



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique



Université IBN KHALDOUN –Tiaret

Faculté : Sciences appliquées

Département de Génie mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème :

**Etude d'un réchauffeur raccordé par un
poste de détente gaz**

Préparé par :

GACEM Abdelaziz

MIROUD Abdelkader

Soutenu publiquement le : **11/06/2023** Devant le jury composé de :

M. GUEMMOUR M B	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. AKERMI N	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mme. KHALDI S	Maître Assistante "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BELMILOUD MA	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

A cette occasion nous remercions Dieu le tout puissant de nous aider a concrétisé ce mémoire. Nous adressons nos remerciements à Mr : **BELMILOUD-MOHAMED-AMINE** d'avoir proposé ce thème, ainsi pour ses orientations et ses précieux conseils.

Nous remercions également :

Monsieur **GUEMMOUR Mohamed Boutkhal**, monsieur **AKERMI Naser-Eddine** et madame **KHALDI Sabrina**, pour leur participation au jury de ce mémoire.

Tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail. Mes chers parents pour leurs sacrifices, soutiens et encouragements. Mes collègues dans le département de Génie Mécanique.

Dédicaces

*C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux
Personnes les plus chères au monde, mes chers parents pour leurs amours
Et bonté et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre mon objectif, que*

Dieu me les garde

À...

Mes parents

Mes sœurs

Mes frères

à tous Mes amis

Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans

L'accomplissement de ce travail.

Table des matières

	Page
Remerciements.....	
Dédicace.....	
Liste des figures	iv
Liste des tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
Introduction générale	1
 Chapitre 1 : Le gaz naturel et poste de détente 	
1.1. INTRODUCTION.....	2
1.2. ORIGINE ET HISTOIRE DU GAZ NATUREL.....	2
1.3. LES DIFFERENTS TYPES DU GAZ NATUREL.....	3
1.3.1. Gaz conventionnel.....	4
1.3.2. Gaz non conventionnel.....	4
1.4. LES ETAPES D’EXTRACTION LE GAZ NATUREL.....	4
1.4.1. Etude géophysique.....	4
1.4.2. Installation gisement.....	4
1.4.3. Forage et traitement.....	4
1.5. PRODUCTION ET TRAITEMENT DU GAZ NATUREL.....	5
1.5.1. Techniques de traitement du gaz naturel.....	5
1.6. TRANSPORT DU GAZ NATUREL.....	6
1.6.1. Transport par les méthaniers.....	6
1.6.2. Transport par les gazoducs.....	6
1.7. POSTE DE DETENTE.....	7
1.7.1. Principe de fonctionnement.....	7
1.7.2. Conception poste de détente.....	8
1.7.3. Problèmes rencontrés détente du gaz.....	10
1.8. CONCLUSION.....	12
 Chapitre 2 : Réchauffeur et l’échange thermique 	
2.1. INTRODUCTION.....	13
2.2. DESCRIPTION DES ECHANGEURS THERMIQUES.....	13
2.3. LES DIFFERENTS TYPES DE TRANSFERTS THERMIQUES.....	14

2.3.1. Conduction.....	14
2.3.2. Convection.....	14
2.3.3. Rayonnement.....	15
2.4. CLASSIFICATIONS DES ECHANGEURS THERMIQUES.....	16
2.4.1. Selon procédés de transfert thermique.....	16
2.4.2. Selon le nombre de fluides utilisés.....	16
2.4.3. Selon le classement technologique.....	16
2.4.4. Selon la nature de matériau de la paroi.....	16
2.4.5. Selon le régime de fonctionnement.....	16
2.4.6. Selon le circuit des fluides.....	17
2.5. TECHNOLOGIES DES ECHANGEURS THERMIQUES.....	20
2.5.1. Echangeurs tubulaires.....	20
2.5.2. Echangeurs à plaque.....	20
2.6. ECHANGEUR THERMIQUE TYPE RECHAUFFEUR.....	21
2.6.1. Réchauffeur du gaz.....	22
2.6.2. Différents types de réchauffeur.....	22
2.7. CONCLUSION.....	26

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et la résolution numérique

3.1. INTRODUCTION.....	27
3.2. DESCRIPTION ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE.....	27
3.3. LES EQUATIONS GOUVERNANTES.....	29
3.3.1. Ecoulement laminaire.....	30
3.3.2. Ecoulement turbulent.....	30
3.4. LES MODELES DE TURBULENCE.....	32
3.5. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.....	33
3.6. CONDITIONS AUX LIMITES.....	33
3.6. METHODE NUMERIQUE.....	34
3.6.1. Choix de la méthode numérique.....	34
3.6.2. Maillage.....	34
3.7. EQUATION GENERALE DE TRANSPORT.....	37

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4.1. INTRODUCTION.....	39
4.2. EFFET DE MAILLAGE.....	39

4.3. VALIDATION NUMERIQUE.....	39
4.4. RESULTATS ET DISCUSSION.....	40
4.4.1. Variation des contours de vitesse.....	40
4.4.2. Variation des Contours de température.....	43
4.4.3. Variation des contours de pression.....	46
4.5. CONCLUSION.....	47
Conclusion générale	48
Liste des références	49
Résumé	



*Liste des figures et des
tableaux*

Liste des figures

	Page
Figure 1.1 Schéma des différents types de source géologique du gaz.....	3
Figure 1.2 Schéma de procédé d'une installation de traitement des gaz pour le retrait CO ₂ et H ₂ S.....	5
Figure 1.3 Limite réglementaire en aval d'un poste de distribution publique.....	7
Figure 1.4 Schéma poste de détente gaz.....	8
Figure 1.5 Filtre du gaz.....	9
Figure 1.6 Appareils des Régulations du gaz: (a) Clapet de sécurité, (b) Régulateur détenteur et (c) Soupape de sureté.....	9
Figure 1.7 Compteur électronique.....	9
Figure 1.8 Odorisation.....	10
Figure 1.9 Givrage du pilote du poste et de la partie aval de régulateur.....	11
Figure 2.1 Fonctions d'échangeurs thermiques.....	13
Figure 2.2 Transfert de chaleur par conduction.....	14
Figure 2.3 Transfert de chaleur par convection.....	15
Figure 2.4 Transfert de chaleur par rayonnement.....	15
Figure 2.5 Classification selon le circuit des fluides.....	17
Figure 2.6 Ecoulement des fluides à co-courant.....	18
Figure 2.7 Ecoulement des fluides à contre-courant.....	18
Figure 2.8 Ecoulement croisé des deux fluides.....	18
Figure 2.9 Ecoulement Multi-passe (tube/calandre).....	19
Figure 2.10 Ecoulement Multi-passe a plaque.....	19
Figure 2.11 Circulation des fluides dans les échangeurs tubulaires : (a) monotube, (b) multitube et (c) coaxial.....	20
Figure 2.12 Circulation des fluides dans les échangeurs a plaque.....	21
Figure 2.13 Réchauffeur raccordé avec poste détente.....	22
Figure 2.14 Réchauffeur du gaz.....	23
Figure 2.15 Fonctionnement le Réchauffeur du gaz.....	24
Figure 3.1 Schéma d'un réchauffeur de gaz.....	27
Figure 3.2 Détails du serpentín à gaz : (a) configuration 2 passes et (b) configuration 4 passes.....	29
Figure 3.3 Maillage structuré.....	35

Figure 3.4	Maillage non structuré.....	35
Figure 3.5	Maillage hybride.....	36
Figure 3.6	Volume de control typique bidimensionnel.....	36
Figure 3.7	Volume de contrôle décalé vers la droite.....	37
Figure 3.8	Volume de contrôle décalé vers le haut.....	37
Figure 4.1	Maillage utilisé dans cette simulation.....	39
Figure 4.2	Variation des contours de vitesse pour les deux configurations.....	40
Figure 4.3	Variation de contour de vitesse pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration N =2.....	41
Figure 4.4	Variation de contour de vitesse pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration N =4	42
Figure 4.5	Variation des contours de température pour les deux configurations.....	43
Figure 4.6	Variation de la température pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration N =2.....	44
Figure 4.7	Variation de la température pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration N =4.....	45
Figure 4.8	Variation des contours de pression pour les deux configurations.....	46

Liste des tableaux

		Page
Tableau 3.1	les constantes utilisées par le code Fluent.....	33
Tableau 3.2	les propriétés thermo-physiques du gaz.....	33
Tableau 4.1	Comparaison entre les résultats de la présente étude et ceux de de Soleimani et al.....	39
Tableau 4.2	Température moyenne d'évacuation des gaz pour les deux configurations.....	45



Nomenclatures

Symbole	Définition	Unité
Cp	Chaleur spécifique massique	[J/KgK]
G	Accélération de la gravité	[m/s ²]
H	Coefficient de transfert de chaleur convectif	[W/m ² K]
\dot{m}	Débit massique	[Kg/s]
N	Nombre de passes	[-]
Q _v	Débit volumique	[m ³ /s]
P	Pression	[N/m ²]
S	Surface d'échange	[m ²]
T	Temps	[s]
T	Température	[K]
V	Vecteur de vitesse	[m/s]
x,y	Cordonnée cartésien	[m]
Z	Facteur de compressibilité	[-]

Symboles grecs

λ	Coefficient de transfert de chaleur par conduction	[W/m K]
ε	Emissivité thermique	[-]
μ	Viscosité dynamique	[Kg/ms]
ρ	Masse volumique	[Kg /m ³]
Φ	Flux de chaleur	[W/m ²]
σ	Coefficient de stefan boltzmann	[W/m ² K ⁴]
τ	Contrainte de cisaillement	[N/m]

Indices et exposants

i,j	Imposé
Moy	Valeur moyenne
0	Référence
P	Paroi
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz du Pétrole Liquéfié
MPB	moyenne pression B
MPC	moyenne pression C



Introduction générale

Au terme des années de formation académique, et dans le cadre de la réalisation d'un projet de fin de cycle, notre choix s'est porté sur un sujet parmi les plus importants dans le secteur énergétiques, qui comprend la production, le transport et la distribution du gaz naturel. En particulier, les étapes pour assurer en qualité la livraison du gaz naturel aux consommateurs dans les conditions répondre aux exigences requises et applicables.

Le gaz naturel est un combustible fossile, après son extraction et traitement, peut être transporté sous des pressions élevées par gazoduc, jusqu'aux centre de consommation. Avant d'être livré à un abonné, il est nécessaire d'abaisser la pression du gaz. Afin qu'il puisse être utilisé dans les procédés industriels, ou transiter dans le réseau de distribution jusqu'au compteur de chaque utilisateur. L'abaissement de la pression, est effectué au moyen d'installation un poste de détente, qui comportent des équipements remplissent cette fonction.

La détente du gaz entre la différence de pression amont et aval du poste pouvant être importante, il en résulte une chute de température non négligeable, Pouvant favoriser la formation d'hydrates et par là même entraînant des problèmes au niveau de la détente régulation et au niveau du comptage du gaz. Pour éviter d'éventuels problèmes de fonctionnement du poste il y a nécessité absolue de procéder au réchauffage du gaz avant la détente, et c'est ce que nous intéresse dans notre projet. En d'autres termes nous allons étudier le réchauffeur du gaz naturel.

Pour ce faire, notre mémoire a été divisé en quatre chapitres. Chaque chapitre développe les détails de ce projet.

Le premier chapitre présente une généralité sur le gaz naturel, et les poste de livraison ou bien poste de détente gaz.

Le deuxième chapitre est consacré à aborder la notion sur les échangeurs thermique, ainsi que la classification les plus couramment utilisés et une partie sur l'équipement de type réchauffeur du gaz.

Le troisième chapitre présente une description et présentation de la problématique de notre thème puis on passe à l'écriture des équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites et en termine par les différentes méthodes numériques, les types de maillage. Ainsi que la discrétisation de l'équation du transport.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de calcul et à leur discussion. Nous terminons par une conclusion générale dans laquelle nous dégagerons les principaux résultats obtenus au cours de cette étude et nous en signalons les extensions possibles.



Chapitre 1 :

***Le gaz naturel et poste
de détente***

1.1. INTRODUCTION

Le gaz naturel provient aujourd'hui de sources éloignées, il faut donc l'acheminer jusqu'aux centres de consommation, par une canalisation de transport fonctionne sous des pressions élevées, avant d'être livré à un abonné passe dans des réseaux fonctionnant sous des pressions plus faibles.

L'abaissement de la pression est réalisée au moyen d'installations poste de détente.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une généralité sur le gaz naturel, et les poste de livraison ou bien poste de détente gaz.

1.2. ORIGINE ET HISTOIRE DU GAZ NATUREL

Les chinois ont commencé à utiliser du gaz naturel comme combustible et source d'éclairage au 4^{eme} siècle avant Jésus-Christ, Le forage systématique des puits pour l'extraction de la saumure mené à la découverte de beaucoup de « puits à feu » au Sichuan, qui produisaient du gaz naturel.

La saumure et le gaz naturel étaient conduits ensemble par des tubes de bambous.

Depuis les petits puits, le gaz pouvait être acheminé directement aux brûleurs où la saumure était versée dans des cuves d'évaporation en fonte pour bouillir et produire du sel [1,2].

En 1776, le physicien Alessandro Volta découvre le méthane en s'intéressant au « gaz des marais » ancien nom du gaz.

Les premiers gaz combustibles utilisés en Europe, à partir de 1785, date de leur invention, seront des gaz manufacturés, c'est-à-dire des gaz fabriqués dans des usines à gaz et des cokeries, principalement à partir de la houille.

L'histoire du gaz manufacturé est liée à l'histoire de nos villes et des grands groupes énergétiques modernes, ceux-là mêmes qui plus tard achemineront le gaz naturel [3].

Le premier réverbère du monde au gaz de houille fut installé à Londres en 1807, et le premier puits de gaz naturel creusé aux États-Unis fut foré en 1821 à Fredonia (État de New York) par William Hart.

La première société gazière connue fut la Fredonia Gas Light, établie en 1858, et le premier gazoduc fut construit en 1891. Ce dernier, d'une longueur de cent-soixante kilomètres, reliait la ville américaine de Chicago à un réservoir de l'Indiana [4].

Si le pétrole fait l'objet d'une exploitation et d'une utilisation industrielle poussée à partir des années 1850, le gaz naturel devra attendre les années 1950 pour susciter un intérêt mondial. Ses

réserves et ressources, voire sa production, sont mal connues en dehors des États-Unis jusqu'à la fin des années 1960. Le gaz naturel est apparu longtemps comme une source d'énergie difficile à mettre en œuvre. Son commerce sous forme liquéfiée (GNL) n'a commencé qu'en 1964 dans des volumes très modestes [5].

Aujourd'hui, et en particulier depuis les crises, le gaz naturel est devenu une source importante d'énergie, c'est la deuxième source la plus utilisée dans le monde après le pétrole et son usage se développe rapidement [6].

1.3. LES DIFFERENTS TYPES DU GAZ NATUREL

Le gaz naturel est un gaz composé de différents hydrocarbures gazeux, comme le méthane, l'éthane, le propane ou le butane, contient aussi du dioxyde de carbone (CO₂), de l'eau, de l'azote, ainsi que du sulfure d'hydrogène (H₂S) [7].

La méthode d'extraction du gaz peut se faire au moyen de différentes techniques, pour cela, il faut s'intéresser aux différents types de gaz naturels.

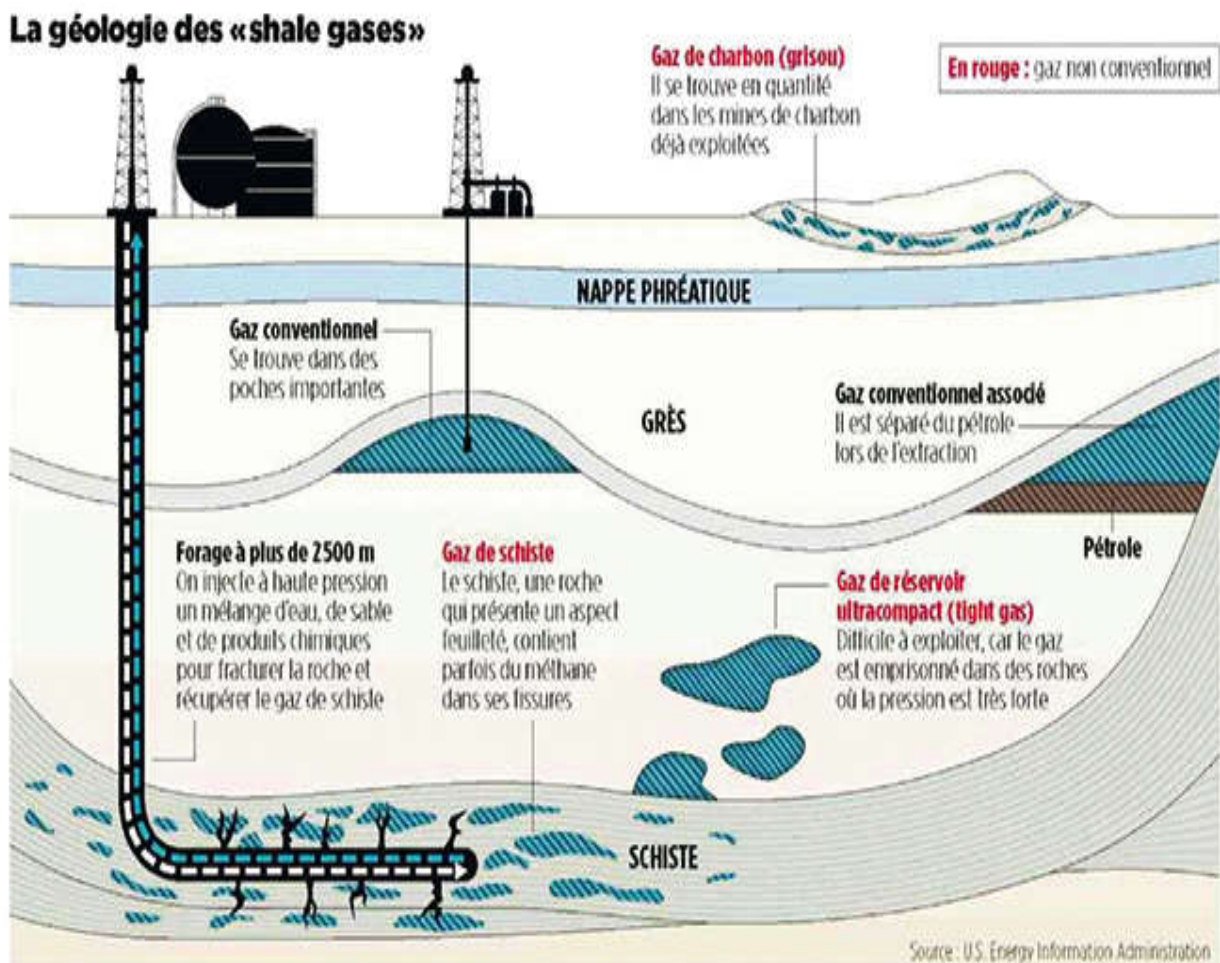


Figure 1.1: Schéma des différents types de source géologique du gaz [8]

1.3.1 Gaz conventionnel

Se trouve dans des roches dites "réservoirs" ou les roches poreuses du sous-sol, on va venir récupérer ce gaz en réalisant un forage vertical, c'est la pression naturelle qui va permettre au gaz de remonter à la surface.

1.3.2 Gaz non conventionnel

C'est le plus difficile à extraire du sous-sol, Il est retenu dans des couches plus fragiles et la technique d'extraction est plus complexe, il s'agit des gaz suivants [7].

- ✚ **Le gaz de schiste** : situé dans la roche-mère.
- ✚ **Le gaz de houille** : retrouve dans le charbon.
- ✚ **Le gaz «fond de bassin »** : situe dans des grands réservoirs en roches.
- ✚ Le gaz «offshore» : se trouve au large des côtes, en pleine mer.
- ✚ **Les hydrates de méthane** : inaccessible car piégés dans les zones arctiques

1.4. LES ETAPES D'EXTRACTION LE GAZ NATUREL

Le gaz naturel n'est pas "produit" à proprement parler, il s'agit plutôt d'une extraction suivie du raffinage d'une matière première disponible dans la nature, ainsi, il existe plusieurs étapes essentielles avant d'obtenir du gaz naturel utilisable par les particuliers.

1.4.1. Etude géophysique

La première étape avant l'extraction du gaz naturel consiste évidemment à découvrir les gisements de gaz.

Pour ce faire, les compagnies gazières procèdent à une inspection des sous-sols, il s'agit alors de repérer les gisements possibles à l'aide du travail des cartographes et sismologues [7].

1.4.2. Installation gisement

La prospection des sous-sols permet de mettre en avant des conditions favorables, il est possible de commencer l'extraction du gaz naturel, on procède à l'installation des éléments qui vont permettre son exploitation [7].

1.4.3. Forage et traitement

Le forage est réalisé, il peut atteindre jusqu'à 6000 mètres de profondeur, on utilise forage horizontal ou forage vertical et la technique de la fracturation hydraulique.

Dans la majorité des cas, le gaz naturel sort des puits par la pression mais il est possible que des équipements servant à pomper le gaz naturel soient installés en plus. [7].

1.5. PRODUCTION ET TRAITEMENT DU GAZ NATUREL

Lorsque la première étape d'extraction du gaz naturel est terminée, et le gaz remonte à la Surface, Le traitement du gaz naturel consiste à séparer les constituants présents à la sortie du puits, tel que l'eau, le gaz acide, et les hydrocarbures lourds, il transporté par gazoduc vers une unité de traitement, pour amener le gaz à des spécifications de transport ou des spécifications commerciales [9].

1.5.1. Techniques de traitement du gaz naturel

Le gaz naturel est complètement brut, doit être traité car le gisement contient souvent d'autres substances (le pétrole, le butane ou encore l'éthane.)

Lors de la phase de traitement, il s'agit d'éliminer les éléments corrosifs comme le soufre, les hydrocarbures ou l'hélium, ensuite, il faut que le gaz soit complètement sec, sans aucune trace de liquide, c'est une étape essentielle pour intégrer le gaz naturel au réseau [7].

Le traitement des gaz par les amines, désigne un procédé de séparation de mélanges gazeux, utilisant des solutions aqueuses d'amines pour retirer des gaz acides, comme le sulfure d'hydrogène (H_2S) et le dioxyde de carbone (CO_2) de mélanges gazeux, il s'agit de procédés courants dans l'industrie chimique.

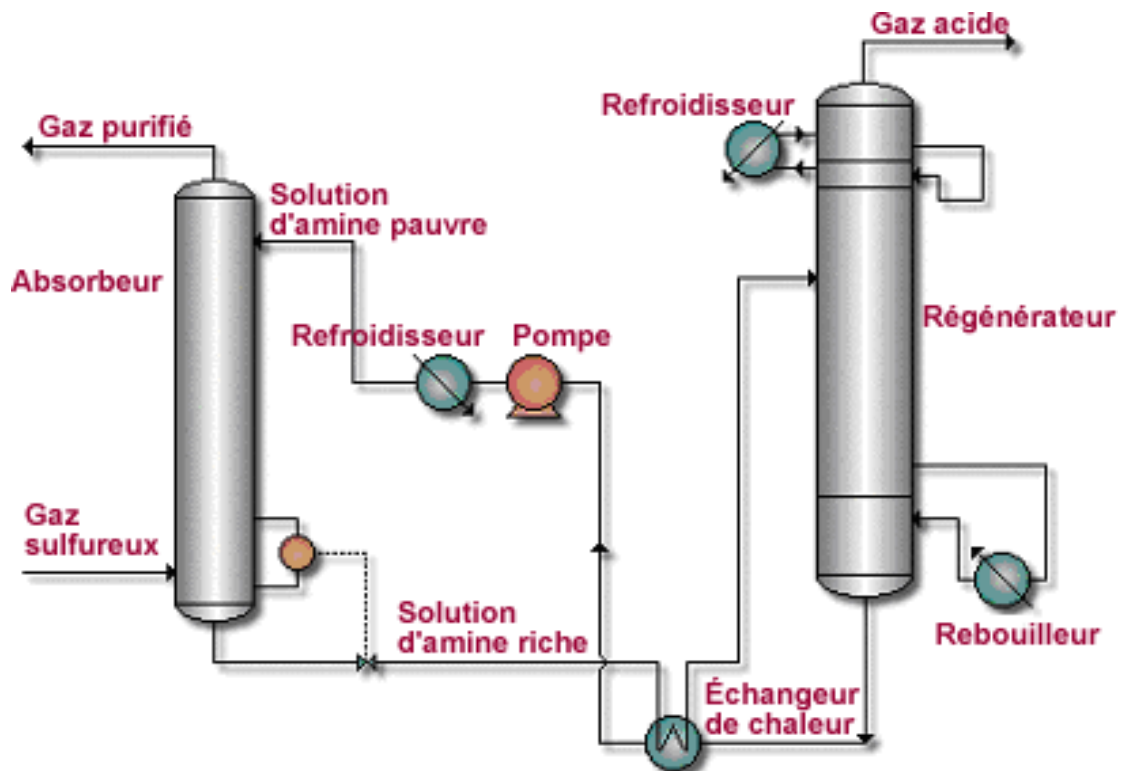


Figure 1.2 : Schéma de procédé d'une installation de traitement des gaz pour le retrait CO_2 et H_2S [10]

Les principaux traitements qui sont effectués sont :

- La première étape permet de réaliser la séparation de fractions liquides éventuellement contenues dans l'effluent du puits.
- Traitement dépend du mode de transport adopté [9].

Le gaz naturel peut être transporté sous forme :

- Gaz naturel comprimé (transport par gazoduc).
- Gaz du Pétrole Liquéfié (GPL).
- Gaz Naturel Liquéfié (GNL).

1.6. TRANSPORT DU GAZ NATUREL

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

1.6.1. Transport par les méthaniers

Il s'agit d'une méthode utilisée pour transporter du gaz sur de très grandes distances, Lorsque le transport par gazoduc est trop coûteux ou impossible, le gaz est liquéfié puis acheminé par navire méthanier vers les zones de consommation.

La liquéfaction du gaz sous forme de GNL permet de l'acheminer sur de longues distances et de le stocker, a pression atmosphérique et à une température d'environ -161°C , et le volume du gaz est réduit 600 fois, cela permet de transporter de plus grandes quantités plus facilement [11].

1.6.2. Transport par les gazoducs

Ils sont le moyen de transport du gaz le plus utilisé, ce sont des canalisations fiables et rentables en acier, capables de transporter sur de longues distances du gaz sous pression, pouvant atteindre plus de 3 000 kilomètres de long, Le diamètre de ces tubes varie entre 50 centimètres et un mètre, ils peuvent être terrestres ou sous-marins [11].

Les réseaux de gazoducs est aujourd'hui dense, il permet d'acheminer rapidement et efficacement le gaz vers les zones de forte demande, ces réseaux comprennent en outre :

- ✚ **Station de compression** : rehaussent la pression du gaz transporté et assurent sa progression dans les canalisations.
- ✚ **Station d'interconnexion** : constituent des nœuds importants du réseau de transport.
- ✚ **Poste de détente (livraison)** : assurent la livraison du gaz naturel chez les gros industriels ou dans les réseaux aval de distribution.

Ces postes assurent généralement des fonctions de détente, de réchauffage, de filtrage et de mesurage du gaz [12].

1.7. POSTE DE DETENTE

Les postes de livraison ou poste de détente assurent la connexion entre deux réseaux de Pression Maximum en Service différente, ils sont installés en particulier, à l'interface entre le transporteur et le distributeur. *Fig. 1.3*, ils assurent les fonctions suivantes :

- Le comptage de gaz naturel.
- La filtration du gaz naturel.
- La régulation et contrôle de la pression émise dans le réseau transport.
- La sécurité contre les surpressions au réseau aval.

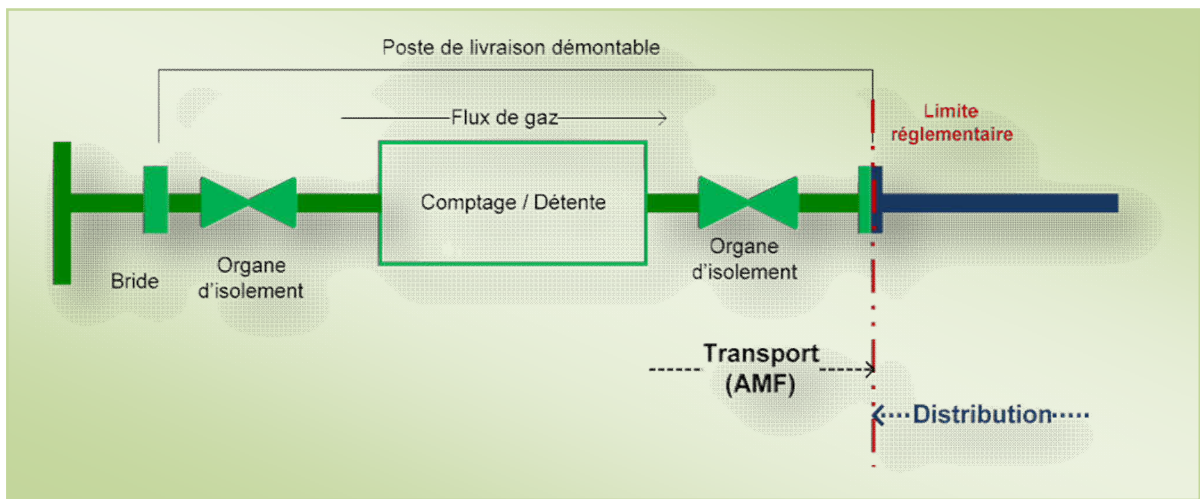


Figure 1.3 : Limite réglementaire en aval d'un poste de distribution publique [13]

1.7.1. Principe de fonctionnement

Un poste de détente a pour principale fonction de fournir un certain volume de gaz à une pression réduite constante à partir d'un gaz à une pression supérieure variable. On distingue deux grands types de postes de détente sur le réseau de transport :

- Les postes de pré-détente
- Les postes de livraison

1.7.1.1. Poste de pré-détente

Il s'agit des postes placés sur le réseau de transport, assurent la séparation entre deux canalisations en Service différente (**70/20Bar**), on distingue deux catégories :

- ✚ **Pré détente technique** : Sert à étager la détente entre deux réseaux de transport qui peuvent parfaitement avoir la même pression maximale de service, Une pré-détente technique n'est pas forcément équipée de dispositifs de sécurité de la pression aval.

- ✚ **Pré détente de sécurité** : Placée entre le réseau principal et le réseau secondaire, lorsque ce dernier a une pression maximale de service inférieure à celle du réseau principal. La Pré détente de sécurité est une installation imposée par la réglementation, Donc elle est obligatoirement équipée de dispositifs de sécurité de la pression aval [14].

1.7.1.2. Poste de livraison

Les postes de livraison sont situés à la sortie du réseau de transport, et servent à alimenter les réseaux de distribution (**MPB, MPC**) ou les clients industriels raccordés directement sur le réseau de transport.

- ✚ **Poste de livraison pour distribution publique** : Destiné pour alimenter le réseau de distribution (consommateurs publique), et il fonctionne selon deux type de pression **moyenne pression B (MPB, 4 bar)** ou **moyenne pression C (MPC, entre 4 et 20 bar)**.
- ✚ **Poste de livraison pour client industriels** : Installé pour alimenter une zone industrielle, livre du gaz à une pression de livraison adaptée à l'usage du client (de 1,5 bar pour une chaufferie à 20 Bar ou plus pour une turbine à gaz), Les débits peuvent être précisés par le client ainsi que leur croissance [14].

1.7.2. Conception poste de détente

Le poste de détente [Fig.1.4], composé de plusieurs parties (MODULE), Permettant d'assuré la livraison du gaz naturel à une pression réduit et un débit demandé.

Le bloc de détente du poste comporte deux lignes indépendantes :

- Ligne principale assure l'alimentation en temps normal.
- Ligne auxiliaire assure l'alimentation en cas d'incident sur la ligne principale.



Figure 1.4 : Schéma poste de détente gaz [15].

✚ **Module filtration** : Les postes de détente sont équipés d'un filtre à cartouche (feutre ou papier par exemple), vertical ou horizontal, servant à retenir la poussière que pourrait transporter le gaz [14].



Figure 1.5 : Filtre du gaz [14]

✚ **Module de régulation** : L'abaissement de la pression est réalisée au moyen d'appareils appelés (détendeur ou régulateur), c'est un ensemble d'appareils, servant à diminuer la pression du gaz et la maintenir une pression constante [14].



(a)



(b)



(c)

Figure 1.6 : Appareils des Régulations du gaz [14] : (a) Clapet de sécurité, (b) Régulateur détenteur et (c) Soupape de sureté

✚ **Module de comptage** : Un compteur à turbine associé à un dispositif électronique permet de compter le gaz livré au client à la pression contractuelle. Le comptage est généralement assuré par un compteur de volume associé à un dispositif de conversion en température, pression/température ou de compressibilité.



Figure 1.7 : Compteur électronique [15]

✚ **Module d'Odorisation** : Pour des raisons sécuritaires le gaz livré au domestique doit être odorisé, le **THT** ne perturbe pas les caractéristiques physico-chimiques du gaz transporté, les pompe doseuses contrôle et régule la quantité du **THT** selon le débit transitant.



Figure 1.8 : Odorisation [15]

✚ **Isolement du poste** : Les postes de détente sont équipés, au moins en entrée et en sortie, de robinets de barrage permettant l'arrêt du transit de gaz dans le poste (pour la maintenance des ensembles de régulation, les essais de fonctionnement des appareils...) [14].

✚ **By-pass** : Assurer manuellement l'alimentation en gaz au moyen d'un circuit de bipasse équipé d'un robinet de laminage manuel, qu'en cas d'incident ou d'opération rendant le bloc de détente inopérant [14].

1.7.3. Problèmes rencontrés détente du gaz

La détente du gaz naturel dans un poste entraîne deux principales nuisances :

1.7.3.1. Le bruit

La détente est une source importante de bruit, dès que $\frac{P_{aval}}{P_{amont}} \leq 0.5$, le gaz atteint la vitesse du son au niveau du point où se réalise la détente et, au-delà, il se produit des ondes de choc et des frottements.

Cela engendre des turbulences qui peuvent être la source d'un bruit intense, ces turbulences peuvent également provoquer des vibrations mécaniques, elles aussi sources de bruit, se transmet ensuite par le gaz en mouvement et par rayonnement du corps des détendeurs et des canalisations.

Le bruit peut s'avérer gênant pour le voisinage et pour la sécurité du personnel, il est alors nécessaire d'employer certaines méthodes pour limiter le niveau acoustique [14].

On utilise au choix :

- Le capotage avec un isolant phonique des appareils et des tuyauteries.
- L'installation d'appareils silencieux.

- En choisissant une conception simple pour ses postes de détente.
- Eviter que le gaz n'atteigne la vitesse critique au clapet (détente progressivement en absorbant au fur et à mesure l'énergie cinétique par frottement).
- Stabiliser les ondes de choc en faisant passer le gaz à travers un grand nombre de petits orifices.

1.7.3.2. Le froid

La détente du gaz naturel entraîne un abaissement de la température du gaz suivant la formule suivante :

$$\Delta T = 0.5 \Delta P \quad (1.1)$$

Pour les postes installés sur le réseau de transport, la différence entre la pression amont et la pression aval pouvant être importante, il en résulte une chute de température non négligeable.

Exemple : Si la pression $P_{\text{amont}} = 60 \text{ bar}$; $P_{\text{aval}} = 4 \text{ bar}$; $T^{\circ} \text{ gaz amont} = 10^{\circ}\text{C}$

Alors : $T^{\circ} \text{ gaz sortie détente}$ voisine de $- 18^{\circ}\text{C}$

Par conséquent, les problèmes qui peuvent se poser sont les suivants :

- Fragilisation du matériau de la canalisation aval, il n'est donc pas recommandé de poser une canalisation en polyéthylène directement en sortie d'un poste de livraison transport [14].
- Formation de glace ou d'hydrates dans le gaz si la température descend au-dessous du point de rosée, ce givrage se produit dans les détendeurs, et encore plus facilement dans les circuits de pilotage (en particulier dans le pré détendeur qui est soumis à une différence de pression importante) [14].



Figure 1.9 : Givrage du pilote du poste et de la partie aval de régulateur [16]

- Formation de glace à l'extérieur (autour des appareillages) pouvant obturer des orifices de

communication avec l'extérieur ou empêcher le fonctionnement mécanique de certains organes (vannes de sécurité, compteur, robinet) si on ne prend pas de précautions.

Les solutions adoptées pour ces problèmes :

- La mise en place en amont du poste de livraison (plusieurs kilomètres) d'un poste de pré détente.
- L'installation d'un échangeur atmosphérique après la détente.

L'installation d'un dispositif de déshydratation du gaz à l'amont du circuit (pots de méthanol ou isopropanol).

- la mise en place de cordons chauffants
- L'installation d'un réchauffeur de gaz en amont de la détente, (Cette solution est généralisée chez les transporteurs de gaz qui se voient imposée une température minimale du gaz livré (utilisation de chaudières à gaz et échangeurs) [14].

1.8. CONCLUSION

Ce n'est pas un hasard si le gaz naturel est distribué via des réseaux de gazoducs terrestres : le stockage du gaz naturel est délicat. Contrairement aux GPL, le gaz naturel ne peut être liquéfié qu'à très haute pression ou très basse température. Ce principe n'est utilisé que sur les méthaniers, navires qui transportent le gaz en mer. Pour les utilisations qui nécessitent un stockage ponctuel (carburant automobile), il faut utiliser des réservoirs qui supportent des pressions de l'ordre de 300 bars.

Sur terre, on préfère utiliser des gazoducs .Le stockage de gros volumes de gaz est réalisé dans des cavités souterraines aux propriétés géologiques stables.

Les postes de détente sont des dispositifs indispensables pour le transport et la distribution du gaz naturel, d'où la nécessité de le entretenir et d'adopter la meilleure méthode de maintenance



Chapitre 2 :

***Réchauffeur et
l'échange thermique***

2.1. INTRODUCTION

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie, lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures, on dit qu'il y'a transfert de chaleur.

Le transférer de chaleur d'un fluide chaud a un fluide froid se réalisé dans des appareils appelés échangeurs thermiques, ces dernier interviennent dans l'industrie énergétique (pétrolière et gazière) qui exigent souvent que le fluide traités soient chauffé ou refroidis, avec ou sans changement de phase.

Dans ce chapitre, nous allons aborder la notion sur les échangeurs thermique, ainsi que la classification les plus couramment utilisés et une partie sur l'équipement de type réchauffeur du gaz.

2.2. DESCRIPTION DES ECHANGEURS THERMIQUES

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur thermique est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie, il permet de modifier la température (de l'abaisser ou de la relever) ou l'état d'un fluide (liquide ou gaz) en vue de le : Séparer, Distiller, Stocker, Transporter. Les échangeurs thermiques assurent plusieurs [fig.2.1] fonctions suivant la terminologie utilisée :

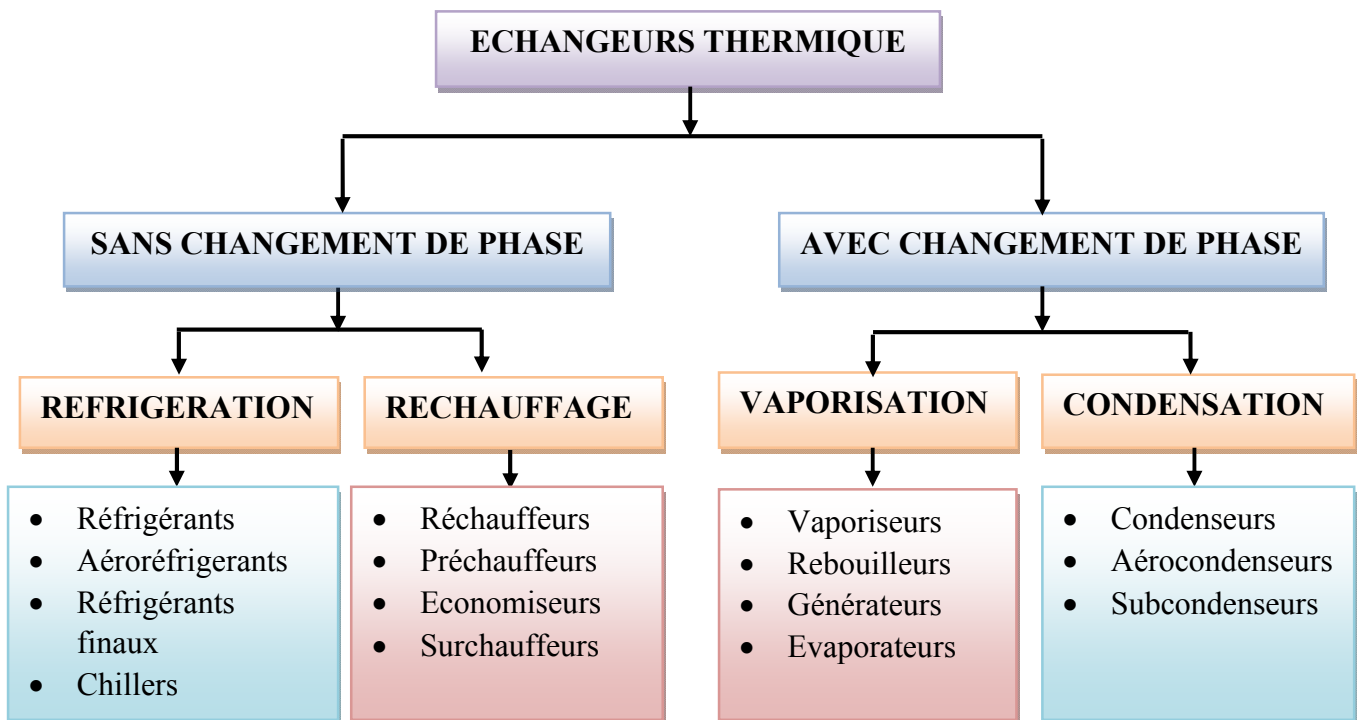


Figure 2.1 : Fonctions d'échangeurs thermiques [17].

L'échangeur de chaleur, instrument clé du thermicien ou de l'énergéticien, permet de contrôler la température d'un système ou d'un produit en échangeant de la chaleur entre deux milieux.

Dans quelques échangeurs de chaleur, les fluides échangeant de la chaleur sont en contact direct et dans la plupart des échangeurs de chaleur, le transfert de chaleur entre les fluides se produit à travers une paroi (surface) de séparation.

2.3. LES DIFFERENTS TYPES DE TRANSFERTS THERMIQUES

Comme nous l'avons déjà mentionné, on peut définir le transfert thermique entre deux corps comme étant le transfert de l'énergie qui résulte d'une différence de température entre deux corps, on distingue habituellement trois modes de transfert: par conduction, par convection et par rayonnement.

2.3.1. La conduction

La chaleur est transférée par conduction dans un fluide immobile ou une matière solide à un niveau moléculaire [Fig.2.2] ces molécules présentant un niveau énergétique plus élevé car elles sont plus chaudes perdent une partie de leur énergie au profit des molécules voisines, la vitesse à laquelle la chaleur est transférée dépend de la différence de température entre les côtés chaud et froid et de la conductivité thermique (k) de la substance, et pour transférer de la chaleur, il faut utiliser un matériau à conductivité thermique élevée [10].

L'équation utilisée pour déterminer la chaleur transférée par conduction est la suivante :

$$\Phi = -\lambda \cdot S \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (2.1)$$

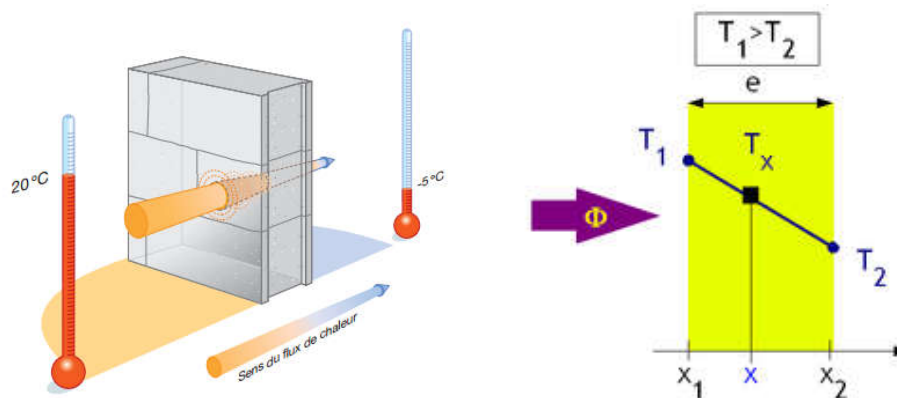


Figure 2.2 : Transfert de chaleur par conduction.

2.3.2. La convection

Le terme convection est utilisé pour faire référence au transfert de chaleur d'une surface vers un fluide en mouvement ou l'inverse. Dans ce cas, la chaleur et le fluide se déplacent tous deux dans la même direction [Fig.2.3], on distingue deux types de convection :

- ✚ **Convection naturelle** : produit dans un fluide immobile car la partie du fluide en contact avec la surface chaude devient moins dense et, en raison de la gravité, s'éloigne, emportant avec elle la chaleur.
- ✚ **Convection forcée** : il s'agit du mode de transfert de chaleur par convection dominant. c'est pour augmenter la vitesse d'évacuation de la chaleur [10].

Toutes les propriétés du fluide jouent un rôle, la densité, la viscosité et la conductivité thermique sont utilisées pour calculer la valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection (h) utilisé dans l'équation de base :

$$\Phi = h \cdot S(T_p - T_0) \quad (2.2)$$

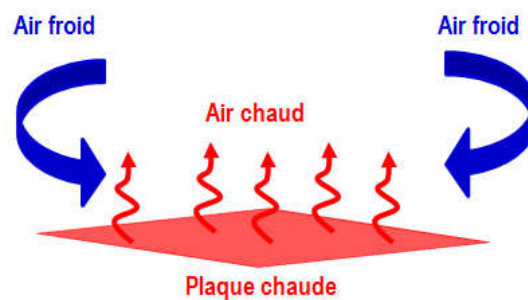


Figure 2.3: Transfert de chaleur par convection

2.3.3. Rayonnement

Des températures élevées, le rayonnement s'érige en méthode de transfert de chaleur prédominante.

À la différence de la conduction et de la convection qui nécessitent une substance pour transférer de l'énergie, le rayonnement est mise en œuvre sans qu'il soit nécessaire de placer un matériau entre la source et le récepteur, en fait, il est plus efficace sous vide.

Dans des températures plus basses, la quantité de chaleur transférée par rayonnement devient faible et ne tient pas un rôle important dans la conception et l'exploitation d'équipements d'échange de chaleur. L'équation de base utilisée pour calculer le transfert de chaleur par rayonnement est :

$$\Phi = \varepsilon \sigma S(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.2)$$

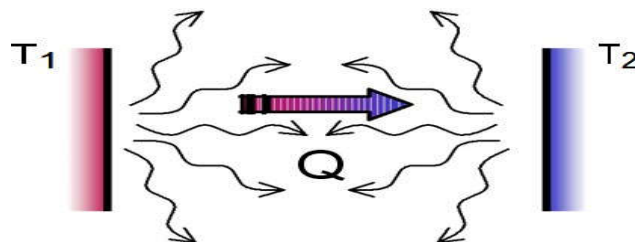


Figure 2.4: Transfert de chaleur par rayonnement [18].

2.4. CLASSIFICATIONS DES ECHANGEURS THERMIQUES

La classification des échangeurs thermiques utilisés dans les équipements industriels, repose sur plusieurs critères, dont les plus importants sont cités :

2.4.1. Selon procédés de transfert thermique

Selon leurs procédés de transfert, les échangeurs de chaleurs sont classés en deux types :

- ✚ **Echangeurs à contact direct** : Le type le plus simple, comprend un récipient (ou canalisation) dans lequel les deux fluides sont directement mélangés, et atteignent la même température finale.
- ✚ **Échangeurs à contact indirect** : En principe, pour les échangeurs les plus répandus dans l'industrie, les deux fluides désignés, s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison, à faible inertie thermique [19].

2.4.2. Selon le nombre de fluides utilisés

Les échanges de chaleur à deux fluides sont les plus connus, la plupart des processus se chauffage, de refroidissement, récupération de la chaleur, implique le transfert de chaleur entre deux fluides, les échangeurs de chaleur à trois fluides sont généralement utilisés dans la cryogénie et dans quelque processus chimique (système de séparation de l'aire, liquéfaction et purification de l'hydrogène) [19].

2.4.3. Selon le classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- ✚ **Echangeur à tubes** : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- ✚ **Echangeur à plaques** : surface primaire ou à surface secondaire.

2.4.4. Selon la nature de matériau de la paroi

On retient deux types de paroi :

- ✚ **Echangeurs métalliques** : en acier, cuivre, aluminium, ou matériaux spéciaux (superalliages, métaux ou alliages réfractaires).
- ✚ **Echangeurs non métalliques** : en plastique, céramique, graphite, verre, etc. [19]

2.4.5. Selon le régime de fonctionnement

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- ✚ **Transferts sans stockage** : donc en récupérateur, avec deux ou (n) passage, et un écoulement général continu.

- ✚ **Transfert avec stockage** : donc en générateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la maîtrise de stockage étant statique ou dynamique [20].

2.4.6. Selon le circuit des fluides

Selon le sens d'écoulement les échangeurs peuvent être classés en deux classes les échangeurs à simple passe et les échangeurs à multi-passe.

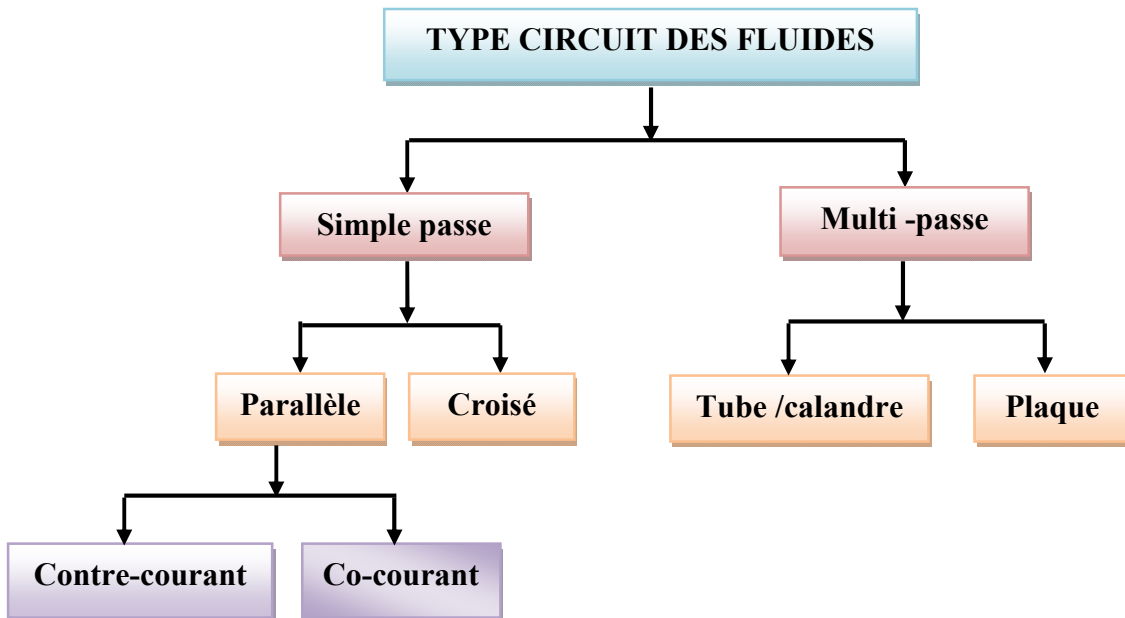


Figure 2.5 : Classification selon le circuit des fluides [19]

Le choix d'un échangeur de chaleur pour une application donnée dépend de nombreux paramètres :

- Les propriétés physiques des fluides.
- Leur agressivité.
- Les températures.
- Les pressions de service.
- Les contraintes d'encombrement et de maintenance.
- les considérations économiques.

2.4.6.1. Les échangeurs thermiques à simple passe

On peut distinguer trois modes d'écoulements :

- ✚ **Écoulements parallèles anti méthodique (Co-courant)** : Les deux fluides s'écoulent dans la même direction [Fig.2.6], il s'agit d'échangeurs dits à Co-courants où la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud [19].

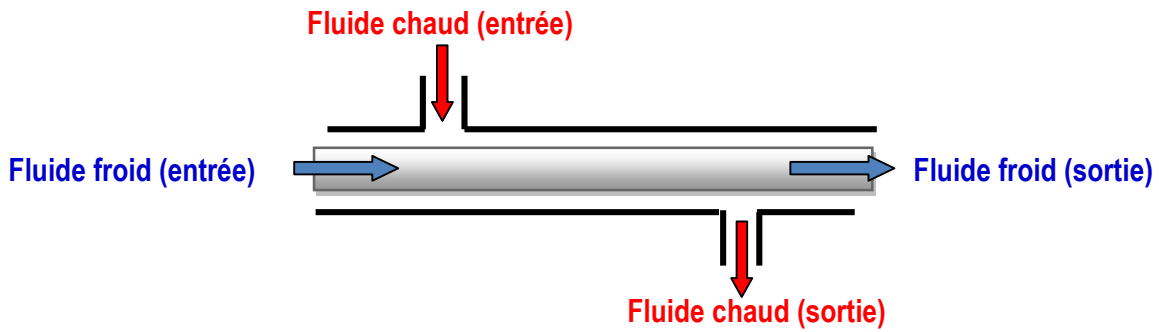


Figure 2.6 : Ecoulement des fluides à co-courant

- ✚ **Écoulements parallèles méthodique (Contre-courant) :** Les deux fluides s'écoulent dans le sens contraire [Fig.2.7], Il s'agit d'échangeurs à contre-courants où la température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud [19].

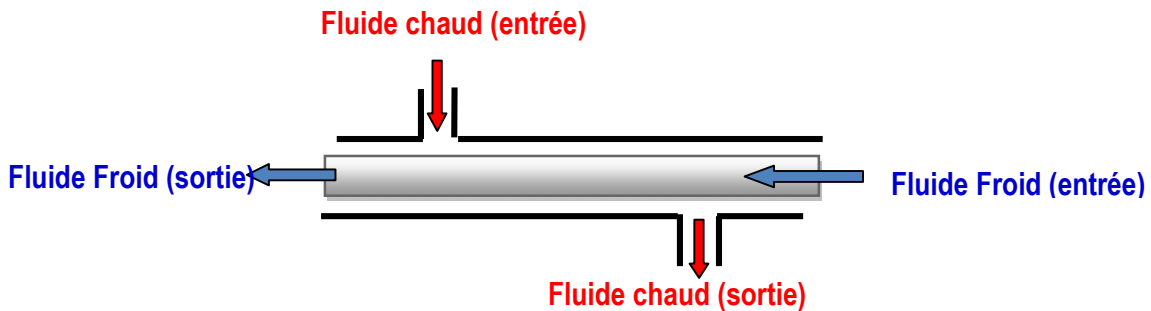


Figure 2.7 : Ecoulement des fluides à contre-courant.

- ✚ **Écoulements croisé des deux fluides avec ou sans brassage :** Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre [Fig.2.8], Le fluide non brassé est canalisé, c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section, l'autre fluide circule librement entre les veines, et peut être considéré comme partiellement brassé, du fait des tourbillons générés par les tubes, le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide [19].

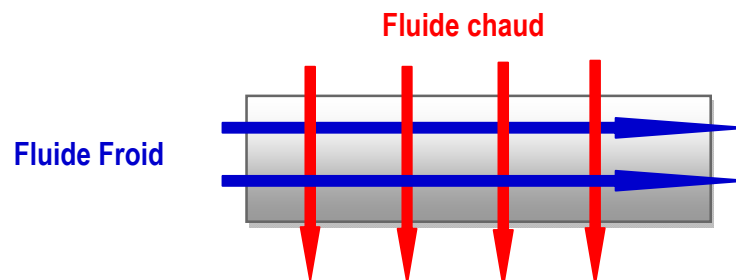


Figure 2.8 : Ecoulement croisé des deux fluides

2.4.6.2. Les échangeurs thermiques à Multi-passe

L'un des majeurs avantages du multi passe est l'augmentation de l'efficacité de l'échangeur, on peut distinguer deux types :

- ✚ **Écoulement tube/calandre** : A l'intérieur des tubes le premier fluide peut circuler en plusieurs passes, et le deuxième fluide du côté de la calandre peut circuler à multi-passe du fait de la présence des chicanes.

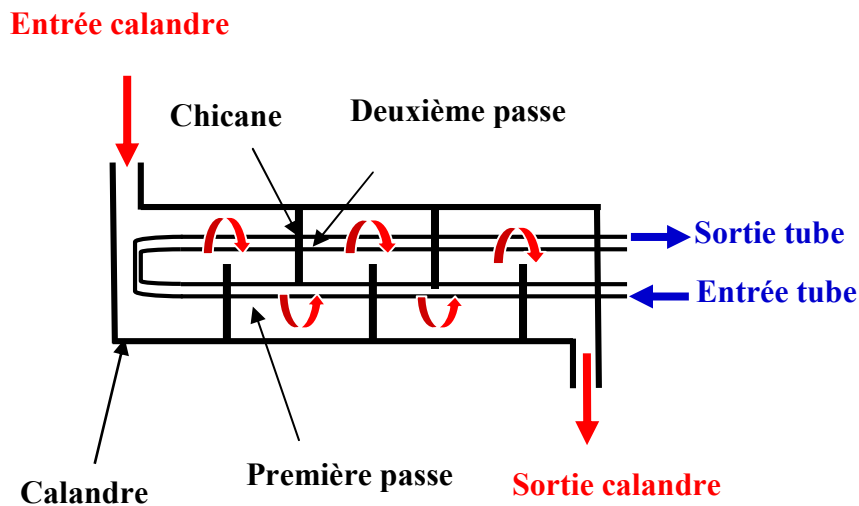


Figure 2.9 : Écoulement Multi-passe (tube/calandre).

- ✚ **Écoulement à plaque** : Les échangeurs à plaques sont composés de plusieurs plaques, elles sont conçues en aluminium, en acier inoxydable ou en matériaux synthétiques, entre chaque plaque, des canaux permettent la circulation parallèle de deux fluides, l'un chaud qui est refroidi et l'autre froid qui est réchauffé.

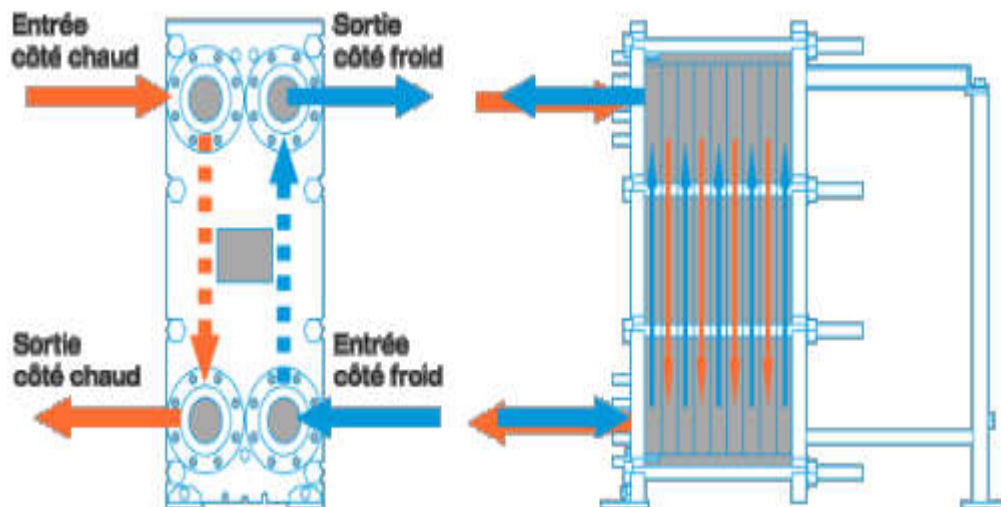


Figure 2.10: Écoulement Multi-passe à plaque. [21]

2.5. TECHNOLOGIES DES ECHANGEURS THERMIQUES

Les différentes technologies et les applications des échangeurs les plus utilisés sont :

2.5.1. Echangeurs tubulaires

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus, on peut distinguer trois catégories en fonction du nombre de tubes et de leur arrangement, qui autorisent une surface d'échange croissante entre les deux fluides [20].

- ✚ **Echangeur monotube** : Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et généralement la forme d'un serpentín ou d'un drapeau.
- ✚ **Echangeur coaxial** : Dans lequel les deux tubes sont concentriques, et l'échangeur est souvent cintré pour limiter son encombrement, en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.
- ✚ **Echangeur multitubulaire** : Existents sous plusieurs formes :
 - Echangeur a tube séparé.
 - Echangeur a tube rapproché.
 - Echangeur a tube et calandre.

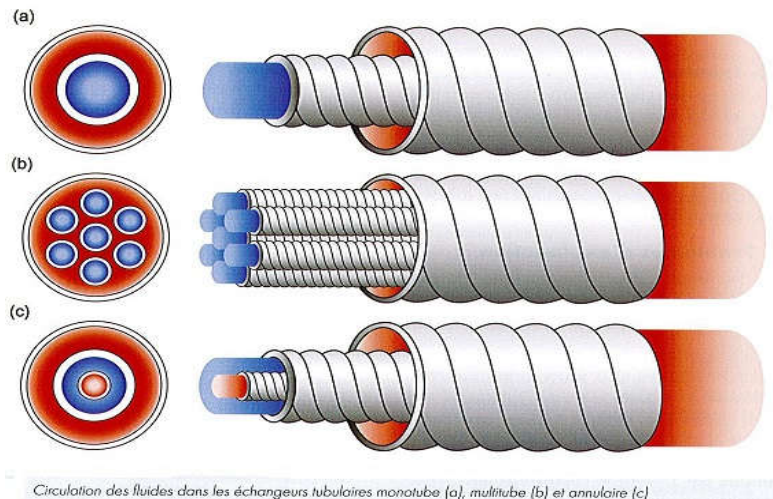


Figure 2.11 : Circulation des fluides dans les échangeurs tubulaires : (a) monotube, (b) multitube et (c) coaxial. [22].

2.5.2. Echangeurs à plaque

L'échangeur de chaleur à plaque est constitué de plaques, de tubes ou de gaufrages, de faible épaisseur en aluminium ou matière plastique qui séparent les veines d'air, le matériau utilisé pour la fabrication des plaques, ce peut être de l'aluminium, de l'acier inoxydable ou un matériau synthétique.

Les plaques sont assemblées, et les courants sont généralement croisés, afin de maximiser l'échange convectif, les plaques peuvent être gaufrées et créer de la sorte une turbulence.

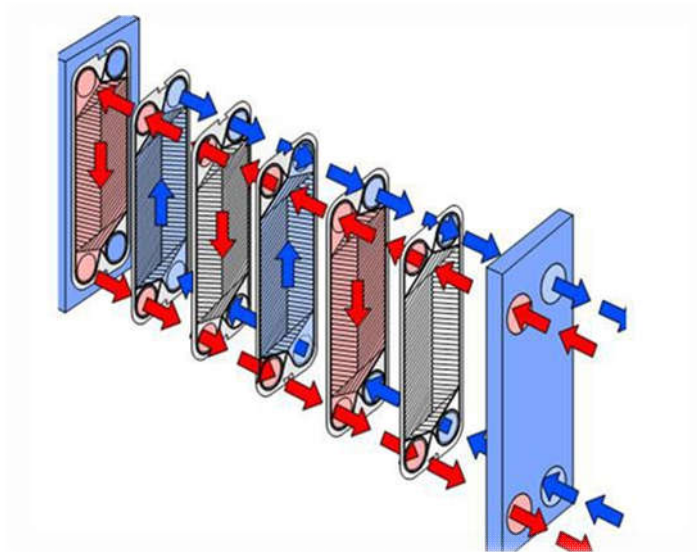


Figure 2.12 : Circulation des fluides dans les échangeurs à plaque. [22]

Après toutes connaissances et la classification des échangeurs thermiques, on prendre le type le plus intéressant (**réchauffeur**), il s'agira plus précisément de connaître ce que c'est qu'un **réchauffeur du gaz naturel**.

2.6. ECHANGEUR THERMIQUE TYPE RECHAUFFEUR

Les réchauffeurs possèdent une grande variété d'applications efficaces dans la production, le traitement et la distribution du pétrole et du gaz, parmi les applications les plus courantes, on peut citer :

- **Réchauffage de point de rosée du gaz** : réchauffage du gaz naturel à haute pression en amont des stations de régulation de pression pour prévenir les phénomènes de condensation dus à l'effet Joule-Thomson.
- **Réchauffage du gaz naturel haute pression** : en amont de la régulation de la pression afin d'empêcher la formation du givre externe.
- **Surchauffage du gaz combustible en amont des turbines à gaz** (performance haters).
- **Réchauffage en aval du stockage à basse température.**
- **Prévention des hydrates.**
- **Réduction de la viscosité** : réchauffage du pétrole brut en amont des traitements pour faciliter le dégazage et la vidange [23].

2.6.1. Réchauffeur du gaz

Le réchauffeur de gaz naturel est un échangeur thermique qui a pour but de réchauffer le gaz naturel avant la réduction de sa pression

Dans le cas de la détente unique (70/4bar), il y a une génération du froid (détente Joules-Thomson), pouvant favoriser la formation de condensats ou d'hydrates et par là même entraînant des problèmes au niveau des appareillages du poste détente, Pour éviter d'éventuels problèmes de fonctionnement du poste il y a nécessité absolue de procéder au réchauffage du gaz avant la détente.

Le réchauffage du gaz a pour objectif de maintenir la température du gaz au-dessus d'un certain seuil afin de permettre le bon fonctionnement de l'appareillage (régulateur, clapet, compteur) et d'éviter la formation d'hydrates ou de condensât [24].



Figure 2.13 : Réchauffeur raccordé avec poste détente [25].

2.6.2. Différents types de réchauffeur

Il existe deux types de réchauffeur utilisé dans l'industrie :

- Réchauffeurs direct
- Réchauffeurs indirect (bain d'eau)

2.6.2.1. Réchauffeur direct

Les réchauffeurs directs, forment une enceinte au sein de laquelle de l'énergie sous une forme non thermique, est convertie en chaleur (on y brûle du fuel gaz), et plus particulièrement au sein de laquelle la chaleur est générée par combustion d'un combustible approprié.

Les réchauffeurs de processus directs, fournissent de l'énergie calorifique directement au procédé industriel, sans utiliser de vapeur ni d'échangeur de chaleur.

Ce sont les appareils dont le tube de flamme est immergé dans le produit, ce sont les plus simples et les moins chers [10].

2.6.2.2. Réchauffeur indirect (bain d'eau)

Le réchauffeur est dit « indirect » car, la chaleur transférée au gaz est transmise par l'eau environnante, le tube foyer est installé à l'intérieur du serpentin d'écoulement, et le tube foyer et le serpentin sont tous deux immergés dans l'eau, dont est rempli le foyer [10].

Les réchauffeurs indirects. Sont constitués des éléments suivants :

- Bac à bain d'eau pour le transfert de la chaleur au gaz naturel
- Tube à flammes et à fumées, où la chaleur produite par la réaction de combustion est transmise à l'eau
- Serpentins à gaz, où le gaz naturel est chauffé par l'eau chaude
- Cheminée avec extincteur de flamme pour l'évacuation du gaz de combustion dans l'atmosphère
- Réservoir d'expansion pour permettre l'expansion de l'eau
- Instruments et les dispositifs de contrôle.

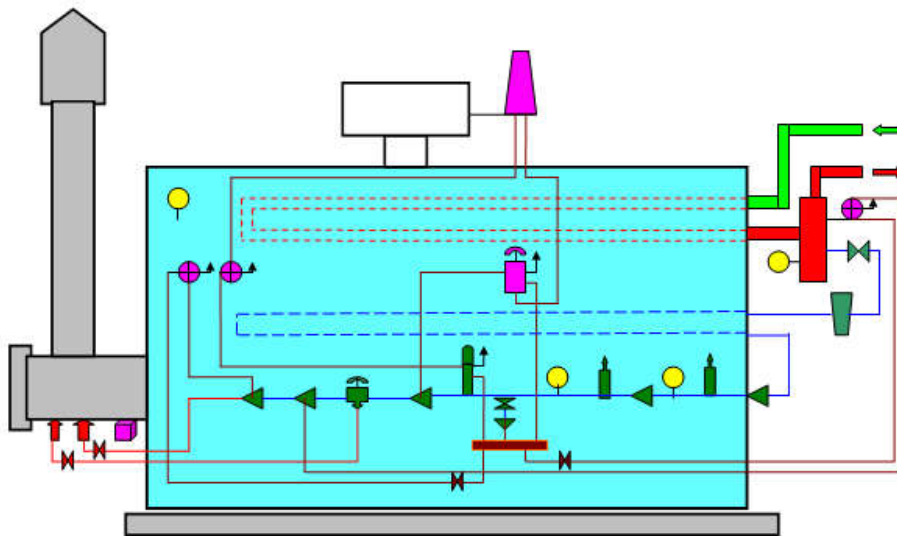


Figure 2.14 : Réchauffeur du gaz [26]

2.6.2.3. Principe de fonctionnement

Ce réchauffeur est constitué, d'un serpentin immergé dans un bain d'eau liquide sous la pression atmosphérique, dans ce serpentin circule le fluide à réchauffer (le gaz naturel) avant la détente, le gaz doit avoir une température sortie réchauffeur supérieure à celle de la formation des hydrates à l'intérieur des conduites, et supérieure à celle conduisant au givrage à l'extérieur des conduites et appareillages du poste de détente.

Le tube à feu est également immergé dans le bain d'eau et alimenté par un piquage de gaz entre 1 et 0.8 bar pour subir une combustion et fournir la chaleur nécessaire au chauffage [26].

Le réchauffage du gaz se fait par un transfert de chaleur thermique passant par plusieurs compartiments et qui sont :

- Rayonnement entre les gaz brulés et l'intérieur du tube à feu.
- Conduction dans l'épaisseur de tube à feu.
- Convection entre le tube à feu et bain d'eau.
- Convection entre l'eau et les tubes du faisceau tubulaire.

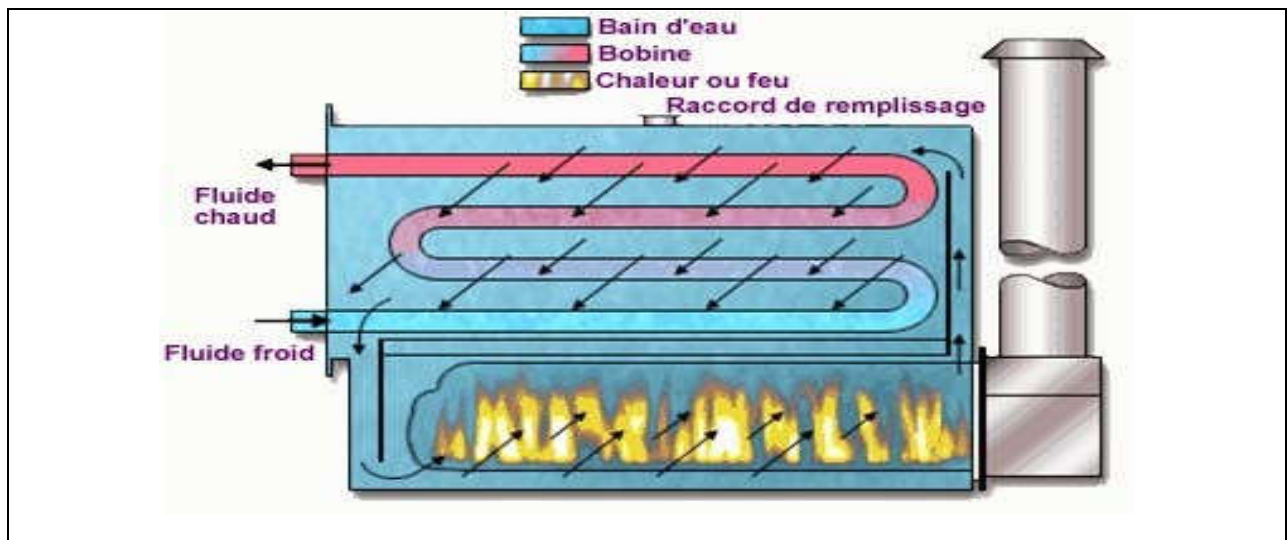


Figure 2.15 : Fonctionnement le Réchauffeur du gaz [10].

Chaque équipement industriel (échangeur tube/calandre) en trouve une plaque d'identification, à partir de cette plaque en peut déduire ses caractéristiques tel que :

- Le constructeur et désignation de l'équipement.
- La nature de fluide coté tube et coté calandre.
- La température de fonctionnement.
- La pression de fonctionnement des fluides.
- La pression d'preuve hydrostatique.
- la capacité de chaque fluide (coté tube/calandre).etc....

2.6.2.4. Entretien et Maintenance

Le réchauffeur doit fonctionner automatiquement, sans surveillance permanente en tenant la température du gaz à l'aval de la détente $\geq 10^{\circ}\text{C}$, il est muni d'un système de sécurité intégral, qui empêche que :

- La température du bain d'eau dépasse une certaine valeur ;
- Le niveau du bain d'eau ne s'abaisse en dessous d'une certaine hauteur ;
- La flamme du pilote ne s'éteigne :
- La température du gaz ne dépasse les 50°C.

L'efficacité de fonctionnement, et la durée de vie des réchauffeurs, dépend du soin qui leur est apporté lors de leur fonctionnement, et leur maintenance, quelques points majeurs sont abordés:

✚ **Inspection et nettoyage :** Les tubes foyer, doivent être inspectés à intervalles réguliers pour éviter l'accumulation de tartre, de rouille et de produit corrosif. Les conditions dans lesquelles le réchauffeur fonctionne sont un facteur déterminant, pour la fréquence des inspections, quand des dépôts de ce genre sont remarqués, les tubes foyer doivent être retirés et nettoyés ou remplacés, selon son état [10].

✚ **Contrôle de la corrosion :** La corrosion des réchauffeurs indirects, provient de l'action de l'eau, et de l'oxygène sur les tubes à gaz et tubes foyer, et entraîne la rouille et le piquage du métal, afin de réduire cette attaque, les réchauffeurs sont remplis de condensat de vapeur traité dans l'usine pour en retirer l'oxygène.

✚ **Contrôle de la température :** Le flux de gaz de carneau du réchauffeur, est contrôlé par un thermostat. Afin de maintenir une température définie du gaz sortant du serpentin. Les thermostats sont un élément important de tout réchauffeur, s'ils ne fonctionnent pas correctement, le brûleur restera généralement éteint ou allumé en permanence, ce qui dans les deux cas n'est pas souhaitable. En général, la réparation sur le terrain des régulateurs de température n'est pas conseillée, mais certains types peuvent être réparés dans les conditions du terrain [10].

Lors de l'allumage d'un réchauffeur du gaz, différentes procédures sont utilisées, les étapes suivantes sont considérées comme importante :

- Couper l'alimentation de gaz et laisser quelque minute au réchauffeur pour vider entièrement le gaz du tube.
- Vérifiez que le niveau de fluide est au-dessus des niveaux du tube foyer et du thermostat.
- Allumer un chiffon trempé d'huile, placez-vous sur un côté au vent et tenez-vous près du pilote.
- Assurez-vous que le brûleur pilote s'allume.
- Régler le thermostat à la température désirée.
- Activer l'alimentation en gaz du brûleur.

Un allumage incorrect peut occasionner des blessures au personnel, des dommages pour l'équipement, ou causer d'autres pertes augmentant le coût de l'opération [10].

2.7. CONCLUSION

Le retour d'expérience industriel sur les échangeurs a permis de faire évoluer la conception et les règles d'exploitation de ces appareils pour améliorer leurs performances et leur durée de vie en conditions réelles de service.

Une présentation détaillée a été réalisée, sur les échangeurs de chaleur en particulier l'échangeur tubulaire à calandre, pour réchauffement du gaz, a pour but de maintenir la température du gaz au-dessus de la température de formation des hydrates.



Chapitre 3 :

Modélisation

***mathématique et la
résolution numérique***

3.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la mise en équations du problème considéré en utilisant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie. Ces dernières expriment les principes fondamentaux de la physique. Ces équations de conservation associées aux lois constitutives contiennent l'ensemble des connaissances nécessaires pour reproduire intégralement le phénomène observé par la voie de la résolution ou de la simulation. Ces équations sont établies sur la base d'hypothèses et de postulats souvent anciens.

On commence par une description et présentation de la problématique de notre thème puis on passe à l'écriture des équations gouvernantes ainsi que les conditions aux limites et en termine par les différentes méthodes numériques, les types de maillage. Ainsi que la discrétisation de l'équation du transport.

3.2. DESCRIPTION ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE

Les réchauffeurs à chauffage indirect sont généralement utilisés pour élever la température de fluides tels que le gaz naturel. Sans réchauffeurs, le gaz peut geler (à cause de l'effet Joule-Thomson) lors de son passage dans l'installation de détente, endommager les vannes et l'instrumentation, voire provoquer une interruption de l'alimentation en gaz. À l'heure actuelle, le réchauffeur indirect est largement utilisé dans l'industrie du gaz pour chauffer le gaz naturel. Sa grande taille, le besoin de repositionnement de l'eau, son faible rendement thermique et les importantes pertes de chaleur par les gaz de combustion (échappement) sont les principaux problèmes de fonctionnement de l'équipement traditionnel. Le réchauffeur indirect est constitué des éléments suivants :

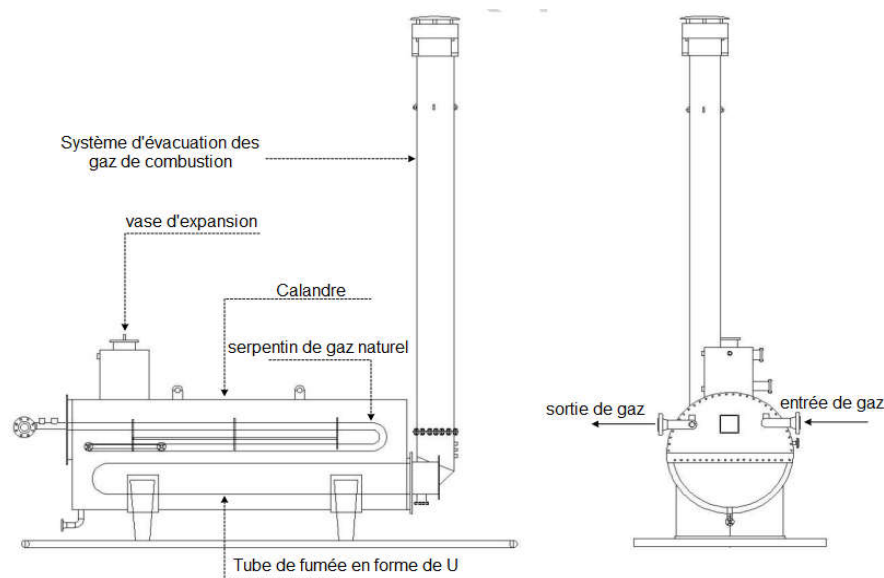
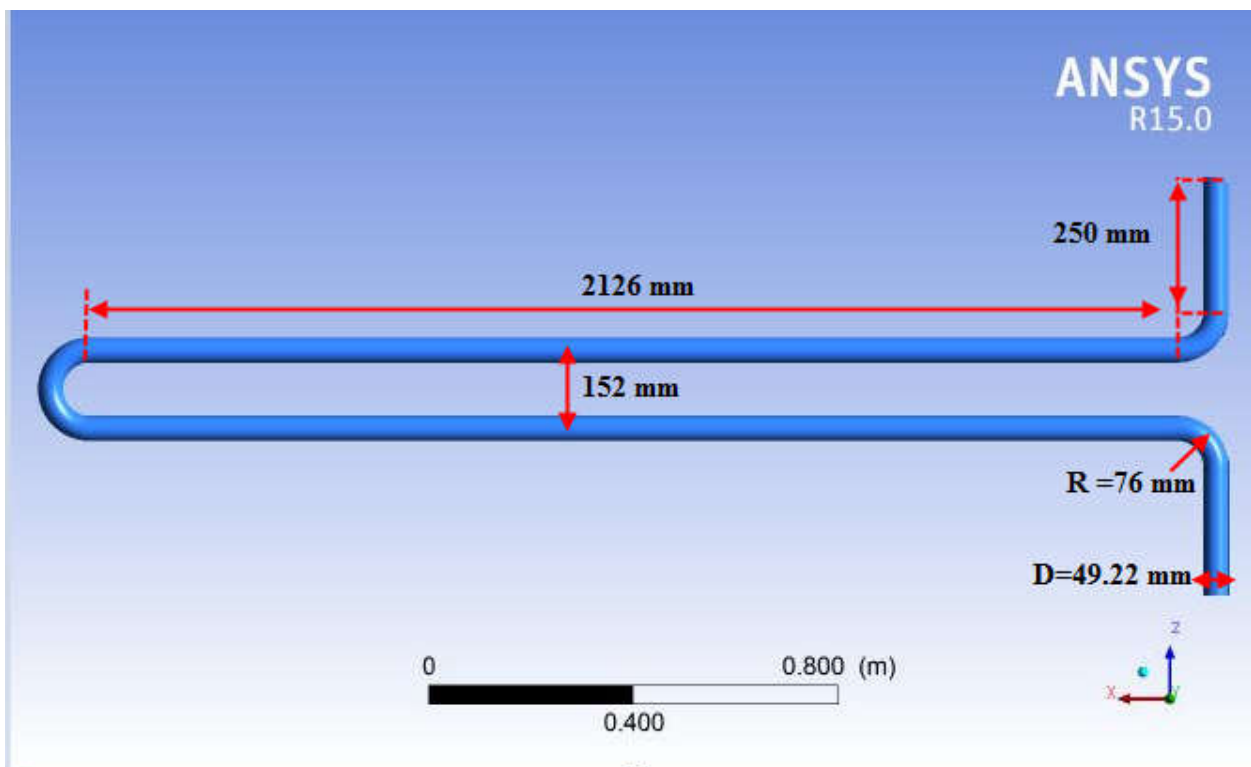
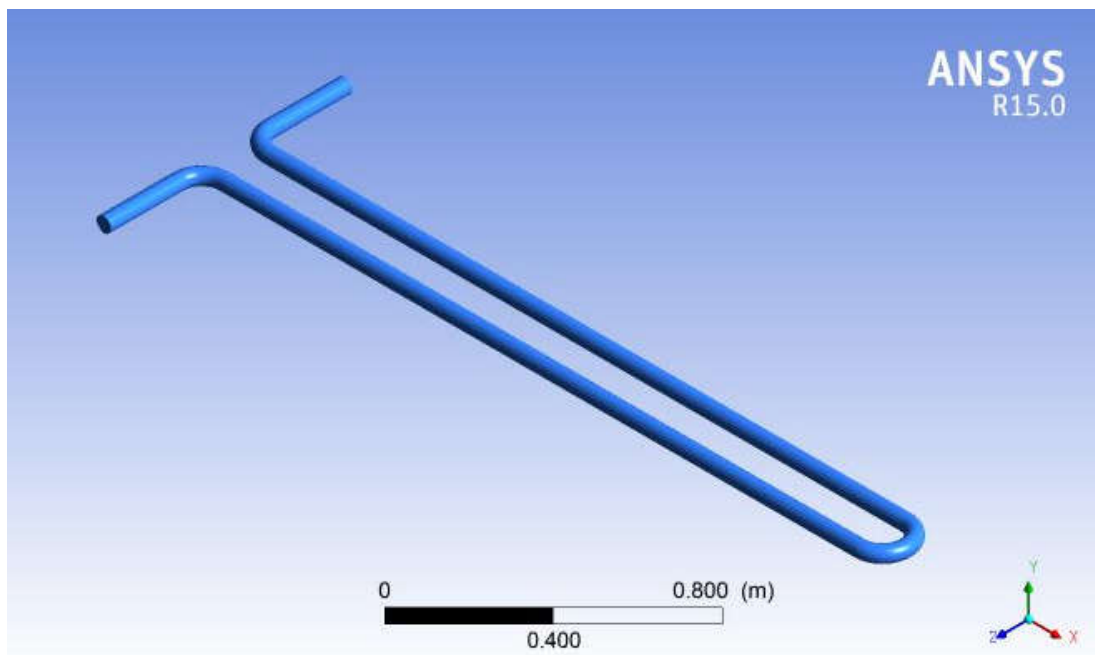


Figure 3.1 : Schéma d'un réchauffeur de gaz

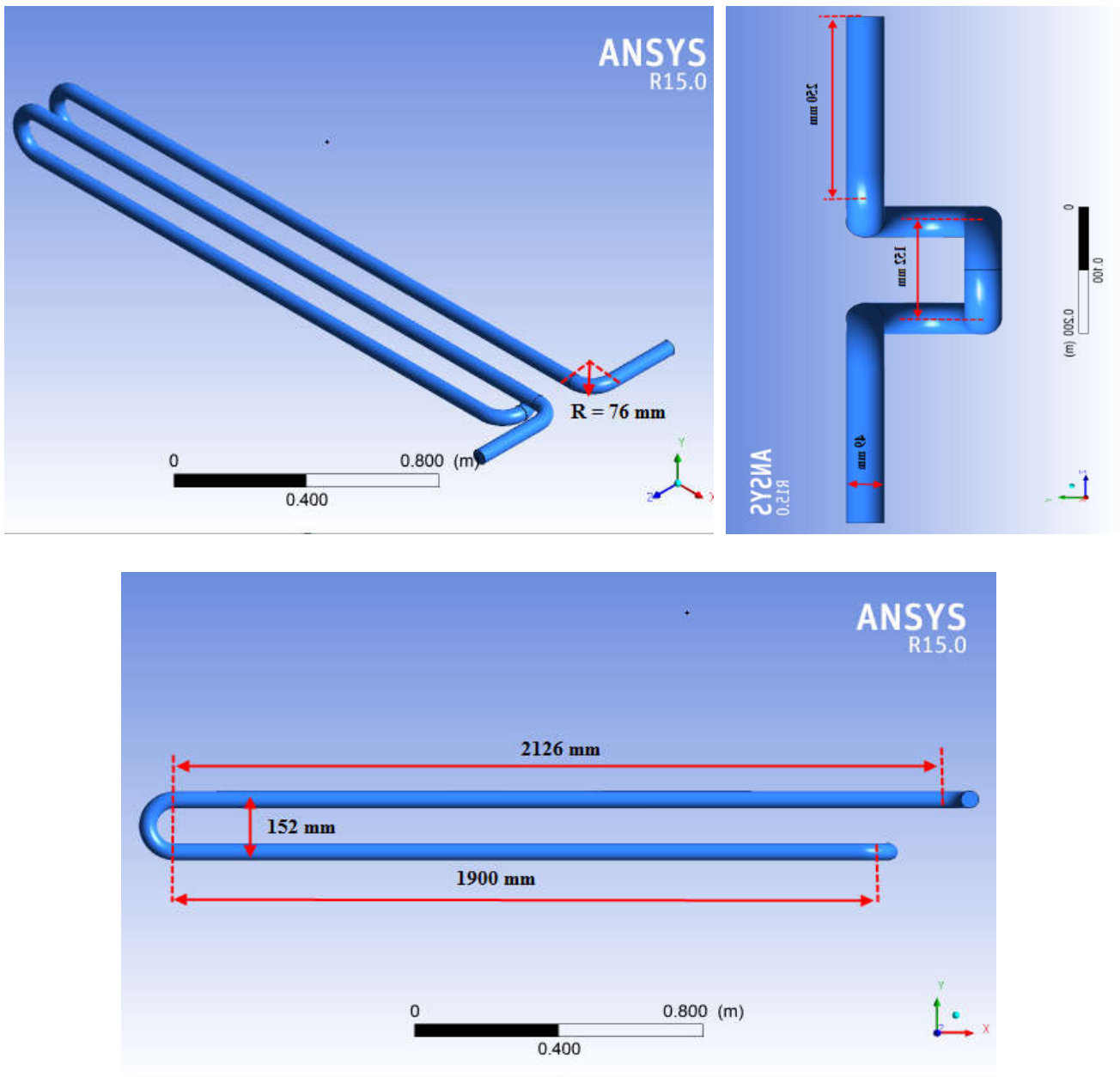
Le serpentin de gaz naturel, qui est la pièce principale considérée, comporte :

- **Configuration 2 passes** : deux rangées de tubes du diamètre de 49,22 mm, un seul coude à 180° et deux coudes à 90° de section circulaire.
- **Configuration 4 passes** : quatre rangées de tubes du diamètre de 49,22 mm, trois coudes à 180° et deux coudes à 90° de section circulaire.

Les configurations et les dimensions du serpentin à gaz sont présentées sur la **Figure 3.2**.



(a)



(b)

Figure 3.2 : Détails du serpentin à gaz : (a) configuration 2 passes et (b) configuration 4 passes

3.3. LES EQUATIONS GOUVERNANTES

La formulation mathématique des phénomènes de convection repose sur les équations liant les différents paramètres à savoir : la vitesse, la pression et la température. Ces équations sont obtenues à partir de :

- La loi de conservation de masse (équation de continuité).
- La loi de conservation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes).
- La loi de conservation d'énergie (équation d'énergie).

3.3.1. Ecoulement laminaire

3.3.1.1. Equation de continuité

Elle exprime le principe de conservation de la masse (j : indice de somme, = 1~3).

$$\frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.1)$$

3.3.1.2. Equations de transport de quantité de mouvement:

Cette équation découle de l'application de la 2^{ème} loi de Newton à un volume de contrôle élémentaire de fluide. Elle permet d'établir des relations entre les caractéristiques du fluide, celles de ses mouvements et les causes qui les produisent.

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + \rho V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.2)$$

Avec :

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} : \text{Variation locale.} \quad \rho V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} : \text{Terme convectif} \quad \frac{\partial P}{\partial x_i} : \text{Forces de pression}$$

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} : \text{Forces visqueux} \quad \rho g_i : \text{Effet de gravité}$$

3.3.1.3. Équation de l'énergie:

Cette équation est du premier principe de la thermodynamique

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (V_j T)}{\partial x_j} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3.3)$$

3.3.2. Ecoulement turbulent

Les équations régissant l'écoulement turbulent sont les même de celui de l'écoulement laminaire avec l'ajout de ce qu'on appelle la décomposition de Reynolds, cette décomposition consiste à considérer toute grandeur vectorielle ou scalaire comme la somme d'un terme moyen et un terme fluctuant.

$$f = \bar{f} + f' \quad (3.4)$$

f : est la partie instantanée, \bar{f} la partie moyenne et f' la partie fluctuante.

On obtient, donc, pour les composantes de la vitesse, la pression et la température.

$$\begin{cases} V = \bar{V} + V' \\ P = \bar{P} + P' \\ T = \bar{T} + T' \end{cases} \quad (3.5)$$

Il est à noter que

$$\begin{cases} V' = 0 \\ P' = 0 \\ T' = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

3.3.2.1. Équation de continuité

En introduisant la décomposition de Reynolds dans l'équation de continuité (3.1), on obtient :

Équation du champ moyen

$$\frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.7)$$

3.3.2.2. Équation de Reynolds

En introduisant la décomposition de Reynolds dans l'équation de continuité et on fait la moyenne, on obtient

$$\frac{\partial \bar{V}_j \bar{V}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{V}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{-v'_i v'_j}) + \rho g_i \quad (3.8)$$

C'est l'équation de Reynolds. Elle ne diffère de l'équation de Navier-Stokes que par le terme $R_{ij} = \overline{-v'_i v'_j}$, regroupé dans le membre droit avec les contraintes. D'où leurs noms de contraintes de Reynolds.

3.3.2.3. Équation d'énergie

On prend l'équation et on applique la décomposition de Reynolds et on fait la moyenne

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial \bar{T}'}{\partial t}}_{=0} + \frac{\partial (\bar{V}_j \bar{T})}{\partial x_j} + \underbrace{\frac{\partial (V'_j \bar{T})}{\partial x_j}}_{=0} + \underbrace{\frac{\partial (\bar{V}_j T')}{\partial x_j}}_{=0} + \frac{\partial (V'_j T')}{\partial x_j} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \underbrace{\frac{\partial^2 T'}{\partial x_j^2}}_{=0} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{V}_j \bar{T}) = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{-v'_j t'}) \quad (3.10)$$

3.4. LES MODELES DE TURBULENCE

Il existe plusieurs modèles de turbulence dans le logiciel FLUENT se distinguant par leur degré de complexité, c'est-à-dire par le nombre d'équations de transport supplémentaires introduites pour les quantités turbulentes pour fermer le problème.

Le modèle utilisé dans notre travail est le modèle k-ε standard à deux équations. Le modèle de turbulence k-ε, proposé par Launder et Sharma (1974), utilise l'hypothèse de viscosité turbulente afin d'obtenir une longueur turbulente par la résolution d'équations différentielles partielle de second ordre de l'énergie cinétique turbulente k et de la dissipation ε. Ce modèle de turbulence le modèle k-ε est le plus connu et le plus largement utilisé qui se base sur le concept Boussinesq qui relie les contraintes de Reynolds aux contraintes visqueuses:

$$-\overline{v_i'v_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3.11)$$

Pour le flux de chaleur

$$-\overline{v_j't'} = \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \quad (3.12)$$

Où la viscosité turbulente est caractérisée par

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

k et ε sont obtenus à partir de l'équation de transport

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{V}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{V}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.15)$$

Avec

P_k Est production de k

$$P_k = -\overline{v_j'v_i'} \frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} \quad (3.16)$$

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$ Sont des constants déterminés expérimentalement, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_t$ sont des nombres de Prandtl de l'énergie cinétique turbulente et de taux de dissipation et à la température respectivement.

Le tableau suivant donne les valeurs implantées dans le code FLUENT .

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε	σ_t
1.44	1.92	0.09	1	1.2	0.85

Tableau 3.1 : Les constantes utilisées par le code Fluent.

3.5. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Afin de simplifier l'étude du problème, on considère les approximations suivantes :

- ✚ La géométrie est tridimensionnelle (3D)
- ✚ L'écoulement de fluide compressible, Turbulent et stationnaire.
- ✚ Il n'y a ni source de chaleur ou de masse ni réaction chimique dans la calandre.
- ✚ Les propriétés physiques du fluide sont constantes.

3.6. CONDITIONS AUX LIMITES

Sur la base des données recueillies auprès du poste de détente du gaz DP3 de renforcement de la ville de Tiaret (situé dans ABDIA –Tiaret), le gaz naturel entre dans le serpentin de gaz à une température minimale d'environ 258 K, qui est généralement égale à la température du sol car les lignes de transmission sont enfouies sous terre et la température du bain d'eau 353K. La pression d'entrée du gaz naturel est d'environ 60 bars et du débit volumique du réchauffeur 20000 Nm³/h. Dans ces conditions, la température de sortie du gaz naturel doit être comprise entre 300,15 et 315,15 K.

Le gaz naturel simulé avec les propriétés thermo-physiques sont [27] :

T (°C)	ρ (Kg/m ³)	Cp (J/Kg.K)	μ (Kg/m.s)	λ (W/m. K)	Z
-15	82.72	3247	1,275 10 ⁻⁵	0,03659	0,7124

Tableau 3.2 : Les propriétés thermo-physiques du gaz

Le facteur de compressibilité pour la température de référence ($T_0 = 15^\circ\text{C} \rightarrow Z_0 = 0.97$)

$$Q_V = Q_{V(\text{réchauffeur})} \left(\frac{Z_1}{Z_0} \right) \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \left(\frac{T_{\text{gaz-entrée}}}{T_0} \right) \quad (3.17)$$

$$\dot{m} = \rho_{\text{gaz}} \cdot Q_V \quad (3.18)$$

3.7. METHODE NUMERIQUE

Les écoulements de fluides en régimes laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équations aux dérivées partielles. Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, qu'il convient de résoudre pour connaître les caractéristiques du champ thermique et du champ d'écoulement. Malheureusement, il est pratiquement impossible de trouver une solution analytique et exacte a de tel système du fait que les équations citées précédemment soient très complexes, c'est à dire non - linéaires d'une part et couplées d'une autre part comme dans le cas de la convection mixte. Dans ce cas, le recours à la résolution numérique s'impose et nous incite à choisir la méthode numérique adéquate pour obtenir les meilleures approximations.

3.7.1. Choix de la méthode numérique

Pour obtenir une solution numérique du problème étudié, on doit transformer les équations différentielles du modèle mathématique au moyen d'un processus de discrétisation en un format facile pour le processus numérique. Ce format n'est autre que le système d'équations algébriques obtenu après la discrétisation. Parmi les techniques et/ou les méthodes de discrétisation les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulements et de transferts thermiques, on peut citer

- la méthode des différences finies ;
- la méthode des volumes finis ;
- la méthode des éléments finis.

Pour notre présente étude, nous avons choisi la méthode des volumes finis, car elle présente des avantages considérables du fait qu'elle soit simple, qu'elle garantisse la conservation de masse et de quantité de mouvement dans chaque volume de contrôle et dans tout le domaine de calcul et qu'elle soit applicable pour les géométries complexes. Elle est aussi avantageuse, parce qu'elle facilite la linéarisation des termes sources s'ils ne le sont pas et permet un traitement plus facile des milieux hétérogènes [28].

Le principe de la méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations de transport sur un ensemble discret de volumes finis jointifs, appelés volumes de contrôle, couvrant le domaine physique. Le résultat de la discrétisation en un point est une équation algébrique liant la valeur d'une variable aux valeurs des variables des points voisins.

3.7.2. Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une Analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions

particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

3.7.2.1. Maillage structure (QUADRA/HEXA)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc.

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent. • Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe • Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes

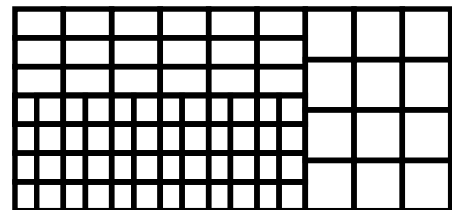
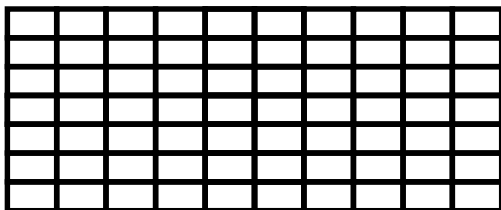


Figure 3.3 : Maillage structuré

3.7.2.2. Maillage non structure (TRI/TETRA.)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments • Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré • Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré

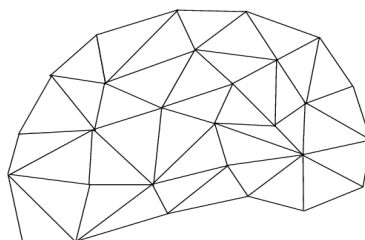


Figure 3.4 : Maillage non structuré

3.7.2.3. Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Les avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non Structuré.

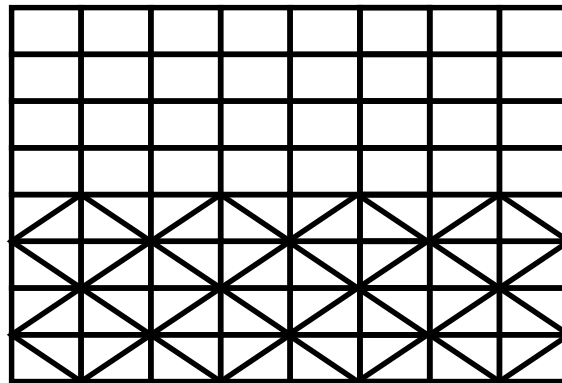


Figure 3.5 : Maillage hybride.

Chaque point du domaine physique stockant une grandeur scalaire ou vectorielle vérifie les équations différentielles du modèle mathématique, gouvernant notre phénomène physique. Pour projeter ces équations sur ce domaine, on subdivise ce dernier en un certain nombre de volumes finis, localisés à l'aide d'indices i et j , et en chaque milieu de chaque volume on considère les points P , appelés **centres** des volumes de contrôle. E , W , N et S sont les centres des volumes de contrôle adjacents, situés respectivement à l'est, à l'ouest, au nord et au sud du centre P [Fig.3.6].

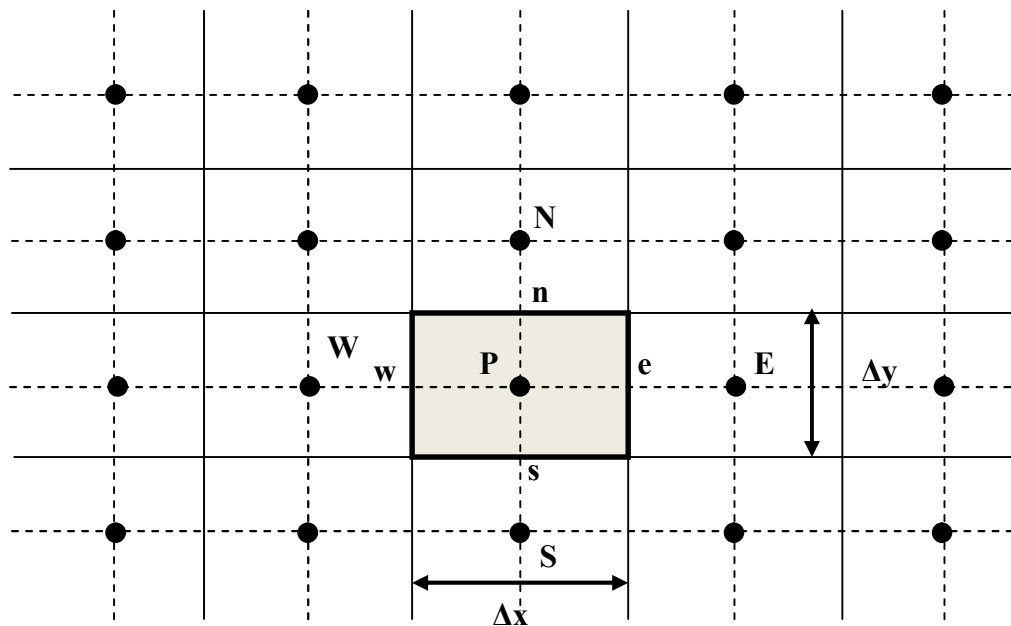


Figure 3.6 : Volume de control typique bidimensionnel

Les faces d'un volume de contrôle typique sont localisées aux points e, w, n et s. Chaque volume de contrôle a une dimension $(\Delta x, \Delta y)$. Au centre de chaque volume de contrôle sont stockées les variables scalaires (p et θ), par contre pour les quantités vectorielles (les vitesses U et V), elles sont localisées sur les faces du volume de contrôle (*Figures 3.7 et 3.8*).

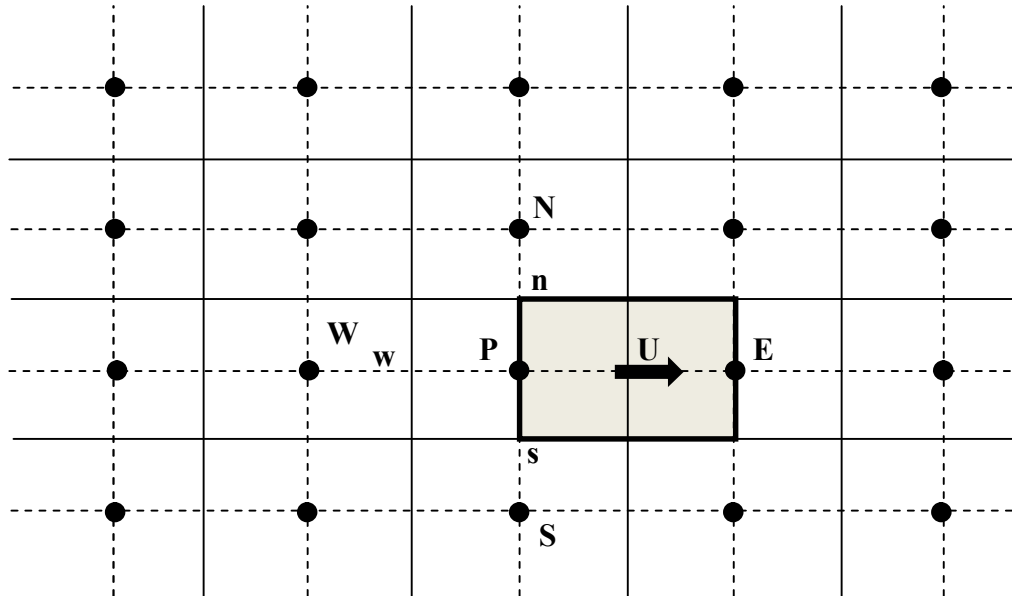


Figure 3.7 : Volume de contrôle décalé vers la droite

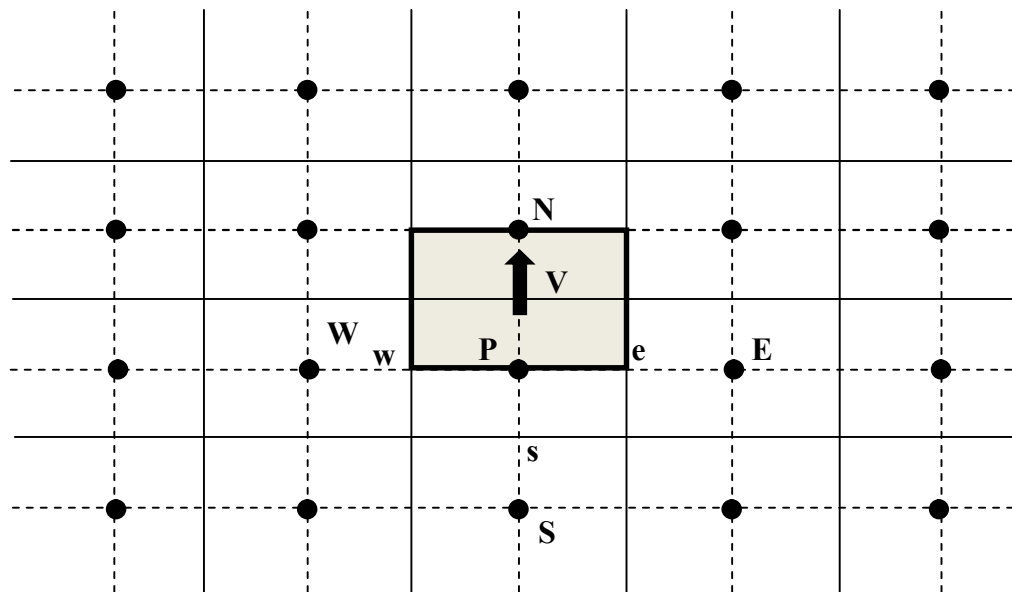


Figure 3.8 : Volume de contrôle décalé vers le haut

3.8. EQUATION GENERALE DE TRANSPORT

L'équation générale de transport d'une variable ϕ pour un écoulement bidimensionnel et incompressible, s'écrit dans le système cartésien comme suit :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (V_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi \quad (3.19)$$

(j : indice de sommation ; j=1, 2 dans le cas bidimensionnel). Avec :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} : \text{ Terme transitoire}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (V_j \Phi) \text{ Terme convectif}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) : \text{ Terme diffusif}$$

s_ϕ : Terme source.

En intégrant l'équation générale de transport sur un volume de contrefilet typique [Fig.3.6], on obtient l'équation de discrétisation de la variable / dans un domaine cartésien bidimensionnel :

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^s \int_{s_e}^e \frac{\partial \phi}{\partial \tau} dx dy d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^s \int_{s_e}^e \frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^s \int_{s_e}^e \frac{\partial J_y}{\partial y} dx dy d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^s \int_{s_e}^e S_\phi dx dy d\tau \quad (3.20)$$

En posant par

$$J_x = U\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.21)$$

Et

$$J_y = V\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3.22)$$

Le résultat de l'intégration de l'équation (3.20) divisé par $\Delta\tau$ donne :

$$\frac{\phi_p^{n+1} - \phi_p^n}{\Delta\tau} \Delta x \Delta y + J_e^{n+1} - J_w^{n+1} + J_n^{n+1} - J_s^{n+1} = \overline{S_\phi} \Delta x \Delta y \quad (3.23)$$

Ou : n et $n+1$ correspondant aux incréments du temps τ et $\tau+\Delta\tau$ respectivement.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_e = U_e \phi_e \Delta y - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e \Delta y \\ J_w = U_w \phi_w \Delta y - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w \Delta y \\ J_n = V_n \phi_n \Delta x - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_n \Delta x \\ J_s = V_s \phi_s \Delta x - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s \Delta x \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Les quantités J_e, J_w, J_n et J_s sont les flux aux interfaces (e,w,n,s). Le terme S est supposé être constant dans le volume de contrefilet. S est évalué au centre du volume de contrôle.



Chapitre 4 :

Résultats et discussions

4.1. INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus par la simulation numérique en utilisant le logiciel Fluent (Ansys R15.0) relatifs en régime turbulent dans configurations étudiées: des serpentins avec $N = 2$ passes et $N = 4$ passes.

Nous présentons pour chaque configuration, les contours de pression, de la vitesse et de la température. Ainsi que les profils de vitesses. Nous terminons cette étude par comparaison entre les résultats de simulation avec celle-ci obtenus dans le poste de détente du gaz DP3 de renforcement de la ville du Tiaret.

4.2. EFFET DE MAILLAGE

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à l'écoulement. De sa qualité dépend la précision des résultats.

Pour obtenir des résultats précis dans des délais de calcul acceptables, on effectue une analyse de sensibilité des maillages. Pour deux configurations faites, ont appliqué le maillage structuré: le maillage des zones proches des murs tubulaires est bien raffiné par rapport au maillage intermédiaire. Une étude d'indépendance des mailles est également menée sur les deux configurations en obtenant la température de sortie du fluide. Comme meilleur compromis entre l'exactitude des résultats et le moment des calculs, le nombre des nœuds utilisés sont 423756 pour la configuration $N = 4$ passes et de 269789 pour la configuration $N = 2$ passes

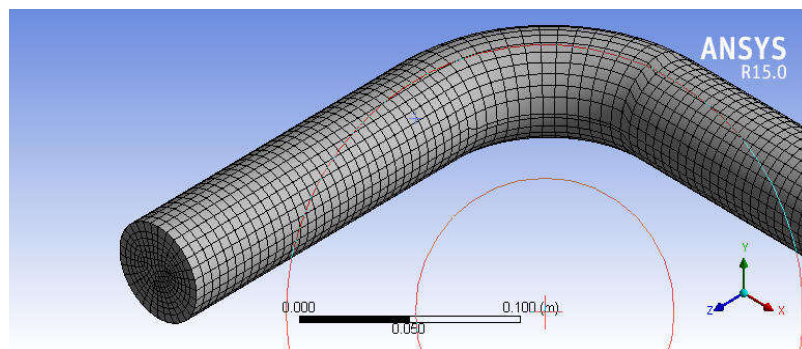


Figure 4.1: Maillage utilisé dans cette simulation

4.3. VALIDATION NUMERIQUE

Pour la validation numérique du code de calcul, nous avons procédé à la comparaison des résultats obtenus dans la présente étude avec les résultats numériques obtenus par Soleimani et al [29].

	Présente étude	Soleimani et al [29]	Erreur [%]
T_{moy}	309.4266	308.3763	0,34

Tableau 4.1 : Comparaison entre les résultats de la présente étude et ceux de Soleimani et al

Le tableau 4.1 présente les valeurs de la température moyenne d'évacuation du gaz déterminé pour un débit volumique $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, la température du gaz d'entrée dans le serpentin 283.75 K , la température de bain d'eau 313.15 K , la pression d'entrée 5447 KPa et la pression de sortie $413,685 \text{ kPa}$. On remarque que la valeur de la température moyenne est presque la même avec l'erreur relative est 0.34% .

4.4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les paramètres physiques intervenant dans le problème considéré sont le débit massique, les conditions géométriques des serpentins (nombre de passes). Dans ce qui suit, les effets du nombre de passe N , sur l'écoulement de fluide et des caractéristiques de transfert de chaleur sont présentés. Les résultats numériques ont été effectués pour le gaz naturel avec une température de 258 K et de pression de 60 bars .

4.4.1. Variation des contours de vitesse

L'influence du nombre de passes de serpentin sur les contours de vitesse est représentée dans la figure 4.2. Pour les mêmes conditions de fonctionnement et lorsque le gaz naturel circule dans les serpentins, sa vitesse joue un rôle très un important. La vitesse du gaz naturel circule dans la configuration $N = 2$ est élève par rapport la configuration $N = 4$, ceci montre que la vitesse diminue avec l'augmentation du nombre de passes de serpentin.

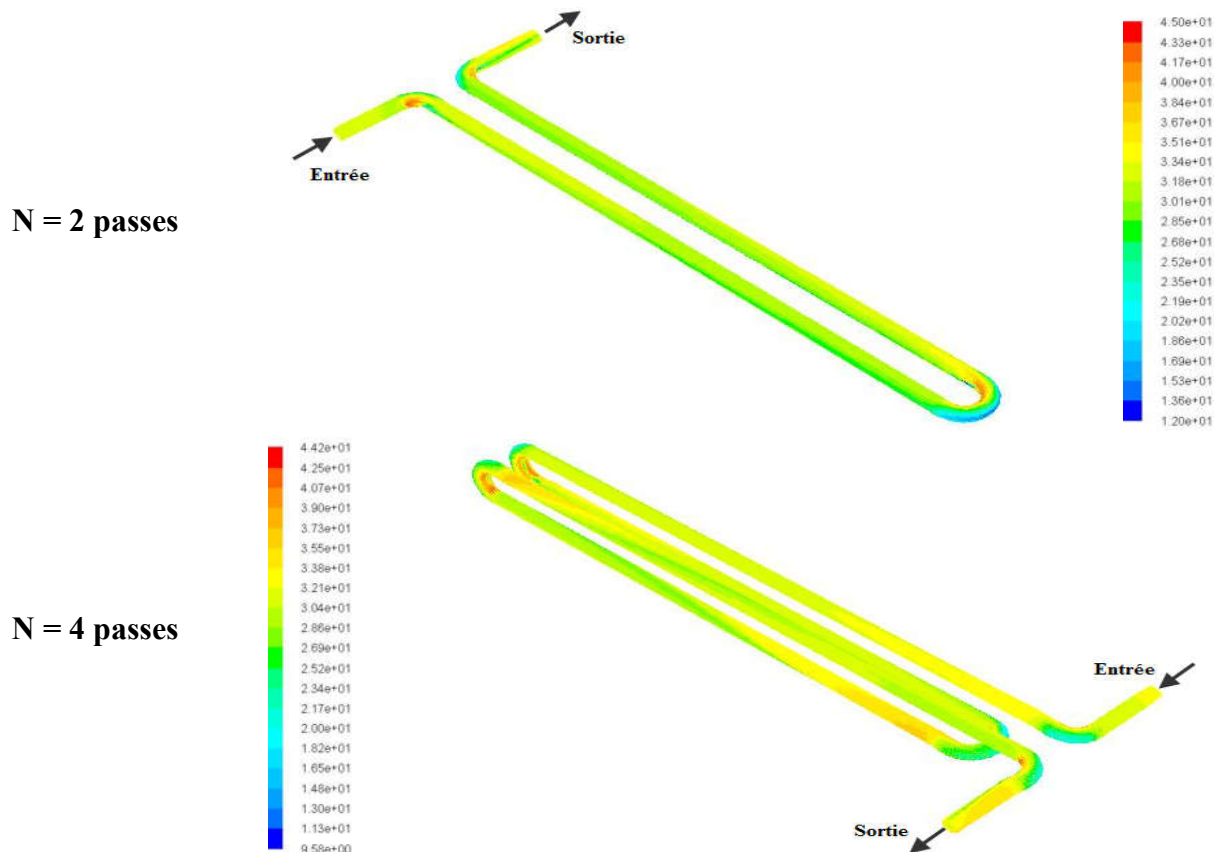


Figure 4.2 : Variation des contours de vitesse pour les deux configurations

Les figures 4.3 et 4.4 montrent la variation des contours de vitesse pour différentes coupes longitudinales ($X = 0, 0.5, 1, 1.5$ et 2 m) à travers deux configurations. Lorsque le gaz naturel s'écoule à travers les serpentins, peuvent être produits des zones de recirculations de fluide (gaz) à l'intérieur du serpentin [voir les figures 4.3 et 4.4]. On peut dire, lorsque le gaz naturel traverse un serpentin, la direction principale de l'écoulement change et les vitesses tangentielles et normales sont intensifiées, ce qui entraîne un meilleur receveur de chaleur.

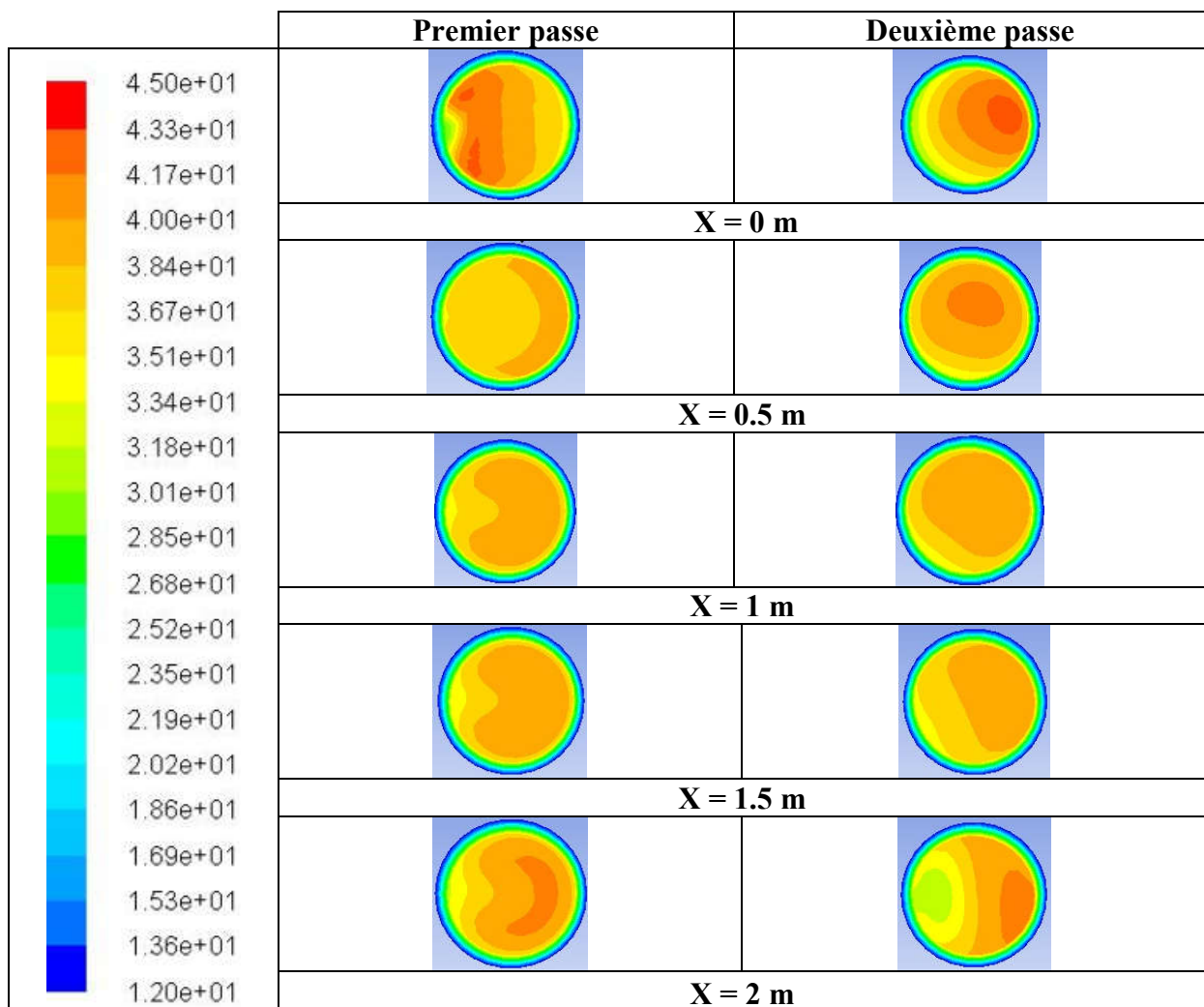
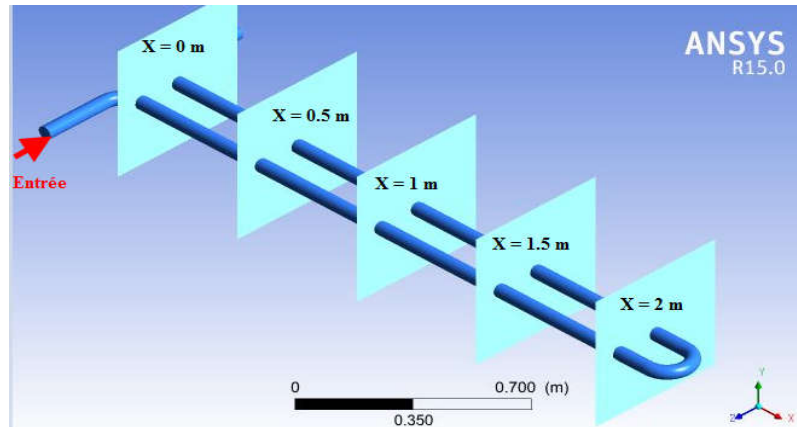


Figure 4.3: Variation de contour de vitesse pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration $N = 2$.

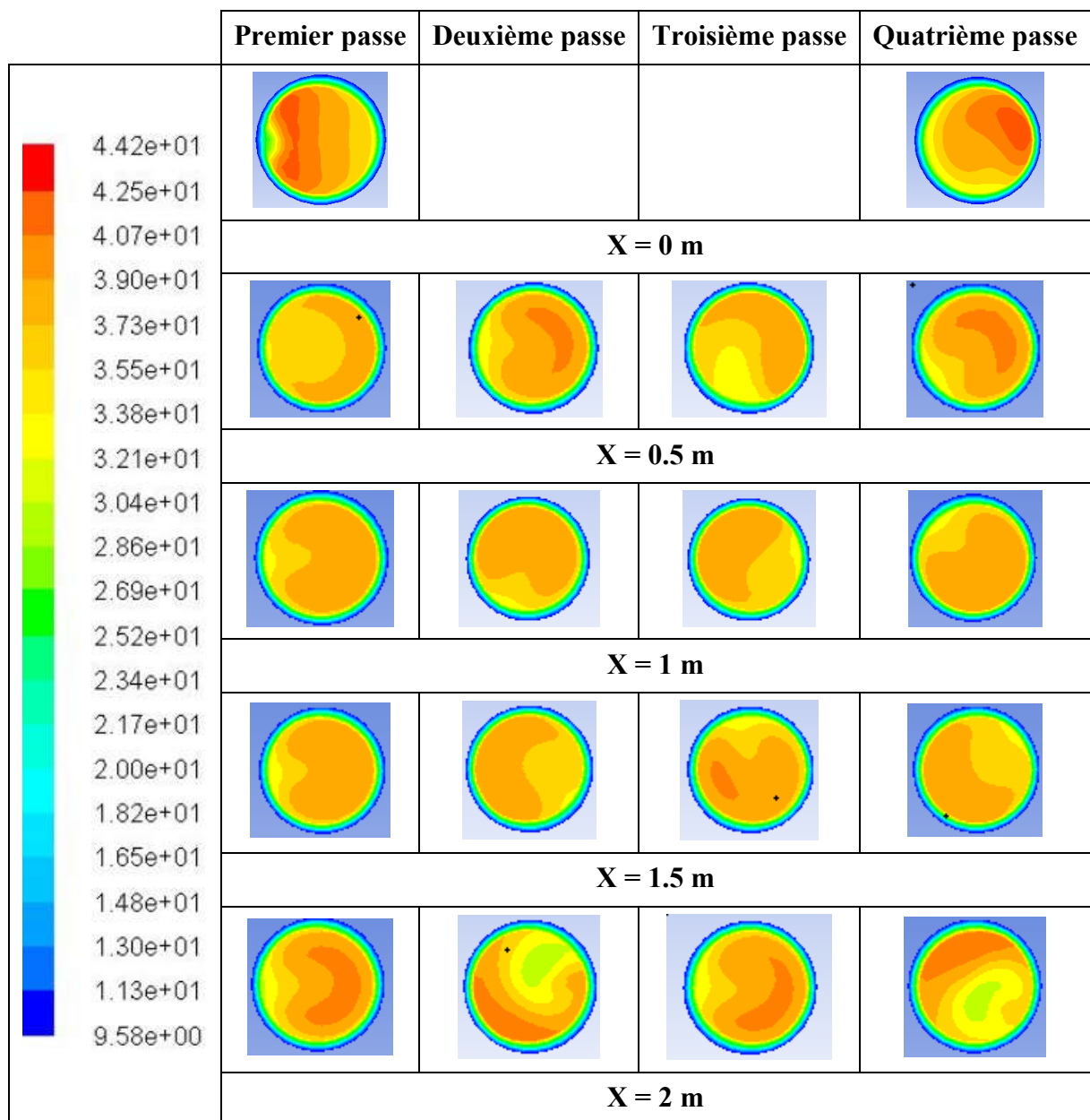
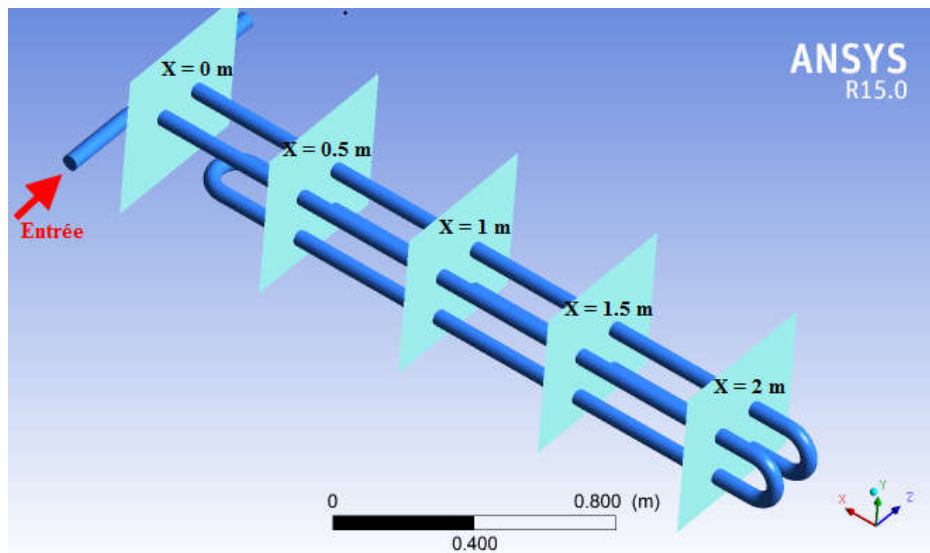


Figure 4.4: Variation de contour de vitesse pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration $N = 4$.

4.4.2. Variation des Contours de température

La figure 4.5 représente L'influence du nombre de passes de serpentin sur les contours de température. Lorsque le gaz naturel entrée dans les serpentins avec une température de 258 K et la température d'eau remplir à la calandre est $T = 353$ K. on remarque que la configuration $N = 4$ présente un mieux transfert thermique par rapport la configuration $N = 2$. Suivant les résultats précédents, la vitesse diminuée avec l'augmentation du nombre de passes de serpentin. Cela intensifie le transfert de chaleur entre l'eau chaud près de la paroi et le gaz froid dans le serpentin. Lorsqu'il a été démontré que l'échange de chaleur est efficace dans les zones de recirculation des fluides en serpentins.

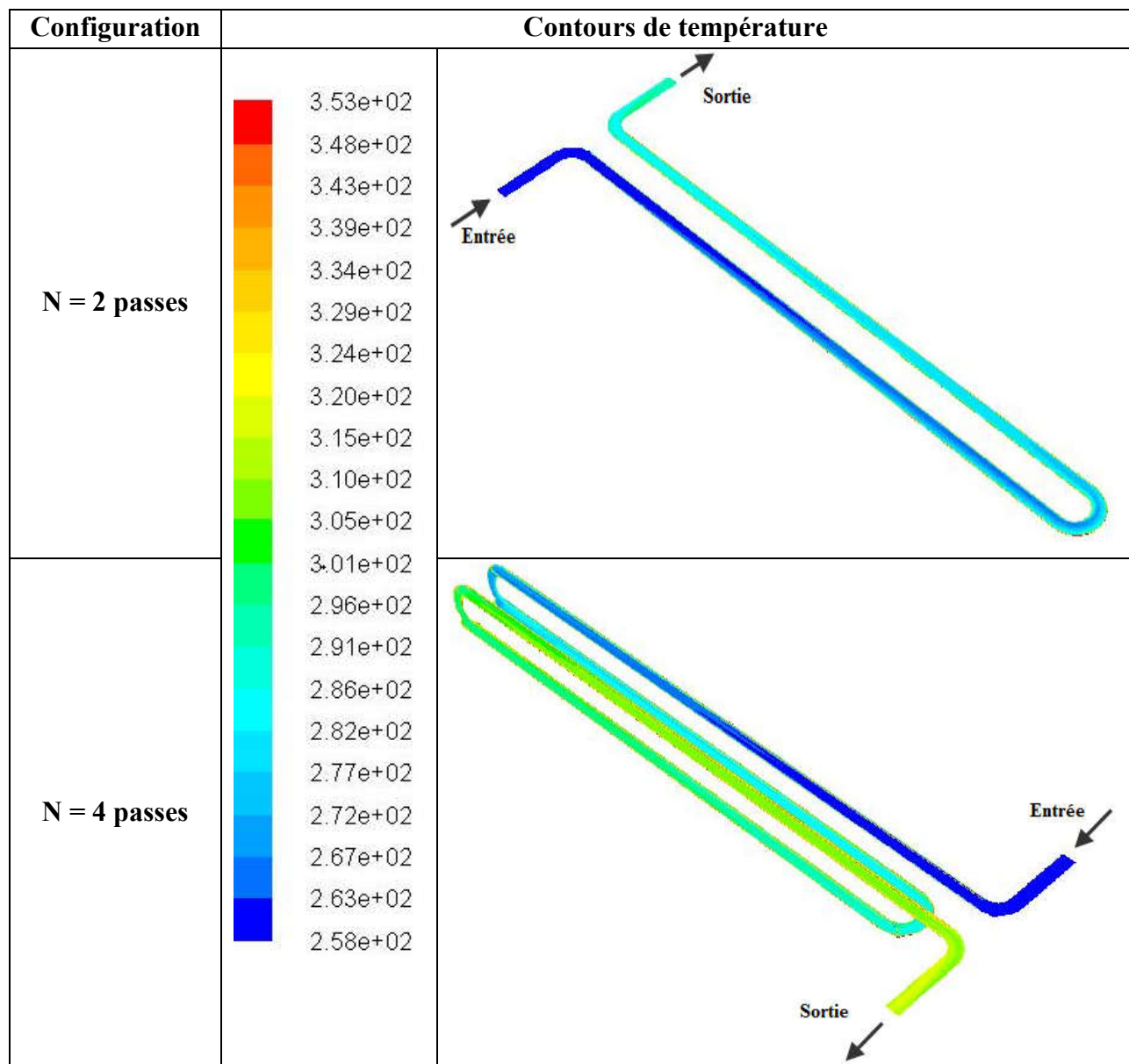


Figure 4.5 : Variation des contours de température pour les deux configurations

Les figures 4.6 et 4.7 montrent les contours de température du gaz naturel à travers deux configurations sur cinq plans normaux avec $X = 0, 0.5, 1, 1.5$ et 2 m. Il est clair que le nombre

de passe de serpentin (la torsion du trajet d'écoulement du gaz naturel) affecte à la fois les performances hydrauliques et thermiques du réchauffeur, et les contours de température sont différents les uns des autres. Comme le montrent les figures, la longueur droite du serpentin de gaz naturel n'est pas suffisante pour atteindre une température uniforme, et l'effet de la perturbation de fluide (gaz) généré dans un coude persiste jusqu'au coude suivant.

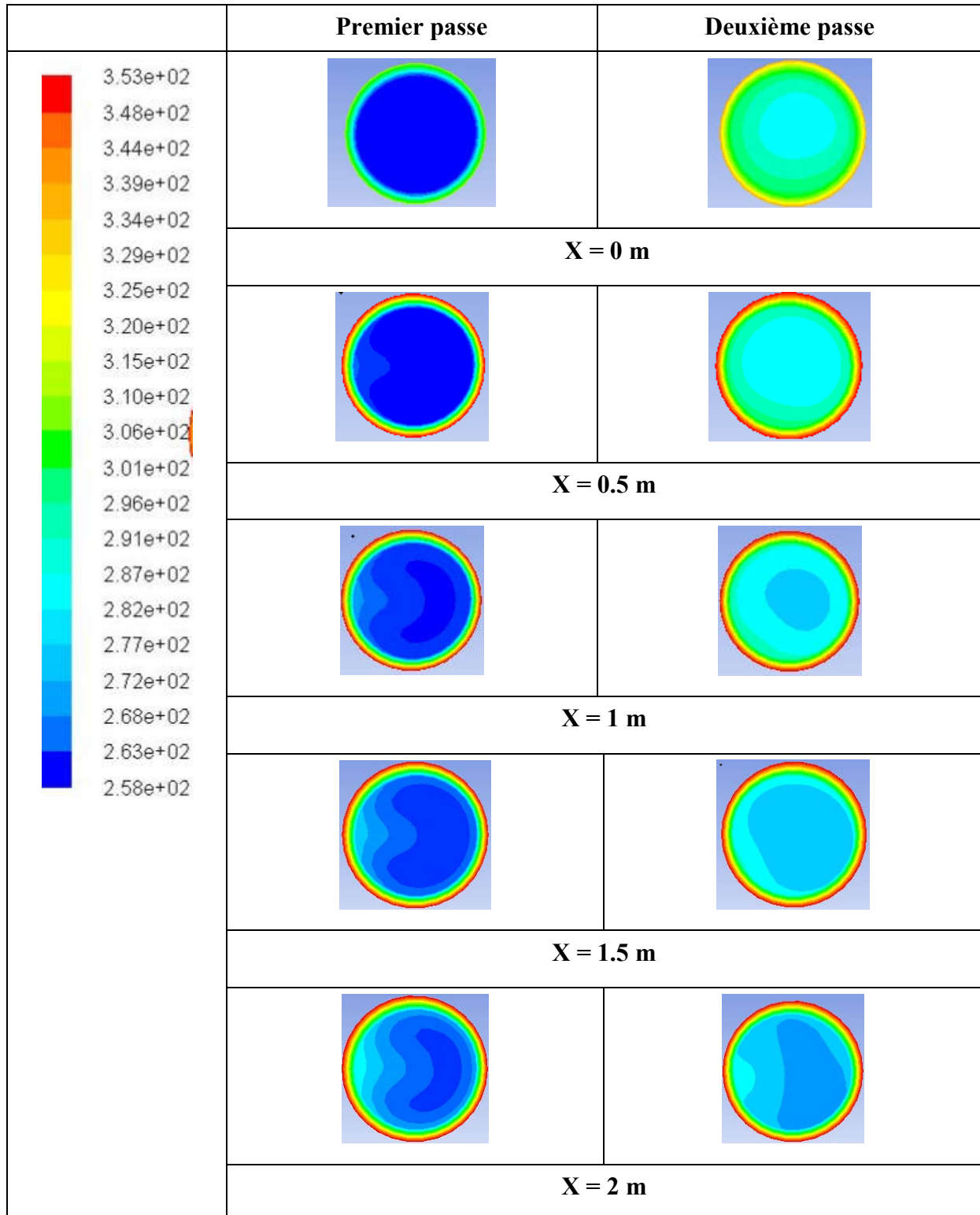


Figure 4.6 : Variation de la température pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration $N = 2$.

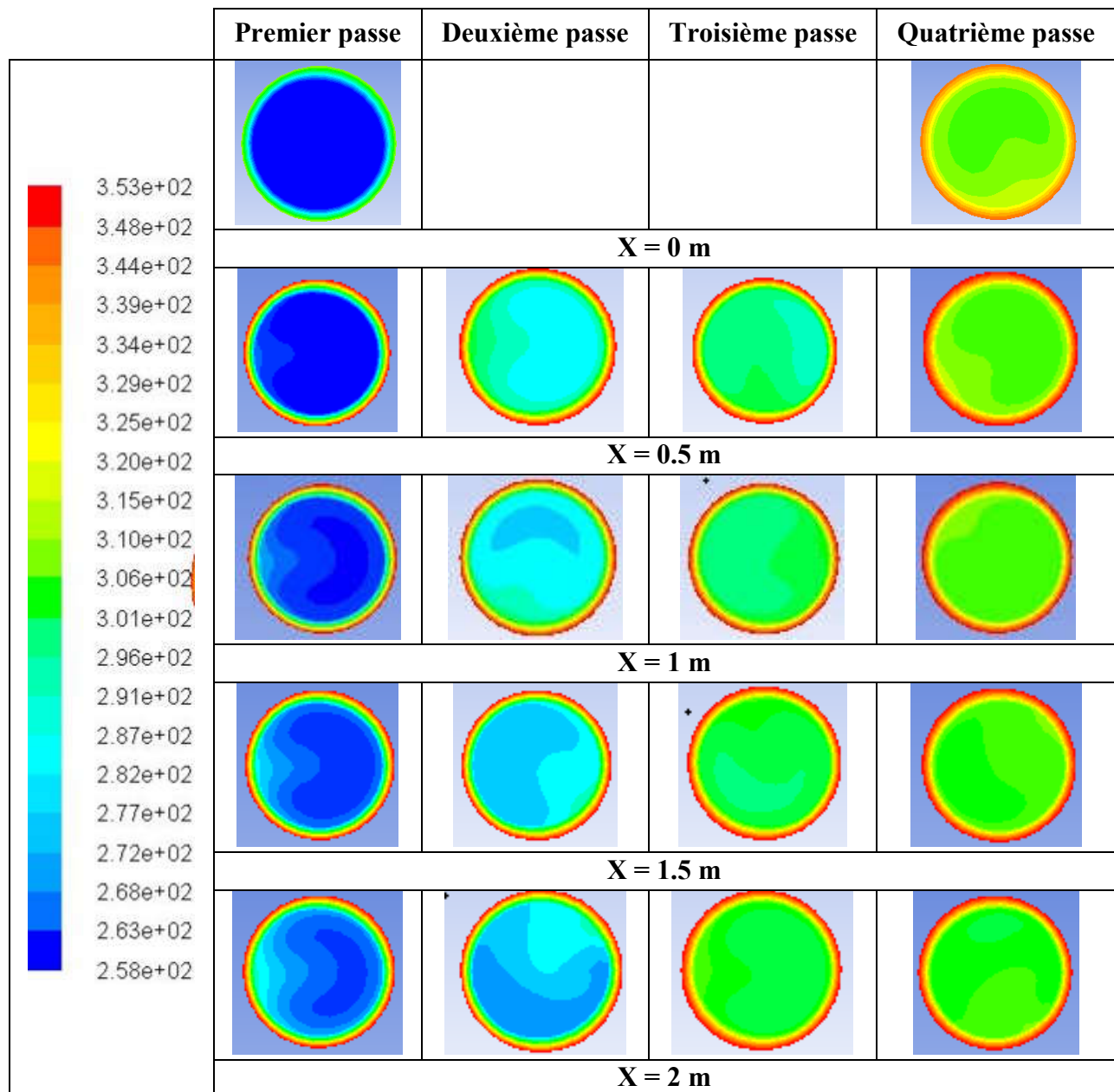


Figure 4.7 : Variation de la température pour différentes coupes longitudinales et pour la configuration $N=4$.

Le tableau 4.2 représente la température moyenne d'évacuation du gaz pour les deux configurations considéré.

Configuration	N = 2 passes	N = 4 passes
T_{moy} [K]	291.17	312.71

Tableau 4.2 : Température moyenne d'évacuation des gaz pour les deux configurations.

La température du gaz naturel évacué par les serpentins, joue un rôle très un important pour éviter l'effet Joule-Thomson (le gaz peut geler) lors de son passage dans l'installation de détente, endommager les vannes et l'instrumentation, voire provoquer une interruption de l'alimentation

en gaz. D'après les résultats obtenus montrent que la configuration de $N = 4$ passes est mieux par rapport la configuration $N = 2$ passes.

4.4.3. Variation des contours de pression

La figure 4.8 représente l'influence du nombre de passes de serpentin sur les contours de pression. On peut observer que les deux configurations de serpentin ont des différences de pression plus élevées que la pression d'entrée (60 bars). Cependant, dans le cas considéré, la chute de pression n'est pas un facteur limitant, car la pression du gaz naturel chutera après le réchauffeur utilisant le système de réduction de pression, c'est-à-dire les détendeurs. Comme pour la vitesse et la température, les différences de pression maximale est obtenue au niveau des coudes.

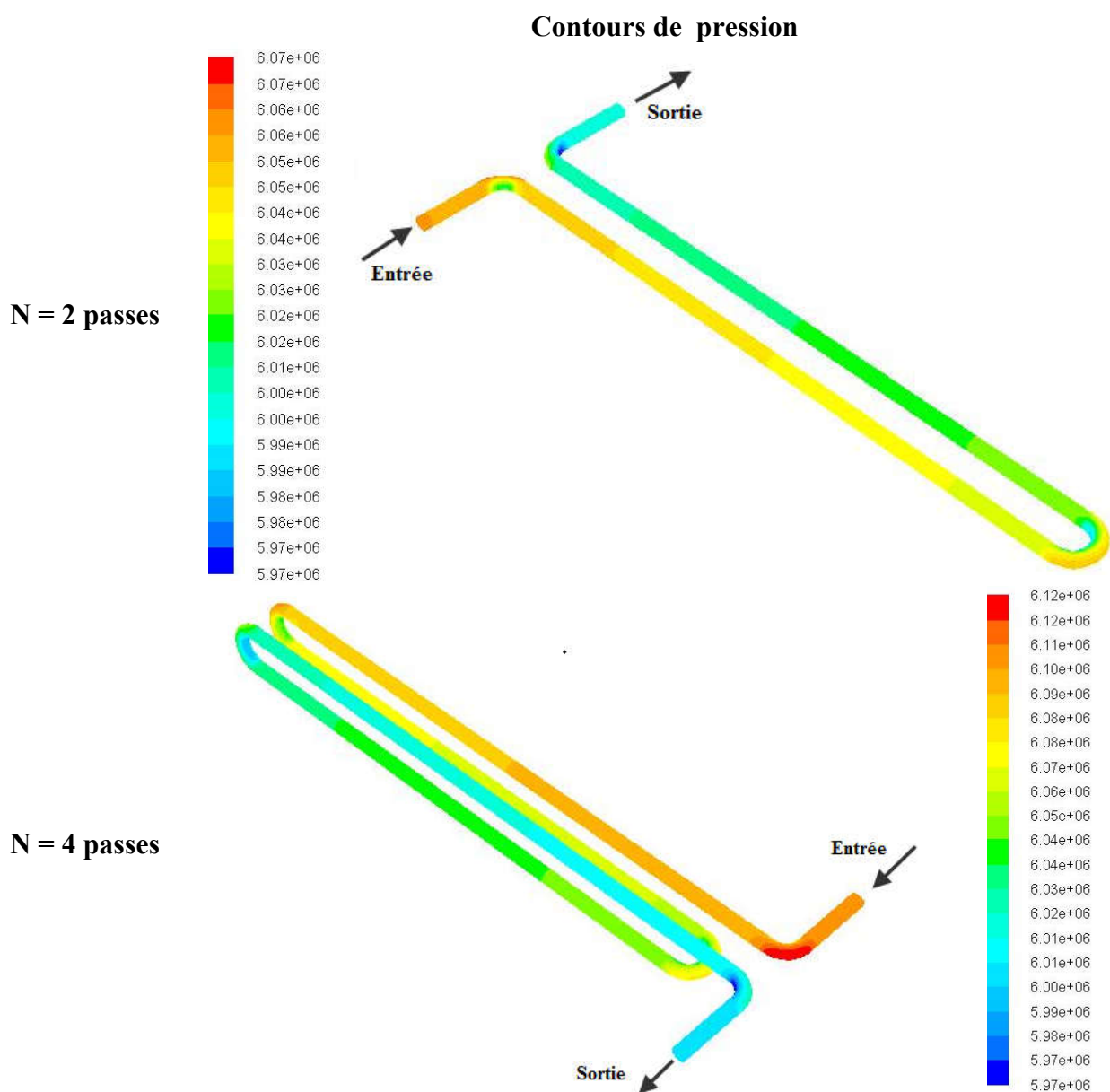


Figure 4.8 : Variation des contours de pression pour les deux configurations

4.5. CONCLUSION

Cette étude porte sur les performances thermiques d'un serpentin de gaz naturel à l'intérieur d'un réchauffeur à bain d'eau de poste de détente du gaz d'une capacité de 20000 Nm³/h. Il est suggéré d'utiliser des serpentins à 2 et 4 passes au lieu de tubes droits pour améliorer les performances thermiques du réchauffeur et réduire la consommation de gaz de combustion pour chauffer le bain d'eau. Tout d'abord, la vitesse, la température et la pression des serpentins de gaz utilisés sont comparées. Dans ce cas, on constate que le serpentin à 4 passes peut atteindre de meilleures performances thermiques par rapport au serpentin à 2 passes. En général, Les performances thermiques d'un serpentin à gaz peuvent être améliorées en augmentant le nombre de passes.



Conclusion générale

Cette étude a été effectuée à la suite d'une visite au poste de détente du gaz DP3 de renforcement de la ville de Tiaret. Où se trouve notre équipement du projet fin de cycle (réchauffeur au gaz naturel).

Le poste de détente de gaz DP3, est considéré parmi les postes les plus importantes de réalisations énergétiques de la wilaya dans les réseaux de transmission de gaz exploités par la société GRTG. Ce poste de détente de gaz est mis en gaz le 14/09/2015, d'une capacité de 20 000Nm³/h, et pour objectif de renforcement de la ville de Tiaret en Gaz naturel.

Le présent travail concerne l'étude du problème chute température et pression dû de la détente du gaz au niveau de la station. A travers ce travail, nous avons étudié le réchauffeur du gaz raccordé par le poste de détente, pour but de réchauffer le gaz naturel afin d'éviter phénomène la formation d'hydrates.

Nous présentons les résultats obtenus par la simulation numérique en utilisant le logiciel Fluent (Ansys 2015). Nous avons essayé de présenter l'effet et les conditions géométriques des serpentins (nombre de passes) sur l'écoulement du fluide et les caractéristiques de transfert de chaleur. Les résultats numériques ont été effectués pour le gaz naturel avec une température de 258 K et de pression de 60 bars.

D'après les résultats de cette simulation, on a trouvé que le réchauffement du gaz naturel (température gaz sortie réchauffeur) avec les paramètres considéré sont acceptable et satisfaisants, afin d'éviter phénomène gel du gaz.



Liste des références

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/ Robert K.G.Temple](https://fr.wikipedia.org/wiki/Robert_K.G.Temple), « Utilisation du gaz naturel comme combustible » [archive], sur chine-informations.com
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/ Désiré Magnier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Désiré_Magnier), Nouveau Manuel complet de l'éclairage au gaz, ou Traité élémentaire et pratique à l'usage des ingénieurs, directeurs, etc., Librairie encyclopédique de Roret, 1849 (Livre numérique Google [archive]).
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/ L'Industrie du gaz en Europe aux 19^e et 20^e siècles](https://fr.wikipedia.org/wiki/L'Industrie_du_gaz_en_Europe_aux_19e_et_20e_siècles) : l'innovation entre marchés privés et collectivités publiques. Peter Lang, 2005 Livre numérique Google [archive].
- [4] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/gaz-naturel/2-histoire/>.
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/ Alexandre Rojey](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Rojey), Bernard Durand. Le Gaz naturel : production, traitement, transport. Éditions TECHNIP, 1994 sur Google [archive].
- [6] <https://www.techno-science.net/definition/3402.html>.
- [7] <https://www.artis-groupe.fr/blog/extraction-gaz-naturel>.
- [8] Le gaz de charbon dans le sous-sol lorrain (<https://books.openedition.org/editions-cnrs/30003?lang=fr>).
- [9] <https://fr.scribd.com/doc/313983206/Traitement-de-Gaz>
- [10] Équipement Réchauffeurs et Fours, manuel de formation (EXP-PR-EQ110-FR), TOTAL, dernière révision : 08/06/2007
- [11] Transport du gaz ([https://www.connaissancedesenergies.org/fiche pédagogique/transport-du-gaz](https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/transport-du-gaz))
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Gazoduc/GA Papadakis](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gazoduc/GA_Papadakis) (2005), Overview of pipelines in Europe—advantages and disadvantages [archive].
- [13] https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/1-p7-1-edd_partie_generique.pdf
- [14] Nathalie AUBERT, Conception les poste de détente, Département Transport du Centre d'Expertise et de Services Direction Production Transport GAZ DE France, 1998
- [15] Formation sur la conception les poste de détente GRTG
- [16] KHALLA Dounya et NAILI Assia, Etude de l'efficacité d'injection de gaz chaud pour la prévention et L'élimination des hydrate. Mémoire de Fin d'Etudes, université 8 mai 1945 Guelma, année universitaire 2019-2020
- [17] BENKAHLA, Cours échangeurs thermique, université Houari Boumediene, Alger, (<http://www.youtube.com/@youb.benkahla>)

- [18] Polycopié Initiation aux transferts thermiques, rédigé par ALI AGHA Hamza, université Abderrahmane MIRA BEJAIA, Année universitaire 2018/2019
- [19] Cours : Calcul et dimensionnement des échangeurs de chaleur, université MSILA 2016/2017
- [20] www.techniques-ingenieur.fr/Ti203 thermique pour l'industrie échangeur de chaleur
- [21] Échangeurs de chaleur à plaques et joints (www.arsopi-thermal.pt/fr/produits/echangeurs-de-chaleur-a-plaques-et-joints).
- [22] ABDELLI Aymen, Etude et simulation sous matlab d'un échangeur thermique a faisceau tubulaire et calandre, mémoire fin d'étude, université BADJI MOKHTAR ANNABA 2018/2019.
- [23] Réchauffeurs indirects, PIETRO FIERONTINI, (<https://docplayer.fr/15318031-Rechauffeurs-indirects.html>)
- [24] Smath Gontran ESSAH, gestion de la maintenance du réchauffeur de gaz nature, mémoire pour l'obtention de la licence professionnelle en gestion et maintenance des installations industrielles et énergétiques, Institut International d'Ingénierie BURKINA FASO, Année [2011/2012].
- [25] Méthodologie d'Exploitation et de Maintenance des Ouvrages de Transport Gaz (formation sonelgaz /GRTG ETB BLIDA 2019)
- [26] Maintenance et entretien des réchauffeurs (formation sonelgaz/GRTG ETB BLIDA 2019)
- [27] SADOUNE Achour, étude d'un réchauffeur intègre a un poste de détente de gaz, mémoire de fin d'étude, université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, année universitaire 2012-2013.
- [28] KHANOUDJ Fatima et KHELIFA Amina, Simulation numérique du transfert de chaleur par convection mixte dans une cavité : Effet de la présence de chicane, mémoire de fin d'étude, université Ibn Khaldoun Tiaret année universitaire 2019-2020.
- [29] P. Soleimani , M. Khoshvaght-Aliabadi , H. Rashidi , H. Bahmanpour, Performance enhancement of water bath heater at natural gas city gate station using twisted tubes, Chinese Journal of Chemical Engineering 28 (2020) 165–179

RESUME

La présente étude se concentre sur le réchauffement du gaz naturel et le maintien de la température du gaz au-dessus de la température de formation des hydrates, en utilisant un réchauffeur indirect. L'un des principaux éléments de la conception d'un réchauffeur de gaz, des serpentins. Il est suggéré d'utiliser des serpentins à 2 et 4 passes au lieu de tubes droits pour améliorer les performances thermiques du réchauffeur. Les résultats de cette étude montrent que le serpentin à 4 passes peut atteindre de meilleures performances thermiques par rapport au serpentin à 2 passes. En général, Les performances thermiques d'un serpentin à gaz peuvent être améliorées en augmentant le nombre de passes.

Mots clés : gaz naturel, réchauffeur, serpentins, nombre de passes

ABSTRACT

This study focuses on warming natural gas and keeping the gas temperature above the hydrate formation temperature, using an indirect heater. One of the main design elements of a gas heater, coils. It is suggested to use 2 and 4 pass coils instead of straight tubes to improve the heater's thermal performance. The results of this study show that the 4-pass coil can achieve better thermal performance compared to the 2-pass coil. In general, the thermal performance of a gas coil can be improved by increasing the number of passes.

Keywords: natural gas, heater, coils, number of passes

المخلص

ترتكز الدراسة الحالية على تسخين الغاز الطبيعي والحفاظ على درجة حرارة الغاز فوق درجة حرارة تكوين الجليد، باستخدام سخان غير مباشر. أحد العناصر الرئيسية في تصميم سخان الغاز هو انبوب نقل الغاز المتلوي . يُقترح استخدام انابيب المتلوية بممرين و اربع ممرات بدلاً من الأنابيب المستقيمة لتحسين الأداء الحراري للسخان. تظهر نتائج هذه الدراسة أن الانبوب المتلوي رباعي الممرات يمكن أن يحقق أداءً حراريًا أفضل مقارنة بالأنبوب المتلوي ثنائي الممرات. بشكل عام، يمكن تحسين الأداء الحراري للأنبوب المتلوي لنقل الغاز عن طريق زيادة عدد الممرات .

الكلمات المفتاحية: الغاز الطبيعي ، السخان ، انابيب المتلوية ، عدد الممرات