RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

Université YAHIA FARES DE MÉDÉA

Faculté de Technologie

Département de Génie des procédés et environnement

Mémoire de Fin d'Etudes

Pour l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : *Hygiène et sécurité industrielle*

Option : *Hygiène et sécurité industrielle*

THEME

Etude de la dispersion d'un gaz polluant dans espace clos

Encadré par :

Dr. REBHI Redha

Pr. HADIDI Noureddine

Présenté par :

AOUFI Abdelkader

BENAISSA Rabah

2021/2022

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

Nous remercions du fond de cœurs nos chers parents de tout ce qu'ils faisaient pour nous.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Dr. HADIDI Noureddine pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour les très précieux conseils et les encouragements qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce travail.

Nous remercions particulièrement notre Co-encadreur Dr. REBHI Redha pour ses efforts, et le temps qu'il a passé pour nous nous a énormément aidés et ne nous a pas épargnés les informations et les conseils

En fin, nous tenons à exprimer nos reconnaissances à tous nos amis pour leur soutien moral.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

À l'Algérie

À l'université de Yahia Farés de Médéa

À ma famille avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions

À tous les étudiants d'hygiène et de sécurité industrielle -HSI-

Abdelkader.

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

À l'Algérie

À l'université de Yahia Farés de Médéa

À ma famille avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions

À tous les étudiants d'hygiène et de sécurité industrielle -HSI-

Rabah.

Résume :

Notre étude est basée sur la diffusion des gaz toxiques dans les espaces confinés. A travers cette étude, nous avons donné un aperçu de la pollution, de ses types et de ses causes, puis nous avons parlé de l'émission de gaz toxiques dans les espaces clos et des conditions et facteurs qui influent sur leur propagation.

Nous avons utilisé le programme ANSYS-CFX pour simuler la diffusion du monoxyde de carbone (Co), qui a été choisi comme modèle de gaz polluant dans un espace clos en raison de divers facteurs d'influence.

Mots clés : CO, espaces confinés, pollution, gaz polluants.

الملخص **:**
تعتمد دراستنا على انتشار الغازات السامة في الأماكن الضيقة. من خلال هذه الدراسة قدمنا لمحة عامة عن التلوث وأنواعه وأسبابه، ثم تحدثنا عن انبعاث الغازات السامة في الأماكن المغلقة والظروف والعوامل التي تؤثر على انتشارها.

استخدمنا برنامج ***ANSYS-CFX*** لمحاكاة انتشار أول أكسيد الكربون، والذي تم اختياره كنموذج للغاز الملوث في مكان مغلق بسبب عوامل مختلفة مؤثرة.
الكلمات المفتاحية: اول أكسيد الكربون، غاز ملوث، مكان مغلق، التلوث.

Summary**:**
Our study is based on the diffusion of toxic gases in confined spaces. Through this study, we gave an overview of pollution, its types and causes, then we talked about the emission of toxic gases in enclosed spaces and the conditions and factors that influence their spread.

We used the ANSYS-CFX program to simulate the diffusion of carbon monoxide (Co), which was chosen as a model pollutant gas in an enclosed space due to various influencing factors.

Key words : confined spaces, CO, pollution, polluting gases.

Liste des figures.

Figure 1.1: smog à New York.....03
Figure 1.2 : la pollution dans les sols.....03
Figure 1.3 : la pollution du l'eau….....04
Figure 1.4 : la pollution des déchets chimiques….....04
Figure 1.5 : sources naturelle de pollution atmosphérique..... 05
Figure 1.6 : les sources dues aux activités industrielles… 06
Figure 1.7 : les effets de pollution sur la santé et l'environnement. 07
Figure 1.8 : les gaz polluants… 08
Figure 1.9 : triangle de feu….....09
Figure 1.10 : activités de construction… 10
Figure 1.11 : espace clos… 11
Figure 2.1 : schéma montrant l'ensemble de l'entrepôt 13
Figure 2.2 : diffusion de gaz de la première source..... 13
Figure 2.3 : Diffusion de gaz de la deuxième source.....14
Figure2.4 : Diffusion de gaz de la troisième source 14
Figure2.5 : Diffusion de gaz de la troisième source 14
Figure 2.6 : Organigramme général de calcul du code ANSYS-CFX 25
Figure 3.1 : contours de la variation de la pression (cas1).....26
Figure 3.2 : contours de la variation de la pression (cas2).....26
Figure 3.3 : contours de la variation de la pression (cas3).....27
Figure 3.4 : contours de la variation de la pression (cas4).....27
Figure 3.5 : contours de la variation de la vitesse (cas1). 28
Figure 3.6 : contours de la variation de la vitesse (cas2). 28
Figure 3.7 : contours de la variation de la vitesse (cas3). 29
Figure 3.8 : contours de la variation de la vitesse (cas4). 29
Figure 3.9 : contours de la variation de la température (cas1).....30
Figure 3.10 : contours de la variation de la température (cas2).....30
Figure 3.11 : contours de la variation de la température (cas3).....31
Figure 3.12 : contours de la variation de la température (cas4).....31
Figure 3.13 : contours de la variation de la fraction volumique (cas1)..... 32
Figure 3.14 : contours de la variation de la fraction volumique (cas2)..... 32
Figure 3.15 : contours de la variation de la fraction volumique (cas3)..... 33
Figure 3.16 : contours de la variation de la fraction volumique (cas4)..... 33

Figure 3.17 : courbe représente l'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=40m 34
Figure 3.18 : courbe représente l'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=40m. 34
Figure 3.19 : courbe représente l'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=40m. 35
Figure 3.20 : courbe représente l'évolution de la fraction volumique en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=40m. 35
Figure 3.21 : courbe représente l'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=67m. 36
Figure 3.22 : courbe représente l'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=67m. 36
Figure 3.23 : courbe représente l'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=67m. 37
Figure 3.24 : courbe représente l'évolution de la fraction volumique en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=67m. 37
Figure 3.25 : courbe représente l'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=89m. 38
Figure 3.26 : courbe représente l'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=89m. 38
Figure 3.27 : courbe représente l'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=89m. 39
Figure 3.28 : courbe représente l'évolution de la fraction volumique en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=89m. 39
Figure 3.29 : courbe représente l'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=111m. 40
Figure 3.30 : courbe représente l'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=111m. 40
Figure 3.31 : courbe représente l'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=111m. 41
Figure 3.32 : courbe représente l'évolution de la fraction volumique en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=111m. 41
Figure 3.33 : courbe représente l'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=138m. 42

Figure 3.34 : courbe représente l'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=138m. 42
Figure 3.35 : courbe représente l'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=138m. 43
Figure 3.36 : courbe représente l'évolution de la fraction volumique en fonction de la hauteur y pour les différents cas dans x=138m. 43

Liste des tables.

Tableau 2-1 : valeurs des constants du modèle k-ε.....23

Tableau 2.2 : constantes du modèle RNG k-ε 24

Nomenclatures

$\vec{U}$:	*Le vecteur vitesse du fluide*
S_M :	*Le terme source de masse*
$\vec{\tau}$:	*Le tenseur de stress visqueux*
$\vec{f}$:	*La forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI: $N{\cdot}kg^{-1}$)*
δ:	*La matrice identité*
Ux :	*La composante de la vitesse dans la direction $\hat{x}$, et ainsi de suite pour Uy et Uz.*
t :	*Le temps (unité SI :s)*
ρ :	*La masse volumique de fluide(unité SI : $kg{\cdot}m^{-3}$)*
$\vec{v} =$ (v_1,v_2,v_3) :	*La vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : $m{\cdot}s^{-1}$)*
P :	*La pression (unité SI : Pa)*
$\overline{\tau}$:	*Le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa)*
$\bar{\bar{I}}$:	*La viscosité de volume du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)*
e :	*L'énergie totale par unité de masse (unité SI : $J{\cdot}kg^{-1}$)*
$\vec{q}$:	*Le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI : $J{\cdot}m^{-2}{\cdot}s^{-1}$)*
r :	*La perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI : $J{\cdot}m^{-3}{\cdot}s^{-1}$)*
M :	*la viscosité dynamique (unité Pa. s)*
η :	*La viscosité de volume du fluide (unité SI : Po)*
λ:	*la conductivité thermique du fluide (unité SI : $W.K^{-1}.m^{-1}$)*
T :	*La température (unité SI : K)*
ν :	*La viscosité cinématique du fluide (unité SI : $m^2.s^{-1}$)*
$(\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v}$:	*le terme de convection*
μ_t :	*La Viscosité turbulente (unité $kg.m^{-1}s^{-1}$)*
s_{ij} :	*Le tenseur de Reynolds*
K :	*L'énergie cinétique turbulente (unité $m^2.s^{-2}$).*
ε :	*Le taux de dissipation de l'énergie cinétique k (unité $m^2.s^{-3}$)*
$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$:	*Coefficient de modèle k-ε*

Abréviation

CFD :	*Computational Fluid dynamics .*
CLA :	*La couche limite atmosphérique*
CLU :	*La couche limite urbaine .*
GES :	*Gaz à effet de serre.*
PPRT :	*Plans de Prévention des Risques Technologiques.*
RNG :	*Renormalization Group (theory used with k epsilon turbulence).*

Sommaire

Remerciement.

Résumé.

Liste des figures.

.Liste des tables.

Nomenclatures.

Introduction générale 1

Chapitre01 : généralité sur La pollution atmosphérique

1. Définition de la pollution 2
2. Les différents types de pollution..... 2
2.1. La pollution de l'air (atmosphérique) 2
2.2. La pollution de sol terrestre..... 3
2.3. La pollution du l'eau 3
2.4. La pollution des déchets nucléaire et chimiques 4
3. La pollution atmosphérique..... 4
3.1. Définition de la pollution atmosphérique..... 4
3.2. Sources de pollution atmosphériques..... 4
3.2.1. Les sources naturelles 5
3.2.2. Les sources dues aux activités industrielles 5
3.3. Les effets de la pollution de l'air 6
4. Les polluants gazeux..... 8
4.1. Définition et exemple..... 8
4.2. Emission des polluants..... 9
4.3. Les effets sur la santé humaine..... 10
5. Les espaces clos..... 11
5.1. Définition des espaces clos..... 11
5.2. Les dangers reliés aux espaces clos 12
5.2.1. Les dangers reliés à l'atmosphère..... 12
5.2.2. Les autres dangers..... 12

Chapitre02 : Modèle physique et formulation mathématique

1. Introduction 13
2. Modèle physique..... 13
3. Formulation mathématique..... 15
3.1. Les équations de Navier-Stokes incompressibles. 15

Sommaire

3.2. Fluide Newtonien, hypothèse de stokes 19
3.3. Expression pour les écoulements de fluides compressibles 20
3.4. Expression pour les écoulements de fluides incompressible 21
3.4.1. Expression en coordonnées cartésiennes (x, y, z) 21
3.4.2. Expression en coordonnées cylindriques (r, ∅, z) 22
4. La turbulence 22
4.1. Les effets de la turbulence 22
4.2. Les modèles turbulences. 23
4.2.1. Le modèle k-ε. 23
4.2.2. Le modèle RNG k-ε 24
5. Présentation de code ANSYS-CFX. 24

Chapitre 03 : Résultats et conclusion

1. Introduction. 26
2. Interprétations de résultats 26
2.1. Evolution de la pression (cas1) 26
2.2. Evolution de la pression (cas 2) 26
2.3. Evolution de la pression (cas 3) 27
2.4. Evolution de la pression (cas 4) 27
2.5. Evolution de la vitesse (cas 1) 28
2.6. Evolution de la vitesse (cas 2) 28
2.7. Evolution de la vitesse (cas 3) 29
2.8. Evolution de la vitesse (cas 4) 29
2.9. Evolution de la Température (cas 1) 30
2.10. Evolution de la Température (cas 2) 30
2.11. Evolution de la Température (cas 3) 31
2.12. Evolution de la Température (cas 4) 31
2.13. Evolution de la fraction volumique (CO) (cas 1) 32
2.14. Evolution de la fraction volumique (CO) (cas 2) 32
2.15. Evolution de la fraction volumique (CO) (cas 3) 33
2.16. Evolution de la fraction volumique (CO) (cas 4) 33

Conclusion 44

Bibliographique 45

Introduction générale

Introduction générale

On appelle pollution une dégradation ou une altération de l'environnement, en général liée à l'activité humaine par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques qui sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants ou qui perturbent de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes, que ce soit à l'air libre ou à espace clos, comme un atelier, un bureau ou une citerne.

Les milieux confinés représentent des dangers importants pour la santé et la sécurité des travailleurs qui peuvent être exposés à différents risques inhérents au fait que l'espace dans lequel ils évoluent est clos, exigu, insalubre, aux issues difficiles d'accès et peu praticables, et peut être pollué par des poussières ou vapeurs toxiques ou inflammables ou appauvri en oxygène : les travaux en milieu confiné figurent parmi les plus accidentogènes car les conditions de pollution de l'air, d'éclairage, d'exigüité, d'humidité, de froid ou de chaleur amplifient considérablement la fréquence et la gravité des accidents du travail et maladies professionnelles.
Par des mesures de prévention collectives appropriées, notamment la ventilation, la consignation, les moyens de communication et d'évacuation, de contrôle d'atmosphère... on peut réduire toutes ces expositions et diminuer fortement les risques professionnels des travaux en milieu confiné.
De plus, le travail en milieu confiné exige que soient respectées scrupuleusement la qualification des personnes habilitées à y pénétrer, les règles d'hygiène et les consignes sur les moyens de protection individuelle (port du casque, gants, bottes, masque respiratoire etc.).
Par ailleurs, les mesures de formation à la sécurité et d'information sont indispensables, particulièrement en ce qui concerne le sauvetage, la sécurité incendie.

Ainsi le présent mémoire comporte, après une introduction générale trois chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre représente une synthèse générale sur la pollution et leurs types, la pollution atmosphérique et leurs sources et effets. Il comprend également les polluants gazeux, leur mode de propagation et leurs impacts sur la santé humaine, les lieux fermés, les dangers qui y sont liés et les sources de gaz polluants qu'ils contiennent.

Le deuxième chapitre est consacré à donner notre modèle physique et les formules mathématiques, et nous avons également parlé des écoulements de fluide (compressibles et incompressibles) et de la turbulence (effets et modèles).

Le troisième chapitre : présentation de code ANSYS-CFX et interprétations de résultats.

Et nous avons clôturé notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 01 :

Généralité sur la pollution

1. Définition de la pollution :

La pollution est la modification physico-chimique ou biologique d'un écosystème par l'introduction d'un élément extérieur qui créait un danger pour le monde du vivant.

La pollution est la conséquence de l'introduction de matières, en quantité suffisamment importante pour perturber son fonctionnement habituel à cours, moyen, ou long terme. La plupart du temps elle est due à l'activité de l'homme.

2. Les différents types de pollution :

La pollution est un phénomène mondial qui ne cesse d'évoluer d'année en année. Problématique connue depuis un certain temps et pas forcément prise en compte, les conséquences liées à la pollution de ces 20 dernières années sont désormais de plus en plus visibles. Réchauffement climatique, fonte de la banquise dans le cercle polaire, émission des particules fines, maladies ou décès, autant d'effets néfastes qui se multiplient de jour en jour [1].

Nous trouvons la pollution dans plusieurs états de la matière :

- La pollution de l'air (atmosphérique).
- La pollution de sol terrestre.
- La pollution du l'eau.
- La pollution des déchets nucléaire et chimiques.

2.1 **La pollution de l'air (atmosphérique) :** la pollution de l'air est surement le type de pollution le plus connu et le plus dévastateur. De base naturelle puis fortement multipliés par l'activité humaine depuis le XIXème siècle, les gaz à effet de serre sont les principaux bourreaux de notre planète. Ces gaz, en plus de polluer la Terre, sont également à l'origine du réchauffement climatique que l'on observe dorénavant sur la totalité de la surface du globe.

Les autres polluants atmosphériques comme par exemple les particules fines sont également très néfastes pour la planète. Elles vont détruire la couche d'ozone terrestre ce qui va laisser passer les rayons ultraviolets nocifs à travers l'atmosphère. Tous ces polluants vont petit à petit réduire la qualité de l'air et vont ainsi provoquer la perte de nombreux organismes vivants ainsi que le développement de diverses maladies cardiovasculaires [2].



Figure 1.1: Smog à New York [3].

2.2 **La pollution de sol terrestre :** La pollution des sols est l'une des pollutions dont on parle le moins, car c'est assurément la moins visible par la population mondiale. Cependant, cette pollution peut s'avérer très dangereuse pour la santé. Cette pollution consiste à la contamination des sols par le rejet de produits chimiques directement dans le sol. Une fois rejetés dans le sol, ces produits viennent ensuite contaminer les cultures agroalimentaires (pesticides, engrais) qui sont ensuite ramassées et ingurgitées par l'homme.



Figure 1.2 : La pollution dans les sols [4].

2.3 **La pollution du l'eau** : Cette pollution provient de différentes origines. Elle peut provenir de la pollution industrielle (dégazage des bateaux en mers, rejets de produits chimiques), de la pollution par le biais de l'agriculture (utilisation de produits chimiques qui viennent contaminer les nappes phréatiques), de la pollution automobile (rejet d'huile ou carburant dans les cours d'eau) ou du non-traitement des eaux usées.



Figure 1.3 : la pollution du l'eau [5].

2.4 **La pollution des déchets nucléaire et chimiques :** Ces déchets peuvent entrainer de graves conséquences sur notre environnement s'ils sont rejetés directement dans l'air ou dans le sol (par un mauvais traitement ou accident). Ils ont la particularité de rester très longtemps « actifs » dans l'environnement et d'être particulièrement mortels pour toute forme d'êtres vivants.



Figure 1.4 : la pollution des déchets chimiques [6].

3. La pollution atmosphérique :

3.1. Définition de la pollution atmosphérique :

«On entend par pollution de l'atmosphère, l'émission dans l'atmosphère, de gaz, des fumées ou de particules solides ou liquides, corrosifs, toxiques ou odorantes de nature à incommoder la population, à compromettre la santé ou la sécurité publique ou à nuire aux végétations, la production agricole et aux produits agro-alimentaires, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites »[7].

3.2. Sources de pollution atmosphériques :

Tous les secteurs d'activité humaine sont susceptibles d'émettre des polluants atmosphériques : les activités industrielles, le traitement des déchets et les chantiers, le transport (routier, aérien, fluvial), les activités domestiques (chauffage en particulier), l'agriculture ou encore la sylviculture.

3.2.1. Les sources naturelles :

L'atmosphère renferme, à côté des éléments de base, une quantité variable de substances naturelles provenant de sources très diverses qui, dépassant un seuil, crée une source de pollution :

* Les feux des forêts, des cultures ou des prairies contribuent à des émissions importantes de noyaux de condensation, d'imbrûlés et de gaz.

* Les volcans émettent des gaz comme le dioxyde de soufre et de l'hydrogène sulfureux, et des particules des cendres en grande quantité, dont les nuages peuvent parcourir des distances considérables.

* Les embruns marins sont constitués par des aérosols renferment des cristaux de sels qui peuvent entraîner à une pollution.

* Les végétaux sont à leur tour à l'origine d'une pollution par les pollens, les spores et les champignons.

* L'homme et les animaux rejettent des quantités importantes de dioxyde de carbone et sont à l'origine d'une pollution microbienne.

* L'ozone est formé naturellement à haute altitude à partir de réaction photochimique impliquant l'oxygène de l'air, ainsi une fois transporté dans les zones rurales par le vent, l'ozone se forme en grande quantité lorsque l'insolation est très élevée [8].



Figure 1.5 : sources naturelle de pollution atmosphérique [9].

3.2.2. Les sources dues aux activités industrielles :

De nombreux types d'installations industrielles émettent cependant également des polluants dans l'atmosphère, constituent généralement un problème local à l'échelle d'une région ou d'un quartier, et planétaire à grande échelle. Comme par exemple :

*Les installations fixes de combustions : les centrales thermiques, l'industrie et les usines d'incinérations des ordures ménagères.

*Les installations industrielles.

*Les sources automobiles: le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx), les composés organiques volatiles (COV), le dioxyde de soufre (SO2).



Figure 1.6 : Les sources dues aux activités industrielles [10].

3.3. Les effets de la pollution de l'air

De manière aigue ou chronique les polluants atmosphériques ont de lourds impacts sur les cultures et les écosystèmes. De manière ponctuelle, par exemple lors des forts épisodes de pollution à l'ozone, des nécroses ou des tâches apparaissent sur les feuilles des arbres. Sur une période d'exposition prolongée à l'ozone, un affaiblissement des organismes et un fort ralentissement de la croissance est observé, et à terme cela impacte les cultures agricoles. Les polluants peuvent également parcourir des distances importantes et atteindre des écosystèmes sensibles. Sous l'effet des oxydes d'azote (NOx) et du dioxyde de soufre (SO2), les pluies, neiges, brouillard deviennent plus acides et altèrent les sols et les cours d'eau (perte des éléments minéraux nutritifs). Ces apports engendrent un déséquilibre de l'écosystème. Cette transformation du milieu se traduit en général par un appauvrissement de la biodiversité puis par la perturbation du fonctionnement général des écosystèmes [11].

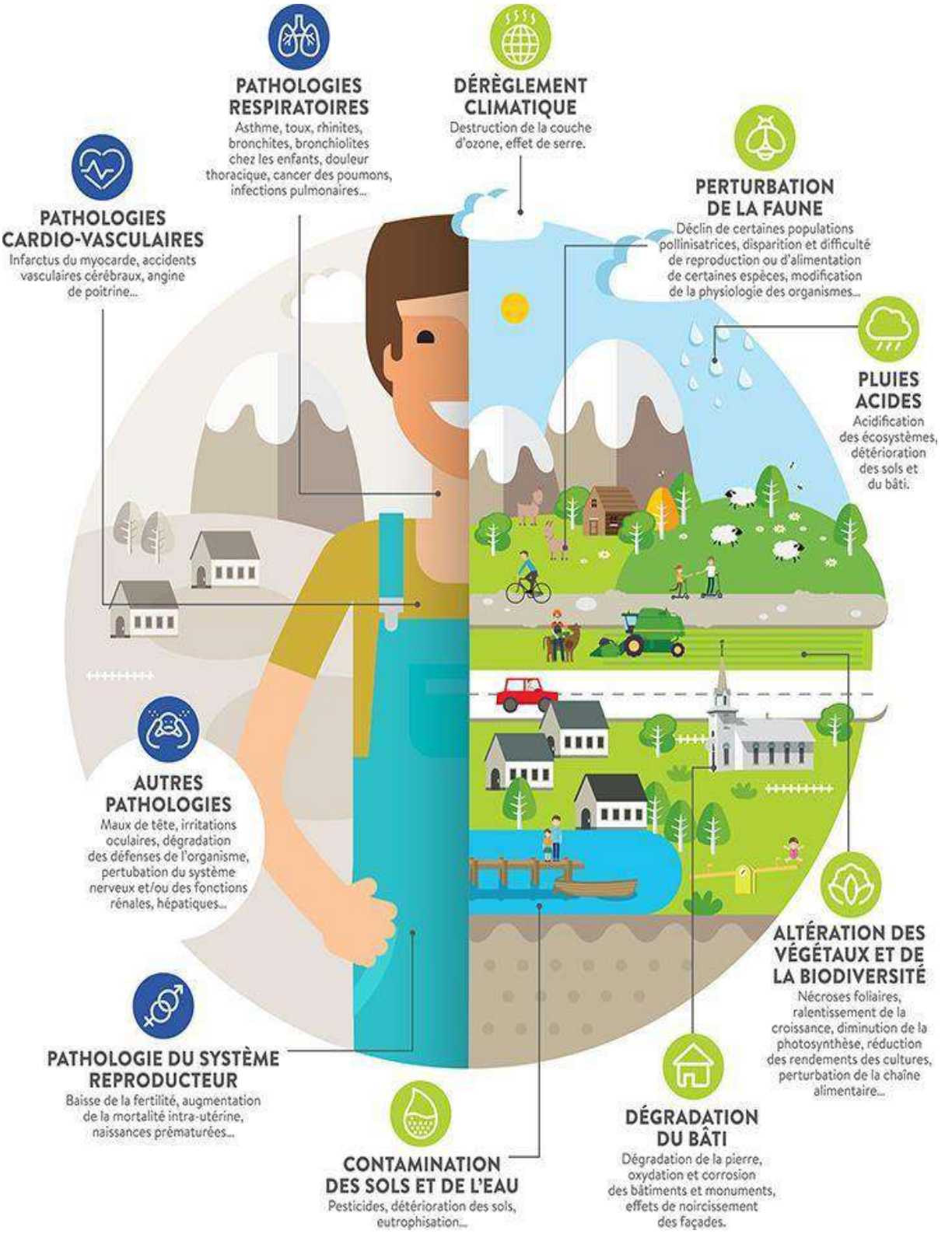


Figure 1.7 : les effets de pollution sur la santé et l'environnement [12].

4. Les gaz polluants :

4.1. **Définition :** Trop de n'importe quelle substance au mauvais endroit ou au mauvais moment est un polluant. Plus spécifiquement, la pollution atmosphérique peut être définie comme 'la présence de substances dans l'atmosphère, résultant des activités synthétiques ou des processus naturels, entraînant des effets nuisibles pour l'homme et pour l'environnement'. La pollution atmosphérique est un terme employé pour décrire tous les produits chimiques non désiré ou d'autres matériaux qui contaminent l'air que nous respirons ayant pour résultat la dégradation de la qualité de l'air [13].

4.1.1. **Monoxyde de carbone :** Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz sans couleur, inodore, toxique produit lorsque des carburants contenant du carbone sont brûlés où il y a trop peu d'oxygène. Il se forme également en raison de la brûlure des carburants à une température trop élevée. Il brûle dans l'air ou avec de l'oxygène avec une flamme bleue, et est légèrement plus léger que l'air.

4.1.2. **Les particules en suspension :** Les particules en suspension sont un mélange complexe des substances organiques et inorganiques, présentes dans l'atmosphère en tant que liquides et solides.

4.1.3. **Hydrogène sulfure :** très connu pour son odeur et pour sa toxicité très supérieure à SO2, le H2S est surtout produit par les usines de production de pâte à papier et par les unités des raffineries de pétrole.

4.1.4. **Plomb :** il est principalement émis par le trafic automobile. Autres sources de plomb ; la fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (cristal), etc.

4.1.5. **Les composés organiques volatils :** les composés organiques volatils (hydrocarbures, solvants...) proviennent notamment des sources mobiles et de procédés industriels tels que le raffinage du pétrole, le dégraissage des métaux, l'application de peintures et de vernis, l'imprimerie,... etc. Ils constituent une famille de polluants d'une forte diversité et d'une grande complexité [14].

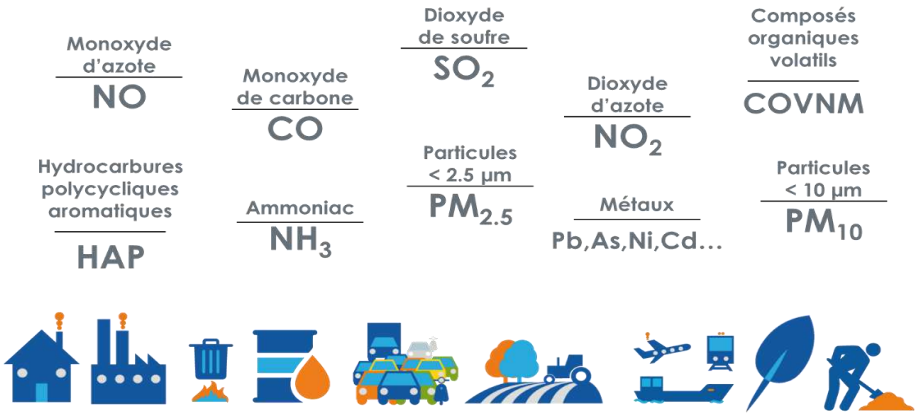


Figure 1.8 : les gaz polluants [15].

4.2. Emission des polluants :

On peut distinguer quatre grandes catégories de processus menant à l'émission de polluants atmosphériques ou de leurs précurseurs : la combustion, la volatilisation, des processus mécaniques (abrasion, érosion…) et des processus naturels (métabolisme de la végétation, éruptions volcaniques…).

* La combustion peut être le résultat d'une activité anthropique (transport, production d'électricité, incinération de déchets, chauffage…) ou d'un processus naturel (feux de forêts). La combustion mène à une production de chaleur qui peut être convertie si besoin est en une autre forme d'énergie (électrique, mécanique). Le processus de combustion implique la présence d'oxygène (obtenu de l'air qui contient environ 78% d'azote et 21% d'oxygène) et de carbone (qui est le constituent principal des combustibles : charbon, essence, gazole, bois…). Cette combustion a lieu à haute température, ce qui mène à l'oxydation du carbone et la dissociation de molécules d'oxygène (O2) et d'azote (N2) présentes dans l'air. Les réactions entre oxygène (O2, O) et azote (N2, N) mènent à la formation d'oxydes d'azote (NOx), principalement du monoxyde d'azote (NO), mais aussi une fraction (<10%) de dioxyde d'azote (NO2). L'oxydation complète du combustible mène au dioxyde de carbone (CO2), un gaz à effet de serre, et à de la vapeur d'eau (H2O). Cependant, le processus de combustion n'est pas mené à complétion et des composés carbonés non totalement oxydés sont générés lors de la combustion telle que le monoxyde de carbone (CO), le formaldéhyde (HCHO), des particules de suie (surtout des moteurs diesel ou des feux de biomasse), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des dioxines et furanes. Certains de ces composés sont des polluants et certains sont cancérogènes (formaldéhyde, particules de suie des moteurs diesel, certains HAP, les dioxines et furanes). Par ailleurs, les substances contenues dans le combustible sont émises lors de la combustion, souvent sous une forme oxydée résultant de transformations chimiques lors des processus de combustion à haute température en présence d'oxygène. Parmi les substances présentes dans le charbon, l'essence, le gazole et le fioul, on peut citer le soufre et des métaux [16].



Figure 1.9 : triangle de feu [17].

* La volatilisation de composés semi-volatils mène à leur transfert d'une phase liquide à une phase gazeuse qui peut alors se disperser dans l'atmosphère. La volatilisation affecte par exemple des hydrocarbures (pétrole, essence..) lors de leur stockage et des peintures et solvants lors de leur utilisation. Le mercure peut être naturellement émis sous forme élémentaire (donc très volatile) des sols et des océans. Par ailleurs, la réémission de polluants semi-volatils (par exemple certains polluants organiques persistants tels que des HAP et des pesticides) est un processus de volatilisation (effet sauterelle).

*Les processus mécaniques incluent des activités anthropiques telles que les activités de construction, de labourage et de certaines productions industrielles et des activités naturelles telles que l'émission de poussières et de sels marins sous l'action du vent. Par ailleurs, les transports sont une source importante d'émissions de particules à travers des processus tels que le freinage (abrasion des plaquettes de frein), le roulage (usure des pneus ou des roues métalliques) et la remise en suspension de poussières/particules déposées sur la voie.



Figure 1.10 : activité de construction [18].

*Les processus naturels autres que les précédents incluent par exemple le métabolisme de la végétation qui émet des composés organiques volatils dans l'atmosphère et les émissions liées aux volcans.

4.3. Les effets sur la santé humaine :

Les principaux polluants primaires ou secondaires atmosphériques d'origine anthropique (chauffages, processus industriels, trafic motorisé) qui peuvent altérer la santé humaine sont les suivants : S02, particules en suspension, CO, hydrocarbures et aldéhydes, NOx, 03 et autres oxydants photochimiques, Pb et autres métaux toxiques (Cd, etc.). Bien qu'agissant le plus souvent simultanément, d'où la difficulté, lorsqu'on effectue des études épidémiologiques, d'établir les relations «dose-réponse » pour un polluant (en ayant soin de tenir compte des facteurs de confusion possibles comme le tabagisme, etc.), on peut néanmoins dire que : S02 et dérivés (sulfates ou aérosols de H2S04). les particules en suspension, N02 et dérivés (nitrates) et 03 (+ autres oxydants photochimiques) affectent principalement les voies respiratoires ; HCHO, H2C=CH-CHO et PAN

sont aussi des irritants oculaires et des lacrymogènes (les deux derniers); CO et Pb produisent des effets toxiques sur les systèmes cardiovasculaire et nerveux en particulier. Certains HC tels que le benzène, les hydrocarbures aromatiques polycycliques «HAP>> dont le benzo[a]pyrène, et le formaldéhyde sont, dans un ordre décroissant, des substances potentiellement cancérigènes. Dans cette optique, les gaz d'échappement des moteurs diesel (surtout les suies qui peuvent aussi adsorber des HAP) seraient associés au cancer du poumon et de la vessie, alors que ceux provenant des moteurs à essence (contenant beaucoup moins de particules en suspension, mais autant de benzène) présenteraient un potentiel cancérigène moindre (21) et plus généralisé. Les études épidémiologiques les plus récentes ont permis de mettre en évidence les effets suivants de la pollution de l'air sur la santé :

a) les effets à court terme (ou aigus) comportant une diminution de la fonction pulmonaire, ainsi qu'une augmentation de l'irritation oculaire, de la capacité de réaction branchiale, des maux de tête, des symptômes respiratoires, des faux croup, de l'exacerbation de maladies chroniques des voies respiratoires, des crises d'asthme, de l'absentéisme scolaire et professionnel, des hospitalisations et de la mortalité journalière.

b) les effets à long terme (ou chroniques) comportant une diminution de la fonction pulmonaire et des intervalles sans symptômes, ainsi qu'une augmentation de la capacité de réaction branchiale, des bronchites chroniques, des symptômes chroniques des voies respiratoires, de la fréquence des cancers et de la mortalité globale.

5. Les espaces clos

5.1. **Définition des espaces clos :** Tout espace totalement ou partiellement fermé, notamment un réservoir, un silo, une cuve, une trémie, une chambre, une voûte, une fosse, un égout, un tuyau, une cheminée, un puits d’accès, une citerne de wagon ou de camion.



Figure 1.11 : espace clos [19].

5.2. Les dangers reliés aux espaces clos :

5.2.1. **Les dangers reliés à l'atmosphère :** Une grande partie des accidents, dont certains mortels, qui surviennent en espace clos sont reliés à une atmosphère déficiente en oxygène, à une explosion ou un incendie, ou encore à la présence de gaz ou de vapeurs toxiques. Ce sont donc les premiers dangers à évaluer lorsqu'on élabore une procédure de travail [20].

5.2.2. **Les autres dangers :** il existe de nombreux autres dangers qui doivent être considérés lors de l'élaboration de la procédure de travail et lors du travail dans un espace clos. Par exemple : Ecrasement, chute, mauvaise visibilité, bruit, radiation.

Chapitre02 :
Modèle physique et formulation mathématique

1. Introduction

Nous présentons dans cette partie un modèle physique et les équations fondamentales de la mécanique de fluide que nous utilisons doivent être complétées, en raison de caractère turbulent des phénomènes, par un modèle de turbulence.

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles -ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie.

Ensuite, nous faire une formulation mathématique des équations de Navier-stokes qui régissent le mouvement turbulence.

2. Modèle physique :

Nous avons un entrepôt de travail fermé d'hauteur 70 mètres qui contient quatre ateliers d'une hauteur de 15 mètres. L'air entre dans l'entrepot par la gauche d'une certaine vitesse et sort par la droite pour que la pression y soit P = 0 Pa. Nous étudions la propagation du gaz (Co) à l'intérieur de l'entrepôt à partir de quatre sources différentes, chacune séparément.

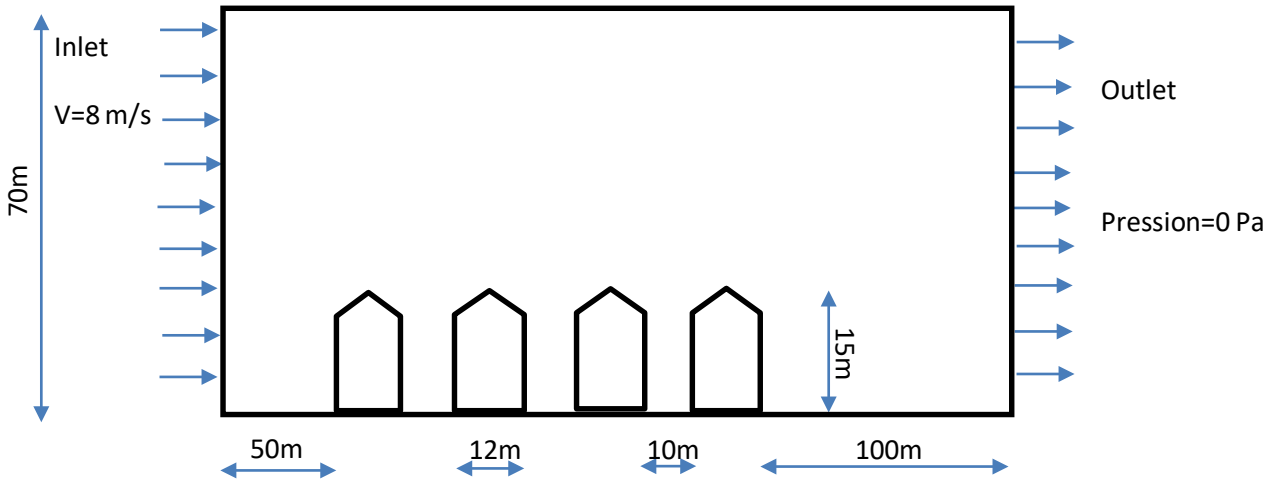


Figure 2.1 : Schéma montrant l'ensemble de l'entrepôt.

Cas 1: x= 40m

Nous étudions la propagation du gaz (Co) de la première source, qui se trouve à dix mètres du premier atelier.

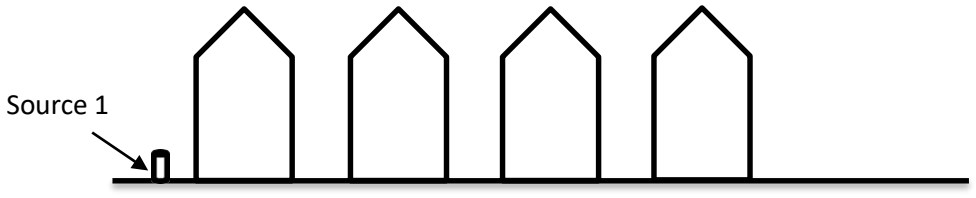


Figure 2.2 : diffusion de gaz de la première source.

Cas 2 : x=67m

Dans ce cas, la source de gaz se situe entre le premier et le deuxième atelier.

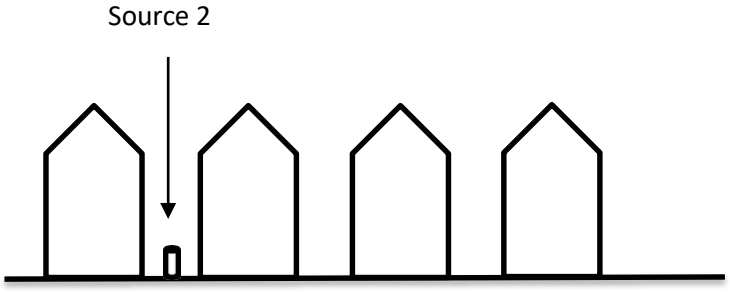


Figure 2.3 : Diffusion de gaz de la deuxième source.

Cas 3 : x=89m

La figure (2.4) représente la diffusion de gaz de la troisième source située entre le deuxième et le troisième atelier.

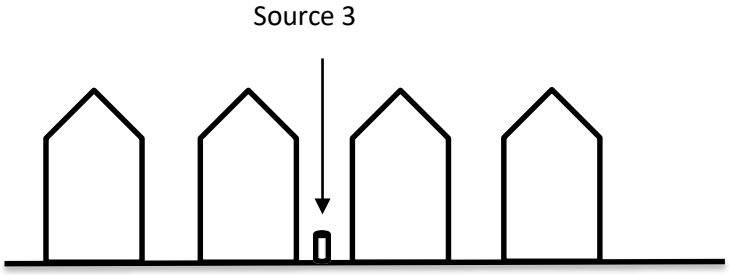


Figure2.4 : Diffusion de gaz de la troisième source.

Cas 4 : x=111m

Diffusion de gaz de la quatrième source et son effet sur le reste du l'entrepôt.

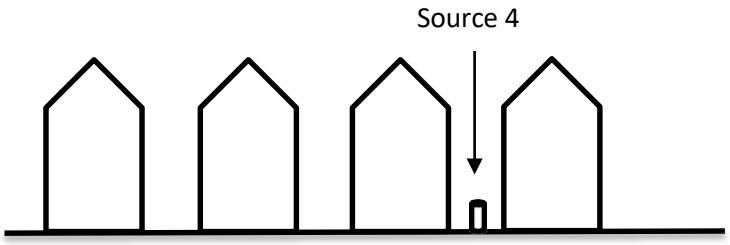


Figure2.5 : Diffusion de gaz de la troisième source.

3. Formulation mathématique

3.1. Les équations de Navier-Stokes incompressibles.

Pour un gaz parfait et dans le cas où l'on néglige l'action de la pesanteur, on doit résoudre le système d'équations suivant :

- ✓ Équation de continuité (ou équation de bilan de la masse).
- ✓ Équation de bilan de la quantité de mouvement (ou équations de Navier- Stokes).
- ✓ Équation de bilan de l'énergie.

La formulation différentielle générale de ces équations est :

❖ **Équation de continuité (ou équation de bilan de la masse) :**

De façon générale, le solveur de CFX résout l'équation de Navier-Stokes ainsi que les équations de conservation de la masse et de l'énergie. Ces équations sont résolues en coordonnées cartésiennes à trois dimensions (quatre dimensions si on compte le temps).

L'équation de conservation de la masse s'exprime sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}.(\rho \vec{U}) = S_{\mathrm{m}} \qquad (2.1)$$

Où $U\rightarrow$ est le vecteur vitesse du fluide et SM est le terme source de masse. Dans le cas où la masse de fluide est constante, SM prend une valeur nulle.

L'équation de Navier-Stokes peut être exprimée sous une forme générale (celle utilisée par CFX) par :

(2.3)

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \vec{\nabla}.(\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\vec{\nabla}\mathrm{p} + \vec{\nabla}.\vec{\tau} + \vec{\mathrm{SM}} \qquad (2.2)$$

$\vec{\tau}$ est l'Ou :

$$\vec{\nabla}.(\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x}(\rho \mathrm{UxUx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \mathrm{UyUx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \mathrm{UzUx}) \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho \mathrm{UxUy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \mathrm{UyUy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \mathrm{UzUy}) \\ \frac{\partial}{\partial x}(\rho \mathrm{UxUz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \mathrm{UyUz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \mathrm{UzUz}) \end{pmatrix} \qquad (2.4)$$

Où μ est la viscosité dynamique (en Pa. s) et δ est la matrice identité

$$\delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Et →SM le terme source de l'impulsion (moment Um). Ux est la composante de la vitesse dans la direction x et ainsi de suite pour Uy et Uz.

Cette équation vectorielle nous donne trois équations scalaires, une pour chaque direction spatiale. Le solveur de CFX résout donc les trois équations aux dérivées partielles ci-dessous :

➢ **Selon OX :**

$$\frac{\partial(\rho U_x)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho U_y U_x)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z U_x)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\left(\frac{4}{3}\frac{\partial U_x}{\partial x}-\frac{2}{3}\frac{\partial U_y}{\partial y}-\frac{2}{3}\frac{\partial U_z}{\partial z}\right)$$
$$+\frac{\partial}{\partial y}\mu\left(\frac{\partial U_x}{\partial y}+\frac{\partial U_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\mu\left(\frac{\partial U_x}{\partial z}+\frac{\partial U_z}{\partial x}\right)+S_{Mx} \quad (2.5)$$

➢ **Selon OY :**

$$\frac{\partial(\rho U_y)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_y)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho U_y U_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z U_y)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\left(\frac{\partial U_x}{\partial y}+\frac{\partial U_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\mu\left(\frac{2}{3}\frac{\partial U_x}{\partial x}+\right.$$
$$\left.\frac{4}{3}\frac{\partial U_y}{\partial y}-\frac{2}{3}\frac{\partial U_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\mu\left(\frac{\partial U_y}{\partial z}-\frac{\partial U_z}{\partial y}\right)+S_{My} \quad (2.6)$$

➢ **Selon OZ :**

$$\frac{\partial(\rho U_z)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_x U_z)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho U_y U_z)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z U_z)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\left(\frac{\partial U_x}{\partial z}+\frac{\partial U_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\mu\left(\frac{\partial U_y}{\partial z}+\right.$$
$$\left.\frac{\partial U_z}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\mu\left(-\frac{2}{3}\frac{\partial U_x}{\partial x}-\frac{2}{3}\frac{\partial U_y}{\partial y}+\frac{4}{3}\frac{\partial U_z}{\partial z}\right)+S_{Mz} \quad (2.7)$$

Le solveur de CFX est basé sur la pression. Les équations sont donc discrétisées de façon à résoudre les équations en fonction de la pression, et la densité est plutôt calculée dans le post-traitement.

Lorsque les effets de la viscosité sont négligeables, alors l'équation de Navier- Stokes tend vers l'équation d'Euler.

Les équations présentées plus haut sont discrétisées de façon implicite, c'est-à-dire que le passage d'un pas de temps à un autre se fait de façon itérative sur des équations non-linéaires. En mode transitoire, deux schémas transitoires sont disponibles, soit Euler en amont au premier et au second ordre ("First Order BackwardEuler" et "Second Order Backward Euler"). Il est possible d'imposer des pas de temps constants tout au long du calcul, ou de les rendre adaptatifs selon certains critères choisis.

Le schéma d'advection, trois options sont possibles. Le plus robuste, mais aussile moins précis, est le schéma au premier ordre en amont "Up Wind". Ce schéma cause de la diffusion numérique, ce qui a pour effet d'étaler les variations des propriétés thermodynamiques aux endroits où il y a une présence de forts gradients, comme des chocs. Par contre, il peut être utile pour obtenir une première estimation d'un cas en régime permanent qui serait capricieux envers les schémas plus précis mais moins robustes. Le schéma "Specified Blend Factor" permet de choisir l'amplitude du facteur de correction au deuxième ordre servant à corriger les effets de la diffusion numérique.

Par exemple, un facteur de 0 sera équivalent au schéma "Upwind", et un facteur de 1 donnera un schéma pleinement au deuxième ordre. Le schéma "High Resolution" calcule pour chaque nœud la diffusion numérique. Le calcul de ce facteur est basé surles gradients autour du nœud. Le terme de correction de la diffusion numérique permetune meilleure définition des chocs présents dans un écoulement. Par contre, il induit des oscillations numériques non- physiques dans les solutions autour des chocs.

Ainsi, l'incompressibilité d'un fluide ($\partial\rho/\partial$ t = 0)

- **Équation de bilan de la quantité de mouvement.**

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\overline{\overline{grad}}).\vec{u} = -\overrightarrow{grad}\, p + div\left(2\mu\overline{\overline{D}}\right) - \frac{2}{3}\overrightarrow{grad}(\mu\, div\, \vec{u}) \qquad (2.8)$$

- Selon OX :

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) + (\rho - \rho_0)g_x \qquad (2.9)$$

- Selon OY :

$$\rho(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right) + (\rho - \rho_0)g_y \qquad (2.10)$$

- Selon OZ :

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right) + (\rho - \rho_0)g_z \qquad (2.11)$$

Où les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont donnés par :

$$\mu = \tau_{xy} = \mu\left[(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right]$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu\left[(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right]$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu\left[(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right]$$

$$\tau_{xx} = \mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right] ; \tau_{yy} = \mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right] ; \tau_{zz} = \mu\left[2\frac{\partial w}{\partial z}\right] .$$

- **Équation de bilan de l'énergie.**

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla}.[(\rho e.P)\vec{v}] = \vec{\nabla}.(\bar{\tau}.\vec{v}) + \rho\vec{f}. - \vec{\nabla}.(\vec{q}) + r \qquad (2.12)$$

Dans ces équations :

- t représente le temps (unité SI : s) ;
- ρ désigne la masse volumique du fluide (unité SI : $kg \cdot m^{-3}$) ;
- v = (v1, v2, v3) désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : $m \cdot s^{-1}$) ;
- P désigne la pression (unité SI : Pa) ;
- r = ($\bar{r}$i, j) i, j est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI : Pa) ;
- f désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI : $N \cdot kg^{1}$)
- e est l'énergie totale par unité de masse (unité SI : $J \cdot kg^{-1}$) ;
- q est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI : $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) ;
- r représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI: $J \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$).

Remarque :

L'énergie totale peut se décomposer en énergie interne u et en énergie cinétique selon:

$$e = u + \frac{1}{2}\vec{v}.\vec{v} = u + \frac{1}{2}v^2 \qquad (2.13)$$

- L'opérateur nabla, qui s'exprime sous la forme x1 x2 x3 :

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x1}, \frac{\partial}{\partial x2}, \frac{\partial}{\partial x3}\right) \qquad (2.14)$$

En coordonnées cartésiennes, est un opérateur de dérivation spatiale du 1er ordre. Les opérateurs gradient, divergence et laplacien peuvent s'écrire à l'aide de cet opérateur :

- $div\vec{a} = \vec{\nabla}.\vec{a}$
- $\overrightarrow{grad}\, A = \vec{\nabla}\,\vec{a}$
- $\Delta A = \vec{\nabla}.(\vec{\nabla} A) = \nabla^2 A$

En coordonnées cartésiennes (x1, x2, x3), les équations de conservation s'écrivent :

- **Équation de continuité**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \qquad (2.15)$$

- **Équation de bilan de la quantité de mouvement (i=1, 2,3)**

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] + S_M \qquad (2.16)$$

- **Équation de bilan d.**

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \sum_{i=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_i}[(\rho e + p)v_i] = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{i,j} v_j) + \sum_{i=1}^{3} \rho f_{iv_i} - \sum_{i=1}^{3} \frac{\partial \dot{q}_i}{\partial x_i} + r \qquad (2.17)$$

3.2. Fluide newtonien, hypothèse de Stokes :

En première approximation, pour de nombreux fluides usuels comme l'eau et l'air, le tenseur des contraintes visqueuses est proportionnel à la partie symétrique du tenseurdes taux de déformation (hypothèse du fluide newtonien) et le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température (loi de Fourier), c'est-à-dire :

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\,[(\vec{\nabla} \otimes \vec{v}) + (\vec{\nabla} \otimes \vec{v})^t] + \eta(\vec{\nabla}.\vec{v})\,\bar{\bar{I}} \qquad (2.18)$$

$$\vec{q} = -\lambda\,\vec{\nabla}T \qquad (2.19)$$

Où :

- μ désigne la viscosité dynamique du fluide (unité SI : Po (Poiseuille),1 Po = 0,1 Pa·s) ;
- η désigne la viscosité de volume du fluide (unité SI : Po) ;
- $\bar{\bar{I}}$ désigne le tenseur unité ;
- λ désigne la conductivité thermique du fluide (unité SI : $W.K^{-1}.m^{-1}$) ;
- T désigne la température (unité SI : K).

Les viscosités dynamiques et de volume sont supposées constants. L'ensemble desfluides pour

lesquels cette hypothèse est vérifiée sont appelés fluides newtoniens.

On lui adjoint généralement l'hypothèse de Stokes :

$$3\eta + 2\mu = 0 \qquad (2.20)$$

Cette hypothèse n'est vraie que pour des fluides simples comme l'eau, l'air et des gaz comme le méthane.

On peut alors réécrire l'équation de quantité de mouvement sous la forme :

$$\rho\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v}\right] = -\vec{\nabla}p + \mu\left[\nabla^2\vec{v} + \frac{1}{3}\vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{v})\right] + \rho\vec{f} \qquad (2.21)$$

Remarque : De nombreux fluides complexes, tels que les polymères, les hydrocarbures lourds, le miel, ou encore la pâte de dentifrice, ne vérifient pas ces hypothèses : on recourt alors à d'autres lois de comportement visqueux, dites non newtoniennes (par exemple ; la loi du fluide de Bing Ham). La science chargée d'étudier les relations entrecontrainte et déformation pour de tels fluides s'appelle la rhéologie.

3.3. Expression pour les écoulements de fluides compressibles :

L'écoulement d'un fluide est dit incompressible lorsque l'on peut négliger ses variations de masse volumique au cours du temps. Cette hypothèse est vérifiée pourl'eau liquide et les métaux en fusion. Elle est aussi vérifiée pour les gaz lorsque le nombre de Mach Maest faible. En général, on considère l'écoulement incompressible lorsque Ma<0,3. Dans le cas contraire, c'est-à-dire pour un écoulement compressible, on adjoint pour fermer le système une équation d'état dufluide, de la forme :

$$f(p, \rho, T) = 0 \quad (2.22)$$

Pour un gaz parfait, cette équation d'état s'écrit:

$$p = \rho\frac{R}{M}T \qquad (2.23)$$

où R désigne la constante des gaz parfaits et M la masse molaire du fluide.

Ainsi, en négligeant les pertes de chaleur par rayonnement, pour un écoulement compressible de fluide visqueux newtonien vérifiant l'hypothèse de Stokes et la loi desgaz parfaits, on obtient un système de 6 équations à 6 inconnues $\rho, \vec{v}, p$ et T

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}.(\rho\vec{v}) = 0 \qquad (2.24)$$

$$\rho\left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{\nabla})\,\vec{v}\right] = -\vec{\nabla}p + \mu\left[\nabla^2\vec{v} + \frac{1}{3}\vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{v})\right] + \rho\vec{f} \qquad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla}.[(\rho e + p)\vec{v}] = \vec{\nabla}.(\bar{\bar{\tau}}.\vec{v}) + \rho\vec{f}.\vec{v} + \vec{\nabla}.(\lambda\vec{\nabla}T) \quad (2.26)$$

$$p = \rho\frac{R}{M}T \quad (2.27)$$

L'énergie totale par unité de masse e est reliée à la pression, la masse volumique età la vitesse par l'équation :

$$p = (\gamma - 1)\rho(e - \frac{1}{2}v^2) \quad (2.28)$$

Où γ désigne l'exposant isentropique du gaz parfait.

3.4. Expression pour les écoulements de fluides incompressibles

Pour un fluide visqueux newtonien et lorsque l'écoulement est incompressible, l'équation de l'énergie est découplée des équations de continuité et de quantité de mouvement, c'est -à- dire qu'on peut déterminer la vitesse et la pression indépendamment de l'équation de l'énergie. L'expression des équations de continuité et de quantité de mouvement sont considérablement simplifiées. On obtient alors :

- **Équation de continuité appelée alors équation d'incompressibilité**

$$\vec{\nabla}.\vec{v} = 0 \quad (2.29)$$

Équation de bilan de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v} = -\frac{1}{2}\vec{\nabla}p + \nu\nabla^2\vec{v} + \vec{f} \quad (2.30)$$

Où $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ désigne la viscosité cinématique du fluide (unité SI : $m^2.s^{-1}$) et $(\vec{v}.\vec{\nabla})\vec{v}$ est le terme *de convection*.

3.4.1 Expression en coordonnées cartésiennes (x, y, z).

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.31)$$

Et

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + f_x \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + f_y \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + f_z \quad (2.34)$$

3.4.2. Expression en coordonnées cylindriques (r, ∅, z).

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial u_\phi}{\partial \phi}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0 \qquad (2.35)$$

Et

$$\frac{\partial u_r}{\partial t}+u_r\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{u_\phi}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \phi}+u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}-\frac{u_\phi^2}{r} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}+\nu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_r}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}-\frac{u_r}{r^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial u_\phi}{\partial \phi}\right]+f_r \qquad (2.36)$$

$$\frac{\partial u_\phi}{\partial t}+u_r\frac{\partial u_\phi}{\partial r}+\frac{u_\phi}{r}\frac{\partial u_\phi}{\partial \phi}+u_z\frac{\partial u_\phi}{\partial z}+\frac{u_r u_\phi}{r} = -\frac{1}{\rho r}\frac{\partial p}{\partial \phi}+\nu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_\phi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 u_\phi}{\partial z^2}+\frac{2}{r^2}\frac{\partial u_r}{\partial \phi}-\frac{u_\phi}{r^2}\right]+f_\phi \qquad (2.37)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t}+u_r\frac{\partial u_z}{\partial r}+\frac{u_\phi}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \phi}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial \phi^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right]+f_z \qquad (2.38)$$

4. La Turbulence :

La turbulence est un phénomène présent de manière très facilement visible dans la nature :

- Dans l'air : les rafales de vent, les mini-tornades dans le désert, le panache de fumée des grandes cheminées, turbulence atmosphérique (tourbillons de taille > 1000 km) ...
- Dans l'eau : le lait dans le café, les remous dans les rivières....
- Dans la mer : le Gulf Stream.
- Dans la terre : le mouvement des plaques continentales.
- Dans l'espace : l'atmosphère externe de Jupiter.

Il est également très présent dans les écoulements industriels

4.1 Les effets de la turbulence:

✓ Effets positifs : l'augmentation du mélange permet d'améliorer la combustion par exemple, d'améliorer la portance des avions, de réduire la température .

✓ Effets négatifs : diffusion de la pollution D'autre part, certaines grandeurs macroscopiques sont bien reproductibles. Par exemple:

- traînée et portance d'une voiture dans une soufflerie donnée.
- débit d'une conduite à haut Reynolds.

•puissance d'un moteur à combustion.

•température maximale des disques de frein.

•durée de persistance du sillage d'un avion de ligne.

•portance et traînée d'un avion**.**

4.2 Les modèles Turbulence.

4.2.1 Le modèle k-ε.

Le modèle k-ε standard qui se base sur le concept bousinesq (1977) les termes descontraintes de Reynolds sont [21] :

$$-\overline{\rho u_i u_j} = 2\mu_t s_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$$ Est le tenseur de Reynolds

$$\mu_t = \rho \nu_t = pC_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$ La Viscosité turbulente

Avec $C\mu = 0{,}09$

L'énergie cinétique turbulent est défini par :

$$K = \frac{1}{2}\overline{u_i u_i} = \frac{1}{2}\left(\overline{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}\right)$$

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

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i \partial u_i}{\partial x_j \partial x_j}}$$

- **Coefficient du modèle k-ε**

L'adaptation des constants standards du modèle. Rend le système d'équationopérationnel. Elles sont réunies dans le tableau

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.29	1	1.3

Tableau 2-1 : valeurs des constants du modèle k-ε [22].

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

4.2.2 Modèle RNG k-ε :

Le modèle RNG, développé par le groupe de normalisation [23] consiste en une estimation au cours du calcul de la constante **C**ε1, remplacée dans l'équation de dissipation par **C**'ε1. Cette expression ajoute un terme fonction du taux de déformationη à l'équation du taux de dissipation le rendant ainsi moins diffusif.

$$C'_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 1} - \frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta\eta^3}$$

Avec :

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{\frac{P}{\eta_t}}$$

Les constantes du modèle RNG ont pour valeur :

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_ε	η_0	β
0.085	1.42	1.68	0.7179	4.38	0.015

Tableau 2.2 : constantes du modèle RNG k-ε

6. Présentation de code ANSYS-CFX :

CFX est un nom générique qui regroupe un ensemble de codes de CFD d'usage universel capables de traiter des écoulements tridimensionnels complexes. Il comprend aussi des logiciels de génération de maillage, de création de géométrie ou d'importation depuis la CAO.

Le code de calcul ANSYS-CFX utilise une méthode couplée où les équations dynamiques (u,v,w et p) sont résolues comme une équation unique. Cette méthode utilise une approche entièrement pour chaque pas de temps. Dans le cas d'unécoulement stationnaire, le pas de temps se comporte comme un paramètre d'accélération pour rendre la solution stationnaire convergente et plus au moins réelle.

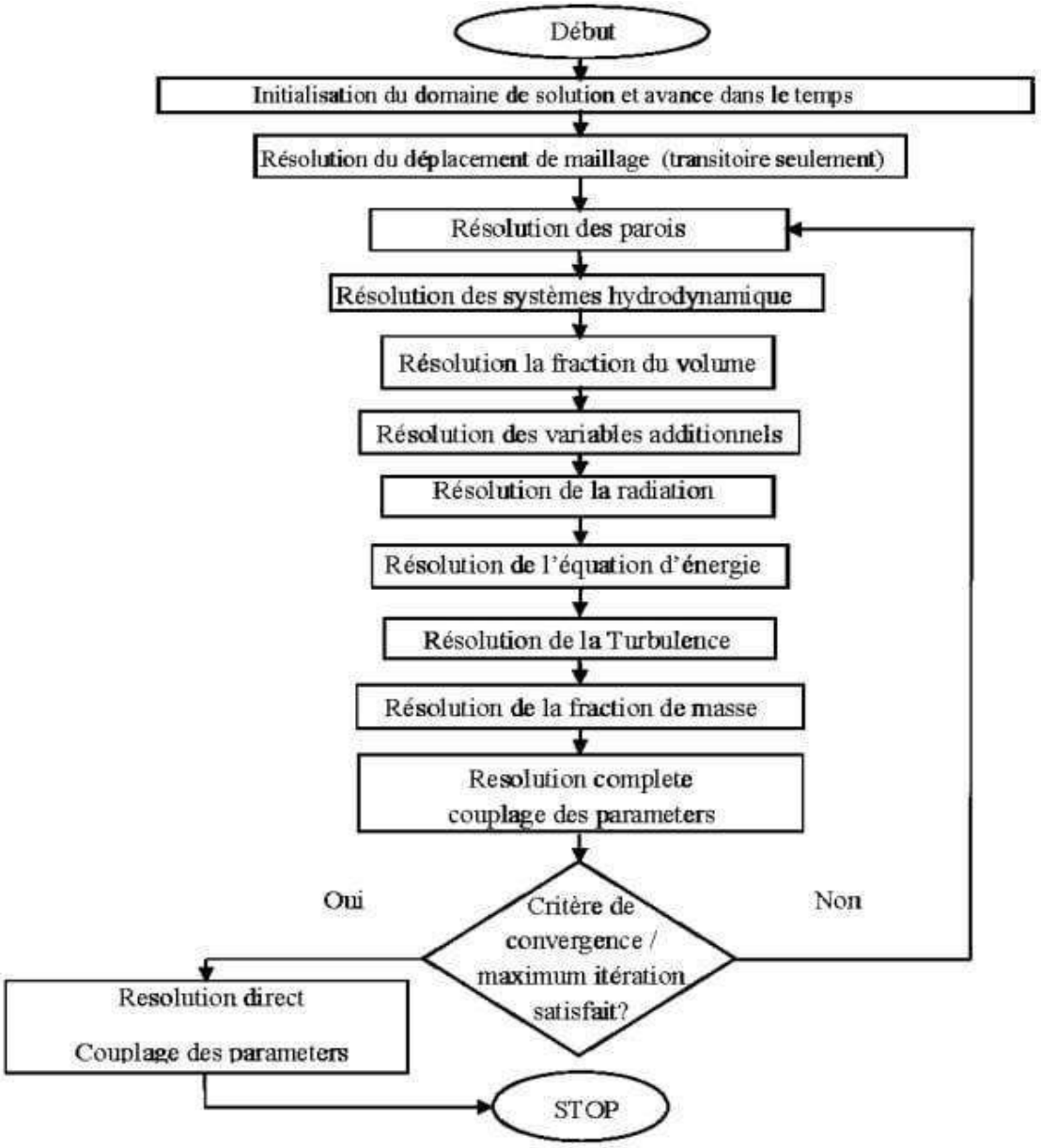


Figure 2.6 : Organigramme général de calcul du code ANSYS-CFX [24]

Chapitre 03 : Résultats et Discussions

1. Introduction :

Dans ce chapitre on a étudié l'évolution de la distribution de chacun des : fraction volumique, la température, la pression, la vitesse et les lignes de courant d'après les différentes distances de la source.

2. Interprétations de résultats :

2.1. Evolution de la pression (cas1):

Le contour suivant représente la répartition de la pression à l'intérieur de l'entrepôt pour que la pression soit élevée au fond de l'entrepôt.

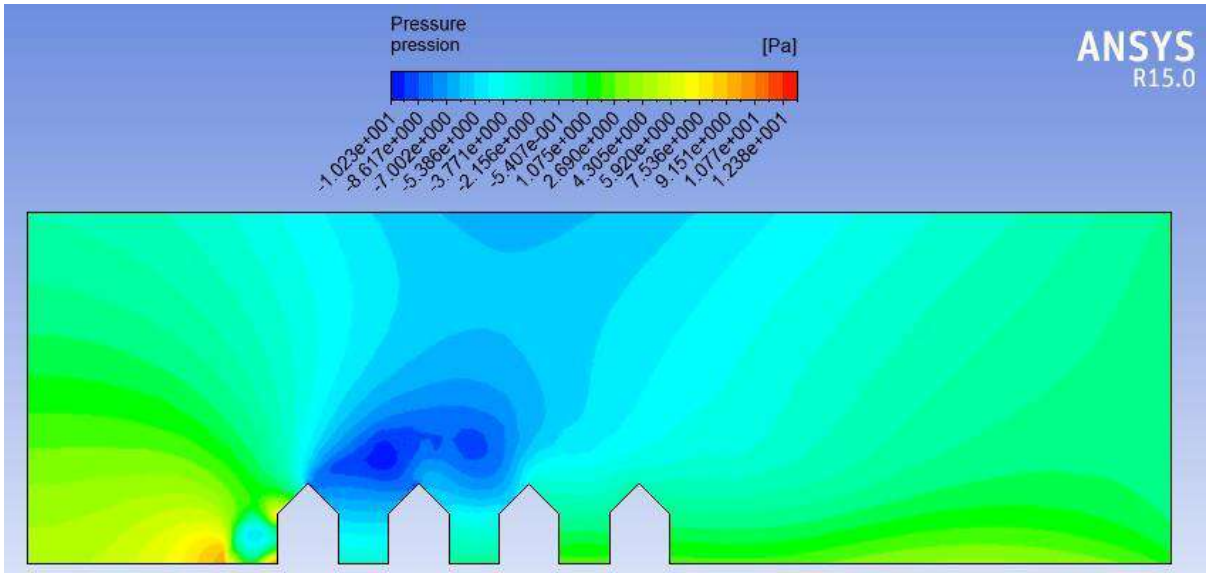


Figure 3.1 : contours de la variation de la pression (cas1).

2.2. Evolution de la pression (cas2):

On remarque sur la figure suivante que la pression monte dans les côtés de l'entrepôt et est faible au milieu.

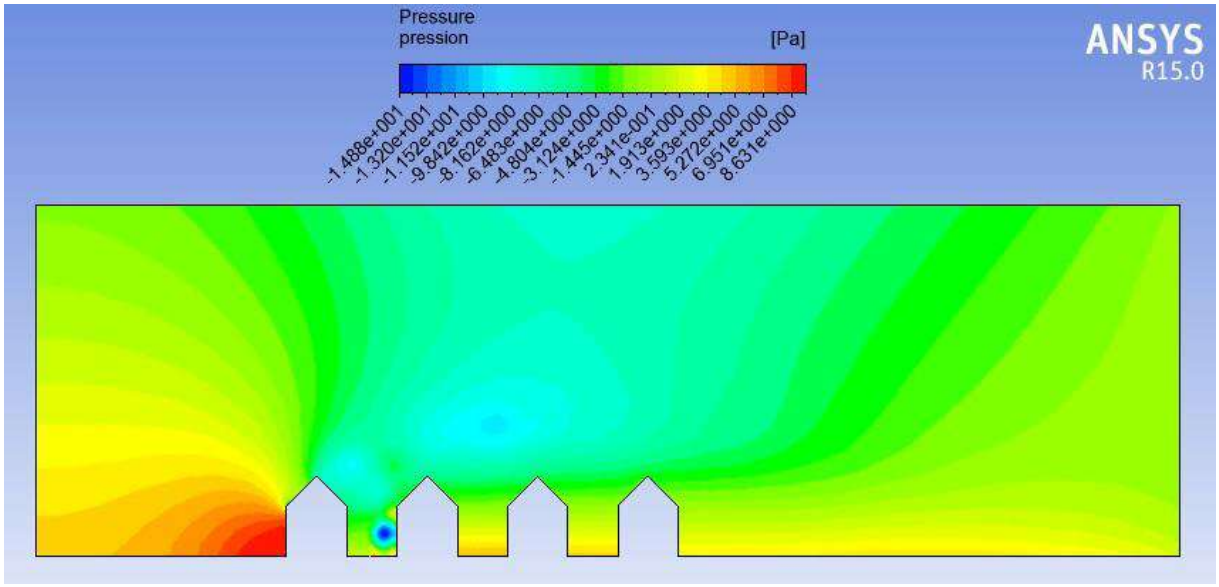


Figure 3.2 : contours de la variation de la pression (cas2).

2.3. Evolution de la pression (cas3):

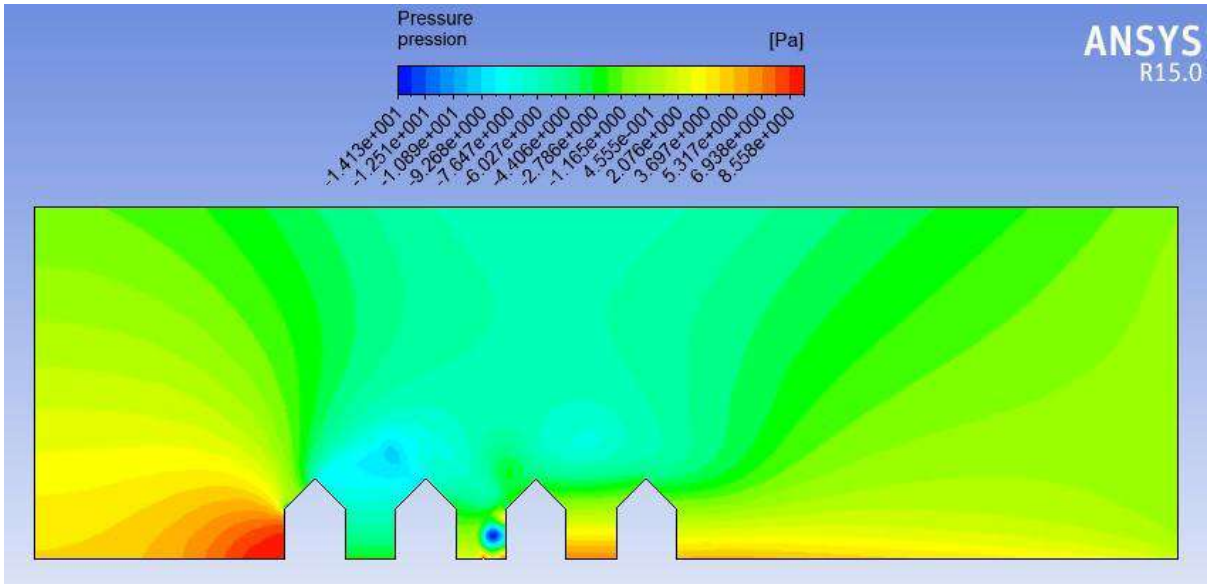


Figure 3.3 : contours de la variation de la pression (cas3).

2.4. Evolution de la pression (cas4) :

La figure 3.4 montre une différence de distribution de pression, on remarque que la pression est élevée dans la région de couleur rouge et diminue dans la région de couleur bleue

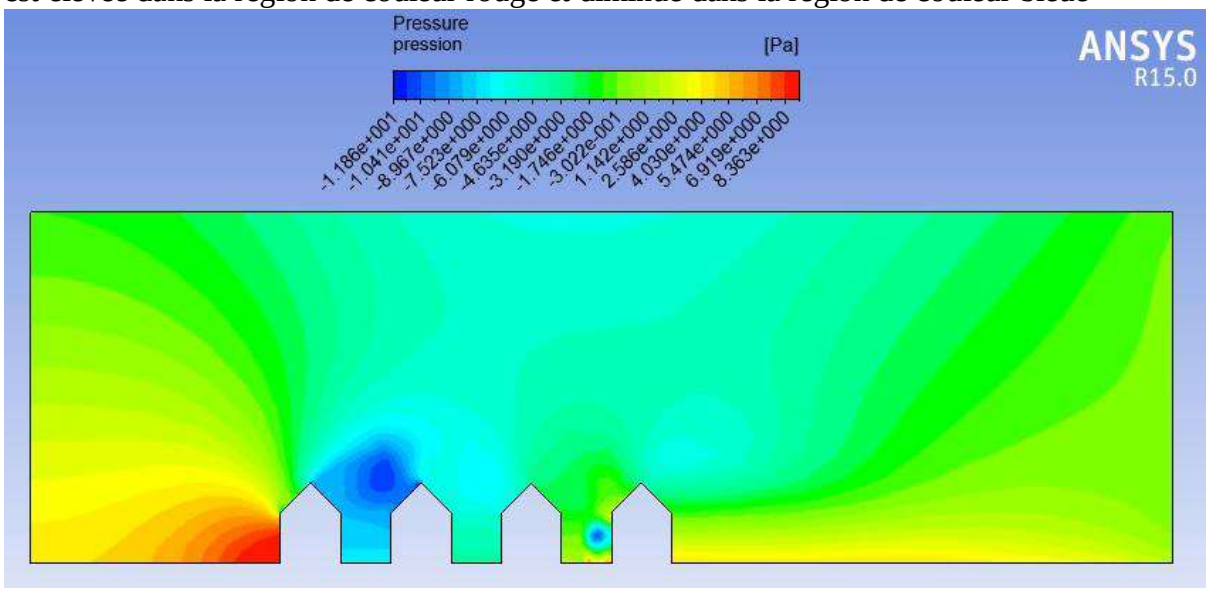


Figure 3.4 : contours de la variation de la pression (cas4)

2.5. Evolution de la vitesse (cas1) :

La figure 3.5 représente la variation de la vitesse, D`après la figure on remarque que la vitesse atteint son maximum devant le début de la source v=6 m/s.

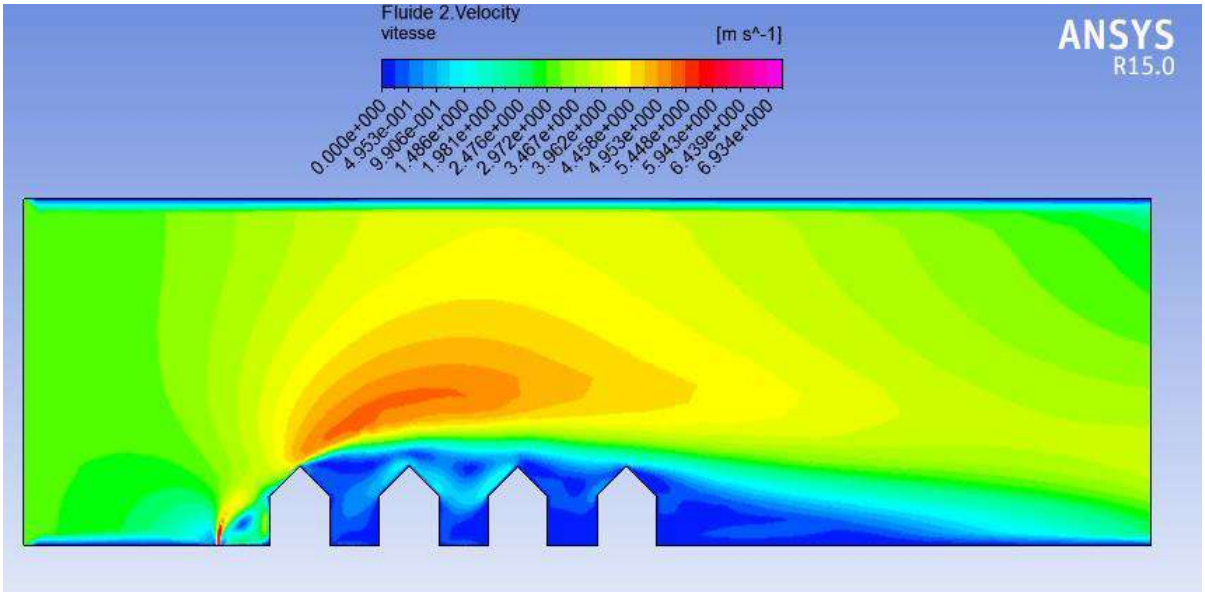


Figure 3.5 : contours de la variation de la vitesse (cas1)

2.6. Evolution de la vitesse (cas2) :

La figure suivante montre la variation de la vitesse pour qu'elle augmente au-dessus des ateliers.et c'est quasi constant au niveau de l'atelier.

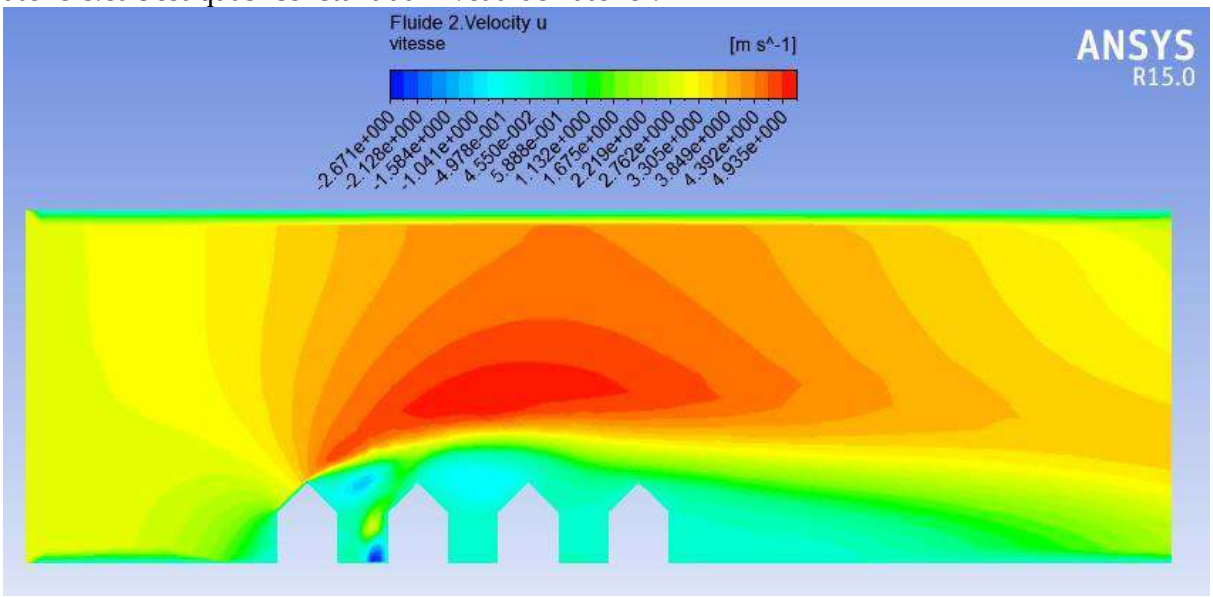


Figure 3.6 : contours de la variation de la vitesse (cas2).

2.7. Evolution de la vitesse (cas3):

La figure 3.7 représente la variation de vitesse et on note la même observation avec la figure précédente.

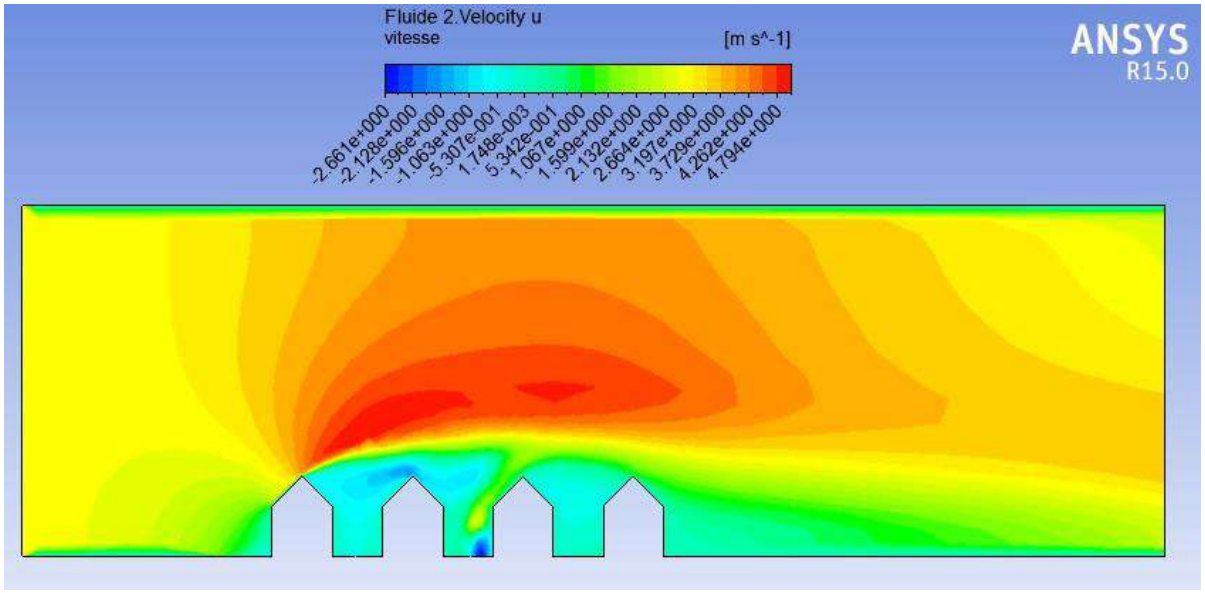


Figure 3.7 : contours de la variation de la vitesse (cas3).

2.8. Evolution de la vitesse (cas4):

La figure 3.8 montre la variation de vitesse, on remarque que la valeur maximale est v=4m/s au-dessus de la surface de l'atelier.

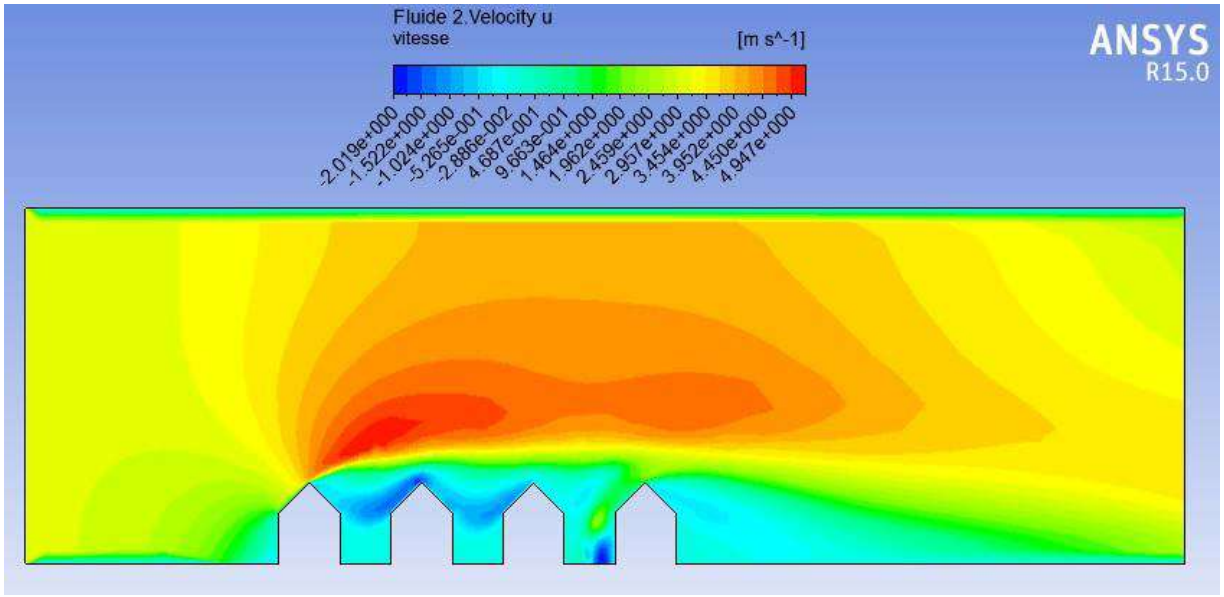


Figure 3.8 : contours de la variation de la vitesse (cas4).

2.9. Evolution de la température (cas1):

La figure 3.9 représente la variation de la température, on note que la température est à son maximum dans le cratère amont.

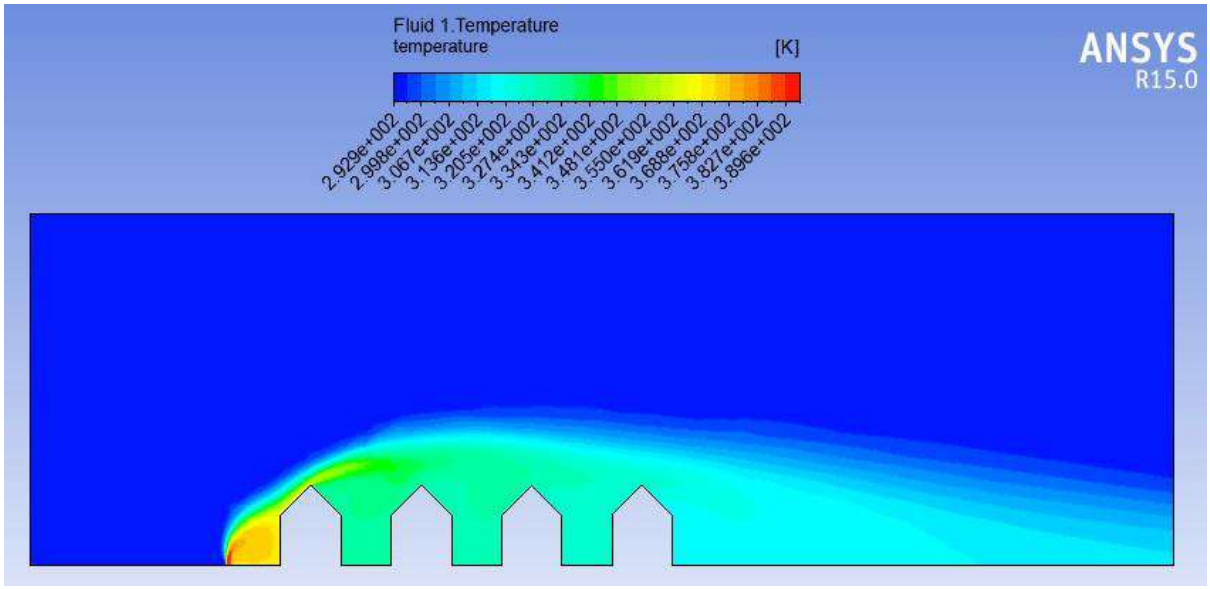


Figure 3.9 : contours de la variation de la température (cas1).

2.10. Evolution de température (cas2):

La figure 3.10 représente la variation de la température, on remarque que la température est élevée et concentrée à côté du deuxième atelier.

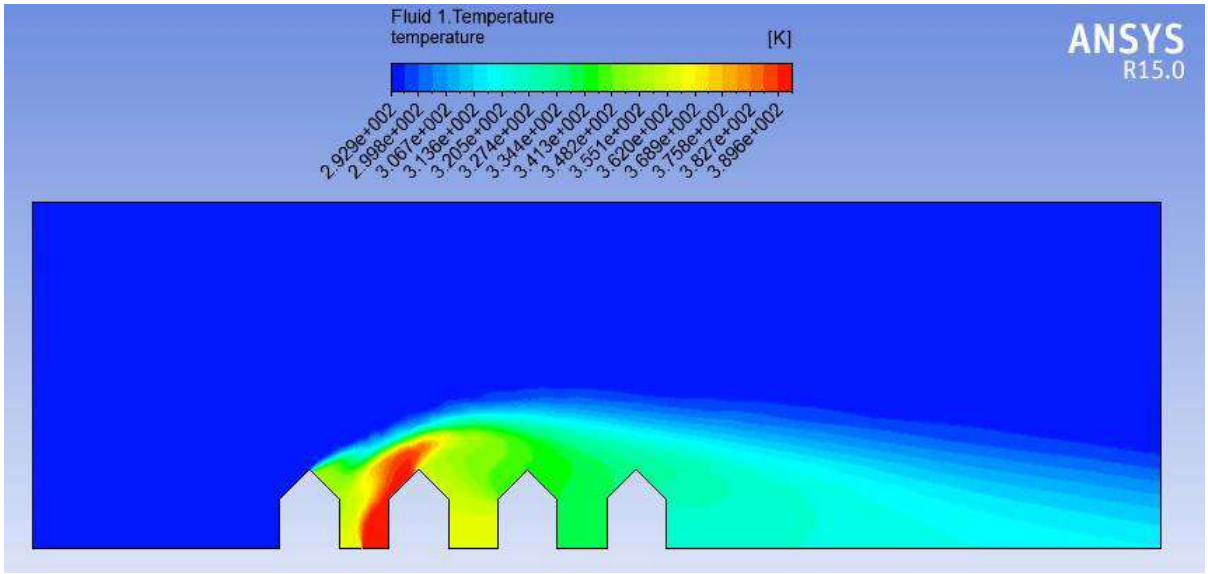


Figure 3.10 : contours de la variation de la température (cas2).

2.11. Evolution de la température (cas3):

La figure 3.11 représente la variation de la température, on remarque que la température est élevée et concentrée à côté du troisième atelier.

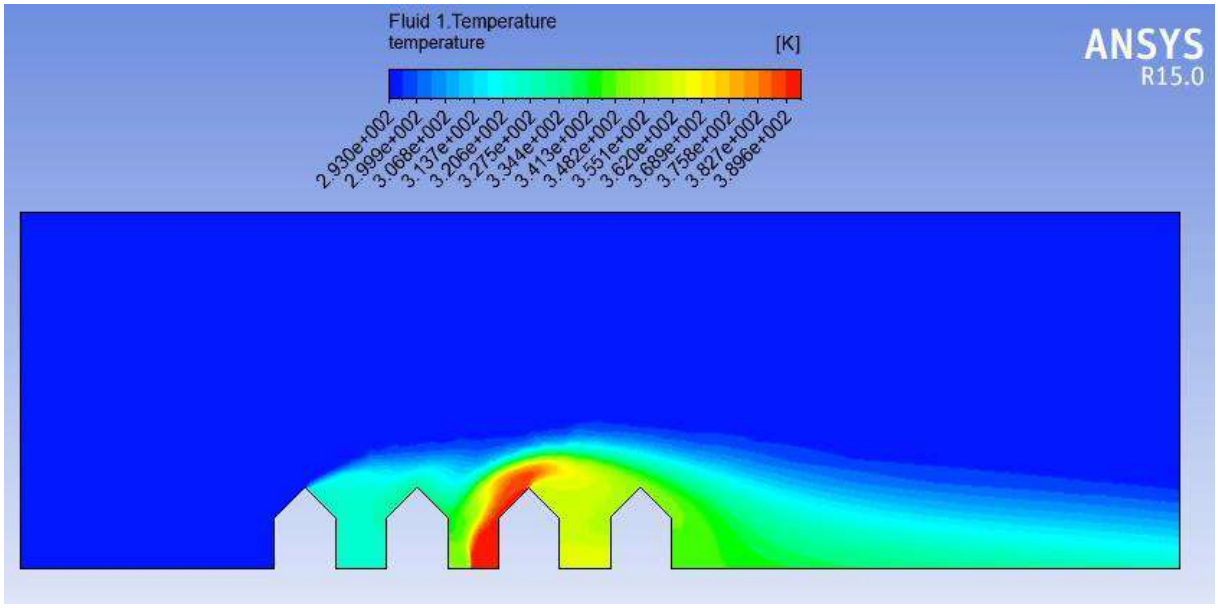


Figure 3.11 : contours de la variation de la température (cas3).

2.12. Evolution de la température (cas4):

D'après la figure 2.13, on peut voir que la chaleur du gaz n'atteint pas du tout les premier et deuxième ateliers.

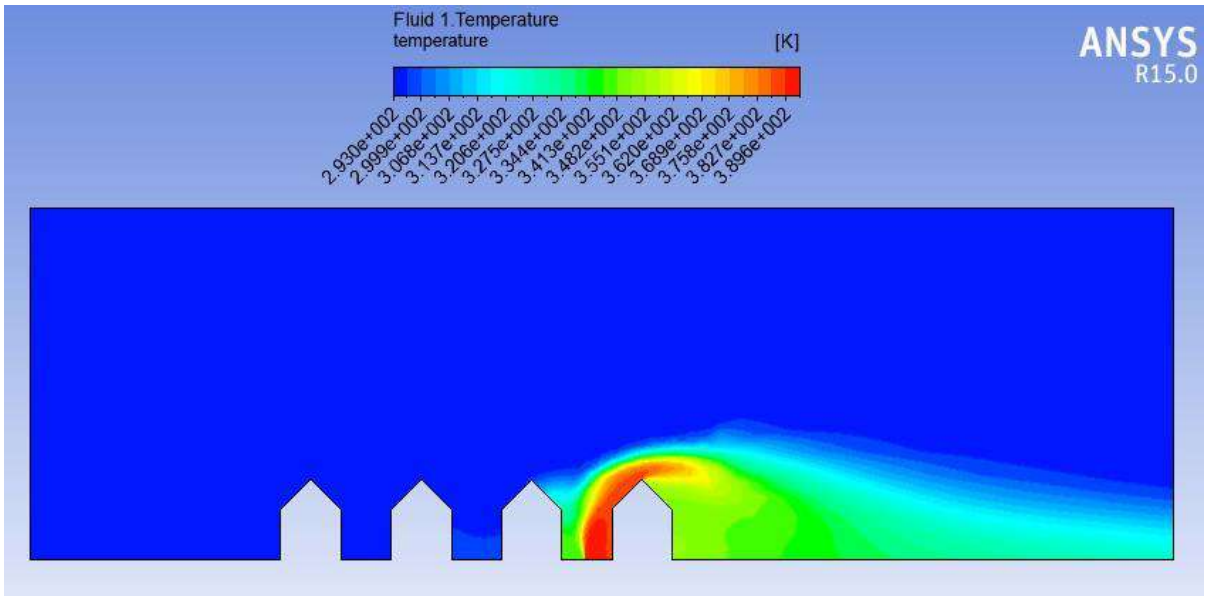


Figure 3.12 : contours de la variation de la température (cas4).

2.13. Evolution de la fraction volumique (CO) (cas1):

La figure 3.13 Montre l'évolution de la fraction volumique (CO) dans la 1ère source, on observe une grande quantité de fraction volumique CO dans la sortie de la source.

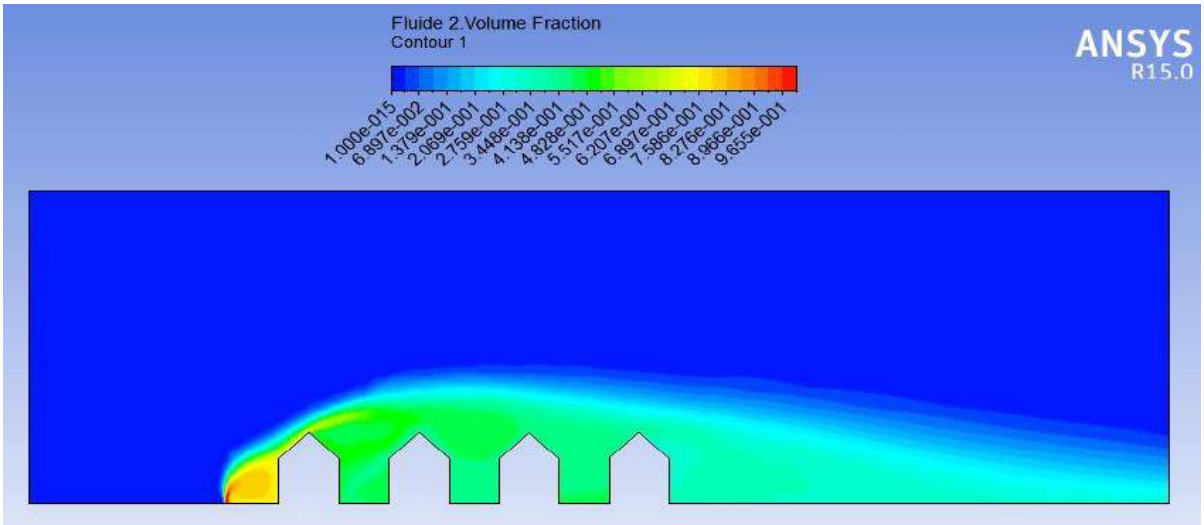


Figure 3.13 : contours de la variation de la fraction volumique (cas1).

2.14. Evolution de la fraction volumique (CO) (cas2):

La figure 3.14 Montre l'évolution de la fraction volumique (CO) dans la 2eme source, on observe une grande quantité de fraction volumique CO dans la sortie de la source.

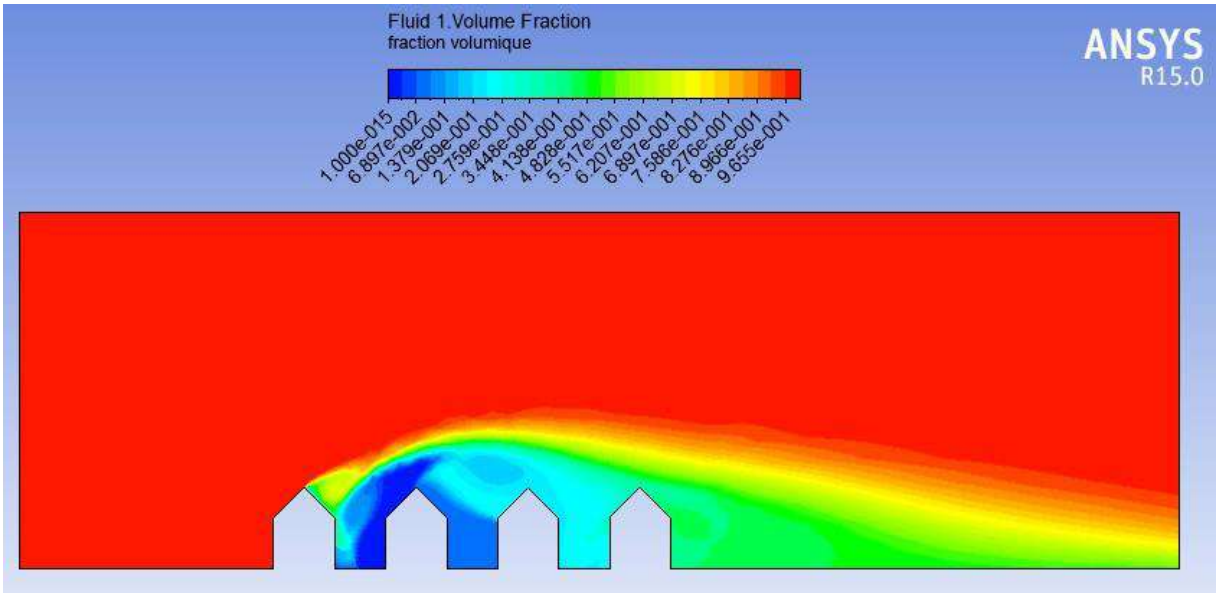


Figure 3.14 : contours de la variation de la fraction volumique (cas2).

2.15. Evolution de fraction volumique (cas3):

D'après la figure 3.15 on remarque que la fraction volumique est fortement concentrée devant la source puis commence à diminuer.

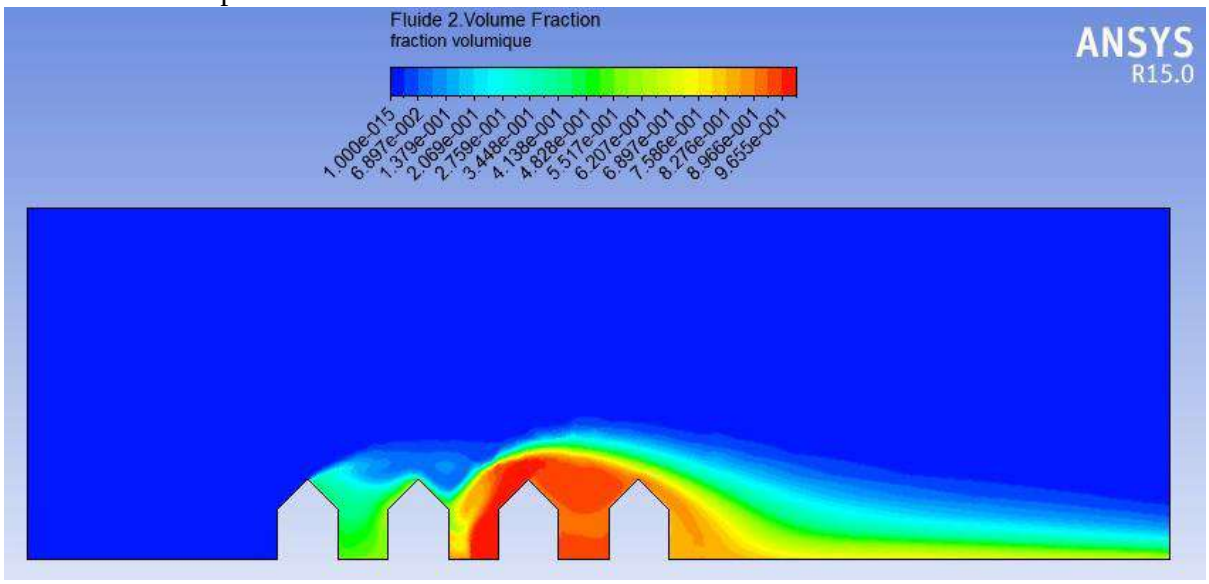


Figure 3.15 : contours de la variation de la fraction volumique (cas3).

2.16. Evolution de fraction volumique (cas4):

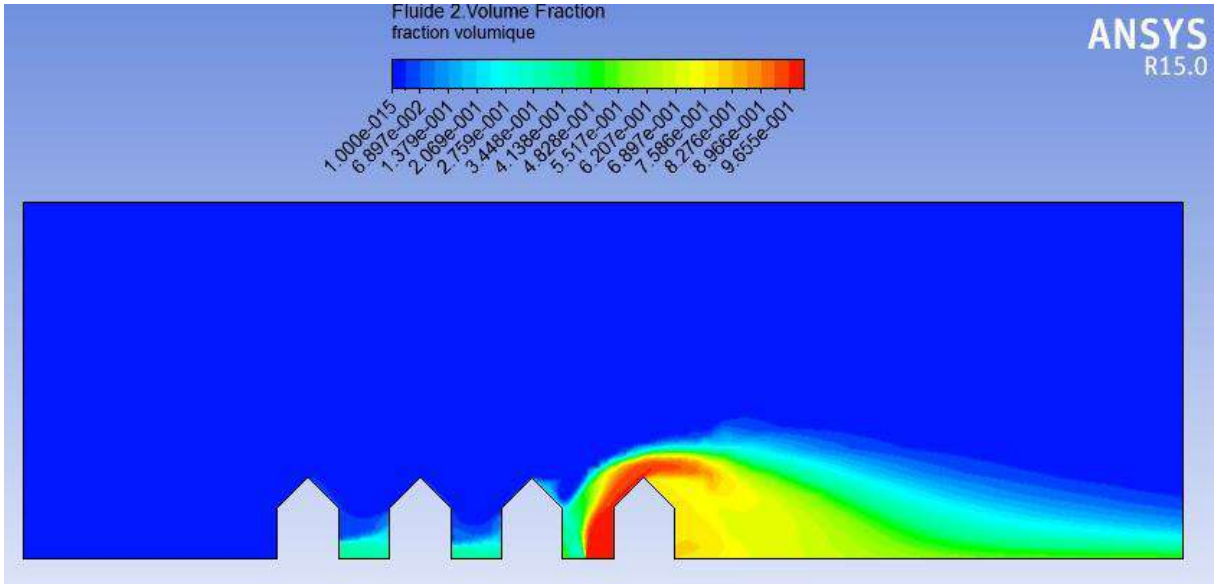


Figure 3.16 : contours de la variation de la fraction volumique (cas4).

Line 1 : (x=40m)

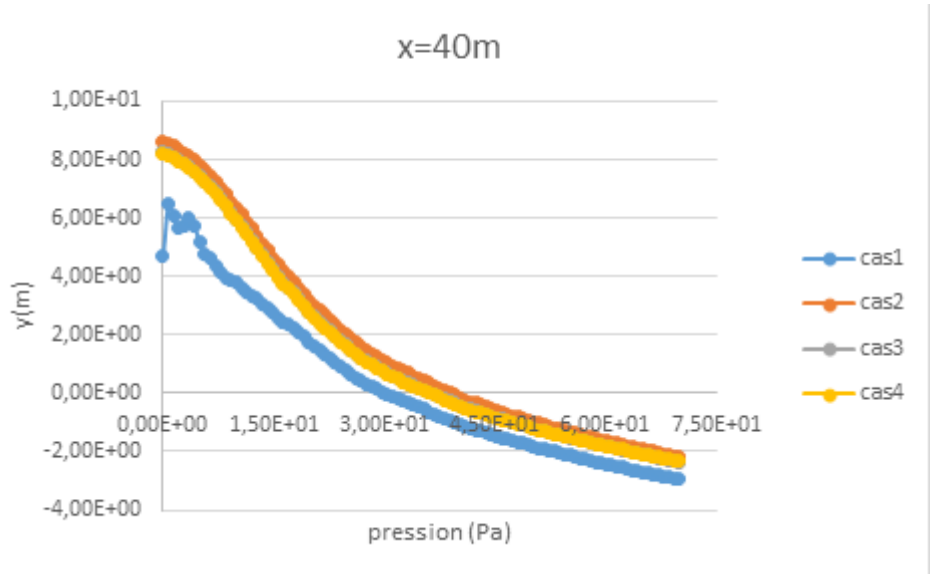


Figure 3.17 :courbe represente la pression de defferents cas dans x=40m.

D'apres la figure 3.17 on remarque que la pression de deuxième cas est la valeur la plus élevée.

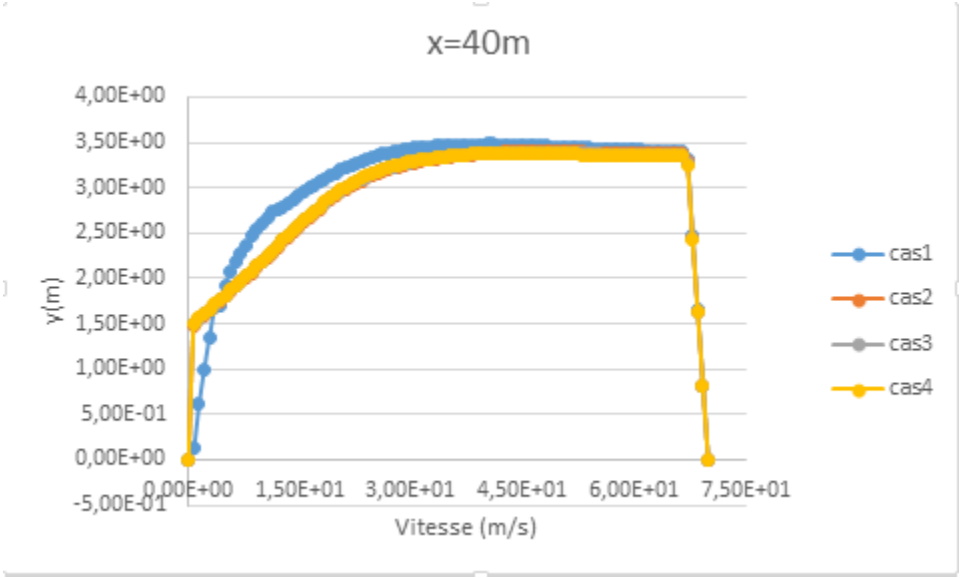


Figure 3.18 : courbe represente la vitesse de defferents cas dans x=40m.

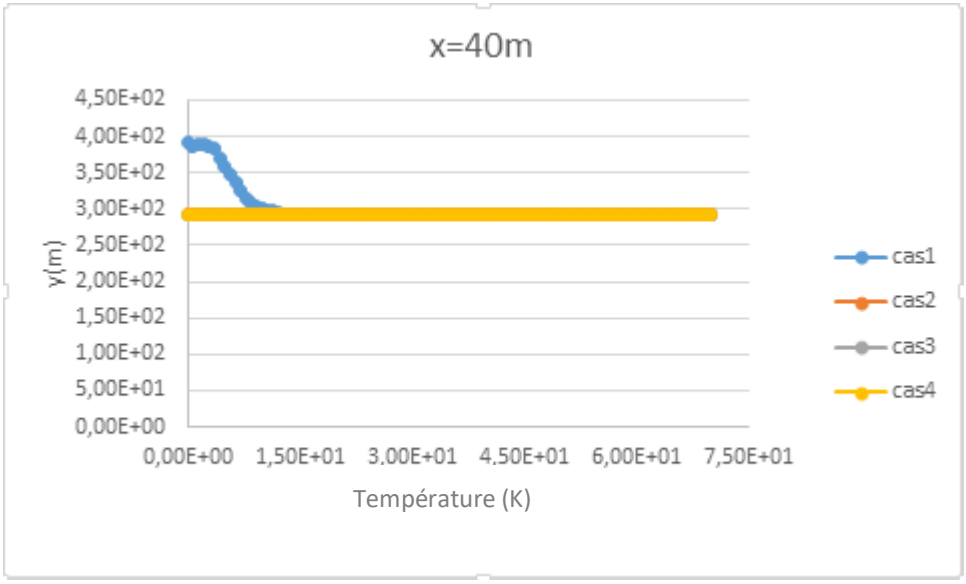


Figure3.19 : courbe represente l'évolution de la temperature en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

D'apres la figure 3.19 on remarque une augmentation de la température des trois cas avec avec une hauteur spécifique.

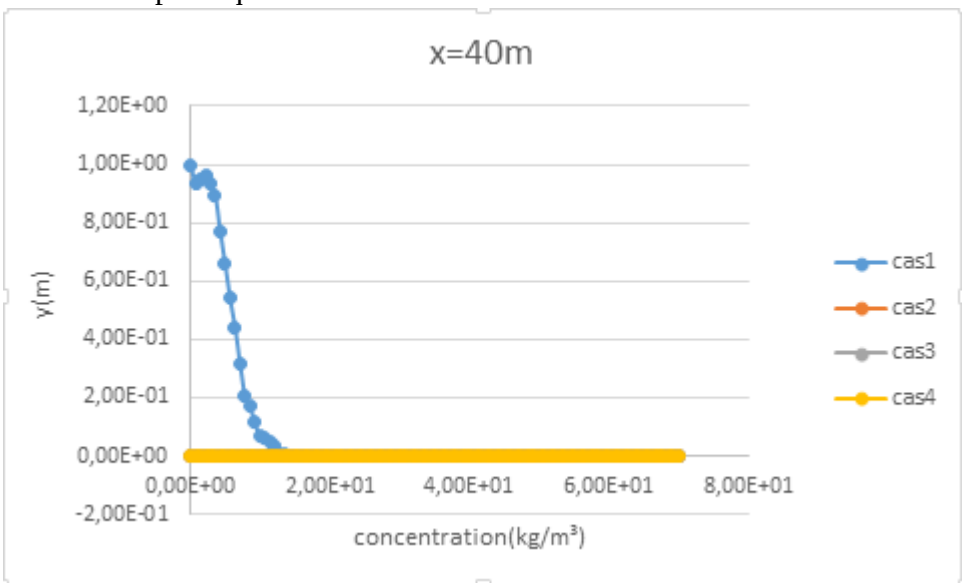


Figure 3.20 : L'évolution de la fraction volumique en fonction de la hauteur y pour les Différents cas. (line1, x=40m).

D'après la figure 3.20 on remarque que la concentration de (CO) est augmente avec la diminution de la hauteur.

Line 2: (x=67m)

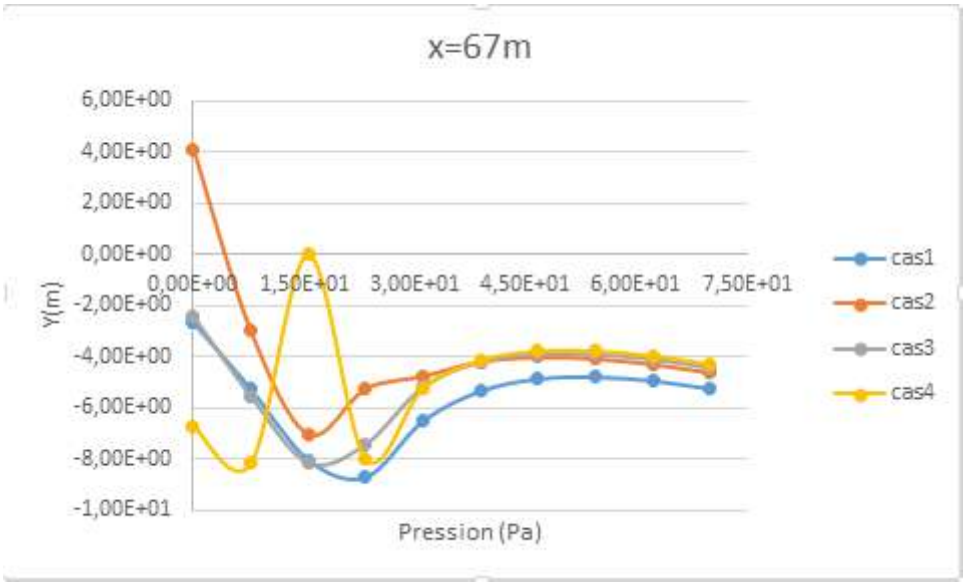


Figure 3.21 :courbe represente la pression de defferents cas dans x=67m.

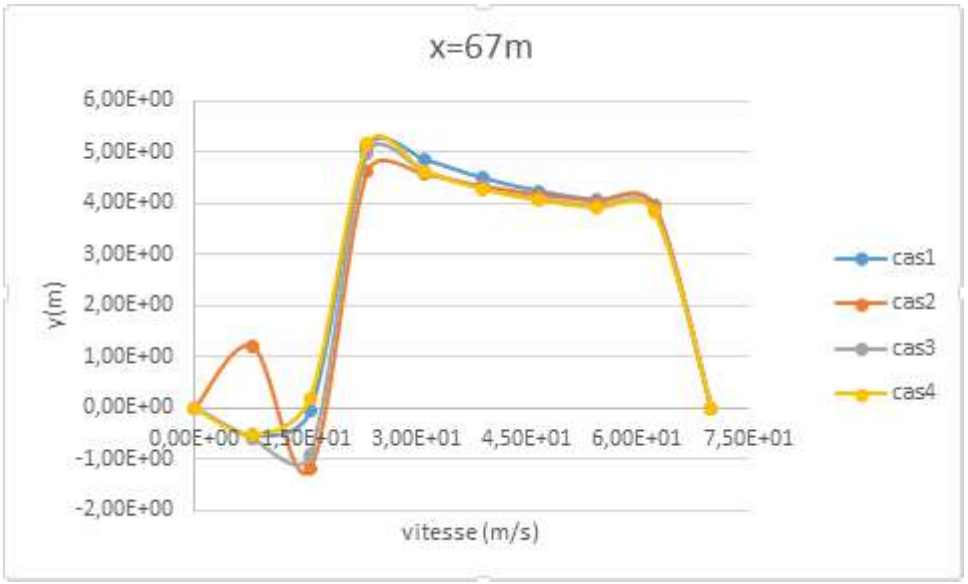


Figure 3.22 : L'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line2).

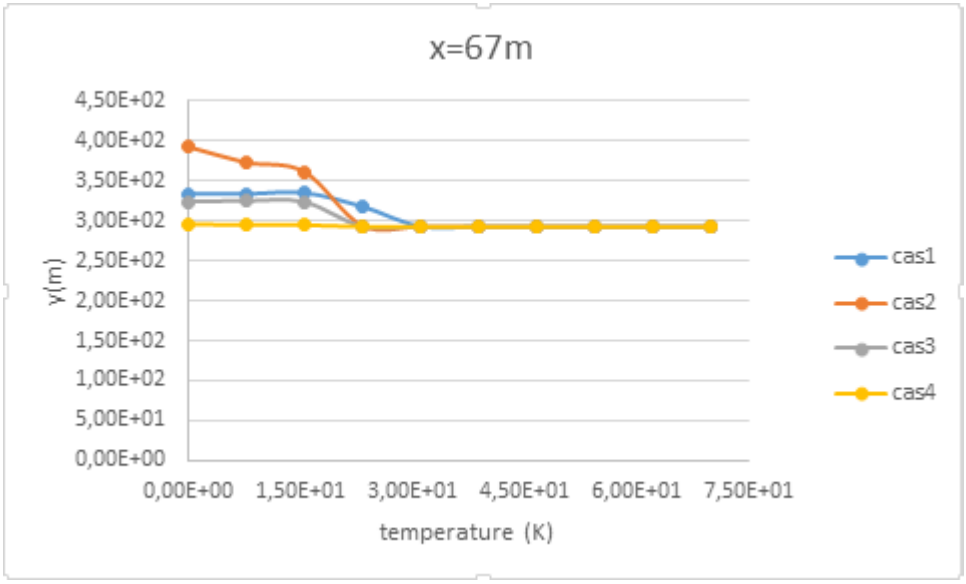


Figure3.23 : L'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line2).

On note que la température varie avec différentes altitudes puis la hauteur reste constante.

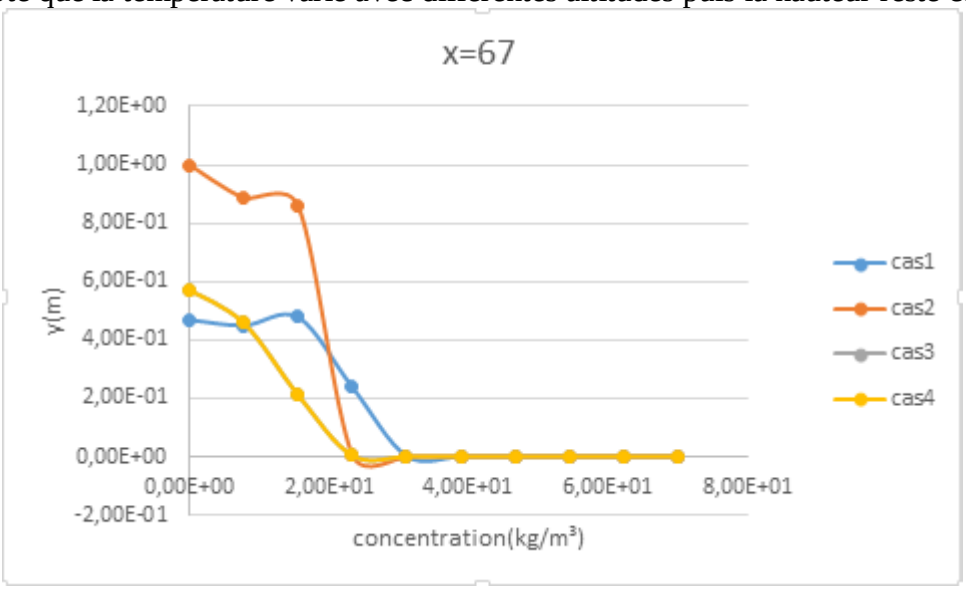


Figure 3.24 : L'évolution de la concentration de (CO) en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

Line 3: (x=89m)

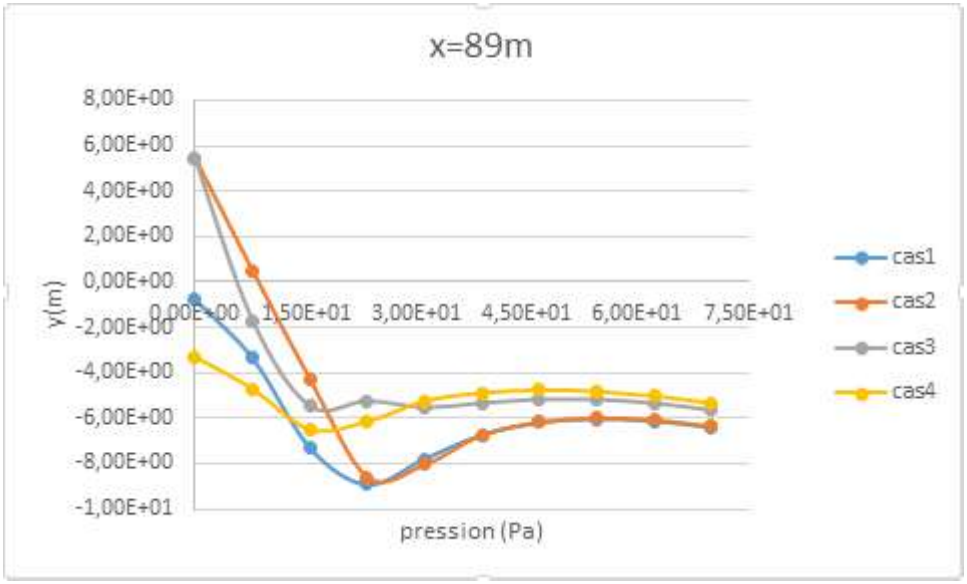


Figure 3.25 : L'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line3)

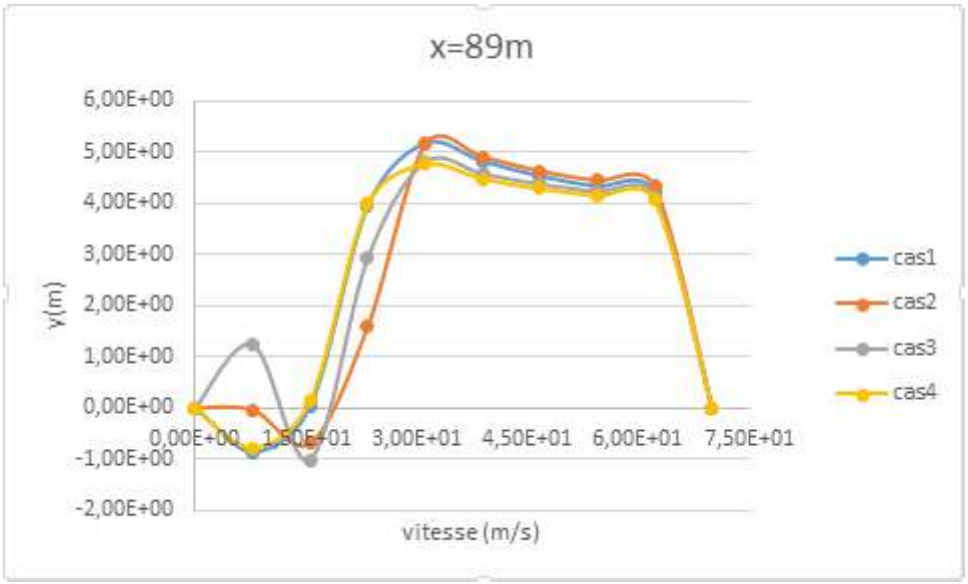


Figure 3.26 : L'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (x = 89m)

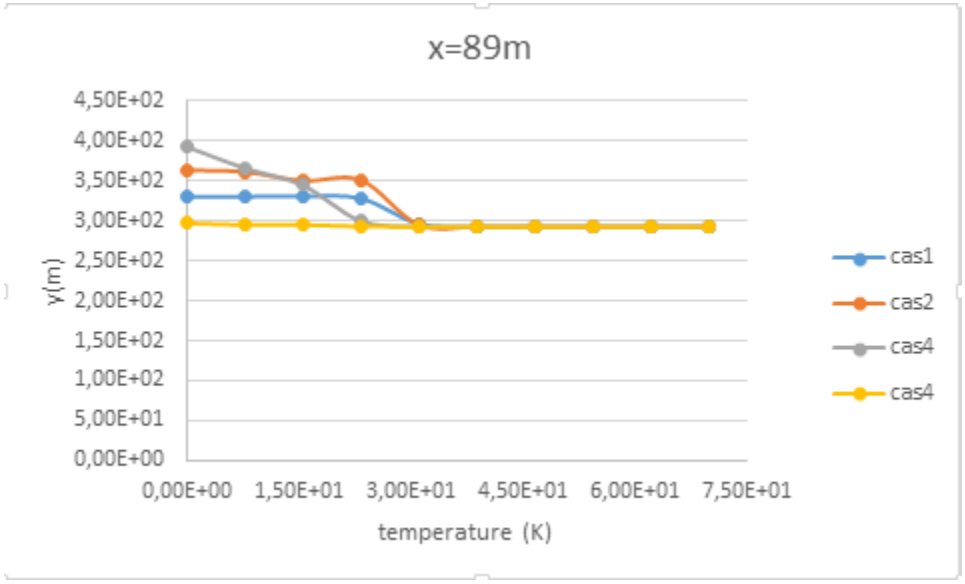


Figure 3.27 : L'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line3)

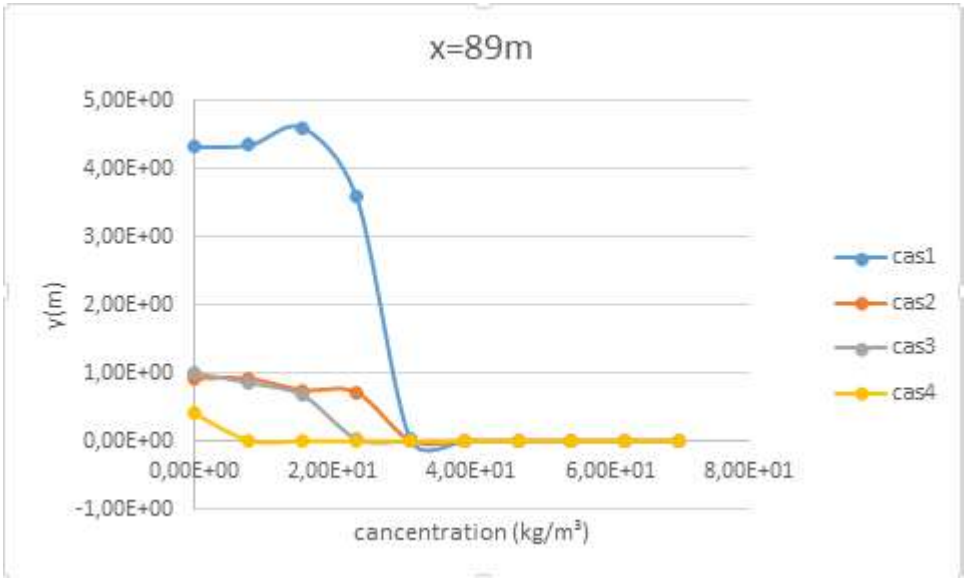


Figure 3.28 : L'évolution de la concentration de (CO) en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

Line 4 : (x=111m)

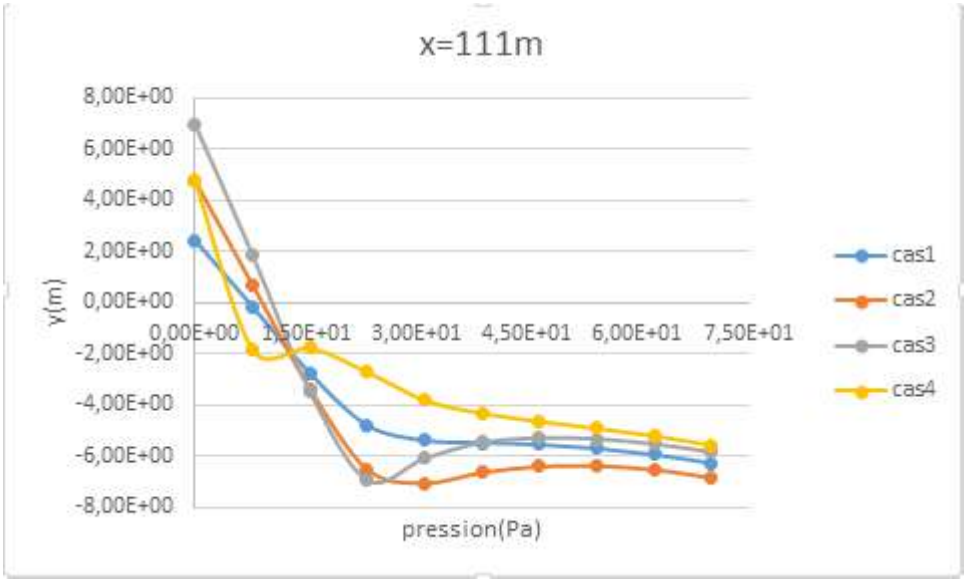


Figure 3.29 : L'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line4).

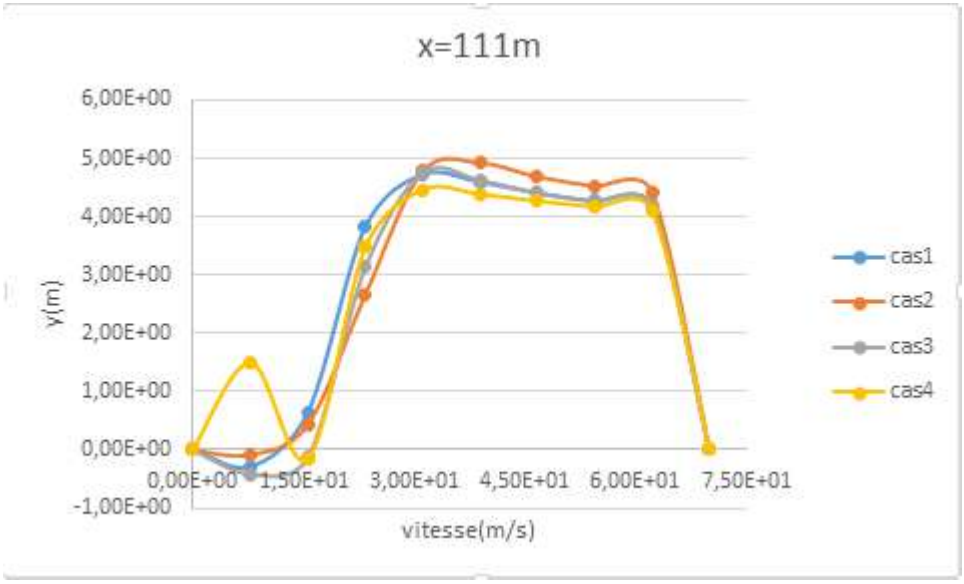


Figure 3.30 : L'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas (x=111m).

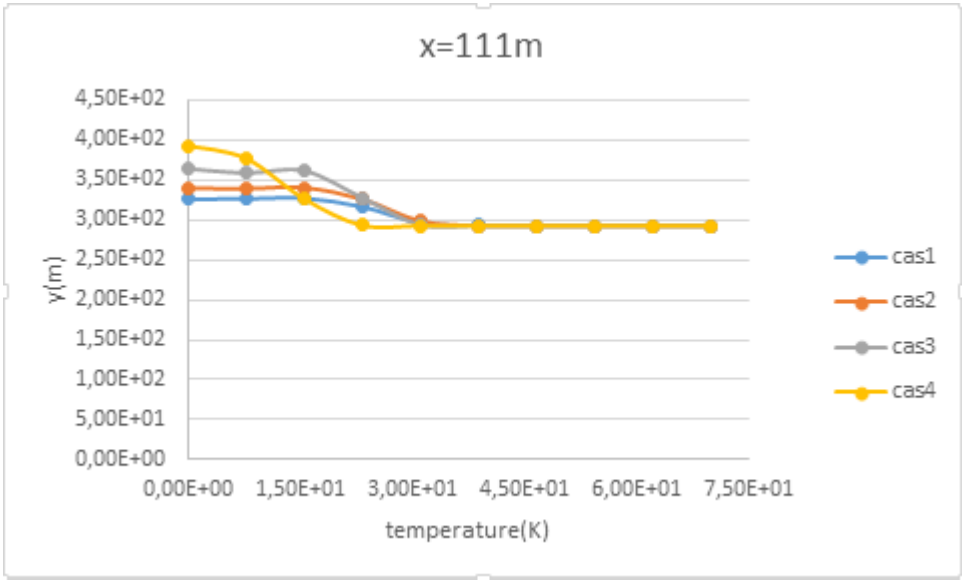


Figure 3.31 : L'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

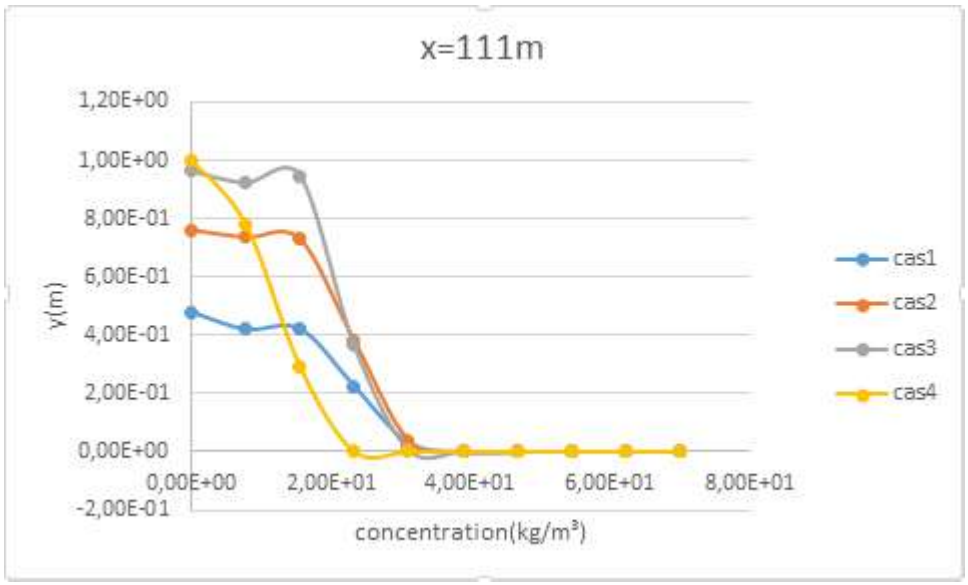


Figure 3.32 : L'évolution de la concentration de (CO) en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

Line 5 : (x=138m)

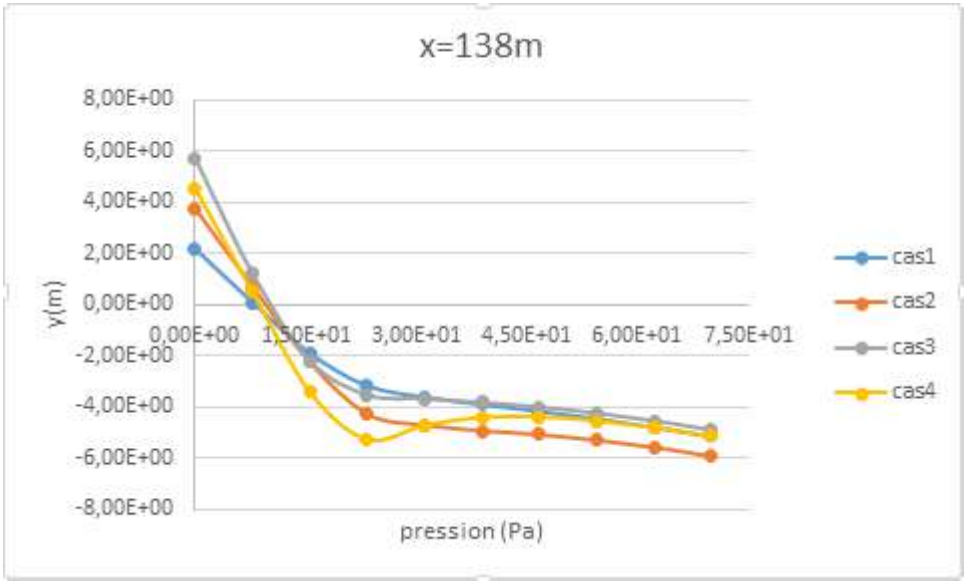


Figure 3.33 : L'évolution de la pression en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line5).

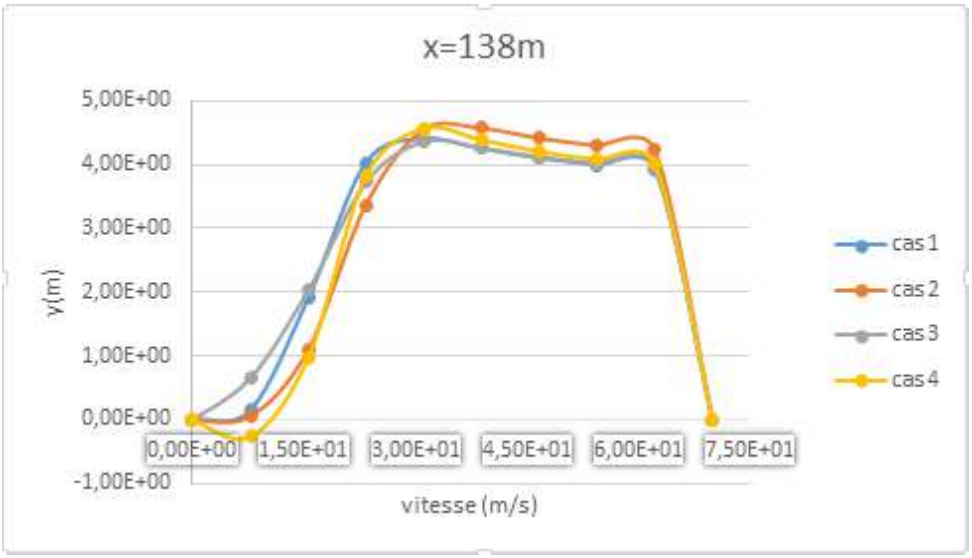


Figure 3.34 : L'évolution de la vitesse en fonction de la hauteur y pour les différents cas. (Line5, x=138m).

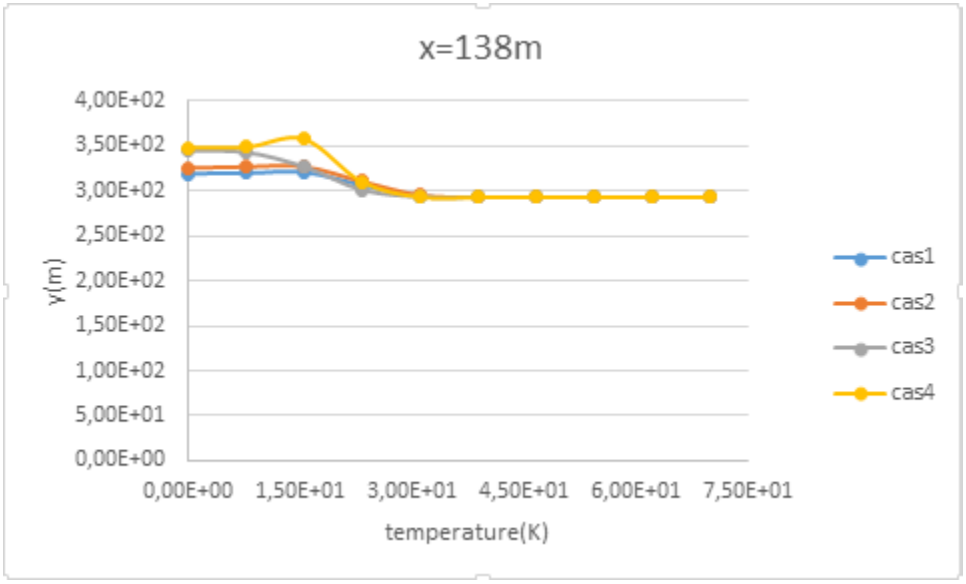


Figure 3.35 : L'évolution de la température en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

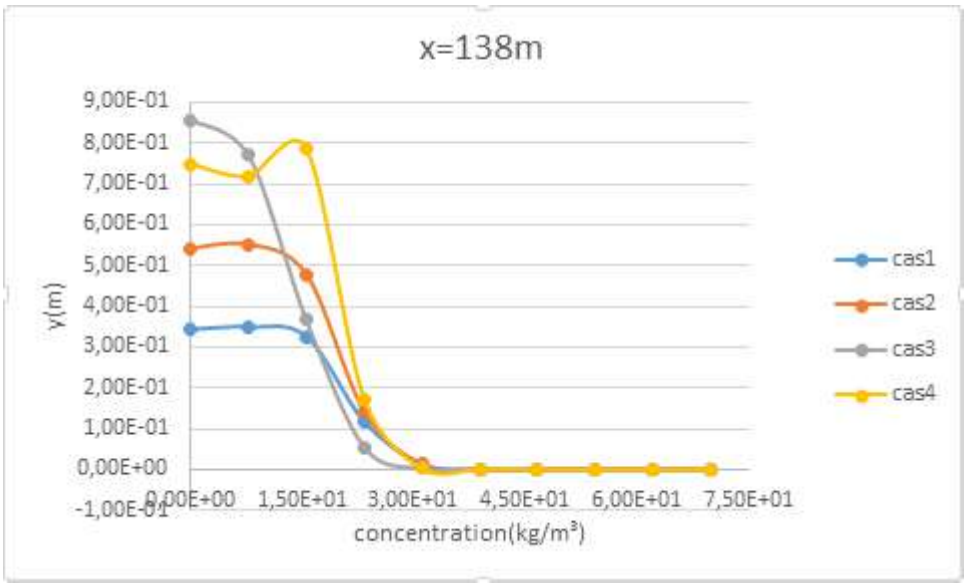


Figure 3.36 : L'évolution de la concentration en fonction de la hauteur y pour les différents cas.

Conclusion générale

Depuis que nous avons assisté à la révolution industrielle, la pollution a augmenté d'année en année, entraînant la modification et la détérioration de notre écosystème, en particulier dans les villes proches des installations industrielles.

Au cours de ce travail, nous avons discuté de plusieurs aspects concernant la dispersion des polluants dans un espace clos, Celui -ci est dû aux différents types de polluants émis des sources naturelles et anthropiques ayant des effets néfastes sur l'être humain et son environnement.

Pour contrer ces problèmes plusieurs organisations ont imposé des contrôles et des normes standards.

Dans notre pratique on a utilisé logicielle ANSYS pour étudier la dispersion du polluant gazeux CO dans un entrepôt multi-ateliers, selon des différents cas.

D’après l’analyse on déduire que :

1-Il y a une légère différence dans le montant de la fraction volumique entre les différents cas.

2-variation de la vitesse de Co dépend de :

L'emplacement de la source de dioxyde de carbone entre les ateliers et sa distance par rapport au lieu d'entrée du vent.

La distance entre la source et les lignes.

3-variation de la température de Co, entre la source et les line.

4-La vitesse de vent induit une diminution de la concentration de CO.

Références bibliographique :

[1] quels sont les différents types de pollution [planeteecologie.com].

[2] quels sont les différents types de pollution [planeteecologie.com].

[3] Dr. Edwin P. Ewing, Jr. French Wikipédia.

[4] Exposé sur la pollution et le développement durable [pixelfarandole.com].

[5] Liste des polluants de l'eau [scienceaq.com].

[6] Polluant chimique [aquaportail.com].

[7] Journal officiel (1983).

[8] Karim MOUAICI [Etude de quelques sources de polluants atmosphériques dans la région de Bejaia, Université de Bejaia - ingéniorat 2002].

[9] Feux de forêt et de végétation : lancement d'une campagne de prévention (ecologie.gouv.fr).

[10] Les relocalisations industrielles en France, janvier 24, 2014 par Marc Unfried (marcunfried.fr).

[11] Les effets de la pollution de l'air sur l'environnement [atmo-nouvelleaquitaine.org].

[12] EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT [atmo-auvergnerhonealpes.fr].

[13] Karim MOUAICI [Etude de quelques sources de polluants atmosphériques dans la région de Bejaia, Université de Bejaia - ingéniorat 2002].

[14] Karim MOUAICI [Etude de quelques sources de polluants atmosphériques dans la région de Bejaia, Université de Bejaia - ingéniorat 2002].

[15] Sources de pollutions [airparif.asso.fr].

[16] Émissions des polluants atmosphériques Christian Seigneur Cerea Laboratoire commun École des Ponts ParisTech.

[17] La réaction de combustion [mathrix.fr].

[18] Les modalités d'exercice de l'activité de construction de véhicules fixées [Algérie presse service].

[19] espace clos [previbois.com].

[20] les espaces clos : pour en sortir sain et sauf : guide de prévention (APSAM, Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail secteur ´ affaires municipales).

[21] Le calcul numérique des écoulements turbulents ; Launder et spalding (1972).

[22] Launder et Spalding (1974). Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, Exhibition Road, London

[23] Yakhot & Smith,1992. Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion technique.

[24] MEGHSEL S, MEGHSEL S] Etude de dispersion d'un gaz toxique dansl'atmosphère dans un milieu urbain [: Master 2, YAHIA FARES DE MÉDÉA (2019-2020).