



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département génie de l'environnement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

**Modélisation de la dispersion atmosphérique du dioxyde d'azote émis par des sources
canalisées au niveau de la
ville d'EL-Hadjar.
Cas d'une rue canyon et d'un site industriel**

BENBEKKA Rima et SEDIKI Radja

Sous la direction de : Promoteur M. Y. KERCHICH MCA à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 20/09/2020

Composition du Jury :

Président	Mme .N.BELHANECHÉ	Professeur	ENP
Promoteur	M .Y. KERCHICH	MCA	ENP
Examineur	M .Y.MOUSSAOUI	Professeur	Université Kasdi Merbah d'Ourgla
Examineur	M .H.BALOUL	MCB	Université de Boumerdès

ENP 2020



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique

Département génie de l'environnement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

**Modélisation de la dispersion atmosphérique du dioxyde d'azote émis par des sources
canalisées au niveau de la
ville d'EL-Hadjar.
Cas d'une rue canyon et d'un site industriel**

BENBEKKA Rima et SEDIKI Radja

Sous la direction de : Promoteur M.Y. KERCHICH MCA à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le 20/09/2020

Composition du Jury :

Président	Mme .N.BELHANECHÉ	Professeur	ENP
Promoteur	M .Y. KERCHICH	MCA	ENP
Examineur	M .Y.MOUSSAOUI	Professeur	Université Kasdi Merbah d'Ourgla
Examineur	M .H.BALOUL,	MCB	Université de Boumerdès

DEDICACE

A MA TRES CHERE MERE

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

A MON TRES CHER PERE

De tous les pères, tu es le meilleur. Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme. En témoignage de brut d'années de sacrifices, de sollicitudes, d'encouragement et de prières. Pourriez-vous trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et tous de vos efforts. En ce jour, j'espère réaliser l'un de tes rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour. Puisse Dieu vous préserver et vous procurer santé et bonheur.

A ma très chère sœur Safa pour leur encouragement permanent, et leur soutien moral, et surtout leur amour.

A mes chers frères, Moatez Abd Allah et Abdelbadie pour leur appui et leur encouragement.

A ma très chère amie Rima ma 2ieme sœur pour leur soutien moral durant toute la période de mes études à l'ENP.

A tous mes amis, et camarades en témoignages de mes plus profondes amitiés et ma sincère sympathie. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Radja

DEDICACE

MA TRES CHERE MERE

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences.

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne serai point te remercier comme il se doit. Ta bienveillance me guide et ta présence à mes coté a toujours été source de force pour affronter les différents obstacles.

A MON TRES CHER PERE

Pour le gout à l'effort qu'il a suscité en moi de part sa rigueur et son perfectionnisme. Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'accompagner. Je vous remercie chaleureusement pour votre disponibilité, pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis en toute liberté d'orienter mon étude comme je le souhaitais. Que ce travail traduit ma gratitude.

A TOI MA SŒUR THANINA

Le meilleur cadeau que dieu m'a donné tout au long de ma vie, avoir une sœur, c'est avoir une personne unique avec qui l'on partage les plus profonds de sa vie. Dieu merci

A vous mes frères SAMI, RAYEN et YAMEN pour votre soutien durant mes études. Que dieu vous protègent et vous donne santé, bonheur, courage et surtout la réussite.

A TOI RADJA MA CHERE AMIE

Un immense merci ne suffirait pas à exprimer toute ma gratitude à ton égard. Merci pour ta disponibilité, ta patience, ta gentillesse. Merci pour tes idées lumineuses, de m'avoir écouté pendant les moments de doutes, et d'avoir permis de mettre mon travail un peu plus en valeur (même si ce n'est pas encore gagné !). Je garde en mémoire les nombreux fous rires qui font partie des meilleurs moments de ce travail.

Aussi, je voudrais exprimer mon immense gratitude à tous ceux qui ont d'une manière ou d'une autre contribué à l'élaboration de ces travaux et qui ont su m'apporter leur soutien.

Rima

REMERCIEMENT

Tout d'abord louange à dieu tout puissant qui nous a donné toutes les capacités physiques et morales pour la réalisation du présent travail.

Nous le remercions également, car il nous a permis de rencontrer tout au long de notre parcours, un grand nombre de personnes douées d'intelligence et de gentillesse

Ce travail a été effectué au niveau du Complexe Sidérurgique d'EL-HADJAR sous la direction Du chef départements des laboratoires centraux et environnement- Direction Métallurgique Qualité Environnement&RTC monsieur **H.LOUHI**.

Nous tenons vivement à remercier notre promoteur le **Dr.Y.KERCHICHE**, à qui nous éprouvons toute notre gratitude de nous avoir permis de réaliser ce travail, de nous avoir encadrées durant cette période de stage et nous avoir toujours soutenues, pour sa gentillesse, sa disponibilité, sa patience et pour ses directives judicieuses tout au long de ce travail.

Notre reconnaissance va à l'égard du professeur **Mme.N. BELHANECHÉ**, pour avoir bien voulu présider le jury de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à **Mr.Y. MOUSSAOUI** et **Mr.H. BALOUL** pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nous remercions aussi respectueusement tous les enseignants du département Génie de

Enfin, nos derniers remerciements iront tout simplement à nos amis et à nos familles, qui même si c'est parfois de loin, nous ont toujours soutenues et nous ont permis d'arriver là où nous sommes aujourd'hui !

A Tous

Un Grand Merci.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تدفق و تشتت الإطلاقات الجوية الموجهة لثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) المتولدة من أنبوب عادم السيارات في شارع كانيون و المداخل في الموقع الصناعي (مجمع سيدار, الحجار), في ظل ظروف جوية مستقرة, في مدينة الحجار, عنابة. لذلك قمنا بتطبيق نموذج K- ϵ المستخدم على نطاق واسع في التدفقات البيئية من خلال كود - CFD ANSYS-CFX.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها على مستوى شارع كانيون أن الظروف الجوية (درجة الحرارة و سرعة الرياح و ما إلى ذلك) و هندسة المباني لها تأثير على دوران, تشتت غاز NO_2 ونوعية الهواء الذي يتنفسه السكان المعرضون. فيما يتعلق بالانبعاثات الجوية الناتجة عن مداخل سيدار, أظهرت المحاكات تشتت جيد لعمود الأدخنة و أن مدينة الحجار لا تتأثر بالتلوث المرتبط بغاز NO_2 .

الكلمات الرئيسية: اضطراب, تشتت, محاكاة عددية, شارع كانيون, موقع صناع NO_2 , سيدار الحجار.

Abstract:

The main objective of this work is to study the flow and dispersion of channelled atmospheric releases of nitrogen dioxide (NO_2) generated by a vehicle exhaust pipe on Canyon Street and by chimneys at an industrial site (El,Hadjar SIDER Complex), under stable atmospheric conditions, at the level of the town of El Hadjar, Annaba. For this we applied the k- ϵ model which is widely used in environmental flows through the CFD code ANSYS-CFX. The results obtained at the canyon street level showed that the atmospheric conditions (temperature, wind speed, etc.) and the geometry of the buildings have a great influence on circulation, the dispersion of the NO_2 gas and the quality of the air breathed by the population

Key words: NO_2 , turbulence, dispersion, numerical simulation, canyon street, SIDER El-Hadjar.

Résumé :

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'écoulement et la dispersion dans l'atmosphère du dioxyde d'azote (NO_2) émis par un tuyau d'échappement d'un véhicule dans une rue Canyon et par des cheminées dans un site industriel (Complexe SIDER El,Hadjar), sous des conditions atmosphériques stables, au niveau de la ville d'El Hadjar, Annaba. Pour cela nous avons appliqué le modèle k- ϵ qui est largement utilisé dans les écoulements environnementaux à travers le code CFD ANSYS-CFX.

Les résultats obtenus au niveau de la rue de canyon ont montré que les conditions atmosphériques (température, vitesse des vents,...) et la géométrie des bâtiments ont une grande influence sur la circulation, la dispersion du gaz NO_2 et la qualité de l'air respirée par la population exposée. En ce qui concerne les émissions atmosphériques générées par les cheminées Complexe SIDER, la simulation a montré une bonne dispersion du panache de fumées et que la ville d'El Hadjar n'est pas impactée par la pollution liée au gaz NO_2 .

Mots-clés : NO_2 , turbulence, dispersion, simulation numérique, rue canyon, SIDER El-Hadjar.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION -----16

1 GENERALITES SUR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE -----19

1.1 Généralités sur la pollution atmosphérique -----19

1.1.1 Structure de l'atmosphère terrestre -----19

1.1.2 Variation de la température et de la pression atmosphérique -----19

1.1.3 Mixage et transport des espèces chimiques -----20

1.2 La pollution atmosphérique -----20

1.2.1 Définition -----20

1.2.2 Les polluants atmosphériques -----21

1.2.2.1 Les types de polluants -----21

1.2.2.2 Les principaux polluants atmosphériques -----22

1.2.3 Source de la pollution atmosphérique -----23

1.2.4 Météorologie et pollution -----26

1.2.4.1 Influence du vent -----26

1.2.4.2 Influence de la chaleur et de la lumière -----26

1.2.4.3 Présence de pluies -----26

1.2.4.4 Couche d'inversion -----27

1.3 Effets de la pollution atmosphérique -----27

1.3.1 Effets sur la santé -----27

1.3.2 Effets des polluants sur l'environnement -----28

1.4 Réglementation sur la qualité de l'air -----29

1.4.1 En Algérie -----30

1.4.2 A l'échelle européenne -----32

1.4.3 Au niveau mondiale -----34

1.5 La place de la modélisation -----35

1.6 Conclusion -----36

2 MODELISATION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES -----38

2.1 Phénoménologie de la couche limite atmosphérique -----38

2.1.1 Mouvement de l'air atmosphérique -----38

2.1.2 La couche limite atmosphérique -----38

2.1.2.1 Caractéristiques de la couche limite atmosphérique -----39

2.2	Introduction à la dispersion de polluants issus d'une source Ponctuelle en atmosphère neutre	39
2.2.1	Influence de la surface terrestre	41
2.2.2	Influence de la vitesse du vent et du gradient de vitesse	42
2.2.3	Influence des bâtiments	43
2.2.3.1	Dispersion autour d'un obstacle isolé	43
2.3	Différentes modèles de la dispersion atmosphérique	45
2.3.1	Les modèles gaussiens	45
2.3.2	Les modèles lagrangiens	45
2.3.3	Les modèles de la mécanique des fluides CFD	45
2.4	Les équations fondamentales dans la couche de surface	46
2.4.1	Conservation de la masse	46
2.4.2	Conservation de la quantité de mouvement	46
2.4.3	Equation d'état et conservation de l'énergie	47
2.4.4	L'équation de l'énergie (bilan de l'enthalpie) inclut les contributions du transport de la chaleur sensible mais aussi de la chaleur latente	47
2.4.5	Equation de transport d'un polluant	47
2.5	Conclusion	48
3	METHODOLOGIE	50
3.1	Polluant et les sources d'émission	50
3.1.1	Le polluant étudié	50
3.1.2	Sources d'émissions	50
3.1.2.1	Emission industrielle fixe SIDER-EL-Hadjar	50
3.1.2.2	Emission mobile – véhicules	51
3.2	La mécanique des fluides numérique(MFN)	51
3.2.1	Méthode de travail	52
3.2.2	Méthodes de discrétisation :	52
3.2.3	Principe de la méthode des volumes finis	52
3.3	ANSYS, In	52
3.3.1	Principaux produits	53
3.3.2	Les Modules d'ANSYS :	53
3.4	ANSYS CFX	53
3.4.1	Environnements logiciels	53
3.4.2	Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX	53
3.4.2.1	ANSYS ICEM	54
3.4.2.2	CFX-pre :	55
3.4.2.3	CFX-solve	56
3.4.2.4	CFX-post :	57
4	RESULTATS ET DISCUSSIONS	60
4.1	Introduction	60

4.2	Emissions du NO₂ par les cheminées de l'atelier agglomération et haut fourneau N°2- SIDER El Hadjar	60
4.2.1	L'influence de la température de l'air sur la température du gaz sortant-----	60
4.2.2	L'influence de la température sur les fractions volumiques des NO ₂ -----	62
4.2.3	L'influence de la variation de la température de l'air sur les vitesses de sortie des gaz de NO ₂ et les lignes du courant -----	65
4.3	Résultats de la source d'émission automobile au niveau de la rue canyon – ville d'El Hadjar	69
4.3.1	Analyse et évaluation des résultats -----	87
5	CONCLUSION -----	94
6	BIBLIOGRAPHIE -----	96
ANNEXE	-----	99

Liste des figures

Figure 1-1: Structure de l'atmosphère et variation de la température et de la pression atmosphérique (3)	19
Figure 1-2 : Schéma résumant les différentes sources des polluants atmosphériques (12).	24
Figure 1-3 : Schéma résumant les différentes sources des aérosols atmosphériques biogéniques et anthropiques d'aérosols organiques à Beijing, en Chine 2018 (12).	26
Figure 2-1 : Structure de la couche limite atmosphérique (21)	39
Figure 2-2 Dispersion d'un panache à partir d'une source ponctuelle.	40
Figure 2-3 Profils de concentration dans un panache.	40
Figure 2-4 : Schéma de synthèse des processus qui affectent la distribution de concentration dans un panache.	41
Figure 2-5 : Interaction d'un panache de polluants avec le sol	42
Figure 2-6 : Evolution de concentration lors du passage d'une bouffée de polluants rejetée de façon ponctuelle (en $x = 0$) et instantanée (en $t = 0$).	43
Figure 2-7 : Déviations verticale et transversale du panache sous l'effet de l'obstacle. Les cercles représentent les sources réelles et les croix les sources virtuelles.	44
Figure 2-8 Mélange des polluants dans la zone de recirculation. Sur la figure a), le panache émis à l'amont de l'obstacle est piégé par la recirculation. Les polluants qui y pénètrent sont bien mélangés et ressortent en formant un panache plus large. Sur la figure b), la source est située à l'intérieur même de la cavité. On observe également un mélange efficace et la formation d'un panache large en aval. Les cercles représentent les sources réelles et les croix les sources virtuelles.	44
Figure 2-9 : Interaction d'un panache avec la zone de sillage	45
Figure 3-1 : Les modules principaux du CFX	54
Figure 3-2 : Domaine de calcul par ICEM-CFX – Rue canyon	54
Figure 3-3: Domaine de calcul par ICEM-CFX – Cheminées SIDER EL-HADJAR	55
Figure 3-4 : Interface graphique du module CFX-pre – Rue canyon	55
Figure 3-5 : Interface graphique du module CFX-pre – Cheminées SIDER EL-HADJAR	56
Figure 3-6 : Interface graphique du module CFX-Solver	57
Figure 3-7 : Interface graphique du module CFX-post – Rue Canyon	58
Figure 3-8 : Interface graphique du module CFX-post – Cheminées SIDER EL-HADJAR	58
Figure 4-1 : Evolution de la température du gaz à $T=278K$ et $V=3m/s$	60
Figure 4-2 : évolution de la température de gaz à $T=298K$ et $V=3m/s$	61
Figure 4-3 : évolution de la température de gaz à $T=308K$ et $V=3m/s$	61
Figure 4-4 : la variation de la température du gaz en fonction de la température de l'air à $V=3m/s$	62
Figure 4-5 : l'évolution des fractions volumiques du NO_2 à $278K$ et $V=3m/s$	63
Figure 4-6 : l'évolution des fractions volumiques du NO_2 à $298K$ et $V=3m/s$	63
Figure 4-7 : l'évolution des fractions volumiques du NO_2 à $308K$ et $V=3m/s$	64
Figure 4-8: la variation des fractions volumiques du NO_2 en fonction de la température de l'air à $V=3m/s$	64
Figure 4-9 : l'évolution de la vitesse de sortie des gaz de NO_2 à $T=278K$	65
Figure 4-10 : les lignes de courant de l'air et le gaz de NO_2 à $T= 278K$	66
Figure 4-11 : l'évolution de la vitesse de sortie des gaz de NO_2 à $T=298K$	66
Figure 4-12 : les lignes de courant de l'air et le gaz de NO_2 à $T= 298K$	67
Figure 4-13 : l'évolution de la vitesse de sortie des gaz de NO_2 à $T=308K$	67
Figure 4-14 : les lignes de courant de l'air et le gaz de NO_2 à $T= 308K$	68
Figure 4-15 : la variation de la vitesse du NO_2 en fonction de la température de l'air à $V=3m/s$	68
Figure 4-16 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3m/s$	69
Figure 4-17 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7 m/s$	70

Figure 4-18 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en aval =2 fois bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	70
Figure 4-19 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5\text{ m/s}$ -----	71
Figure 4-20 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), sources après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	71
Figure 4-21 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	72
Figure 4-22 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	72
Figure 4-23 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	74
Figure 4-24 : Evolution de la vitesse de sortie – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	75
Figure 4-25 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	75
Figure 4-26 : Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	76
Figure 4-27 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7\text{ m/s}$ -----	76
Figure 4-28: Evolution de la vitesse de sortie des gaz – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7\text{ m/s}$ -----	77
Figure 4-29 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7\text{ m/s}$ -----	77
Figure 4-30 : Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7\text{ m/s}$ -----	78
Figure 4-31 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	78
Figure 4-32 : Evolution de la vitesse de sortie des gaz température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	79
Figure 4-33 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	79
Figure 4-34 : Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	80
Figure 4-35 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5\text{ m/s}$ -----	80
Figure 4-36 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5\text{ m/s}$ -----	81
Figure 4-37 : Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5\text{ m/s}$ -----	81
Figure 4-38 : Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	82
Figure 4-39 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	82
Figure 4-40 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	83
Figure 4-41 : Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	83
Figure 4-42 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$ -----	84

Figure 4-43 : Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	84
Figure 4-44 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	85
Figure 4-45 : Evolution des lignes des vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	85
Figure 4-46 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	86
Figure 4-47 : Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	86
Figure 4-48 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	87
Figure 4-49 : Evolution des ligne de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$ -----	87
Figure 4-50 : Profils des concentrations entre les bâtiments (source au milieu) -----	88
Figure 4-51 : Profils des concentrations après les bâtiments (source au milieu) -----	88
Figure 4-52 : Profils des concentrations au milieu des bâtiments (source au milieu)-----	89
Figure 4-53 : Profils des concentrations en aval des bâtiments (source au milieu) -----	89
Figure 4-54 : Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes hauteurs (source au milieu) -----	90
Figure 4-55 : Profils des températures en aval des bâtiments à différentes hauteurs (source au milieu) ---	90
Figure 4-56 : Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques) -----	90
Figure 4-57 : Profils des températures en aval des bâtiments à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques) -----	91
Figure 4-58 : Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)-----	91
Figure 4-59 : Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)-----	92
Figure 4-60 : Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)-----	92
Figure 4-61 : Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)-----	92

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Effets des principaux polluants sur la santé -----	27
Tableau 1-2 : Effets des principaux polluants sur l'environnement-----	29
Tableau 1-3 : Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques-Journal officiel-----	31
Tableau 1-4: Réglementation européenne concernant Anhydride sulfureux-----	32
Tableau 1-5 : Réglementation européennes Dioxyde d'azote et oxydes d'azote-----	33
Tableau 1-6 : Réglementation européenne Particules (PM ₁₀ /PM _{2,5})-----	33
Tableau 1-7 : Réglementation européenne sur Monoxyde de carbone-----	34
Tableau 3-1 : Caractéristiques des cheminées au niveau de la PMA -----	50
Tableau 4-1 : la variation de la température du gaz en fonction de la température de l'air à V=3m/s-----	62
Tableau 4-2 : la variation des fractions volumiques du NO ₂ en fonction de la température de l'air à V=3m/s-----	64
Tableau 4-3 : la variation des vitesses du NO ₂ dans le panache en fonction de la température de l'air à V=3m/s-----	68

Liste des abréviations

As : Arsenic

ACE : Aciérie Electrique

ACO1 : Aciéries à Oxygène numéro 1

ACO2 : Aciéries à Oxygène numéro 2

ADEME : Agence De l'Environnement Et de la Maitrise de l'Energie

APDL: ANSYS Parametric Design Language

ATC : Ateliers de Construction

CAFE: Clean Air For Europe

Cd : Cadmium

CFC : ChloroFluoroCarbure

CFD: Computational Fluid Dynamics

CH4 : Le méthane

CLA : La Couche Limite Atmosphérique

CLS : La Couche Limite de Surface

COV : Composés Organiques Volatils

CO : Monoxyde de carbone

CO2 : Dioxyde de carbone

ENS : L'Entreprise Nationale de Sidérurgie

Fe₃O₄ : Oxyde de fer (II,III)

FeO : Oxyde de fer (I)

Ha : Hectare

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

HFX : Hauts Fourneaux

Hg: Mercure

LAC : Laminoir à Chaud

LAF : Laminoir à Froid

MEF : La Méthode des Eléments Finis

MFN : La Mécanique des Fluides Numérique

MPF : Matières Premières et Fonte

Ni: Nickel

NO₂: Dioxyde d'azote

NO₃: Trioxyde d'azote

NO_x : Oxyde d'azote

OMC : Organisation mondiale du commerce

OMS : Organisation Mondial de Santé

O₃ : Ozone

Pb : Plomb

PM : Particulate Matter

PM₁₀ : Particulate Matter (aerosol de diameter < 10µm).

PM_{2.5} : Particulate Matter (aerosol de diameter < 2.5µm).

PMA : Préparation Matière Première

PPRT : Plan de Prévention des Risques Technologiques

RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes

SBS : La Société Bônoise de Sidérurgie

SDM : Sulfure de Diméthyle

SNS : La Société Nationale de Sidérurgie

SO₂ : Dioxyde de soufre

TSS : Unité de Tuberie Sans Soudure

UV : Ultra-Violet

µg /m³ : Microgramme (10⁻⁶g) par mètre cube. Unité de concentration la plus couramment utilisée pour quantifier la masse d'un polluant par mètre cube d'air

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Introduction

La pollution atmosphérique est responsable, selon l'Organisation Mondiale de la Santé, de la mort de 4,2 millions de personnes dans le monde chaque année (1).

En France, les 11 millions de tonnes de polluants émis chaque année dans l'atmosphère sont responsables de 30000 décès anticipés (ADEME). Ils causent des troubles cardiaques ou reproductifs, des cancers et favorisent également les maladies allergiques respiratoires (asthme) dont la prévalence a doublé en 20 ans (ADEME).

Devant cette situation, dont l'évolution future semble pessimiste en raison notamment de l'émergence des pays tels que la Chine ou l'Inde, une prise de conscience des pouvoirs publics et de la population commence à naître dans les pays développés. Des mesures réglementaires de plus en plus sévères ont alors été adoptées pour limiter les émissions de polluants, en particulier celles d'origines industrielles. Pour satisfaire les demandes de restriction des pouvoirs publics, le monde industriel s'est lancé dans une course aux réductions de leurs émissions de produits nocifs (depuis les années 1980, les rejets de dioxyde de soufre ont baissé de 85% par exemple). C'est ainsi qu'au cours des 20 dernières années, l'industrie a fait appel au secteur de la recherche pour développer et optimiser ses méthodes de production, par la mise en place de procédés de plus en plus perfectionnés. Cependant, la réduction des émissions industrielles passe aussi par la surveillance continue des sites et de leurs abords et par l'analyse de scénarii accidentels pour améliorer la compréhension des causes des pics de pollution et prendre les mesures nécessaires pour éviter leurs reproductions futures. Cette approche nécessite alors le développement de réseaux de surveillance de la qualité de l'air et la mise en place de nombreux capteurs pour conseiller les autorités, informer et prévenir les populations. En appui de ces réseaux, le monde industriel s'est tourné vers la modélisation de la pollution atmosphérique, afin de renforcer et d'améliorer la sécurité sur et en dehors des sites de production. Grâce aux développements des ressources informatiques, cet aspect numérique a pris ces dernières années un poids de plus en plus important dans les systèmes de régulation de la pollution industrielle.

Pour mieux connaître et maîtriser la pollution de l'air, il est nécessaire de savoir quelles sont les sources de pollution, les identifier et les quantifier. Cette connaissance permet ensuite de prendre des mesures de réduction des émissions à la source. Les inventaires d'émissions sont également une donnée de base nécessaire pour réaliser des évaluations de qualité de l'air et estimer les impacts de cette pollution sur la santé, l'environnement.

La modélisation de la pollution atmosphérique est un problème complexe et pluridisciplinaire. Elle fait appel à la météorologie, à la mécanique des fluides ou à la chimie pour déterminer l'évolution de l'espèce polluante de son point de rejet jusqu'à la zone d'étude, mais aussi à la médecine permettant alors de créer un lien statistique entre la substance étudiée et son impact sur les populations. On retrouve ainsi la modélisation dans des domaines divers et variés que sont l'industrie, les transports en passant par la santé publique. Dans le monde industriel, la modélisation est utilisée pour diverses applications : le contrôle des émissions, la surveillance des sites et la gestion de crise en cas d'accident.

Chacune de ces approches possède sa propre gamme d'échelle de temps et d'espace permettant de prendre en compte les phénomènes physiques prépondérants. Ainsi, des modèles permettant de modéliser les grands mouvements de masse d'air seront utilisés pour la modélisation à l'échelle continentale, assurant alors le suivi de substances toxiques sur de longues distances (l'exemple de l'accident de Tchernobyl) alors que la surveillance des sites industriels demandera une prise en compte de structures turbulentes plus petites pour expliquer

INTRODUCTION

l'évolution de la concentration autour d'un site. Au final, il est impossible de représenter l'ensemble des échelles à l'intérieur d'un seul modèle. C'est pourquoi une large gamme de modèles a été développée afin de répondre aux différents problèmes de pollution que peuvent connaître les industriels.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de la dispersion du dioxyde d'azote (NO_2) car c'est un polluant réglementé qui représente un impact significatif sur l'environnement et la santé humaine. Une fois émis dans la troposphère, ce polluant qui est appelé polluant primaire ou précurseur, subit plusieurs réactions chimiques et photochimiques dans l'air pour donner d'autres polluants appelés secondaires tels que l'ozone et les particules de nitrate d'ammonium et composés organiques nitrés.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'écoulement et la dispersion des rejets atmosphériques canalisés du dioxyde d'azote (NO_2) généré par un tuyau d'échappement d'un véhicule dans une rue Canyon et par des cheminées dans un site industriel (Complexe SIDER El, Hadjar), sous des conditions atmosphériques stables, au niveau de la ville d'El Hadjar, Annaba. Pour cela nous avons appliqué le modèle k- ϵ qui est largement utilisé dans les écoulements environnementaux à travers le code CFD ANSYS-CFX.

Le travail est structuré en cinq chapitres :

- Le premier chapitre de ce rapport comporte des généralités sur la pollution de l'air. Les différents polluants, leurs sources, leurs dispersions et leurs effets sur la santé et l'environnement ainsi que leur cadre réglementaire.
- Le second chapitre décrit les différents modèles de la dispersion atmosphérique et les équations pour la modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques.
- Le troisième chapitre présente la zone d'étude et les procédés de fabrication du complexe SIDER EL-HADJAR.
- Le quatrième chapitre décrit la méthodologie suivie pour la simulation de la dispersion dans l'air du dioxyde d'azote (NO_2) généré par un tuyaux d'achoppement d'un véhicule dans une rue canyon et par les cheminées du complexe SIDER El Hadjar.
- Le cinquième chapitre présente les résultats de la simulation de la dispersion du dioxyde d'azote dans la ville d'El Hadjar.

Enfin une conclusion générale qui résume l'essentiel des résultats obtenus.

CHAPITRE 01 :
GENERALITES SUR LA POLLUTION
ATMOSPHERIQUE

1 Généralités sur la pollution atmosphérique

1.1 Généralités sur la pollution atmosphérique

1.1.1 Structure de l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches concentriques et superposées. On retrouve successivement :

La biosphère comprise entre le sol et une centaine de mètres d'altitude. Dans la biosphère vivent les hommes, les animaux et les plantes terrestres. C'est la zone où sont émis les polluants atmosphériques.

- ✓ **La troposphère** qui s'étend du sol jusqu'à 12 km d'altitude environ. C'est la zone où les composés chimiques se mélangent et réagissent entre eux, c'est le site de la grande majorité des réactions atmosphériques.
- ✓ **La stratosphère** qui est comprise en moyenne entre 12 – 50 km d'altitude. Les polluants y sont rares mais très destructeurs.

La troposphère est séparée de la stratosphère par la tropopause (2).

1.1.2 Variation de la température et de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique décroît très régulièrement avec l'altitude. En revanche, la température décroît, croît puis décroît de nouveau avec l'altitude. Le sol est chauffé par les radiations solaires, essentiellement par absorption de la lumière infrarouge. Le sol transmet sa température à la basse troposphère (2).

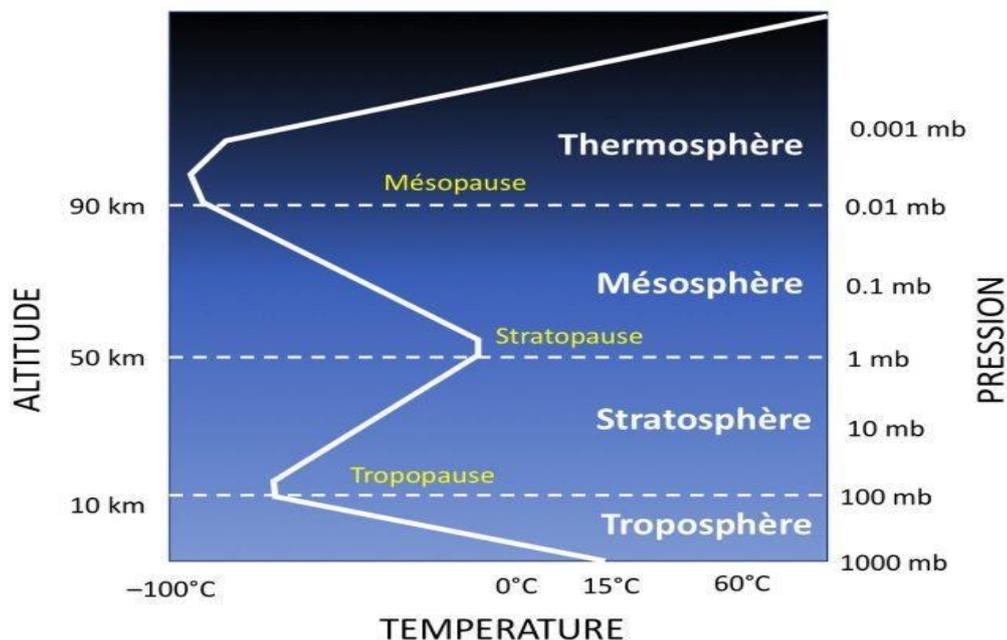


Figure 1-1: Structure de l'atmosphère et variation de la température et de la pression atmosphérique (3)

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

1.1.3 Mixage et transport des espèces chimiques

Dans la troposphère, les substances chimiques subissent des phénomènes de transports horizontaux (l'advection). Elle est due à l'apport, sous l'effet du vent. Le transport des gaz et particules peut s'étendre sur plusieurs milliers de kilomètres et certains polluants peuvent faire le tour de la terre (2) par exemple le transport de poussières sahariennes vers les Caraïbes et la Floride (4) et la poussière transportée à travers le Pacifique depuis l'Asie qui a été détectée aux États-Unis (5).

Dans les années récentes, imagerie et autres mesures d'instruments embarqués sur des satellites nous informent sur la présence et le transport des aérosols. Ces techniques sont utilisées de manière routinière. On a aussi les mixages verticaux (convection), ce transport atmosphérique est un phénomène analogue à la convection ou l'air chaud monte puis redescend. Ces deux phénomènes contribuent à un fort brassage de toutes les espèces chimiques gazeuses ou particulaires, dans les basses couches (2).

Dans la stratosphère la plus part des réactions chimiques impliquent l'ozone. Ce gaz absorbe la lumière ultraviolette entre 210 et 290 nm qui sont néfastes à la vie et l'environnement, tandis que l'oxygène moléculaire absorbe en dessous de 210 nm. La présence de ces deux gaz à des concentrations importante entraîne une augmentation de la température. Un équilibre naturel s'établit entre les espèces oxygénées (O_2 et O_3) qui conduit à une concentration d'ozone constante et il est décrit par le cycle de CHAPMAN. Dans la stratosphère il n'y a pas ou peu de brassage des composés chimiques (2).

1.2 La pollution atmosphérique

1.2.1 Définition

La pollution de l'air est définie comme l'addition dans notre atmosphère de tout matériau qui aura un effet néfaste sur la vie et sur notre planète. Le matériau peut être un hydrocarbure gazeux toxique ayant des effets durables sur un organisme l'ingérant ou éventuellement un irritant particulaire qui pourrait causer des problèmes similaires. Il pourrait s'agir d'un rayonnement atomique sous une forme que nous ne pouvons pas voir qui pourrait être dommageable pour les cellules animales ou végétales. Un polluant peut être un élément émis dans l'atmosphère, par un acte de la nature ou anthropique qui réduit la teneur en oxygène ou modifie de manière significative la composition de l'air. Un polluant atmosphérique ne doit pas être inhalé une fois il dépasse sa norme. Cela devient un polluant simplement en étant dans l'air (6).

La pollution de l'air n'a pas de barrière. Ainsi, certains polluants atmosphériques dont la durée de vie est élevée, peuvent migrer loin de leurs sources d'émission en interférant à différentes échelles spatiales. C'est pour cette raison que lors de la classification des phénomènes de pollution, il faut faire référence à l'échelle d'étude. Souvent dans la littérature, on se limite à trois niveaux d'échelles : locale, régionale et globale.

✓ L'échelle locale

Il s'agit des pollutions rencontrées au voisinage direct des sources d'émissions comme les foyers industriels de combustion, les axes de circulation, le chauffage domestique, l'incinération des déchets. Ces sources engendrent des pollutions de proximité et/ou des nuisances olfactives à des distances inférieures à quelques kilomètres. En effet, la matière particulaire en suspension (Particulate Matter, PM), les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO), les Composés Organiques Volatils (COV), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et les métaux constituent les polluants les plus caractéristiques de ce type de pollution.

✓ L'échelle régionale

La pollution régionale touche les zones distantes de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres des sources d'émission de polluants. Cette pollution résulte des phénomènes physico-chimiques plus ou moins complexes à l'origine de la formation dans l'atmosphère de polluants dits « secondaires » à partir de polluants dits « primaires » rejetés par des sources émettrices. Notamment l'ozone (O₃), dont la formation dépend de la présence des (NO_x) et des COV, est le principal représentant de la pollution photochimique ainsi que les acides nitriques et sulfuriques, à partir des (NO_x) et du (SO₂), sont responsables de la formation des pluies acides.

✓ L'échelle globale ou mondiale

La pollution à l'échelle de la planète, susceptible d'affecter l'équilibre de l'écosystème. Elle se caractérise par les substances impliquées dans le phénomène de changement climatique, notamment les gaz à effet de serre et en particulier le dioxyde de carbone (CO₂), et par les substances responsables de la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, principalement les émissions de ChloroFluoroCarbures (CFC) (2).

1.2.2 Les polluants atmosphériques

1.2.2.1 Les types de polluants

✓ Polluant primaire

Les différents polluants introduits dans l'atmosphère directement ou comme conséquence la modification des émissions naturelles de la biosphère sont appelés des «polluants primaires» tels que les gaz et particules issues des activités de transport (7).

✓ Polluant secondaire

Un grand nombre de polluant vont réagir chimiquement, en particulier sous l'effet du rayonnement solaire, et donner de nouveau constituants ou «polluants secondaires», résultant de réactions chimiques mais aussi souvent de réactions photochimiques, qui sont parfois plus agressifs pour l'environnement que ceux qui lors ont données naissances parmi ces polluants on a l'acides sulfuriques, l'acide nitriques, qui sont des acides forts, des oxydants fort comme l'ozone. L'atmosphère est donc le siège d'une intense activité chimique, entre composés qui sont la plus part des temps à l'état de traces infimes (7).

Les processus les plus connus pour la formation secondaires sont :

- La transformation du dioxyde de soufre SO₂ en sulfates SO₄²⁻.
- La transformation des oxydes d'azote NO_x en nitrates NO₃⁻.
- La transformation des composés organiques lourds en particules organiques.
- Les particules secondaires constituent généralement les particules fines de D_p<2.5 μm (8).

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

1.2.2.2 Les principaux polluants atmosphériques

Plusieurs éléments sont considérés comme des polluants de l'air parce qu'ils n'existent pas naturellement dans l'air ou ne s'y trouvent qu'à de très faibles niveaux de concentration, et qu'ils sont nocifs pour la santé et pour l'environnement. Ces polluants se divisent en deux catégories : gaz et particules.

a) Les gaz

Les polluants gazeux présents dans l'atmosphère sont très nombreux et il n'est pas possible de les énumérer, ni de les identifier tous. Nous dressons une liste non exhaustive des principaux composés par grandes familles de polluants.

Le dioxyde de soufre (SO₂) : Ce gaz résulte des combustions (oxydation du soufre des combustibles fossiles) et il est associé à de nombreuses pathologies respiratoires, souvent en combinaison avec les particules. Il peut entraîner des inflammations et une altération de la fonction respiratoire et les études épidémiologiques montrent également souvent des liens entre dioxyde de soufre et particules dans l'air, et hospitalisations pour troubles respiratoires et cardiaques. Le dioxyde de soufre peut se transformer en particules de sulfates dans l'air ambiant et concourt également au phénomène des pluies acides, néfastes pour les écosystèmes aquatiques et terrestres.

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) : Ils sont émis lors des combustions (chaudières, moteurs...) et le dioxyde d'azote est le plus nocif pour la santé humaine. C'est un gaz irritant pour l'appareil respiratoire et il favorise l'hyperréactivité bronchique. Les populations asthmatiques semblent plus sensibles également à ce polluant. Chez l'enfant il peut favoriser des infections pulmonaires. Les oxydes d'azote participent en outre à la formation de polluants photochimiques comme l'ozone, néfastes pour la santé, et concourent au phénomène des pluies acides.

Les métaux lourds : Ce sont des métaux de densité élevée comme le plomb (Pb), le Mercure (Hg), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Nickel (Ni). Dans l'air ils sont sous forme de particules à l'exception du mercure qui est principalement gazeux. Ils proviennent de combustions, de certains procédés industriels, de l'incinération des déchets. Ils peuvent s'accumuler dans l'organisme et les effets sont variables selon les métaux ; atteintes du système nerveux, des fonctions rénales, hépatiques, etc. Leur dépôt sur les surfaces (sols, eaux, etc.) conduit également à une contamination de la chaîne alimentaire.

Les hydrocarbures et les composés organiques volatils (COV) : Ils sont émis par diverses sources (solvants, pétrochimie, automobiles...) et recouvrent de nombreux composés aux effets différents (odeurs, altération de la fonction respiratoire, troubles nerveux...). Certains COV comme le formaldéhyde et le benzène sont cancérigènes. Les COV contribuent aussi à la formation de polluants photochimiques comme l'ozone, nocifs pour la santé. L'atmosphère peut comporter également des composés organiques persistants et peu volatils tels que des pesticides, dioxines, furanes.

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : Ce sont des composés organiques dont la molécule comporte au moins deux noyaux benzéniques. On y trouve des composés tels que le benzo(a)pyrène qui est cancérigène. Certains HAP peuvent aussi affecter le système immunitaire. Dans l'air ils proviennent notamment des combustions du secteur domestique

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

dans des conditions mal maîtrisées (mauvaises combustions du bois dans des cheminées et foyers ouverts) et pour une plus faible part de la circulation automobile.

Le monoxyde de carbone : Ce gaz est issu des combustions et chaudières mal réglées, et de la circulation automobile. Il se fixe sur l'hémoglobine et peut entraîner des troubles respiratoires, des effets asphyxiants, des maux de tête, et des troubles cardiaques

L'ammoniac (NH₃) : Ce gaz est notamment émis par les lisiers d'élevage. Il est malodorant et irritant à forte concentration. Dans l'air, l'ammoniac contribue à la formation de fines particules et de nitrate d'ammonium, et contribue aux phénomènes d'acidification et d'eutrophisation des milieux naturels par dépôt de matière azotée.

L'ozone et les polluants photochimiques : L'ozone troposphérique résulte majoritairement de réactions chimiques sous l'effet du rayonnement solaire, entre les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone. Ces réactions forment aussi d'autres polluants (nitrate de peroxyacétyle, acide nitrique, aldéhydes, fines particules) regroupés sous le terme de « pollution photochimique ». L'ozone en est le principal constituant et il est néfaste pour la santé humaine et la végétation. L'ozone contribue également à l'effet de serre et constitue, avec les particules, l'une des priorités du programme CAFE (Clean Air For Europe) en matière de préservation de la qualité de l'air en Europe (9).

b) Les particules

L'atmosphère contient de toutes petites particules solides ou liquides en suspension, appelées aérosols. Leur taille varie de quelques nanomètres à presque 100 microns soit l'épaisseur d'un cheveu. En moyenne globale, plusieurs millions de tonnes d'aérosols sont émis chaque jour par une multiplicité de sources à la fois naturelles et humaines. Dans la stratosphère, les aérosols sont rares mais ils peuvent résider plusieurs années. Dans la basse troposphère, où ils sont en général beaucoup plus abondants, les aérosols séjournent quelques jours seulement. Cette durée variant essentiellement selon les précipitations. Il en résulte que, contrairement aux gaz à effet de serre, la concentration des aérosols peut varier de plusieurs ordres de grandeur à des échelles régionales ou journalières (10).

La diversité des sources et des mécanismes physiques et chimiques de formation des aérosols entraîne une grande diversité de tailles et de morphologies des aérosols. Le diamètre d'un aérosol ne sera donc pas unique mais réparti sur plusieurs ordres de grandeurs (11).

1.2.3 Source de la pollution atmosphérique

La pollution de l'atmosphère résulte ainsi du rejet direct de composé gazeux ou sous formes de particules, nocifs pour l'homme ou la biosphère, provenant de divers activités humaines, industrielles, domestiques, agricoles, les transports, les combustions diverses. Les pollutions ainsi sont dites d'origine anthropique. La biosphère produit aussi naturellement des gaz et des particules qui se retrouvent dans l'atmosphère. Ces sources naturelles qui sont souvent de même nature que les polluants, sont appelés terrigènes lorsqu'elles proviennent du sol, biogéniques quand elles sont produites par la matière vivante. Les activités humaines modifient ces émissions, apportant alors une contribution à la pollution atmosphérique (2).

La figure 1.2 présente un schéma illustrant les différentes sources des polluants atmosphériques.

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

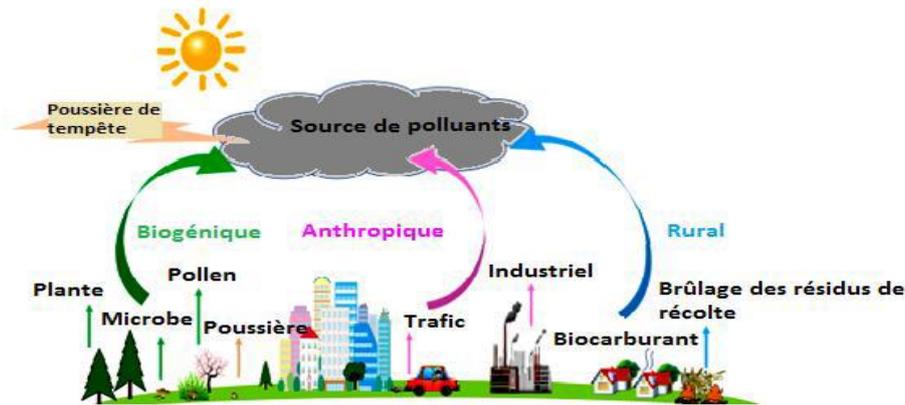


Figure 1-2 : Schéma résumant les différentes sources des polluants atmosphériques (12).

a) Sources des polluants gazeux

- **Les combustibles** de types fossiles mais il faut y ajouter la combustion des déchets.
- **Les polluants gazeux** : sont émis lors de l'incinération des déchets ou encore dans des aciéries.
- **Les activités industrielles** sont sources majeurs de polluants, en raison de leur grande variété, vont engendrer des pollutions diverses, parfois spécifiques.
- **L'évaporation des carburants et solvants**, les composés émis sont des hydrocarbures dont certains sont toxiques.
- **Les émissions de la végétation, des sols, de l'homme et des animaux** : La végétation émet des gaz biogénique, absorbant du gaz carbonique pendant le jour et le relâche en partie pendant la nuit mais elle émet aussi des hydrocarbures de type de l'isoprène et les terpènes.

Les bactéries présentes dans les sols et dans des eaux continentales ou océaniques recyclent la matière organique et entraînent des émissions de gaz carboniques, d'oxyde d'azote, d'ammoniac, des composés de soufre, d'hydrocarbures (CH₄). L'utilisation d'engrais en agriculture a perturbé les cycles biogéochimiques et les émissions des sols s'en trouvent augmentées. L'agriculture aussi responsable de l'émission de pesticides dans l'atmosphère lors de l'étape d'épandage mais aussi par évaporation (2).

b) Source des aérosols

Il existe deux types d'aérosols mélangés dans l'atmosphère, l'aérosol d'origine naturel et l'aérosol de pollution. La part de chacun des deux types dépend de l'éloignement des centres d'activités humaines et industrielles et d'une autre part l'éloignement des zones désertique et marines (2).

✓ Source de particules naturelles

Les principales sources naturelles primaires sont le sel marin, les poussières minérales, matière biologique primaire et particules volcaniques.

Particules minéral de poussière, émises principalement dans les déserts et les régions semi-arides, sont le type de particule le plus abondant (sur une base de masse) dans l'atmosphère au niveau mondial. Les particules de poussière minérale peuvent être transportées depuis des régions telles que les déserts lors de grandes tempêtes de poussière à de longues distances

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

intercontinentales. Pour les zones océaniques ouvertes et éloignées, les dépôts de poussières minérales constituent une source importante de nutriments, en particulier des oligo-éléments tels que le fer ou le phosphore. Les particules de sel de mer sont tout aussi importantes au niveau mondial. Elles sont générées par des processus d'éclatement des bulles et déferlement des vagues à la surface de la mer et sont fortement corrélés avec la vitesse du vent celles-ci par évaporation, conduisent à la formation de cristaux solides. L'aérosol marin est constitué d'ions de chlorure et de sodium mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates (2).

Les particules biologiques primaires comprennent une grande variété de particules comme le pollen, les spores fongiques, les bactéries et les débris végétaux et dans les environnements marins également des matières organiques présentes dans la couche de surface de l'océan.

Les particules naturelles secondaires sont formées à partir de plusieurs contenant de l'azote et du soufre mais également des gaz d'origine organique. A l'échelle mondiale, le Sulfure de diméthyle (SDM) est émis par le phytoplancton marin dans l'atmosphère. Le SDM est oxydé en SO_2 et finalement en acide sulfurique. L'acide sulfurique gazeux forme très rapidement des particules d'aérosol ou se condense sur les particules existantes en raison de sa faible pression de vapeur.

Le nitrate est un autre composant particulaire inorganique important, qui se forme principalement par oxydation des NO_x et du NO_2 . La foudre et les émissions de sol (activités bactériennes) sont les principales sources de ces précurseurs. La plus grande fraction secondaire naturelle est formée à partir de précurseurs organiques gazeux tels que les terpènes et les sesquiterpènes, qui sont émis par les plantes. Par oxydation dans l'atmosphère, principalement avec OH, O_3 ou NO_3 . Certains de ces produits de réaction à basse pression de vapeur se condensent sur des particules. La composition chimique des composés organiques secondaire est très complexe et plusieurs centaines de composés peuvent être trouvés dans les particules d'aérosol organiques secondaires formées à partir d'un seul gaz précurseur organique (13).

- **Sources de particules anthropiques**

Les particules primaires générées par les activités humaines incluent la combustion de la biomasse, combustion de combustibles fossiles et activités industrielles. Bien que les feux de forêt puissent avoir des causes purement naturelles, ils sont souvent liés à des activités anthropiques. Ces dernières années, il a également été reconnu qu'une fraction importante de la production biologique de particules présente dans l'atmosphère est due à la biomasse brûlante des activités de chauffage et de cuisine résidentielles, non seulement dans les pays en développement mais aussi dans les pays industrialisés. Suie (c'est-à-dire du carbone semblable à du graphite), des matières organiques et des sels inorganiques sont les composants principaux de la particule brûlant de la biomasse et peut varier considérablement en fonction du type de biomasse, des conditions de combustion et les conditions de ventilation. En outre, un certain nombre de processus industriels à grande échelle peuvent émettre des masses de particules dans l'atmosphère telles que les mines, les cimenteries, ou industrie de transformation des métaux. Ces sources sont souvent d'importance locale (13).

La figure 3 donnant les principales sources biogéniques et anthropiques d'aérosols organiques à Beijing, en Chine en 2018.

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

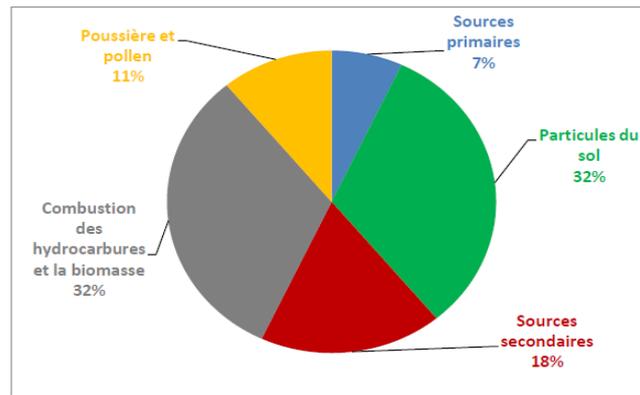


Figure 1-3 : Schéma résumant les différentes sources des aérosols atmosphériques biogéniques et anthropiques d'aérosols organiques à Beijing, en Chine 2018 (12).

1.2.4 Météorologie et pollution

Les concentrations et la distribution spatiotemporelle des polluants ne sont pas seulement déterminées par les sources et les transformations physicochimiques. Elles sont aussi dues à des paramètres physiques qui révèlent de la dynamique atmosphérique. Un épisode de pollution est observé lorsque les émissions de polluants sont importantes et quand la météo est défavorable tels que l'absence ou faible vent, chaleur et lumière, absence de pluies, couche d'inversion basse (2).

1.2.4.1 Influence du vent

Le vent tend à disperser la pollution surtout en l'absence de relief. Plus le vent est fort plus la pollution se disperse rapidement.

1.2.4.2 Influence de la chaleur et de la lumière

La lumière et la température augmentent la probabilité et la vitesse des réactions photochimiques et les concentrations radicaux oxydants tels que le OH. Les espèces primaires disparaissent rapidement et les substances secondaires apparaissent rapidement.

1.2.4.3 Présence de pluies

La présence de pluies ou de neige conduit toujours à une diminution de la pollution. Deux phénomènes de lessivage de l'atmosphère par les pluies sont responsables de cette diminution

- Incorporation des gaz dans le nuage.
- Lessivage des particules sous le nuage.

Les gaz solubles se dissolvent dans les gouttes d'eau de nuages, c'est le phénomène d'incorporation. En tombant la pluie entraîne mécaniquement vers le sol les polluants. Les particules et certains gaz sont lessivés par la pluie, c'est le phénomène d'abattement. L'atmosphère est purifiée mais il peut y avoir un transfert de la pollution de l'air vers les sols ou les eaux de surfaces.

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

1.2.4.4 Couche d'inversion

Dans la couche de mélange, les polluants se diluent dans le volume atmosphérique « V » (appelé boîte atmosphérique) délimité par la surface au sol (S) et la hauteur de la couche de mélange (H). La concentration est alors :

$$[C] = \frac{G}{V} = \frac{G}{S \times H} \quad (1)$$

Avec :

G la quantité de polluant exprimé en Kg

H exprimée en Km.

S s'exprime en Km².

On prend souvent comme surface au sol : S = 1 Km² donc :

$$[C] = \frac{G}{H} \quad (2)$$

Dans les conditions normales, la hauteur H de la couche de mélange s'étend du sol jusqu'à la troposphère libre, dans certaines conditions météo, il se produit, en altitude, une inversion de température, et la masse d'air est « bloquée » par cette couche d'inversion qui agit comme un couvercle empêchant la dispersion verticale des polluants. Si la dispersion verticale est empêchée donc le volume d'air sera faible, puisque la quantité de polluant G reste la même, la concentration des polluants augmente.

Les causes de l'existence de ces couches d'inversion diffèrent suivant le lieu d'observation. Elles peuvent être dues à un :

Rapide refroidissement du sol. La couche d'inversion peut alors être très basse (200 m) (2).

1.3 Effets de la pollution atmosphérique

1.3.1 Effets sur la santé

Les polluants agissant sur la santé peuvent avoir des effets selon diverses échelles, ces effets sur la santé peuvent se répartir en effets aigus (à court terme) et effets chroniques (à long terme) (14).

Les polluants peuvent agir à différents niveaux du corps humain : (voir tableau 1.1) (15).

Tableau 1-1 : Effets des principaux polluants sur la santé

Origine	Effets sur la santé
Oxydes d'azotes (NO_x) Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO ₂) sont principalement produits par les transports et les centrales thermiques.	Irritations de l'appareil respiratoire, crises d'asthme et bronchiolite

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

<p>Dioxyde de soufre (SO₂)</p> <p>Provient de la combustion du fuel, charbon et diesel.</p>	<p>Très soluble, rapidement absorbé par les surfaces humides de la bouche, du nez. Irritant respiratoire, contribue à l'exacerbation des troubles bronchiques</p>
<p>Monoxyde de carbone (CO)</p> <p>Produit par les moteurs à essence et la circulation routière.</p>	<p>Atteinte du système nerveux central et des organes sensoriels.</p>
<p>Ozone (O₃)</p> <p>Produit dans la basse atmosphère par interaction entre les ultraviolets et les gaz tels que CO, SO₂, NO_x, COV et hydrocarbures.</p>	<p>Atteint facilement les alvéoles pulmonaires, toux, altération pulmonaire surtout chez l'enfant et l'asthmatique. Effets aggravés par l'exercice physique.</p>
<p>Composés organiques volatils (COV)</p> <p>Proviennent des hydrocarbures (benzène, 1-3butadiène) émis dans les gaz d'échappement et des solvants.</p>	<p>Irritants pour les yeux, gorge, nez, poumons.</p> <p>Capacité respiratoire diminuée.</p> <p>Risques d'effets cancérogènes.</p>
<p>Particules en suspension (Ps)</p> <p>Produits de combustion industrielle, chauffage et incinération de déchets. Les particules les plus fines sont émises par les moteurs diesel.</p>	<p>Très dangereuses même à de faibles concentrations. Altération de la fonction respiratoire chez l'enfant.</p> <p>Propriétés cancérogènes pour les composés émis par les moteurs diesel.</p>
<p>Plomb (Pb)</p> <p>Provient des hydrocarbures plombés.</p>	<p>Modifie la composition du sang en gênant la fabrication de l'hémoglobine.</p>

1.3.2 Effets des polluants sur l'environnement

D'après Kalaora «L'environnement s'inscrit d'abord dans une logique de rationalisation administrative et non dans une logique de participation et de communication écologique» (16). Le tableau 1.2 résume les effets et les contributions des principaux polluants atmosphériques sur l'environnement (17).

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

Tableau 1-2 : Effets des principaux polluants sur l'environnement

Origine	Effets sur l'environnement
Oxydes d'azotes (NO_x) Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO ₂)	Participation au phénomène des pluies acides Participation à la formation de l'ozone troposphérique (celui des basses couches) Atteinte de la couche d'ozone stratosphérique Participation à l'augmentation de l'effet de serre
Dioxyde de soufre (SO₂)	Participation au phénomène des pluies acides par transformation en acide sulfurique au contact de l'humidité de l'air. Dégradation de la pierre et des matériaux de nombreux bâtiments
Monoxyde de carbone (CO)	Participation à la formation de l'ozone troposphérique Dans l'atmosphère, il contribue à l'augmentation de l'effet de serre par transformation en dioxyde de carbone CO ₂ .
Ozone (O₃)	Diminution des rendements agricoles Dégradation des matériaux (caoutchouc par exemple) Participation à l'augmentation de l'effet de serre.
Composés organiques volatils (COV) dont benzène	Participation à la formation de l'ozone troposphérique (rôle majeur avec les oxydes d'azote) Participation indirecte à l'augmentation de l'effet de serre (par intervention dans des mécanismes conduisant à la formation des gaz à effet de serre).
Particules en suspension (PM10)	Effets de salissure des monuments et bâtiments.
Métaux (Pb..Etc..)	Contamination des sols et des aliments Accumulation dans les organismes vivants et perturbation des mécanismes et équilibres biologiques.

1.4 Réglementation sur la qualité de l'air

La pollution de l'air, à l'intérieur des locaux comme à l'extérieur, est un problème majeur de santé environnementale touchant aussi bien les pays à revenu faible, intermédiaire ou élevé. En 2016, on estimait à 4,2 millions le nombre de décès prématurés causés dans le monde par la pollution ambiante (de l'air extérieur) dans les zones urbaines et rurales ; cette mortalité est due à l'exposition aux particules d'un diamètre de 2,5 microns ou moins (PM_{2,5}, qui provoquent des maladies cardiovasculaires et respiratoires, et des cancers.

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

1.4.1 En Algérie

Pour contrôler la pollution générée par les rejets gazeux, préserver la santé des populations et protéger l'environnement, l'état algérien a mis au point des lois et des décrets qui spécifient des valeurs de concentration (ou des facteurs d'émission) de polluants à respecter dans le milieu tant en pollution moyenne qu'en pointe. Selon les caractéristiques physiques et chimiques des particules concernées. Les seuils d'alerte sont fixés, le cas échéant, par arrêté conjoint du ministre chargé de l'environnement et du ministre concerné par l'activité engendrant le type de particule considérée.

Art. 9. — Lorsque les seuils d'information et les seuils d'alerte fixés sont atteints ou risquent de l'être, le ou les walis concernés prennent toutes les mesures visant à protéger la santé humaine et l'environnement ainsi que les mesures de réduction et/ou de restriction des activités polluantes. Pour les particules fines en suspension Les valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit

Art. 6. Valeurs limites ainsi que les objectifs de qualité de l'air sont fixés comme suit :
Particules fines en suspension :

- Objectif de qualité : 50 $\mu\text{g} / \text{Nm}^3$.
- Valeur limite : 80 $\mu\text{g} / \text{Nm}^3$.

En général, la réglementation fixe diverse seuils avec un objectif bien déterminé.

Objectifs de qualité: Un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement, à atteindre dans une période donnée (18).

Valeur limite : Un niveau maximal de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, fixé sur la base de connaissances scientifiques.

Seuil d'information : Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée a des effets limités et transitoires sur la santé de catégories de la population particulièrement sensibles.

Seuil d'alerte : Un niveau de concentration des substances polluantes dans l'atmosphère au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou pour l'environnement. Contrairement aux normes algériennes traitant des particules fines sans leur donner une définition, les normes européennes portent sur les particules PM-10 et PM-2,5.

Les limites des rejets atmosphériques fixées par le Décret exécutif n° 06-138 du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leurs contrôle.

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

Tableau 1-3 : Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques-Journal officiel-

17 Rabie El Aouel 1427 16 avril 2006		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 24			13
ANNEXE I					
VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS ATMOSPHERIQUES					
N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE DES VALEURS LIMITES DES INDUSTRIES ANCIENNES	
1	Poussières totales	mg/Nm ³	50	100	
2	Oxydes de soufre (exprimés en dioxyde de soufre)	"	300	500	
3	Oxydes d'azote (exprimés en dioxyde d'azote)	"	300	500	
4	Protoxyde d'azote	"	300	500	
5	Chlorure d'hydrogène et autres composés inorganiques gazeux du chlore (exprimé en HCL).	"	50	100	
6	Fluor et composés inorganiques du fluor (gaz, vésicule et particules), (exprimés en HF)	"	10	20	
7	Composés organiques volatils (Rejet total de composés organiques volatils à l'exclusion du méthane)	"	150	200	
8	Métaux et composés de métaux (gazeux et particulaires)	"	5	10	
9	Rejets de cadmium, mercure et thallium, et de leurs composés	"	0,25	0,5	
10	Rejets d'arsenic, sélénium et tellure et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	"	1	2	
11	Rejets d'antimoine, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, vanadium et zinc, et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	"	5	10	
12	Phosphine, phosgène	"	1	2	
13	Acide cyanhydrique exprimé en HCN, brome et composés inorganiques gazeux du chrome exprimés en HBr, chlore exprimé en HCl, Hydrogène sulfuré	"	5	10	
14	Ammoniac	"	50	100	
15	Amiante	"	0,1	0,5	
16	Autres fibres que l'amiante	"	1	50	

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

1.4.2 A l'échelle européenne

Le sixième programme d'action communautaire pour l'environnement, arrêté par la décision n° 1600/2002/CE du Parlement européen et du Conseil du 22 juillet 2002, établit la nécessité de réduire la pollution à des niveaux qui en minimisent les effets nocifs sur la santé humaine en accordant une attention particulière aux populations sensibles et sur l'environnement dans son ensemble, d'améliorer la surveillance et l'évaluation de la qualité de l'air, y compris en ce qui concerne les retombées de polluants, et de fournir des informations au public.

Afin de protéger la santé humaine et l'environnement dans son ensemble, il est particulièrement important de lutter contre les émissions de polluants à la source, ainsi que de définir et de mettre en œuvre les mesures de réduction les plus efficaces aux niveaux local, national et communautaire. Il convient dès lors d'éviter, de prévenir ou de réduire les émissions de polluants atmosphériques nocifs, et de définir des objectifs appropriés en matière de qualité de l'air ambiant en tenant compte des normes, des orientations et des programmes de l'Organisation mondiale de la santé (19).

Détermination des exigences pour l'évaluation des concentrations d'anhydride sulfureux, de dioxyde d'azote et d'oxydes d'azote, de particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) et de monoxyde de carbone dans l'air ambiant à l'intérieur d'une zone ou d'une agglomération

ANNEXE II SECTION A ([la directive européenne \(2008/50/CE\) du 21 mai 2008](#))

Seuils d'évaluation supérieurs et inférieurs

Les seuils d'évaluation supérieurs et inférieurs ci-après s'appliquent.

- **Anhydride sulfureux**

Tableau 1-4: Réglementation européenne concernant Anhydride sulfureux

	Protection de la santé	Protection de la végétation
Seuil d'évaluation supérieur	60 % de la valeur limite par 24 heures (75 µg/m ³ , à ne pas dépasser plus de trois fois par année civile)	60 % du niveau critique hivernal (12µg/m ³)
Seuil d'évaluation inférieur	40 % de la valeur limite par 24 heures (50 µg/m ³ , à ne pas dépasser plus de trois fois par année civile)	40 % du niveau critique hivernal (8µg/m ³)

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

- **Dioxyde d'azote et oxydes d'azote**

Tableau 1-5 : Règlementation européennes Dioxyde d'azote et oxydes d'azote

	Valeur limite horaire pour la protection de la santé humaine (NO₂)	Valeur limite annuelle pour la protection de la santé humaine (NO₂)	Niveau critique annuel pour la protection de la végétation et des écosystèmes naturels (NO_x)
Seuil d'évaluation supérieur	70 % de la valeur limite (140 µg/m ³ , à ne pas dépasser plus de dix-huit fois par année civile)	80 % de la valeur limite (32 µg/m ³)	80 % du niveau critique (24 µg/m ³)
Seuil d'évaluation inférieur	50 % de la valeur limite (100 µg/m ³ , à ne pas dépasser plus de dix-huit fois par année civile).	65 % de la valeur limite (26 µg/m ³)	65 % du niveau critique (19,5 µg/m ³)

- **Particules (PM₁₀/PM_{2,5})**

Tableau 1-6 : Règlementation européenne Particules (PM₁₀/PM_{2,5})

	Moyenne sur 24 heures PM₁₀	Moyenne annuelle PM₁₀	Moyenne annuelle PM_{2,5} (1)
Seuil d'évaluation supérieur	70 % de la valeur limite (35 µg/m ³ , à ne pas dépasser plus de trente-cinq fois par année civile)	70 % de la valeur limite (28µg/m ³)	70 % de la valeur limite (17µg/m ³)
Seuil d'évaluation inférieur	50 % de la valeur limite (25 µg/m ³ , à ne pas dépasser plus de trente-cinq fois par année civile)	50 % de la valeur limite (20 µg/m ³)	50 % de la valeur limite (12 µg/m ³)

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

- **Monoxyde de carbone**

Tableau 1-7 : Réglementation européenne sur Monoxyde de carbone

	Moyenne sur 8 heures
Seuil d'évaluation supérieur	70 % de la valeur limite (7 mg/m ³)
Seuil d'évaluation inférieur	50 % de la valeur limite (5 mg/m ³)

(¹) Le seuil d'évaluation supérieur et le seuil d'évaluation inférieur pour les PM_{2,5} ne s'appliquent pas aux mesures effectuées pour évaluer la conformité à l'objectif de réduction de l'exposition aux PM_{2,5} pour la protection de la santé humaine.

1.4.3 Au niveau mondiale

Les Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air de 2005 présentent des recommandations d'ordre général concernant les valeurs seuils des principaux polluants de l'air qui posent des risques de santé. Il y est indiqué qu'on peut diminuer de 15% environ la mortalité imputable à la pollution de l'air en réduisant la pollution par les matières particulaires PM₁₀ de 70 à 20 microgrammes par mètre cube (20).

Ces lignes directrices sont applicables dans le monde entier et se fondent sur l'analyse par des experts de données scientifiques contemporaines récoltées dans toutes les Régions de l'OMS concernant :

- les matières particulaires (PM)
- l'ozone (O₃)
- le dioxyde d'azote (NO₂)
- le dioxyde de soufre (SO₂)

Ces recommandations sont en cours de révision, la nouvelle version devrait être publiée en 2020.

➤ **Valeurs recommandées**

- **Matières particulaires fines (PM_{2,5})**

10 µg/m³ moyenne annuelle

25 µg/m³ moyenne sur 24 heures

- **Matières particulaires grossières (PM₁₀)**

20 µg/m³ moyenne annuelle

50 µg/m³ moyenne sur 24 heures

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

- **Ozone (O₃)**

100 µg/m³ moyenne sur 8 heures

Sur la base de liens récemment établis entre la mortalité journalière et la concentration d'ozone dans l'air, la valeur seuil d'ozone préconisée dans les Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air a été abaissée par rapport à celle des éditions précédentes qui s'élevait à 120 µg/m³.

- **Dioxyde d'azote (NO₂)**

40 µg/m³ moyenne annuelle

200 µg/m³ moyenne horaire

La valeur guide actuelle de l'OMS de 40 µg/m³ (moyenne annuelle), a été fixée pour protéger le public des effets du NO₂ gazeux sur la santé.

- **Dioxyde de soufre (SO₂)**

20 µg/m³ moyenne sur 24 heures

500 µg/m³ moyennes sur 10 minutes

La concentration de SO₂ ne doit pas dépasser 500 µg/m³ en moyenne sur 10 minutes. Selon certaines études, une proportion d'asthmatiques voient leur fonction pulmonaire s'altérer et des symptômes respiratoires apparaître après une exposition au SO₂ de seulement 10 minutes.

- On sait maintenant que le SO₂ a des effets sur la santé à des concentrations bien plus faibles qu'on ne le soupçonnait auparavant.
- Il faut s'en protéger davantage.
- Bien que l'on ne connaisse pas encore exactement la cause des effets du SO₂ à de faibles concentrations, il est probable qu'en abaissant celles-ci on obtiendra aussi une réduction de l'exposition aux polluants associés.

1.5 La place de la modélisation

Le rôle de la modélisation de la dispersion atmosphérique peut paraître secondaire par rapport aux mesures législatives de réduction des émissions. Pourtant cette dernière est une composante importante de la gestion de la pollution pour les pouvoirs publics, mais aussi pour les exploitants de sites industriels. La modélisation permet de mieux comprendre les phénomènes physiques mis en jeu et constitue un outil indispensable pour concevoir les moyens de lutte contre la pollution.

Ainsi la place de la modélisation dans la problématique de la pollution industrielle se situe à plusieurs niveaux :

- **Surveillance de sites**

La modélisation intervient tout d'abord dans la surveillance de sites industriels. Elle peut venir compléter et préciser des mesures réalisées par les capteurs fixes de pollution disséminés sur le

Chapitre 01 : généralités sur la pollution atmosphérique

site. Les outils de modélisation permettent alors d'exploiter les données issues de ces capteurs en traçant des cartographies de concentration et visualiser ainsi les zones à fortes concentrations de polluant tout en évaluant l'exposition réelle de la population aux alentours des sites industriels, mais aussi celle des employés au voisinage des installations. De par sa capacité à étudier des épisodes passés de forte pollution, elle permet aux exploitants d'améliorer leur réactivité devant des scénarii similaires mais aussi de choisir de manière optimale l'emplacement de futurs capteurs qui permettront une surveillance de plus en plus précise. La surveillance des sites passe aussi par un contrôle en temps réel et prévisionnel de la pollution. La modélisation permet alors la création d'outils assurant le suivi en temps réel des concentrations aux abords des sites mais aussi, en fonction des prévisions météorologiques et des activités du site, ces outils prévisionnels peuvent assurer le pilotage de la production en limitant cette dernière en cas de risque de pollution sur les villes limitrophes.

Pour finir, le recours à la modélisation peut s'avérer indispensable pour localiser une source lorsqu'un le seuil d'un capteur est dépassé, on parle alors de modélisation inverse. Au bilan, la modélisation de la dispersion atmosphérique permet aux exploitants de réagir de manière adaptée et rapide à une situation de pollution repérée par un capteur, mais elle apporte aussi, par des études de scénarii, une aide quant à la prise de décision.

- **Aide à la décision**

L'un des principaux intérêts de la modélisation pour les exploitants de sites industriels est de pouvoir étudier les modifications engendrées par un changement des conditions d'un problème. Ainsi, il est possible avec les outils actuels de prédire l'impact de l'ajout d'une géométrie ou d'un terme source sur les sites industriels. Plusieurs scénarii peuvent être testés et simulés afin d'aider les politiques et les exploitants à choisir le meilleur compromis entre rentabilité et protection des populations aux alentours. Ainsi la modélisation prend une place très importante dans l'optique de réalisation de PPRT par exemple. Les études de dangers sont alors réalisées en partie par des modèles de calcul, qui lors d'aménagements particuliers (implantation d'usine, réorganisation de l'urbanisme aux alentours d'un site, etc.) apportent des renseignements sur la pollution engendrée et évaluent l'efficacité des différentes politiques mises en œuvre. Finalement, l'apport de la modélisation atmosphérique au niveau de l'aide à la décision est très important et permet de faciliter la coexistence entre la rentabilité et la production du monde industriel et la sécurité des populations environnantes.

1.6 Conclusion

Depuis une vingtaine d'années, la pollution atmosphérique est devenue pour les décideurs un sujet de préoccupation certain. L'augmentation des densités de population dans les grandes métropoles et la proximité des installations industrielles ont contribué à faire de la pollution de l'air un problème sanitaire majeur. Ainsi en ce début de XXIème siècle, de nombreuses normes sont en places et constituent de forts moyens d'action pour limiter les rejets polluants, qu'ils soient d'origine automobile, tertiaire ou industrielle. On peut d'ores et déjà observer les effets de ces mesures par une nette diminution des principaux polluants.

Avec l'amélioration des moyens informatiques et des connaissances, la modélisation s'est petit à petit développée afin de venir s'installer, en appui des limitations de rejet, dans un système de solution visant à réduire les émissions et à gérer les conséquences de la pollution.

Ainsi, cette introduction à la problématique de la pollution de l'air a permis de présenter le contexte général dans lequel s'instaure l'utilisation de la modélisation et plus particulièrement son utilisation dans le secteur de l'industrie.

CHAPITRE 02 :

MODELISATION DE LA

DISPERSION DES POLLUANTS

ATMOSPHERIQUE

2 Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

Ce chapitre présente un résumé des connaissances théoriques et empiriques sur la dispersion de matière dans les écoulements atmosphériques. Afin de bien comprendre le rôle joué par les différents phénomènes, nous présentons dans un premier temps le cas "simple" de la dispersion dans une atmosphère neutre, sur un sol plat, à partir d'une source ponctuelle. Les paragraphes suivants décrivent différents effets plus complexes qui peuvent modifier le comportement du panache et les concentrations observées : la stratification thermique, la nature et les conditions initiales du rejet, l'influence du relief et des bâtiments, les phénomènes de déposition et les processus d'envol de particules, les fluctuations de concentration.

2.1 Phénoménologie de la couche limite atmosphérique

2.1.1 Mouvement de l'air atmosphérique

La circulation générale de l'air atmosphérique est le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la Terre. Cette dernière redistribue l'énergie provenant du soleil et qui a chauffée de manière inhomogène les différentes régions de la planète. En effet de part la forme ellipsoïdale de la Terre, la radiation solaire incidente au sol varie entre un maximum aux régions équatoriales et un minimum à celles proches des pôles. Par conséquent, il s'en suit un réchauffement différencié entre les deux régions et c'est ce flux de chaleur ainsi créé qui est responsable des grands mouvements de masse d'air. D'un point de vue dynamique, les mouvements convectifs ainsi créés sont soumis à deux forces. La première, la force de Coriolis, est directement liée à la rotation de la Terre et dévie, en altitude, les trajectoires de ces masses d'air. Quant à la deuxième, c'est une force de frottement qui se manifeste au contact du sol et qui a pour conséquence un ralentissement du mouvement. L'influence relative de ces deux forces sur le mouvement de l'air atmosphérique permet alors de distinguer deux zones au sein de l'atmosphère :

- **l'atmosphère libre**, zone à partir de laquelle les effets du frottement de l'air sur la surface de la Terre deviennent négligeables devant ceux produits par la force de Coriolis.
- **la couche limite atmosphérique** qui est située au voisinage du sol. Dans cette zone, le frottement devient progressivement prépondérant par rapport à la force de Coriolis. C'est la zone d'intérêt de notre travail. Par conséquent dans la suite de notre étude nous négligerons la force de Coriolis.

2.1.2 La couche limite atmosphérique

Nous l'avons vu au paragraphe précédent, la couche limite atmosphérique (CLA) est la partie de l'atmosphère la plus proche du sol et dans laquelle les effets de la force de Coriolis s'estompent petit à petit en faveur des forces de frottement dues à l'influence du sol, lorsque l'on se rapproche de ce dernier. Ainsi, à l'intérieur de la CLA les mouvements de l'air atmosphérique sont fortement perturbés par les discontinuités qu'impose la surface terrestre.

Par exemple, les effets du relief et des obstacles génèrent l'apparition de perturbations qui peuvent se propager jusque dans l'atmosphère libre (onde de relief, déferlement de pente, etc.). La présence du sol impose aussi la création de phénomènes thermiques (échanges de chaleur entre le sol et l'air) pouvant entraîner la formation d'écoulements locaux tels que les brises de mer ou de montagne par exemple. De par sa position proche du sol, la couche limite atmosphérique devient une partie privilégiée de l'atmosphère lorsque l'on s'intéresse aux interactions entre cette dernière et les activités humaines. Nous détaillerons ainsi cette couche

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

inférieure dans les paragraphes suivants afin de présenter les notions physiques nécessaires à la compréhension du cheminement de notre étude.

2.1.2.1 Caractéristiques de la couche limite atmosphérique

D'un point de vue assez général, l'épaisseur de la couche limite atmosphérique est comprise entre 100 et 2000 m. Pour étudier la CLA, on considère que sa structure est uniforme horizontalement et qu'elle peut être divisée en trois couches, représentées sur la Figure 2-1.

- **la couche de transition d'Ekman**, dans la partie supérieure, à l'intérieur de laquelle les effets du frottement sur le sol et de Coriolis s'équilibrent.
- **la couche limite de surface (CLS)**, dans la partie la plus proche du sol. Elle est définie comme la région où la température diminue rapidement avec l'altitude pendant la journée, et où les flux de quantité de mouvement, de chaleur sensible et latente sont conservatifs et égaux à ceux du sol. Elle s'étend du sol à quelques centaines de mètres et représente environ 10% de la hauteur de la couche limite atmosphérique. Les propriétés dynamiques et turbulentes y sont homogènes horizontalement, et la force de Coriolis négligeable devant les forces de frottement dues au sol.
- **la canopée**, zone dans laquelle l'effet individuel des obstacles (microrelief, bâtiments, arbres) peut être mis en avant.

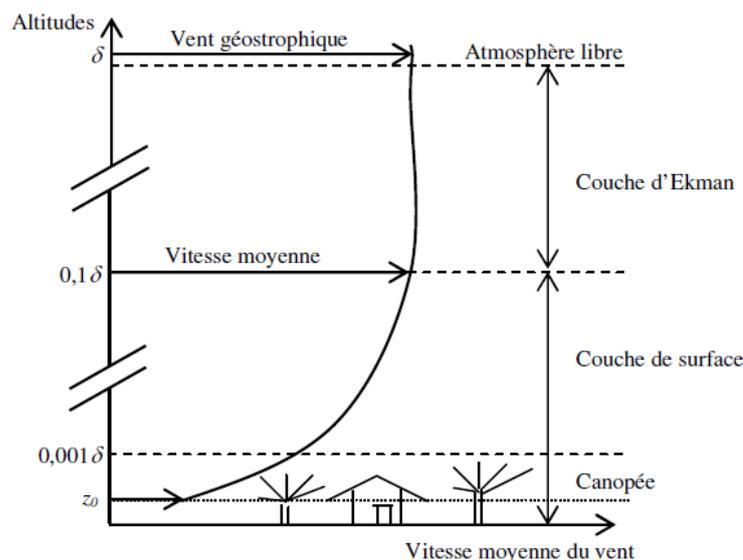


Figure 2-1 : Structure de la couche limite atmosphérique (21)

On peut aussi observer que la CLA, n'est pas homogène au court du temps (21). En effet, l'alternance entre les cycles diurnes et nocturnes permet la création de flux thermiques variables entraînant la formation de couches stables et instables. De plus, l'irrégularité de la nature du sol (variation de rugosité ou de flux de chaleur) impose une inhomogénéité spatiale de la couche limite permettant alors d'observer, à l'intérieur de cette CLA, le développement de couches limites internes. (22) (23).

2.2 Introduction à la dispersion de polluants issus d'une source Ponctuelle en atmosphère neutre

Le cas que l'on rencontre le plus fréquemment dans l'étude de la dispersion de polluants industriels est le cas d'un rejet ponctuel continu, qui s'effectue par exemple au niveau d'une cheminée. C'est pourquoi nous allons souvent nous intéresser à ce cas dans la suite du chapitre.

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

L'allure générale du nuage de polluants issu d'une source ponctuelle (appelé panache) est illustrée sur la Figure 2-3. L'enveloppe du nuage a une forme allongée qui s'étire dans la direction du vent. Il faut noter qu'un panache n'est visible à l'œil nu que si l'espèce transportée est visible et en concentration suffisante (exemple des panaches de condensation ou de particules solides).

a) Exemple d'un panache industriel



b) Profils de concentration dans un panache et au niveau du sol

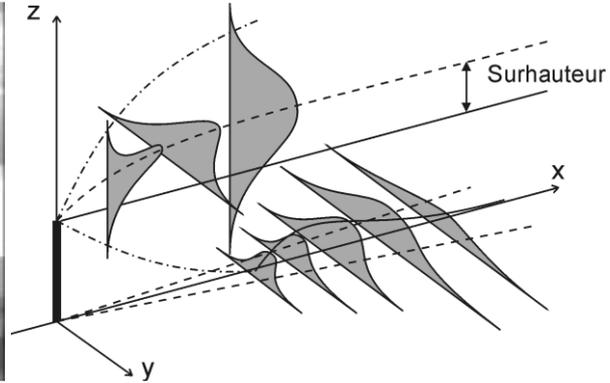


Figure 2-2 Dispersion d'un panache à partir d'une source ponctuelle.

La concentration en polluants dans un panache n'est pas uniforme. Elle est maximale au voisinage de l'axe du panache et diminue plus on s'éloigne de cet axe. Nous avons montré que la distribution transversale de concentration est approximativement gaussienne pour une source ponctuelle (Figure 2-2a et Figure 2-2-b). Cette distribution gaussienne est principalement caractérisée par le débit Q de la source, par la vitesse U du vent et par ses écarts-types transversaux s_y et verticaux s_z . Au cours du transport du panache par le vent, ces écarts-types augmentent sous l'effet du mélange par la turbulence atmosphérique. En raison du fait que la quantité transportée par le panache doit rester constante, l'étalement de la distribution transversale de concentration se traduit par une diminution de la concentration sur l'axe du panache (Figure 2-3). Ainsi, on peut considérer que plus on s'éloigne du point de rejet, plus la concentration due à ce rejet diminue et tend vers zéro.

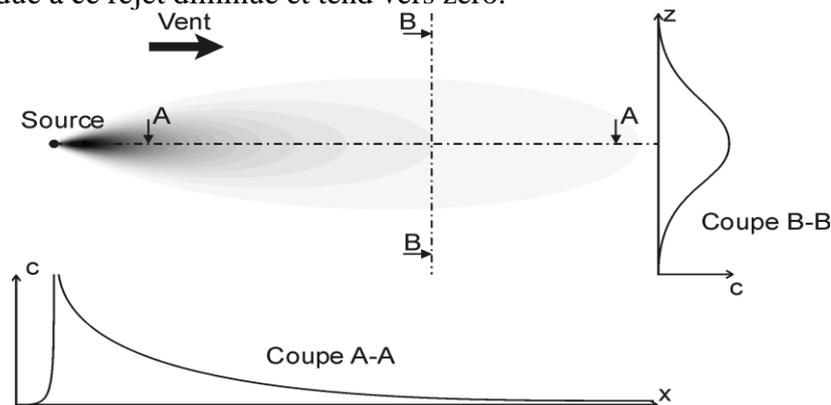


Figure 2-3 Profils de concentration dans un panache.

Le comportement simplifié que nous venons de décrire est en réalité compliqué par une multitude d'effets liés à la complexité des écoulements atmosphériques. L'action de ces effets sur la concentration dans le panache est schématisée sur la Figure 2-4. On note sur cette figure que la prise en compte de la plupart des effets s'effectue à travers la connaissance du champ de vent ou de turbulence. En particulier, un modèle gaussien tient compte de ces différents effets

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

en paramétrant leur influence sur les variables U , s_x , s_y , s_z , Q et sur la position de la source. Les effets présentés sur la Figure 2-4 sont introduits progressivement au cours de ce chapitre.

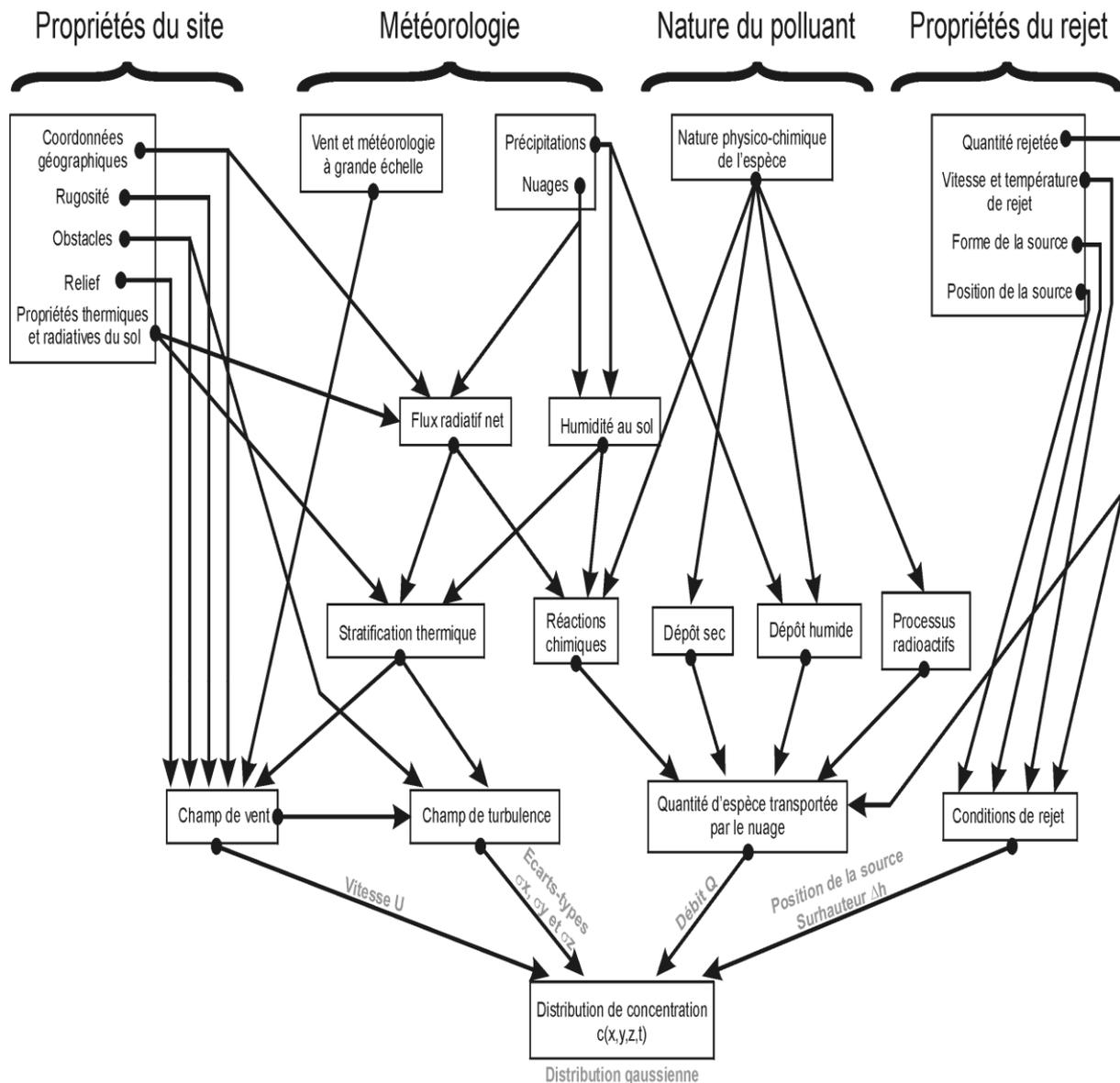


Figure 2-4 : Schéma de synthèse des processus qui affectent la distribution de concentration dans un panache.

2.2.1 Influence de la surface terrestre

Le premier effet qui induit une modification de la dispersion d'un panache est la présence du sol.

En effet, la surface terrestre constitue un obstacle à la diffusion des polluants qui ne peuvent pas pénétrer dans le sol. Tant que le panache est situé loin au-dessus du sol, il n'est quasiment pas modifié par sa présence. Lorsque l'étalement vertical du panache est suffisant pour que la concentration à la surface soit non négligeable, la présence du sol a pour effet d'augmenter localement la concentration, comme cela est illustré sur la Figure 2-5. S'il n'y a pas de mécanisme de dépôt, le gradient vertical de concentration au sol est nul.

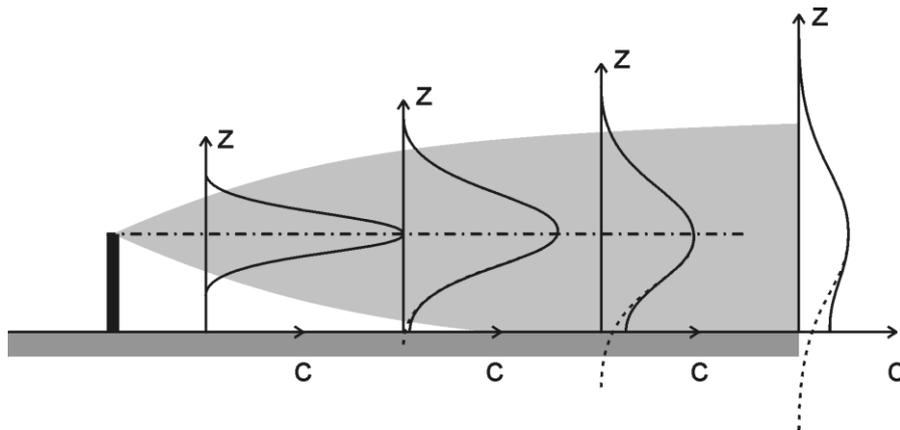


Figure 2-5 : Interaction d'un panache de polluants avec le sol

Conceptuellement, le panache se comporte comme s'il existait une source image, de même débit que la source réelle, et symétrique de celle-ci par rapport au sol. Cette notion de réflexion du panache par rapport au sol est utilisée dans les modèles gaussiens pour prendre en compte la présence du sol. Il faut noter que dans les modèles gaussiens, les formulations classiques, utilisées pour paramétrer les écarts-types s_y et s_z , (exemple des formulations de Pasquill ou de Doury) ne tiennent pas compte de la présence du sol. Il est donc nécessaire, dans ce type de modèle, de modéliser explicitement l'existence d'une paroi au niveau du sol.

2.2.2 Influence de la vitesse du vent et du gradient de vitesse

La vitesse du vent constitue un des paramètres déterminants de la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Il est donc important de déterminer le rôle de la vitesse et de définir comment déterminer cette vitesse lorsque le champ de vitesse n'est pas uniforme. Nous ne nous intéresserons ici qu'à la vitesse moyenne du vent.

- **Rôle de la vitesse**

Dans le cas d'un rejet instantané, la vitesse du vent influence le transport (ou advection) de la bouffée de polluants. Si le rejet est effectué à l'instant $t = 0$, un capteur situé à une distance x en aval du rejet mesurera une concentration maximale au bout d'un temps $\Delta t = x / U$. Cette durée est donc d'autant plus courte que la vitesse du vent est élevée. Par contre, la concentration maximale observée sera indépendante de la vitesse du vent, tant que cette vitesse est suffisamment élevée (en fait, cela est vrai tant que la turbulence de l'écoulement est proportionnelle à la vitesse moyenne). Pour des vents faibles ($U=1\text{m/s}$) ou des situations fortement convectives, la concentration maximale observée lors du passage du nuage n'est plus indépendante de la vitesse. Des paramétrisations particulières sont alors nécessaires pour traiter ces situations.

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

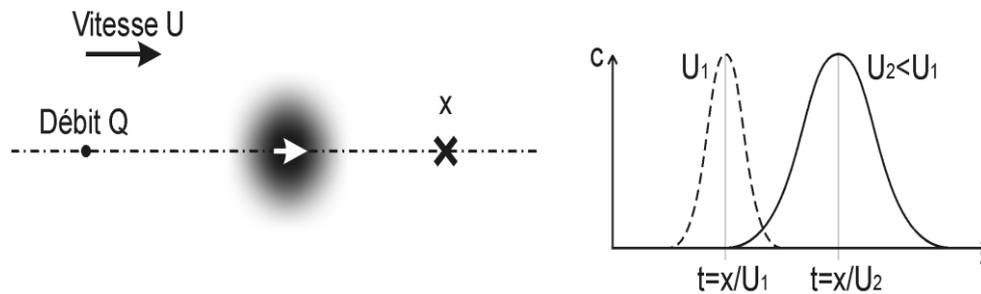


Figure 2-6 : Evolution de concentration lors du passage d'une bouffée de polluants rejetée de façon ponctuelle (en $x = 0$) et instantanée (en $t = 0$).

Dans le cas d'un rejet continu (de débit constant au cours du temps), la concentration en tout point du panache est inversement proportionnelle à la vitesse du vent. L'allure de la distribution spatiale de concentration, en particulier les écarts-types σ_x et σ_y , reste identique quelle que soit la vitesse du vent :

$$c \propto \frac{1}{U} \quad (3)$$

Ce résultat très important n'est cependant valable que si la vitesse du vent est suffisamment élevée (une relation inversement proportionnelle entre la concentration et la vitesse du vent conduit à une concentration infinie lorsque la vitesse du vent est nulle). Pour des vents faibles ($U=1$ m/s), le panache diffuse uniquement sous l'effet de la turbulence d'origine convective. Des paramétrisations particulières sont également nécessaires pour traiter ces situations.

2.2.3 Influence des bâtiments

Nous présentons successivement l'influence sur la dispersion atmosphérique d'un obstacle isolé, d'un groupe d'obstacles, ainsi que les méthodes existantes pour prendre en compte ces phénomènes.

2.2.3.1 Dispersion autour d'un obstacle isolé

L'écoulement complexe qui se développe autour d'un obstacle isolé conduit à une modification de la dispersion des polluants émis à proximité. Nous distinguerons trois principaux effets :

- **Déviations du panache :** La déviation de l'écoulement au voisinage de l'obstacle génère un déplacement vertical ou transversal du centre de masse du panache (Figure 2-7). Cet effet est d'autant plus important que le panache est peu dispersé et proche de l'obstacle.

Une fois l'obstacle franchi, la trajectoire du panache peut se trouver déportée par rapport à la position de la source si bien que la dispersion s'effectue comme si le rejet avait eu lieu au niveau d'une source virtuelle, distincte de la source réelle. Le temps de franchissement de l'obstacle par le panache est également modifié en raison du ralentissement de l'écoulement à l'amont et de son accélération sur les côtés et sur le toit. Il peut en résulter une modification des écarts-types de dispersion par rapport à une situation sans obstacle.

De plus, les phénomènes d'étirement des particules fluides dans les zones de convergence ou de divergence de l'écoulement induisent une intensification de la diffusion (24).

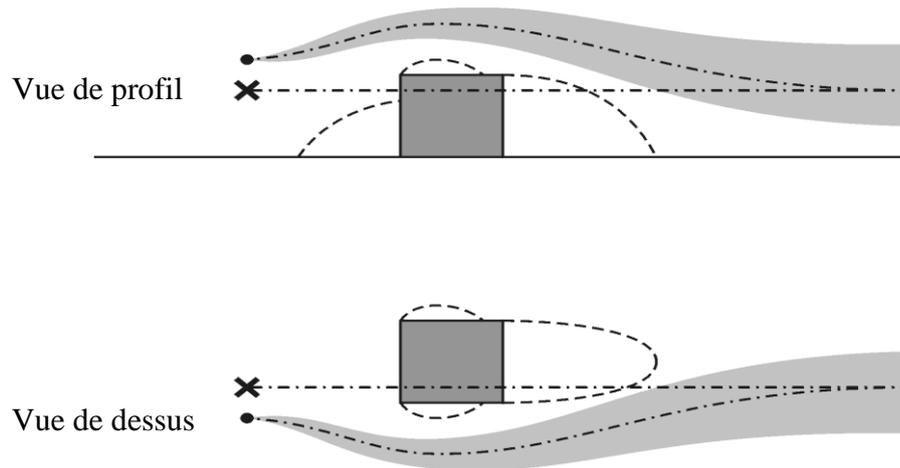


Figure 2-7 : Déviations verticale et transversale du panache sous l'effet de l'obstacle. Les cercles représentent les sources réelles et les croix les sources virtuelles.

- **Mélange dans la zone de recirculation :** si le panache émis au voisinage de l'obstacle entre en contact avec la zone de recirculation, une partie des polluants pénètrent à l'intérieur de cette zone (Figure 2-8-a) où les mouvements tourbillonnaires tendent à homogénéiser la concentration. Si le rejet est effectué à l'intérieur-même de la cavité (Figure 2-8-b), ces mouvements transportent les polluants dans toute la cavité, en générant des niveaux de concentration élevés. Une fois que les polluants sont bien mélangés dans la cavité, ils diffusent à nouveau vers l'extérieur, sous l'effet de la turbulence, en créant un panache large dont les dimensions initiales sont proches de celles de l'obstacle.

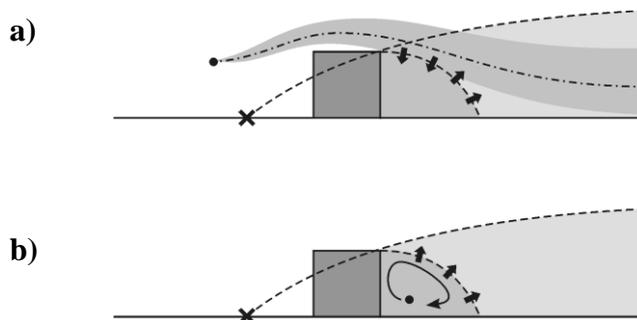


Figure 2-8 Mélange des polluants dans la zone de recirculation. Sur la figure a), le panache émis à l'amont de l'obstacle est piégé par la recirculation. Les polluants qui y pénètrent sont bien mélangés et ressortent en formant un panache plus large. Sur la figure b), la source est située à l'intérieur même de la cavité. On observe également un mélange efficace et la formation d'un panache large en aval. Les cercles représentent les sources réelles et les croix les sources virtuelles.

- **Augmentation de la diffusion dans le sillage :** dans le sillage lointain, la vitesse moyenne est inférieure et le niveau de turbulence supérieur aux valeurs équivalentes en l'absence d'obstacle. Il en résulte généralement une amplification de la dispersion des polluants qui pénètrent dans cette zone de sillage. En particulier, un rejet situé à

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

l'extérieur du sillage peut subir l'effet de ce dernier bien en aval de l'obstacle, si la trajectoire du panache entre dans la zone où la turbulence est plus élevée (phénomène illustré sur la Figure 2-9). Ce phénomène s'apparente à un processus de fumigation.

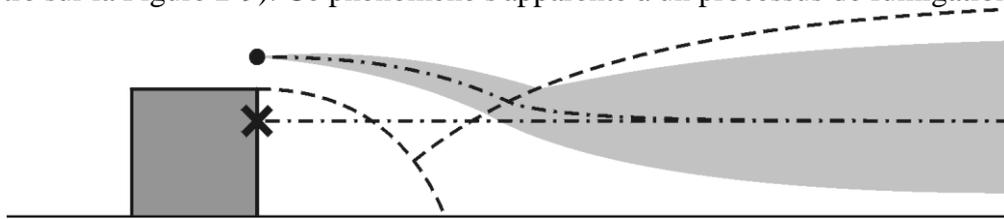


Figure 2-9 : Interaction d'un panache avec la zone de sillage

Les trois effets précédents constituent une décomposition schématique de l'influence d'un obstacle sur la dispersion des polluants. En effet, l'écoulement réel est souvent très complexe et les différents effets peuvent interagir entre eux. Néanmoins, c'est sur la base de cette décomposition que sont construits la plupart des modèles simples permettant de paramétrer l'influence d'un bâtiment sur la dispersion.

2.3 Différentes modèles de la dispersion atmosphérique

Il existe différentes approches pour modéliser la dispersion dans un milieu. Il paraît cependant plus difficile de diviser les approches selon les échelles. En effet si les codes de type CFD sont surtout impliqués à l'échelle locale, les autres approches peuvent être appliquées à des échelles différentes. (25) font une revue très complète sur la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle de la rue. Dans cette section, nous présentons trois modèles.

2.3.1 Les modèles gaussiens

Ces modèles permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs (de masse volumique très proche de celle de l'air).

Ils sont basés sur des solutions d'advection-diffusion c'est-à-dire l'équation d'évolution de la concentration couplées avec des para-métrisations semi-empirique des principaux phénomènes physiques. Les modèles gaussiens fournissent une modélisation rapide adaptée aux études opérationnelles mais ne permettent pas de traiter directement des écoulements complexes. Cette limitation s'est vite avérée inacceptable pour bon nombre d'études faisant intervenir des gaz dont la masse volumique était sensiblement plus importante que celle de l'air (26).

2.3.2 Les modèles lagrangiens

Les modèles lagrangiens utilisent, pour modéliser le mouvement du fluide, une approche particulière : la dispersion est évaluée par le calcul de plusieurs milliers de trajectoires de particules partant d'une même source. Les concentrations sont alors données par sommation du nombre de particules présentes dans un volume donné.

Par rapport aux modèles nécessitant un maillage, l'approche lagrangienne évite la diffusion artificielle initiale des sources ponctuelles dans la maille correspondante et les erreurs dues à la diffusion numérique. Elle permet de plus de n'effectuer les calculs que là où cela est nécessaire (27).

2.3.3 Les modèles de la mécanique des fluides CFD

Ils reposent sur une approximation tridimensionnelle des Equations de la mécanique des fluides (Equation de Navier-Stokes) pour la partie dynamique et de l'équation de Conservation de la masse pour la dispersion des polluants. Mais ces relations sont établies par rapport à un référentiel fixe, à partir duquel a été défini un maillage tridimensionnel. Celui-ci peut se composer de parallélépipèdes de même taille ou de tailles différentes (maillage structuré), ou d'autres éléments disposés de façon non régulière tels que des tétraèdres

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

(Maillage non structuré). Les équations sont intégrées numériquement sur ce maillage, de façon à calculer une valeur de chaque variable (vitesse, température, turbulence, concentration) en chaque sommet ou centre de maille.

L'avantage principal de l'approche CFD est sa capacité à reproduire d'une façon qualitative les caractéristiques de l'écoulement et la dispersion des polluants dans une rue canyons dans n'importe quelle configuration. De nombreux modèles CFD (deux ou trois dimensions) utilisant les équations RANS à des modèles de turbulence ont été appliquées à l'issue d'étudier la structure de l'écoulement et la dispersion des polluants dans les rues canyons (28).

2.4 Les équations fondamentales dans la couche de surface

Les écoulements dans la couche de surface sont régis par les équations fondamentales de la dynamique des fluides (21) (29) adaptées à l'échelle de la partie basse de l'atmosphère. Ces équations sont appliquées à petite échelle.

2.4.1 Conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse (équation de continuité) s'écrit pour un fluide compressible :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

2.4.2 Conservation de la quantité de mouvement

La conservation de la quantité de mouvement est décrite par les équations de Navier-Stokes adaptées à la CSU :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

(A) (B) (C) (D) (E)

- (A) : est le terme d'inertie
- (B) : est le terme d'advection
- (C) : est le terme gradient de pression
- (D) : est le terme de gravité
- (E) : est le terme de viscosité de l'air

On peut considérer l'air atmosphérique comme un fluide newtonien, c'est-à-dire que le tenseur des contraintes est proportionnel au tenseur des taux de déformation. Le terme (E) s'écrit alors :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \mu \left[\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \delta_{ij} \right) \quad (6)$$

Où μ est la viscosité dynamique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). En considérant que la viscosité dynamique est homogène spatialement, on fait apparaître la viscosité cinématique $\nu = \frac{\mu}{\rho} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

2.4.3 Equation d'état et conservation de l'énergie

Pour tenir compte de la teneur en vapeur d'eau d'une parcelle d'air, l'équation d'état d'un gaz parfait s'écrit pour une parcelle d'air humide :

$$P = \rho R^* T_v \quad (7)$$

où p est la pression de l'air, ρ la masse volumique, R^* la constante des gaz parfaits pour l'air sec et T_v la température virtuelle définie par :

$$T_v = T (1 + 0.61q) \quad (8)$$

Où q est l'humidité spécifique de l'air, T la température de l'air

La variable thermique usuellement utilisée dans l'atmosphère est la température potentielle, θ définie comme la température d'une parcelle d'air amenée adiabatiquement de sa position initiale à la pression de référence 1000 hPa.

$$\theta = T \left(\frac{p_s}{p} \right)^{\frac{R^*}{C_p}} \quad (9)$$

P_s est la pression de référence au niveau de la mer prise à 1000 mb, C_p : la capacité calorifique de l'air.

2.4.4 L'équation de l'énergie (bilan de l'enthalpie) inclut les contributions du transport de la chaleur sensible mais aussi de la chaleur latente

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + S_\theta \quad (10)$$

Où λ est la conductibilité thermique moléculaire et S_θ un terme source ou puits qui peut inclure la chaleur latente lors des éventuels changements de phases ainsi que la divergence des flux radiatifs.

2.4.5 Equation de transport d'un polluant

La dispersion d'un polluant i de concentration c_i est décrite par l'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} = D_{mi} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, c_2, \dots, c_N, T) + S_i \quad (11)$$

Où C est la concentration d'un polluant, D_m est le coefficient de diffusion moléculaire massique du polluant, R est un terme source ou puits par réaction chimique avec d'autres constituants et qui dépend de la température T , S est un terme source additionnel comme l'injection de polluant dans le milieu. Dans notre cas le polluant est non réactif on se contentera que du terme S .

Chapitre 02 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques

2.5 Conclusion

Cette partie décrit la couche de surface urbaine, qui est la sous partie de l'atmosphère dans laquelle se situe notre étude, en présentant les différents phénomènes physiques qu'on a pris en compte par la suite. La structure particulière des villes y influence fortement les écoulements turbulents et la dispersion des polluants

CHAPITRE 03 :

METHODOLOGIE

3 Méthodologie

3.1 Polluant et les sources d'émission

3.1.1 Le polluant étudié

Le polluant choisi dans cette étude est le dioxyde d'azote (NO₂). Ce dernier est un polluant primaire qui est émis directement lors des phénomènes de combustion. Le NO₂ est issu de l'oxydation du NO. Les sources principales sont les véhicules (près de 60%) et les installations de combustion (les installations thermiques,...). Dans cette étude, le gaz NO₂ est supposé inerte c'est-à-dire qu'au cours de la dispersion il ne subit pas de réactions photochimiques.

3.1.2 Sources d'émissions

Deux sources d'émissions canalisées sont étudiées dans ce travail. Les émissions canalisées sont des rejets atmosphériques qui sont émis à l'aide de toute sorte de conduite, canalisation ou tuyauterie (quelle que soit la forme de la section de cette conduite). Les émissions fugitives et diffuses ne sont pas prises en considération.

La première c'est une source liée aux émissions automobiles qui se trouvent dans les rues canyons de la ville d'El-Hadjar.

Les rues de type canyon sont des rues étroites bordées en continu part de grands bâtiments. Cette configuration entraîne le confinement des polluants entre les bâtiments. Les rues « canyons » se retrouvent le plus fréquemment en zones urbaines et posent des problèmes de santé publique.

La deuxième source c'est les émissions générées par deux cheminées qui sont situées au niveau de l'atelier de haut fourneau N°2 et l'atelier Agglomération du complexe SIDER-EL-HADJAR.

Ces deux sources sont considérées comme les principales sources anthropiques qui sont responsable de la dégradation de la qualité de l'air dans la ville d'EL-HADJAR.

3.1.2.1 Emission industrielle fixe SIDER-EL-Hadjar

Afin de modéliser la dispersion de NO₂ émis par les sources canalisées du complexe SIDER EL-HADJAR, nous avons choisi, selon les objectifs fixés par les responsables du complexe, deux cheminées. Les caractéristiques de ces sources fixes étudiées sont présentées dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Caractéristiques des cheminées au niveau de la PMA

Source	Nombre	Hauteur (m)	Diamètre de sortie (m)	Débit des gaz rejetés (Nm ³ /h)	Type de polluant
Agglomération					
Cheminée de dépoussiéreur DEP 1 et 2 /chaîne d'agglomération	1	50	4	1400000	Poussière, CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ .
Haut fourneau n°2					
Cheminée gaz de combustion (cowpers)	1	80	3,5	540000	Particules, CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂ .

Chapitre 03 : Méthodologie

Le tableau montre que les deux sources sont génératrices des principaux polluants réglementées et en particuliers les NO_x qui sont exprimées en dioxyde d'azote dans le Décret exécutif n° 06-138 du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.

Le procédé de production au niveau du complexe SIDER El-Hadjar est détaillé en annexe.

3.1.2.2 Emission mobile – véhicules-

Pour l'étude de la dispersion de la pollution par le dioxyde d'azote émis à partir d'un tuyau d'échappement d'un véhicule en position d'arrêt au niveau d'une rue canyon, nous avons procédé à la réalisation de différentes architectures de bâtiments avec changement de position de la source d'émission par rapport à ces derniers et ce afin de suivre le phénomène de dispersion de ce polluant en fonction des variations des hauteurs des bâtiments et vitesses de sortie des gaz d'échappements. Autres paramètres, tels que la pression et la température ont été étudiées aussi pour mieux interpréter les résultats de modélisation.

Les géométries des bâtiments étudiées sont réalisées suivant l'architecture réelle existante dans la ville d'El HADJAR à Annaba. Les hauteurs maximale et minimale des bâtiments réalisées étaient de 15 et 7.5 m. Il a été considéré qu'entre ces deux bâtiments il y a des trottoirs et une route à deux voies avec une distance totale entre les deux bâtiments de 10 m. Autres voies routières des deux côtés des deux bâtiments ont été aussi supposées avec des distances similaires. Le sens de dispersion des polluants a été pris selon la direction du vent dominant (Gauche à droite). Pour la modélisation de la dispersion de NO_2 , trois cas ont été supposés. Dans le premier cas on a considéré que la route se trouve entre deux bâtiments de même hauteur, dans le deuxième cas le bâtiment de plus élevé se trouve en amont de la route et le troisième cas le bâtiment le plus élevé est situé en aval de la route. La circulation des véhicules dans les différentes voies étudiées a été supposée très encombrées. Une source émettrice seulement a été étudiée. Le diamètre de sortie des gaz de combustion à travers cette source était de 30 mm et les vitesses de sortie de ces derniers en fonction du régime du moteur étaient de 2,5m/s au ralenti et 7 m/s. La modélisation de la dispersion du dioxyde d'azote a été étudiée dans les conditions atmosphériques stables (jour ensoleillé, vitesse des vents de 3 m/s, ...) avec absence de réactions photochimiques conduisant à son élimination ou à la formation de d'autres polluants secondaires.

3.2 La mécanique des fluides numérique(MFN)

Plus souvent désignée par le terme anglais Computational Fluid Dynamics (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont en général le résultat d'un compromis en terme de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc.

Le CFD permet de construire un prototype virtuel d'un produit ou d'un processus. A fin de simuler des conditions de fonctionnement réel, l'approche CFD est un complément aux techniques expérimentales et autres modélisations pour obtenir une description précise des problèmes d'écoulement de fluides. Ce procédé complexe, à l'origine excessivement coûteux, était réservé aux bureaux d'ingénierie des hautes technologies, comme l'industrie aéronautique. Aujourd'hui, les coûts, les temps de calcul se sont considérablement réduits et la CFD est devenue un outil performant au service de toutes les industries qui manipulent des fluides ou rencontrent des mouvements de fluide dans leurs projets ou procédés.

Chapitre 03 : Méthodologie

3.2.1 Méthode de travail

Pour les écoulements simples les équations de Navier Stokes sont directement intégrées et résolues par méthode analytique. Il s'agit de méthodes locales.

Dans le cas général, une méthode de discrétisation est appliquée pour l'approximation des équations différentielles. Ces dernières sont remplacées par des équations algébriques qui sont résolues par méthode numérique. Un maillage est généré dans un domaine d'étude qui entoure l'obstacle considéré (bâtiments, chemins, voiture, hélice...) ou un domaine délimité par le contenant du fluide. Les équations algébriques sont résolues pour chaque nœud du maillage. Le plus souvent, une méthode itérative est appliquée. Les calculs sont exécutés à l'aide d'un code CFD.

En pratique, les simulations CFD s'effectuent en trois étapes :

- **Pré-processing** : Au cours de la première étape, (pre-processing), on construit la géométrie et on définit le domaine d'étude. Le maillage est ensuite généré à l'intérieur de ce domaine. Ensuite, on spécifie les propriétés physiques du fluide et on choisit les modèles à appliquer l'algorithme de calcul, les méthodes d'interpolation et autres schémas.
- **solver** : c'est la phase de calcul, ou de résolution des équations algébriques.
- **post processing** : c'est la phase de traitement et d'interprétation des résultats.

Avec la CFD, on peut faire plus de simulations avec la possibilité de faire varier à moindre coût plus de paramètres et simuler différentes configurations. Mais des résultats expérimentaux sont nécessaires pour valider les calculs CFD.

3.2.2 Méthodes de discrétisation :

- **Méthodes de différences finies** : La méthode des différences finies a une importance historique et est simple à programmer. Elle n'est actuellement utilisée que dans quelques codes spécialisés.
- **Méthode des volumes finis** : La méthode des volumes finis est une approche commune utilisée dans les codes MFN. Les équations qui régissent le fluide sont résolues sur des volumes de contrôle discret.
- **Méthode des éléments finis** : La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée dans l'analyse structurale des solides, mais est également applicable aux fluides.

3.2.3 Principe de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est intégrée, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de la quantité de mouvement, équation de la conservation de l'énergie.

Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des parallélépipèdes rectangle en 3 dimensions). Ce pendant la méthode des volumes finis permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme quelconque, donc de traiter des géométries complexes, ce qui est un avantage sur les différences finis.

3.3 ANSYS, In

ANSYS, In c'est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

Chapitre 03 : Méthodologie

3.3.1 Principaux produits

ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle
- La gestion de différentes situations non-linéaires (contact, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations)

3.3.2 Les Modules d'ANSYS :

- ANSYS Mechanical
- ANSYS CFX et Fluent
- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA
- ANSYS Electromagnetics et Ansoft
- ANSYS Multiphysics

Dans le présent travail, on a utilisé le code ANSYS CFX, qui utilise comme plateforme la méthode des volumes finis.

3.4 ANSYS CFX

ANSYS CFX est un outil de dynamique des fluides (CFD) très performant qui fournit rapidement des résultats fiables et précis pour un large éventail d'applications CFD et multiphysiques. ANSYS CFX est reconnu pour sa précision, sa robustesse et sa rapidité exceptionnelle pour les machines tournantes (pompes, ventilateurs, compresseurs, turbines à gaz et hydrauliques).

ANSYS CFX est logiciel de CFD généraliste extrêmement performant, utilisé pour résoudre une large variété de problèmes d'écoulement fluide depuis plus de 20ans. Grâce à son solveur avancé, moderne et parallélisé, les utilisateurs obtiennent rapidement des solutions fiables et robustes. Le vaste choix de modèles physiques proposé permet de représenter la quasi-totalité des phénomènes d'écoulement fluide. Le solveur tout comme les modèles physiques, sont accessibles via un environnement utilisateur graphique moderne, intuitif, flexible, personnalisable et automatisable (fichiers de session, scripts, générateur d'expression...).

3.4.1 Environnements logiciels

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS Classic** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- **ANSYS Workbench** : Cette plate forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution.

3.4.2 Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX

Elle se fait en 4 étapes :

Chapitre 03 : Méthodologie

ICEM, CFX-pre, CFX-solve et CFX-post

Chaque module a une utilisation bien spécifique (figure3.1)

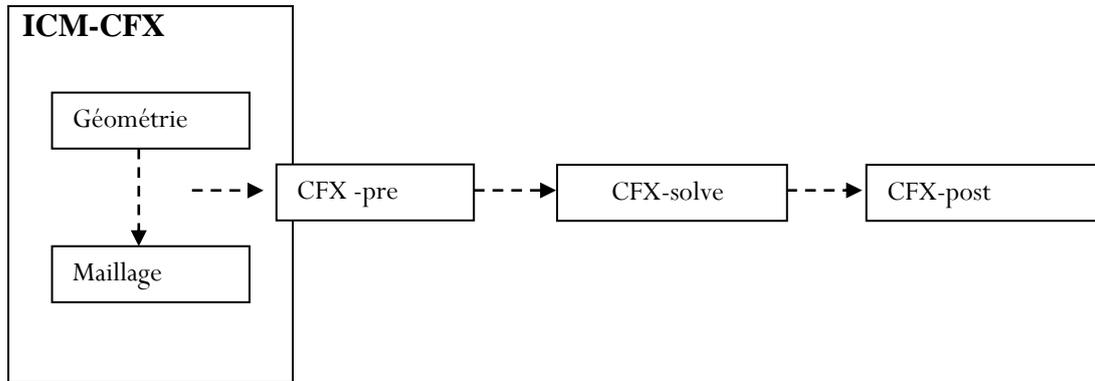


Figure 3-1 : Les modules principaux du CFX

3.4.2.1 ANSYS ICEM

Le module ICEM permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de CAO traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surface et de volume (figure 3.2 et 3.3). C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie.

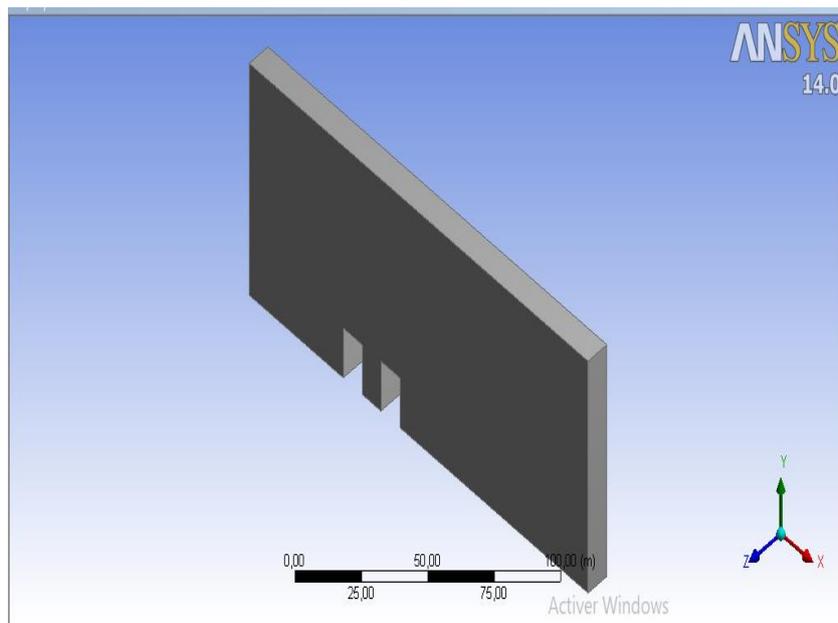


Figure 3-2 : Domaine de calcul par ICEM-CFX – Rue canyon

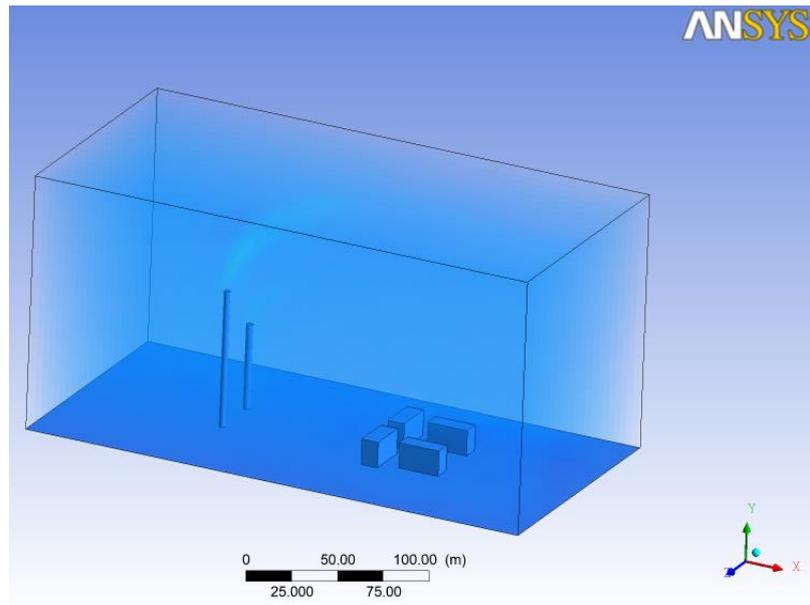


Figure 3-3: Domaine de calcul par ICEM-CFX – Cheminées SIDER EL-HADJAR

3.4.2.2 CFX-pre :

Le module CFX-pre permet quant à lui de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solveur, parmi lesquels : le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides(ou solides) en présence.

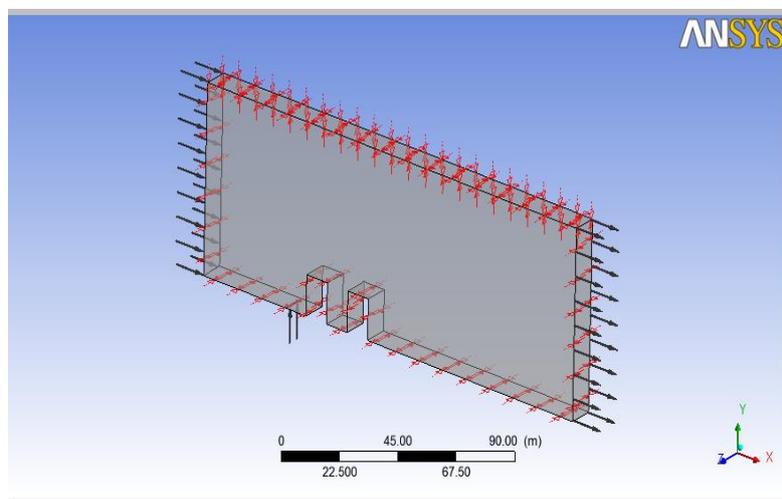


Figure 3-4 : Interface graphique du module CFX-pre – Rue canyon

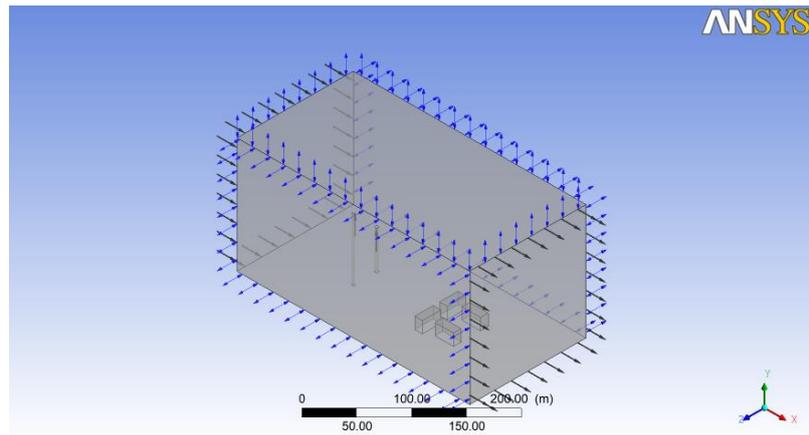


Figure 3-5 : Interface graphique du module CFX-pre – Cheminées SIDER EL-HADJAR

Les conditions aux limites sont de 5 types : INLET, OUTLET, OPENING, WALL et SYMMETRY.

- Les conditions de type INLET sont utilisées dans le cas d'un écoulement entrant à l'intérieur du domaine.
- Les conditions de type OUTLET sont quant à elles utilisées dans le cas d'un écoulement sortant à l'extérieur du domaine.
- La condition OPENING est utilisée dans le cas d'une méconnaissance de la nature entrante ou sortante de l'écoulement.
- La condition aux limites de type WALL est attribuée aux parois imperméables à l'écoulement.
- Enfin, si l'écoulement présente un plan de symétrie, il est possible d'attribuer la condition SYMMETRY à ce plan.

Une fois tous les paramètres définis, CFX-pre génère un fichier «.def» qui contient toutes les informations relatives au maillage, aux conditions aux limites et initiales, ainsi que tous les autres paramètres introduit dans CFX-pre. C'est ce fichier qui va être à la base de travail du solver.

3.4.2.3 CFX-solve

Le module CFX-solve est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stokes dans chaque maille et dispo de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique.

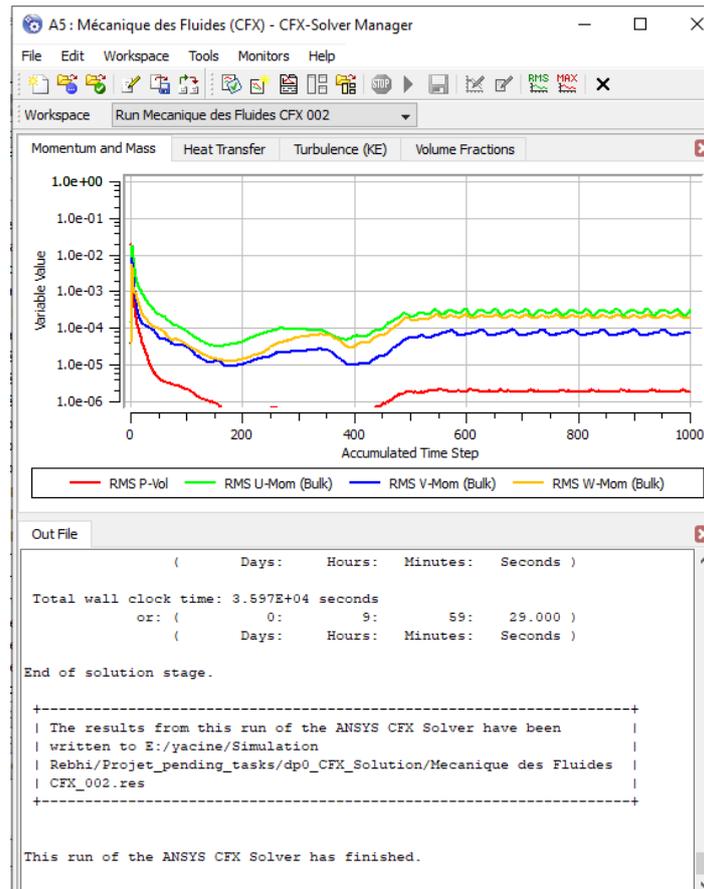


Figure 3-6 : Interface graphique du module CFX-Solver

Dans le cas d'une résolution en régime permanent, le calcul se poursuit jusqu'à ce que, soit le nombre maximal d'itération demandé par l'utilisateur est atteint, soit la solution satisfait au critère de convergence. Dans le cas d'une résolution en régime transitoire, le calcul prend fin lorsque la durée de résolution du phénomène étudiée est atteinte.

A la fin de son calcul, CFX-solve génère deux types de fichiers :

- Un fichier «.out» lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du.def, ainsi que le bilan masse du système.
- Un fichier «.res» qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par CFX-post.

3.4.2.4 CFX-post :

Le module CFX-post est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesse. Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, comme par exemple la valeur des différentes variables sur chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation.

Chapitre 03 : Méthodologie

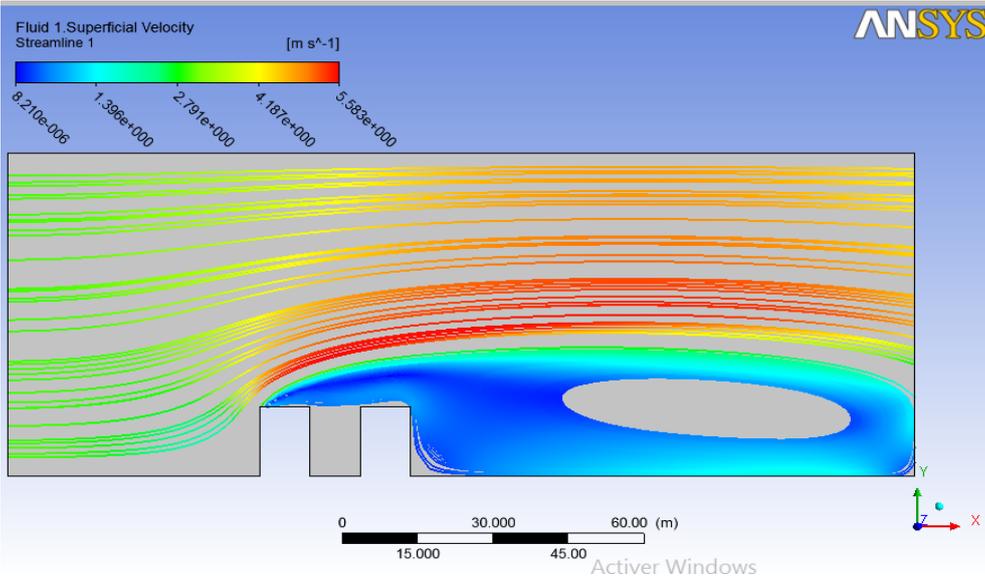


Figure 3-7 : Interface graphique du module CFX-post – Rue Canyon

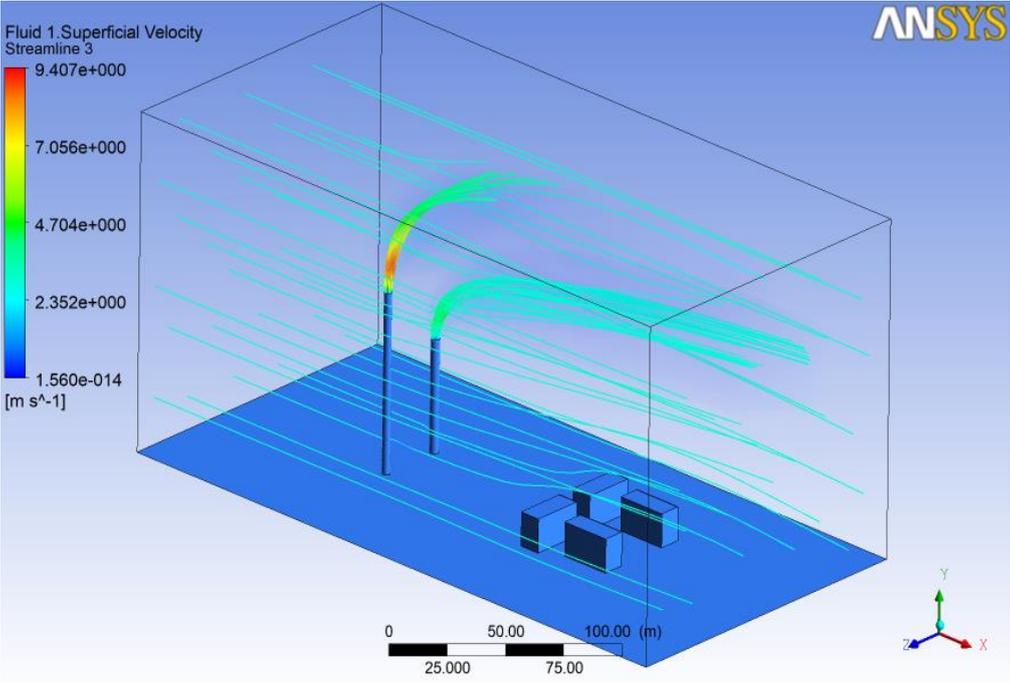


Figure 3-8 : Interface graphique du module CFX-post – Cheminées SIDER EL-HADJAR

CHAPITRE 04 :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

4 Résultats et discussions

4.1 Introduction

Cette partie sera consacrée à la discussion des résultats de la modélisation de la dispersion de dioxyde d'azote par le logiciel ANSYS -14.0, émis à partir d'un tuyau d'échappement d'un véhicule en position d'arrêt au niveau d'une rue canyon et deux sources fixes (cheminées) localisées au niveau du complexe SIDER-EL-HADJAR. La dispersion de ce polluant sera étudiée sur la ville d'El HADJER à Annaba.

4.2 Emissions du NO₂ par les cheminées de l'atelier agglomération et haut fourneau N°2- SIDER El Hadjar

4.2.1 L'influence de la température de l'air sur la température du gaz sortant

Sur la première partie on a procédé à une dispersion sous une atmosphère neutre dont la vitesse du vent est maintenue constante $V = 3\text{m/s}$ on varie la température de l'air 278K, 298K et 308K.

les résultats obtenus par le logiciel ANSYS sont présentés ci-dessus :

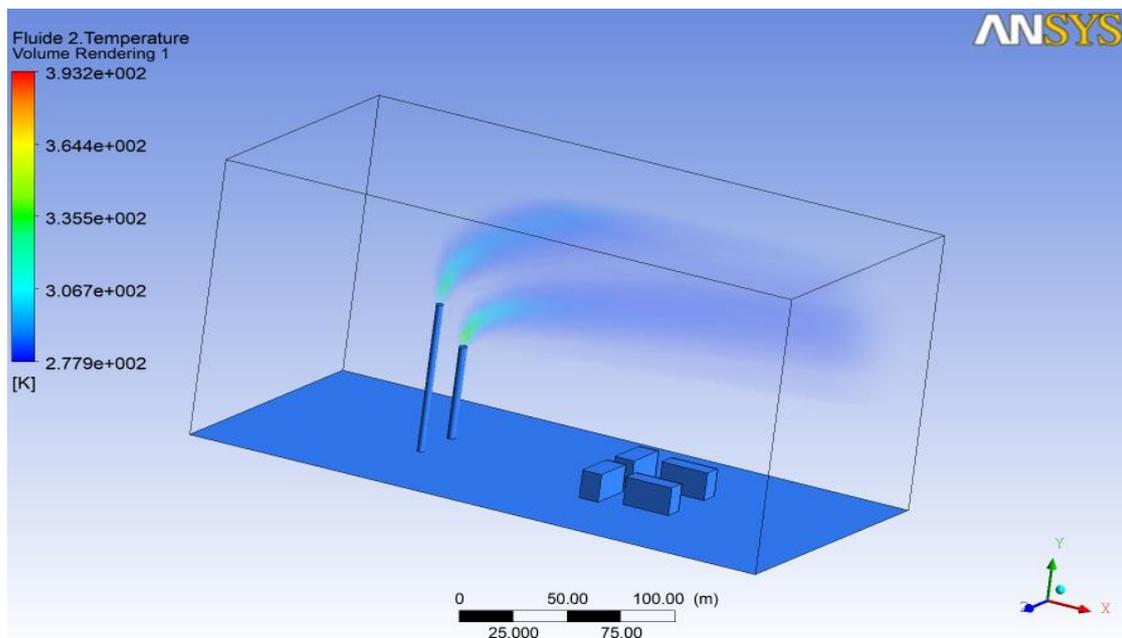


Figure 4-1 : Evolution de la température du gaz à $T=278\text{K}$ et $V=3\text{m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

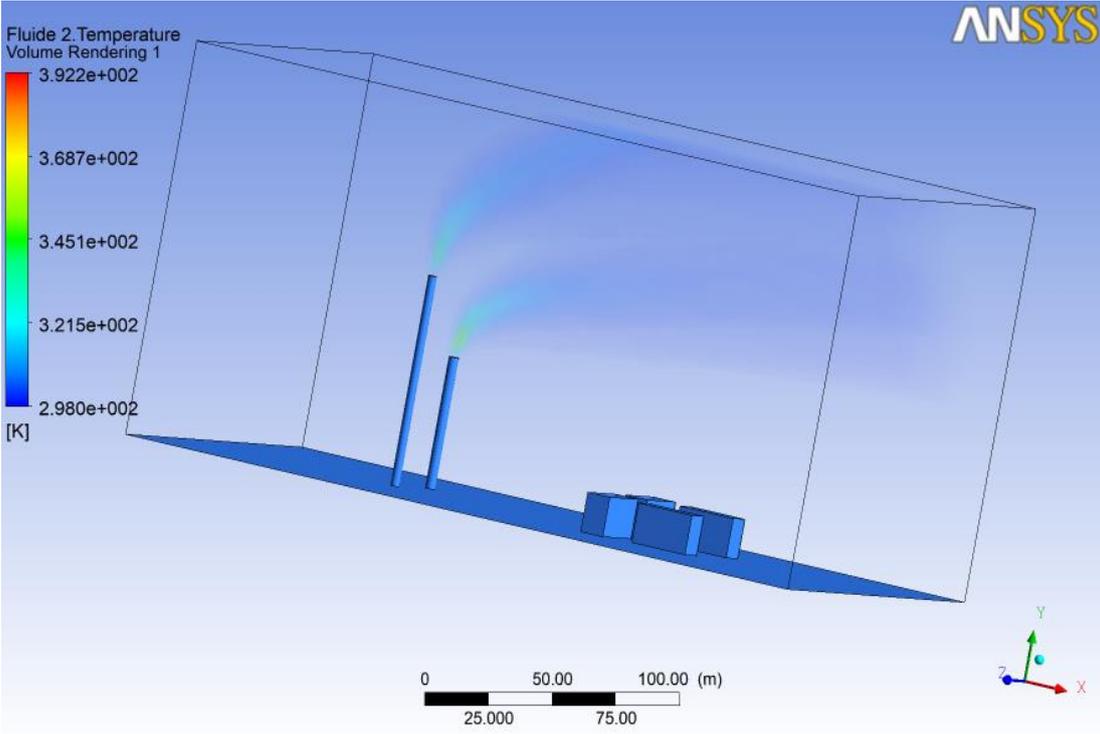


Figure 4-2 : évolution de la température de gaz à T=298K et V=3m/s

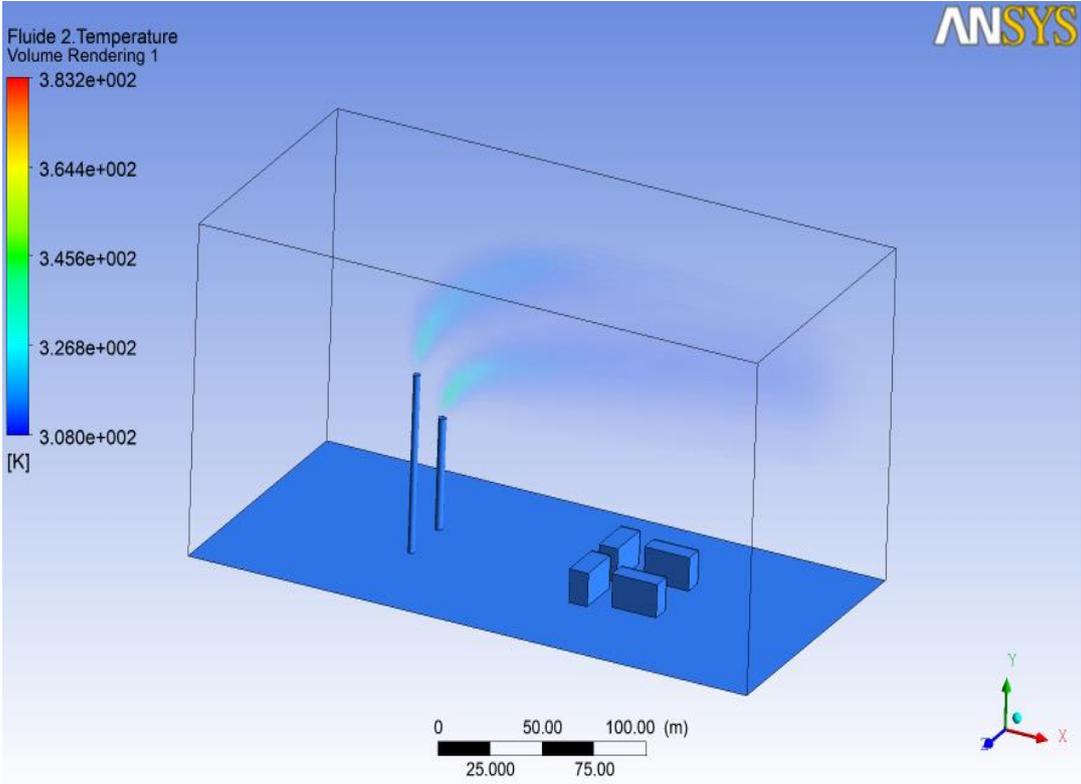


Figure 4-3 : évolution de la température de gaz à T=308K et V=3m/s

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Tableau 4-1 : la variation de la température du gaz en fonction de la température de l'air à $V=3\text{m/s}$

Distance à la source (m)	0	25	50	75	100
Température fluide 2(K) à $T_{\text{air}}=278\text{K}$	393,2	364,4	335,5	306,7	277,9
Température fluide 2(K) à $T_{\text{air}}=298\text{K}$	392,2	368,7	345,1	321,5	298
Température fluide 2(K) à $T_{\text{air}}=308\text{K}$	383,2	364,4	345,6	326,8	308

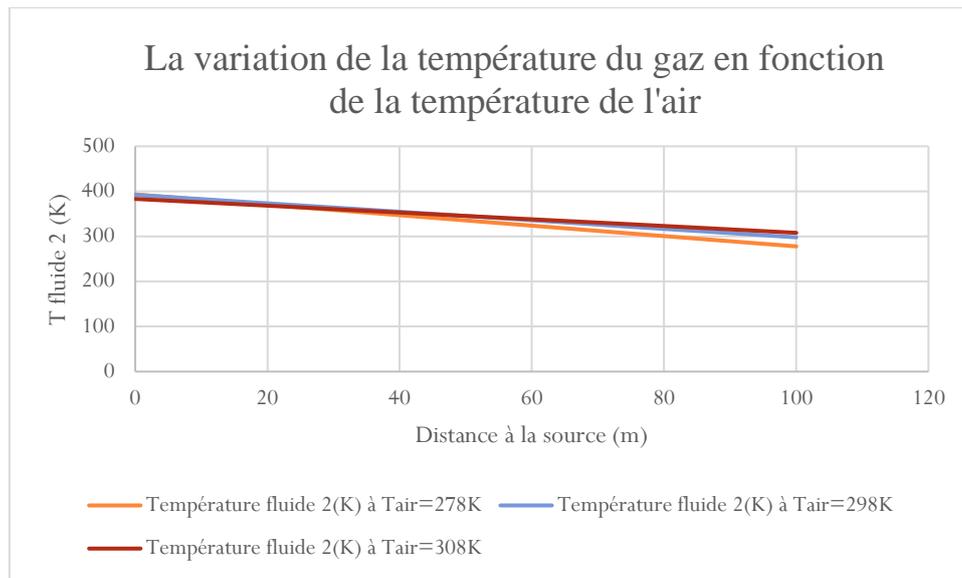


Figure 4-4 : la variation de la température du gaz en fonction de la température de l'air à $V=3\text{m/s}$

D'après les figures 4-1, 4-2 et 4-3 on remarque une influence considérable de la température de l'air sur la température du gaz sortant des deux cheminées qui se trouve au-dessous et à la rentrée de la ville de EL-Hadjar résumé dans le tableau 4-1.

La figure 4-4, montre qu'à une vitesse constante de l'air, l'augmentation de la température de l'air a une relation proportionnelle avec la variation de la température du fluide gaz ce qui fait une influence sur la dispersion des fumées du gaz en-dessous de la ville, contrairement à sa sortie, les températures sont semblable.

Les températures qui se trouvent juste en dessous et à la rentrée de la ville sont respectivement de l'ordre de 306.7 K, 321.5 K et 326.8 K. D'où une influence sur le microclimat en dessous de la ville.

En milieu urbain, les paramètres climatiques tels que la température et l'écoulement de l'air, peuvent varier en fonction de l'espace et du temps. Ces variations générées affectent d'une manière significative la répartition des polluants dans l'air et engendre ainsi des nuisances urbaine.

4.2.2 L'influence de la température sur les fractions volumiques des NO_2

les résultats obtenue par le logiciel ANSYS sont présenter ci-dessus :

Chapitre 04 : Résultats et discussions

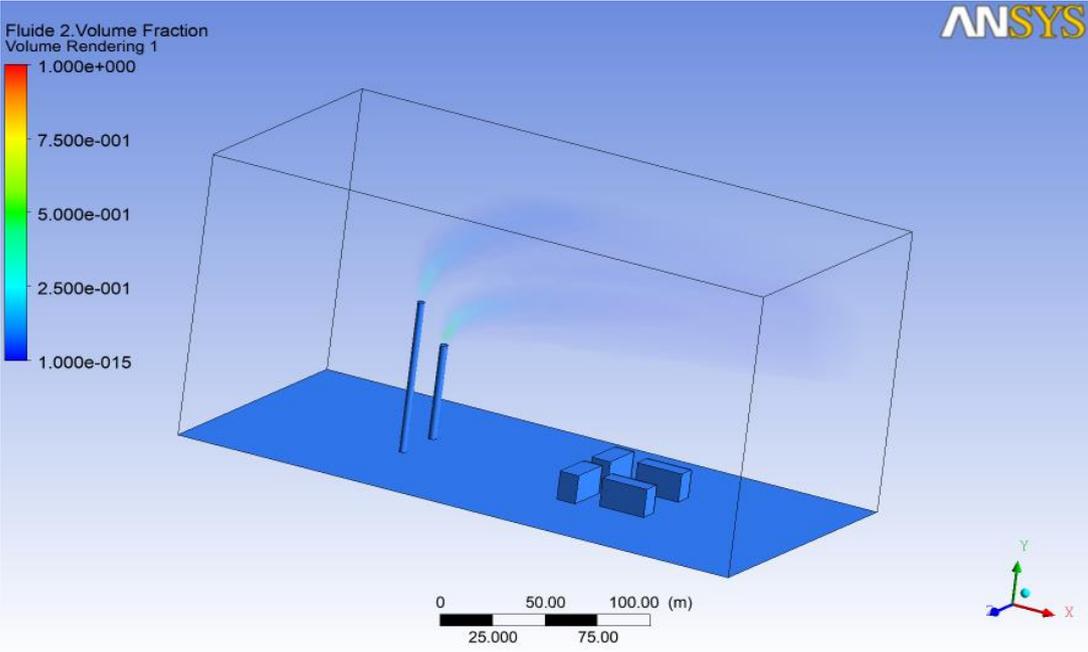


Figure 4-5 :l'évolution des fractions volumiques du NO₂ à 278K et V=3m/s

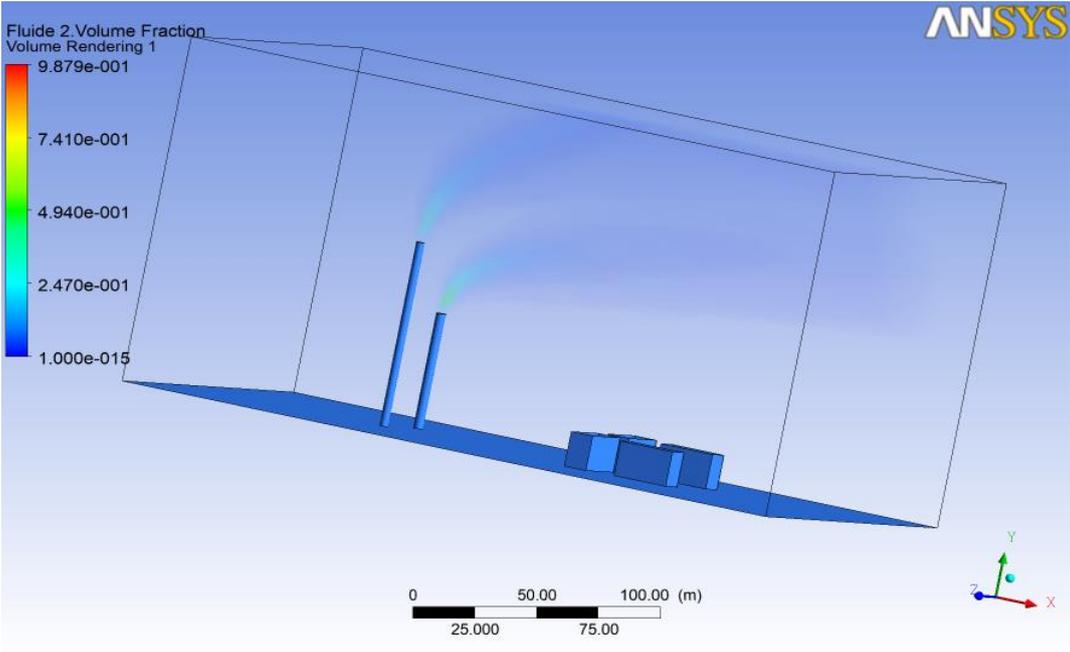


Figure 4-6 : l'évolution des fractions volumiques du NO₂ à 298K et V=3m/s

Chapitre 04 : Résultats et discussions

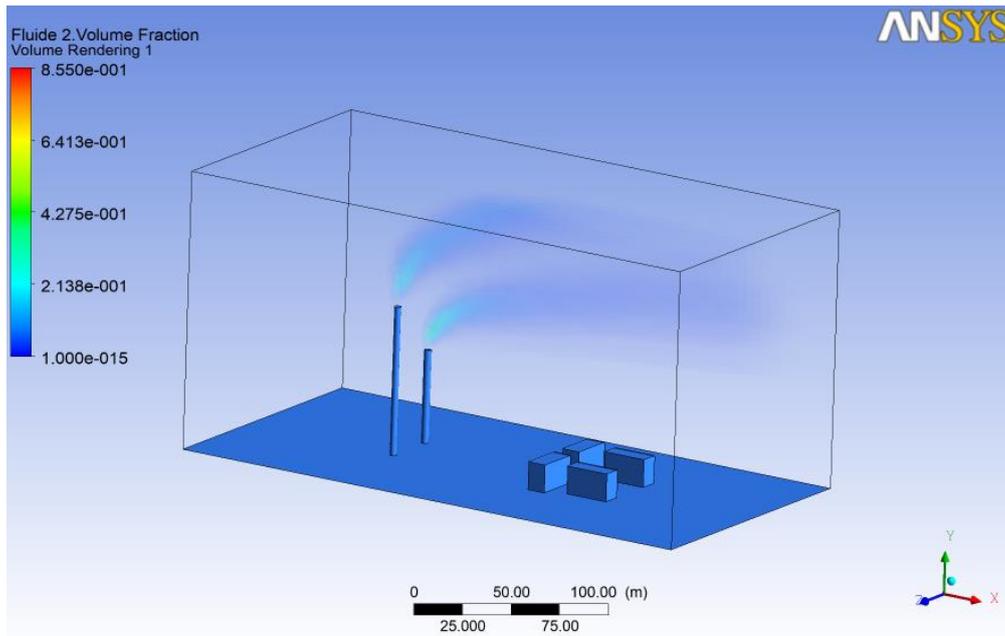


Figure 4-7 : l'évolution des fractions volumiques du NO₂ à 308K et V=3m/s

Tableau 4-2 : la variation des fractions volumiques du NO₂ en fonction de la température de l'air à V=3m/s

Distance à la source (m)	0	25	50	75	100
Fraction volume du NO ₂ (%) à T _{air} =278K	100	75	50	25	1.0e -15
Fraction volume du NO ₂ (%) à T _{air} =298K	98,79	74,1	49,4	24,7	1.0e -15
Fraction volume du NO ₂ (%) à T _{air} =308K	85,5	64,13	42,75	21,38	1.0e -15

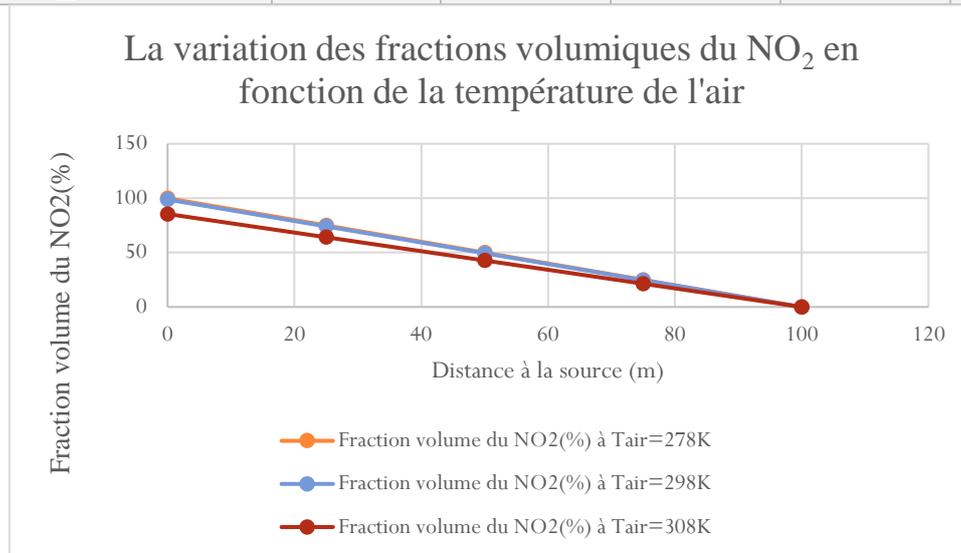


Figure 4-8: la variation des fractions volumiques du NO₂ en fonction de la température de l'air à V=3m/s

Chapitre 04 : Résultats et discussions

En ce qui concerne l'influence de la température sur les fractions volumiques de NO₂ on remarque que la dispersion est meilleure quand la température de l'air est élevée. Selon les figures 4-5, 4-6 et 4-7 les fractions volumiques indiquées sont de 25% pour une température de l'air de 278 K, 24.7 % pour une température de 298 K et 21.3% pour une température de 308 K.

En général, l'augmentation de la température de l'air favorise la dispersion et la convection des gaz et les faibles températures en diminuent la dispersion et provoque une stagnation des gaz émis. Ce qui fait des concentrations des polluants élevés dans des zones froides où une intervention de traitement de l'air est indispensable, contrairement aux zones chaudes, les concentrations initiales sont diluées dans l'air à de faibles teneurs.

Supposant à la sortie de la cheminée, notre polluant a pour des concentrations égales à ceux de la réglementation algérienne autre mots dite, il est à la limite de la concentration réglementée.

Pour une teneur maximale de 300mg/Nm³ à la sortie de la cheminée et à une distance de 75m de la source d'émission au niveau du panache de fumées, on se retrouve avec des concentrations de 75 mg/Nm³, 74,1 mg/Nm³ et 64,14 mg/Nm³ respectivement pour les températures 278K, 298K et 308K.

4.2.3 L'influence de la variation de la température de l'air sur les vitesses de sortie des gaz de NO₂ et les lignes du courant

les résultats obtenue par le logiciel ANSYS sont présenter ci-dessus :

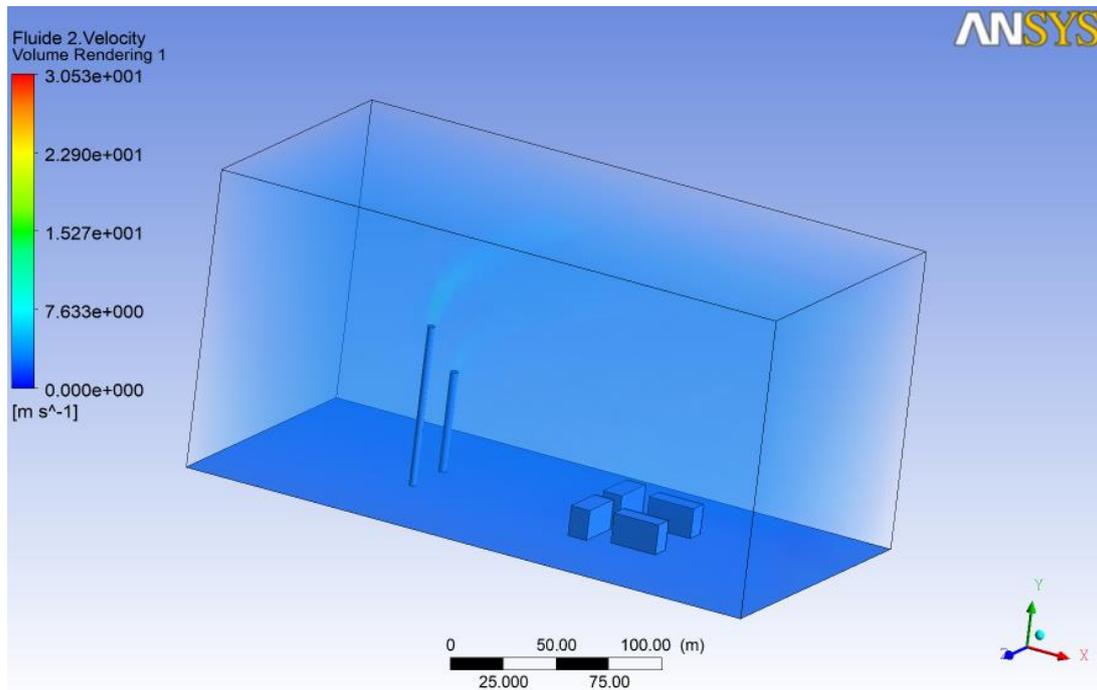


Figure 4-9 : l'évolution de la vitesse de sortie des gaz de NO₂ à T=278K

Chapitre 04 : Résultats et discussions

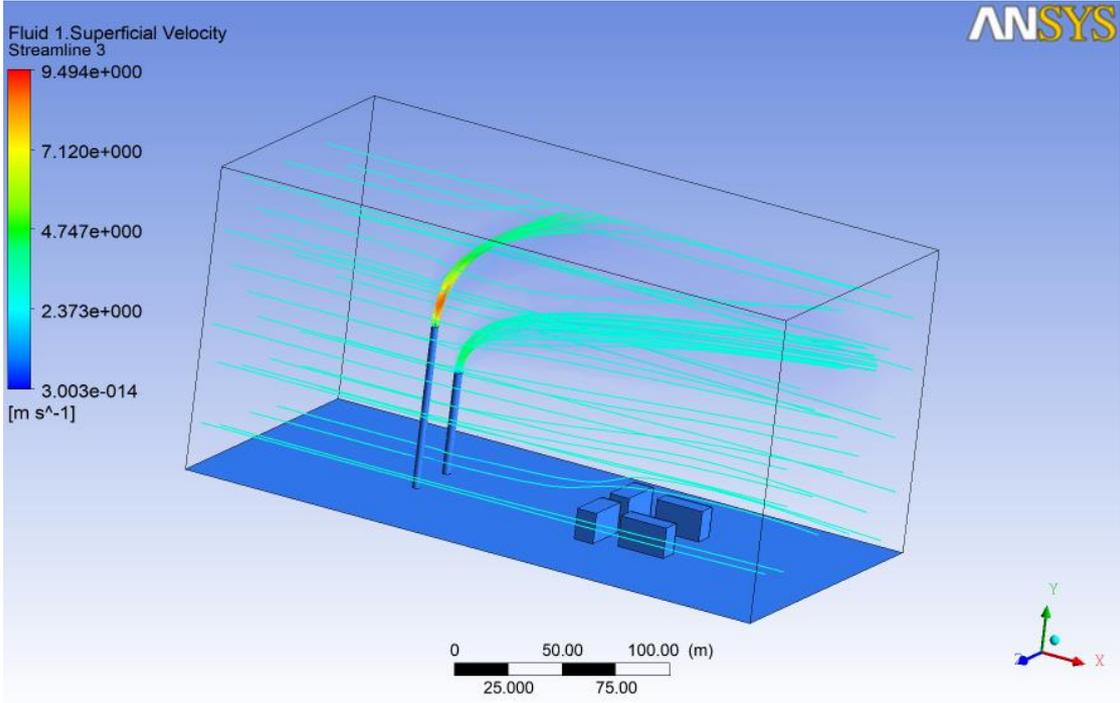


Figure 4-10 : les lignes de courant de l'air et le gaz de NO₂ à T= 278K

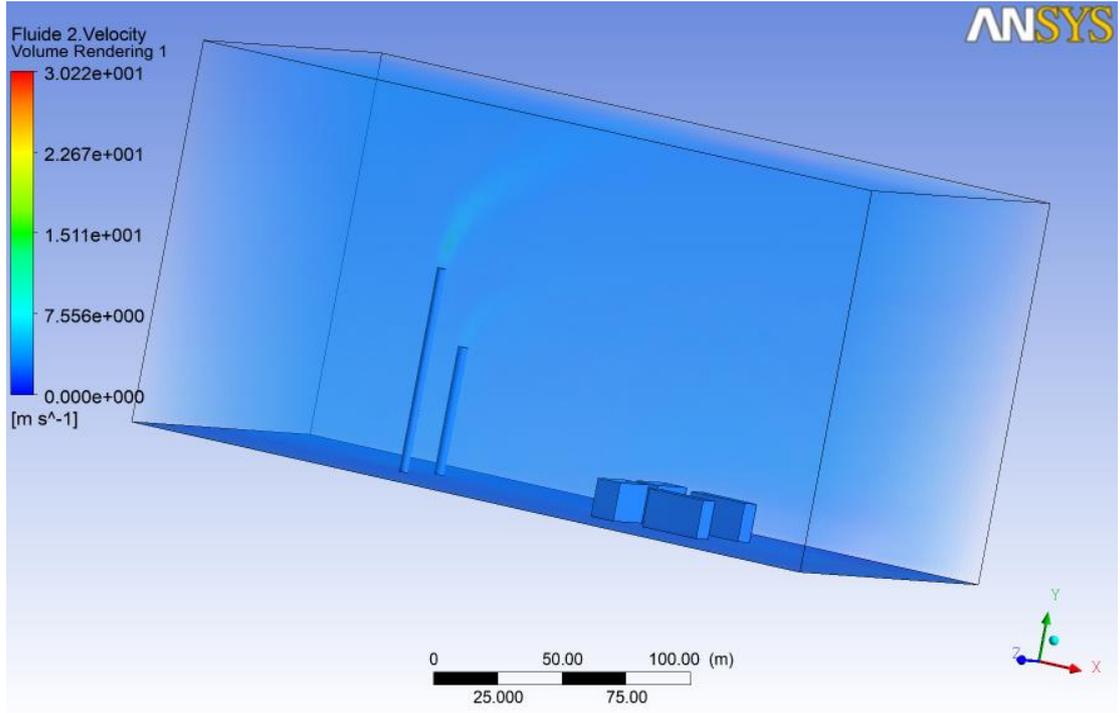


Figure 4-11 : l'évolution de la vitesse de sortie des gaz de NO₂ à T=298K

Chapitre 04 : Résultats et discussions

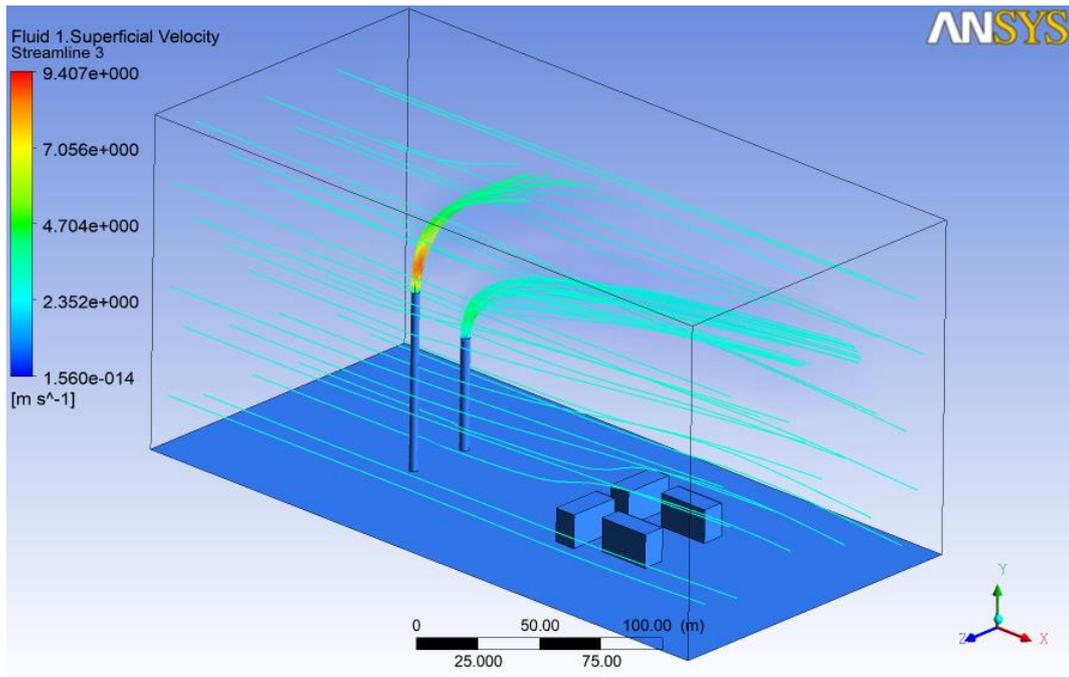


Figure 4-12 : les lignes de courant de l'air et le gaz de NO₂ à T= 298K

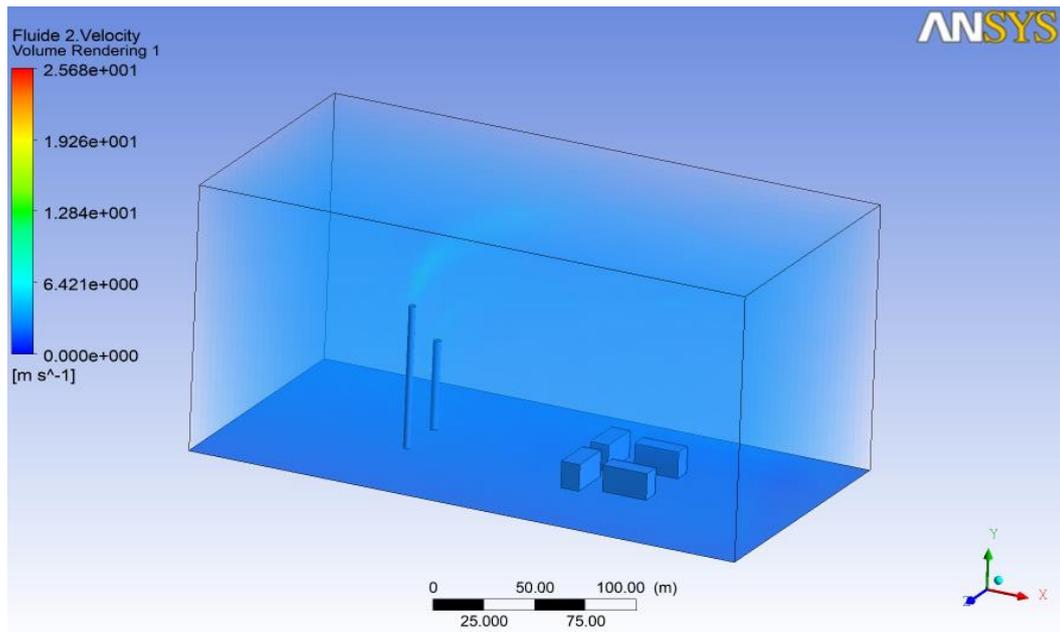


Figure 4-13 : l'évolution de la vitesse de sortie des gaz de NO₂ à T=308K

Chapitre 04 : Résultats et discussions

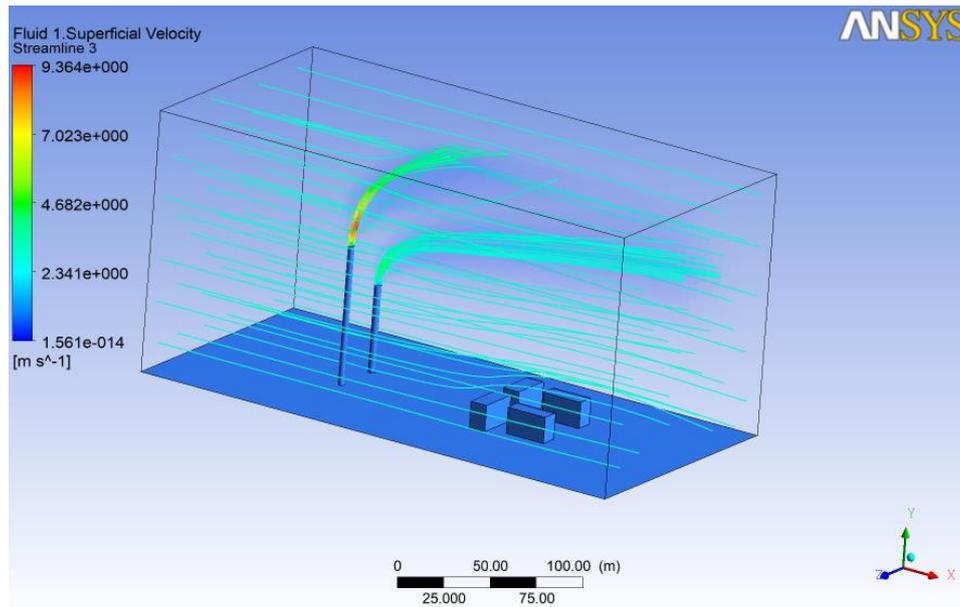


Figure 4-14 : les lignes de courant de l'air et le gaz de NO₂ à T= 308K

Tableau 4-3 : la variation des vitesses du NO₂ dans le panache en fonction de la température de l'air à V=3m/s

Distance à la source (m)	0	25	50	75	100
Vitesse fluide 2(m/s) à T _{air} =278K	30,53	22,9	15,27	7,633	0
Vitesse fluide 2(m/s) à T _{air} =298K	30,22	22,67	15,11	7,55	0
Vitesse fluide 2(m/s) à T _{air} =308K	25,68	19,26	12,84	6,42	0

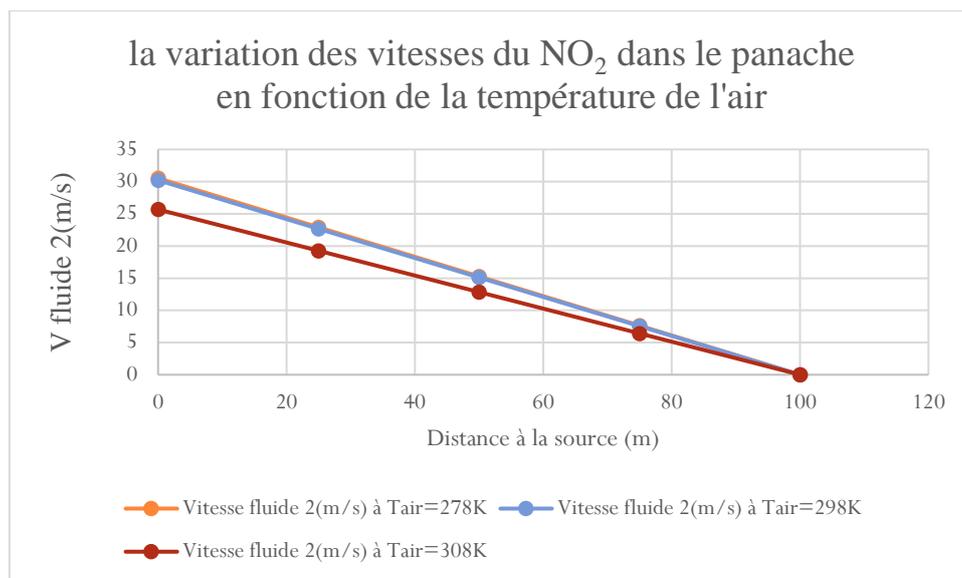


Figure 4-15 : la variation de la vitesse du NO₂ en fonction de la température de l'air à V=3m/s

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Les figures 4-10,4-12 et 4-14 présentent les surélévations des panaches des deux sources et les variations de vitesses de sortie des gaz de NO₂ en fonction de la variation de la température de l'air. Selon les résultats indiqués sur ces figures on remarque qu'à la rentrée de la ville la vitesse des gaz de NO₂ diminuent. Cette dernière est due à la hauteur de la surélévation du panache qui est la plus grande dans le cas où la température de l'atmosphère est de 308 K. On remarque que la vitesse à la sortie a diminué jusqu'à 25.8 m/s au lieu de 30 m/s dans le cas des températures 278 K et 298 K.

Lignes de courant du gaz montre bien que les lignes de courant de l'air sont déviées vers le haut par le panache de gaz de NO₂ dans le cas d'une atmosphère chaud (308 K), ce qui montre que la surélévation est plus importante en comparaison avec les deux cas précédents.

De cette effet et d'après les différents résultats données par le logiciel numérique ANSYS-CFX-, les bâtiments de la ville n'ont aucune influence sur la dispersion du panache ni sa concentration ni la direction vue la hauteur élevée de la cheminée ce qui revient à dire que la construction du complexe SIDER à prit en considération l'agglomération approximée.

4.3 Résultats de la source d'émission automobile au niveau de la rue canyon – ville d'El Hadjar

Les résultats de la modélisation de la dispersion, de la pollution générée par la source d'émission située au milieu des bâtiments et la rue canyon ont montré que les variations de la pression dans les limites du domaine étudié (Figures 4-19 à 4-21), sont très similaires pour l'ensemble des géométries considérées. Nous constatons que les fortes pressions sont plus élevées a coté de l'arête de la première façade du bâtiment situé en amont de la rue canyon suite à l'effet obstacle engendré par le premier bâtiment. Une faible depression est formée au niveau de l'arête supérieure du bâtiment qui va être plus accentuée et généralisée sur le reste du domaine en provoquant tourbillon en aval des bâtiments. Il a été aussi remarqué qu'une depression remarquable a été enregistrée au niveau du centre de la rue canyon et des bâtiments.

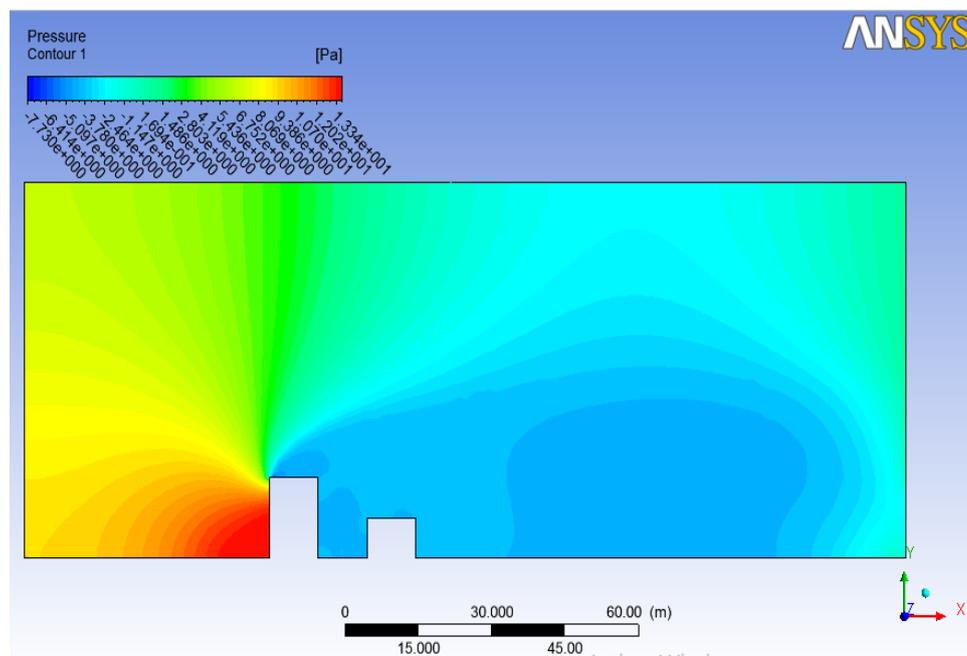


Figure 4-16 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

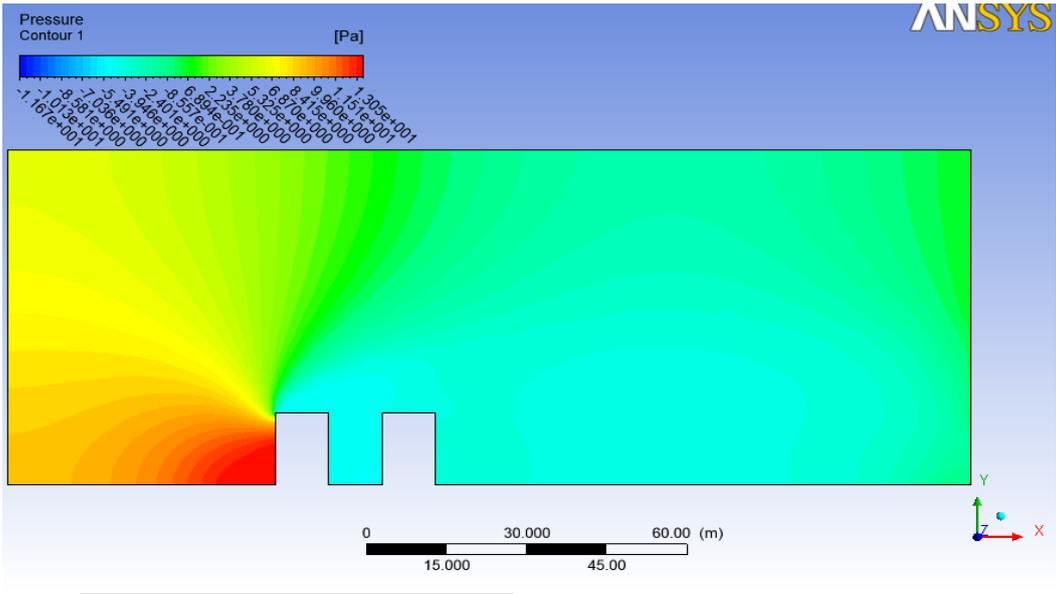


Figure 4-17 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7 \text{ m/s}$

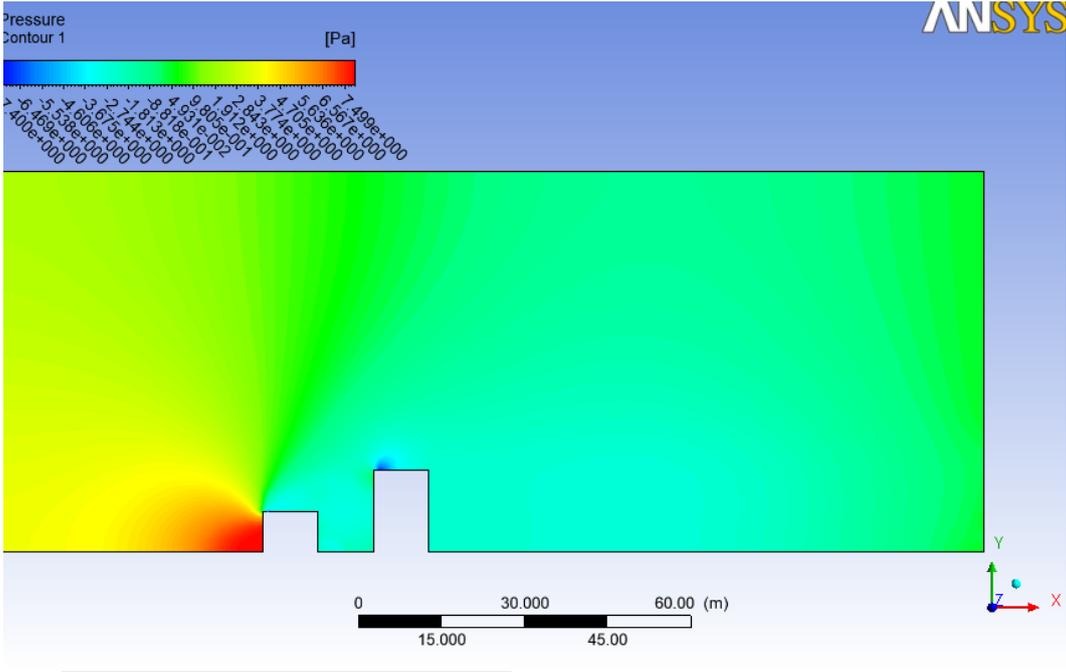


Figure 4-18 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en aval =2 fois bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

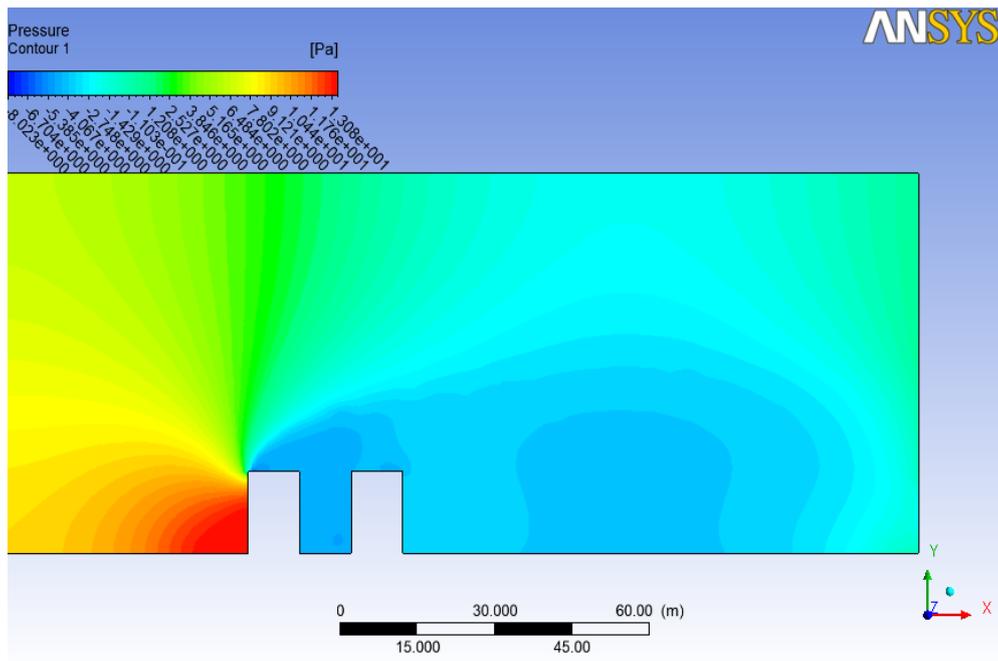


Figure 4-19 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5 \text{ m/s}$

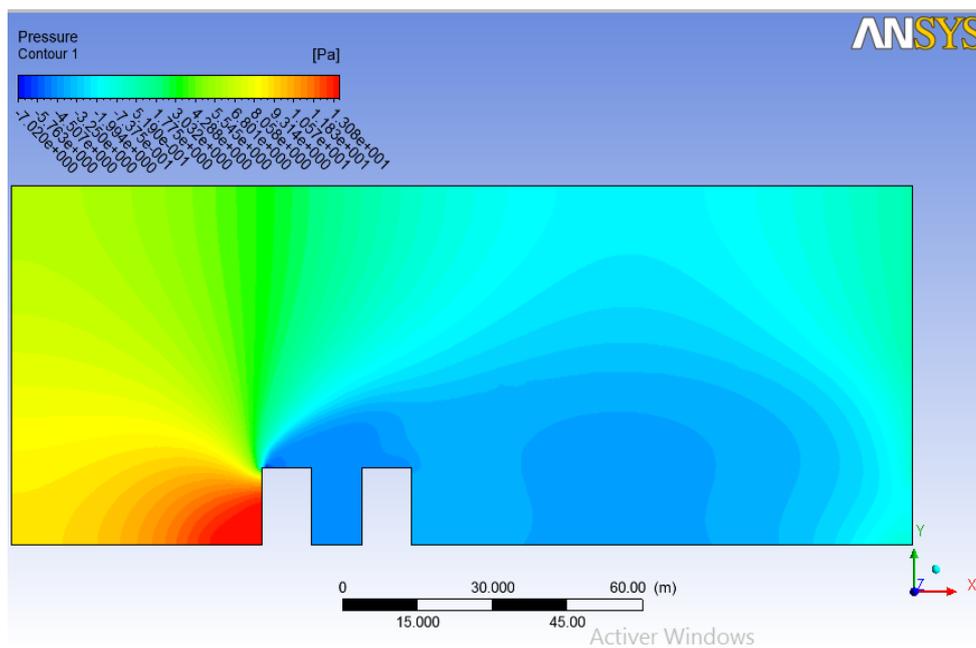


Figure 4-20 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), sources après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

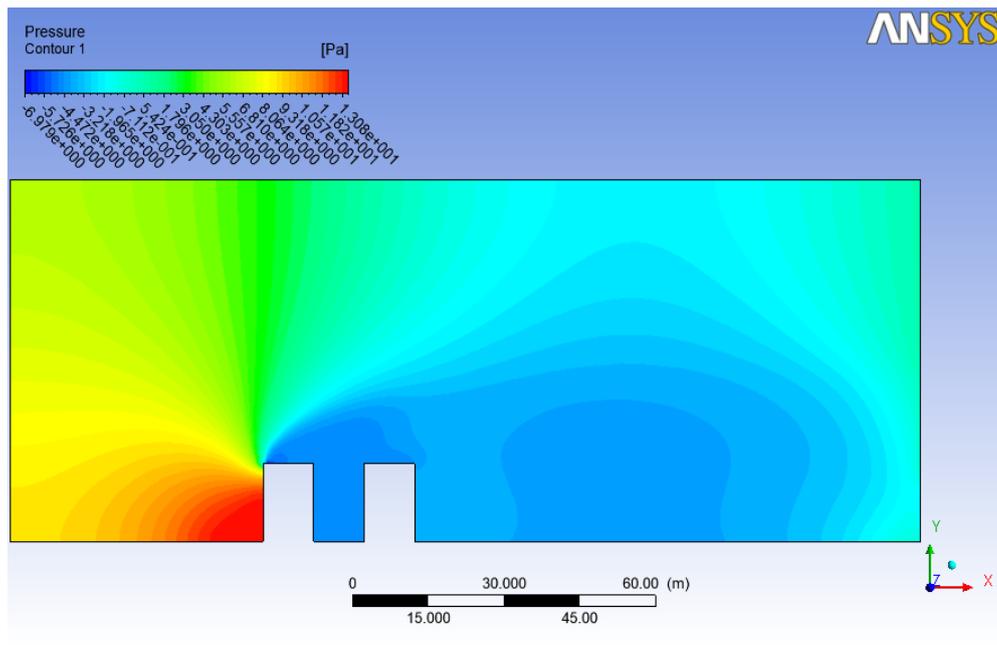


Figure 4-21 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

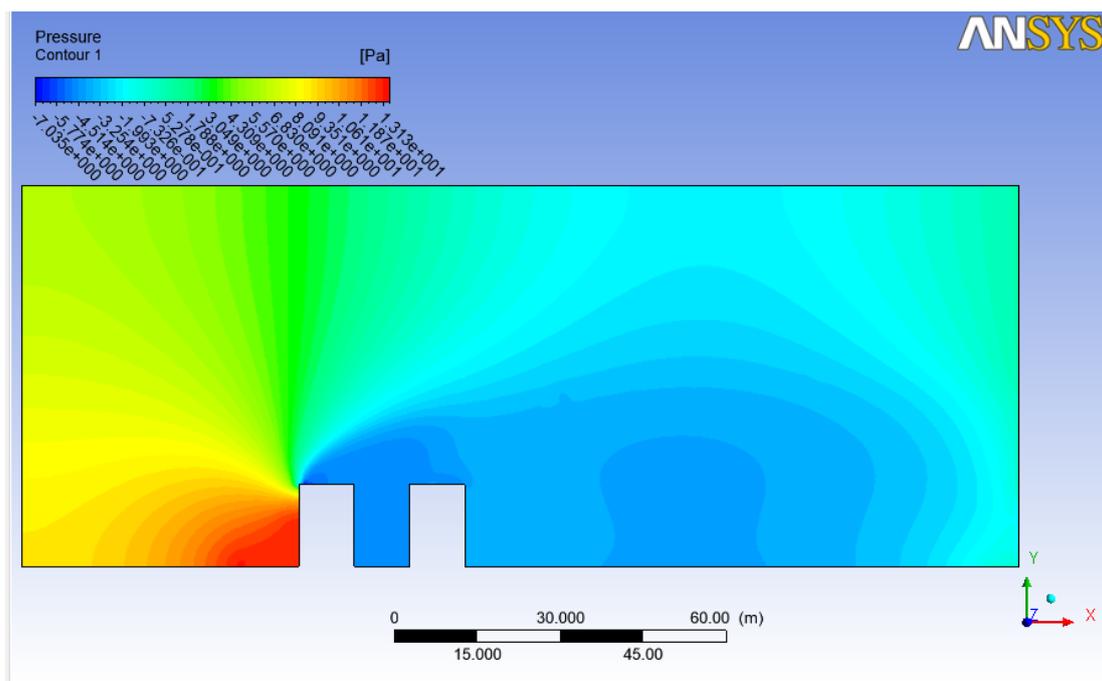


Figure 4-22 : Evolution de la pression – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), Source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Plusieurs études ont montré l'effet des obstacles sur l'écoulement d'un fluide et sa relation avec les variations de pression. Par exemple dans le cas d'un écoulement qui aborde transversalement une colline, il se produit au sommet une zone de dépression et de suritesse, tandis qu'au pied du versant au vent, l'air est ralenti (30). La dépression constatée au centre de la rue canyon est due à la surélévation de la température de la zone par les émissions des gaz d'échappement (Figure 4-22, 4-26, 4-30, 4-34, 4-38, 4-41 et 4-45) Les gaz donc auront un mouvement ascendant, ce qui provoque une dépression dans les couches inférieures en attirant ensuite l'air froid vers le bas. Ce volume d'air sera ensuite emprisonné au centre des deux bâtiments par

Chapitre 04 : Résultats et discussions

l'effet bouchon provoqué par le passage de l'air en dessus des bâtiments. Ce phénomène a été constaté pour l'ensemble des cas étudiés, géométrie et variations de vitesses de sortie de gaz.

En effet, la complexité des écoulements autour d'obstacles isolés a été bien étudiée par plusieurs chercheurs (30) qui ont montré que :

- au niveau différents parois de l'obstacle étudié, se forment des couches limites qui se détachent puis se rattachent, créant des zones de tourbillonnement ou recirculation.
- au niveau de la rencontre de l'écoulement décollé et du sillage, se forme une couche fortement cisailée.
- au niveau de la façade qui se trouve face au vent, se crée une circulation de fluide descendante qui, au contact avec le sol, se forme un mouvement sous forme d'un rouleau tourbillonnaire. Ce dernier se déplace en aval en contournant latéralement l'obstacle, formant des tourbillons dit en "fer à cheval". Dans notre cas est appelé bouchon.

En ce qui concerne la dispersion du polluant étudié (figure 4-24, 4-28, 4-32, 4-35, 4-42, 4-33 et 4-47), on peut constater que là où il y avait une dépression il y a eu un transfert de pollution.

Par exemple dans le cas de la source située avant le premier bâtiment qui se trouve en amont de la rue canyon1), il y a un accroissement de la concentration et stagnation de la pollution sur le bas du bâtiment ce qui va provoquer une l'augmentation du temps d'exposition pour les familles qui habitent au premier et deuxième étage avec bien sûre création des zones de recirculation. Pour le côté opposé du bâtiment (rue canyon), on observe des concentrations plus faibles à ceux émise par la source avec une homogénéité verticale de la concentration et stagnation des polluants ce qui va engendrer dans ce cas une augmentation du temps d'exposition sur toute la hauteur des deux bâtiments donc impact sur les familles habitants sur les façades qui donnent vers la rue canyon. La même constatation est observée quand la source est située en aval du deuxième bâtiment.

Ce phénomène est très répété dans les grandes villes où les bâtiments et les activités au sein des agglomérations (transport, chauffage...) changent avec les différents rejets les caractéristiques thermiques de l'air. Dans ce cas, l'agglomération constitue une source de chaleur pendant la journée, par contre les zones environnantes se refroidissent. Donc, l'air chaud s'élève au-dessus de l'agglomération, provoquant ainsi une dépression qui fait transférer l'air plus frais des zones situées aux alentours. Les polluants émis à la périphérie de l'agglomération sont dispersés vers le centre de l'agglomération où il s'installe une atmosphère fortement polluée.

Il a été démontré aussi dans plusieurs recherches que pour un observateur éloigné, les turbulences induites par un bâtiment proche de la source engendrent une dilution initiale du rejet à peu près homogène dans le sillage de l'obstacle.

Le rejet peut alors être considéré comme ayant des dimensions initiales non nulles, de l'ordre de celle de l'obstacle.

En termes de conséquences, si le gaz rejeté avait été toxique, en amont de l'obstacle, les concentrations sont plus importantes et le temps d'exposition plus grand, la situation se serait bien évidemment aggravée. En aval de l'obstacle, la concentration est moins importante mais il faut souligner que l'augmentation du temps d'exposition ne permet pas de conclure à des effets de dose plus faibles dans tous les cas.

Par ailleurs, si le nuage déborde sur les côtés de l'obstacle, il faut parfois redouter la formation de filets de nuage à forte toxicité (la concentration en amont étant plus importante) de chaque côté de la zone du sillage de l'obstacle.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

La vitesse du vent et la densité du gaz rejeté jouent des rôles particulièrement importants.

Ainsi, plus le vent est fort et le gaz léger, moins la présence de l'obstacle se fait sentir.

Les mécanismes de dispersion peuvent être considérés comme dégagés de l'influence de tout obstacle au sol à des distances supérieures à 10 fois la dimension caractéristique de cet obstacle dans la direction du vent, ou à 2,5 fois perpendiculairement à cette direction à la fois dans le plan horizontal et dans le plan vertical (31).

Une étude aussi sur la dispersion des vitesses et les streamlines a été réalisée (figures 4-25, 4-29, 4-33, 4-36, 4-40, 4-44 et 4-48). Pour ce là il été constaté dans le cas où le premier ou les deux bâtiments ont la même hauteur, qu'au niveau du sommet, une zone de dépression et de survitesse se forme, tandis qu'au pied du versant au vent, l'air est ralenti. Pour le cas où le premier bâtiment amont est le moins élevée la vitesse des vents est influencée par une double survitesse provoquée par les deux arêtes de bâtiments.

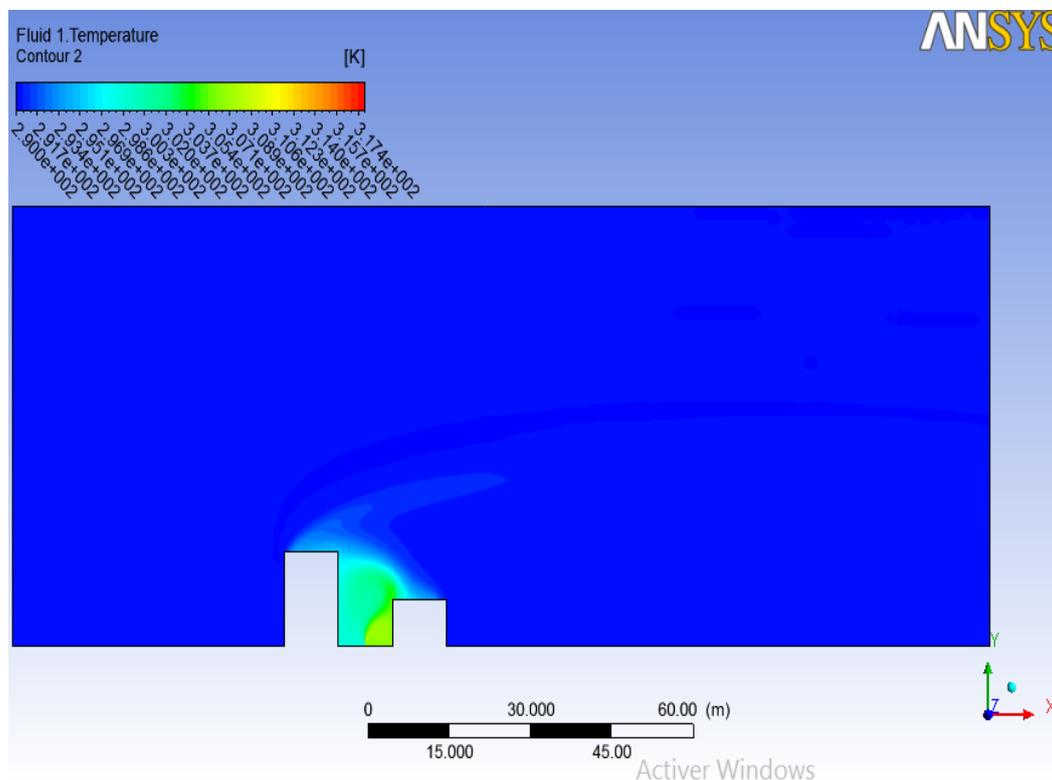


Figure 4-23 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

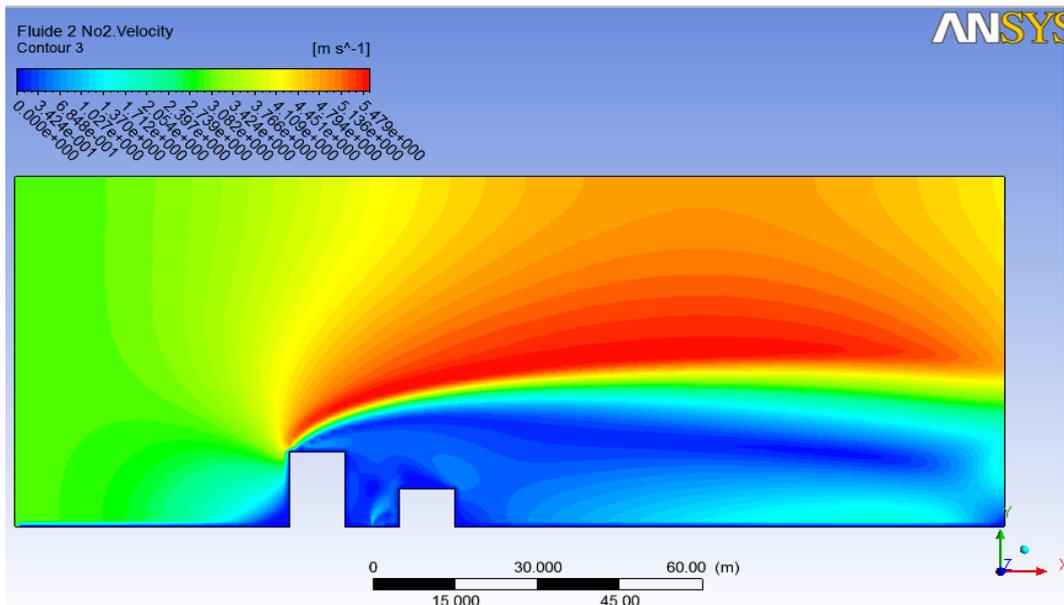


Figure 4-24 : Evolution de la vitesse de sortie – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

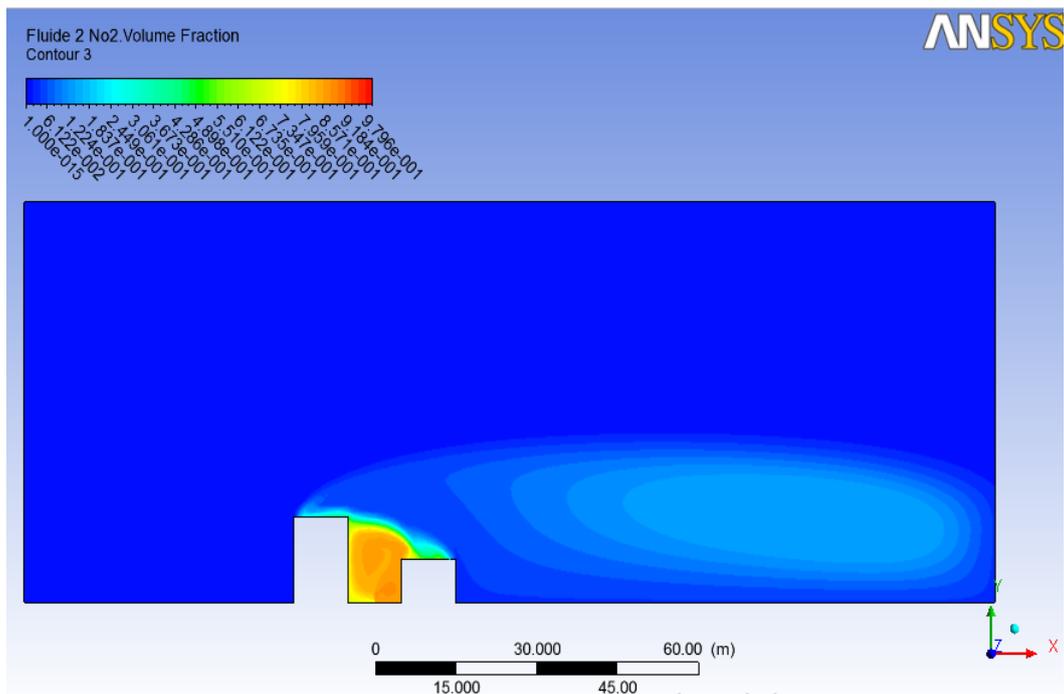


Figure 4-25 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

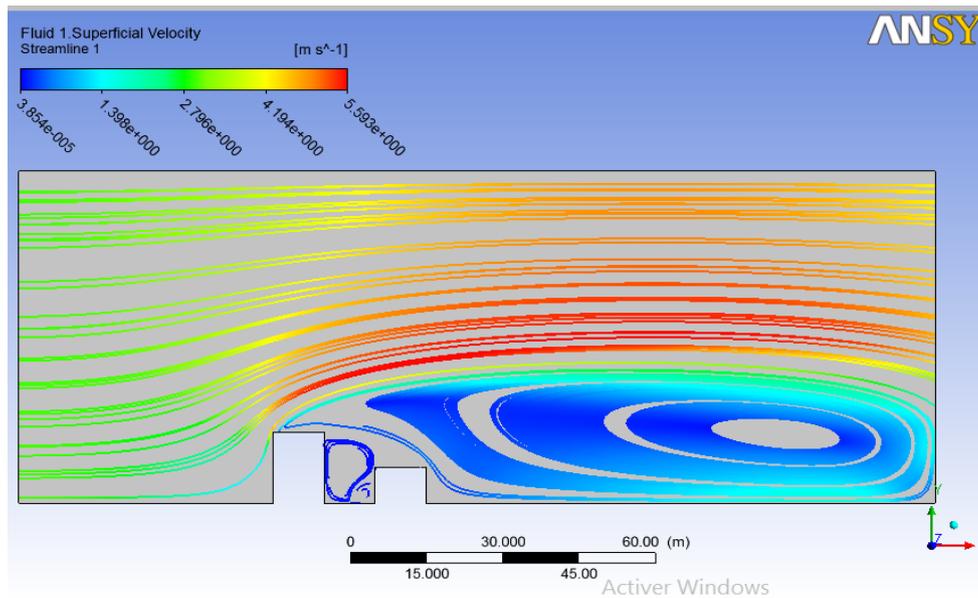


Figure 4-26 : Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = 2 fois la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$

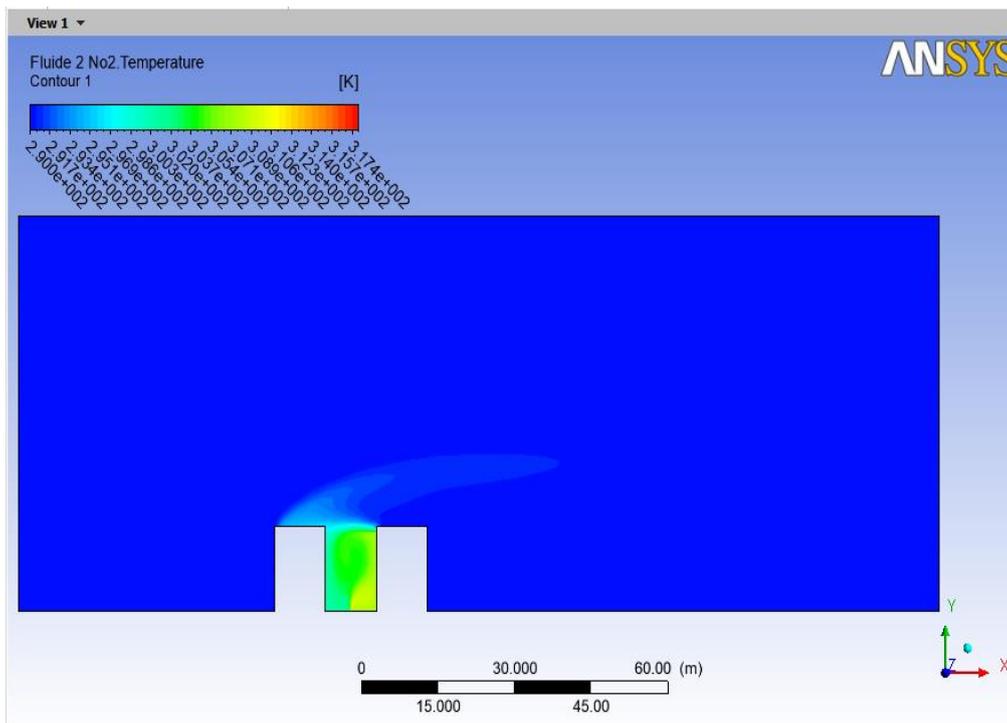


Figure 4-27 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7\text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

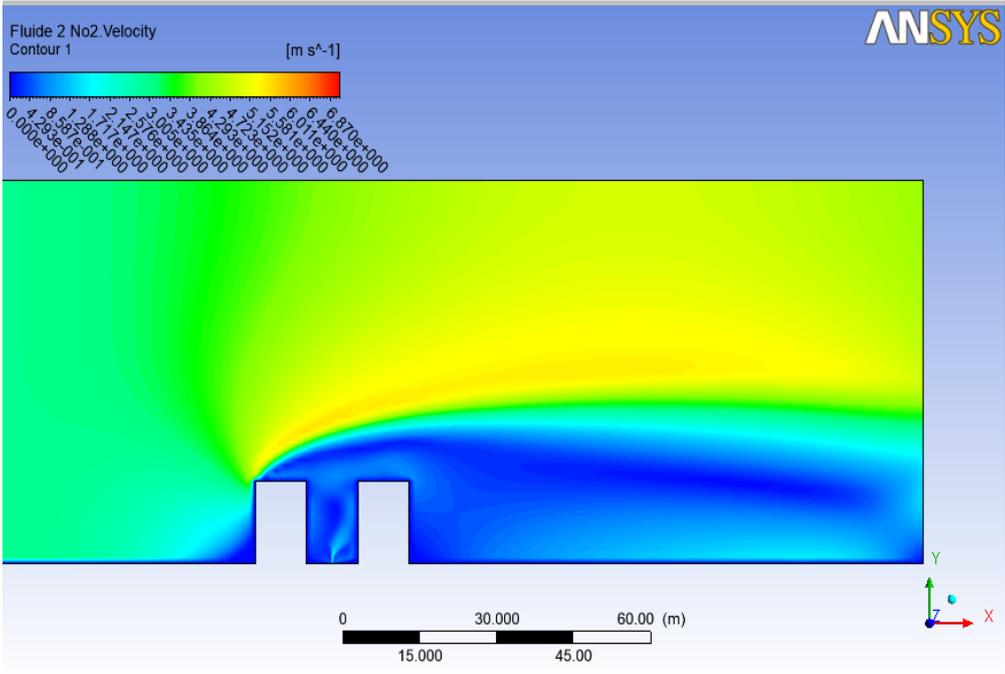


Figure 4-28: Evolution de la vitesse de sortie des gaz – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7 \text{ m/s}$

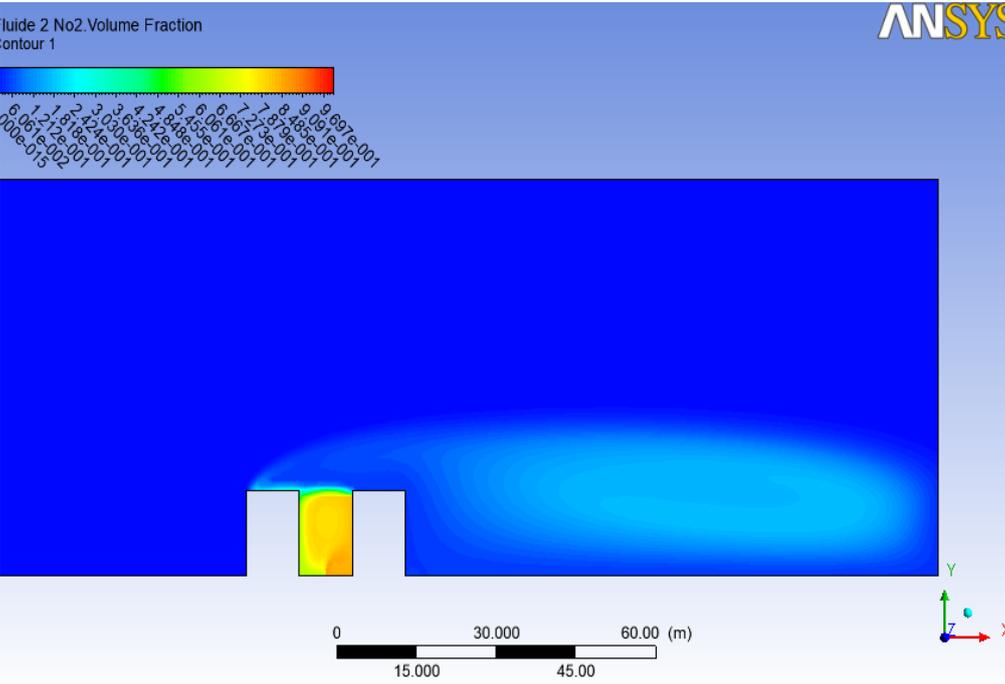


Figure 4-29 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

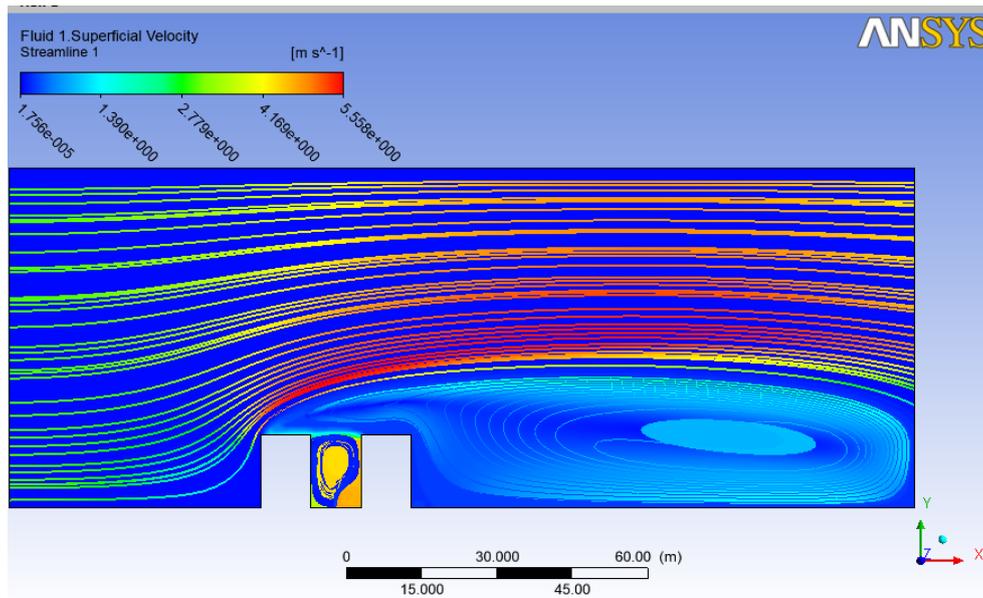


Figure 4-30 : Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en amont = la hauteur du bâtiment en aval), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 7 \text{ m/s}$

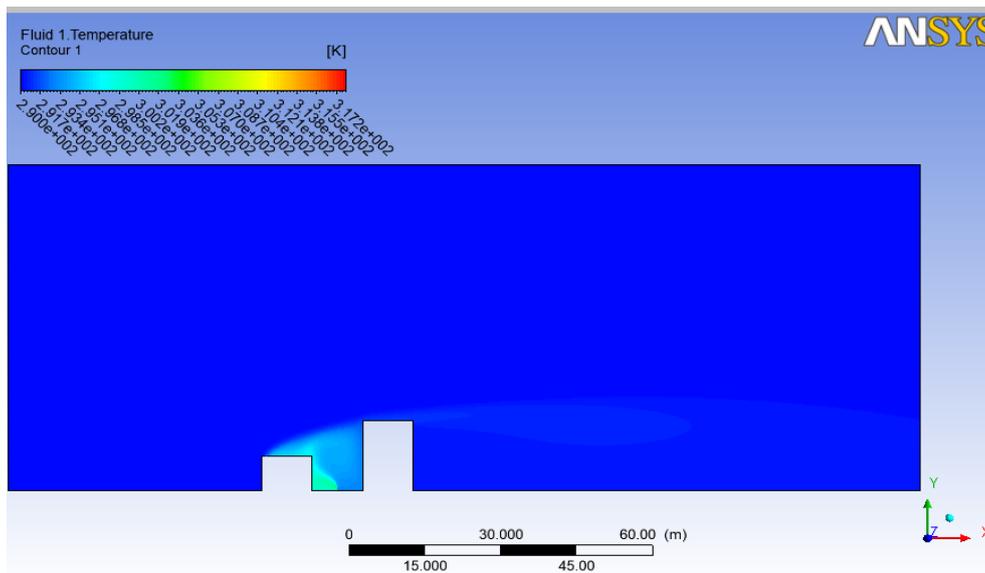


Figure 4-31 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

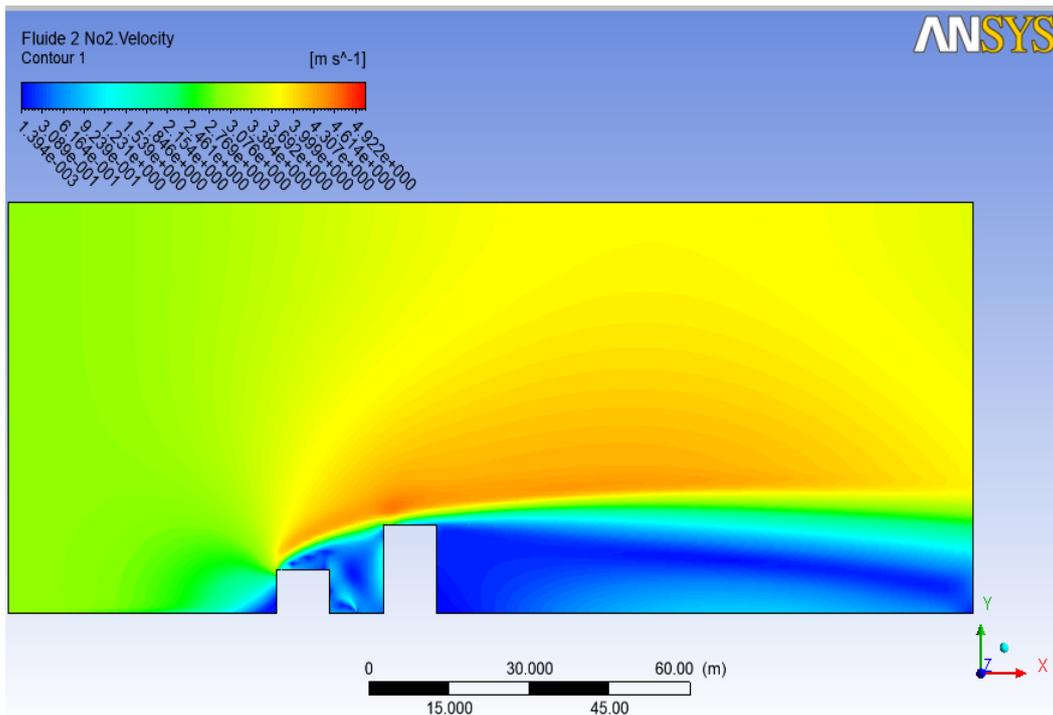


Figure 4-32 : Evolution de la vitesse de sortie des gaz température – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

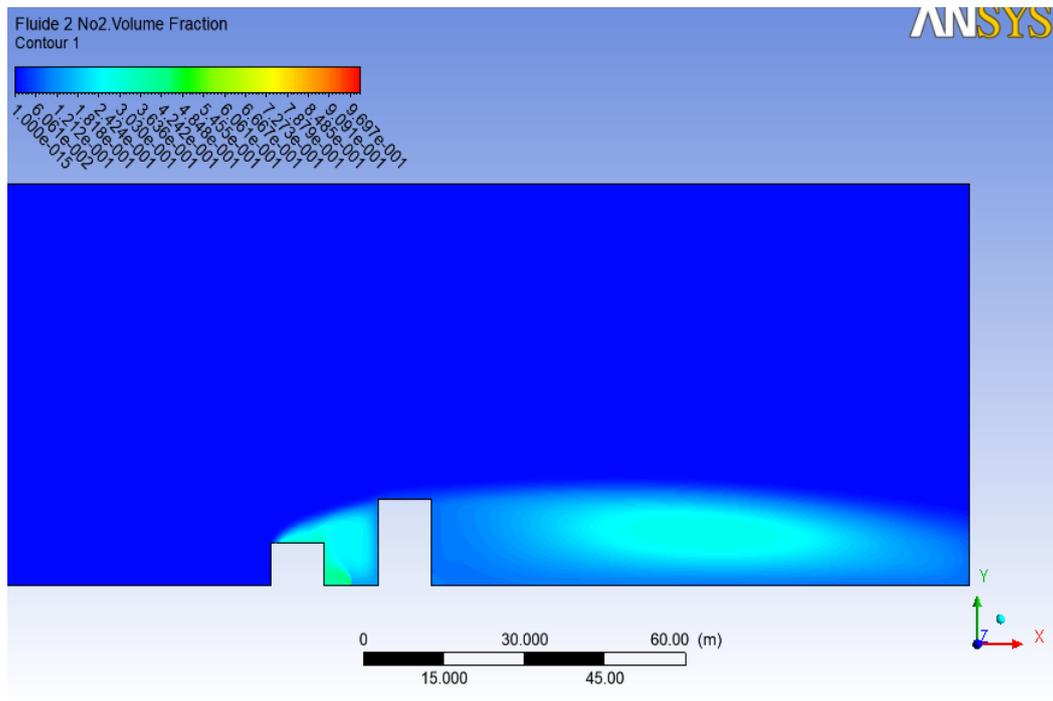


Figure 4-33 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

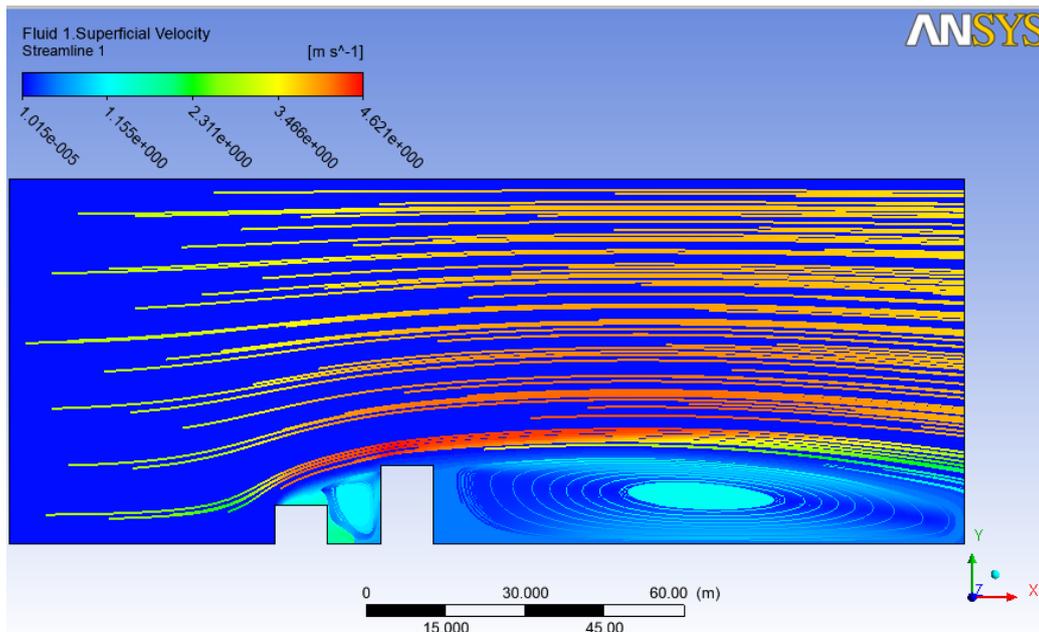


Figure 4-34 : Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = 2 fois la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

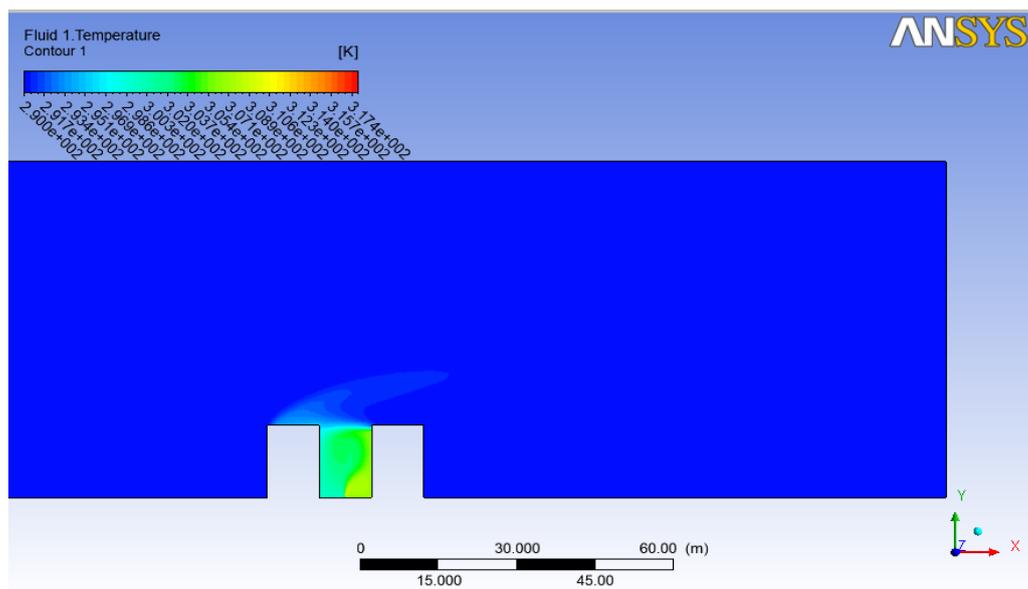


Figure 4-35 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

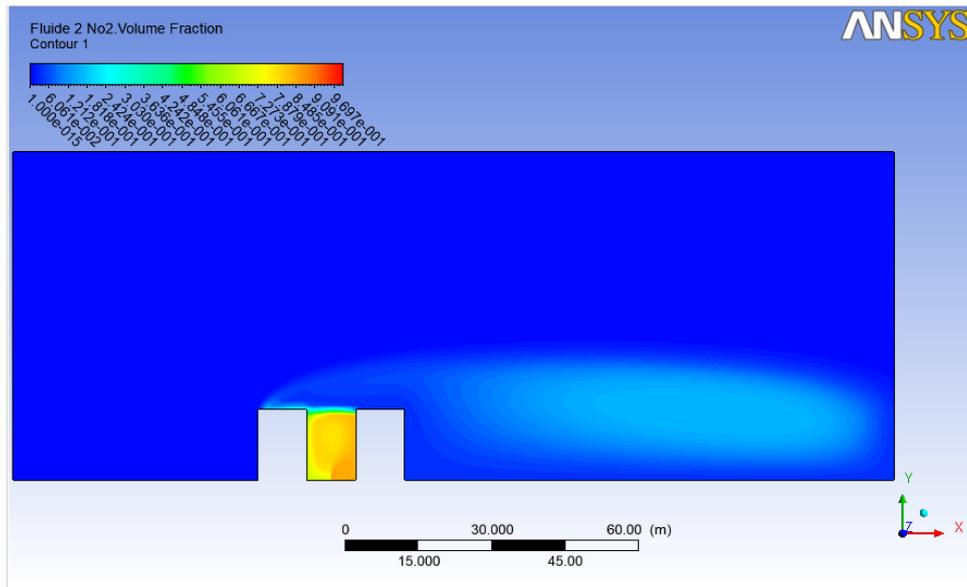


Figure 4-36 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5 \text{ m/s}$

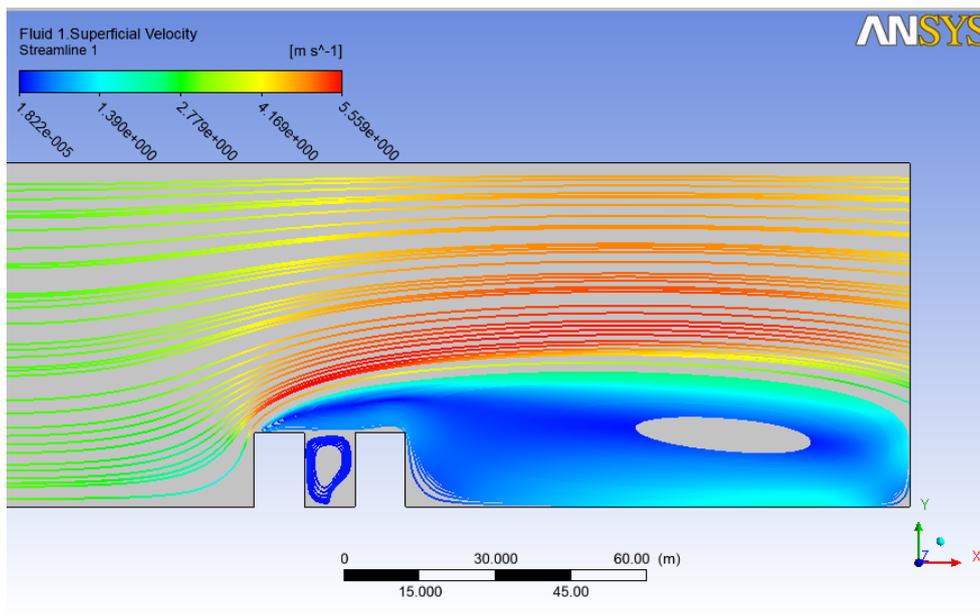


Figure 4-37 : Evolution des lignes des vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 5 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

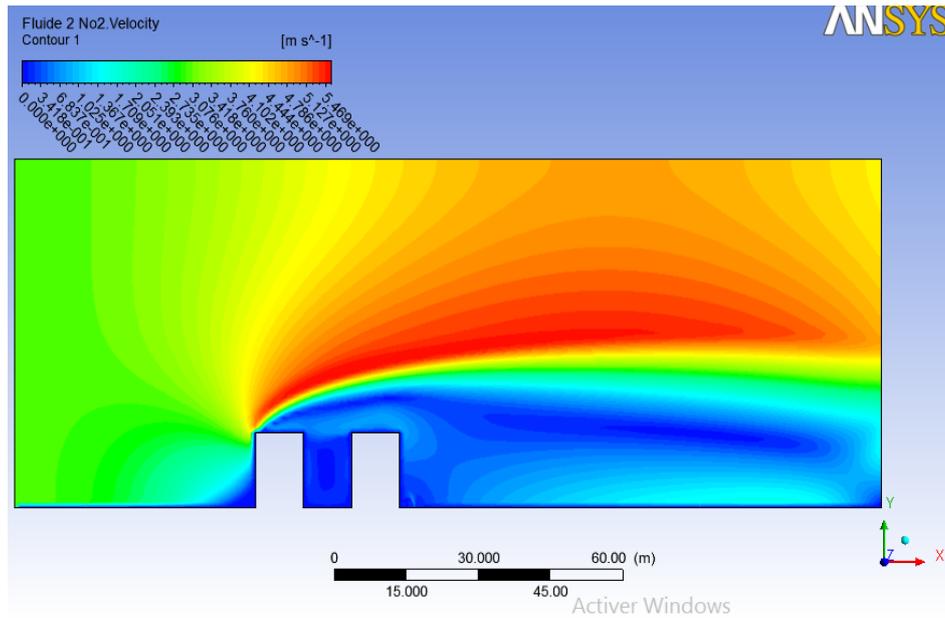


Figure 4-38 : Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$

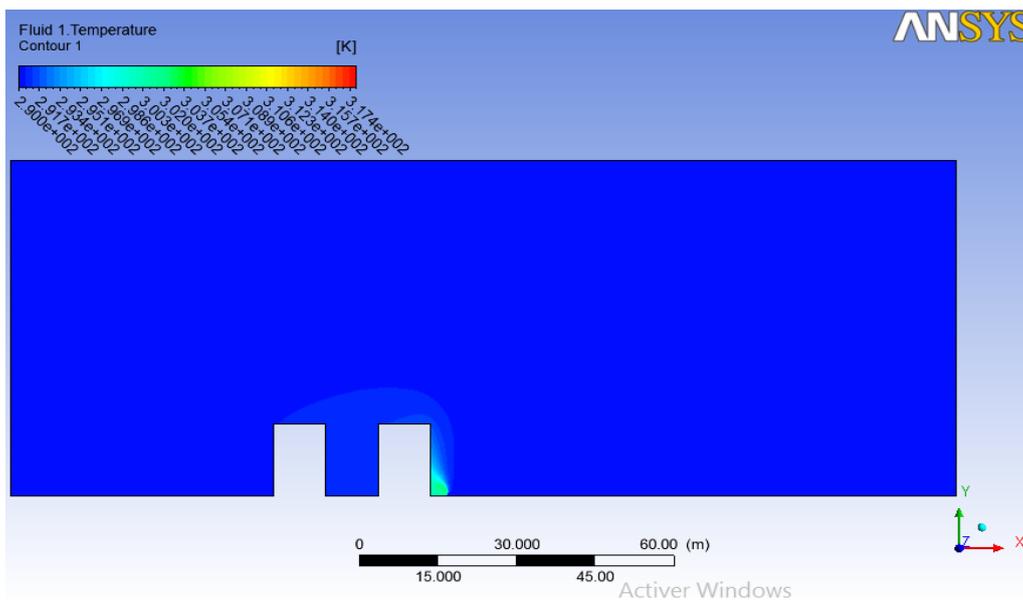


Figure 4-39 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3\text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

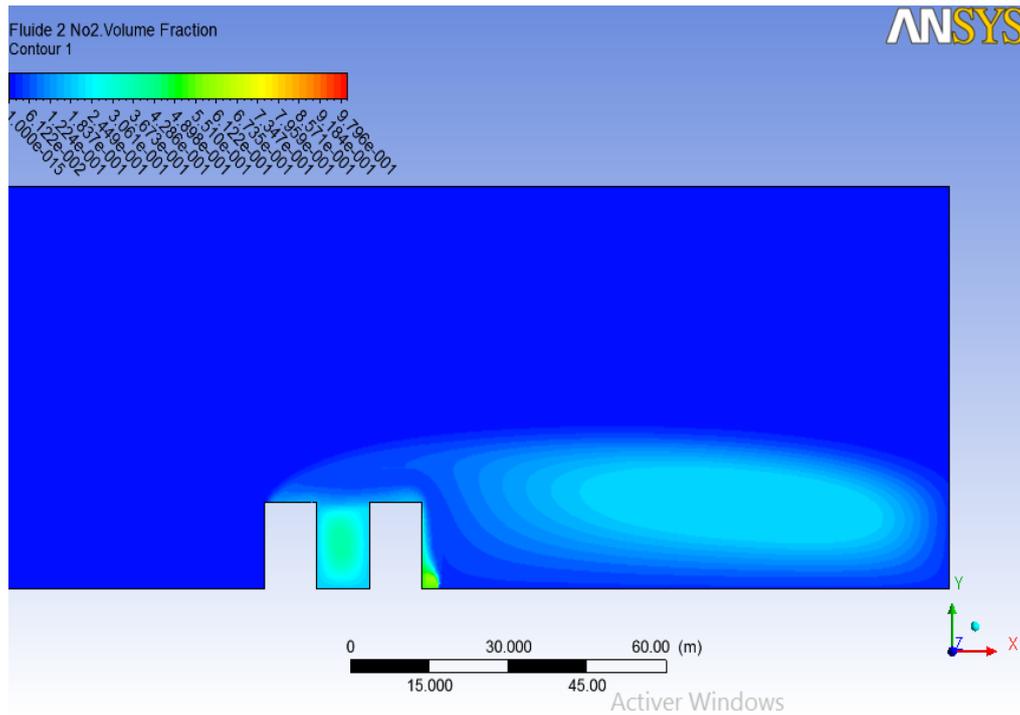


Figure 4-40 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

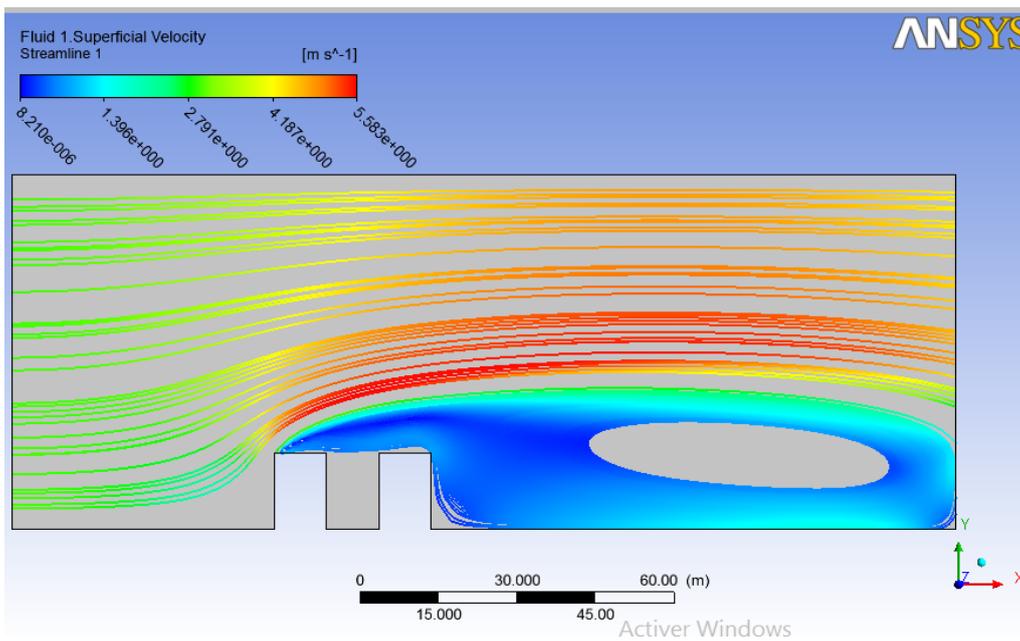


Figure 4-41 : Evolution des lignes de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

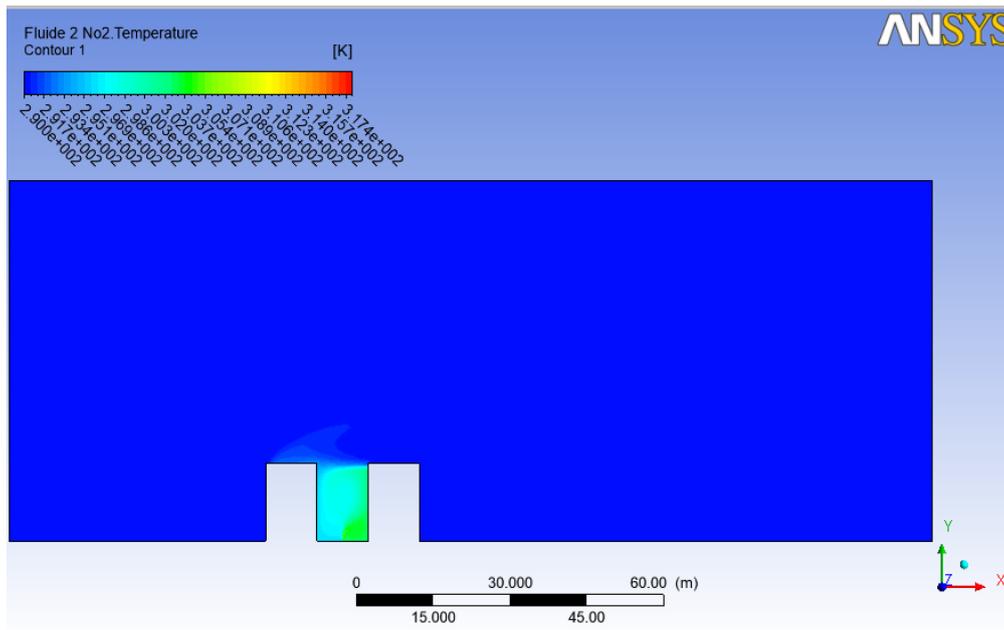


Figure 4-42 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

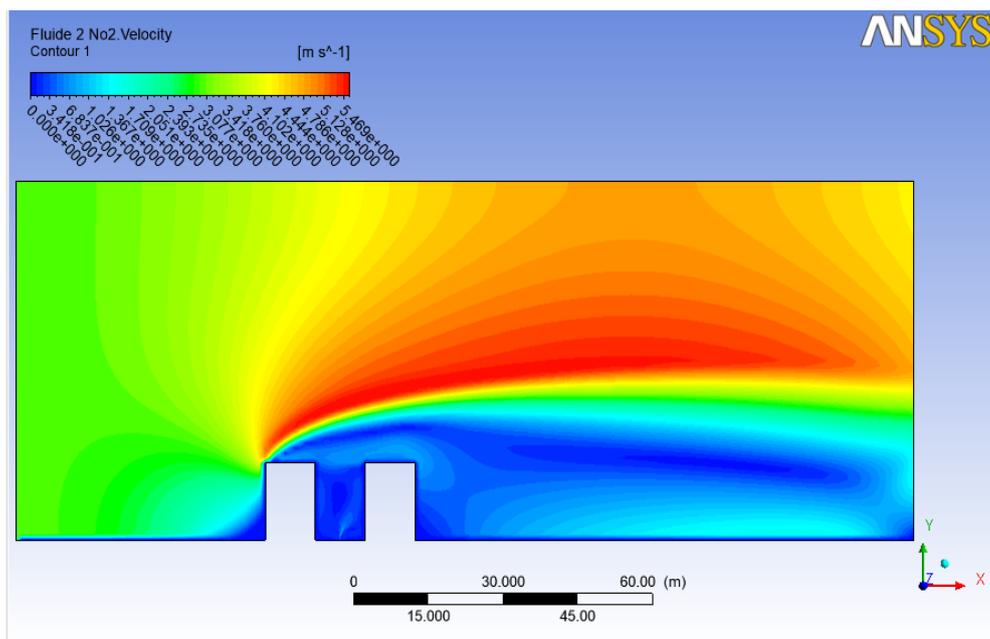


Figure 4-43 : Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source au milieu, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

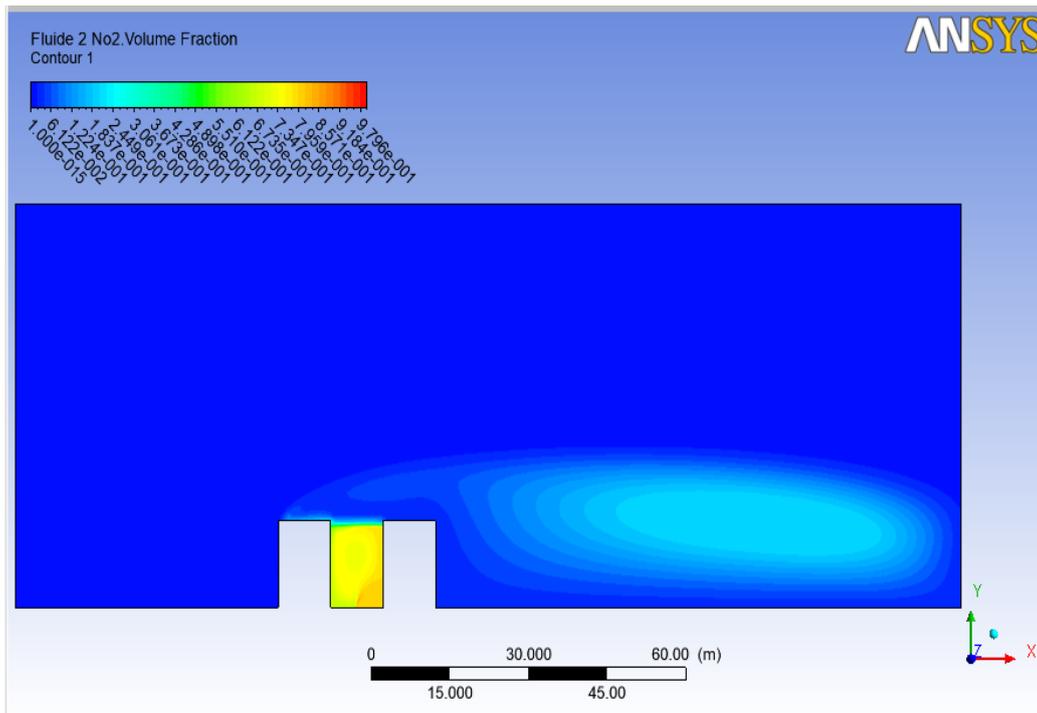


Figure 4-44 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

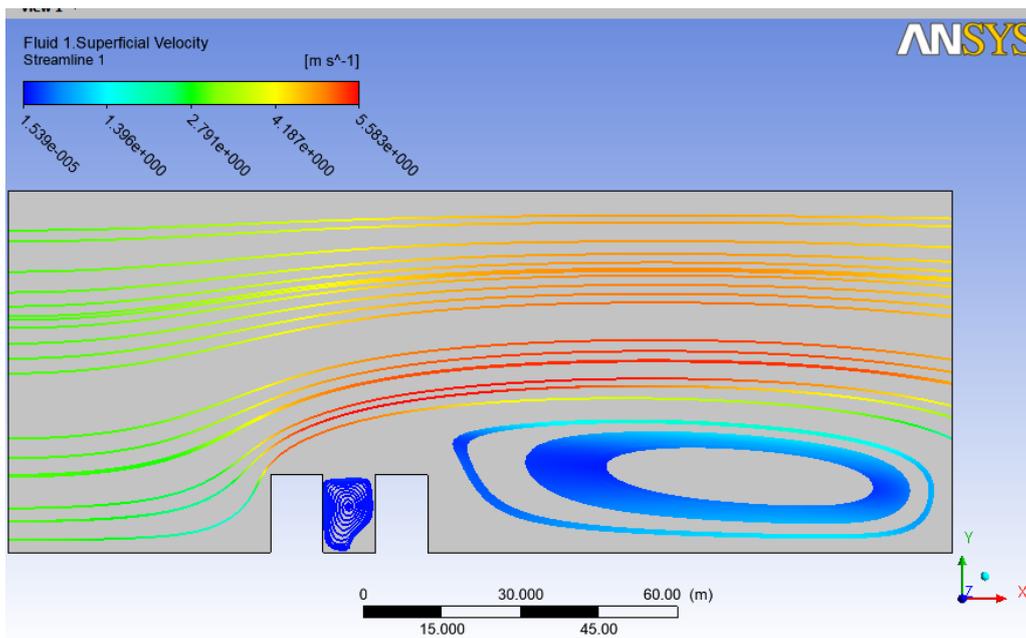


Figure 4-45 : Evolution des lignes des vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

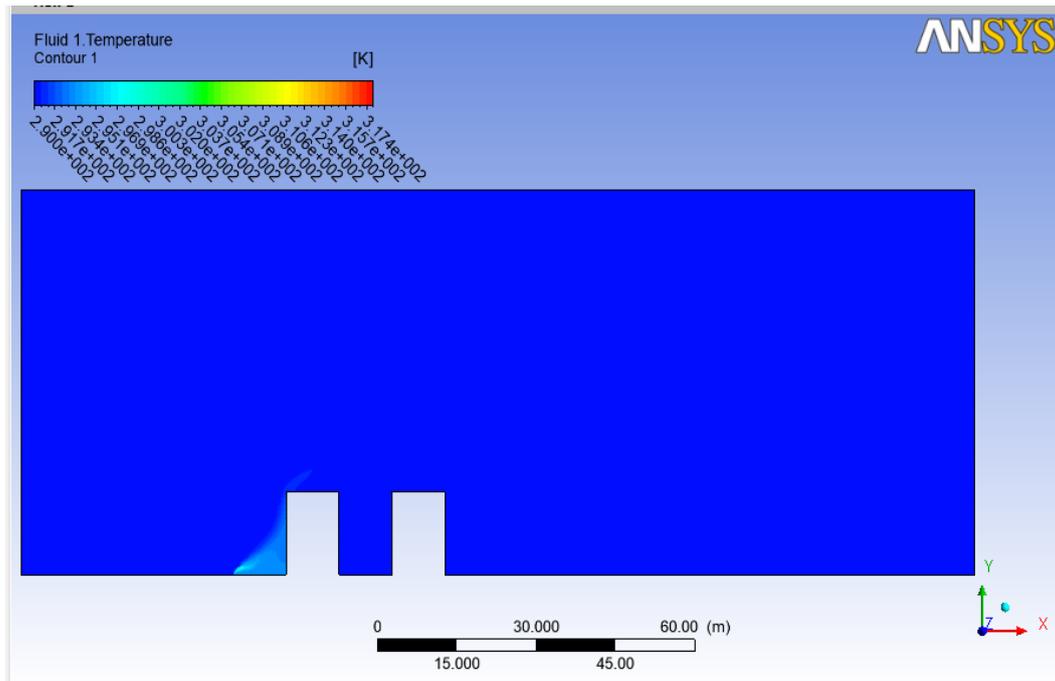


Figure 4-46 : Evolution de la température – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

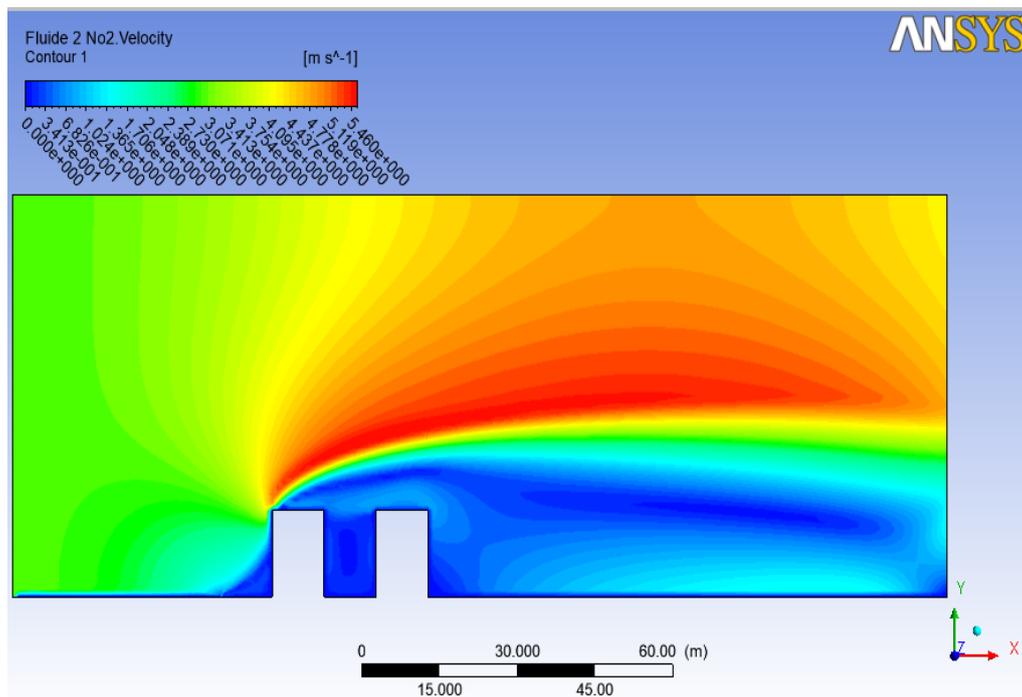


Figure 4-47 : Evolution de la vitesse – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

Chapitre 04 : Résultats et discussions

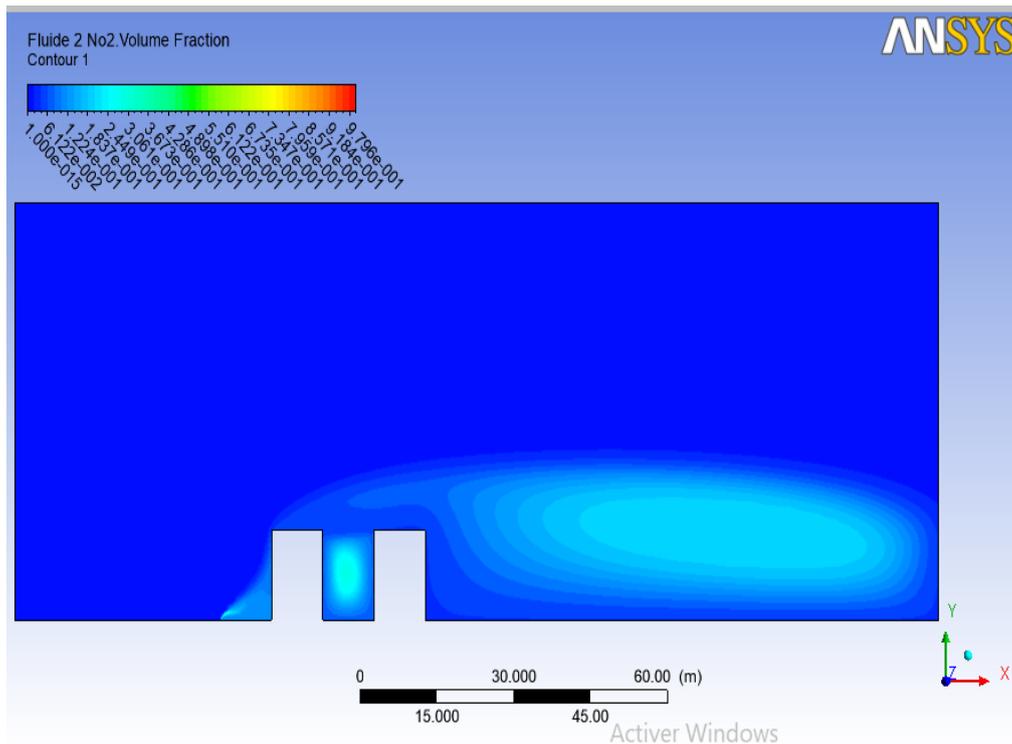


Figure 4-48 : Evolution de la fraction – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source après, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

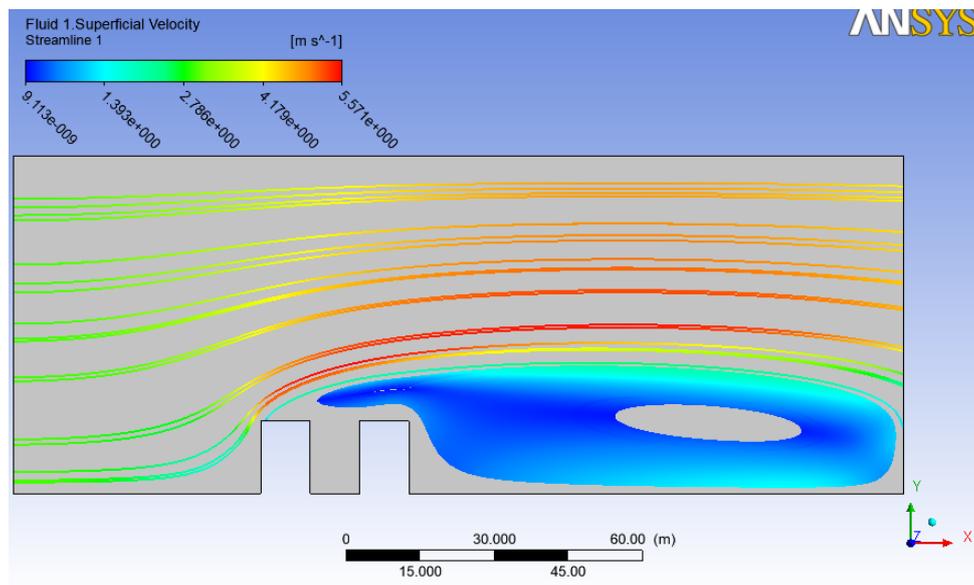


Figure 4-49 : Evolution des ligne de vitesses – hauteur du bâtiment en aval = la hauteur du bâtiment en amont), source avant, $V_{\text{sortie gaz}} = 3 \text{ m/s}$

4.3.1 Analyse et évaluation des résultats

Ce chapitre présente les différents profils relatifs à la fraction, température et vitesse en fonction de la hauteur du domaine étudié (20 m). Ces profils ont été étudiés en variant les hauteurs des bâtiments par rapport à la source, les positions des sources émettrices du dioxyde d'azote par rapport aux bâtiments et la vitesse de sortie des gaz au niveau de la source étudiée.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

Les résultats obtenus ont montré que dans le cas où la source d'émission est située au niveau de la rue canyon, les profils de la concentration du dioxyde d'azote sont symétriques (Figure 4-49). Dans la première hypothèse quand le premier bâtiment de hauteur deux fois supérieur (2H avant) au deuxième bâtiment, les concentrations dans l'atmosphère en prison augmentent légèrement puis le polluant est stagné jusqu'à une certaine hauteur ensuite il est commencé à se disperser au-delà de la hauteur du bâtiment. Dans la deuxième hypothèse le profil est inversé car la pollution est stagnée au niveau du deuxième bâtiment de hauteur deux fois supérieure au premier bâtiment (2H après) puis elle est dispersée au-delà de la hauteur de 15 m. En ce qui concerne les profils des concentrations en aval des deux bâtiments pour les deux hypothèses étudiées (2H avant et 2H après), la dispersion est similaire et aucune influence sur les variations des concentrations n'est constatée lors de la variation des hauteurs des bâtiments figure 4-50).

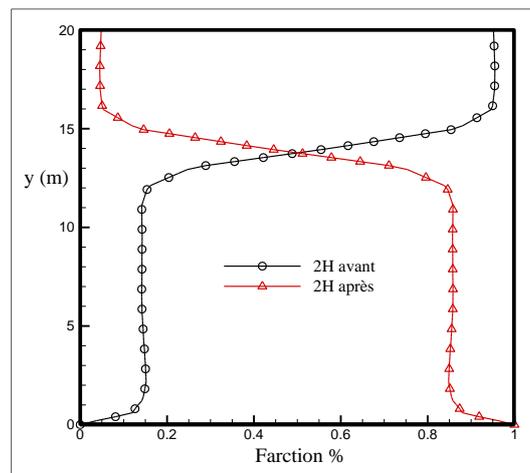


Figure 4-50 : Profils des concentrations entre les bâtiments (source au milieu)

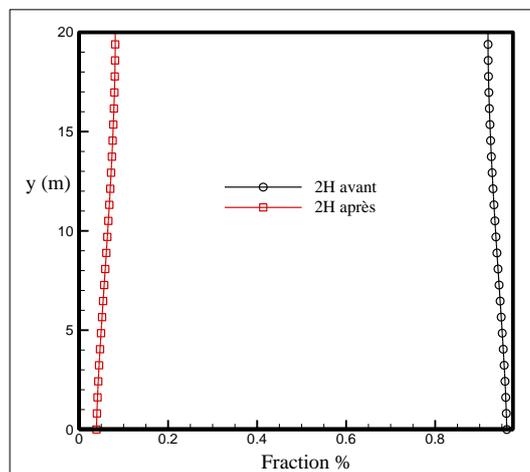


Figure 4-51 : Profils des concentrations après les bâtiments (source au milieu)

L'étude de la variation des vitesses de sortie des gaz de combustion dans le cas d'une source située au milieu de la rue canyon entre deux bâtiments de même hauteur (2H) ont montré que les profils des concentrations sont presque identiques au niveau de la rue canyon (figure 4-52) avec une diminution très marquée au sommet des bâtiments, par contre les profils des concentrations après les deux bâtiments (figure 4-53), sont identiques aussi mais les plus élevées correspondent à la vitesse de sortie de 7 m/s avec dues à la quantité des gaz générée lors de la combustion.

Chapitre 04 : Résultats et discussions

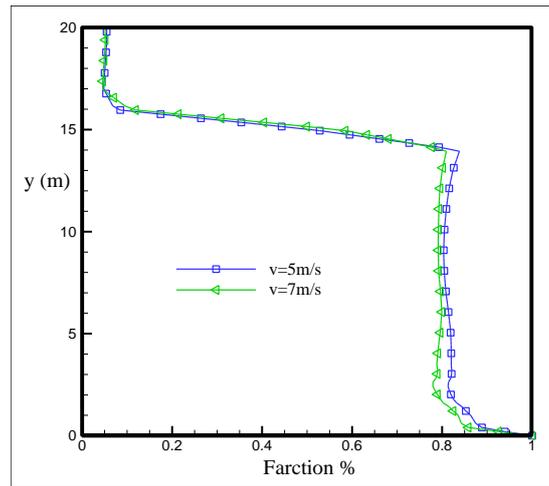


Figure 4-52 : Profils des concentrations au milieu des bâtiments (source au milieu)

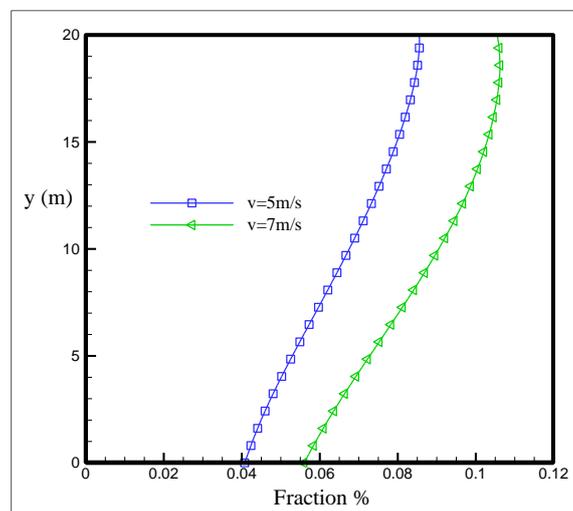


Figure 4-53 : Profils des concentrations en aval des bâtiments (source au milieu)

Les profils des températures obtenus pour les différentes hauteurs des bâtiments (2H avant et après) et vitesses (5 et 7 m/s) à montrées que les variations sont identiques tout au long de la hauteur des bâtiments pour les deux plans, c'est-à-dire au milieu de la rue canyon et en aval des bâtiments. On remarque qu'au milieu de la rue canyon la température de sortie des gaz a une influence sur l'atmosphère (température élevée jusqu'à 10 m de hauteur). Cette influence a un grand effet sur le phénomène de déplacement des masses d'air froides et chaudes, ce qui provoque la dispersion des polluants (figure 4-54, 4-55, 4-56 et 4-57).

Chapitre 04 : Résultats et discussions

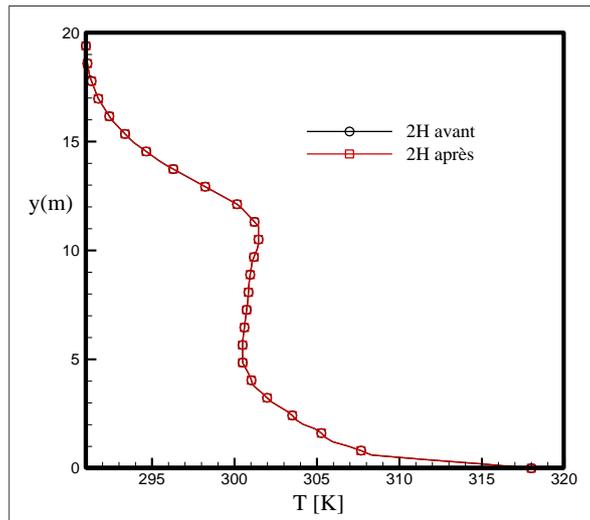


Figure 4-54 : Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes hauteurs (source au milieu)

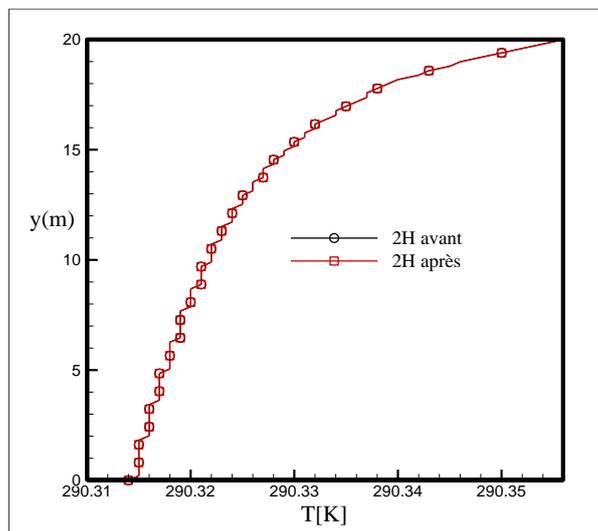


Figure 4-55 : Profils des températures en aval des bâtiments à différentes hauteurs (source au milieu)

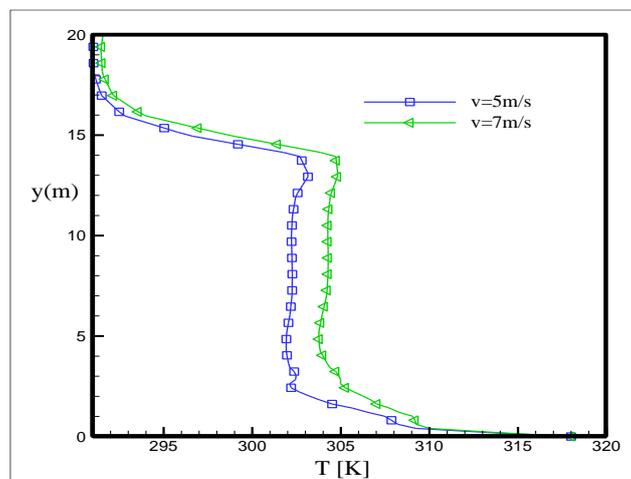


Figure 4-56 : Profils des températures au milieu de la rue canyon à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques)

Chapitre 04 : Résultats et discussions

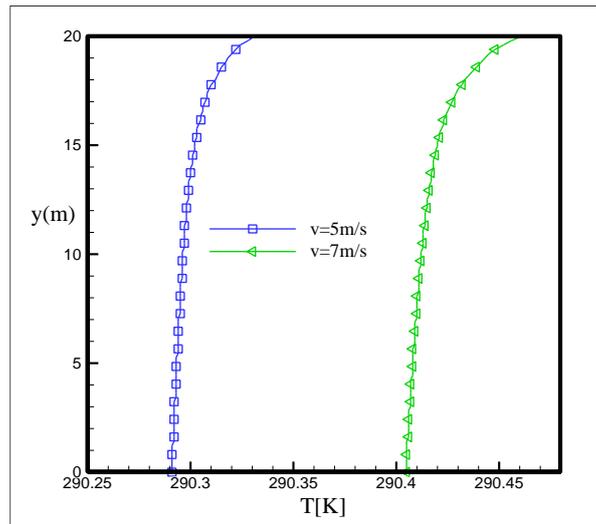


Figure 4-57 : Profils des températures en aval des bâtiments à différentes vitesses (source au milieu, hauteurs identiques)

Pour mieux étudier la dispersion de la pollution par le dioxyde d'azote, nous avons procédé au changement de la position de la source par rapport à une géométrie des bâtiments et une vitesse de sortie des gaz fixes. Les positions choisies des sources étaient avant, au milieu et après les bâtiments. La modélisation par rapport au plan transversal (Ligne 2) situé au milieu des bâtiments a montré que la concentration émise de la source d'émission au niveau de la rue canyon a un profil différent par rapport aux concentrations émises avant et après les bâtiments (figure 4-58). Cela explique bien que la pollution décroît avec la hauteur du côté sous le vent du bâtiment et croît avec la hauteur du côté au vent du bâtiment formant le canyon. La modélisation par rapport au plan transversal situé après les bâtiments (Ligne 3) les profils de la fraction sont identiques suite à une bonne dispersion des polluants dans l'atmosphère (figure 4-59). Mêmes constatations ont été enregistrés pour le paramètre de température (figures 4-60 et 4-61)

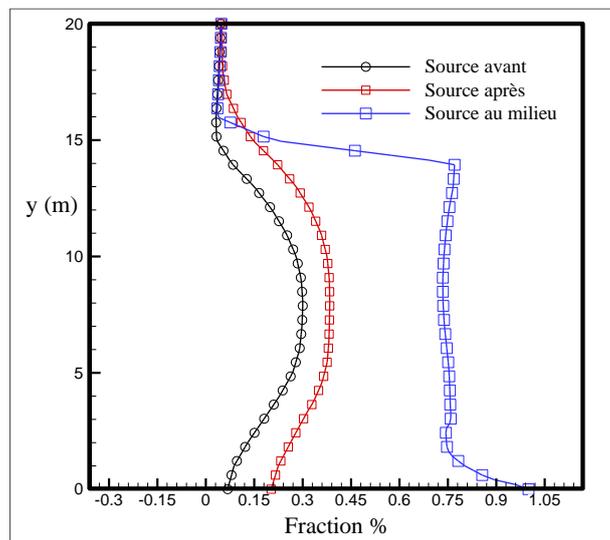


Figure 4-58 : Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)

Chapitre 04 : Résultats et discussions

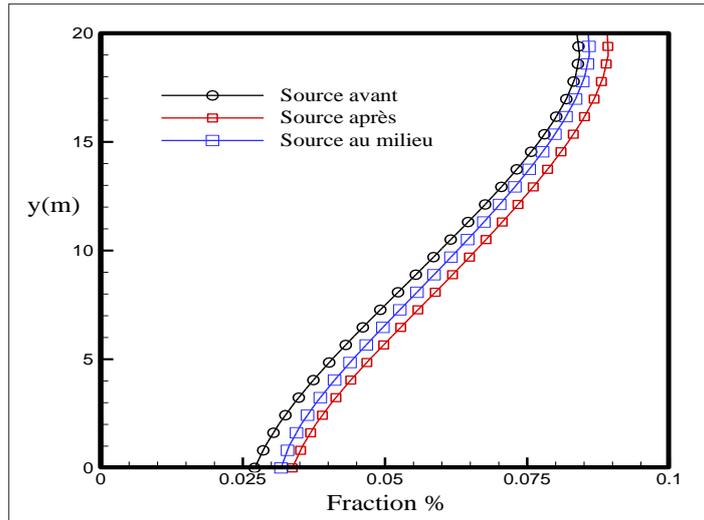


Figure 4-59 : Profils des fractions en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)

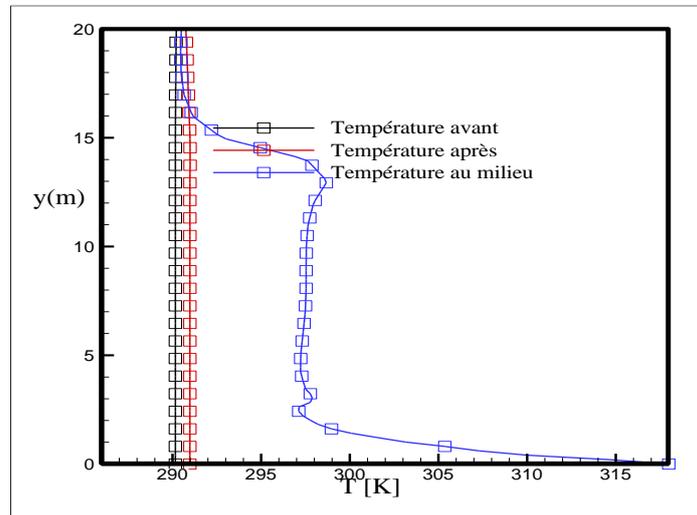


Figure 4-60 : Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 2)

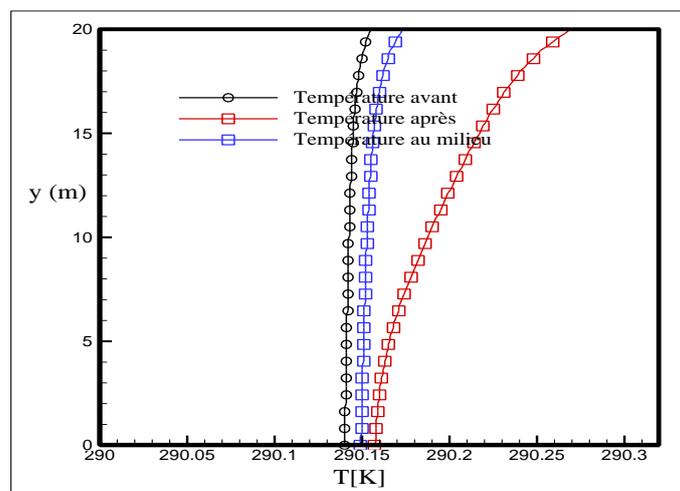


Figure 4-61 : Profils des températures en amont, milieu et en aval des bâtiments (vitesse de la source constante 3 m/s, hauteurs identiques, Ligne 3)

CONCLUSION

5 CONCLUSION

Dans ce travail on a étudié, sous des conditions atmosphériques stables, la dispersion du gaz NO₂ émis par un tuyau d'échappement d'un véhicule situé dans une rue Canyon et des cheminées localisées à l'intérieur du Complexe SIDER El,Hadjar). Le gaz étudié a été supposé inerte et la vitesse de l'air a été pris 3 m/s. Pour l'étude de la simulation de la dispersion plusieurs paramètres ont été variés et en particulier la température de l'air et la vitesse de sortie des gaz dans le cas d'une source automobile.

Les résultats obtenus ont montrés qu'au niveau de la rue canyon, les émissions de gaz émis restent toujours emprisonnés dans la rue canyon quel que soit la position et la vitesse de sortie du gaz NO₂. Ce phénomène est dû à l'effet de la dépression, de tourbillonnement ou recirculation créé par les bâtiments, température des gaz, etc.

Il a été constaté en général que la qualité de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air. Si la dispersion est bonne, les concentrations peuvent rester faibles malgré des émissions importantes. Par contre, si la dispersion se fait mal, des rejets relativement limités peuvent suffire à dégrader la qualité de l'air.

Aussi, à travers les résultats obtenus, on a prélevé les paramètres influant sur la dispersion des polluants tels que les hauteurs des bâtiments et vitesses de sortie des gaz d'échappement. Autres paramètres, tels que la pression et la température ont été étudiés.

En ce qui concerne les émissions des cheminées du complexe SIDER El Hadjar, les résultats de la simulation ont indiqué que la ville d'El Hadjar n'est pas touchée par les rejets atmosphériques de l'usine. La simulation n'a pas pris en considération mes émissions diffuses et fugitives.

En conclusion de ce travail, nous pouvons affirmer que la dispersion des polluants gazeux à travers l'atmosphère est très complexe. Ainsi, une situation anticyclonique, très faibles vents, favorise des niveaux de pollution élevés car elle entraîne une accumulation des gaz. L'inversion du gradient thermique vertical, induit les mêmes conséquences. A l'inverse, une situation dépressionnaire, vents plus sensibles, permet une bonne dilution des polluants dans l'atmosphère. Au cours de la dispersion, les polluants peuvent se transformer par réactions.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes. Il s'agira par exemple, de compléter les résultats par l'étude de la dispersion avec l'introduction des réaction photochimique des gaz, chagement de la direction des vents, géométrie des toitures et autres sources démisions.

BIBLIOGRAPHIE

6 Bibliographie

1. 9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action.[consulté le 02/05/2018].Disponible à l'adresse :<https://www.who.int/fr/news-room>.
2. **Masclat, Pierre**. Pollution atmosphérique causes, conséquences, solution, perspectives. Ellipses Marketing, 2005 [Technosup]. 211.
3. **Structure de l'atmosphère**. science-climat-energie[en ligne].Disponible à l'adresse : www.science-climat-energie.be.
4. **Prospero**, Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality, Atmospher, AGU100 (1999).
5. **Keith Griffin, Azizur Rahman Khan , Amy Ickowitz.**, Poverty and the Distribution of Land, Journal of Agrarian change (2002).
6. **Zhonglin Xu**. Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms (SPRINGER) China Academy of Building Research Beijing, China, People's Republic,2014.
7. **Buseck, PR. et Schwartz SE**. "Tropospheric Aerosols." Elsevier Ltd 4 (2014): 96-134.
8. **Oucher. N**, «Mémoire de Projet Fin d'Etude : contribution à l'étude, par classe granulométrique, des aérosols particuliers sur un site de proximité a L'ENP,» Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
9. **C. Elichegaray, S. Bouallala, A. Maitre, M. Ba** « état et évolution de la Pollution atmosphérique » Revue Française d'Allergologie - Vol. 50 - N° 4 - p. 381-393, 2009.
10. **FONTON, J**. Les pollutions de l'air les connaitre pour les combattre.Vuibert,Culture scientifique,2003,p.198.
11. **Boris Quennehen, Alfons Schwarzenboeck, A. Matsuki, J. F. Burkhart, A. Stohl, Gérard Ancellet, Kathy S. Law**, Anthropogenic and forest fire pollution aerosol transported to the Arctic: observations from the POLARCAT-France spring campaign, volume 12, 6437-6454, 2012.
12. **Kang, M., Ren, L., Ren, H., Zhao, Y., Kawamura, K., Zhang, H., Wei, L., Sun, Y., Wang, Z., Fu, P.**, Primary biogenic and anthropogenic sources of organic aerosols in Beijing, China:Insights from saccharides and n-alkanes, Environmental Pollution (2018).
13. **Kalberer, M.**, Aerosol Physics and Chemistry, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Elsevier Ltd (2015).
14. **Coparly**, l'air et les polluants, 2004.
15. Direction générale de l'aviation civile. Pollution atmosphérique et aviation, 2003.
16. **Kalaora**, p.105,1998.
17. **Souf**.Généralités sur la pollution atmosphérique et ses effets, 1999.
18. Décret exécutif n° 2006-02 du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.

BIBLIOGRAPHIE

19. la directive européenne (2008/50/CE) du 21 mai 2008 et sur la directive n°2004/107/CE du 15 décembre 2004 .
20. Site officiel de l'organisation mondiale de la santé. Disponible à l'adresse : <https://www.who.int/fr>.
21. **Stull, R. B.** An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers. 1988.
22. **COSTES, J.P.** Simulations numériques des écoulements atmosphériques sur sols fortement hétérogènes. Thèse de Doctorat.Nantes:Ecole Centrale de Nantes,1996.
23. **FOLCHER, A.** Contribution à l'étude de la modification de la structure du vent dans une zone de changement de nature de sol. Thèse de Doctorat.Nantes: Université de Nantes,1989.
24. **HUNT,C.R.,LEIBOVICH,S.,RICHARDS,K.J.** Turbulent shear flow over hills. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 114, pp 1435-1470,1988.
25. **VARDOULAKIS, S., FISHER, B.E.A. PERICLEOUS, K. GONZALEZ-FLESCA:** Modelling Air quality in street canyon,a review. Atmos .Environ, 37,pp.155-182,2003.
26. **KATO, M et LAUNDER, B.E.** Te modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders.Proceeding,9th Symposium on Turbulent Shear Flows,Kyoto,1993.
27. **COUILLET,J.C.**Dispersion atmosphérique,Mécanismes et outils de calcul.2002.
28. **FEKIH.A.**Étude et modélisation de l'écoulement et de la dispersion des polluants atmosphériques dans une rue canyon idéalisée, 2012.
29. **VENDEL,F.**Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes:application à l'etude de sites industriels,2011.
30. **TURBELIN, G.** Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent.Thèse. l'Université d'Evry: Centre d'Etudes de Mécaniqued'Ile-de-France,14 janvier 2000.
31. **HUG, M.** Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique. Edition Eyrolles,1975.
32. **GARATT,J.R.** The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press: 316 p,1992.
33. **LAURET,P.** Modélisation de la dispersion atmosphérique sur un site industriel par combinaison d'automates cellulaires et de réseaux de neurones, 2014.
34. **VIERS, G.** Eléments de climatologie.FAC:NATHAN, F.Paris: p.224,1968.

ANNEXE

Description du procédé de fabrication de l'entreprise SIDER El-Hadjar



1. Historique du complexe

L'entreprise nationale de sidérurgie (ENS) a été construite en 1959 par la société bônoise de sidérurgie (SBS). Avec la nationalisation du patrimoine algérien celle-ci devient la société nationale de sidérurgie (SNS). Et elle possède une section qui est la plaque tournante de toute l'usine : la PMA c'est la préparation des matières et agglomérations.

En 1969, l'usine subit un essor en construisant un pôle sidérurgique à El Hadjar pouvant répondre à une variété de gamme de produits et de là elle devient SIDER.

Le complexe d'El-Hadjar depuis 1969 a vu un domaine d'activités se développer au fil des années afin de répondre à la demande sans cesse croissante des produits sidérurgique. Pour la réalisation de plusieurs plans de développement (unités pétrolières etc.)

C'est une année qui marque la fin d'une époque où le souci moyen des responsables était la maîtrise de la technologie et le début d'une autre époque où le premier objet est l'amélioration de la capacité des préoccupations de l'heure figurant les problèmes techniques qui génèrent tous les paramètres de production. L'année 1980 marque dans l'historique du complexe des grandes réalisations, après la création de la SNS, dans l'Algérie indépendante, il a été opéré en une ré-conception complète de configuration de l'usine pour en faire un complexe intégré.

Le début de janvier 1999, marque la suppression des sous directions et création des filiales aux membres de 24. En 2004 marque la création de la division L.R.B laminoir rond a béton

En 2006 se fait un partenariat entre les français et MITTAL pour restructurer la sidérurgie. Elle se nomme actuellement ARCELOR MITTAL et voit le jour jusqu'à présent.

2. Arcelormittal Annaba

- Arcelormittal Annaba, complexe sidérurgique intégré dont 30% des actions détenues par Sider et 70% par Arcelormittal.
- Situé à 12 km d'Annaba
- Superficie : 832 hectares
- Capacité de production nominale : 1.8 Million de tonnes de produits sidérurgiques.
- Arcelormittal Annaba dispose de ses propres installations maritimes reliées au réseau ferroviaires pour le transport des matières premières et les expéditions des produits finis.
- Arcelormittal Annaba dispose d'un réseau commercial à travers le pays de 12 points de vente.
- Deux mines de fer d'une capacité totale de 3 millions de tonnes/an situées à 200 km d'Annaba gérées par Arcelormittal Tébessa sont reliées à l'usine par une ligne ferroviaire. Réserves minières exploitables de 86 millions de tonnes

3. Objectifs du complexe

Les perspectives d'adhésion de l'Algérie à l'organisation mondiale du commerce (OMC) et le traité d'association avec l'union européenne impose des défis majeurs à relever.

Face à cette situation, les parties concernées ont convenu d'un projet de partenariat pouvant assurer la pérennité de l'activité sidérurgique par son insertion dans le processus incontournable de la mondialisation.

Le programme du complexe vise les objectifs suivants :

ANNEXE

- Satisfaction des besoins nationaux.
- Formation du personnel.
- Production ayant un haut niveau d'intégration.

La gestion de l'entreprise a imposé une subdivision en filiales spécialisées dont chacune dans un secteur de production finie. Chaque filiale est dirigée par un sous-directeur qui est responsable du contrôle, de la gestion et de la coordination de l'ensemble des divisions qui constituent la sous-direction.

4. Localisation du complexe SIDER-EL-HADJAR

Le complexe sidérurgique est situé dans la commune de Sidi-Amar distant de 3 km de la daïra d'El-Hadjar et de 12 km d'Annaba.

Il est limité :

- Au Nord par la Cité Sidi -Amar ;
- A l'Est l'agglomération de Bergouga (commune de Sidi Amar) ;
- A Est –sud Est par l'Oud Mebouja et la Daïra d'El-Hadjar ;
- AU Sud-ouest par l'Ouest de la localité Derradji Redjem (commune de Sidi-Amar).

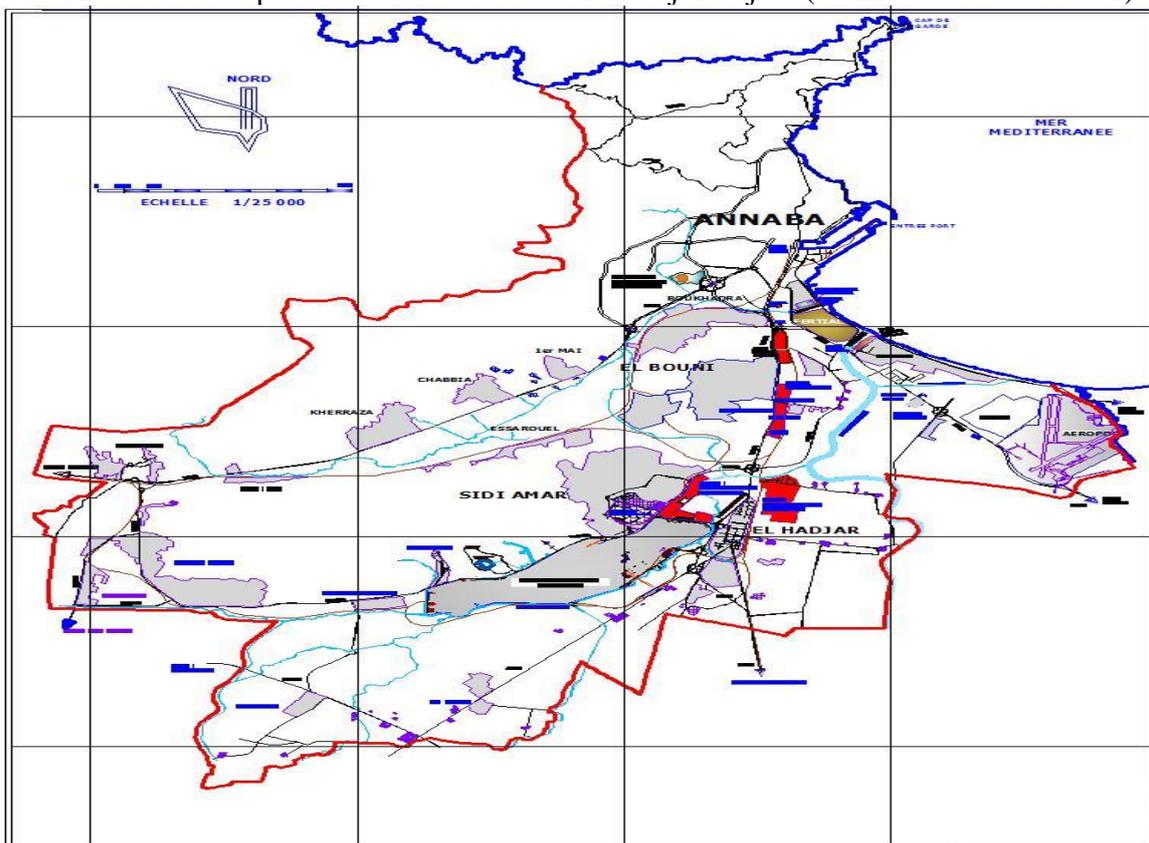


Figure 1: Localisation du complexe SIDER-EL-HADJER

5. Présentation du complexe

Le complexe sidérurgique d'El Hadjar est situé à l'Est de l'Algérie dans une zone industrielle à une quinzaine de kilomètre de la ville d'Annaba.

Il occupe une surface de 800 Ha dont :

ANNEXE

- ✓ Les ateliers de production qui sont repartis sur 300 Ha
- ✓ Les lieux de stockage occupent près de 200 Ha de la surface
- ✓ L'administration, les services ou les grands bureaux se partagent 200 Ha du reste.

A l'intérieur, il y a près de 60 Km de voies ferrées permettant la libre circulation des matières premières et près de 100 Km de route permettant la circulation des engins et les véhicules personnels.

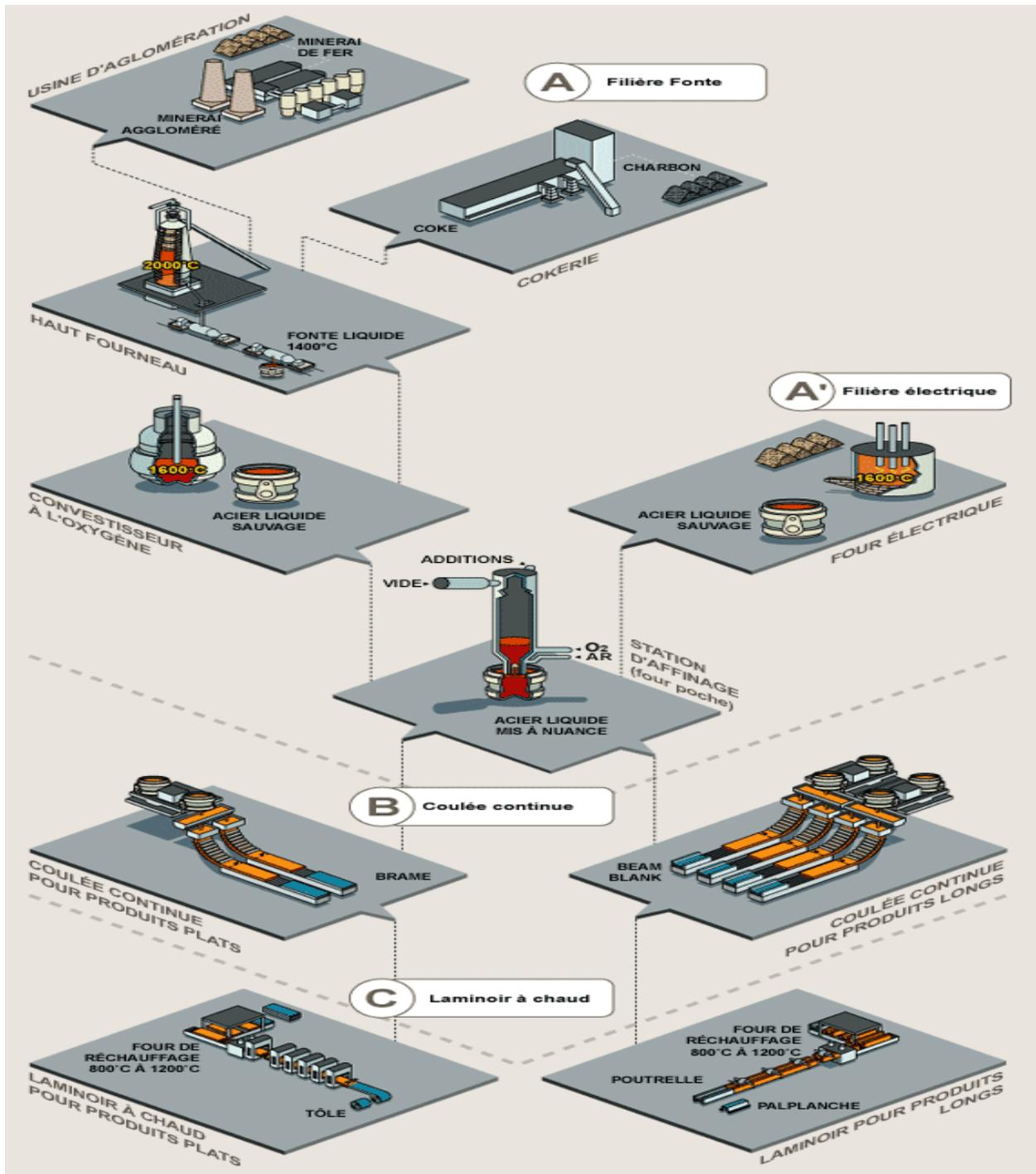


Figure 2 : Les différentes structures du complexe d'EL-Hadjar

6. Les activités principales

Tableau 1: Les différentes activités du complexe sidérurgique

Dénomination des installations	Activité principale
Cokerie	Production du coke
Unité de préparation matière et aggloméré (PMA)	Production d'aggloméré
Hauts fourneaux (HFx)	Production de la fonte liquide
Aciéries à oxygène (ACO1 et ACO2)	Acier liquide ACO1: Brames ACO2: Billettes
Aciérie électrique (ACE)	Acier liquide, billettes et lingots
Laminoir à chaud (LAC)	Bobines
Laminoir à froid (LAF)	Bobines, Bobines galvanisée, TN 40 galvanisées
Laminoir à fil et rond (LFR, LRB)	Fil machine et rond à béton
Unité de tuberie sans soudure (TSS)	Tubes casing et pipe line
Ateliers de construction (ATC) (AMM)	Maintenance
Atelier de traitement de surface.	Electrodéposition du cuivre –nickel et chrome.

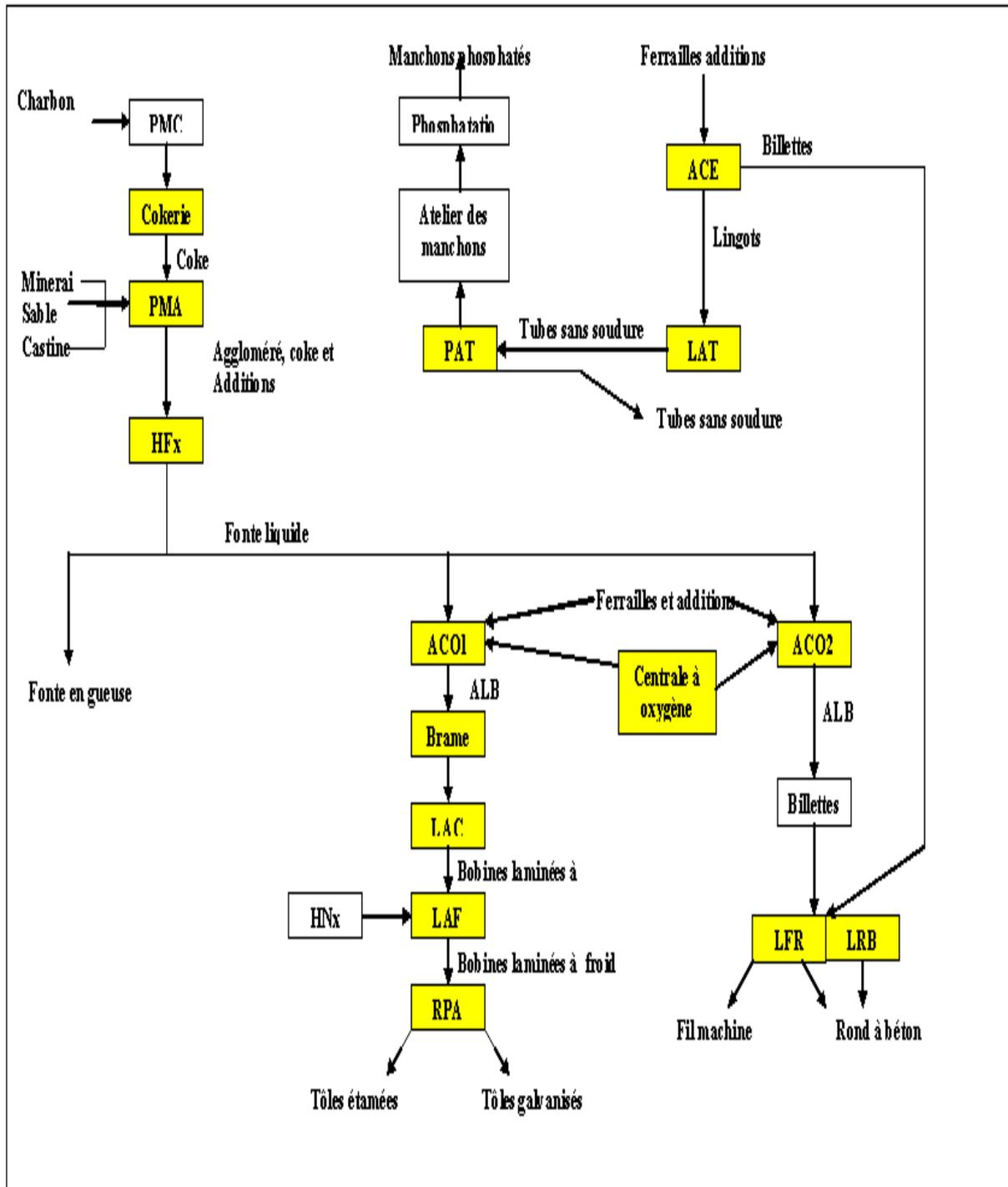


Figure 3: Synoptique du complexe SIDER EL-HADJAR

7. Description générale du procédé

7.1. Présentation de la PMA

La division PMA (Préparation des Matières et Agglomérations) est mise en service depuis l'essor de l'usine et constitue le pilier fort de la sous-direction de la MPF (Matières Premières et fonte). Elle est chargée de la manutention et du traitement des matières destinées à l'alimentation des deux hauts fourneaux pour la fabrication de la fonte.

➤ **Le secteur coke et additions**

Il réceptionne, stocke, traite et achemine les combustibles et les additions nécessaires au fonctionnement des hauts fourneaux et des agglomérations.

➤ **Le secteur minierai**

Le rôle est identique au précédent en ce qui concerne le minerai acheminé par wagons des mines de Boukhadra et d'Ouenza à la station de déchargement.

➤ **Le secteur agglomération**

IL comprend deux unités :

- L'agglomération N°1 mise en service en juin 1969 et d'une capacité de 2100 t/j.
- L'agglomération N°2 mise en service en mai 1980 et d'une capacité de 8250 t/j.

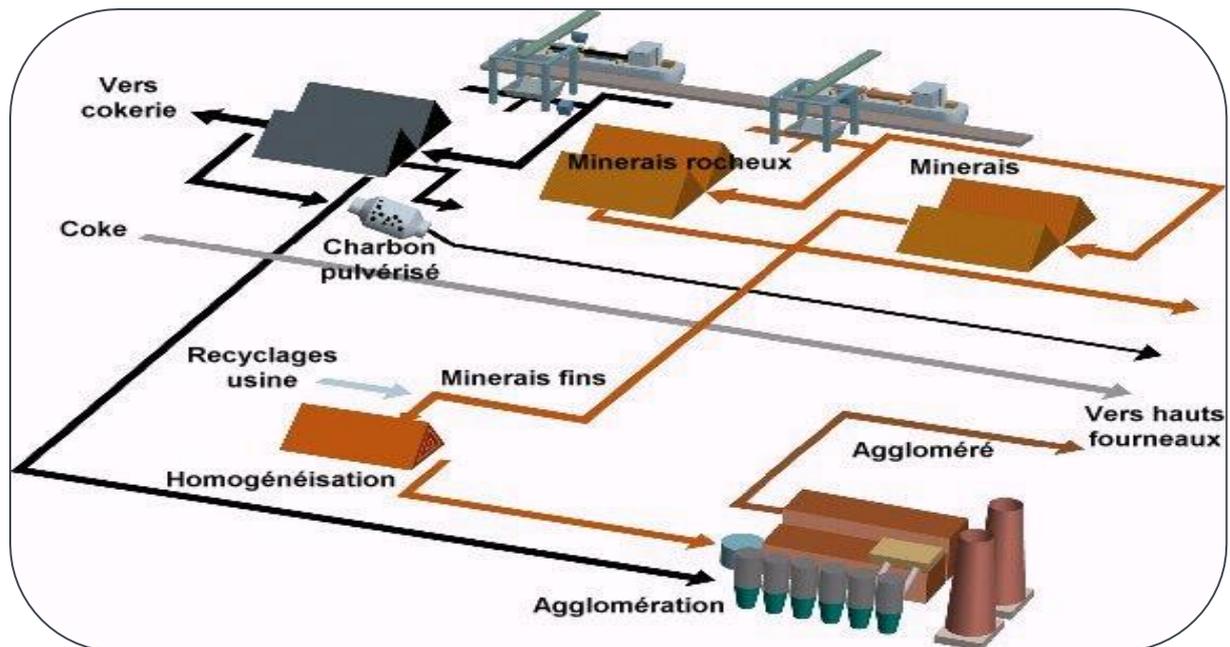


Figure 0-4 : L'ensemble des installations regroupées dans la division PMA

7.2. Le secteur agglomération

Deux agglomérations sont installées dans le complexe SIDER EL-HADJAR :

7.2.1. Description des installations du procédé d'agglomération

L'agglomération est chargée de la manutention et du traitement des matières destinées à l'alimentation des hauts fourneaux pour la fabrication de la fonte, elle reçoit le minerai de la PM, le coke de la cokerie.

• **Mélangeur**

Chaque silo de stockage déverse dans un extracteur, un doseur pour le réglage du débit désiré. La quantité déversée sera transportée à l'aide des transporteurs à bandes et qui la déversent dans le mélangeur.

Deux rampes d'arrosage travaillent simultanément assure au mélange un apport d'eau de (9 à 11%). Lorsque le produit est bien mélangé, il est orienté ensuite du répartiteur de charge

• **Répartiteur**

ANNEXE

Le répartiteur à tambour dépose d'une façon uniforme le mélange sur les barreaux de grille des chariots de la chaîne d'agglomération, cette couche du mélange d'environ 200 mm d'épaisseur est étalée uniformément sur toute la surface du chariot.

- **Hotte d'allumage**

Au fur et à mesure que la chaîne se déplace, elle passe sous la hotte d'allumage où la couche superficielle sera grillée pendant deux minutes environ, par 18 brûleurs alimentés par gaz naturel, la température est de 1200°C.

Pour permettre à toute la pâte d'être cuite on a placé 15 boîtes à vent, reliées à deux ventilateurs (aspirateurs) de la couche supérieure vers la couche inférieure. Le front de flamme se déplace selon une courbe caractéristique décroissante. De façon qu'à la fin du front, tout le gâteau sera proportionnellement cuit.

Dans le front de flamme, où la température s'élève à 1250-1350° c (moyenne), les petits grains subissent une fusion complète tandis que les plus gros ne fondent qu'à la surface.

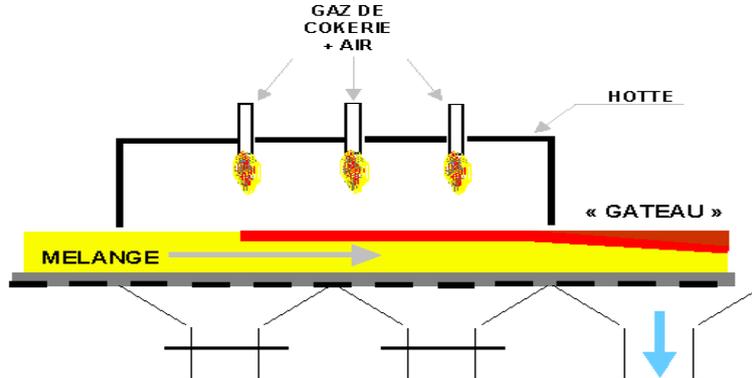


Figure 5 : La chaîne de minerais sous la hotte d'allumage

La formation de l'aggloméré résulte des processus chimiques et physiques se produisant en température élevées. Dans la première étape il y a lieu une déshydratation et décomposition des carbonates ainsi que des oxydes de fer supérieurs.

Dans la seconde étape les fines de coke brûlent, la décomposition des carbonates s'achève, le Fe_3O_4 se réduit en FeO et une part de composants se transforme en phase liquide.

Dans la troisième étape, suite au refroidissement de l'aggloméré sur la chaîne, il se produit une cristallisation de nouveaux composants minéraux.

7.2.2. Les étapes de l'agglomération sur grille

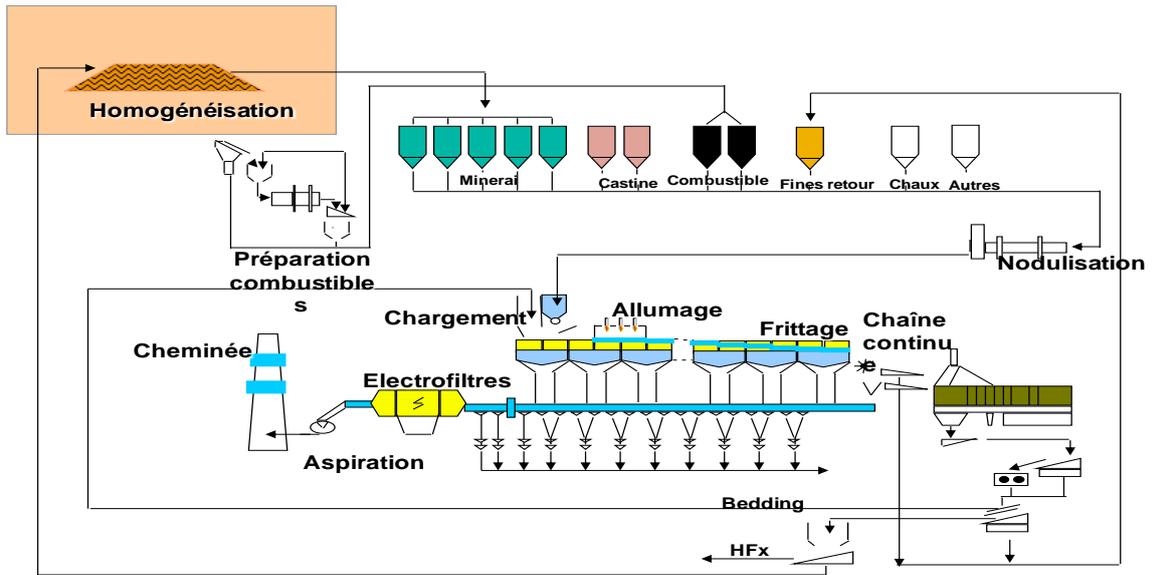


Figure 6 : Les étapes de l'agglomération sur grille