

PC : pouvoir calorifique du mélange

$X_i$ : Fraction molaire d'un constituant du mélange

$PC_i$: pouvoir calorifique d'un constituant du mélange

On distingue :

- **Le pouvoir calorifique supérieur**

Quantité de chaleur qui serait libérée par la combustion complète avec de l'oxygène d'une quantité déterminée de gaz, de sorte que la pression p à laquelle la réaction a lieu reste constante, et que tous les produits de combustion sont retournés à la même température spécifiée T que celle des réactifs, tous ces produits étant à l'état gazeux, à l'exception de l'eau formée par la combustion, qui est condensée à l'état liquide à T. [6]

- **Le pouvoir calorifique inférieur**

Quantité de chaleur qui serait libérée par la combustion complète avec de l'oxygène d'une quantité déterminée de gaz, de sorte que la pression *p* à laquelle la réaction a lieu reste constante, et que tous les produits de combustion sont retournés à la même température spécifiée *T* que celle des réactifs, tous ces produits étant à l'état gazeux. [6]

### I.4.3 Indice de Wobbe

L'indice de Wobbe est une grandeur proportionnelle à l'apport calorifique fourni par un brûleur déterminé, alimenté en gaz, sous une pression également définie. C'est le quotient du pouvoir calorifique par la racine carrée de sa densité: [5]

$$W_{GN}=PC/\sqrt{d}$$

Où :

$W_{GN}$ : Indice de Wobbe.

PC : pouvoir calorifique du mélange.

d : densité du mélange.

### I.4.4 Masse volumique

Quotient de la masse du gaz par le volume de celui-ci dans les conditions spécifiées de pression et de température. La masse volumique se représente sous forme mathématique par l'équation suivante : [6]

$$\rho(p,T) = \frac{m}{V(p,T)}$$

### I.4.5 Densité relative

Quotient de la masse d'un gaz contenue dans un volume arbitraire par la masse d'air sec de composition normale qui serait contenue dans le même volume aux mêmes conditions de référence.

Une définition équivalente est donnée par le quotient de la masse volumique du gaz, $\rho_g$, à la masse volumique d'air sec de composition normale, $\rho_a$, dans les mêmes conditions de référence ; [6]

$$d = \frac{\rho_g(p_{stc}, T_{stc})}{\rho_a(p_{stc}, T_{stc})}$$

### I.4.6 Densité d'un mélange d'hydrocarbure

La densité d'un mélange hydrocarbure est exprimée par la formule suivante :[5]

$$d = \frac{\sum d_i X_i}{d_{air}} \text{ . Où :}$$

d : densité du mélange.

di : densité d'un constituant du mélange.

Xi : fraction molaire d'un constituant du mélange.

$d_{air}$ : densité de l'air.

### I.4.7 Facteur de compression

Quotient entre le volume réel d'une masse arbitraire de gaz aux conditions spécifiées de pression et de température et le volume du même gaz, dans les mêmes conditions, calculé d'après la loi des gaz parfaits comme suit : [6]

$$Z = \frac{Vm(réel)}{Vm(idéal)};$$

$$\text{Où : } Vm(idéal) = \frac{RT}{p};$$

$$\text{Ainsi : } Z\ (p,\ T, xi) = \frac{pVm}{RT}$$

Où :

P : est la pression absolue;

T : est la température thermodynamique ;

$V_m$ : est le volume molaire du gaz ;

R : est la constante molaire des gaz, dans des unités cohérentes.

### I.4.8 Limites d'inflammabilité

C'est la quantité de gaz combustible qui mélangée à une quantité d'oxygène donnée peut propager une flamme; il existe une limite d'inflammabilité inférieure (**L.I.I**) et une limite d'inflammabilité supérieure (**L.I.S**). [5]

| Type de gaz | L.I.I. (%) | L.I.S. (%) |
|---|---|---|
| **Gaz naturel** | 5.3 | 13.5 |
| **Propane commercial** | 2.2 | 9.5 |

**Tableau I-2: Limites d'inflammabilité pour deux types de gaz [5]**

### I.4.9 Viscosité

La viscosité d'un fluide est la résistance en friction interne qui tend à l'empêcher de s'écouler. La viscosité est due principalement à l'interaction entre les molécules du fluide. Les fluides (gaz et liquides) en se déplaçant dans une conduite sont le siège de forces internes que l'on interprète comme des phénomènes de viscosité. Cette viscosité est à l'origine des pertes de charge. [7]

### I.4.10 Odorisation

Le gaz naturel est normalement inodore. Il est nécessaire d'ajouter un odorisant au gaz alimentant le système de distribution pour des raisons de sécurité. L'ajout d'odorisants, généralement des composés organiques soufrés sentant fortement, au gaz naturel afin de permettre la découverte de fuites de gaz par l'odeur à une très faible concentration (avant qu'une accumulation de gaz à une concentration dangereuse dans l'air ne se produise). [6]

## I.5 Le gaz naturel dans le monde et en Algérie

### I.5.1 Le gaz naturel dans le monde

Le gaz naturel occupe aujourd'hui la troisième place dans la production mondiale d'énergie primaire, avec une part dépassant les 20%, après le pétrole et le charbon. La production du gaz, qui a atteint 3 540 milliards de m3 en 2015, provient essentiellement de la zone Europe-Eurasie (28%), de l'Amérique du Nord (28%) et du Moyen Orient (17%).

En 2015, les réserves prouvées de gaz s'élevaient à près de 190 000 milliards de m3. C'est le Moyen Orient qui en détient la plus grosse part, suivi par la zone Europe-Eurasie. Il faut signaler ici le cas de l'Iran, qui disposerait des plus grandes réserves prouvées de la planète (18% du total mondial), devant la Russie et le Qatar. [8]

### I.5.2 Le gaz naturel en Algérie

L'Algérie est un important producteur de gaz naturel au niveau mondial et le plus grand producteur méditerranéen, avec un volume de 75 Gm3 environ, soit près de la moitié de la production totale de la région. La capacité globale des infrastructures algériennes d'exportation est de 80 Gm3, dont 53 par pipeline et 27 sous forme de GNL : [8]

- ✓ Gazoduc TRANSMED vers l'Italie via la Tunisie (capacité de 33,5 Gm3/an) ;
- ✓ Gazoduc MEG vers l'Espagne *via* le Maroc (capacité de 11,5 Gm3/an, extensible à 21 Gm3) ;
- ✓ Gazoduc MEDGAZ vers l'Espagne (capacité de 8 Gm3/an, extensible à 16 Gm3);
- ✓ Terminal GNL d'Arzew (capacité de 21 Gm3/an) ;
- ✓ Terminal GNL de Skikda (capacité de 6 Gm3/an).

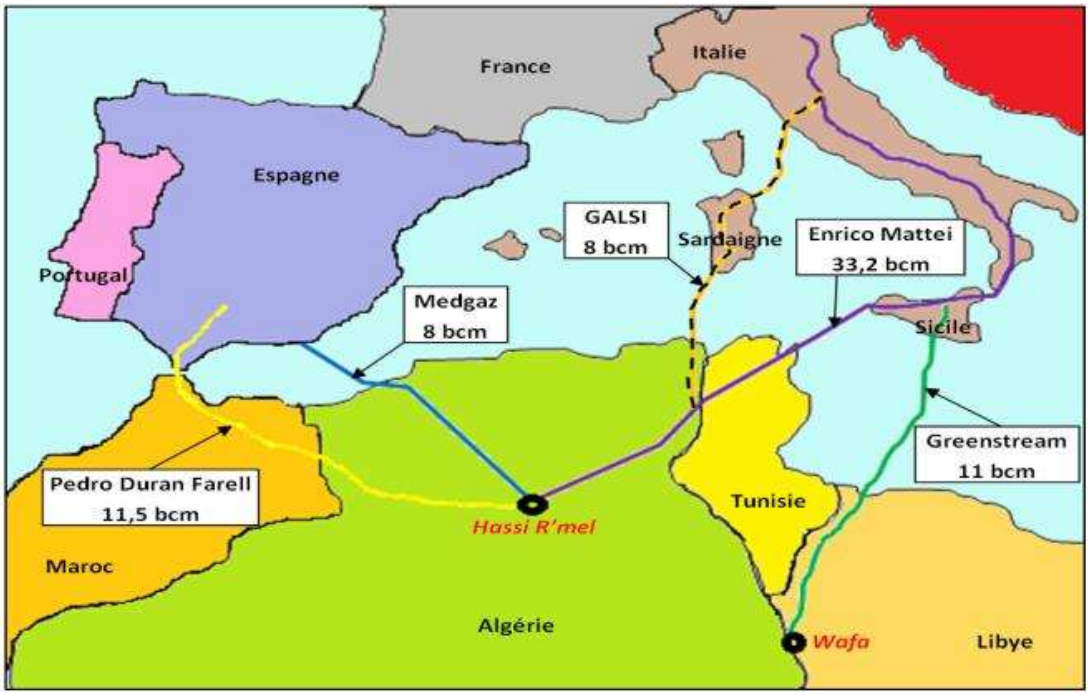



**Figure I-1: Gazoducs Maghreb-Europe installés ou en projet [8]**

## I.6 Transport de gaz naturel

Le transport du gaz naturel consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution. Il existe deux moyens pour transporter le gaz efficacement : [9]

### I.6.1 Les gazoducs

Le transport du gaz naturel par gazoduc représente la solution la plus simple mais requiert la mise en place d'un réseau des conduites reliant les sites de production et de réception. Le gaz naturel doit être comprimé sous haute pression avant d'être transporté. Pour cela on utilise des canalisations en acier ayant quelques millimètres d'épaisseur et de 0,9 à 1,40 mètre de diamètre, soudés les uns aux autres supportant des pressions allant jusqu'à 90 bars. Pour maintenir cette haute pression, des stations de compression sont installées tous les 80 à 120 km. [9]

### I.6.2 Les méthaniers

Le transport par méthanier nécessite la liquéfaction du gaz naturel qui est transporté en phase liquide (GNL), afin de réduire le volume de stockage à la pression atmosphérique et à une température avoisinant de -162°C. En effet, un méthanier est un navire qui transporte généralement une charge dans 4 à 5 cuves par une vitesse moyenne de 19 nœuds. Le gaz est liquéfié sous pression, puis il subit un sous-refroidissement pour rester liquide à la pression atmosphérique. [9]

## I.7 Réseaux de distribution de gaz naturel

Les ouvrages de distribution ont pour vocation l'alimentation en gaz combustible des consommateurs, à une pression d'utilisation comprise à l'intérieur d'un intervalle bien précise. [10]

### I.7.1 Les différents types de réseaux

Les réseaux de distribution comprennent des conduites, des postes de détentes, des branchements et des colonnes montantes. Ils se classent en quatre catégories suivant le niveau de la pression de service : [10]

- **Catégorie B.P. (basse pression)**

Réseaux fonctionnant à une pression correspondant sensiblement à la pression effective nécessaire à l'entrée des appareils d'utilisation. Cette pression est de **21 mbar**.

Les réseaux B.P. sont constitués en majeure partie de conduites en fonte. Ils sont un héritage des anciennes distributions de gaz manufacturé. Ils doivent être également remplacés en polyéthylène ou en acier. Cette catégorie de réseaux est en voie d'extinction.

- **Catégorie M.P.B. (moyenne pression type B)**

Réseaux fonctionnant à des pressions entre **0.4 et 4 bar relatif** délivrant le gaz sur les réseaux de pression inférieure et chez les clients par l'intermédiaire de détendeurs. Après une détente, on peut obtenir trois niveaux de pressions selon le type d'usages :

- **21 mbar** (BP) pour les clients domestiques, tertiaires et petites industries,
- **300 mbar** (MP) pour les clients tertiaires et industriels.
- **1000 mbar** (MP) pour les clients tertiaires et industriels.

Les réseaux M.P.B. sont constitués de conduites en acier et en polyéthylène et pour certaines parties (réseaux tertiaires) en cuivre. Depuis 1996 l'emploi de ce dernier, en ouvrages enterrés n'est plus autorisé par le Distributeur.

- **Catégorie M.P.C. (moyenne pression type C)**

Réseaux fonctionnant à des pressions comprises entre **4 et 16 bars relatifs**, délivrant le gaz sur les réseaux de pression inférieure et chez les clients importants par l'intermédiaire des postes de détente.

Les réseaux M.P.C. construits entièrement en acier, permettent de véhiculer des quantités importantes de gaz.

### I.7.2 Structure des réseaux de distribution

La structure d'un réseau est définie par ses points de livraison (sources), sa fonction **(Transit** ou **Distribution)**, son niveau de pression et l'organisation de ses canalisations (maillage-antenne). Pour un réseau de distribution, les structures types sont les suivantes : [10]

- **Le réseau primaire**

C'est un réseau dont les conduites sont alimentées en **M.P.C.** par les réseaux de transport à partir d'un ou plusieurs postes de livraison. Il a une fonction essentiellement de transit et il est destiné à alimenter le réseau aval (MPB) par l'intermédiaire de postes de détente Ce réseau est dimensionné pour répondre à la demande dans les conditions les plus défavorables.

- **Le réseau secondaire**

C'est un réseau dont les canalisations sont alimentées par un ou plusieurs postes de détente à partir du réseau transport HP ou du réseau primaire MPC et assurent les transits de gaz. Elles peuvent aussi livrer du gaz aux installations des clients industriels. Elles sont en **B.P. ou en M.P.B.** Les règles généralement retenues pour leur calcul admettent qu'elles seront maillées à l'horizon de l'étude.

- **Le réseau tertiaire**

C'est un réseau dont les canalisations servent uniquement à la desserte des usagers. Elles partent d'un nœud du réseau secondaire et n'assurent aucun transit. Elles ont des structures ramifiées. Elles sont exploitées soit en **B.P.** soit en **M.P.B.**

### I.7.3 Intérêt des réseaux M.P.B

Le choix des réseaux M.P.B. a été motivé pour les raisons suivantes :

- **Techniques :** leur puissance est nettement supérieure à diamètre égal de conduite, à celle des réseaux B.P.
- **Economiques :** la construction d'un réseau M.P.B. par rapport à un réseau B.P. résulte du coût plus faible des conduites, des travaux de terrassement et de pose,
- **de qualité de service** : la détente du gaz directement à l'amont de l'installation du client, assure au niveau des appareils d'utilisations une pression constante,
- **de sécurité** : les détendeurs-régulateurs individuels ou collectifs sont munis de système de sécurités qui protègent l'installation par un dispositif de coupure automatique produisant l'interruption du gaz en cas de sur ou sous pression amont et aval, Les détendeurs des clients sont conçus pour fonctionner sous une pression amont comprise entre **0,4 bar et 4 bar.** La pression fournie à l'aval est de **21 mbar.** [10]

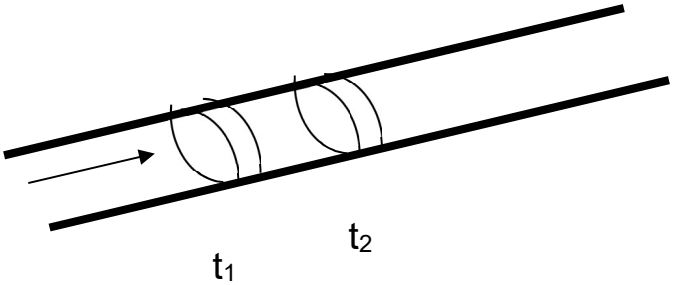
## I.8 Pertes de charge

### I.8.1 Charge totale

Nous considérons un fluide s'écoule dans une conduite de forme quelconque, nous concevons aisément qu'entre deux instants $t_1$ et $t_2$, une masse de gaz subira une variation de :

- Vitesse
- Volume
- Hauteur
- Pression

D'après la loi de la conservation de l'énergie, nous retrouverons toujours, entre les deux instants la même somme d'énergie, mais sous des aspects différents.




| | |
|---|---|
| $\frac{1}{2} mv^2$ | = Energie cinétique |
| $P/\rho$ | = Energie de pression |
| $m.g.z$ | = Energie de position (altitude) |
| $E_f$ | = Energie des forces de frottements |

**Figure I-2: Déplacement d'un gaz dans une conduite**

### I.8.2 Perte de charge linéaire

C'est la perte de pression due aux forces de frottement le long des parois. La pression du gaz va donc diminuer au fur et à mesure de son déplacement dans la conduite. La perte de charge linéaire est Proportionnelle : à la densité du gaz considéré, à la longueur de la conduite et au débit tandis qu'elle est inversement proportionnelle au diamètre. [7]

### I.8.3 Pertes de charge singulières

Ce sont les pertes de pression dues aux changements de direction tels que les coudes, les Tés, les vannes et les réductions (changement de section) qui opposent au gaz une certaine résistance. Ce type de perte de charge est aussi appelé perte de charge due aux accidents de parcours. Pour des raisons de simplification, on assimile ces points de résistance à une longueur supplémentaire de la conduite, qu'on appelle longueur équivalente. [7]

# Chapitre II
# Equations mathématiques

## I.1 Introduction

Le gaz naturel Algérien est acheminé depuis le gisement (HassiR'mel ) où il est extrait jusqu'aux consommateurs au moyen d'un ensemble de canalisation. Débutant par les gazoducs constituant le réseau de transport jusqu'aux conduites de réseau de distribution. L'écoulement du gaz dans ces canalisations est caractérisé par une chute de pression considérable connue par le terme perte de charge, dont leur détermination prend une importance primordiale, afin d'assurer une bonne alimentation en gaz naturel des abonnés. Dans ce chapitre nous introduisons les équations mathématiques indispensables pour le calcul de cette perte par deux méthodes (analytique et numérique).

## I.2 Ecoulement d'un gaz dans les conduites

L'écoulement d'un fluide dans une canalisation, même horizontale et rectiligne, est un phénomène compliqué qui ne peut être traduit par une seule formule. Dans notre application, les écoulements de **fluides compressibles** peuvent être étudiés en ne s'attachant qu'à la **composante principale vp** des vecteurs vitesse, celle dont la direction est en tous points perpendiculaire au plan normal à la ligne générale de l'écoulement, encore appelée **ligne moyenne**(figure1). [11]

**Figure II-1: Écoulements monodimensionnels de gaz [9]**

D'après Reynolds, il existe au moins deux régimes d'écoulements :

### I.2.1 Ecoulement laminaire

Dans l'écoulement laminaire, les particules du fluide se déplacent en lignes droites parallèles à la paroi de la canalisation .Cet écoulement ne se présente que si:

- Le fluide est suffisamment visqueux
- La vitesse moyenne est faible
- Le diamètre de la canalisation est faible [10]

### I.2.2 Ecoulement turbulent

Dans l'écoulement turbulent, les particules du fluide se déplacent dans toutes les directions au hasard. Ce type d'écoulement est très fréquent dans tous les écoulements industriels[10]

### I.2.3 Le nombre de Reynolds

L'étude du Nombre de Reynolds permet de déterminer le caractère turbulent ou laminaire d'un écoulement. Ce nombre adimensionnel, représente le rapport des forces d'inertie aux forces de frottement visqueux: [10]

$$R_e = \frac{\rho\, V\, D}{\mu} \quad (\mathrm{II.1})$$

V : vitesse moyenne en m/s

D : Diamètre en m

$\mu$: Viscosité dynamique

$\rho$ : Masse volumique en Kg/$m^3$

### II.2.4 Coefficient de frottement

On peut calculer mathématiquement le coefficient de frottement f pour l'écoulement laminaire, mais on ne dispose d'aucune expression mathématique simple de la relation entre f et le nombre de Reynolds pour le cas de l'écoulement turbulent. Toutefois, des expériences ont montrées que la rugosité relative des tubes (le rapport entre la taille des aspérités de surface au diamètre intérieur du tube) influe sur la valeur de f. [10]

- Pour l'écoulement laminaire: f = 64 / Re
- Pour les tubes lisse : f = 0,316 / Re 0.25
- Pour les tubes rugueux :$1\sqrt{f} = 2\log\left(Re\sqrt{f}\right) - 0.8$

Pour le cas de l'écoulement turbulent l'équation de COOLBROOK est considérée comme la plus acceptable pour le calcul de f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (\mathrm{II.2})$$

## II.3 Géométrie du problème

Dans notre étude nous avons utilisé une géométrie de forme cylindrique représentant la conduite de distribution du gaz naturel avec plusieurs calibres (diamètres).

**Figure II-1: géométrie utilisé**

Les diamètres utilisés sont récapitulés dans le tableau suivant :

| Calibre nominal (mm) | Diamètre intérieur(mm) |
|---|---|
| **Conduites en polyéthylène** | |
| PE250 | 221,6 |
| PE200 | 177,2 |
| PE125 | 102,2 |
| PE63 | 51,4 |
| PE40 | 32,6 |
| **Conduites en cuivre** | |
| CU22 | 20 |
| CU16 | 14 |

**Tableau II-1: Les différents diamétres utilisés[5]**

## II.4 Théorèmes fondamentaux

### II.3.1 L'équation de continuité

Cette équation traduit la conservation de la masse. Elle s'écrit : [11]

$$\int \rho_1 v_1 \Omega_1 = \int \rho_2 v_2 \Omega_2 \quad (\mathrm{II.3})$$

Avec$\Omega_1$ et $\Omega_2$ sections planes perpendiculaires à la ligne moyenne.Encore appelées sections droites :

$v_1, v_2$ : composante du vecteur vitesse selon la normale chacune de ces sections.

Compte tenu de l'hypothèse de la constance de cette vitesse sur une section droite et en admettant que la masse volumique ρ soit également constante sur cette section, on peut écrire :

$$\rho_1 v_1 \Omega_1 = \rho_2 v_2 \Omega_2 = q_m \quad (\mathrm{II.4})$$

Avec $q_m$débit-masse du fluide dans le tube de courant.

### II.3.2 Principe de la conservation de l'énergie

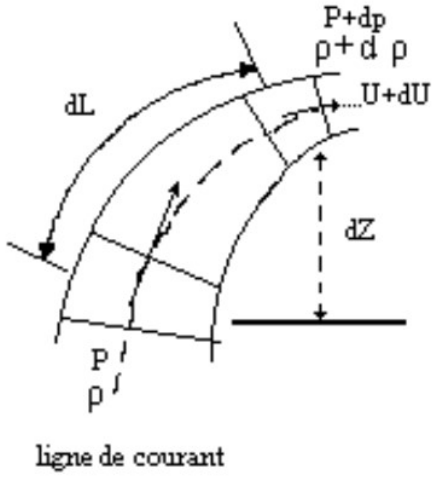



**Figure II-3: Déplacement dL d'un fluide en écoulement [12]**

L'équation de l'énergie traduit le premier principe de la thermodynamique ;en appliquant le principe de la conservation de l'énergie à l'unité de masse du fluide ayant subi un déplacement dL on obtient:

$$dE + UdU + d\tau_p + gdZ = dQ + dw \quad (\mathrm{II.5})$$

Où :

dE : variation de l'énergie interne du fluide par (kg).

UdU : variation de l'énergie cinétique du fluide (kg).

$d\tau_p$ : travail élémentaire exercé dans la conduite par les forces de pression

gdZ : travail élémentaire exercé dans la conduite par les forces de gravité (kg)

dQ : énergie transmise sous forme de chaleur au milieu extérieur à la veine

dW : énergie dissipée par les forces de frottement.

Compte tenu de : $d\tau_p = d\left(\frac{P}{\rho}\right) et\ dE = dQ - dP\left(\frac{1}{\rho}\right)$:

On obtient : $\rho VdV + dP + \rho gdZ = \rho dW \quad (\mathrm{II.6})$

En intégrant entre deux points de la conduite et en posant ρ constante nous aurons :

$$\rho\frac{V_2^2}{2}+\rho g h_2+P_2=\rho\frac{V_1^2}{2}+\rho g h_1+P_1+\rho W \quad (\mathrm{II.7})$$

On retrouve ainsi l'équation de BERNOULLI tenant compte de la perte de charge ρW. Cette équation est particulièrement valable pour le cas des écoulements permanents des fluides dans les conduites cylindriques.

### II.3.3 Equation de BERNOULLI

L'équation de BERNOULLI est déduite des équations générales de la dynamique des fluides parfaits en considérant les hypothèses de calcul suivantes : [12]

a- Fluide parfait en écoulement permanent,

b- Forces de volume dérivant d'un potentiel

c- ρ n'est fonction que de p, ou bien ρ est constant.

Le long d'une ligne de courant l'équation de BERNOULLI s'écrit :

$$V\frac{dV}{d\Omega}=-\frac{dU}{d\Omega}-\frac{1}{\rho\frac{dP}{d\Omega}} \quad (\mathrm{II.8})$$

Qu'on peut intégrer sous la forme :

$$\frac{V^2}{2}+U+\int\left(\frac{dP}{\rho}\right)=cte \quad (\mathrm{II.9})$$

Entre deux points 1 et 2 de la ligne de courant on peut écrire :

$$\frac{V_2^2}{2}-\frac{V_1^2}{2}+U_2-U_1+\int_1^2\left(\frac{dP}{\rho}\right)=cte \quad (\mathrm{II.10})$$

Si les forces de volume se réduisent aux seules forces de gravité, on remplacera U par g.h, en outre, ρ est constant (fluide incompressible), le calcul de l'intégral est immédiat et on trouve :

$$\frac{V_1^2}{2}+gh_1+\frac{P_1}{\rho}=\frac{V_2^2}{2}+gh_2+\frac{P_2}{\rho} \quad (\mathrm{II.11})$$

Où :

V1 et V2 : vitesse du gaz aux points 1 et 2

g : accélération de la pesanteur

h1 et h2 : cotes des points 1 et 2.

## I.4 Calcul des pertes de charge par la méthode analytique

### II.4.1 Formule générale de la perte de charge

En théorie on montre que :

$$\rho dW = -\rho \frac{V^2}{2} \times \frac{\lambda}{D} dL \quad (\mathrm{II.12})$$

Où :

dL : élément de longueur de la conduite.

λ : coefficient de perte de charge, nombre sans dimension fonction du nombre de REYNOLDS « Re » et de « e », où « e » représente la hauteur moyenne des aspérités en mm (rugosité).

Une précision très grande sur λ n'est pas requise et, en concordance avec les précisions d'hypothèses déjà exposées (régime permanent, loi approchée des gaz réels, iso thermicité, Etc.), on peut se satisfaire de la formule de RENOUARD qui est valable pour tous types de conduite et pour Re<5.106, et$\lambda = 0.172 \times Re^{-1.82}$[12]

### II.4.2 Calcul de la perte de charge dans une conduite horizontale

$$\Delta P = \left(-8\frac{\rho}{\pi^2}\right)\lambda \frac{Q^2}{D^5}\Delta L \quad (\mathrm{II.13})$$

Cette équation donne pour les basses pressions :

$$P_1 - P_2 = 770 S\lambda \left(\frac{T}{T_0}\right)\left(\frac{Q^2}{D^5}\right) L \quad (\mathrm{II.14})$$

Où : P1, P2 : pression aux extrémités de la conduite en bar

S : densité fictive du gaz

T : température absolue du gaz

$T_0$ : Température de référence à 15°C

D : diamètre du tronçon en mm

L : longueur de la conduite en m

Q : débit circulant dans le tronçon en m3/h à 15°C et 1,013bar

- **Pour les hautes pressions**

$$P_1^2 - P_2^2 = 1614 S\lambda Z \frac{T}{T_0}\frac{Q^2}{D^5}L \quad (\text{II.}15)$$

Où :

Z : facteur de compressibilité, pour le gaz naturel et à une pression < 70bar

$$Z = 1 - \left(\frac{P}{500}\right) \quad (\text{II.}16)$$

Entre deux points A et B :

$$Z_m = 1 - \left(\frac{P_m}{500}\right) \quad (\text{II.}17)$$

$$P_m = \frac{P_A - P_B}{2} \quad (\text{II.}18)$$

### II.4.3 Calcul de la perte de charge par la formule simplifiée de Renouard

Cette équation donne pour les basses pressions :

$$P_1 - P_2 = 232 \times 10^6 \times SL\frac{Q^{1.82}}{D^{4.82}} \quad (\text{II.}19)$$

Pour les moyennes pressions type B :

$$P_1^2 - P_2^2 = 48600 \times SL\frac{Q^{1.82}}{D^{4.82}} \quad (\text{II.}20)$$

Où : P1 et P2 : les pressions en bar absolu

S : la densité fictive du gaz

L : la longueur de la conduite en Km

D : le diamètre intérieur de la conduite en mm

Q : le débit dans la conduite en m3/h (à 15° C et 1 atm)

Avec :

$$S = d\left(\frac{\nu}{0.22}\right)^{0.18} \quad (\text{II.}21)$$

Où :ν : viscosité cinématique du gaz en cm2/s

d : la densité réelle du gaz.

## I.5 Equations gouvernantes dans les simulations numériques

Les équations qui gouvernent le phénomène d'écoulement d'un gaz dans une conduite sont :

### II.5.1 Equation de continuité

Elle est déduite du principe de conservation de masse et s'exprime sous forme tensorielle comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j\right) = 0 \quad (\mathrm{II.22})$$

(j=1, 2, 3 : indice de sommation)

Pour un fluide Newtonien incompressible, l'équation (II.22) se réduit à :

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (\mathrm{II.23})$$

### II.5.2 Equations de quantité de mouvement

D'après la deuxième loi fondamentale de la dynamique, l'équation de la dynamique sous forme tensorielle s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \quad (\mathrm{II.24})$$

$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)$ : représente le taux de transport de la quantité de mouvement suivant la direction i,

$F_i$ : Force de volume suivant la direction i.

$\frac{\partial p}{\partial x_i}$ : Forces dues à la pression.

$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]$ : Forces de viscosité.

L'équation (II.24) représente la conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier Stokes) d'un fluide visqueux incompressible pour un régime stationnaire.

En utilisant l'hypothèse de Boussinesq qui dans notre cas est vérifiée, la convection naturelle tridimensionnelle dans centrale à cheminée solaire est modélisée par les équations suivantes:

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \quad \text{(II.25)}$$

- **Equation de quantité de mouvement suivant la direction X**

$$\rho_0\left[\frac{\partial}{\partial x}(uu)+\frac{\partial}{\partial y}(vu)+\frac{\partial}{\partial z}(wu)\right]=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu\frac{\partial u}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu\frac{\partial u}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu\frac{\partial u}{\partial z}) \quad \text{(II.26)}$$

- **Equation de quantité de mouvement suivant la direction Y**

$$\rho_0\left[\frac{\partial}{\partial x}(uv)+\frac{\partial}{\partial y}(vv)+\frac{\partial}{\partial z}(wv)\right]=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu\frac{\partial v}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu\frac{\partial v}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu\frac{\partial v}{\partial z}) \quad \text{(II.27)}$$

- **Equation de quantité de mouvement suivant la direction Z**

$$\rho_0\left[\frac{\partial}{\partial x}(uw)+\frac{\partial}{\partial y}(vw)+\frac{\partial}{\partial z}(ww)\right]=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu\frac{\partial w}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu\frac{\partial w}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu\frac{\partial w}{\partial z}) \quad \text{(II.28)}$$

## I.6 Les modèles de turbulence

Il existe une grande variété des modèles de turbulence dont on distingue deux grandes classes :

- Les modèles du premier ordre ou modèles à viscosité turbulente basés sur l'hypothèse, dite de Boussinesq, qui regroupe les Modèles à zéro équation ou les Modèles algébriques, les modèles à une équation et les modèles à deux équation.
- Les modèles du second ordre qui consistent à calculer directement les tensions de Reynolds moyennant leurs équations de transport.

Dans notre étude, nous utilisons le modèle$k-\varepsilon$ qui a été le modéle à deux équations le plus largement testé et utilisé et qui offre souvent un bon équilibre entre la complexité et l'exactitude. En utilisant le logicielle de simulation CFD Ansys fluent6.

### II.6.1 L'hypothèse de Boussinesq

En 1877 Joseph Boussinesq a proposé d'écrire le tenseur de Reynolds comme le tenseur des contraintes dans le cas d'un fluide newtonien en faisant intervenir une viscosité de turbulence $\mu_t$. [13]

### II.6.2 Le modèle k-ε

Le modèle k-ε standard proposé en 1972 par Jones et Launder comprend une équation de transport pour l'énergie cinétique turbulente k et une équation de transport pour la dissipation ε.Il est basé sur le concept bousinesq (1877), les termes des contraintes de Reynolds sont : [14]

$$-\rho\overline{u_\iota u_j} = 2\mu_t s_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (\mathrm{II.29})$$

$s_{ij} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}\right)$ : est le tenseur de Reynolds,

$\mu_t = \rho \times \nu_t = \rho \times C_\mu \times \frac{k^2}{\varepsilon}$ : La Viscosité turbulente,

Avec :$C_\mu = 0.09$,

L'énergie cinétique turbulente est défini par :

$$k = \frac{1}{2} \times \overline{u_\iota \times u_\iota} = \frac{1}{2} \times \overline{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)} \quad (\mathrm{II.30})$$

Le taux de dissipation ε de l'énergie cinétique k est donné par :

$$\varepsilon = \nu \times \overline{\frac{\partial u_\iota \times \partial u_\iota}{\partial X_j \times \partial X_j}} \quad (\mathrm{II.31})$$

- **Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k**

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k \overline{u_\iota})}_{1} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial X_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial X_j}\right]}_{2} + \underbrace{G_k}_{3} - \underbrace{\rho\varepsilon}_{4} \quad (\mathrm{II.32})$$

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation.

- **Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε**

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho\varepsilon\overline{u_\iota}) = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial X_j}\right] + C_{l\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\mathrm{II.33})$$

Le terme de production $G_k$ est donnée par :

$$G_k = -\rho\overline{u_\iota u_\jmath}\frac{\partial\overline{U}_\jmath}{\partial x_i} = \rho v_t\left(\frac{\partial\overline{U}_\iota}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{U}_\jmath}{\partial x_i}\right)\frac{\partial\overline{U}_\iota}{\partial x_j} \quad (\mathrm{II.34})$$

L'adaptation des constants standards du modèle donné par Launder et Spalding (1974) rend le système d'équation opérationnel. Elles sont réunies dans le tableau suivant :

| $C_\mu$ | $C_{l\varepsilon}$ | $C_{\varepsilon 2}$ | $\sigma_k$ | $\sigma_\varepsilon$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.09 | 1.44 | 1.92 | 1 | 1.3 |

**Tableau II-2: valeurs des constants du modèle k-ε.**

Il est indispensable de savoir que le modèle k-ε est applicable aux écoulements à nombre de Reynolds élevé. [14]

## I.7 Vitesse du gaz dans une conduite

Les vitesses élevées de circulation du gaz peuvent constituer une gêne pour les abonnés ; pour minimiser l'effet nuisible, on conseille de limiter la vitesse à 20 m/s en MPB et de 5 à 10 m/s en BP. [12]

La vitesse du gaz dans une conduite peut être déterminée par la formule :

$$V = 354 \times \frac{Q}{P \times D^2} \quad (\mathrm{II.35})$$

Avec :

V : vitesse du gaz (m/s)

D : le diamètre intérieur de la conduite (mm),

Q : le débit du gaz (m3/h) (à 15° C et 1 atm),

P : la pression absolue (bar).

## I.8 Conclusion

Dans ce chapitre les relations analytiques nécessaires pour le calcul des pertes de charge linéaires ont été présentées. Ainsi qu'une description du modèle numérique à deux équations k-ε que l'on utilisera dans le chapitre suivons à l'aide du logicielle de CFD Ansys fluent6 pour le calcul de ces pertes afin de pouvoir faire comparer les résultats obtenus avec les résultats du calcul analytique.

# Chapitre III
# Simulation numérique

## I.1 Introduction sur gambit et fluent

La modélisation numérique est possible à l'aide de deux logiciels commerciaux couramment utilisés dans l'industrie un mailleur gambit et le logiciel de calcul fluent.

- **Le logiciel Gambit :** « **G**eometry **A**nd **M**esh **B**uilding **I**ntelligent **T**oolkit » est un mailleur 2D/3D; pré processeur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD. Il génère des fichiers. msh pour Fluent.
- **Le logiciel Fluent :** est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis.

Le Gambit regroupe trois fonctions :

-définition de la géométrie du problème,

-le maillage et sa vérification,

-la définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs. [15]

## I.2 Réalisation de maillage sous Gambit

L'application de gambit doit être lancé à partir du chemin suivant :
**/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe**

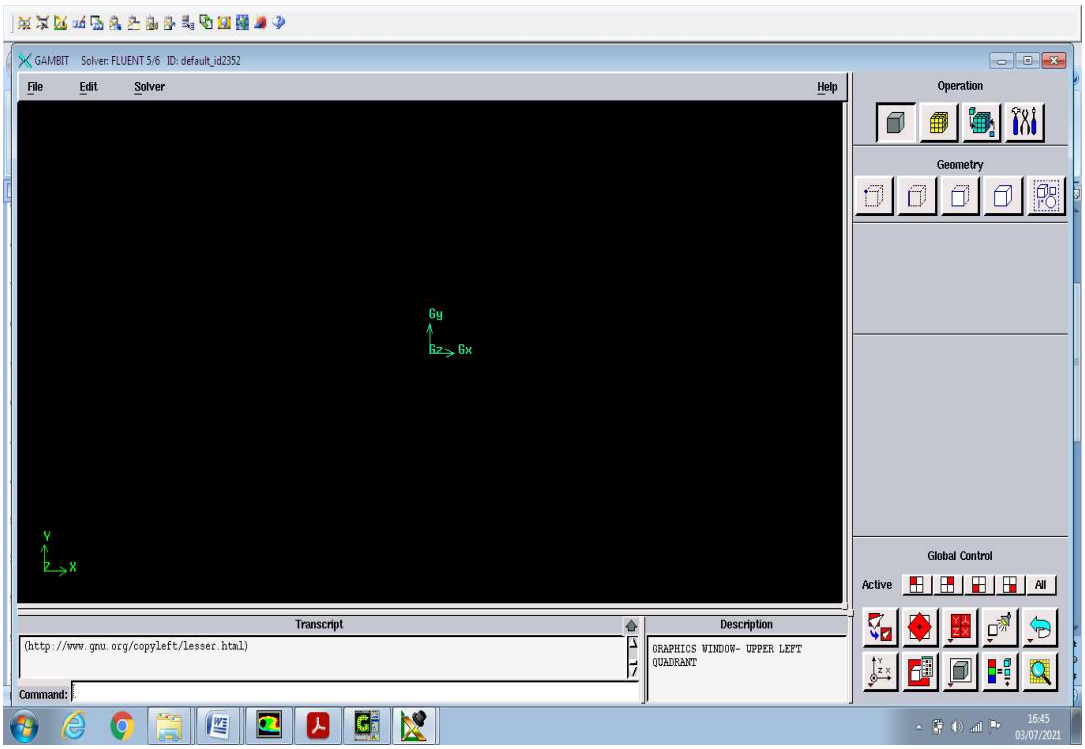
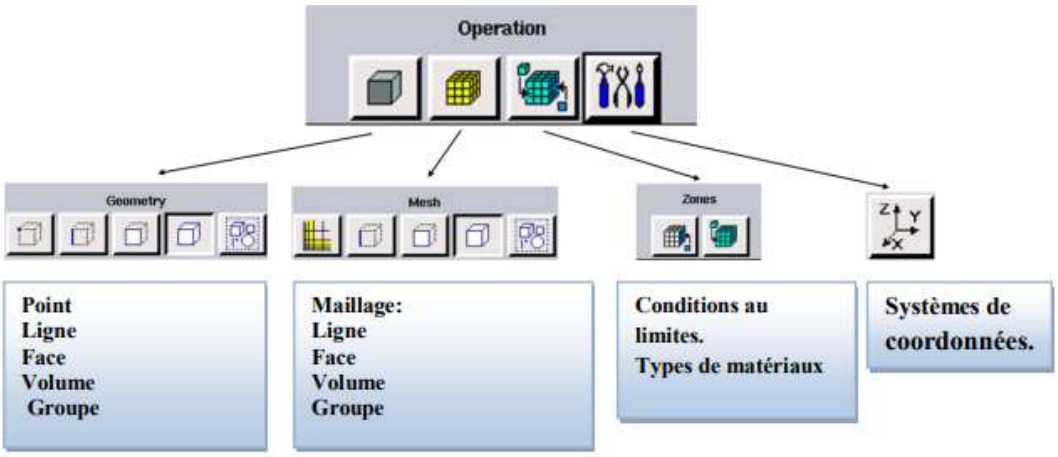



**Figure III-1: lancement de gambit.**

## I.3 Construction de la géométrie

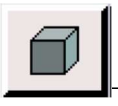
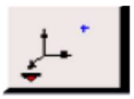
Le but de la construction de la géométrie est de définir le domaine de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

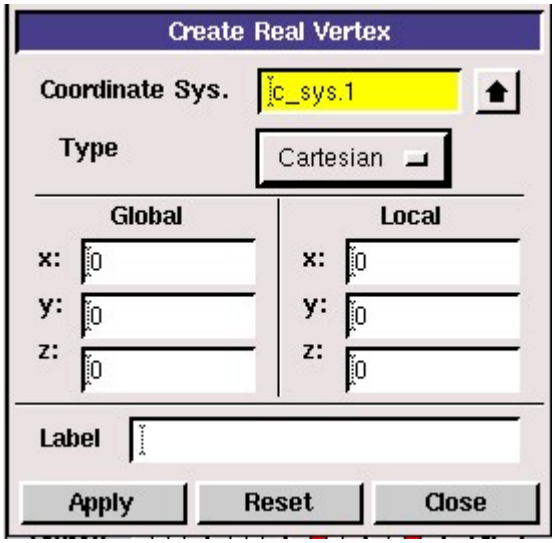
**Détail des principaux menus :**



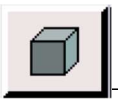
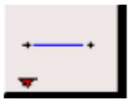

### I.3.1 Construction de la géométrie 2D

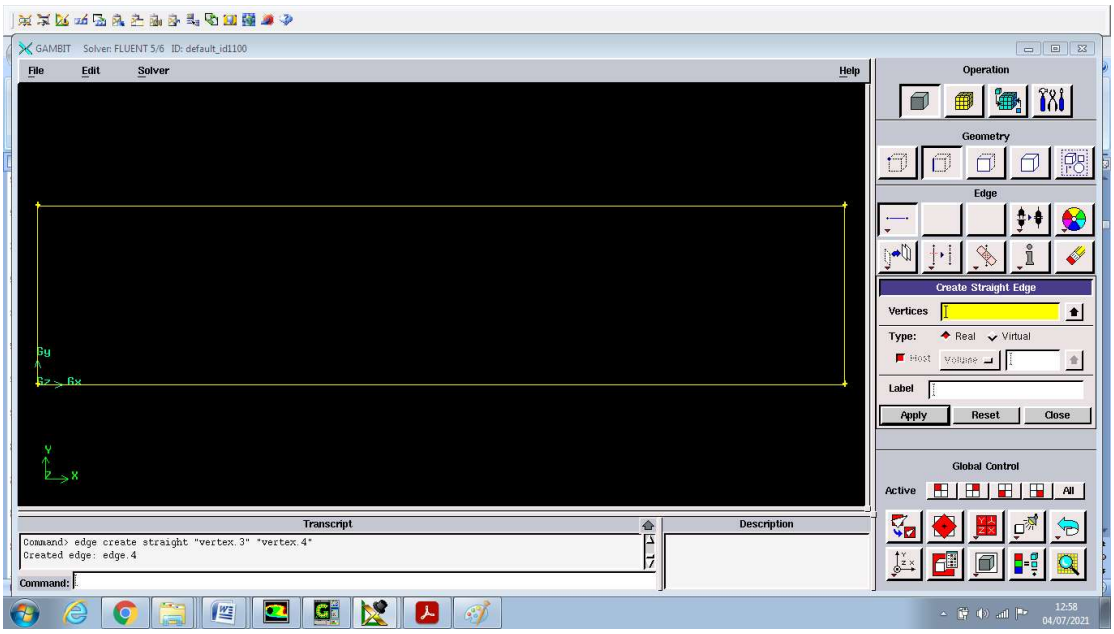
- Entrant les coordonnées des points qui définies la géométrie :

**GEOMETRIE**  **→point** **→créer point** 

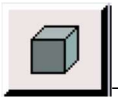
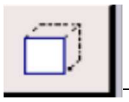
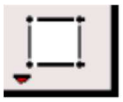


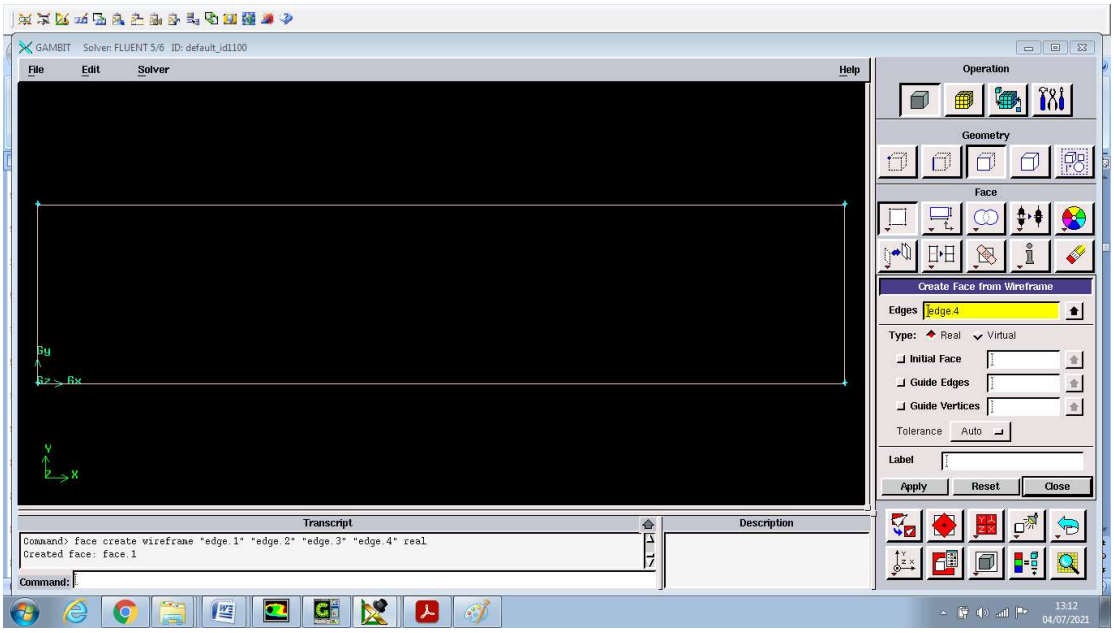
- Ensuite on fait relier les point on créant des ligne de connection on les appelles les « edge »

**GEOMETRIE**  **→Edge** **→créer un Edge** 

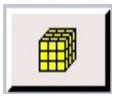


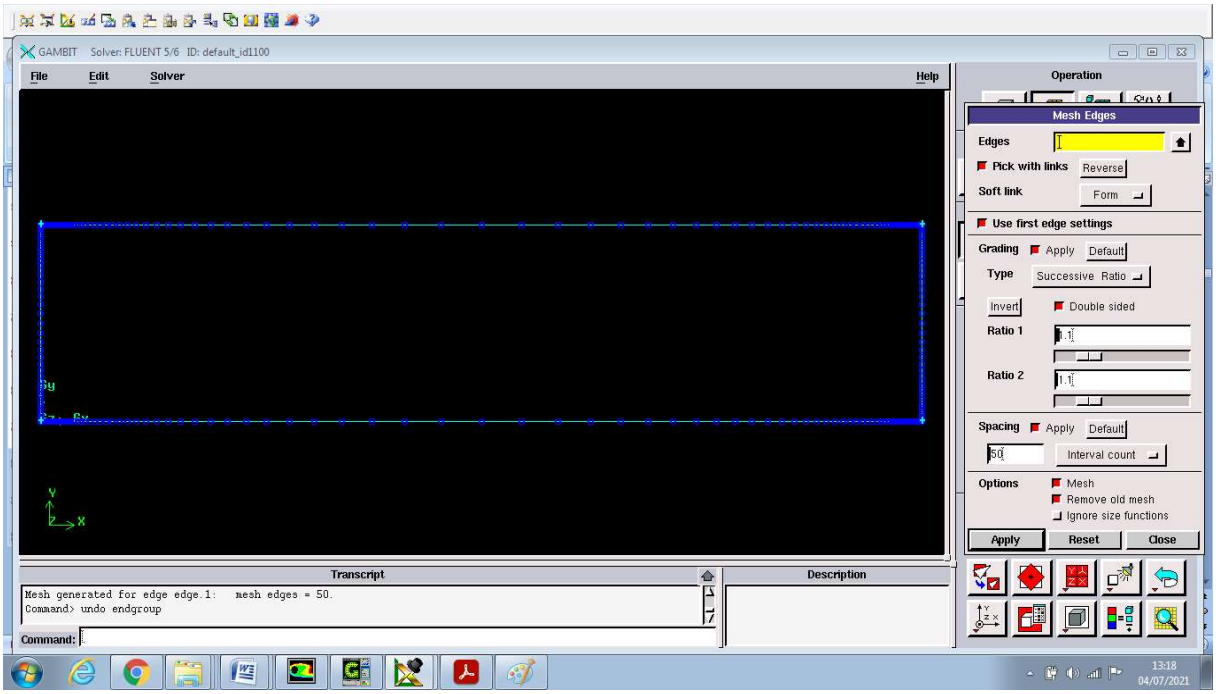

- La dernière étape à la création d'une géométrie 2dimension est la création de surface :

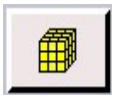
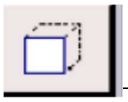
**GEOMETRIE**  **→ Face**  **→Former une face** 

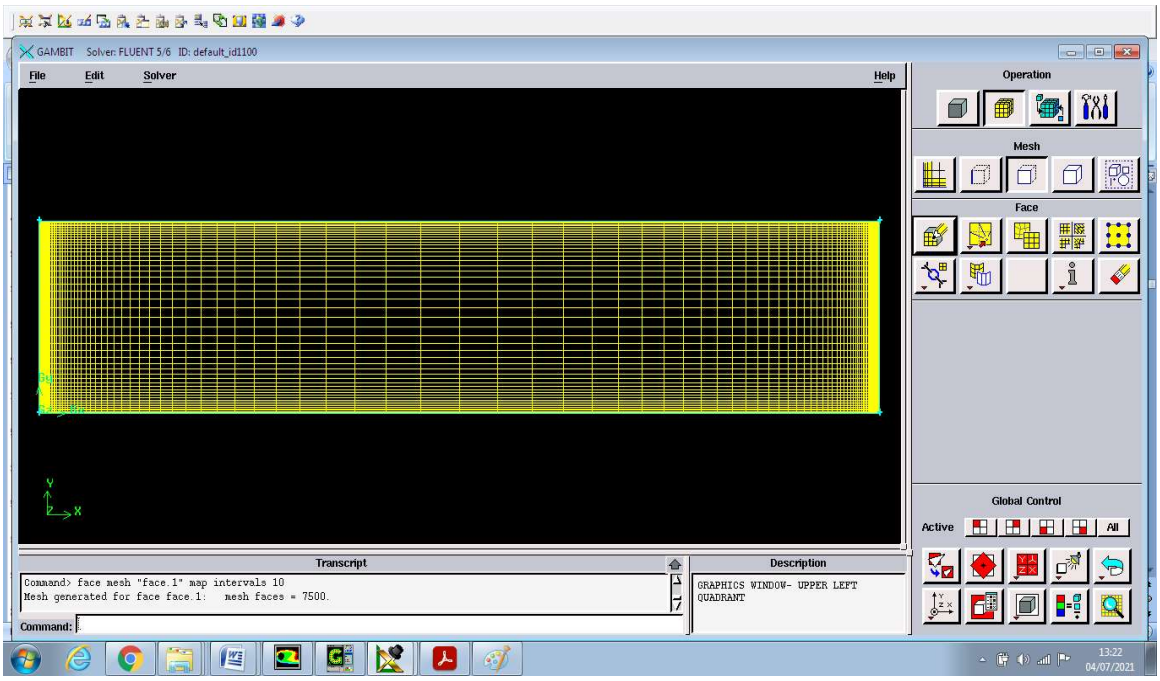


- Après la création de la géométrie on passe à la création de maillage :

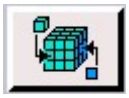
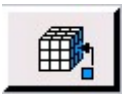
**MESH**  **→ Edge** **→ MECH Edges**

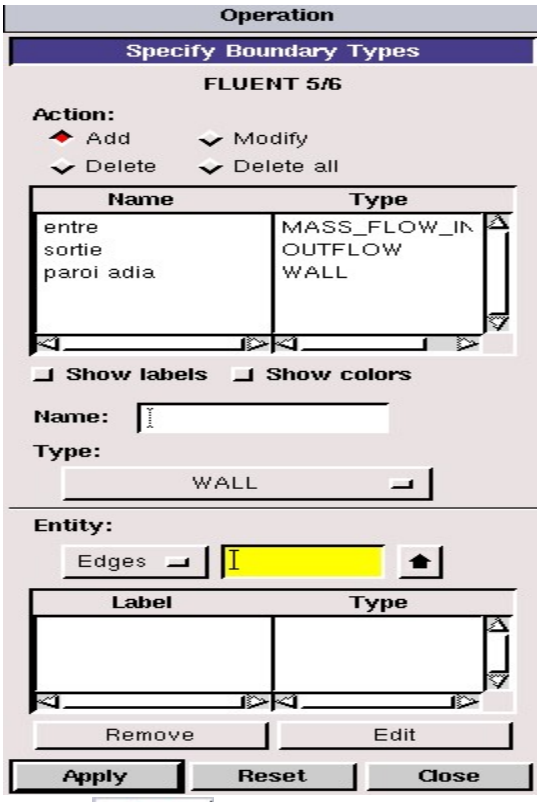



**MESH**  **→ Face**  **→ MECH Face**

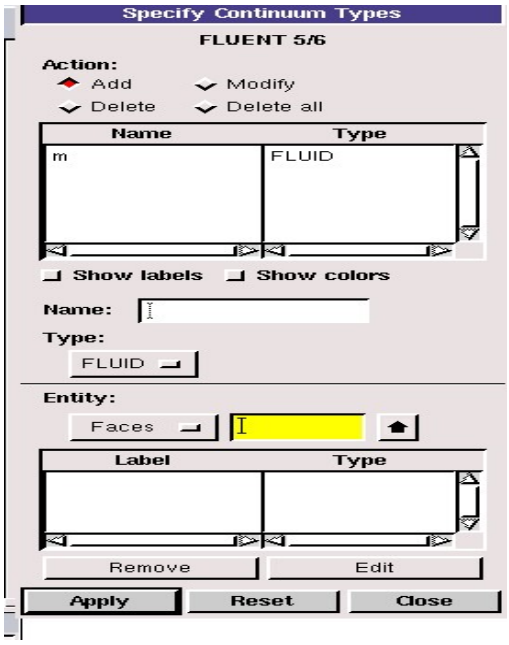


- La dernière étape consiste à la Définition des conditions aux limites et de nature du matériau.

**ZONE**  **SPECIFY BOUNDARY TYPES →** 

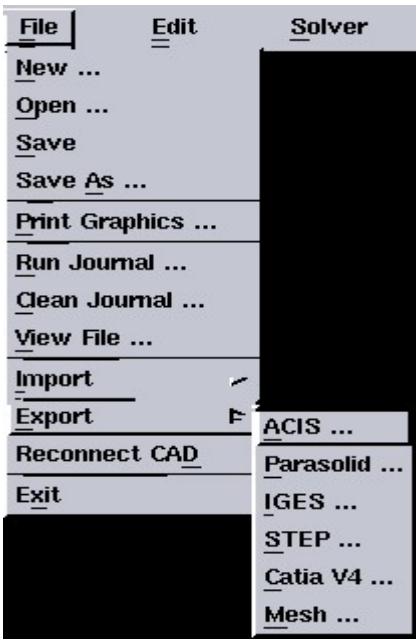



**ZONE** **→ SPECIFY CONTINUUM TYPES**



- Enfin le maillage devient pré à exporter sous forme de fichier « .msh » :

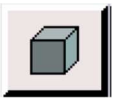
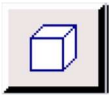
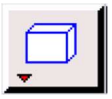
**Exportation du maillage de gambit**




### II.3.2 Construction de la géométrie 3D

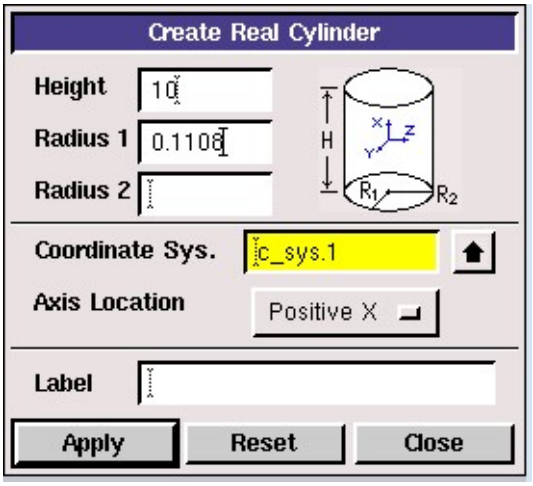
La création du Maillage 3D est similaire à la procédure de création de maillage 2D dans notre cas en va créer une géométrie cylindrique :

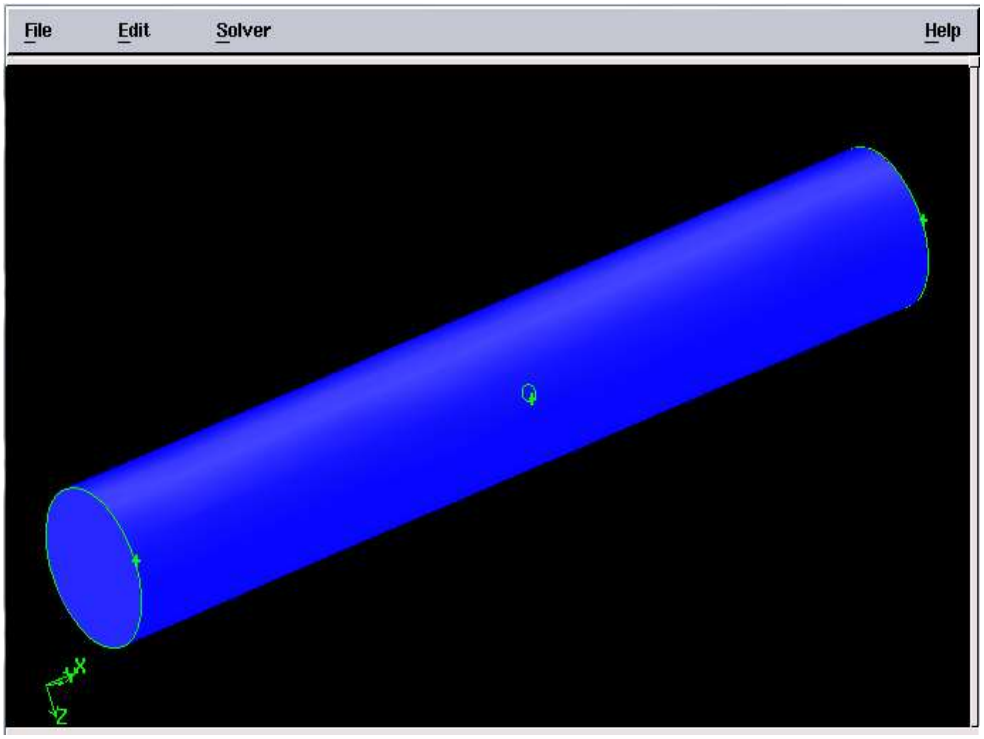
Création d'un cylindre :

**GEOMETRIE**  → **VOLUME**  → **CREATE VOLUME** 

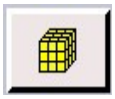
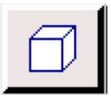
(click droit pour choisir) / CYLINDER :

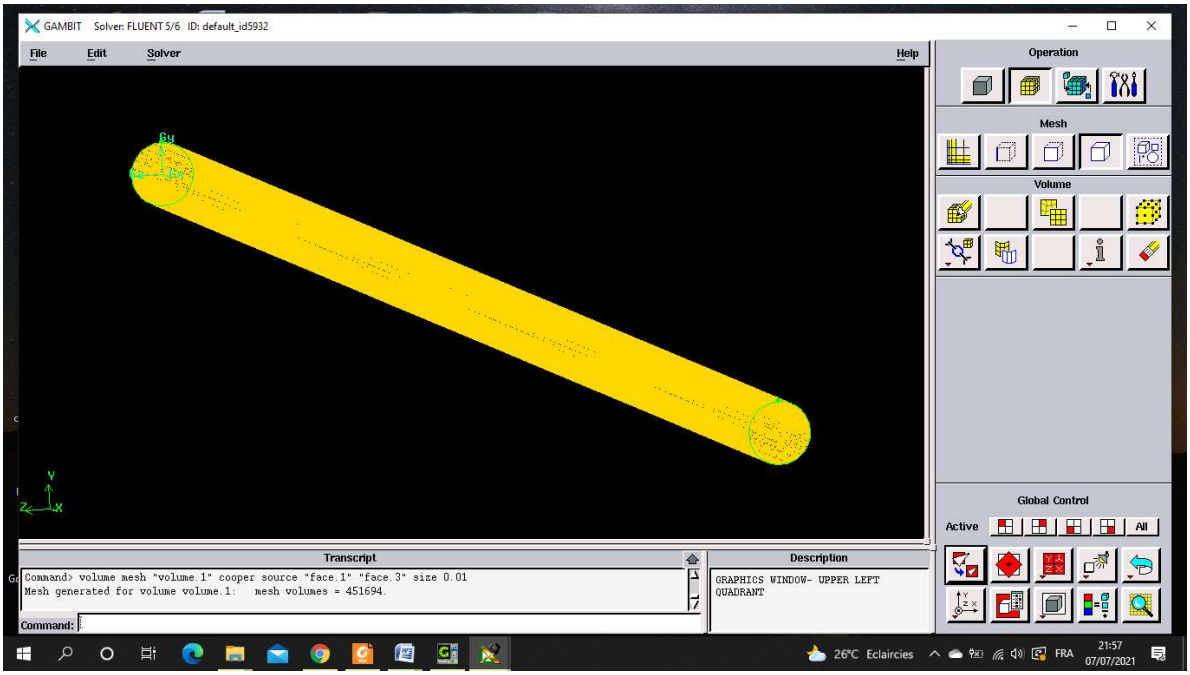

- Entrer la hauteur, le rayon, puis cliquer sur [Apply]



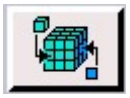
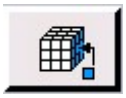


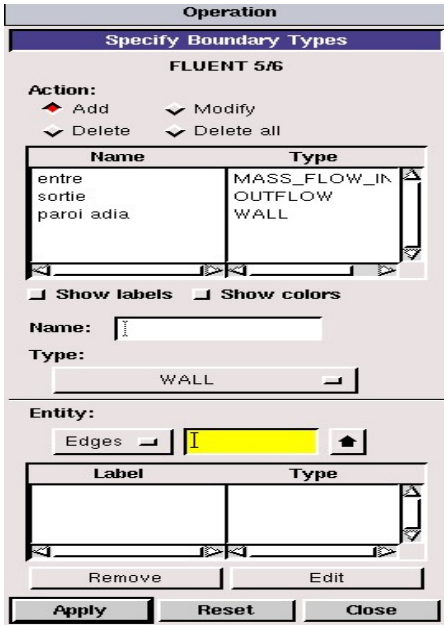

- Après la création de la géométrie on passe à la création de maillage, La génération de maillage (3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

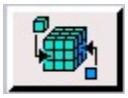
**MESH**  → **VOLUME**  → **MECH VOLUMES**

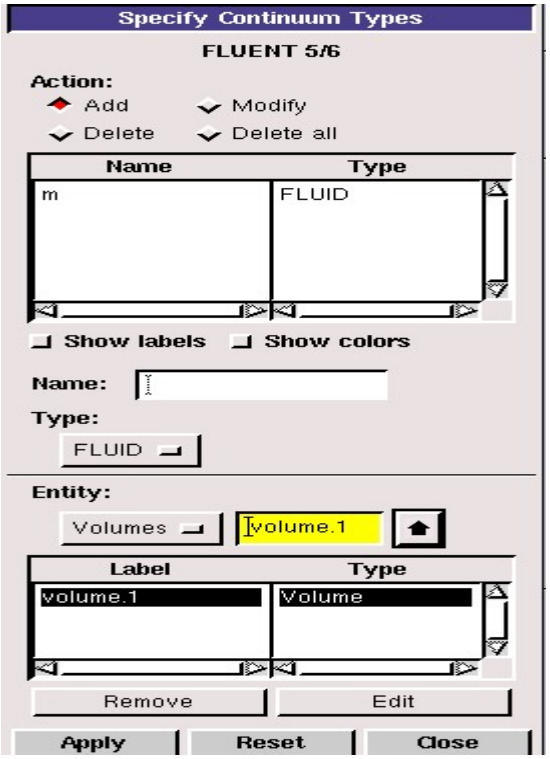


- Après la création de géométrie et la génération de maillage, on précise les conditions aux limites et le matériau :

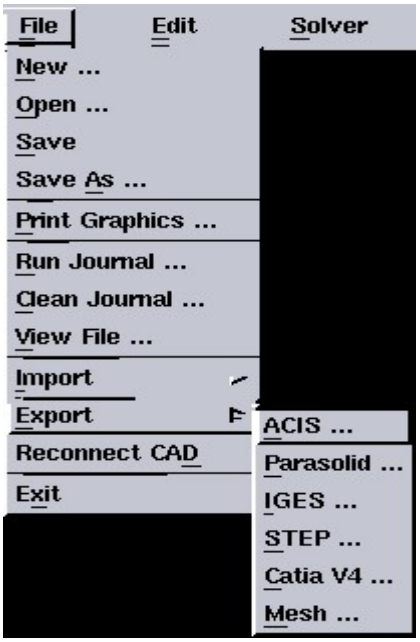
**ZONE**  **SPECIFY BOUNDARY TYPES →** 




**ZONE**  **→ SPECIFY CONTINUUM TYPES**



- Exportation du maillage de gambit :




### II.3.3 Effet de maillage

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. Une bonne qualité de maillage repose sur : Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Pour cela nous avons testé plusieurs maillages jusqu'à arriver à celui qui donne les résultats les plus précis possible. [16]

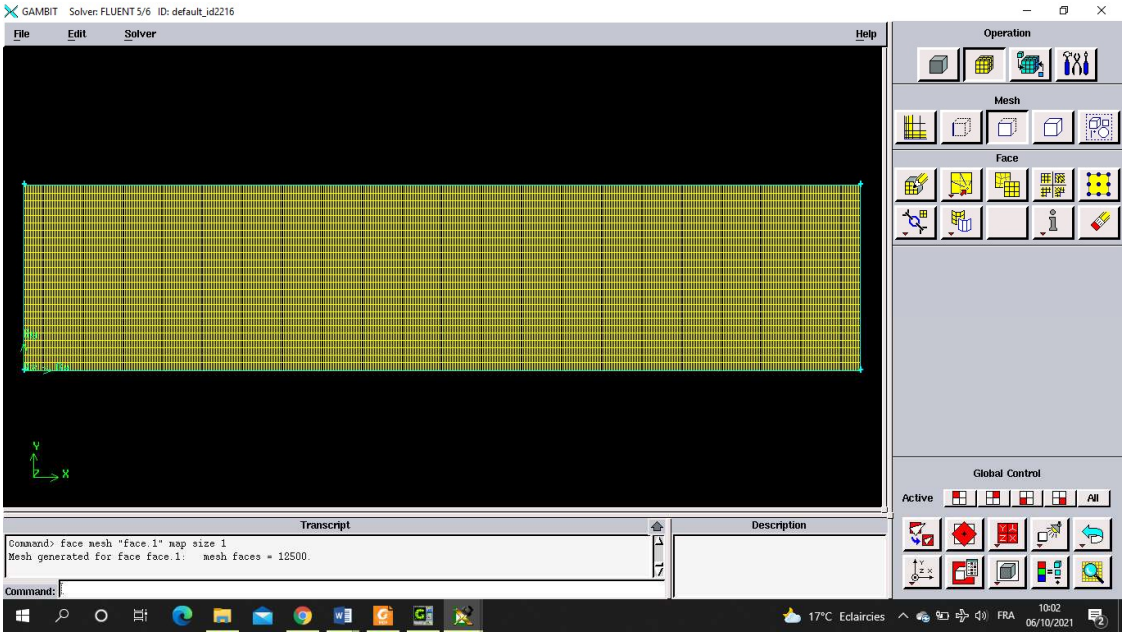



**Figure III-2: maillage avec nombre des mails =12500 avec un ratio=1**

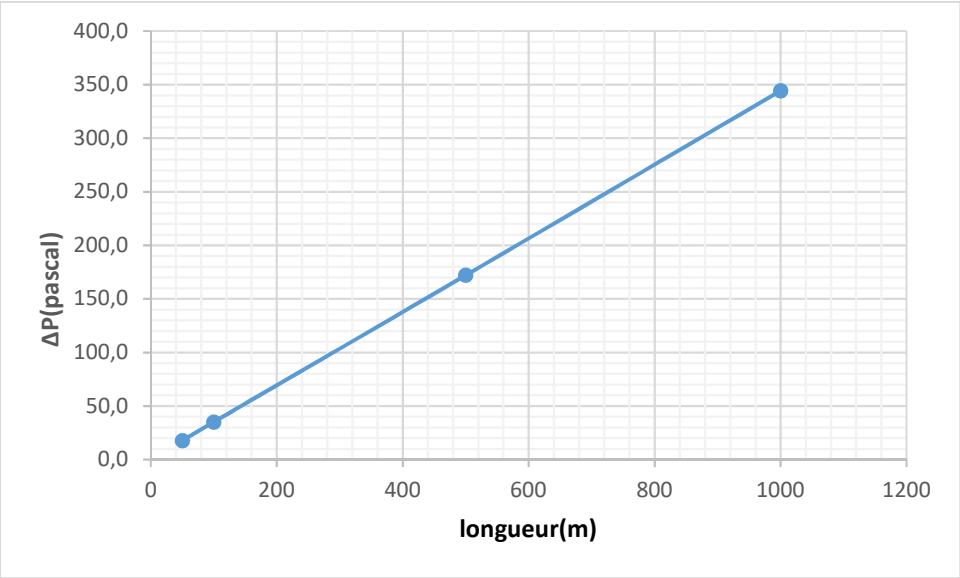



**Figure III-3: Résultats de simulation 2D pour le $1^{er}$ maillage**

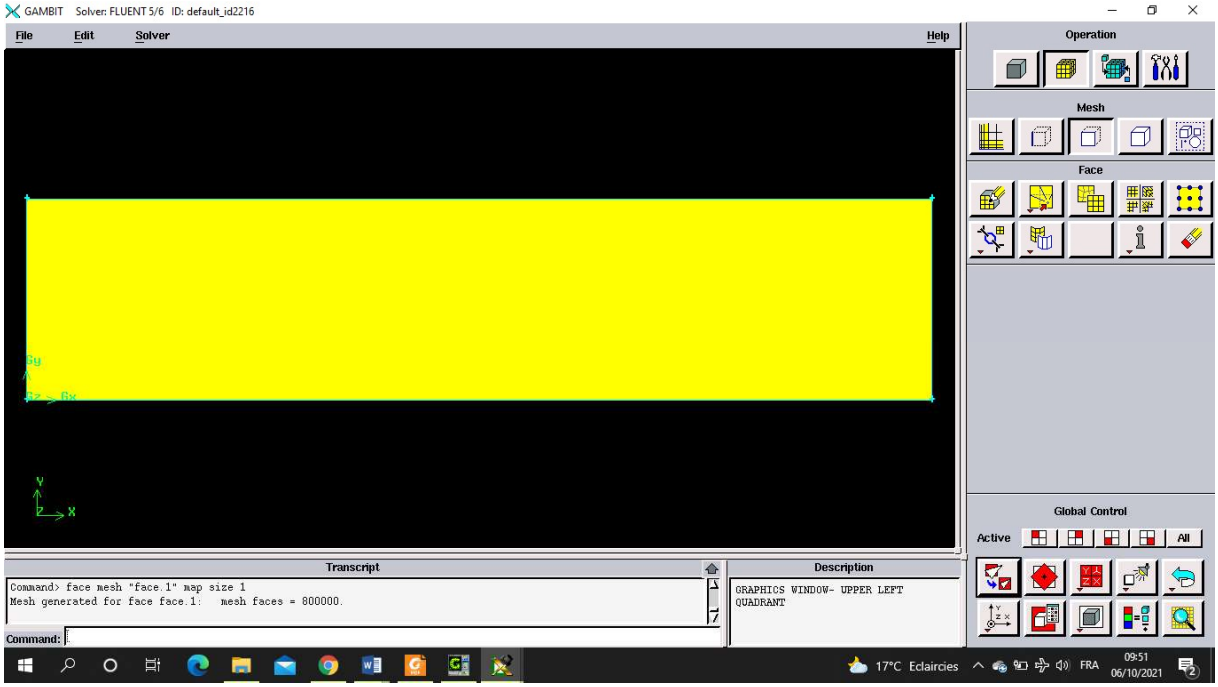



**Figure III-4 : maillage avec nombre des mails =800000 avec un ratio=1.05**

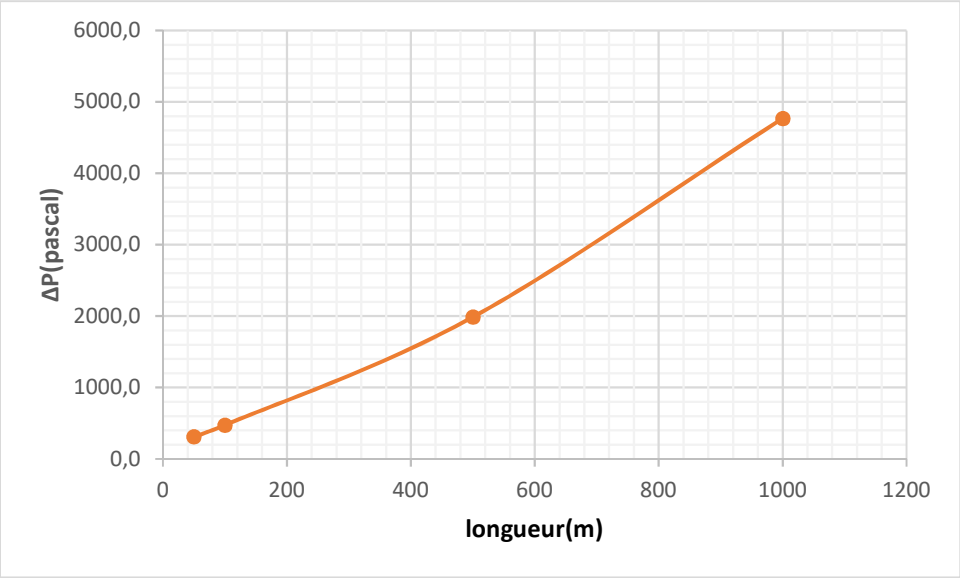
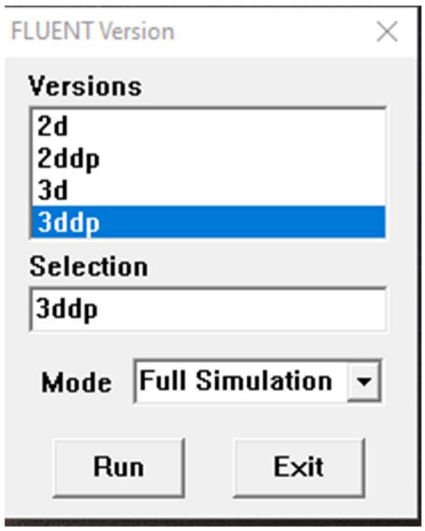



**Figure III-5:Résultats de simulation 2D pour le $2^{éme}$ maillage**

## I.4 Simulation par fluent

### II.4.1 Démarrage de fluent

On lance FLUENT6 à l'aide d'un raccourci dans le menu démarrer, choisir la version de FLUENT à utiliser (ici version 3ddp).



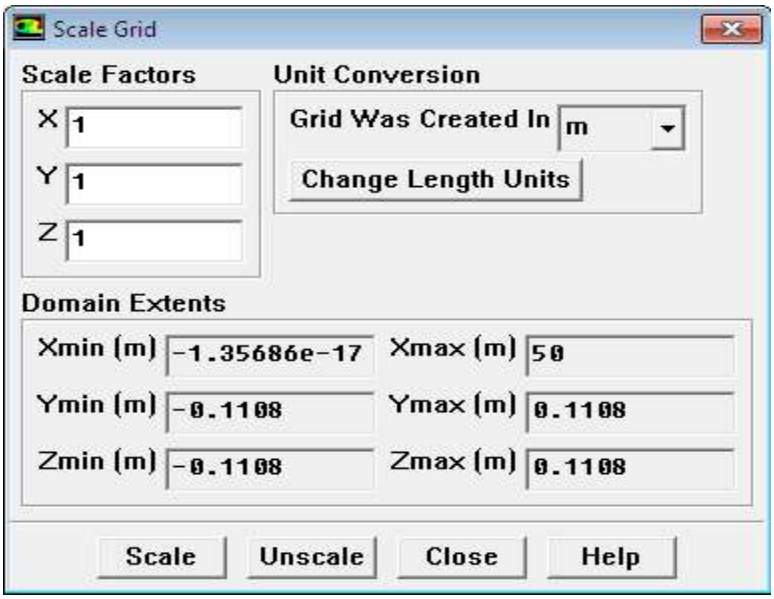
### II.4.2 Chargement du modèle

**File →Read → Case :** choisir le fichier (.msh)

**Grid→ Check :** vérifier s'il n'y a pas de problème dans le maillage exporté.

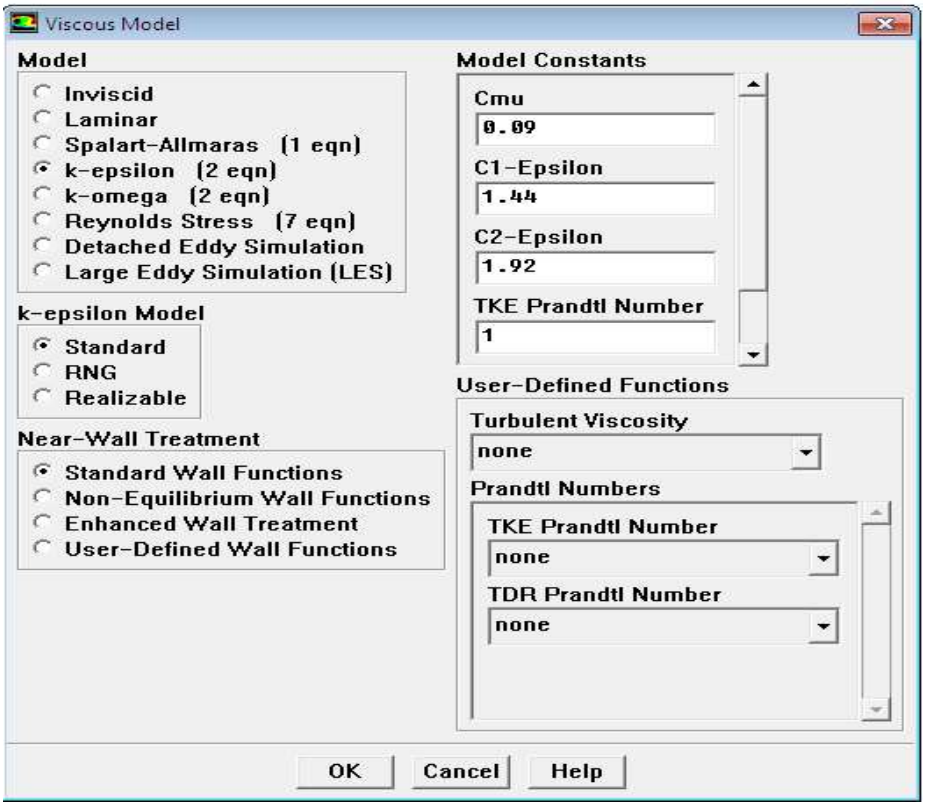
```
Grid Check

 Domain Extents:
   x-coordinate: min (m) = -1.356864e-017, max (m) = 5.000000e+001
   y-coordinate: min (m) = -1.108000e-001, max (m) = 1.108000e-001
   z-coordinate: min (m) = -1.108000e-001, max (m) = 1.108000e-001
 Volume statistics:
   minimum volume (m3): 8.231579e-006
   maximum volume (m3): 3.538152e-005
     total volume (m3): 1.912263e+000
 Face area statistics:
   minimum face area (m2): 1.863027e-004
   maximum face area (m2): 1.614023e-003
 Checking number of nodes per cell.
 Checking number of faces per cell.
 Checking thread pointers.
 Checking number of cells per face.
 Checking face cells.
 Checking bridge faces.
 Checking right-handed cells.
 Checking face handedness.
 Checking face node order.
 Checking element type consistency.
 Checking boundary types:
 Checking face pairs.
 Checking periodic boundaries.
 Checking node count.
 Checking nosolve cell count.
 Checking nosolve face count.
 Checking face children.
 Checking cell children.
 Checking storage.
Done.
```

**Grid →Scale:** choisir la dimension dans laquelle le modèle a été créé.

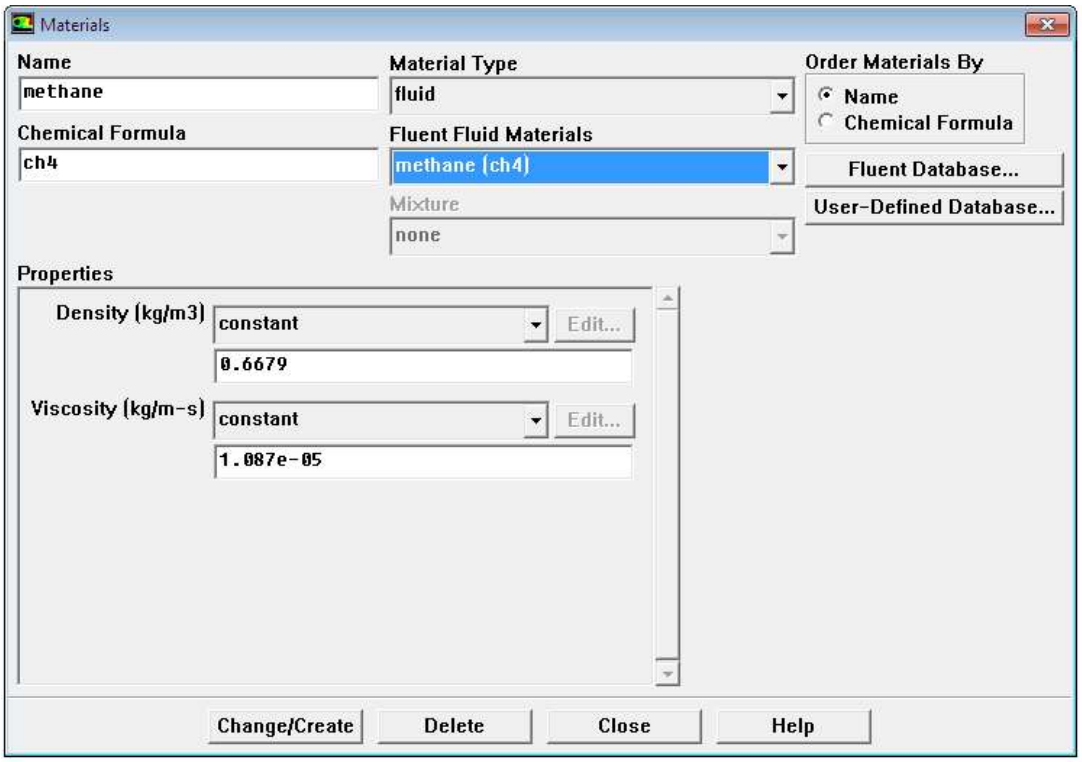


### III.4.3 Définition de modèle de turbulence, du matériau et des conditions aux limites

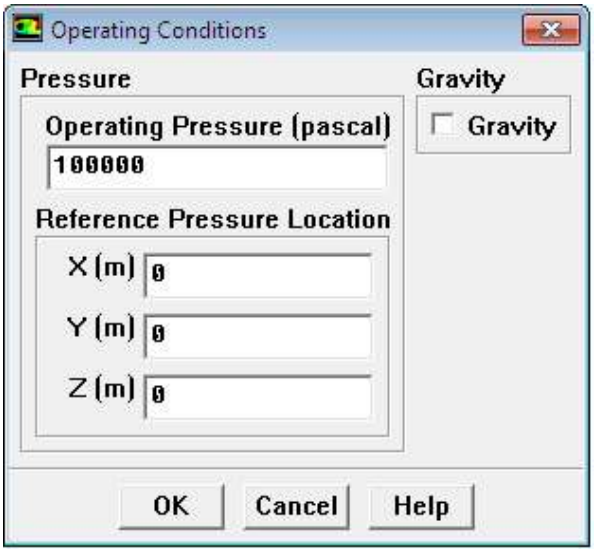
**Define → Models → Viscous :** sélectionner le modèle turbulent à deux équation simple **k-epsilon**.



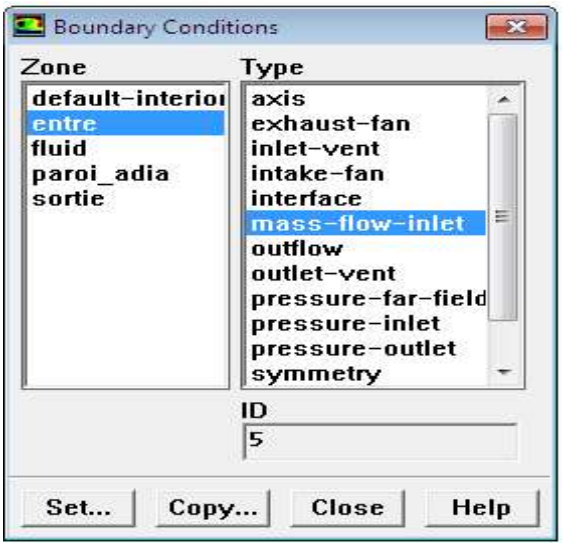

**Define → Materials :** définir le type de fluide utilisé dans la simulation, ici on utilise le Méthane (on utilise le méthane ch4 dans la simulation car il représente le majeur constituant de gaz naturel ; plus de 85% dans le gaz naturel de type Hassi R'mel donc son comportement au cours de l'écoulement est assimilé au comportement de gaz naturel).



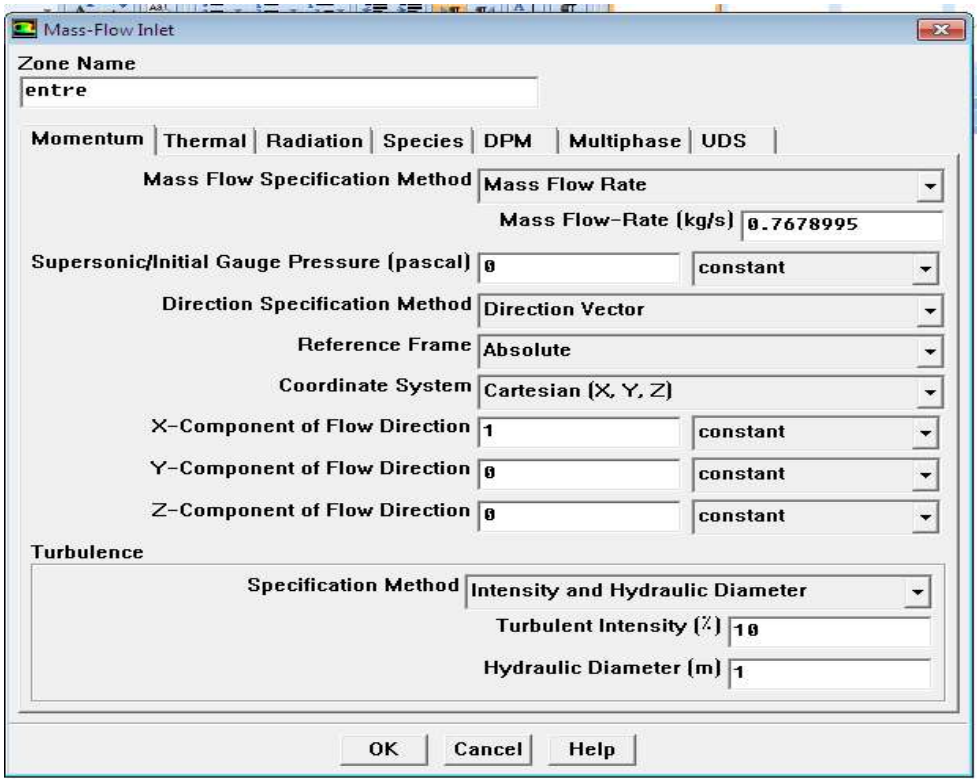

**Define → Operating conditions :** choisir la valeur de pression.



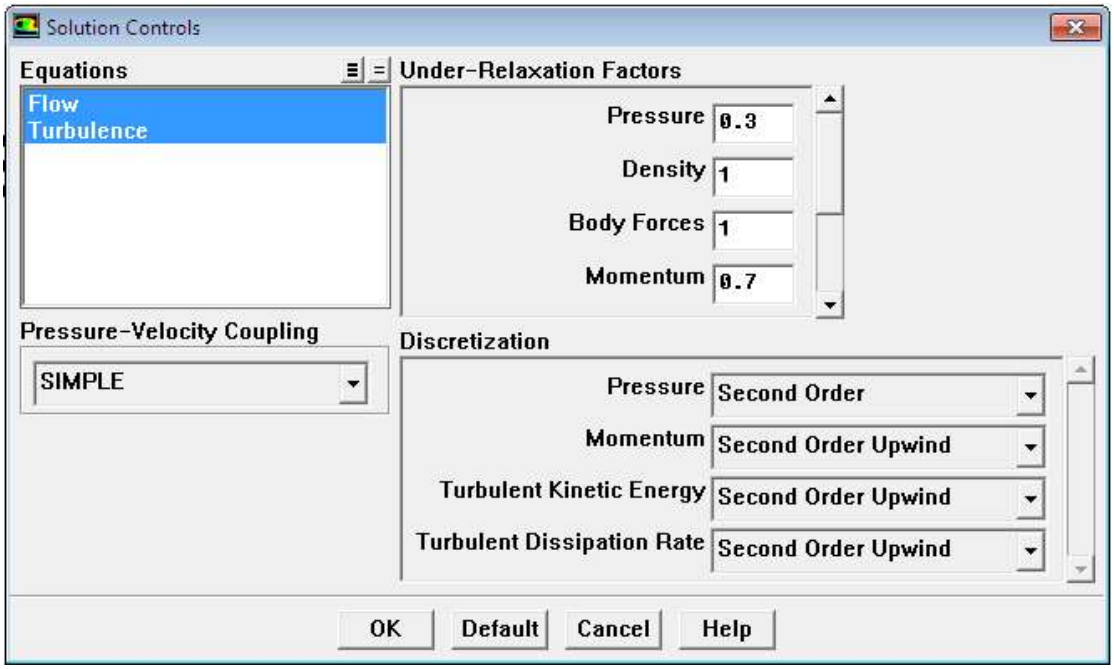
**Define → boundary conditions :** spécifier les conditions aux limites.




- Pour chaque zone, on donne le type correspondant :
- Default-interior : interior
- entrée : masse-flow-inlet
- paroi adia : wall
- sortie : outflow
- fluid : methane
- On ajoute le débit de fonctionnement en kg/s.

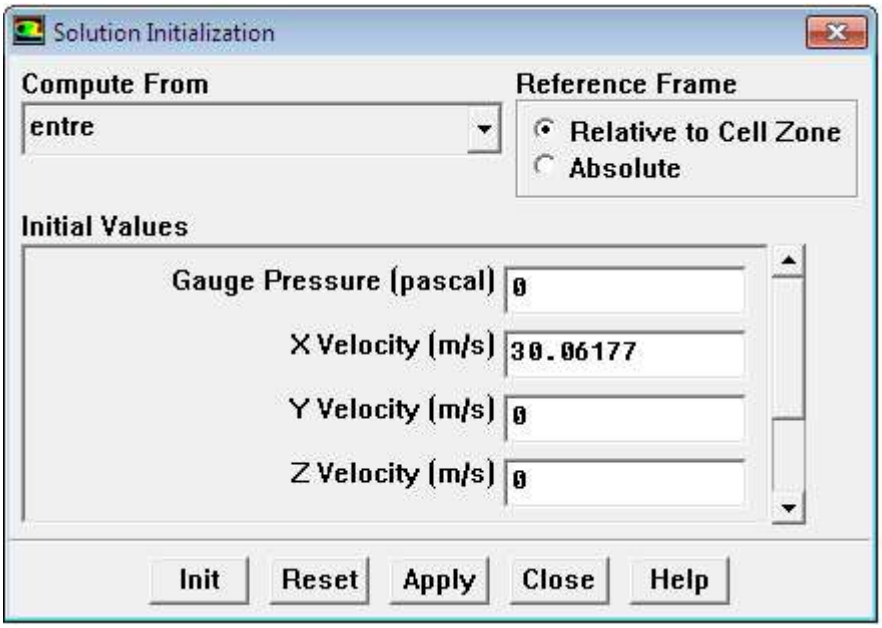


**Solve→ Controls→ Solution :** faire le Choix d'ordre des équations et l'algorithme.

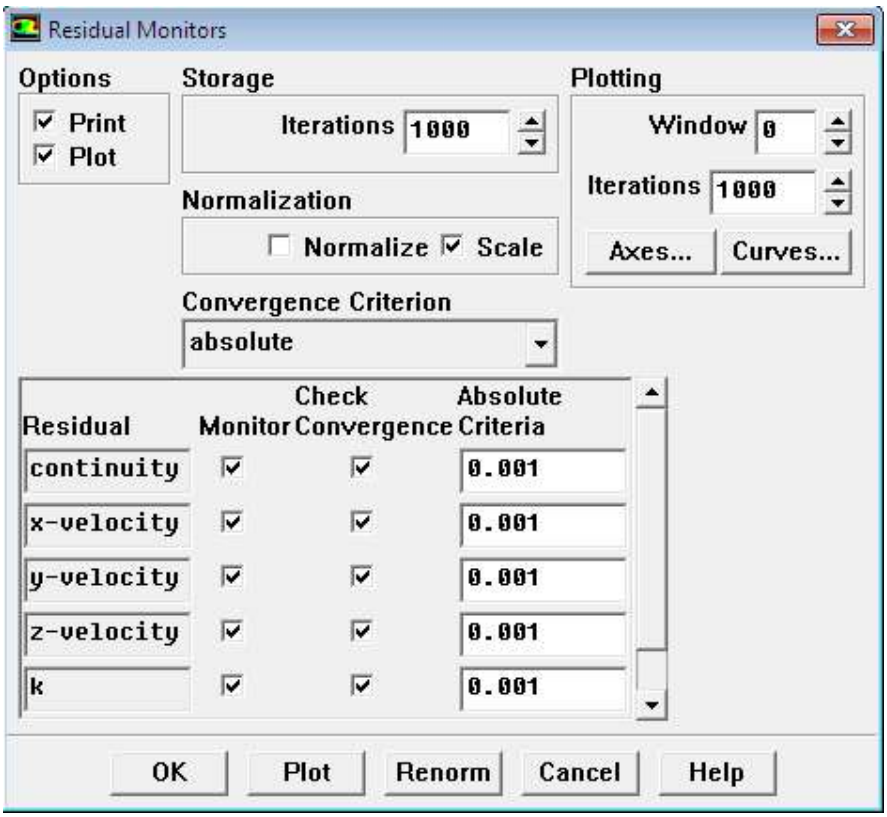



### III.4.4 Initialisation et lancement des itérations

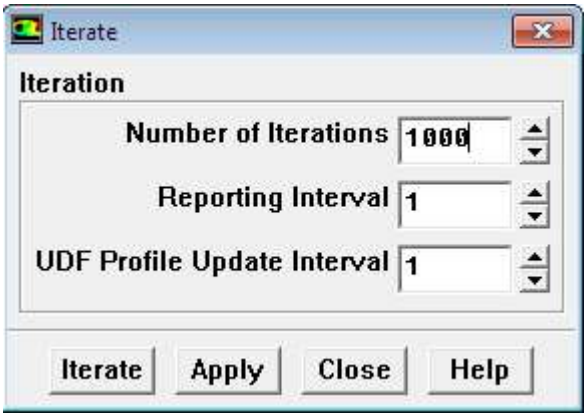
**Solve →Initialize → Initialize :** choisir le démarrage de calcul à partir de l'entrée.



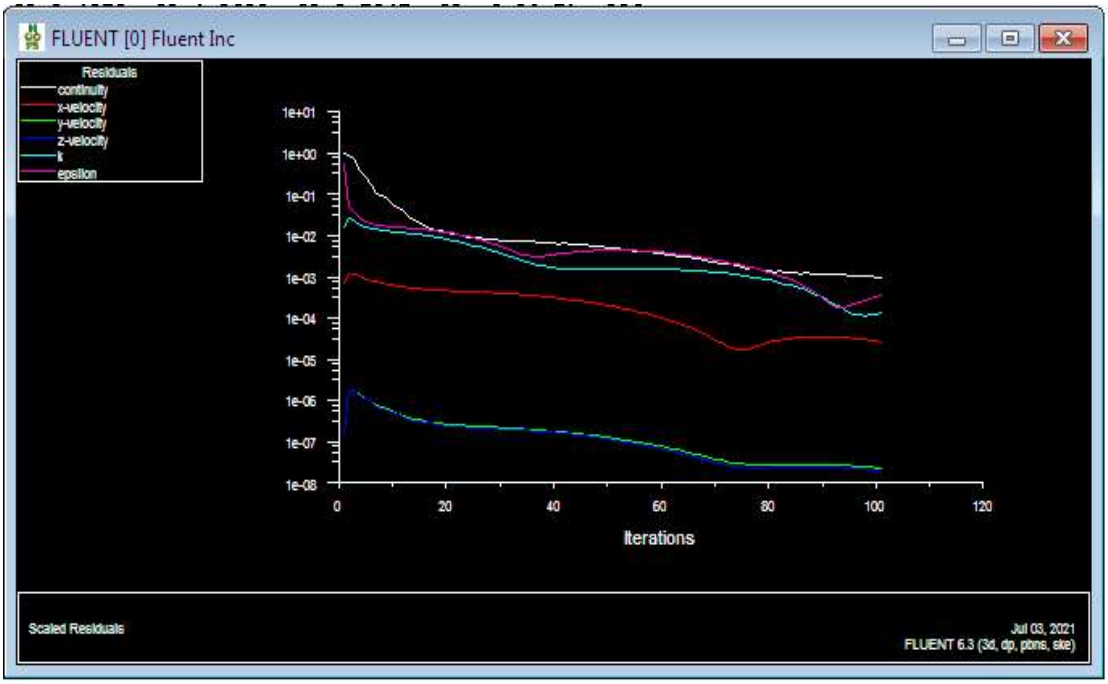
**Solve → Monitors → Residual :** fixer les critères de convergence pour chaque entité physique et afficher le graphe de convergence en cliquant sur **Plot** .




**Solve → Iterate :** donner le nombre d'itérations et lancer le calcul des résidus.

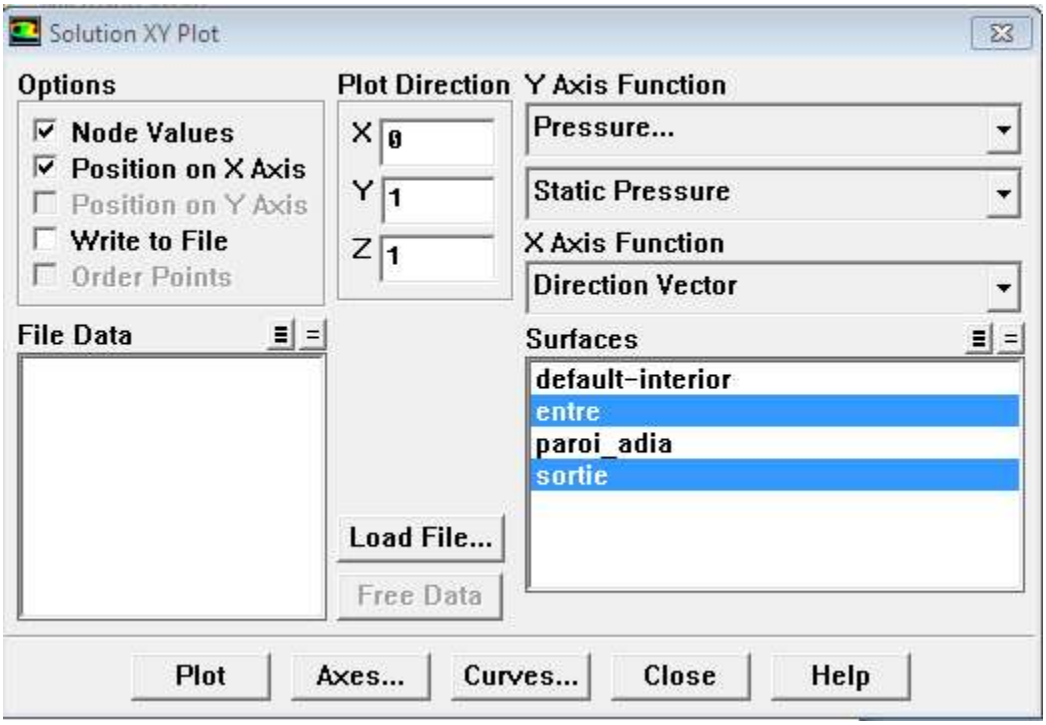


**Allures de l'évolution des résidus de calcul**

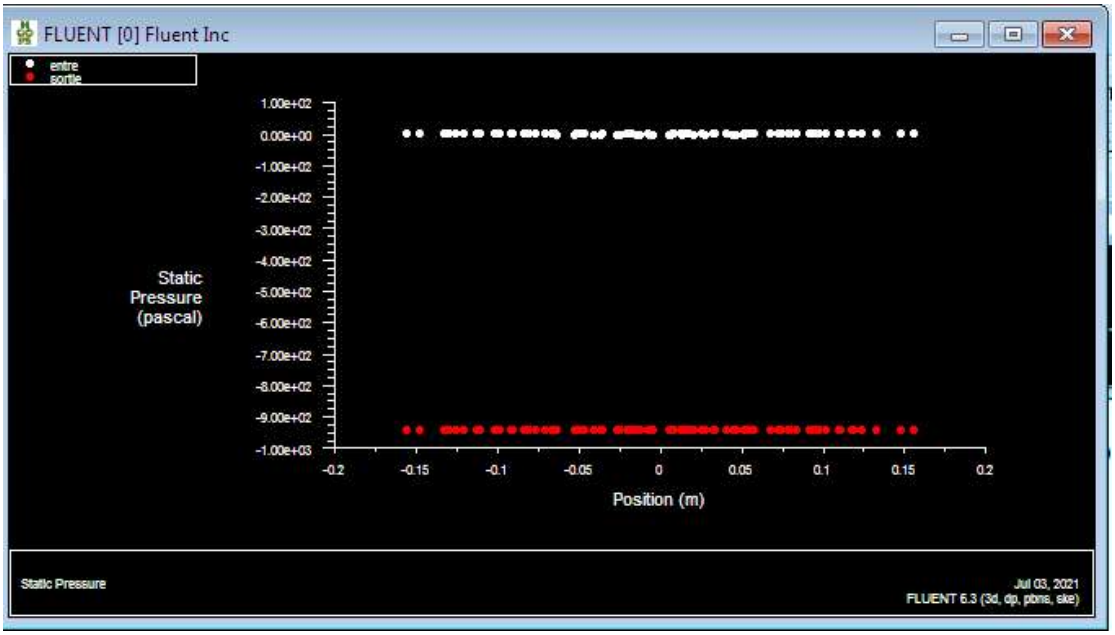



## I.4.5 Visualisation des résultats

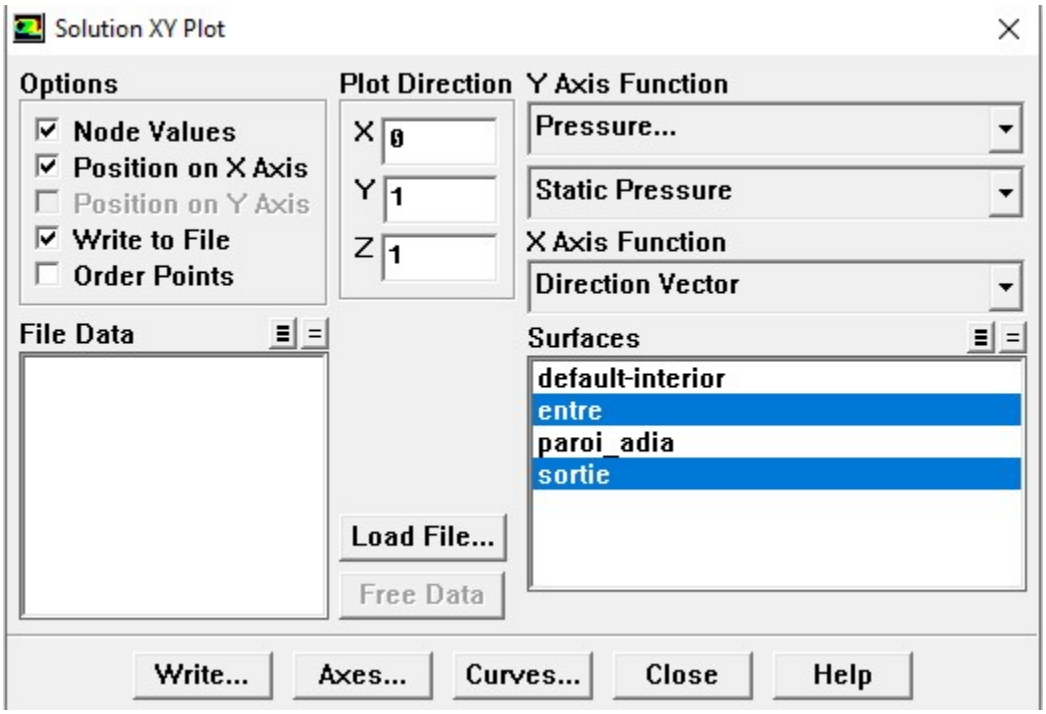
**Plot→ Solution XY plot :** Choisir la représentation de pression absolu à l'entrée et à la sortie.



**Plot :**




**Write to file→Write :** Pour une représentation numérique de pression absolue à l'entrée et à la sortie.



## I.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté le logiciel GAMBIT qui est un logiciel de dessin et de génération de maillage « mailleur », et les étapes suivies pour la création de la géométrie, et du maillage. Ainsi que le code calcul ANSYS-Fluent6, son principe de fonctionnement, et la méthode de résolution des équations générales de l'écoulement et visualisation des résultats. Les résultats de simulation numérique font l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre IV
# Résultats et discussion

# I.1 Introduction

Après avoir détaillé les étapes suivies dans la simulation numérique (2D et 3D) à l'aide du logiciel ANSYS-Fluent 6 dans le chapitre précédent. Ce chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenue (calcul analytique et simulation numérique) afin de pouvoir comparer entre les trois méthodes de calcul (simulation 2D, simulation 3D, et méthode analytique) des pertes de charge linéaire dans les deux cas : dans le réseau moyenne pression et dans le réseau basse pression en utilisant les différents calibres propres pour chaque cas.

# I.2 Pertes de charge dans le réseau moyenne pression

## I.2.1 Pour le PE250

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 593 | 310,1 | 940,9232323 |
| 100 | 1188,185514 | 474,1 | 1875,083838 |
| 500 | 6013,19784 | 1985,8 | 9309 |
| 1000 | 12217,50544 | 4769,1 | 18578,4 |

**Tableau IV-1: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 1bar)**

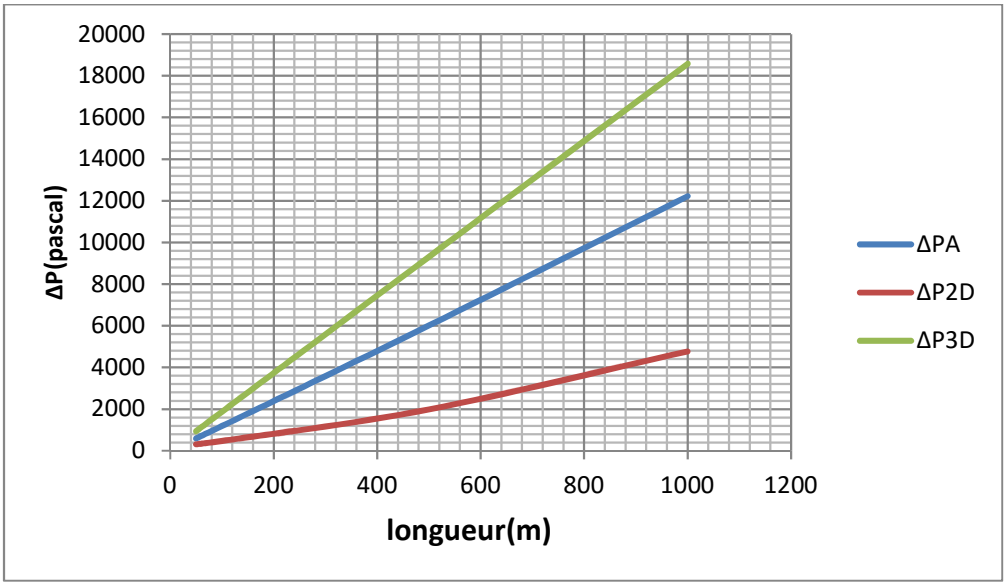



**Figure IV-1: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 1bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal-) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 828,8070881 | 485 | 1966,292929 |
| 100 | 1659,906464 | 1179 | 3926,323232 |
| 500 | 8393,57642 | 3322 | 19485 |
| 1000 | 12217,50544 | 8097 | 38977 |

**Tableau IV-2: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 2bar)**

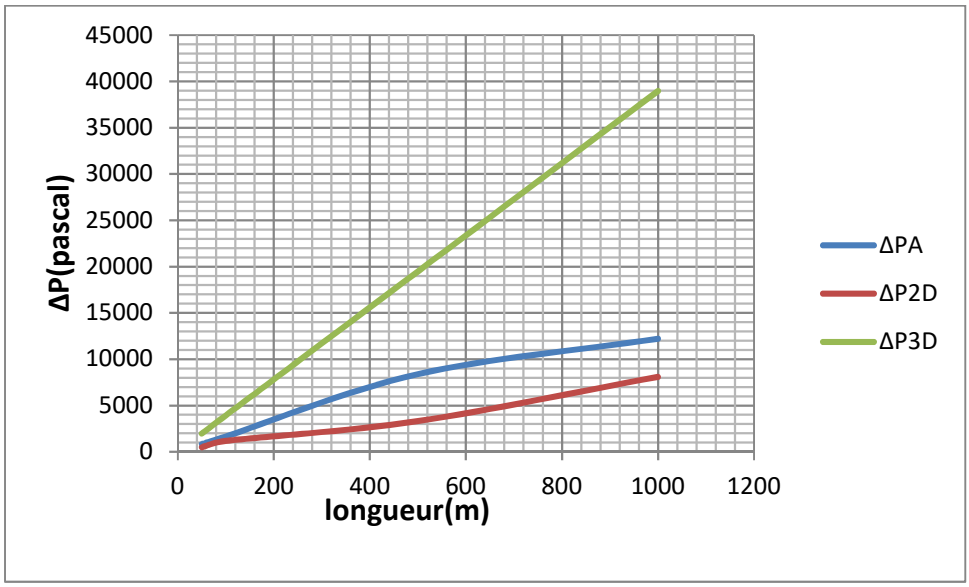



**Figure IV-2: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 2bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 1050,316205 | 709 | 3324,525253 |
| 100 | 2103,395688 | 1685 | 6640,40404 |
| 500 | 10630,2032 | 5006 | 32926,62626 |
| 1000 | 21557,84387 | 12413 | 65903 |

**Tableau IV-3: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 3bar)**

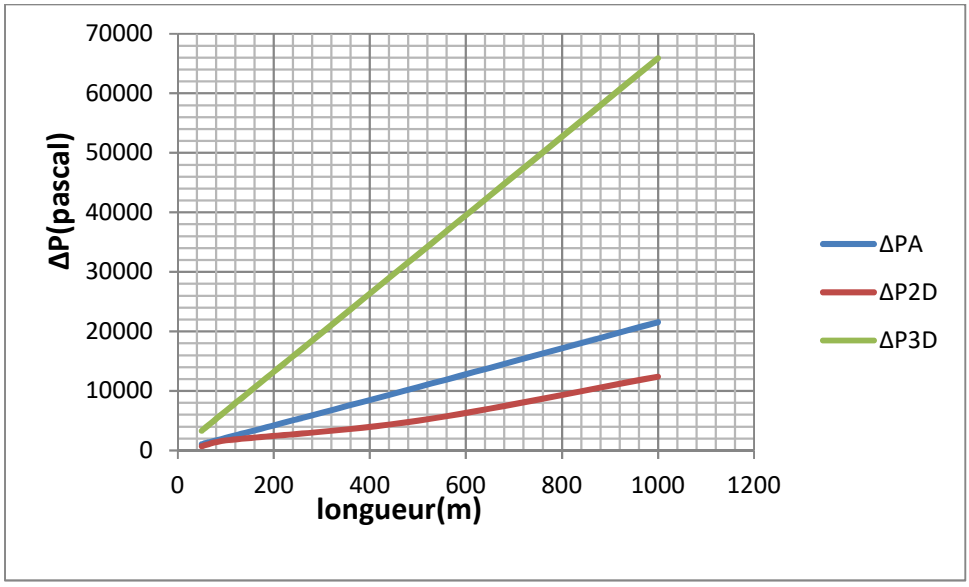



**Figure IV-3: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 3bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 1262,143694 | 895 | 5013,010101 |
| 100 | 2527,481071 | 2240 | 9996,474747 |
| 500 | 12768,14359 | 6801 | 49608,73737 |
| 1000 | 25879,05326 | 15573 | 98979,47475 |

**Tableau IV-4: Pertes de charge (PE250/ pression d'entrée 4bar)**

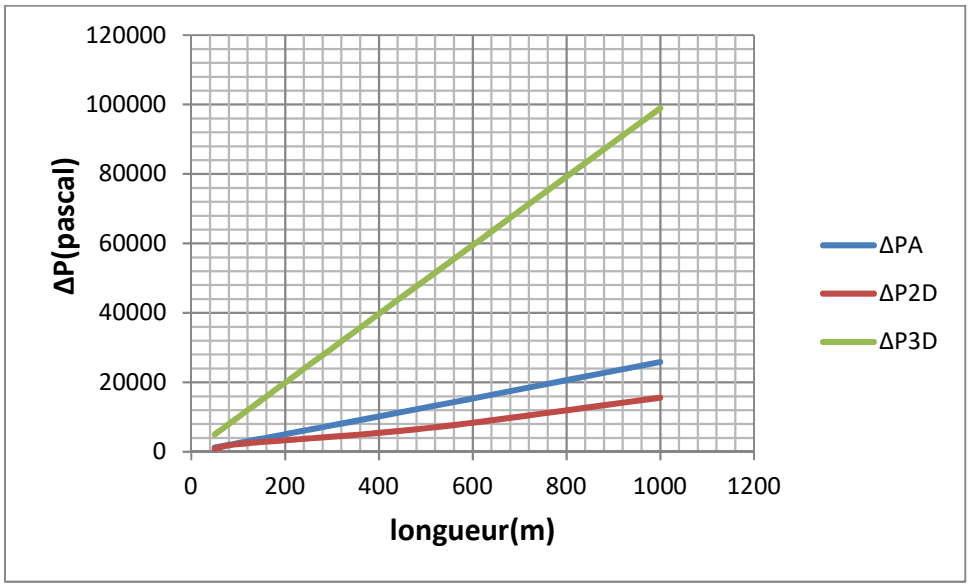



**Figure IV-4: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE250 avec une pression d'entrée 4bar**

Les figures (Figure IV-1, Figure IV-2, Figure IV-3 Figure IV-4) représentent l'évolution des pertes de charge linéaires ΔP (pascal) en fonction de la longueur du réseau (m) calculées par les trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour les quatre valeurs de pression d'entrée (1,2,3 et 4bar) (chaque figure représente une pression de fonctionnement respectivement) pour la canalisation de types PE 250.

L'analyse des quatre graphes, nous a permis de constater que pour les trois méthodes de calcul la perte de charge varie proportionnellement avec la variation de la longueur du réseau, donc elle est plus importante plus que la longueur est importante et vice versa. On remarque aussi qu'il y a un écart entre les résultats calculés par les trois méthodes, la méthode 3D donne des valeurs plus importantes par rapport aux deux autres méthodes.

Les résultats obtenus par la méthode analytique et la méthode 3D sont plus proche pour une pression d'entrée de 1 bar, mais l'augmentation de pression d'entrée engendre l'augmentation de cette écart .Par exemple pour la longueur 50 m l'écart ($\Delta P_{3D} - \Delta P_{Analytique} = 347{,}92Pa$ pour la pression 1bar) alors qu'il est de ($\Delta P_{3D} - \Delta P_{Analytique} = 3750{,}87Pa$ pour 4bar) pour la même longueur.

Par contre on remarque un rapprochement entre les résultats de la simulation 2D et 3D quand la pression d'entrée augmente.

### I.2.2 Pour le PE200

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 781,4069596 | 356 | 1222,939394 |
| 100 | 1565,870561 | 583,3 | 2452,293939 |
| 500 | 7956,112972 | 2399,9 | 12197,65051 |
| 1000 | 16253,93982 | 5589,8 | 24337,3 |

**Tableau IV-5: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 1bar)**

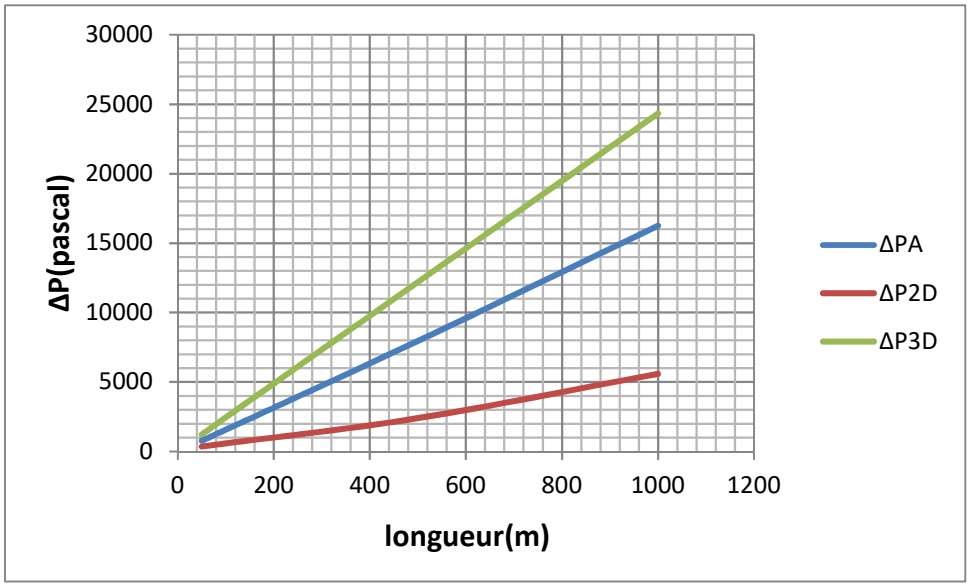



**Figure IV-5: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 1bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 1091,617294 | 557 | 2558,939394 |
| 100 | 2187,218105 | 912 | 5126,161616 |
| 500 | 11100,87921 | 3269 | 25502 |
| 1000 | 22643,59598 | 8604 | 50869 |

**Tableau IV-6: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 2bar)**

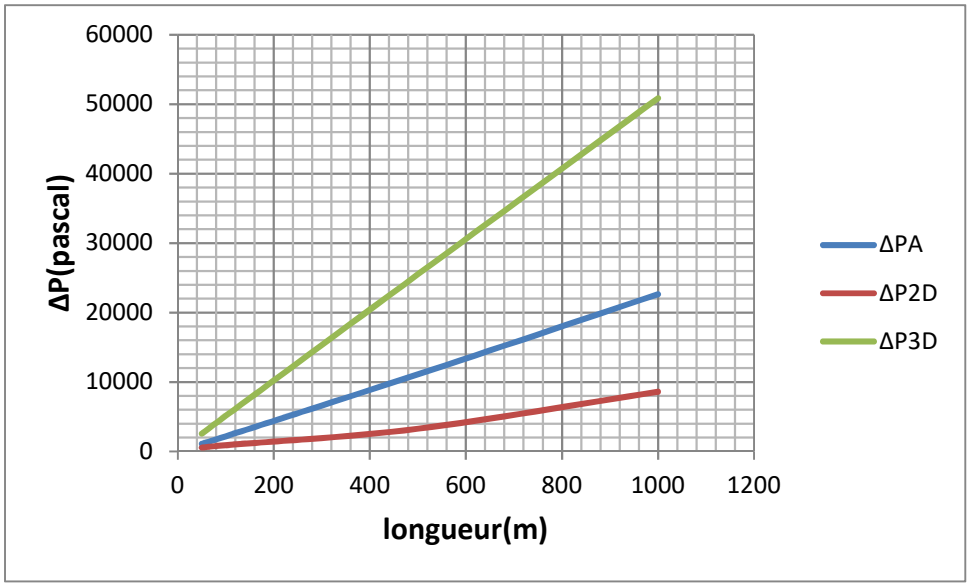



**Figure IV-6: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 2bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 1383,754626 | 885 | 4327,616162 |
| 100 | 2772,313548 | 1370 | 8665,929293 |
| 500 | 14059,97848 | 5381 | 43104,34343 |
| 1000 | 28650,02344 | 12008 | 85989 |

**Tableau IV-7: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 3bar)**

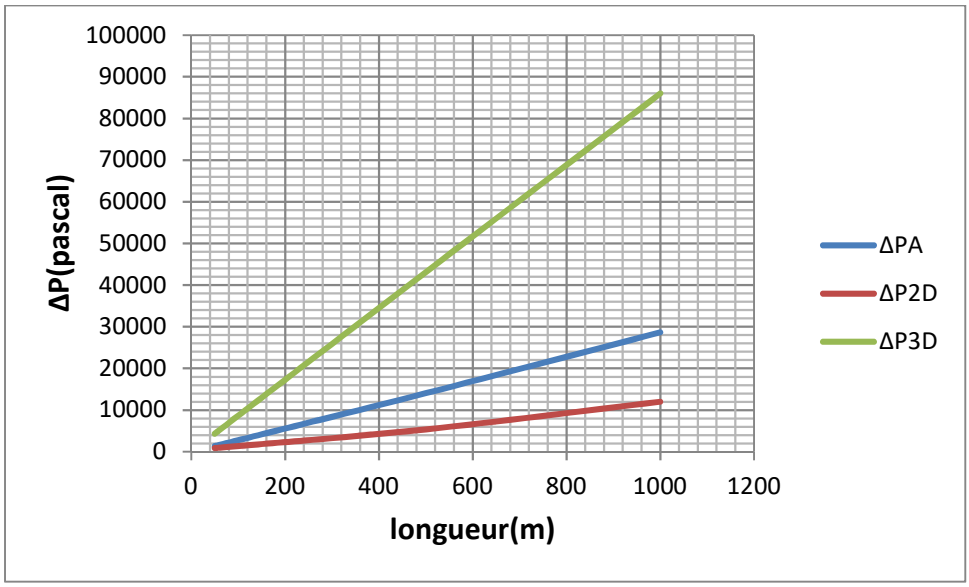



**Figure IV-7: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 3bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 1662,355468 | 1273 | 6509,40404 |
| 100 | 3330,260011 | 2937 | 13030,12121 |
| 500 | 16880,18087 | 7752 | 64812,70707 |
| 1000 | 34370,17356 | 16940 | 129575,3333 |

**Tableau IV-8: Pertes de charge (PE200/ pression d'entrée 4bar)**

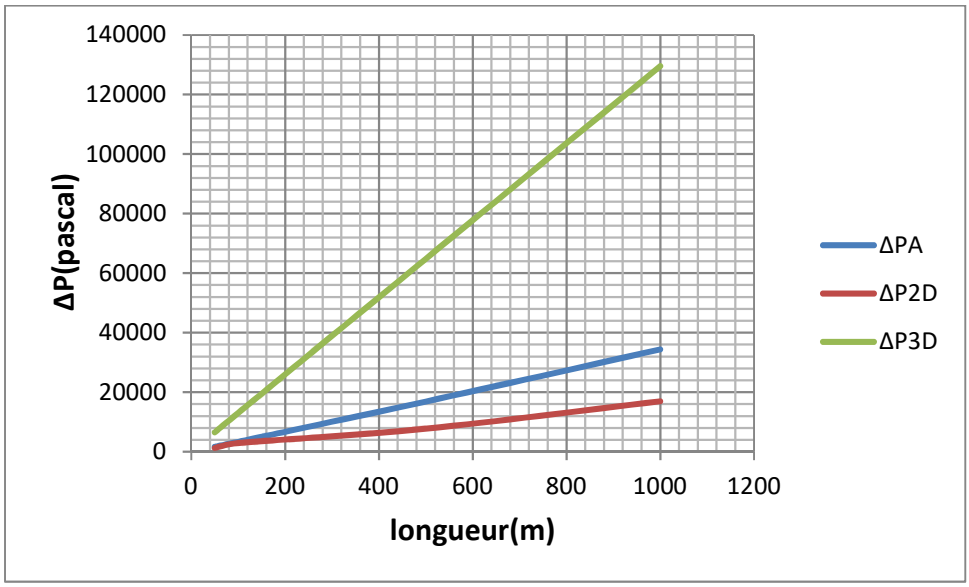



**Figure IV-8: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE200 avec une pression d'entrée 4bar**

Les figures (Figure IV-5, Figure IV-6, Figure IV-7 et Figure IV-8) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires $\Delta$P en (pascal) en fonction de la longueur du réseau en mètre calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour les quatre pressions d'entrée (1, 2, 3 et 4bar) pour la canalisation PE200.

L'écart observé entre les graphes représentant les résultats obtenus par les trois méthodes de calcul est plus grand pour le PE200 que pour le PE250. Par exemple pour une longueur de 50m et la pression d'entrée 1bar on obtient pour le PE200 $\Delta P_{3D} - \Delta P_{Analytique} = 441{,}53Pa$ alors que pour le PE250 $\Delta P_{3D} - \Delta P_{Analytique} = 347{,}92Pa$ pour les mêmes valeurs de longueur et de pression.

### I.2.3 Pour le PE125

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 1537,479314 | 513,8 | 2171,343434 |
| 100 | 3086,882529 | 1326,9 | 4374,10303 |
| 500 | 15947,72633 | 4288,5 | 21807,5 |
| 1000 | 33403,25764 | 8990,1 | 43488,4 |

**Tableau IV-9: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 1bar)**

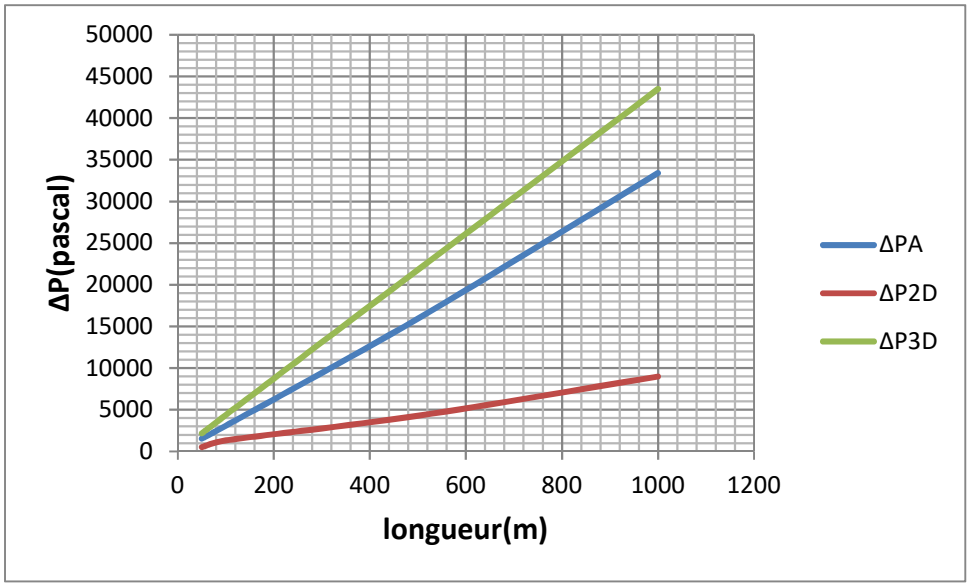



**Figure IV-9: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 1bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 2148,063816 | 563 | 4523,393939 |
| 100 | 4311,662482 | 1675 | 9110,727273 |
| 500 | 22223,60119 | 6325 | 45412 |
| 1000 | 46377,11118 | 12460 | 90821 |

**Tableau IV-10: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 2bar)**

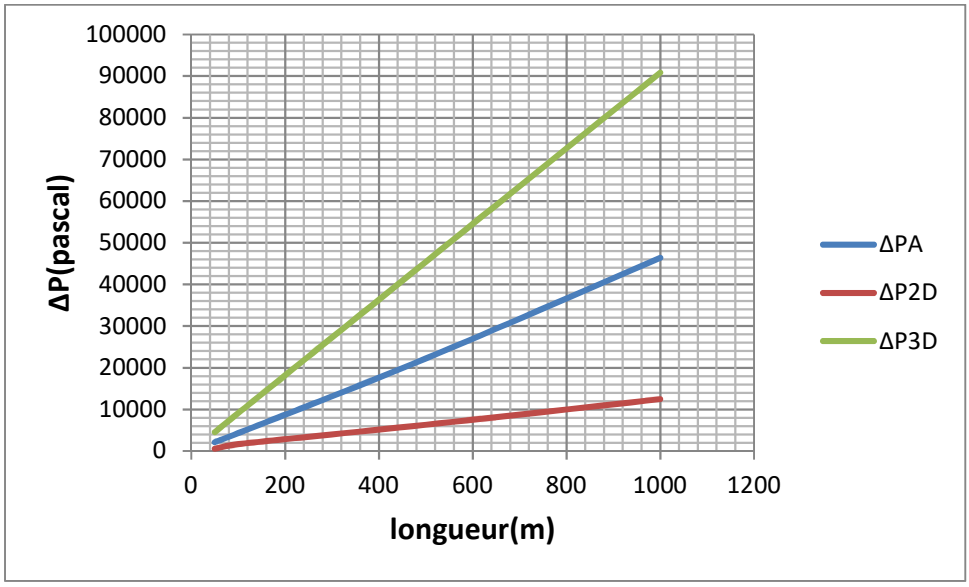



**Figure IV-10: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 2bar**

| PE125/ pression d'entrée 3bar | | | |
|---|---|---|---|
| **L(m)** | **ΔP(A)(pascal)** | **ΔP(2D)(pascal)** | **ΔP(3D)(pascal)** |
| 50 | 2722,069637 | 890 | 7628,525253 |
| 100 | 5462,856617 | 902 | 15358,33333 |
| 500 | 28113,04907 | 8758 | 76519 |
| 1000 | 58523,94252 | 19017 | 152672,4949 |

**Tableau IV-11: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 3bar)**

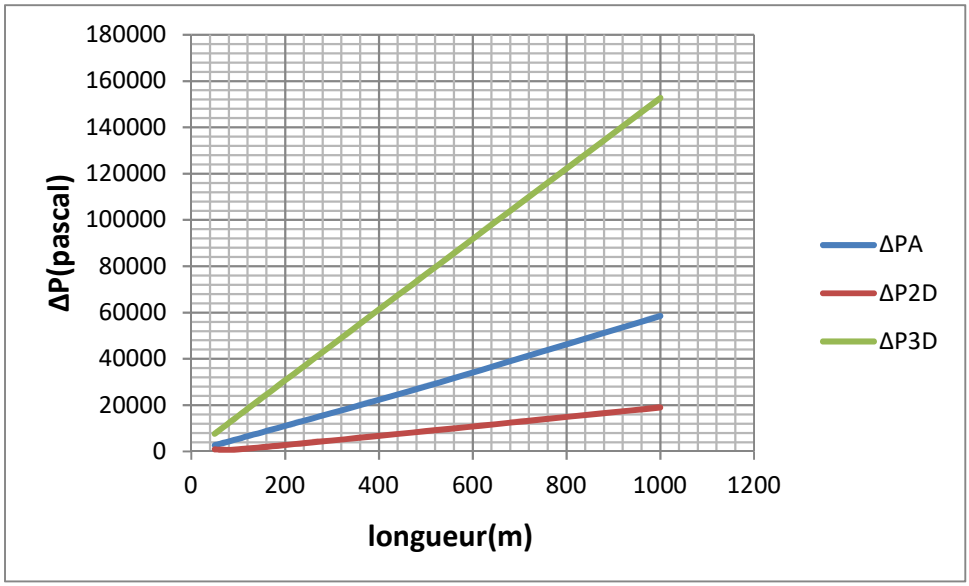



**Figure IV-11: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 3bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 3270,361935 | 1122 | 11556,12121 |
| 100 | 6562,340363 | 1803 | 23049,93939 |
| 500 | 33731,77469 | 10625 | 114861,596 |
| 1000 | 70094,09539 | 23106 | 229122,0101 |

**Tableau IV-12: Pertes de charge (PE125/ pression d'entrée 4bar)**

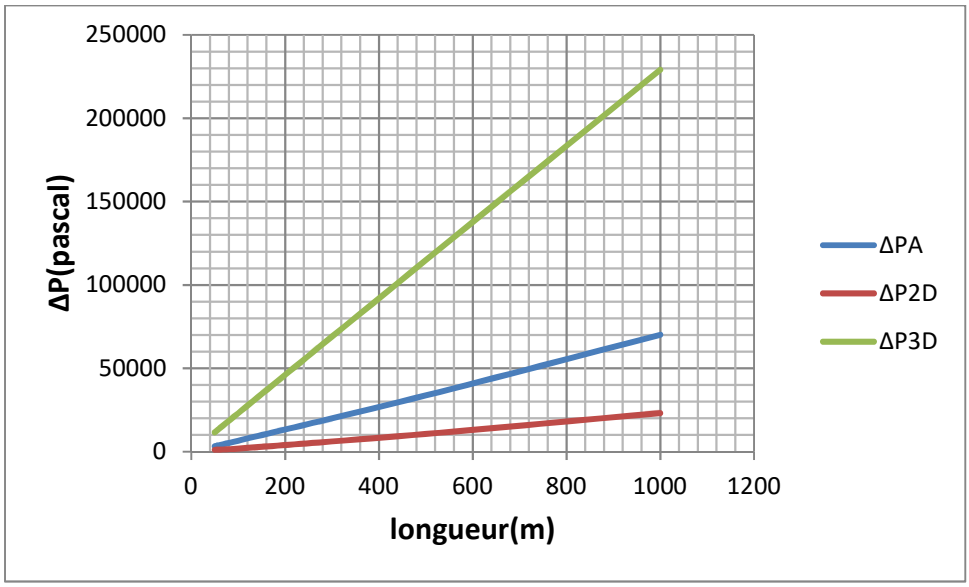



**Figure IV-12: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE125 avec une pression d'entrée 4bar**

Les figures (Figure IV-9, Figure IV-10, Figure IV-11 et Figure IV-12) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires ΔP en (pascal) en fonction de la longueur du réseau en (mètre) calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour les quatre pressions d'entrée

(1, 2, 3 et 4bar) pour la canalisation PE125. L'écart observé entre les résultats obtenus par les trois méthodes de calcul devient plus important pour ce calibre.

### I.2.4 Pour le PE63

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 3500,70511 | 763,9 | 5577,5 |
| 100 | 7064,485041 | 778,6 | 11129,9 |
| 500 | 38356,54949 | 9396,2 | 55626,1 |
| 1000 | 89139,10027 | 19557,7 | 110939,6 |

**Tableau IV-13: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 1bar)**

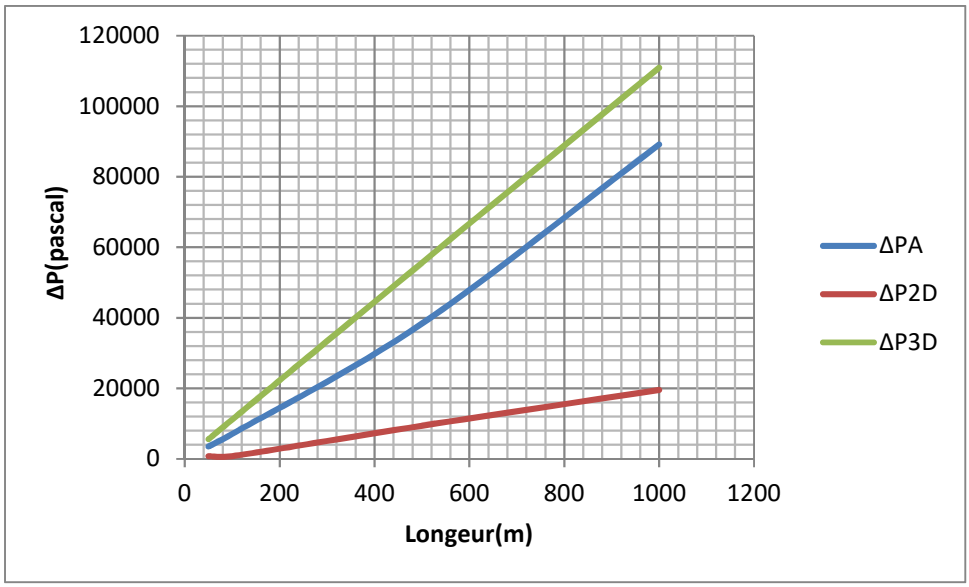



**Figure IV-13: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 1bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 4889,333393 | 1233 | 11559 |
| 100 | 9860,674141 | 1305 | 23067 |
| 500 | 53191,48001 | 14282 | 115258,1 |
| 1000 | 121481,3683 | 26837 | 229954,3 |

**Tableau IV-14: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 2bar)**

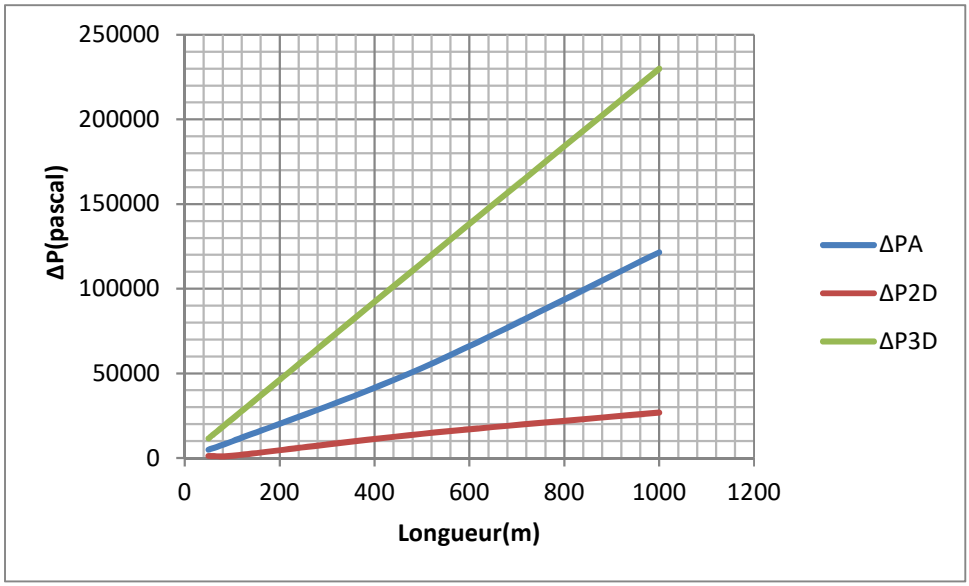



**Figure IV-14: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 2bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 6194,46714 | 1609 | 19424 |
| 100 | 12487,6042 | 1565 | 38767 |
| 500 | 67071,23509 | 17003 | 193132 |
| 1000 | 151546,2918 | 36430 | 386210,6626 |

**Tableau IV-15: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 3bar)**

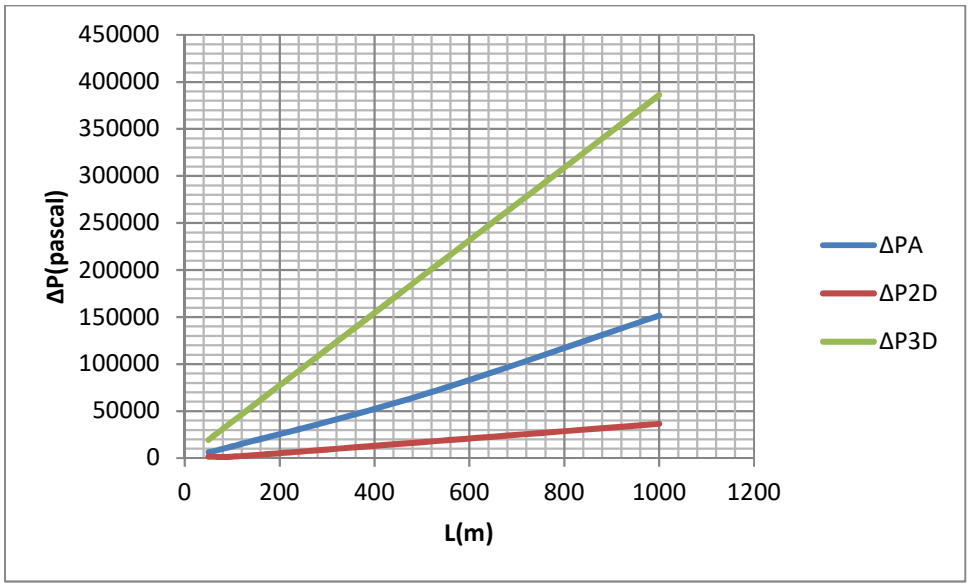



**Figure IV-15: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 3bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 7440,932872 | 1671 | 29080 |
| 100 | 14995,70014 | 2006 | 58049 |
| 500 | 80285,90799 | 21139 | 289128 |
| 1000 | 180044,6265 | 45459 | 578239 |

**Tableau IV-16: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 4bar)**

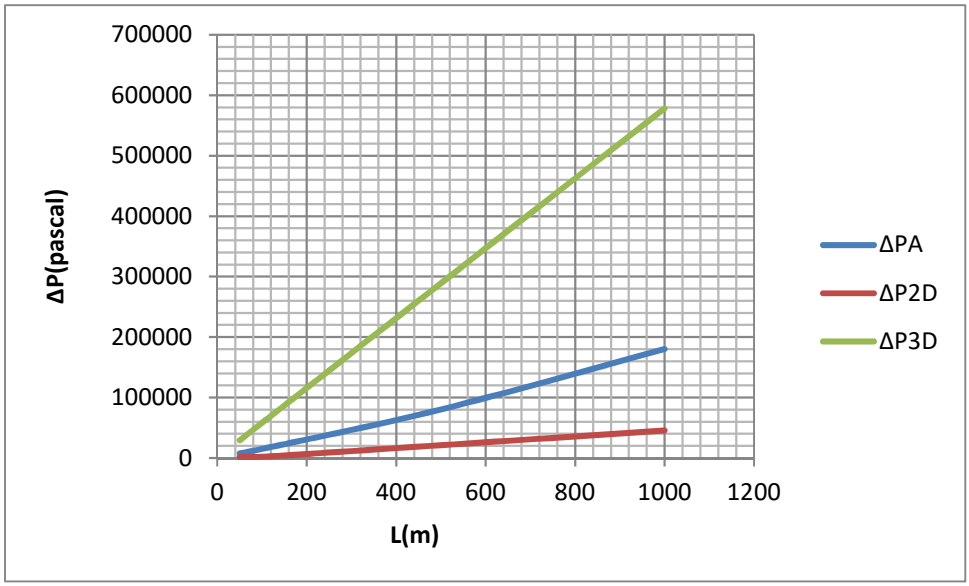



**Figure IV-16: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 4bar**

Les figures (Figure IV-13, Figure IV-14, Figure IV-15 et Figure IV-16) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires $\Delta P$ en (pascal) en fonction de longueur du réseau en (mètre) calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour les quatre pressions d'entrée (1,2,3 et 4bar) pour la canalisation PE63. L'analyse de ces figures nous donne :

On remarque toujours que l'écart observé entre les résultats obtenus par les trois méthodes de calcul devient plus important pour ce calibre ainsi que les résultats obtenus par la simulation 2D deviennent de plus en plus loin des résultats obtenus par les deux autres méthodes.

On note pour une longueur de réseau supérieur ou égal à 1km que la perte de charge calculée par la simulation 3D devient supérieure à la pression d'entrée (par exemple pour la pression 4bar $\Delta P_{3D}$=5,78239bar) cela peut être interprété comme le gaz n'atteindra jamais la sortie de la conduite($\Delta P > P_1$).

### I.2.5 Pour le PE40

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 5708,542577 | 1537,9 | 9154,5 |
| 100 | 11588,75885 | 1706,8 | 18283,6 |
| 500 | 67638,11387 | 16094,7 | 91125,5 |
| 1000 | / | 31360,5 | 182243,5 |

**Tableau IV-17: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 1bar)**

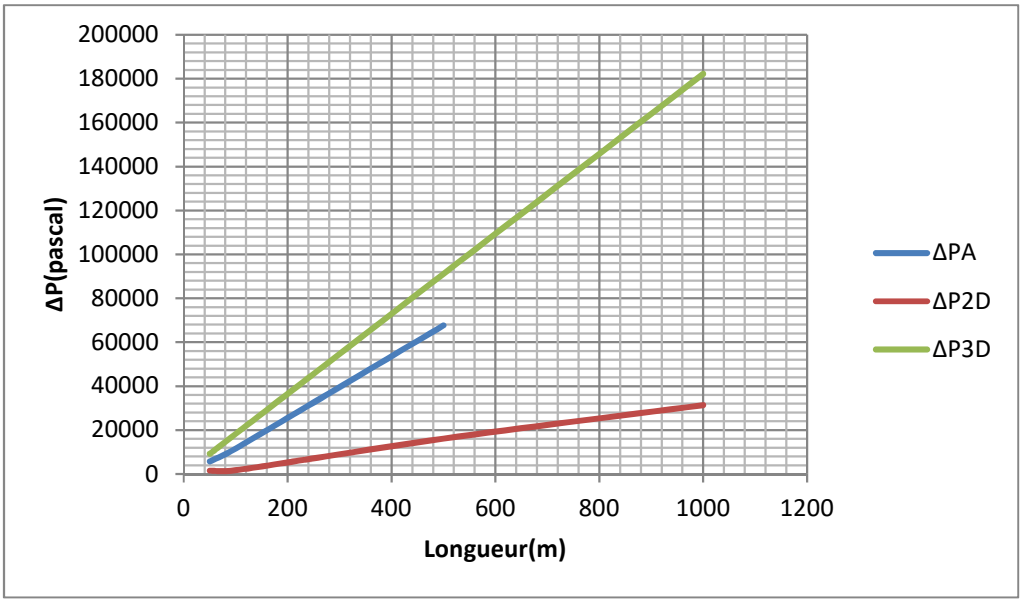



**Figure IV-17: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 1bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 7969,928235 | 2199 | 18907 |
| 100 | 16162,51889 | 2426 | 37758 |
| 500 | 92995,49974 | 21350 | 188198,6 |
| 1000 | / | 43487 | 376415 |

**Tableau IV-18: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 2bar)**

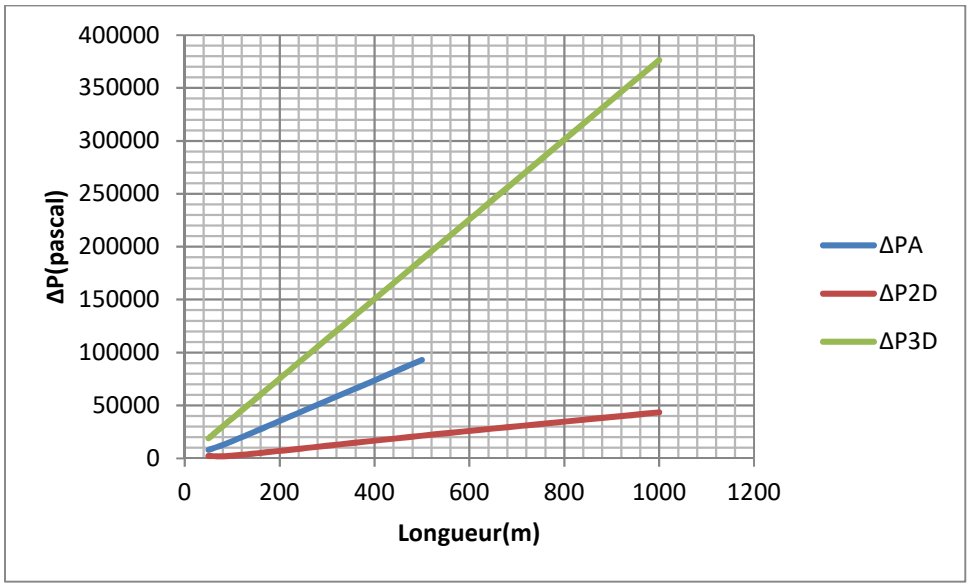



**Figure IV-18: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 2bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 10094,77782 | 1089 | 31702 |
| 100 | 20457,02041 | 3302 | 63310 |
| 500 | 116623,2844 | 27063 | 315476,8 |
| 1000 | 368946,3325 | 56225 | 630913 |

**Tableau IV-19: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 3bar)**

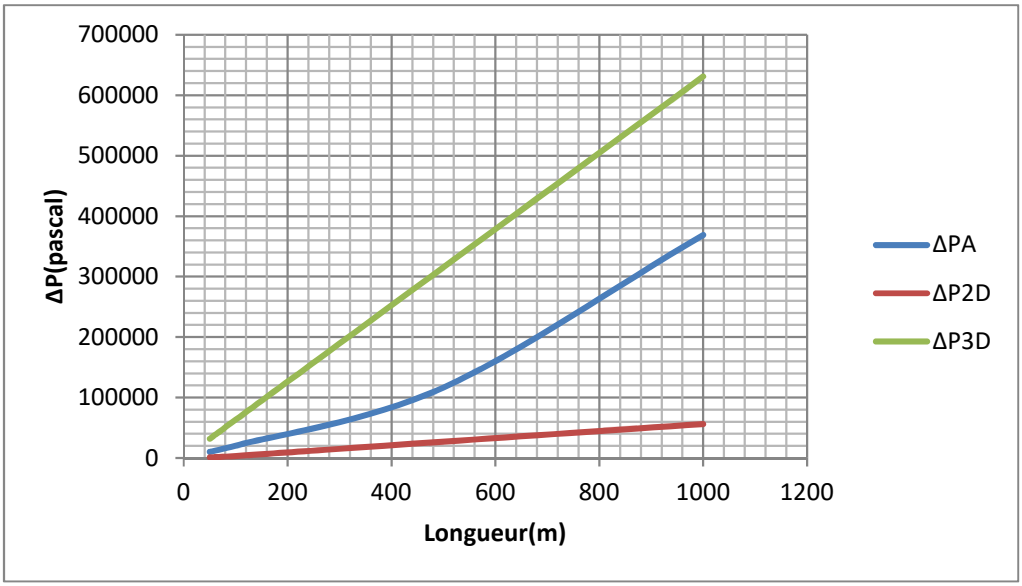



**Figure IV-19: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 3bar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 50 | 12123,73753 | 1381 | 47375 |
| 100 | 24555,66921 | 4022 | 94598 |
| 500 | 139057,2103 | 33943 | 471532,4 |
| 1000 | 395735,4776 | 72934 | 942870 |

**Tableau IV-20: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 4bar)**

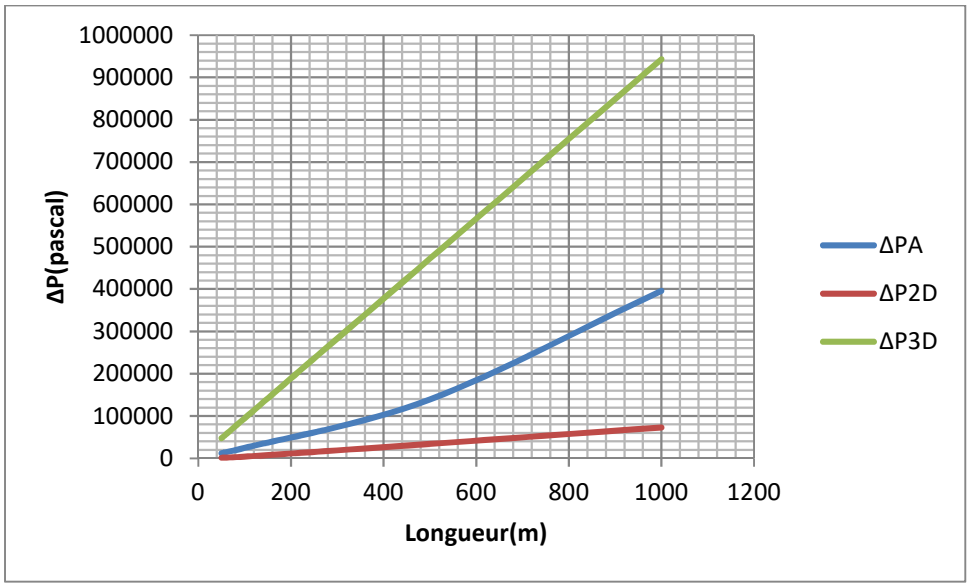



**Figure IV-20: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 4bar**

Les figures (Figure IV-17, Figure IV-18, Figure IV-19 et Figure IV-20) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires ΔP en (pascal) en fonction de longueur de réseau en (mètre) calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour les quatre pressions 1, 2, 3 et 4bar) pour la canalisation PE40.L'analyse des quatre graphiques peut être résumée comme suite :

L'écart observé entre les résultats obtenus devient plus important sur tout entre les résultats de simulation 3D et celle de la méthode analytique.

On remarque pour une longueur de réseau supérieur ou égal à 1km et pour les pressions d'entrée 1 et 2 bar que les pertes de charge calculée par la simulation 3D deviennent supérieures aux pressions d'entrée. Alors que la formule analytique nous ne permet pas de calculer les pertes dans ces deux cas. Ainsi que pour les pressions d'entrée 3 et 4bar les pertes calculées à l'aide de la simulation3D deviennent supérieures à la pression d'entée à partir de 500m de longueur (la formule analytique nous donne une perte supérieure à la pression d'entrée 3 bar pour la longueur 1km).

### I.2.6 Perte de charge pour les différents calibres pour la pression 1bar

| | PE250 | PE200 | PE125 | PE63 | PE40 |
|---|---|---|---|---|---|
| **L(m)** | **ΔP(3D)(pascal)** | **ΔP(3D)(pascal)** | **ΔP(3D)(pascal)** | **ΔP(3D)(pascal)** | **ΔP(3D)(pascal)** |
| 50 | 940,923232 | 1222,93939 | 2171,34343 | 5577,5 | 9154,5 |
| 100 | 1875,08384 | 2452,29394 | 4374,10303 | 11129,9 | 18283,6 |
| 500 | 9309 | 12197,6505 | 21807,5 | 55626,1 | 91125,5 |
| 1000 | 18578,4 | 24337,3 | 43488,4 | 110939,6 | 182243,5 |

**Tableau IV-21: Perte de charge pour différents calibres avec une pression d'entrée 1bar (Simulation 3D)**

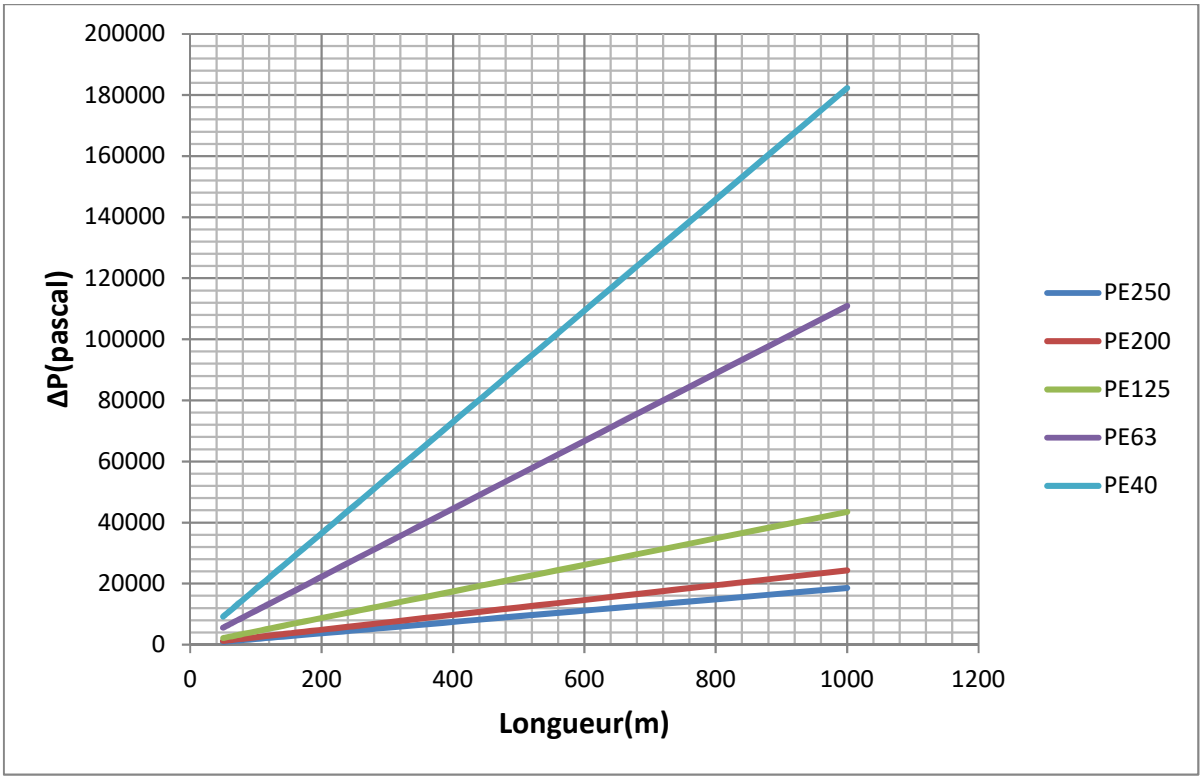



**Figure IV-21: Développement de la perte de charge en fonction de longueur pour les différents diamètres (Simulation 3D-1bar)**

| | PE250 | PE200 | PE125 | PE63 | PE40 |
|---|---|---|---|---|---|
| **L(m)** | **ΔP(2D)(pascal)** | **ΔP(2D)(pascal)** | **ΔP(2D)(pascal)** | **ΔP(2D)(pascal)** | **ΔP(2D)(pascal)** |
| 50 | 310,0646766 | 356 | 513,8 | 763,9 | 1537,9 |
| 100 | 474,1 | 583,3 | 1326,9 | 778,6 | 1706,8 |
| 500 | 1985,8 | 2399,9 | 4288,5 | 9396,2 | 16094,7 |
| 1000 | 4769,1 | 5589,8 | 8990,1 | 19557,7 | 31360,5 |

**Tableau IV-22: Perte de charge pour différents calibres avec une pression d'entrée 1bar (Simulation 2D)**

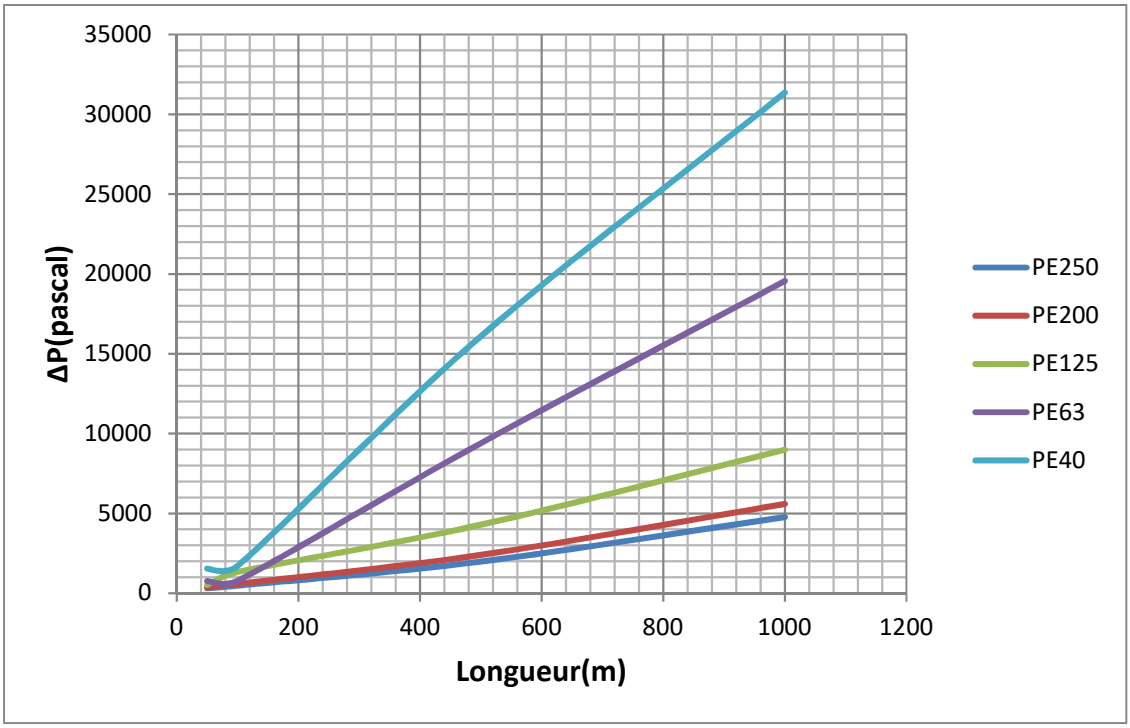



**Figure IV-22: Développement de la perte de charge en fonction de longueur pour les différents diamètres (Simulation 2D-1bar)**

| | PE250 | PE200 | PE125 | PE63 | PE40 |
|---|---|---|---|---|---|
| **L(m)** | **ΔP(A)(pascal)** | **ΔP(A)(pascal)** | **ΔP(A)(pascal)** | **ΔP(A)(pascal)** | **ΔP(A)(pascal)** |
| 50 | 593 | 781,40696 | 1537,47931 | 3500,70511 | 5708,54258 |
| 100 | 1188,18551 | 1565,87056 | 3086,88253 | 7064,48504 | 11588,7589 |
| 500 | 6013,19784 | 7956,11297 | 15947,7263 | 38356,5495 | 67638,1139 |
| 1000 | 12217,5054 | 16253,9398 | 33403,2576 | 89139,1003 | / |

**Tableau IV-23: Perte de charge pour différents calibres avec une pression d'entrée 1bar (Formule analytique)**

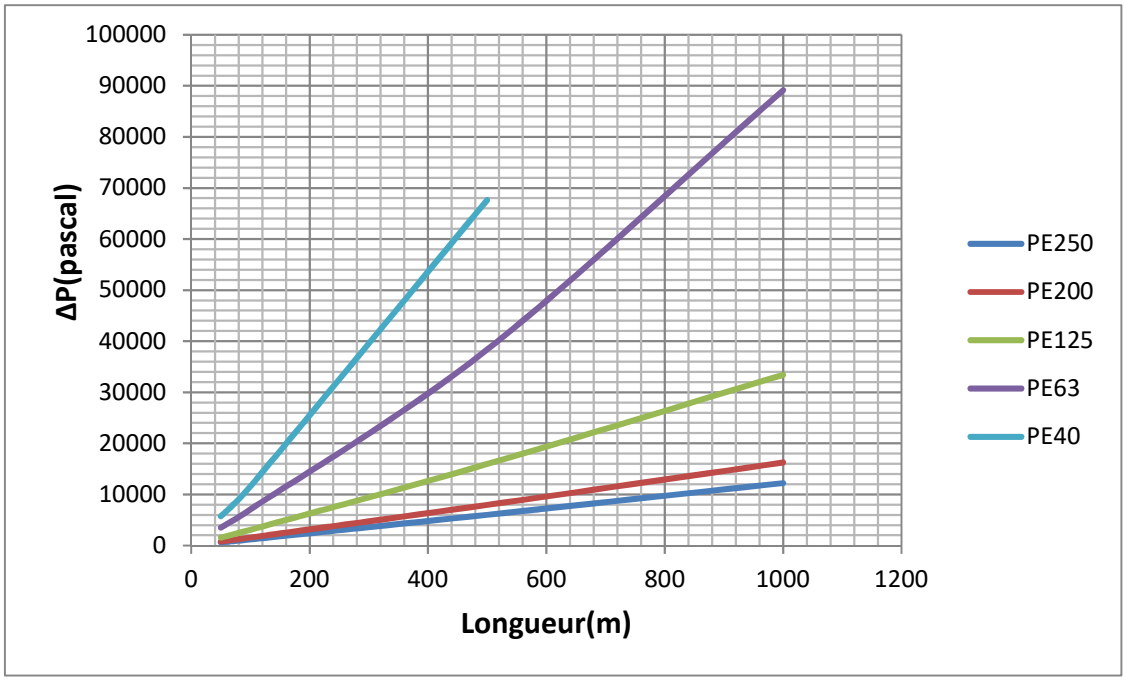



**Figure IV-23: Développement de la perte de charge en fonction de longueur pour les différents diamètres (Formule Analytique-1bar)**

Les figures précédentes (figure IV-21, figure IV-22, figure IV-23) : sont des graphes qui représentent le développement des pertes de charge en (pascal) en fonction de longueur du réseau en (m) pour les différents diamètres pour la pression d'entrée 1bar tel que chaque figure représente une méthode de calcul (simulation3D, simulation2D, et formule analytique) respectivement. On résume l'analyse de ces graphes comme suite :

Comme remarque général la perte de charge varie proportionnellement avec la longueur du réseau pour les différents diamètres.

Pour les trois figures on remarque que la perte de charge est inversement proportionnelle à la variation de diamètre. Donc la perte augmente quand le diamètre diminue.

## I.3 Pertes de charge dans le réseau basse pression

### I.3.1 Pertes dans le réseau domestiques

| CU16/ pression d'entrée 21mbar | | | |
|---|---|---|---|
| **L(m)** | **ΔP(A)(pascal)** | **ΔP(2D)(pascal)** | **ΔP(3D)(pascal)** |
| 5 | 460,0594074 | 164,44 | 441,98 |
| 10 | 920,1188148 | 199,21 | 890,87 |
| 15 | 1380,178222 | 336,2 | 1335,07 |
| 20 | 1840,23763 | 337,3527861 | 1779,2 |

**Tableau IV-24: Pertes de charge (CU16/ pression d'entrée 21mbar)**

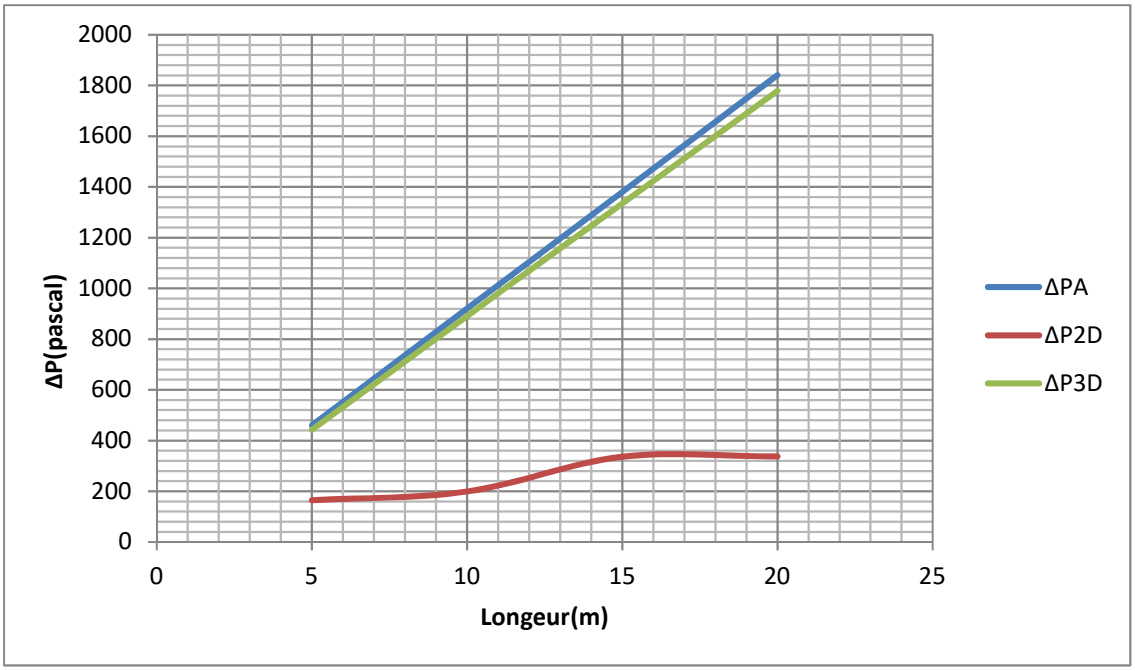



**Figure IV-24: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le CU16 avec une pression d'entrée 21mbar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 5 | 208,9061344 | 86,88 | 198,54 |
| 10 | 417,8122687 | 132,44 | 395,14 |
| 15 | 626,7184031 | 165,59 | 598,54 |
| 20 | 835,6245374 | 192,86 | 797,53 |

**Tableau IV-25: Pertes de charge (CU22/ pression d'entrée 21mbar)**

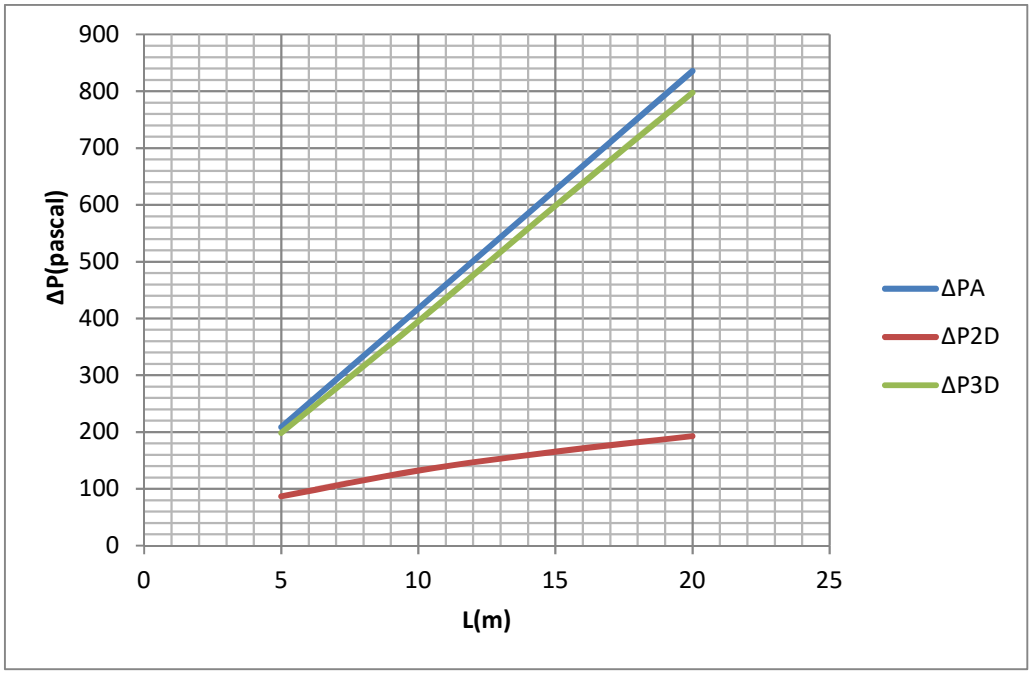



**Figure IV-25: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le CU22 avec une pression d'entrée 21mbar**

Les figures (Figure IV-24, Figure IV-25) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires ΔP en (pascal) en fonction de longueur du réseau en (mètre) calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) avec la pression d'entrée 21mbar pour les canalisations CU16 et CU22 respectivement utilisées dans les réseaux domestiques on récapitule les remarques tirées dans les points suivants :

Comme tous les cas précédents la proportionnalité entre la longueur de réseau et la perte de charge linéaire calculée par les trois méthodes reste conservée pour le réseau domestique de basse pression.

On remarque que les résultats de la simulation 3D sont plus proches à celle de la méthode analytique pour ces deux calibres par apport aux calibres de réseau moyenne pression qu'on l'a déjà vu précédemment (L'écart entre les deux méthodes est de l'ordre de quelque pascal pour le CU22), par contre les résultats de la simulation 2D sont très loin des résultats des deux autres méthodes.

L'écart entre les résultats de la simulation 3D et les résultats analytiques est un peu plus grand dans le CU16 que dans le CU22 ce qui confirme la relation inverse entre l'écart et la variation du diamètre.

### I.3.2 Pertes dans le réseau industriel

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 10 | 2470,069725 | 413,73 | 2119,09 |
| 50 | 12350,33056 | 1604,62 | 10622,09 |
| 100 | 24700,66112 | 1780,01 | 21220,5 |
| 200 | 49401,32224 | 5208,53 | 42408,67 |

**Tableau IV-26: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 21mbar)**

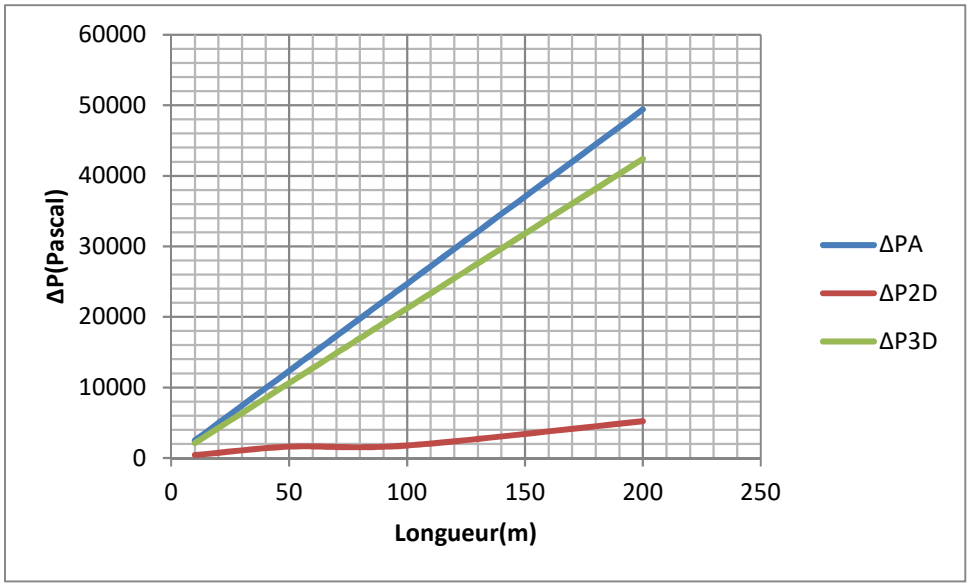



**Figure IV-26: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 21mbar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 10 | 13090,59519 | 1168,3 | 10954,8 |
| 50 | 65452,97597 | 1735,7 | 55054,4 |
| 100 | 130905,9519 | 4211,1 | 109959,89 |
| 200 | 261811,9039 | 11975,6 | 219832 |

**Tableau IV-27: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 300mbar)**

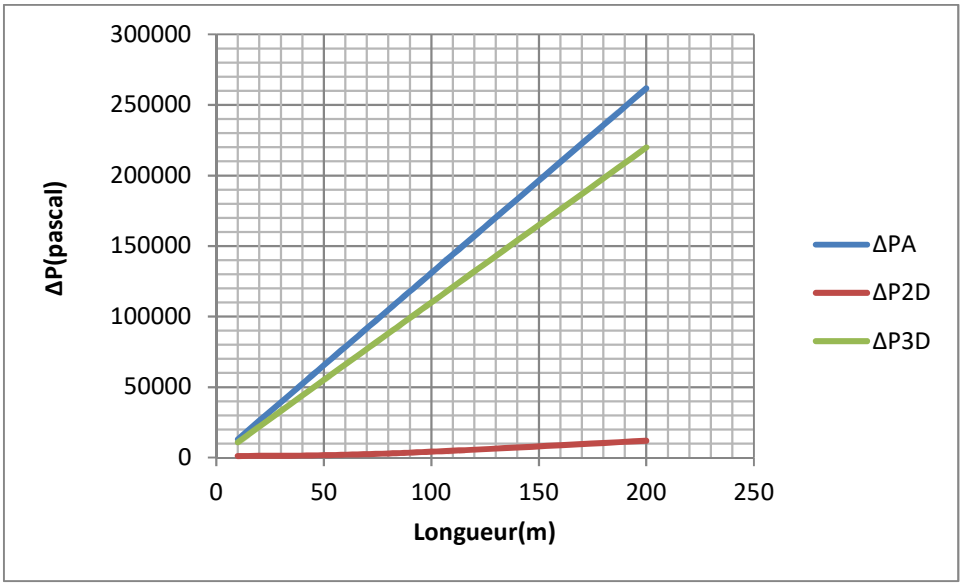



**Figure IV-27: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 300mbar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 10 | 46220,4304 | 2204,92 | 38634,47 |
| 50 | 231102,152 | 2950,9 | 193134,56 |
| 100 | 462204,304 | 8645,4 | 385701,64 |
| 200 | 924408,6081 | 22538,7 | 770975,16 |

**Tableau IV-28: Pertes de charge (PE40/ pression d'entrée 1bar)**

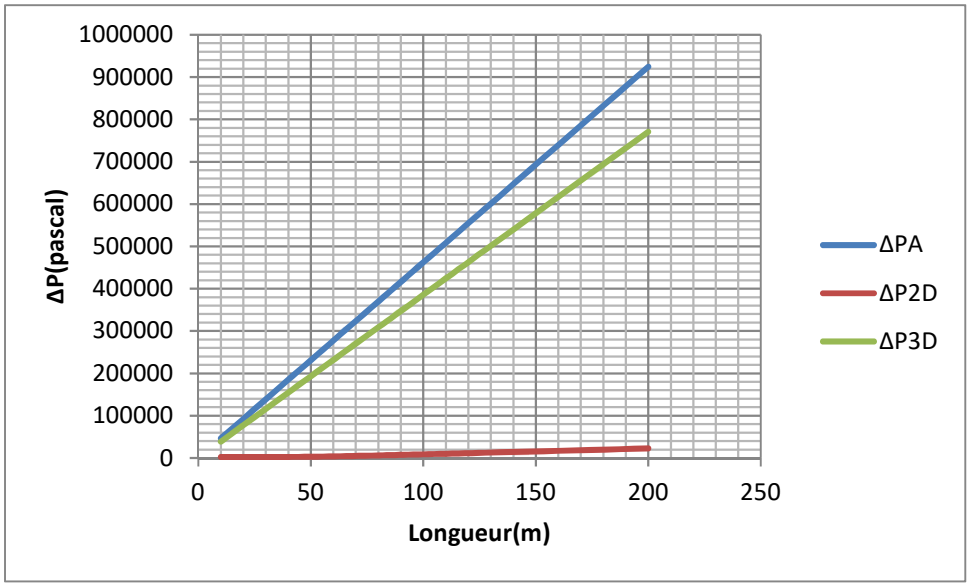



**Figure IV-28: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE40 avec une pression d'entrée 1bar**

Les figures (Figure IV-26, Figure IV-27, Figure IV-28) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires ΔP en (pascal) en fonction de longueur du réseau en (mètre) calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour trois pressions d'entrée (21mbar, 300mbar et 1bar respectivement) pour la canalisation PE40 du réseau industriel de basse pression.

On discute les résultats dans les points suivants :

On note que l'écart entre les résultats de la méthode analytique et les résultats de la simulation 3D dans le réseau industriel est plus important par rapport au réseau domestique et moins important par rapport au réseau moyen pression.

On remarque que la perte de charge calculée par les deux méthodes (la simulation 3D et la formule analytique) nous donne des résultats supérieurs à la pression d'entrée (à partir de 10m de longueur pour 21mbar et de 50m de longueur pour les pressions d'entrée 300mbar et 1bar).

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 10 | 333,3575892 | 103,69 | 292 |
| 50 | 1666,787946 | 256,89 | 1457,92 |
| 100 | 3333,575892 | 396,92 | 2910,63 |
| 200 | 6667,151784 | 1430,88 | 5817,53 |

**Tableau IV-29: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 21mbar)**

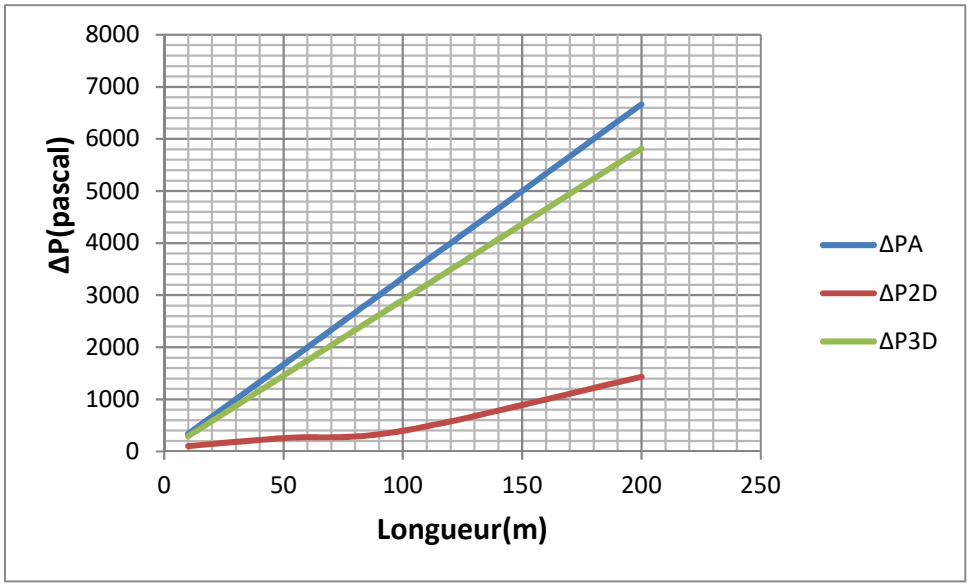



**Figure IV-29: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 21mbar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 10 | 1766,693302 | 419,2119403 | 1505,08 |
| 50 | 8833,46651 | 987,8 | 7497,8 |
| 100 | 17666,93302 | 1127,4 | 14965,9 |
| 200 | 35333,86604 | 3225,7 | 29899,24 |

**Tableau IV-30: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 300mbar)**

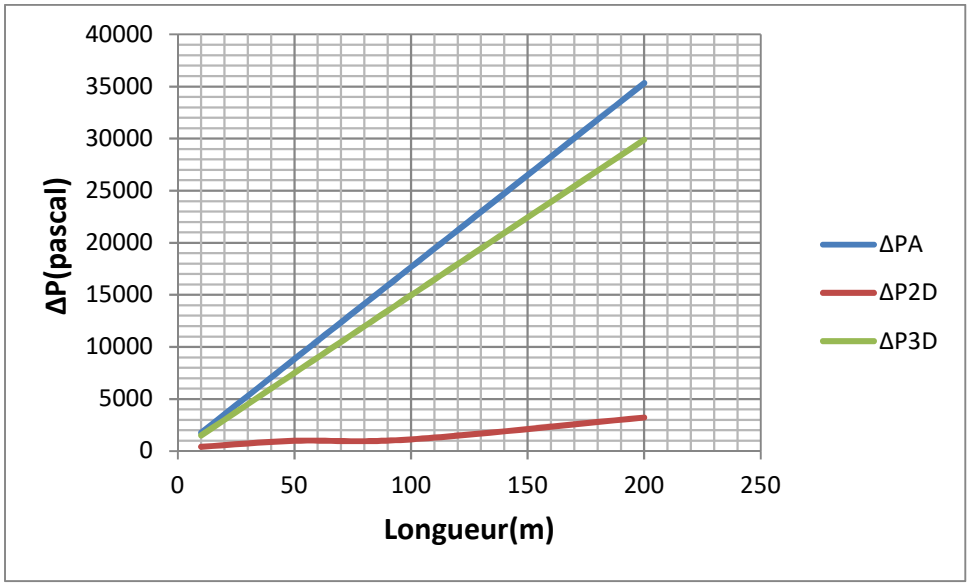



**Figure IV-30: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 300mbar**

| L(m) | ΔP(A)(pascal) | ΔP(2D)(pascal) | ΔP(3D)(pascal) |
|---|---|---|---|
| 10 | 6237,861885 | 572,3 | 5262,72 |
| 50 | 31189,30942 | 1310,8 | 26171,02 |
| 100 | 62378,61885 | 2032,7 | 52236,6 |
| 200 | 124757,2377 | 6556,2 | 104349,77 |

**Tableau IV-31: Pertes de charge (PE63/ pression d'entrée 1bar)**

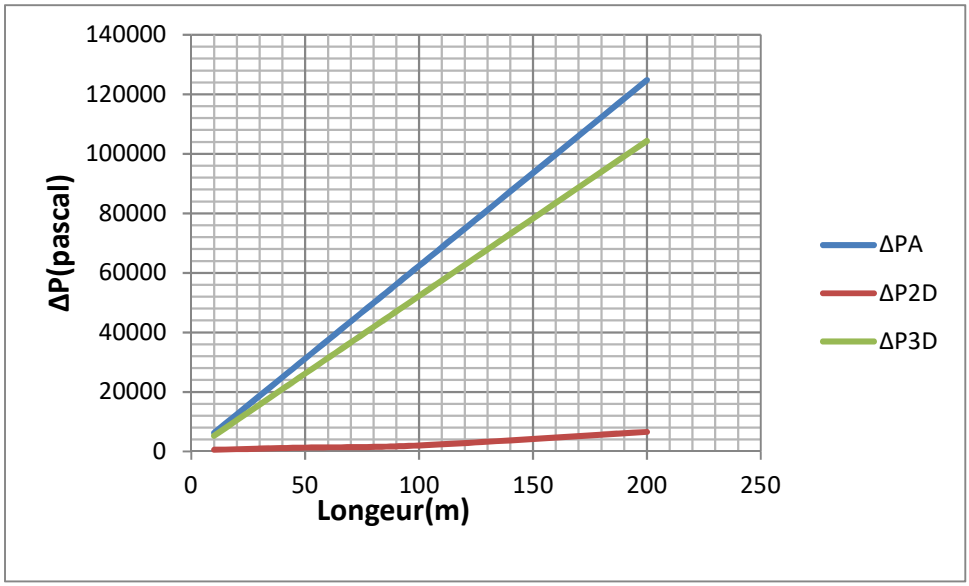



**Figure IV-31: Evolution de la perte de charge en fonction de la longueur pour le PE63 avec une pression d'entrée 1bar**

Les figures (Figure IV-29, Figure IV-30, Figure IV-31) représentent les graphes d'évolution des pertes de charge linéaires ΔP en (pascal) en fonction de longueur du réseau en (mètre) calculées par trois méthodes (simulation 2D, simulation 3D et méthode analytique) pour trois pressions d'entrée (21mbar, 300mbar et 1bar respectivement) pour la canalisation PE63 du réseau industriel de basse pression.

Les remarques tirées de ces graphiques sont résumées dans les points suivants :

La même remarque tirée pour tous les cas précédents concernant la proportionnalité entre la longueur de réseau et les pertes de charge linéaire obtenue par les trois méthodes reste valable pour le réseau industriel de basse pression.

On note que l'écart entre les résultats de la méthode analytique et les résultats de la simulation 3D diminue pour le PE63 par apport au cas précédent (PE40).

On remarque que les deux méthodes de calcul de perte de charge (la simulation 3D et la formule analytique) nous donnent des résultats supérieurs à la pression d'entrée (à partir de 100m de longueur pour la pression d'entrée 21mbar et de 200m pour 300mbar et 1bar).

## I.4 Conclusion

D'après l'analyse des résultats obtenue par la simulation numérique (2D et 3D) et par le calcul analytique on conclue que :

La perte de charge calculée par les trois méthodes est proportionnelle à la variation de longueur du réseau par contre elle est inversement proportionnelle à la variation de diamètre. Cela est expliqué par l'augmentation des frottements avec les parois des conduites qui seront plus importants plus que le diamètre se réduit et plus que la longueur augmente.

Les résultats de la simulation 3D et de la méthode analytique sont plus valables par rapport à celle de la simulation 2D qui sont très loin des deux autres méthodes. Alors que la comparaison entre les résultats de la simulation3D et celle de la méthode analytique nous fait apparaitre un écart qui est plus important plus que le diamètre diminue et plus que la pression augmente.

Dans certains cas le calcul des pertes de charge par les deux méthodes (analytique, et simulation 3D) nous donne des résultats supérieurs à la pression d'entrée cela signifie que le gaz écoulé dans la conduite n'atteint pas la sortie de la conduite ce qui oblige l'utilisation des pressions plus grands pour ces longueurs.

Le calcul des pertes de charge par la méthode analytique nous ne permet pas d'obtenir des résultats pour certaines longueurs avec certains pressions d'entrée pour la conduite PE40.

# Conclusion générale

# Conclusion générale

Ce modeste travail est dédié à l'étude comparative entre deux méthodes de calcul des pertes de charge linéaire dans le réseau de distribution du gaz naturel. Une méthode analytique basée sur les relations mathématiques utilisées par «sonelgaz » et une méthode numérique qui est assimilé à la simulation 2D et 3D à l'aide du logiciel de CFD *ANSYS Fluent* pour être capable de tirer les qualités et les défauts de chaque méthode. La valorisation de notre travail vient dans la validation de la précision des relations analytiques utilisées.

D'abord nous avons introduit des informations générales sur le gaz naturel et son distribution et les pertes de charge. Puis nous avons présenté la théorie de base des écoulements dans les conduites et de calcul des pertes de charge. En suite le chapitre 3 présente les étapes suivies pour faire la simulation numérique. En fin le chapitre 4 est consacré à la présentation et l'analyse des résultats et tirer les utilités essentielles du travail.

Le résultat commun entre la méthode analytique et la simulation numérique est la proportionnalité entre la perte de charge obtenue et la longueur du réseau, aussi cette perte est inversement proportionnelle à l'augmentation de diamètre. Ceci est dû à l'augmentation des frottements avec les parois de la conduite.

Une différence importante est constatée entre les résultats de la simulation 2D et les résultats de deux autres méthodes (simulation 3D, Analytique) cela montre que les résultats de simulation 2D pour les écoulements turbulents du gaz naturel dans les conduites de distribution ne sont pas valides.

L'existence d'un écart entre les résultats de la simulation3D et celle de la méthode analytique qui est plus important plus que le diamètre diminue et plus que la pression d'entrée augmente (les résultats des deux méthodes sont plus proche dans les basses pressions et pour les grand diamètres).

Dans certaine longueurs le calcul des pertes de charge par les deux méthodes (analytique, et simulation 3D) nous donne des résultats supérieurs à la pression d'entrée ce qui exige l'utilisation des pressions plus grandes.

La limitation de la méthode analytique dans le calcul de la perte de charge pour certaines longueurs et certaines pressions d'entrée pour le PE40.

# Références Bibliographiques

[1] LOONEY B. Statistical Review of World Energy, 2020|. Bp. 2020; 69:66.

[2] https://www.sonelgaz.dz/fr/category/qui-sommes-nous

[3] AT Kearney Introduction au gaz naturel Croissance et enjeux actuels. Natural Gas Series. Novembre 2015, pp. 4

[4] ROJEY A. Gaz naturel (Le): De la production aux marchés. Éditions Technip; 2013 May 3.

[5] SONELGAZ, Etude d'exécution méthodologie d'une étude de dimensionnement. Guide Technique de la distribution du Gaz par canalisations. 1997, pp.3 – 6

[6] https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14532:ed-2:v1:fr

[7] DELILACHE A. Etude des réseaux gaz. Ain M'Lila : institut de formation en électricité et gaz, Avril2016.

[8] Le gaz naturel : État des lieux, enjeux, perspectives et options d'ici l'horizon 2030, Washington DC : ESMAP et Banque Mondiale,2017

[9] BOUROUIS A. Support de cours : Transport et stockage d'énergie. Jijel : Université M.S Benyahia,2021

[10] SONELGAZ, options fondamentales Réseaux de distribution –canalisation-. Guide Technique de la distribution du Gaz par canalisations. Octobre2011, pp.2 – 5

[11] LALLEMAND André. Ecoulements des fluides. Techniques de l'ingénieur, octobre 2014pp39-41

[12] SONELGAZ, Théorie des écoulements du gaz. Guide Technique de la distribution du Gaz par canalisations. Septembre 2013.

[13] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_de_la_turbulence

[14] ZEGHIB A, TALBI K. Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone (Doctoral dissertation, Université Mentouri Constantine),2008

[15] MABROUK H. Estimation de débit d'une fuite dans un réseau de distribution de gaz naturel à l'aide du logiciel fluent. Mémoire de master 2 : Université Mentouri - Constantine : Juin 2012.

[16] DJIMLI S. Support de cours CFD. Jijel : Université M.S Benyahia,2021