



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



N° d'ordre : M2...../GC/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Thème

**Simulation de la dispersion des polluants
atmosphériques dans la zone industrielle
pétrochimique d'Arzew**

Présenté par :

MAHAMAT Hissein Haroun

Soutenu le 28/06/2020 devant le jury composé de :

Président :	Pr. MEROUANI Djilali Redha	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. BENSALAH Farhate	MAA	Université de Sidi-Bel-Abbès
Rapporteur :	Dr. AGUEDAL Hakim	MCB	Université de Mostaganem
Co-Rapporteur :	Mr. HOUDA Lakhdar	Doctorant	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Grace soit rendue à ALLAH seul, que nulle expression ne saurait glorifier ou dénombrer les bienfaits ou lui rendre l'hommage requis.

Je tiens à remercier le Docteur AGUEDAL Hakim, d'avoir accepté de diriger ce mémoire, et qui n'a pas cessé de m'encourager et de m'aider dans l'apprentissage et la maîtrise de tous les outils nécessaires demandés dans ce travail. La réalisation de ce travail aurait été impossible sans son soutien et sans aspect moral et affectif.

Monsieur HOUDA Lakhdar trouve également mes remerciements d'avoir co-dirigé ce travail.

Je remercie les membres de Jury le Professeur MEROUANI Djilali Redha, de m'avoir fait le grand honneur de présider le jury, et Monsieur BENSALAH Farhate d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Merci pour votre temps et votre disponibilité.

Je remercie également Monsieur MAHIDDINI Abderrahman pour son entière collaboration et sa vive contribution en nous fournissant la documentation nécessaire et les données expérimentales.

J'aimerais remercier le Professeur BENTOUAMI Abdelhadi, directeur du Laboratoire Valorisation des Matériaux « LVM », de m'avoir autorisé d'accéder au laboratoire. Mes remerciements vont également Madame DAOUD Meriem, Ingénieur au laboratoire de Valorisation des Matériaux de l'université Abdelhamid Ibn Badis- Mostaganem pour tous les moyens matériels qui m'ont été mis à ma disposition. Sans oublier tous le staff du laboratoire « LVM » par leur esprit familial.

Je tiens à remercier mes amis, mes collègues algériens et toute la communauté des Etudiants et Stagiaires Etrangers de Mostaganem et plus particulièrement mon frère IBRAHIM SALEH WORAK d'Erythrée pour m'avoir tant appris sur la confiance.

Enfin, mes sincères remerciements vont à l'endroit de mes très chers parents pour leur encouragement et leur soutien durant toute mon cursus universitaire et surtout de m'avoir aidé dans les moments les plus difficiles.

Ma gratitude va à toute ma famille.

Résumé

La dispersion atmosphérique représente une menace pour la santé humaine et l'environnement particulièrement dans les zones situées aux voisinage des parcs industriels. Les polluants provenant des déchets industriels, tels que le charbon pulvérisé et les cendres volantes rejetées par les centrales électriques et les industries pétrochimiques, sont les principaux types de sources de pollution atmosphérique.

Afin de prévenir cette menace, l'étude de la dispersion de ces polluants se révèle très important, néanmoins, celle-ci demande la réalisation d'une maquette dans la majorité des cas ou une simulation numérique.

Aujourd'hui en Algérie on observe une augmentation de la construction de diverses unités industrielles qui pourraient probablement générer une pollution atmosphérique. C'est ainsi que les rejets gazeux de l'usine de liquéfaction du gaz naturel (GNL3/Z) ont retenu notre attention. Cette étude nécessite une connaissance approfondie des conditions climatiques (la direction du vent, la vitesse du vent et la moyenne des températures) de la zone industrielle pétrochimique d'Arzew, région dans laquelle l'étude a été menée.

Mots clés : Pollution, Dispersion atmosphérique, CO₂, GNL3/Z, CFD.

Abstract:

Atmospheric dispersion represents a threat to human health and to the environment, particularly in areas located around industrial parks. Pollutants from industrial wastes, such as pulverized coal and fly ash released from power plants and petrochemical industries, are the main types of air pollution sources.

In order to prevent this threat, the study of dispersion of these pollutants is very important, however, it requires the realization of a reduced model in most cases or numerical simulation.

Today in Algeria there is an increase in the construction of various industrial units which could probably generate air pollution. This is how the gaseous emissions from the natural gas liquefaction plant (NGL 3/Z) caught our attention. This study requires a depth knowledge of the climatic conditions (wind direction, wind speed and average temperature) of the industrial zone petrochemical of Arzew, region in which the study was conducted.

Keywords: Pollution, Atmospheric dispersion, CO₂, NGL3/Z, CFD.

Sommaire

Remerciements	I
Introduction générale	1
CHAPITRE I : POLLUTION ATMOSPHERIQUE.....	4
1. Pollution atmosphérique	5
1.1. Définition.....	5
1.2. Historique de la pollution	6
1.3. La pollution atmosphérique en Algérie	6
2. Les polluants dans l’atmosphère.....	8
2.1. Composition chimique de l’atmosphère	8
2.2. Les polluants atmosphériques	9
3. Sources de pollution	11
3.1. Les émissions naturelles	11
3.2. Les émissions industrielles	11
3.3. Les émissions d’origine agricole	12
3.4. Les émissions domestiques.....	12
3.5. Les émissions dues aux transports	12
4. Les conséquences de la pollution atmosphérique.....	12
4.1. Les effets sur l’environnement.....	12
4.2. Les effets sur la santé	13
5. Problématique de la pollution atmosphérique	14
5.1. La place de la modélisation.....	14
5.2. Aide à la décision.....	14
5.3. Prévision	15
Conclusion.....	15

CHAPITRE II : LA COUCHE LIMITE DE L'ATMOSPHERE	16
1. Généralités sur l'atmosphère	17
2. La couche limite atmosphérique.....	18
2.1. Caractéristiques de la Couche Limite Atmosphérique.....	18
2.3. Turbulence dans la couche limite atmosphérique	19
2.4. Mouvement de l'air atmosphérique	21
2.5. Etats de la couche limite atmosphérique.....	22
3. Equations de la dispersion atmosphérique.....	22
CHAPITRE III : COMPLEXE GNL3/Z ET METEOROLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE	24
1. Situation géographique du complexe GNL3/Z.....	25
1.1. Description du site	26
1.2. Principe de conception et de fonctionnement	26
1.3. Vue d'Ensemble du Procédé.....	29
2. Conditions météorologiques de la zone d'étude.....	32
2.1. Les températures moyennes.....	32
2.2. La vitesse du vent.....	33
2.3. La direction du vent	34
CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION DE LA DISPERSION	
ATMOSPHERIQUE	36
1. Codes de calcul CFD « Ansys CFX 14.5 »	37
2. Domaine d'étude, maillage et conditions aux limites.....	37
3. Résultats de simulation.....	40
3.1. Profile de vitesse du vent	40
3.2. Distribution de la fraction massique de CO ₂	41
3.3. Distribution de la température	43
3.4. Isosurfaces et validation du modèle de simulation	43

Conclusion générale	46
Références bibliographiques	47

Introduction générale

L'environnement est l'ensemble des éléments naturels et culturels. La culture humaine en rupture avec l'environnement naturel résulte la pollution globale et locale planétaire. La planète bleu appelée Terre est une sphère très particulière. Tous les organismes vivants qui l'habitent se trouvent à l'intérieur d'une mince couche composée d'air, d'eau et de terre d'environ 15 kilomètres d'épaisseur, qu'on appelle biosphère. La biosphère peut être divisée en trois couches : l'atmosphère (l'air), l'hydrosphère (l'eau) et la lithosphère (le sol).

Toutefois, c'est l'atmosphère, à cause de ses caractéristiques particulières, qui rend la planète habitable par les êtres humains, les animaux et les plantes tels qu'on les connaît. S'il y a de la vie sur Terre, c'est grâce à l'atmosphère qui, malgré sa fragilité, lui sert de bouclier. Or, les activités humaines peuvent affaiblir ce bouclier. L'atmosphère protège la Terre ; nous devons protéger l'atmosphère [1].

Cependant, les activités d'origine anthropiques et naturelles portent préjudice à ce dernier et par conséquent causent un déséquilibre au sein de notre planète. Les rejets de ces activités sont réunis sous le vocable pollution atmosphérique.

La pollution atmosphérique est devenue l'une des principales menaces pour la santé humaine et l'environnement, en particulier dans les régions entourant les parcs industriels. Les polluants des déchets industriels, tels que le charbon pulvérisé et les cendres volantes rejetées par les centrales électriques et les usines pétrochimiques, sont les principaux types de sources de polluants atmosphériques. La dispersion des polluants particuliers est fortement influencée par le relief et l'environnement autour de la source de pollution. Cependant, les détails et le mécanisme de la façon dont ces facteurs affectent la dispersion des polluants restent mal connus. En conséquence, il est de plus en plus important d'étudier la dispersion des polluants à l'intérieur d'un parc industriel pour protéger la santé humaine dans les régions au voisinage du parc [2]. Aujourd'hui en Algérie nous observons un accroissement de construction des unités industrielles aussi divers les unes des autres et qui génèrent par conséquent une très grande pollution atmosphérique. C'est ainsi que les rejets gazeux du complexe GNL3/Z ont attiré toute notre attention.

La modélisation numérique présente a priori certains avantages par rapport aux techniques physiques que sont les essais in situ ou à échelle réduite tels que la rapidité de l'étude et la possibilité d'envisager un grand nombre de situations. Ces modèles numériques de dispersion peuvent se ranger par ordre de complexité croissante en trois principales familles : les modèles gaussiens, les modèles intégraux et les modèles de la dynamique des fluides computationnelle CFD (Computational Fluid Dynamics). Les premiers modèles de dispersion utilisés de type Gaussien. Leur origine remonte aux travaux de Sutton (1932), de Pasquill (1961, 1974), de Gifford (1961, 1968) et en France, de Le Quinio (1964, 1975) et de Doury (1977, 1986) [3]. Ces sont des modèles estimatifs de la dispersion des gaz neutres ou passifs (de masse volumique très proche de celle de l'air). Cette limitation s'est vite avérée inacceptable pour un bon nombre d'études faisant intervenir des gaz dont la masse volumique était sensiblement plus importante que celle de l'air. Van Ulden reprit en 1974, une méthodologie déjà existante et créa le premier modèle de type intégral appliqué à la dispersion des gaz lourds.

Globalement, les deux premiers types d'outils s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. Les temps de calcul sont courts, de l'ordre de la minute. Comparé aux deux anciennes méthodes, la CFD est plus pratique et a des coûts inférieurs en termes de main-d'œuvre et de ressources matérielles. Elle résout directement le système d'équation décrivant les mécanismes physiques de la dispersion. Les temps de calcul sont plus longs, de l'ordre de l'heure, voire de la journée. De plus, la distribution détaillée des champs éoliens et des concentrations de polluants peut être obtenue par CFD. Par conséquent, la CFD a été largement utilisé pour étudier la dispersion des polluants à l'intérieur des parcs industriels. L'augmentation et la démocratisation croissante des moyens de calcul ont permis d'envisager et de résoudre directement le système d'équations qui régit réellement la dispersion du nuage. C'est ainsi que sont apparus depuis la fin des années 70, les modèles tridimensionnels permettant de simuler le comportement des nuages de gaz plus lourds que l'air. Un domaine d'application maintenant en développement est l'intégration de ces outils dans des systèmes de surveillance et de prévision en temps réel.

Dans cette étude, un modèle de terrain réel du complexe GNL3/Z a été construit pour étudier le transport des polluant et la dispersion du panache des gaz torchés dans la couche limite atmosphérique sous l'effet du vent et des conditions météorologiques instables. Ce phénomène est très complexe à analyser de par les différents phénomènes physiques couplés qui interviennent dans ce processus :

- la structure thermique de l'atmosphère qui conditionne selon la verticale son équilibre dynamique ;
- la topographie et l'urbanisation du domaine d'étude qui vont influencer l'écoulement au niveau du sol
- la turbulence de l'écoulement qui va directement influencer le mélange des polluants.

Le présent travail est structuré en 04 chapitres :

- ✓ Le premier chapitre présente la pollution atmosphérique en général et son historique, les polluants atmosphériques et leurs différentes sources et les conséquences engendrées par la pollution atmosphérique.
- ✓ Le deuxième chapitre est dédié à la couche limite atmosphérique et de ses différents aspects, ainsi englobe toutes les équations et les formules utilisés dans la simulation numérique de la dispersion atmosphérique
- ✓ Le troisième chapitre représente un aperçu général sur le complexe GNL3/Z, et la météorologie de la zone d'étude.
- ✓ Le quatrième chapitre présente tous les résultats de calcul obtenu au cours de cette étude et leurs discussions.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale.

CHAPITRE I : POLLUTION ATMOSPHERIQUE

CHAPITRE I : POLLUTION ATMOSPHERIQUE

1. Pollution atmosphérique

Ce chapitre présente un bref aperçu de la problématique de la pollution atmosphérique. Après avoir défini la notion de pollution de l'air, on présentera les différentes sources d'émissions ainsi que les principaux polluants soumis à des mesures de restriction par les différentes législations en vigueur. Cela nous permettra par la suite d'aborder certains aspects liés à la problématique de la pollution industrielle et de voir comment la modélisation peut, dans certains cas, faciliter le respect de ces mesures imposées par les instances politiques.

1.1. Définition

La pollution atmosphérique est un phénomène complexe, qui a fait l'objet de multiples définitions. Au fur et à mesure de l'avancée des connaissances, le terme pollution a recouvert des réalités de plus en plus diverses.

De manière générale, la pollution de l'air se définit par les conséquences qu'elle entraîne, allant du simple gêne olfactif à la nocivité mortelle. Selon certaines instances, la notion de pollution correspond uniquement aux conséquences de l'activité humaine, alors que d'autres incluent la pollution d'origine naturelle (volcanisme, feux de forêts, ...).

La définition du Conseil de l'Europe (Mars 1968) résume ces différentes nuances : Il y a pollution atmosphérique lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses composants est susceptible de provoquer un effet nocif, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, ou de créer une nuisance ou une gêne [4].

D'après le journal officiel de la République Algérienne N°43 du 20 Juillet 2003, constitue une pollution atmosphérique au sens de la présente loi, l'introduction, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances de nature à :

- Mettre en danger la santé humaine ;
- Influencer sur les changements climatiques ou appauvrir la couche d'ozone ;
- Nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes ;
- Compromettre la sécurité publique ;
- Incommoder la population ;

- Provoquer des nuisances olfactives ;
- Nuire à la production agricole et aux produits agro-alimentaires ;
- Altérer les constructions et porter atteinte au caractère des sites ;
- Détériorer les biens matériels.

1.2. Historique de la pollution

Si les émissions d'origine naturelle remontent à la création de la terre, la pollution proprement dite apparaît avec la naissance de l'homme qui ressent cette pollution. La maîtrise du feu par les premiers hommes constitue le début de la pollution de l'air d'origine anthropique. Sous l'Antiquité, plusieurs auteurs comme Hippocrate ou Sénèque font mention des nuisances atmosphériques.

Au Moyen-Age, la qualité sanitaire de l'air n'était pas une priorité. Les premières mesures sont prises en Angleterre pour limiter la pollution de l'air due au charbon. La révolution industrielle du XIX^{ème} siècle et l'exode rural ont contribué à rassembler de plus en plus d'habitants dans des agglomérations urbaines de plus en plus polluées. Cette évolution a conduit à des situations extrêmes, comme la catastrophe due aux fumées de charbon qui est survenue à Londres en 1952 et qui causa le décès de plus de 4000 personnes.

Cette dégradation de la situation s'est accompagnée d'une prise de conscience par la population de l'importance de l'écologie et de l'environnement et un corpus réglementaire s'est développé peu à peu à partir de la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui. C'est ainsi par exemple que la croissance du smog de Los Angeles a conduit à la création du premier réseau de surveillance en 1947. La constitution de ces réseaux de mesures, mais aussi l'établissement de seuils de pollution à ne pas dépasser ou les normes sur les carburants, sont autant de conséquences de cette prise de conscience [5].

1.3. La pollution atmosphérique en Algérie

Après l'accession de l'Algérie à l'indépendance, le pays a connu le développement économique et social, qui ont été suffisants pour troubler l'équilibre entre l'algérien et son patrimoine vital.

Au début des années soixante-dix, le problème de pollution a été posé avec le démarrage des grandes unités industrielles. L'industrie était de loin la principale source de pollution.

Le gouvernement algérien, après la première conférence mondiale sur l'environnement à Stockholm en 1972, a pris conscience de la nécessité d'intégrer la dimension environnementale

dans la démarche de planification du développement et l'utilisation durable des ressources naturelles du pays.

L'Algérie a pleinement contribué pour orienter le développement dans une perspective durable à la suite du sommet de Rio en 1992. Ces efforts ont permis de réduire de façon considérable la concentration en dioxyde de soufre (SO₂), principal polluant à l'époque, simultanément, le secteur des transports s'est largement développé.

Dans sa stratégie de lutte contre la pollution de l'air, le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a inscrit cette dernière dans la liste de ses priorités.

La pollution atmosphérique, dans bon nombre d'agglomérations algérienne, a désormais pour origine majeure les transports routiers.

La Loi N°43 du 20 Juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable consacre des dispositions spéciales à la pollution de l'air que nous respirons. Elle stipule :

- Que les industries polluantes doivent prendre toutes les dispositions nécessaires pour réduire ou supprimer leurs émissions ;
- Que l'état doit définir les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité pour l'air ainsi que les dispositifs de surveillance de l'atmosphère.

Pour être en conformité avec les objectifs réglementaires définis, il était nécessaire de mettre en place des réseaux de mesures de surveillance de la qualité de l'air «SAMASAFIA», au niveau des agglomérations d'Alger et d'Annaba depuis Avril 2002. Ces réseaux ont pour rôle :

- Surveiller en continu les niveaux de pollution atmosphérique en zones urbaines ;
- Détecter les pics de pollution et les périodes durant lesquelles les seuils limites sont dépassés ;
- Etablir des prévisions de qualité de l'air en utilisant des modèles de simulation ;
- Informer les populations des mesures pour minimiser les impacts sur la santé ;
- Programmer et mettre en œuvre les mesures requises pour améliorer la qualité de l'air à moyen terme.

2. Les polluants dans l'atmosphère

2.1. Composition chimique de l'atmosphère

L'atmosphère représente la couche gazeuse qui constitue l'enveloppe du corps céleste. L'atmosphère terrestre correspond à une couche d'air dont l'épaisseur est de l'ordre de 500km, alors que le rayon de la terre est de 6730 km [6].

Les propriétés de l'atmosphère influencent la dispersion d'un produit. Du point de vue de la composition chimique on a l'habitude de considérer que l'air atmosphérique se compose d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau dont le rôle est très important en météorologie. On peut classer ce mélange en deux catégories :

- a. Les constituants permanents qui sont toujours présents dans l'air, et ce en proportions fixes.
- b. Les constituants variables présents en proportions variables avec le temps et avec le lieu.

Tableau 1 : Composition de l'air [6].

Constituants	
Constituants permanents (l'air pur sec)	Constituants variables
Gaz principaux	Eau (extérieur) (H ₂ O)
Azotes (N ₂)	Dioxyde de carbone (CO ₂)
Oxygène (O ₂)	
Argon (Ar)	
Dioxyde de Carbone (CO ₂)	
Gaz traces	Dioxyde de soufre (SO ₂)
Néon (Ne)	Ozone (O ₃)
Hélium (He)	
Krypton (Kr)	
Xénon (Xe)	
Hydrogène (H ₂)	
Méthane (CH ₄)	
Monoxyde d'azote (N ₂ O)	
	Dioxyde d'azote (NO ₂)

On estime que 99% de la masse d'air atmosphérique se situe entre le niveau du sol et l'altitude de 40 km. Les phénomènes météorologiques courants dans cette tranche sont qualifiés d'atmosphère météorologique.

2.2. Les polluants atmosphériques

La nature des substances rejetées peut se trouver sous la forme :

- D'un gaz ;
- D'un liquide ;
- D'un gaz liquéfié.

Les pollutions atmosphériques se distinguent selon les espèces considérées. Parmi les polluants, nous recensons :

- Les oxydes d'azote (NO_2 et NO) : Gaz très irritants recouvrent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2) dérive de l'oxydation du monoxyde d'azote. Comme le monoxyde d'azote s'oxyde facilement en dioxyde d'azote, toutes les émissions sont exprimées sous la forme de dioxyde d'azote.

Source : véhicules à moteur (trafic routier) consommation de carburants et de combustible, particulièrement à des températures élevées.

- Monoxyde de carbone (CO) : C'est un gaz toxique inodore et incolore. C'est l'aéropolluant le plus fréquent dans la pollution atmosphérique. Heureusement, il ne persiste pas dans l'atmosphère ; il se transforme naturellement par un processus inconnu en CO_2 .

Source : Combustion incomplète de carburants et de combustibles

- Dioxyde de carbone CO_2 : aussi appelé gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé inorganique. Il se présente, sous les conditions normales de pression et de température, comme un gaz incolore, inodore, à la saveur piquante.

Source : la combustion de pétrole, de charbon et de gaz, ainsi que la déforestation.

- Dioxyde de soufre (SO_2) : Gaz très irritant.

Source : Le dioxyde de soufre provient principalement de la combustion des combustibles fossiles (charbon, fioul...), au cours de laquelle les impuretés soufrées contenues dans les combustibles sont oxydées par l'oxygène de l'air O_2 en dioxyde de soufre SO_2 .

Il est le résultat de rejet de plusieurs petites sources (installations de chauffage domestique, véhicules à moteur diesel...) et par des sources ponctuelles plus importantes (centrales de production électrique ou de vapeur, chaufferies urbaines...). Il existe des procédés industriels qui émettent également des effluents soufrés (production d'acide sulfurique, raffinage de pétrole, métallurgie des métaux non ferreux...).

- Ozone (O_3) : C'est la forme toxique de l'oxygène (O_2) pur et le principal composant du smog des grandes métropoles. Contrairement aux autres polluants, l'ozone n'est pas émis directement par une source particulière. L'ozone proche du sol est un polluant secondaire

qui se forme par réaction chimique dans la troposphère (basse altitude) à partir d'oxyde d'azote et de composés organique volatils sous l'action de la lumière du soleil.

Source : trafic automobile, industrie (polluant secondaire).

- Les particules en suspension constituent un ensemble très hétérogène, compte tenu de la diversité de leur composition, de leur état (liquide ou solide) et de leur taille (de 0,005 à 100 μm).

Alors que les grosses particules se déposent rapidement sous l'effet de leurs poids, cependant, les petites particules restent en suspension dans l'air, leur vitesse de chute résultant d'un équilibre entre l'action du champ de pesanteur terrestre ou de la force électrique qui agit sur elles et la résistance du milieu. Les particules de diamètre inférieur ou égal à 10 μm , appelées PM10, peuvent rester en suspension dans l'air pendant des jours, voire des semaines, et être transportées par les vents sur de très longues distances.

Si les émissions de particules ont baissé depuis quelques années, du fait du traitement des rejets industriels, du développement des chauffages à l'électricité et au gaz, et des centrales électriques nucléaires au détriment des centrales thermiques, la part du transport routier a fortement augmenté avec l'extension du parc des véhicules diesel, émetteurs notamment de particules fines de diamètre inférieur ou égal à 2,5 μm , appelées PM2,5.

Source : L'activité humaine émet des particules fines. Ces particules, constituées de cendres, de composés organiques, de métaux..., proviennent de la combustion de combustibles fossiles, de l'essence et du gazole (transport, installations de chauffage, industries, usines d'incinération des ordures ménagères, centrales thermiques...), ainsi que du revêtement des routes et des chantiers de construction.

- Composés Organique Volatiles (COV) Molécules constituées principalement d'atomes de carbones et d'hydrogène. Ils sont multiples et s'évaporent relativement facilement. Ils ne comprennent pas le méthane et les CFC.

Source : Evaporation des solvants (dans les peintures, les encres, les produits de nettoyage et de vitrification des sols, etc.), de carburants (lors du transvasement de produits pétroliers ou d'hydrocarbure pour les véhicules à moteur) et lors de la combustion incomplète.

Tableau 2 : Les valeurs limites admissibles d'émissions de polluants en Algérie (Source : Le Décret 06-02 du 07/01/ 2006).

Polluants	Valeurs limites (Base moyenne horaire)	Objectifs de qualité	Seuils d'alerte
NO ₂	200 microgr/Nm ³ (centile 98)	135	600 microgr/Nm ³
SO ₂	350 microgr/Nm ³ (centile 99,9)	150	600 microgr/Nm ³
O ₃	200 microgr/Nm ³ (moy. Annuelle)	110	360 microgr/Nm ³)
PM10	80 microgr/Nm ³ (moy. Annuelle)	50	/

La teneur d'un polluant dans l'air en un endroit donné est définie par la concentration des polluants. On l'exprime généralement sous la forme d'un rapport entre le poids du polluant et le poids de l'air dans un volume donné, et l'unité consacrée est alors le ppb (partie par billion), ou sous la forme d'une concentration massique classique, en microgramme par mètre cube ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3. Sources de pollution

Suivant la manière dont elles polluent l'environnement, les sources de pollution peuvent être soit d'origine naturelle soit d'origine anthropique.

Les principales sources de pollution atmosphérique sont [2] :

3.1. Les émissions naturelles

Certains polluants atmosphériques sont d'origine naturelle. Ce sont essentiellement le dioxyde de soufre (SO₂), le dioxyde d'azote (NO₂) et les cendres. Ces composés proviennent principalement des éruptions volcaniques, des décompositions organiques, des feux de forêt, ainsi que des océans. D'autres sources naturelles de pollution des végétaux, dont leur cycle de vie produit de nombreux composés toxiques (H₂S, CH₄, COV).

3.2. Les émissions industrielles

L'industrie est à l'origine des émissions spécifiques dues aux processus de traitement ou de fabrication employés. En quantités variables, selon les secteurs industriels, elle est émettrice de monoxyde et de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre (SO₂), d'oxyde d'azote (NO_x), de poussières, de composés organiques volatils (COV).

3.3. Les émissions d'origine agricole

Le développement de l'agriculture intensive contribue à la pollution atmosphérique. Ses émissions (essentiellement l'ammoniac (NH_3), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), le monoxyde de carbone (CO) et les pesticides) sont liées à la décomposition des matières organiques, aux animaux d'élevage et à l'utilisation massive d'engrais et de pesticides.

3.4. Les émissions domestiques

Au niveau individuel ou tertiaire (chauffage des logements ou des bureaux), la combustion de carburants fossiles (charbon, fioul lourd, etc.) produit d'importantes émissions polluantes. Le dioxyde de carbone (CO_2), produit inévitable de la combustion de matières organiques et dont la concentration croissante dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre, le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azotes (NO_x), les poussières, les métaux lourds, etc. sont concernés.

3.5. Les émissions dues aux transports

La pollution due aux transports est essentiellement perçue dans les villes en raison de la densité du trafic. La contribution des transports à la pollution ne cesse de s'accroître du fait de l'augmentation du trafic directement liée à l'activité économique.

4. Les conséquences de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est également déterminée par ses conséquences. Nous distinguerons les effets sur l'environnement et les effets sur la santé humaine.

4.1. Les effets sur l'environnement

Les équilibres climatiques : La pollution atmosphérique agit directement sur la composition de l'atmosphère, localement ou globalement. De faibles variations de cette composition peuvent causer une disproportion du système climatique, dont les exemples les plus connus sont l'effet de serre ou la destruction de la couche d'ozone. Il est cependant souvent difficile, à notre échelle de temps, de distinguer les agitations climatiques naturelles de celles provoquées par des sources anthropiques.

- Les effets sur la faune et la flore : La présence dans l'air de substances toxiques perturbe la faune et la flore. Le lessivage des composés acides par les précipitations permet un transfert de la pollution atmosphérique vers une pollution des eaux ou des sols. Ainsi, des pluies acides ont gravement affecté de nombreuses forêts et lacs du nord de l'Europe. De plus, ces

polluants sont capables de se retrouver dans l'eau de boisson et dans les chaînes alimentaires (ex. de la dioxine). L'effet de la pollution sur certaines plantes, comme le tabac, est d'ailleurs utilisé comme un bioindicateur de la pollution de l'air.

- Les effets sur les bâtiments : Les retombées acides dégradent de nombreux matériaux, en particulier les roches calcaires utilisées dans la construction des bâtiments ou des monuments, qui sont dissoutes par les pluies acides. A cette dégradation irrémédiable viennent s'ajouter les salissures provoquées par le dépôt des particules en suspension dans l'air, qui produisent des coûts de ravalement et de restauration très importants.

4.2. Les effets sur la santé

Si l'homme est affecté psychologiquement par les effets de la pollution atmosphérique sur son environnement, son organisme est également directement sensible à cette pollution, sachant déjà qu'un adulte inhale en moyenne 11 m³ d'air par jour.

Les polluants présents dans l'air affectent la santé à court et à long terme. A court terme, ils agissent souvent comme des facteurs déclenchants ou aggravants pour des personnes fragiles. En provoquant une irritation des poumons et une diminution de la fonction respiratoire, la pollution à court terme touche surtout des personnes à risques comme les enfants, les personnes âgées, les asthmatiques, ... etc.

Les effets à long terme de la pollution sont beaucoup plus difficiles à évaluer. Il semblerait que les particules aggravent le risque de cancer des poumons. Le monoxyde de carbone occasionne des maladies psychiques et amplifie les maladies cardio-vasculaires. La pollution atmosphérique aurait également tendance à diminuer l'espérance de vie [7]. L'impact de la pollution sur la santé dépend donc de la nature des polluants, du type de personnes impliquées mais également de la dose reçue par l'organisme. Les facteurs agissant sur cette dose sont la concentration en polluant, la durée d'exposition et l'activité physique.

Les effets de la pollution sur la santé représentent un coût important pour la société. Les consultations médicales pour asthme augmentent de 30 % lors des pics de pollution. En France, on évalue à 8000 le nombre de décès prématurés causés par la pollution atmosphérique. A Lyon, la part de la mortalité cardio-vasculaire attribuable à la pollution par le dioxyde de soufre a été estimée à 6,6 % au cours de la période 1985-90, contre 2,2 % en région parisienne [7].

5. Problématique de la pollution atmosphérique

Les polluants industriels sont responsables d'une pollution de proximité qui affecte la santé des populations lors des pics de pollution, mais participe aussi à la dégradation du patrimoine bâti et entraîne le plus souvent des nuisances olfactives. A l'échelle régionale, les pluies acides sont causées par le transport et la transformation des substances oxydantes. L'émission des substances précurseurs de la pollution photochimique (oxydes d'azote, composés organiques, monoxyde de carbone) est également imputable en partie aux activités industrielles. Enfin comme d'autres activités humaines, l'industrie participe à l'effet de serre. Ainsi l'impact de la pollution industrielle sur l'environnement et plus précisément sur la pollution de l'air est loin d'être négligeable et la diminution des rejets est devenue depuis quelques années une priorité pour l'Union Européenne qui souhaite améliorer la qualité de l'air de manière significative en imposant des normes d'émissions aux industriels pour les principaux polluants.

5.1. La place de la modélisation

La modélisation de la dispersion atmosphérique occupe une place capitale dans la gestion de la pollution atmosphérique. En effet, elle permet le contrôle des émissions, la surveillance des sites et la gestion de crise en cas d'accident [5]. En outre, elle aide à mieux appréhender les phénomènes physiques mis en jeu et constitue un dispositif indispensable pour la conception et l'évaluation des moyens de lutte contre la pollution [8]. Elle intervient à plusieurs niveaux dans la problématique de la pollution industrielle :

5.2. Aide à la décision

Pour étudier les modifications causées par un changement des conditions d'un problème, la modélisation déterministe, une branche de la modélisation, s'avère être intéressante pour la prédiction de l'impact de l'ajout d'une source d'émission sur les sites industriels en utilisant les outils de la technologie moderne. En effet, elle aide les instances politiques et les industriels à faire le meilleur choix de compromis entre le volet économique et le volet environnemental d'un projet d'implantation d'une source d'émission de polluants en utilisant des tests de scénarios et la simulation [8]. Par ailleurs, elle permet de réaliser les simulations permettant de fixer la définition des objectifs et actions de réduction des émissions de polluant (INERIS). En outre, la modélisation estime la gravité de la pollution et évalue la part de contribution des différentes sources de polluant [6].

5.3. Prévision

Les modèles de prévision de la pollution atmosphérique fournissent des informations qui permettent de renseigner si le seuil d'émission de polluant est atteint ou pas. Cependant, ces méthodes sont limitées car leur capacité de prédictibilité ne peut pas dépasser une certaine distance (incapable de couvrir toute une ville) [6].

Conclusion

A travers le monde, la pollution atmosphérique est un sujet d'actualité au cœur des débats politiques. Ainsi, les dirigeants des différents pays ont mis sur pied des organisations (ou des plateformes) permettant de fixer des normes pour limiter les différents rejets anthropiques.

Par ailleurs, avec l'avènement et le développement des outils informatiques, la modélisation a vite servi de support aux mesures et décisions prises par les gouvernements pour la réduction des émissions.

CHAPITRE II : LA COUCHE LIMITE DE L'ATMOSPHERE

CHAPITRE II : LA COUCHE LIMITE DE L'ATMOSPHERE

1. Généralités sur l'atmosphère

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent le globe. Vue de l'espace, elle forme une fine couche de lumière bleu foncé sur l'horizon. L'atmosphère est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre. Elle s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais elle est confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au-dessus de la surface terrestre.

L'atmosphère, couramment appelé l'air, est un mélange gazeux, composé principalement de l'azote (79,09%), de l'oxygène (20,95%), l'argon (0,93%) et le dioxyde de carbone (0,03%). Les proportions de trois principaux composants sont presque invariables. Par contre, celle de dioxyde de carbone a augmenté de 30% depuis le XIXème siècle [6].

Par ailleurs, l'air contient des gaz rares et d'autres éléments d'origine naturelle en faibles quantités tels que : la poussière, le pollen et les spores [8].

Grace au profil vertical de température, l'atmosphère peut être stratifiée en plusieurs couches [8]:

- **La Troposphère** : Couche qui joue le rôle important dans la dispersion de polluants. Elle est la zone où se produit la plupart des phénomènes physiques et elle contient presque toute la quantité de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. La température décroît avec l'altitude à raison de 6,5°C par km. Elle s'étend jusqu'à 15 km d'altitude.
- **La Stratosphère** : C'est une zone située entre 15 km à 50 km d'altitude. Dans cette zone de l'atmosphère, la température croît avec l'altitude jusqu'à 0°C. Cette réaugmentation s'explique par l'absorption du rayonnement UV par la couche d'ozone.
- **La Mésosphère** : La température décroît avec l'altitude dans cette partie de l'atmosphère jusqu'à -80°C. Elle est considérée comme le point le plus froid de l'atmosphère du fait de la raréfaction de l'ozone et de l'oxygène. Elle se situe entre 50 à 80 km d'altitude.
- **La Thermosphère** : Elle se situe entre 80 à 350-800 km d'altitude. La température augmente au fur et à mesure que l'on avance en altitude dans cette zone.
- **L'Exosphère** : Elle est située entre 350-800 km d'altitude jusqu'à 50.0000 km d'altitude.

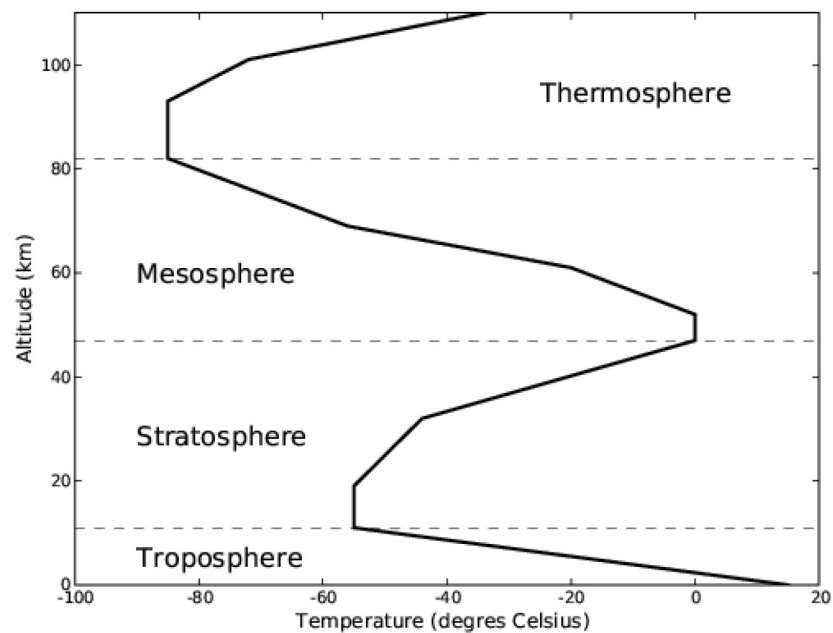


Figure 01 : Schéma structurel de l'atmosphère terrestre et son profil de température.

2. La couche limite atmosphérique

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) est définie comme la partie de la troposphère directement soumise à l'influence de la surface terrestre et donc du cycle diurne (alternance du jour et de la nuit). Son étude est donc cruciale pour la compréhension des épisodes de pollution car le problème de dispersion atmosphérique est exactement localisé à cette échelle.

2.1. Caractéristiques de la Couche Limite Atmosphérique

Cette couche, en interaction directe avec la terre, a une épaisseur variable comprise entre 100 m à 2000 m.

En effet, pour étudier la couche atmosphérique, on considère que sa structure est uniforme horizontalement et qu'elle peut être divisée en trois couches [9] :

- ✓ La couche de transition d'Ekman : c'est la région où la force de CORIOLIS (l'effet de rotation de la terre) et les forces de frottement sur le sol atteignent l'équilibre. L'épaisseur de la CLA (et donc de la Couche d'Ekman) dépend de l'intensité de la turbulence, du flux de chaleur, de l'humidité, de la quantité de mouvement, de la rugosité du terrain et des flux turbulents ;
- ✓ La couche limite de surface : c'est la partie la plus proche du sol. Elle représente le dixième de la hauteur de la couche limite atmosphérique. Dans cette zone, l'effet

de rotation de la terre est négligeable devant les flux turbulents de quantité de mouvement. Sur terrain plat et dans des conditions de stabilité neutre, le profil de vitesse du vent moyen suit une loi logarithmique. La distribution du vent dépend essentiellement de la stratification thermique de l'air et de la nature de la surface ;

- ✓ La canopée : c'est la région à l'intérieur de laquelle l'effet et les interactions de chaque obstacle sont identifiables (ils peuvent impacter la dispersion des polluants. La canopée est moins observée en milieu rural du fait de l'absence des obstacles (bâtiments). Cependant, elle est considérable dans le milieu urbain.

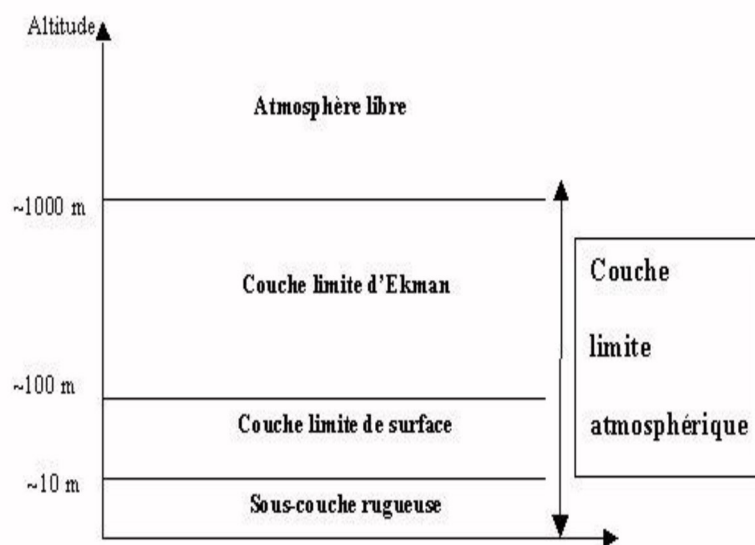


Figure 02 : Ecoulement dans la couche limite atmosphérique.

L'air considéré comme un fluide newtonien, son comportement est décrit par les équations de Navier-Stokes. Les caractéristiques de la couche limite atmosphérique dépendent de la nature de la surface, de la rugosité et de la stabilité thermique. Par ailleurs, l'air est traité comme un fluide incompressible lorsqu'il s'agit de simulation dans la couche de surface. La masse volumique de l'air change à cause de la variation de la température.

2.3. Turbulence dans la couche limite atmosphérique

Une caractérisation de la turbulence pour un écoulement est l'existence de mouvements balayant un large spectre d'échelles spatio-temporelles. L'énergie cinétique est transférée de grandes échelles vers les petites échelles. En effet, la turbulence dans la couche limite atmosphérique a deux (2) origines : une origine mécanique qui dépend des caractéristiques de la surface (relief, bâtiments et la végétation) et une origine thermique causée par le gradient de température obtenu par le réchauffement ou le refroidissement du sol par les rayons solaires.

Dans les codes de calcul CFD, le modèle k – e est le plus utilisé dans les simulations de la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Pour ce modèle Richards (1989) a proposé des profils verticaux pour la vitesse moyenne du vent U, l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation de la turbulence e dans la CLA qui sont basés sur le modèle de Harris et Deaves (1981).

Les équations du profil de vitesse, de l'énergie cinétique turbulente « k » et du taux de dissipation de la turbulence « e », obtenues à partir des équations de transport qui décrivent ce modèle, sont exprimées comme suit [10] :

$$U_z = \frac{U_*}{k} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad 01$$

$$k = \frac{U_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad 02$$

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{K.z} \quad 03$$

Avec :

U_z : la vitesse du vent en altitude Z

U_* : coefficient de friction,

k : constante de Von Karman (0,40-0,41),

Z : altitude (dénivellation)

Z_0 : hauteur de référence (longueur de rugosité aérodynamique)

C_μ : capacité thermique massique de l'air

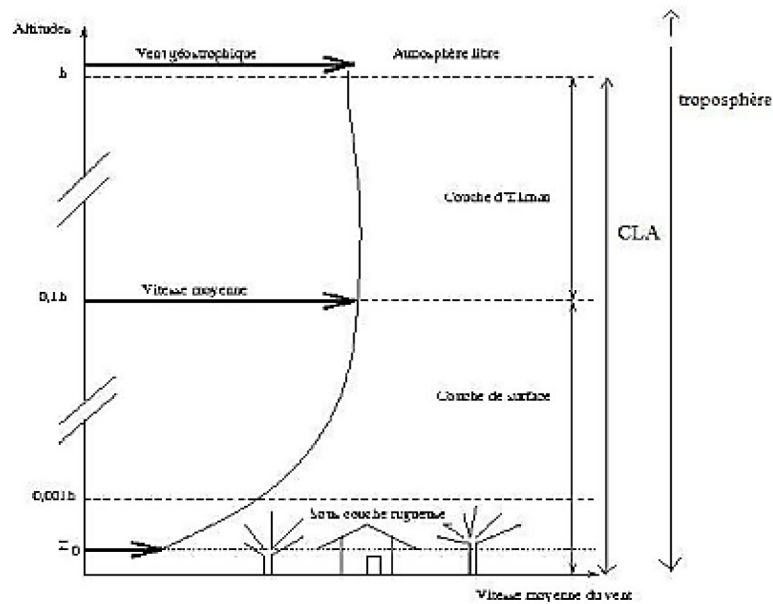


Figure 03 : Décomposition de la couche limite atmosphérique.

2.4. Mouvement de l'air atmosphérique

La circulation générale de l'air atmosphérique est le mouvement global de la couche d'air entourant la Terre. Il redistribue l'énergie du soleil qui a chauffé de manière inhomogène différentes régions de la planète. En effet, en raison de la forme ellipsoïdale de la Terre, le rayonnement solaire incident au sol varie d'un maximum dans les régions équatoriales à un minimum dans celles proches des pôles. Il en résulte un réchauffement différentiel entre les deux régions et c'est ce flux de chaleur 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 les trajectoires de ces masses d'air en altitude. La seconde est une force de friction qui se produit au contact du sol et ralentit le mouvement. L'influence relative de ces deux forces sur le mouvement de l'air atmosphérique permet de distinguer deux zones au sein de l'atmosphère [4] :

- L'atmosphère libre, la zone à partir de laquelle les effets du frottement de l'air à la surface de la Terre deviennent négligeables par rapport à ceux produits par le Force de Coriolis ;
- La couche limite atmosphérique, qui est située près du sol. Dans cette zone, le frottement devient progressivement plus important que la force de Coriolis.

2.5. Etats de la couche limite atmosphérique

Durant la journée, un gradient vertical de température se crée ; la vitesse du vent et l'intensité de la turbulence sont influencées par le changement de température.

Selon l'intensité de la turbulence, on distingue trois états de la couche limite atmosphérique : stable, neutre et instable [2].

- **Etat stable** : sous l'effet de refroidissement du sol, la couche limite atmosphérique devient thermiquement stable et par conséquent, la turbulence s'atténue. A cet état, il y a accumulation dans les basses couches de l'atmosphère. Cet état se produit souvent durant la nuit par le vent faible.
- **Etat neutre** : cet état se produit par un vent fort ou par un vent modéré et ciel couvert ; Il s'agit de la situation la plus fréquente en zone tempérée. Une couche résiduelle de stabilité neutre se forme. Cet état est rarement réalisé. Il se manifeste par fois au-dessus de la mer ou lorsque la couverture nuageuse est totale.
- **Etat instable** : pendant la journée, sous l'effet du réchauffement du sol par absorption du rayonnement solaire, une couche de mélange instable se forme et s'épaissit jusqu'à la fin de l'après-midi. La turbulence dans la couche de mélange est générée par les effets thermiques et le cisaillement du vent avec le sol.

3. Equations de la dispersion atmosphérique

Le système d'équations différentielles, qui définissent l'écoulement en régime instationnaire dans l'espace tridimensionnel du mélange de gaz, du transfert de l'énergie, de transport du gaz est régi par les quatre équations de conservation à savoir la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie et sont explicités par les équations (3), (4), (5) et l'équation d'advection-diffusion (6) suivantes [10] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial(\overline{\rho u_i' u_j'})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda + C_p \frac{\lambda_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_s)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_s}{\partial x_i} \right] + S_Y \quad (6)$$

Où Y_s est la fraction massique du mélange gazeux constituant, Sc_t est le Nombre de Schmidt turbulent, D est le coefficient de diffusion moléculaire, qui dépend de la composition du mélange, S_Y est le terme source qui détermine la génération du gaz d'impureté.

CHAPITRE III :
COMPLEXE GNL3/Z ET
METEOROLOGIE DE LA
ZONE D'ETUDE

CHAPITRE III : COMPLEXE GNL3/Z ET METEOROLOGIE DE LA ZONE D'ETUDE

1. Situation géographique du complexe GNL3/Z

Le site du complexe GNL3/Z se trouve sur la côte méditerranéenne à Berthioua, à l'Est d'Arzew, dans la zone du port industriel d'Arzew d'El Djedid ; son étendu est de 54,6 ha. Le complexe GP1Z se trouve à la limite Est du site, tandis que le complexe de désalinisation (KHARAMA) et le complexe GPL2/Z existante se trouvent à la limite Ouest. La mer méditerranée et la route du port se trouvent au Nord du site, alors que la route principale de la zone industrielle se trouve au Sud. Le site est accessible par une route de terre existante ; des installations marines existantes sont disponibles pour le Complexe GNL3/Z [11].

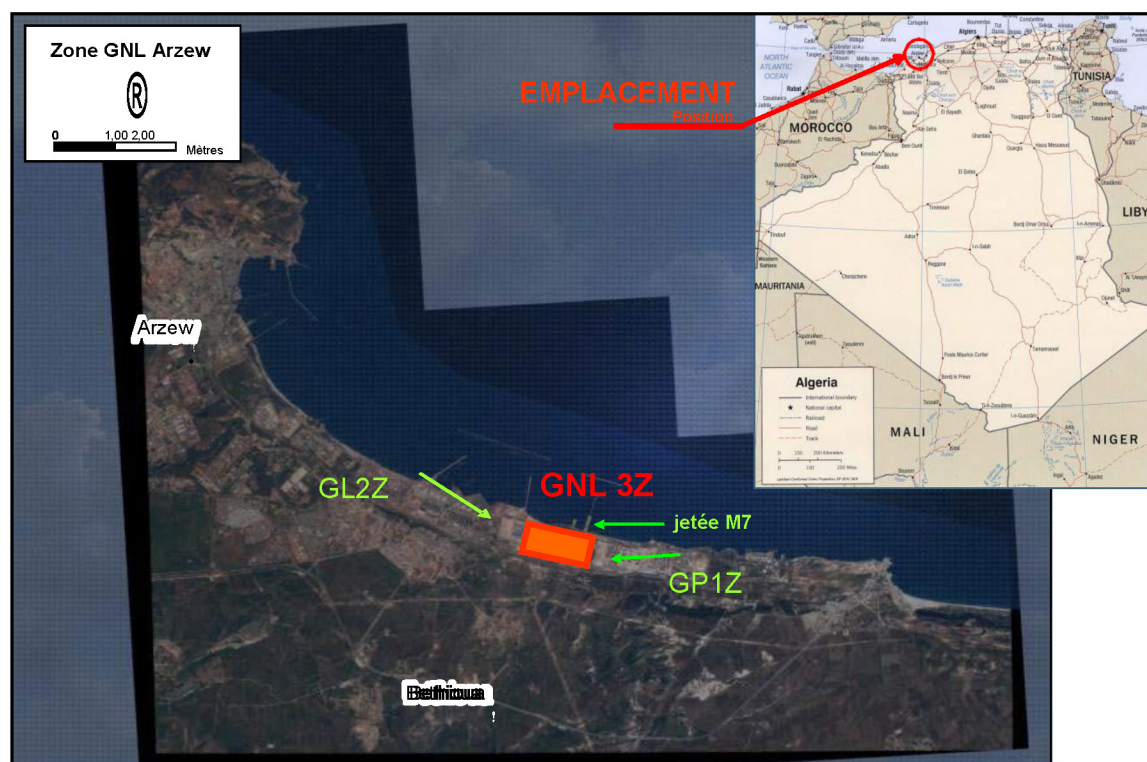


Figure 04 : Emplacement du Complexe GNL3/Z.

1.1. Description du site

Les installations du complexe GNL3/Z comprennent le Train de Procédé, toutes les utilités, le stockage des produits finis, les installations off-site liées, une jetée de GNL avec une plateforme de chargement de GNL extensible, un brise-lame, la protection du bord de mer existant, tous les bâtiments et les infrastructures nécessaires.

Les installations d'entrée du complexe se trouvent dans le côté Sud-Ouest de la zone d'implantation. C'est là que le gaz d'alimentation entre dans le complexe GNL3/Z.

Le côté Ouest comprend la zone de Génération d'Énergie et les Turbines à Gaz Frames 6 correspondantes fournies par GE/NP.

La partie Sud du complexe est constituée des Unités des Utilités et de leurs dispositifs de stockage. La section Nord longe la mer et contient les installations pour le stockage des produits et des réfrigérants, la zone de la Torche et la jetée.

Le Train de Procédé est situé au milieu de la zone d'implantation. Il est subdivisé en deux parties : la partie Est comprend les Unités de Prétraitement et de Liquéfaction, alors que la partie Ouest comprend les équipements de Fractionnement et de Récupération de GNL.

1.2. Principe de conception et de fonctionnement

Le Complexe comprend un train de procédé, les utilités associées et les installations off-site. Le train de procédé comprend un compresseur de gaz d'alimentation, une section d'élimination du mercure, une unité de Décarbonatation, un système de déshydratation, une unité de récupération et de fractionnement des GNL et un cycle de réfrigération au propane dédié, une section de liquéfaction et de réfrigération [11].

Les Utilités et les installations off-sites comprennent le système de génération d'énergie, le stockage et le chargement sur les navires du GNL et du GPL, l'huile chaude, l'eau de refroidissement, l'air service/instrument, l'azote, le gaz combustible, les torches, le traitement des eaux usées, l'eau de service/potable, le diesel, le stockage du réfrigérant et de la gazoline.

Le Train de Procédé 1 comprend les unités suivantes :

- UNITE 11 Traitement du Gaz d'Alimentation
- UNITE 12 Décarbonatation
- UNIT 13 Déshydratation
- UNITE 14 Système de Gaz Combustible du Train 1
- UNIT 15 Liquéfaction
- UNITE 16 Réfrigération

- UNITE 17 Récupération et Fractionnement des NGL
- UNITE 18 Système d'Huile Chaude
- UNITE 19 Système d'Eau de Refroidissement

La Zone des Utilités comprend les unités suivantes :

- UNITE 01 Installations d'Entrée
- UNITE 02 Stockage de l'Amine
- UNITE 08 Stockage d'Huile Chaude
- UNITE 51 Génération d'Energie
- UNITE 53 Diesel de Secours
- UNITE 55 Système de Gaz Combustible Commun
- UNITE 56 Système d' Air de Service et d' Air Instrument
- UNITE 57 Système d' Azote
- UNITE 58 Circuit d'Eau Potable
- UNITE 59 Système d'Eau de Service et d'Eau Déminéralisée
- UNITE 64 Système des Eaux Usées

Les Off-site, la Torche et la Zone de la Jetée comprennent les unités suivantes :

- UNITE 71 Stockage et de Chargement de GNL
- UNITE 72 Stockage et Chargement du GPL
- UNITE 73 Stockage du Réfrigérant
- UNITE 75 Système de la Torche
- UNITE 76 Système de Stockage de la gazoline

La Zone Anti-incendie comprend les unités suivantes :

- UNITE 63 Système d'Eau Anti-incendie
- UNITE 77 Lutte Anti-incendie

Le Complexe est conçu pour traiter aussi bien le gaz à composition « légère » (avec une teneur faible en hydrocarbures) que le gaz à composition « lourde » (avec une teneur élevée en hydrocarbures).

Le gaz d'alimentation est en premier lieu comprimé puis traité afin d'éliminer le mercure, les gaz acides et l'eau. En aval des unités de prétraitement, le gaz est refroidi pour condenser les hydrocarbures liquides (NGL) présents dans le gaz d'alimentation. Ce courant liquide est envoyé

à la section de fractionnement où sont extraits l'éthane, le propane, le butane et la gazoline. Ces produits sont considérés comme des produits à grande valeur ajoutée.

Le courant de vapeur, composé principalement de méthane, est quant à lui refroidi par un fluide de réfrigération, d'abord du propane puis du réfrigérant mixte, jusqu'à atteindre l'état liquide (GNL) à la sortie de l'unité de liquéfaction. Le GNL produit par le train de procédé est acheminé vers deux réservoirs de stockage de GNL, puis exporté sur navire au moyen d'un système de chargement dédié. Les gaz évaporés durant les activités de stockage et de chargement sont récupérés et comprimés avant d'être envoyés vers le système de gaz combustible du Complexe.

Le plan des Utilités du Complexe est basé sur la fourniture de turbines à gaz pour les compresseurs du réfrigérant, du gaz d'alimentation et du gaz résiduel ainsi que de quatre turbines à gaz pour la génération d'énergie en cycle ouvert. Des moteurs électriques sont fournis pour les pompes et les autres compresseurs.

Le Complexe GNL3/Z d'Arzew est alimenté par deux systèmes de gaz combustible distincts :

- Un système de gaz combustible présent à l'intérieur de chaque train de procédé (Unité 14 pour les utilisateurs du train 1 et future Unité 24 pour les utilisateurs du train 2) avec son propre réseau de distribution ;
- Un système de gaz combustible commun au train 1 et au futur train 2 pour les utilisateurs off-site et communs (Unité 55) avec son propre réseau de distribution, qui fait l'objet du présent manuel.

Quatre générateurs diesel de secours (trois en service et un de réserve) peuvent être utilisés comme source de génération d'énergie de réserve pour le démarrage.

Le réchauffement du procédé est assuré par l'huile chaude. Le Train de Procédé est ainsi chauffé par l'Huile Chaude provenant de l'Unité 18.

Le système de refroidissement primaire est à air.

La protection contre les incendies est fournie par les Unités 63 et 77. De l'eau est stockée dans le Réservoir de Stockage d'Eau Anti-incendie, dont l'appoint est effectué au fur et à mesure à avec de l'eau douce. En cas de dysfonctionnement de l'alimentation en eau douce, des Pompes d'Eau de Mer Anti-incendie situées sur la jetée peuvent fournir l'alimentation principale de lutte contre les incendies [11].

1.3. Vue d'Ensemble du Procédé

Les paragraphes suivants décrivent les unités du procédé principal. L'objectif est ici de fournir une vue d'ensemble générale du schéma fonctionnel du procédé [11].

UNITE 01 – Installations d'Entrée

L'Unité qui comprend les Installations d'Entrée (Unité 01) est située dans la zone d'entrée du Complexe, commune au Train 1 et au futur Train 2. Le gaz d'alimentation entrant dans le Complexe est fourni à cette unité directement depuis les limites de batterie du Complexe par un pipeline de gaz naturel avant d'être acheminé vers les sections de prétraitement, de récupération et de liquéfaction des NGL du train 1 et du futur train 2 pour un traitement supplémentaire. Parmi les objectifs principaux des installations d'entrées est l'élimination des contaminants liquides et solides du gaz d'alimentation brut par le biais d'un Filtre Coalesceur (01-MD01) ;

UNITE 11 – Compression du Gaz d'Alimentation du Complexe et Suppression du Mercure

Le gaz naturel provenant de l'unité des Installations d'Entrée (Unité 01) est envoyé vers l'unité de Traitement du Gaz d'Alimentation (Unité 11) avant d'être acheminé vers l'unité de Décarbonatation (*Acid Gas Removal Unit*, AGRU) (Unité 12). Parmi les objectifs principaux de l'unité de Traitement du Gaz d'Alimentation sont les suivants est de réduire la teneur en mercure du gaz d'alimentation à l'aide d'un lit d'adsorption, afin de ne pas endommager les équipements en aluminium en aval.

UNITE 12 – Décarbonatation

L'objectif de l'Unité de Décarbonatation est de réduire la teneur en CO₂ du gaz d'alimentation traité provenant de l'Unité 11 à une concentration inférieure à 50 ppm en vol., avant que ce dernier soit acheminé vers la section de Déshydratation (Unité 13).

Le processus de décarbonatation est effectué de façon aussi bien à répondre aux spécifications de vente normales du GNL qu'à éviter d'endommager l'équipement situé dans le Complexe en aval. En effet, le CO₂ peut geler aux basses températures, ce qui risque d'entraîner des obstructions dans la section cryogénique.

UNITE 13 – Déshydratation du Gaz

L'objectif de la Déshydratation du Gaz (Unité 13) est de réduire la teneur en eau du gaz d'alimentation décarbonaté provenant du Système de Décarbonatation (Unité 12) avant qu'il soit acheminé vers la section de Récupération des NGL en aval (Unité 17), où l'eau pourrait geler à basse température.

L'Unité 13 a été conçue de manière à produire un gaz sec dont la teneur en eau est de 0,5 ppm en vol, maximum.

La déshydratation est obtenue au moyen de trois Sécheurs à Tamis Moléculaires installés après deux étapes de refroidissement et un séparateur permettant de récupérer puis de renvoyer vers l'Unité 12 la plus grande quantité possible d'eau.

Deux sécheurs fonctionnent en adsorption, tandis que le troisième est en régénération.

La régénération est effectuée au moyen du gaz combustible chaud provenant de l'Unité 14, qui est ensuite refroidi et renvoyé aux utilisateurs de gaz combustible. L'eau éliminée du gaz combustible est envoyée au Traitement des Eaux Usées (Unité 64).

Le gaz sec est filtré avant d'être acheminé vers le Système de Récupération des NGL (Unité 17) afin d'éviter d'éventuels entraînements de poussière depuis les sécheurs.

UNITE 15 – Liquéfaction

L'objectif de l'Unité de Liquéfaction (Unité 15) est de produire du Gaz Naturel Liquéfié (GNL) répondant à une qualité de marché spécifique ainsi qu'un courant d'hélium brut.

Le gaz résiduel entrant dans l'Unité 15 ne contient aucune des impuretés principales, telles que l'eau, le dioxyde de carbone, les hydrocarbures lourds et le mercure qui pourraient geler à basse température et endommager l'Echangeur Cryogénique Principal.

Les unités de Liquéfaction et de Réfrigération sont basées sur la Licence d'Air Products and Chemicals Inc.'s (APCI), le procédé Propane-Réfrigérant Mixte qui utilise un seul MCHE.

La production de GNL dépend de la puissance de la turbine à gaz disponible pour les compresseurs de réfrigérant et des exigences d'alimentation spécifique (MW/tonnes de GNL).

Le gaz résiduel est d'abord refroidi au moyen d'un cycle de Réfrigération au Propane, puis il est liquéfié dans le MCHE au moyen de la boucle de Refroidissement au réfrigérant mixte.

Le GNL sortant du MCHE à haute pression est détendu.

UNITE 16 – Réfrigération

L'objectif de l'Unité de Réfrigération (Unité 16) est de fournir de l'énergie froide pour produire du GNL répondant à une qualité de marché spécifique et un courant d'hélium brut dans l'Unité 15.

Les unités de Liquéfaction et de Réfrigération sont basées sur la Licence d'Air Products and Chemicals Inc.'s (APCI), le procédé Propane-Réfrigérant Mixte qui utilise un seul MCHE.

Le réfrigérant nécessaire à refroidir et liquéfier le gaz naturel est fourni par deux systèmes séparés, mais interdépendants :

- ✓ Le système de propane réfrigérant (PR) permet un refroidissement allant jusqu'à -35°C du circuit de Gaz Naturel et du système de MR ;
- ✓ Le système de réfrigérant mixte (MR) permet un refroidissement allant jusqu'à -145°C pour produire le GNL dans le MCHE.

Unité 17 – Récupération et Fractionnement des NGL

L'Unité 17 traite le gaz séché et décarbonaté provenant de l'Unité 13 pour récupérer l'éthane et les hydrocarbures plus lourds (ici appelés NGL) du gaz d'alimentation (section de Récupération des NGL) et pour les séparer en courants de composants purs : produits éthane, propane, butane, pentane et gazoline (section de Fractionnement des NGL).

Récupération des NGL

Le Gaz séché et décarbonaté provenant de l'Unité 13 est pré-refroidi et acheminé vers le Déméthaniseur après avoir été détendu isentropiquement au moyen du Compresseur du Turboexpandeur.

Le produit de tête de la colonne est initialement acheminé vers la Boîte Froide de Récupération des NGL afin de garantir le refroidissement du gaz d'alimentation, d'abord comprimé par le Compresseur du Turboexpandeur puis par le compresseur de gaz résiduel, avant d'être envoyé à l'Unité de Liquéfaction.

Fractionnement des NGL

Les NGL du fond du Déméthaniseur sont acheminés vers le Dééthaniseur pour récupérer les hydrocarbures plus lourds (C3+), tandis que le courant de tête (produit éthane) est exporté ou utilisé comme source de gaz combustible.

Le produit de fond du Dééthaniseur est acheminé vers le Dépropaniseur pour récupérer les hydrocarbures plus lourds (C4+), tandis que le courant de tête (produit propane) est acheminé vers le stockage et utilisé comme appoint de réfrigérant. Le produit de fond du Dépropaniseur est acheminé vers le Débutaniseur pour récupérer les hydrocarbures les plus lourds (C5+), tandis que le courant de tête (produit butane) est acheminé vers le stockage.

Le courant de fond du Débutaniseur est envoyé vers le stockage du produit Gazoline ; le pentane provenant du soutirage latéral est envoyé comme combustible au Four d'Huile Chaude de l'Unité 18.

Chaque colonne (Dééthaniseur, Dépropaniseur et Débutaniseur) est également dotée d'une ligne permettant de réinjecter le Produit de tête correspondant (Ethane, Propane et Butane) dans le gaz résiduel vers l'Unité de Liquéfaction, de façon à réguler le PCS du GNL.

Tout ce qui nous intéresse dans la partie du procédé de du complexe GNL3/Z est celle de Unité 75.

Unité 75 – Système de la Torche

Le Système de la Torche est dimensionné pour satisfaire au fonctionnement de deux trains de GNL. Le système permet d'éliminer de manière sûre et fiable les vapeurs d'hydrocarbures et les

rejets liquides produits par les unités suite à des défaillances lors de situations d'urgence et de dysfonctionnement. Le système est également dimensionné pour les rejets d'hydrocarbures survenant dans des conditions opératoires telles que le démarrage, la dépressurisation et le drainage des équipements et/ou de la tuyauterie.

Le Système de la Torche est subdivisé en trois systèmes de torches séparés pour éviter la formation d'hydrates, le gel et la condensation en raison de la nature et des propriétés du fluide manipulé dans les différentes unités :

- la Torche Chaude 75-MB01 est consacrée aux Hydrocarbures humides, lourds et chauds. Son débit de calcul est de 1 306 000 kg/h ;
- la Torche Froide 75-MB02 est consacrée aux hydrocarbures secs, légers et froids. Son débit de calcul est de 2 436 000 kg/h ;
- la Torche BP 75-MB03 est consacrée aux rejets des stockages de GNL et GPL, des Systèmes de BOG et de la sphère de gazoline. Son débit de calcul est de 162 400 kg/h ;
- le Brûlot des Résidus Liquides 75-MB04 est consacré à la mise au rebut de tous les courants d'hydrocarbures liquides des Pompes du Ballon de la Torche Chaude 75-MJ01-A/B. Son débit de calcul est de 25 200 kg/h.

2. Conditions météorologiques de la zone d'étude

Pour les conditions météorologiques de la ville d'Arzew pendant le mois d'Avril de l'année 2020, nous nous consacrons juste à la description de deux jours le 1^{ier} qui est représenté un torchage normal du complexe et le 14^{ème} durant lequel les rejets ont atteint un pic.

2.1. Les températures moyennes

Le graphique sur la Figure 05 montre les variations des températures moyennes durant toute la journée du 1^{ier} et du 14^{ème} jour du mois d'Avril. Pendant la nuit, du 00h à 6h, les températures connaissent une légère variation de 13°C à 11°C. La matinée, à partir du 7h, les températures augmentent progressivement pour atteindre un maximum de 19°C le 1 avril et 20°C le 14 avril à 14h. Puis, elle dégringole progressivement jusqu'à la nuit de la journée suivante.

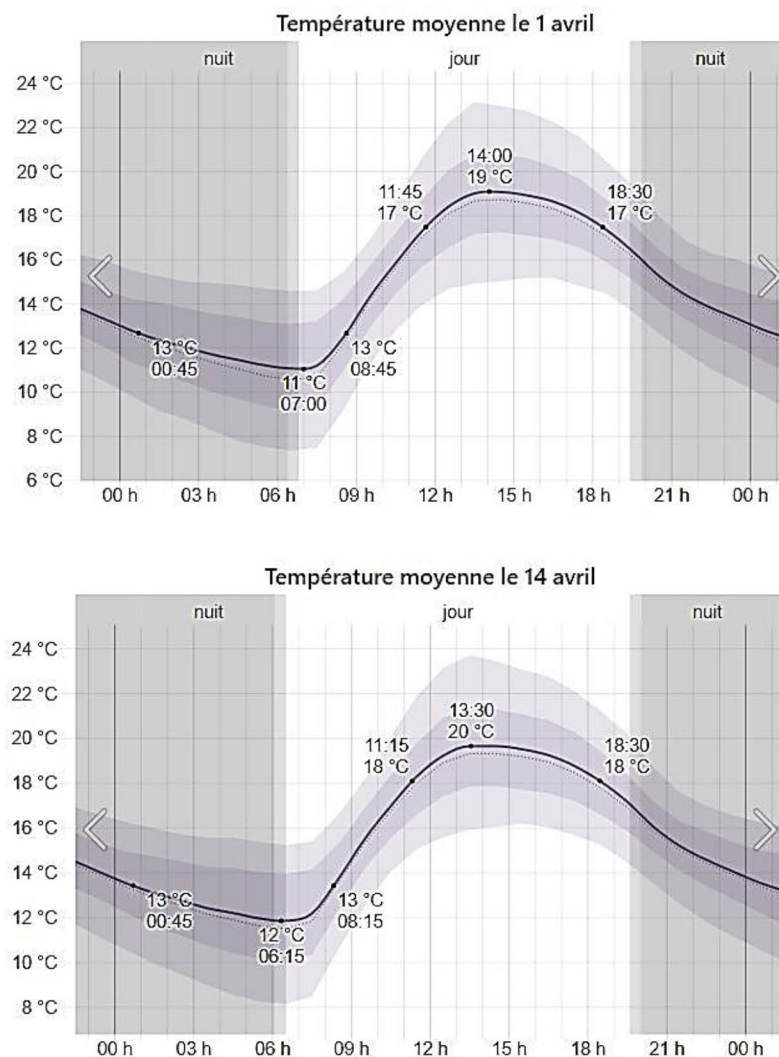


Figure 05 : Températures moyennes de la zone d'étude le 1^{er} et le 14 Avril 2020.

2.2. La vitesse du vent

En météorologie, le vent désigne le mouvement horizontal de l'air. Sa mesure comprend deux paramètres : sa direction et sa vitesse ou force. La vitesse est exprimée communément en km.h^{-1} ou m.s^{-1} . Marins et pilotes utilisent les nœuds ($1 \text{ nœud} = 1,852 \text{ km.h}^{-1}$). Cette grandeur est très intéressante dans les études de la dispersion des polluants dans l'atmosphère, puisqu'elle affecte leur extension.

Les courbes de la variation de la vitesse du vent en fonction de toute la journée sont présentées sur la Figure 06. Durant la nuit, de 00h à 6h, la vitesse du vent est presque invariable à $15,2 \text{ km.h}^{-1}$ dans les deux dates étudiées. A partir de 6h du matin, la vitesse augmente graduellement pour

atteindre un maximum de $21,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ le 1^{er} avril et $22,1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour le 14 avril à 16 du soir. Puis diminue progressivement pour se stabiliser à partir de 21h jusqu'à la journée suivante.

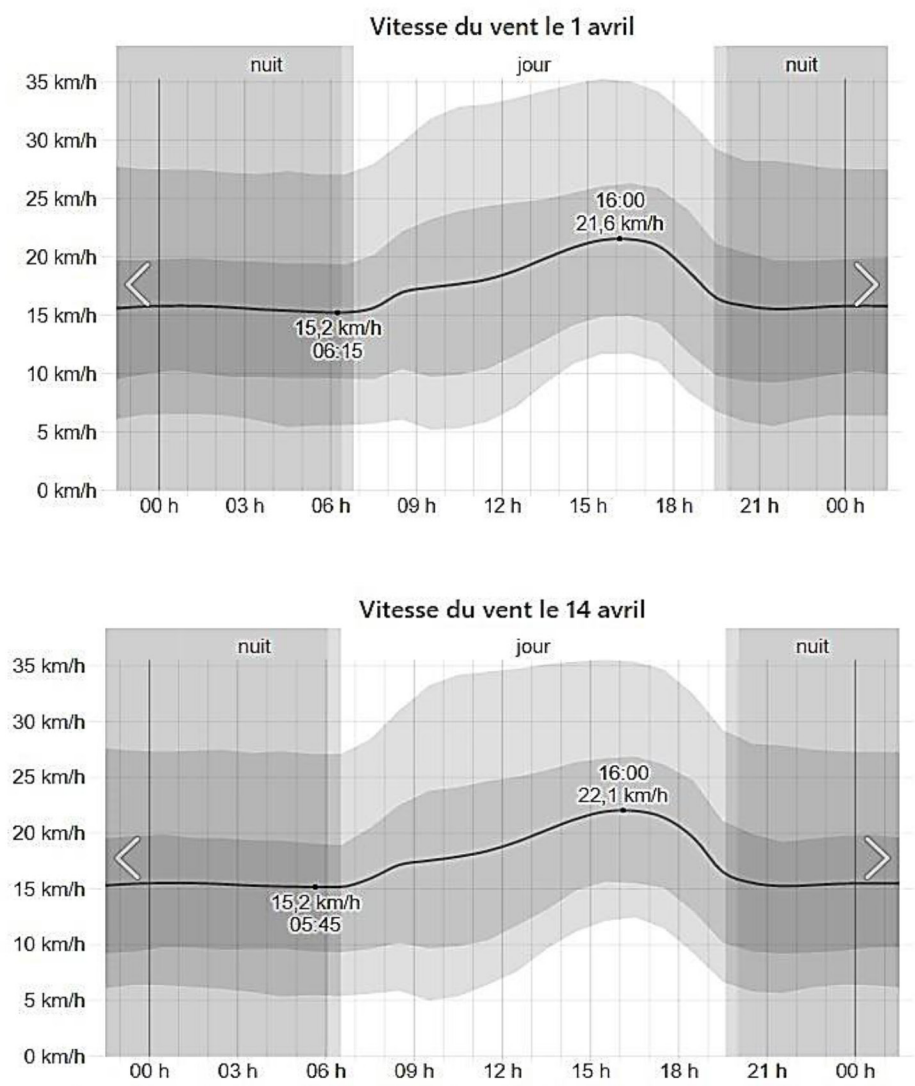


Figure 06 : Vitesses du vent de la zone d'étude le 1^{er} et le 14 Avril 2020.

2.3. La direction du vent

La direction du vent est l'une des deux grandeurs numériques qui, avec la vitesse du vent, caractérisent le vent au sens courant, c'est-à-dire, d'un point de vue physique, la composante horizontale de la vitesse de l'air. Cependant, il est très important de se rappeler qu'en météorologie, cette "direction" du vent désigne toujours, en fait, la direction d'où vient le vent ; par rapport à l'axe horizontal sud-nord, elle repère donc, non pas la direction de la flèche du vent telle qu'on l'entend habituellement, mais la direction opposée.

La vitesse des Vents pour la zone d'Arzew montre combien d'heures par jour le vent souffle dans la direction indiquée. Le vent souffle du Nord-Ouest (NO) au Sud-Est (SE) durant les deux jours d'étude.

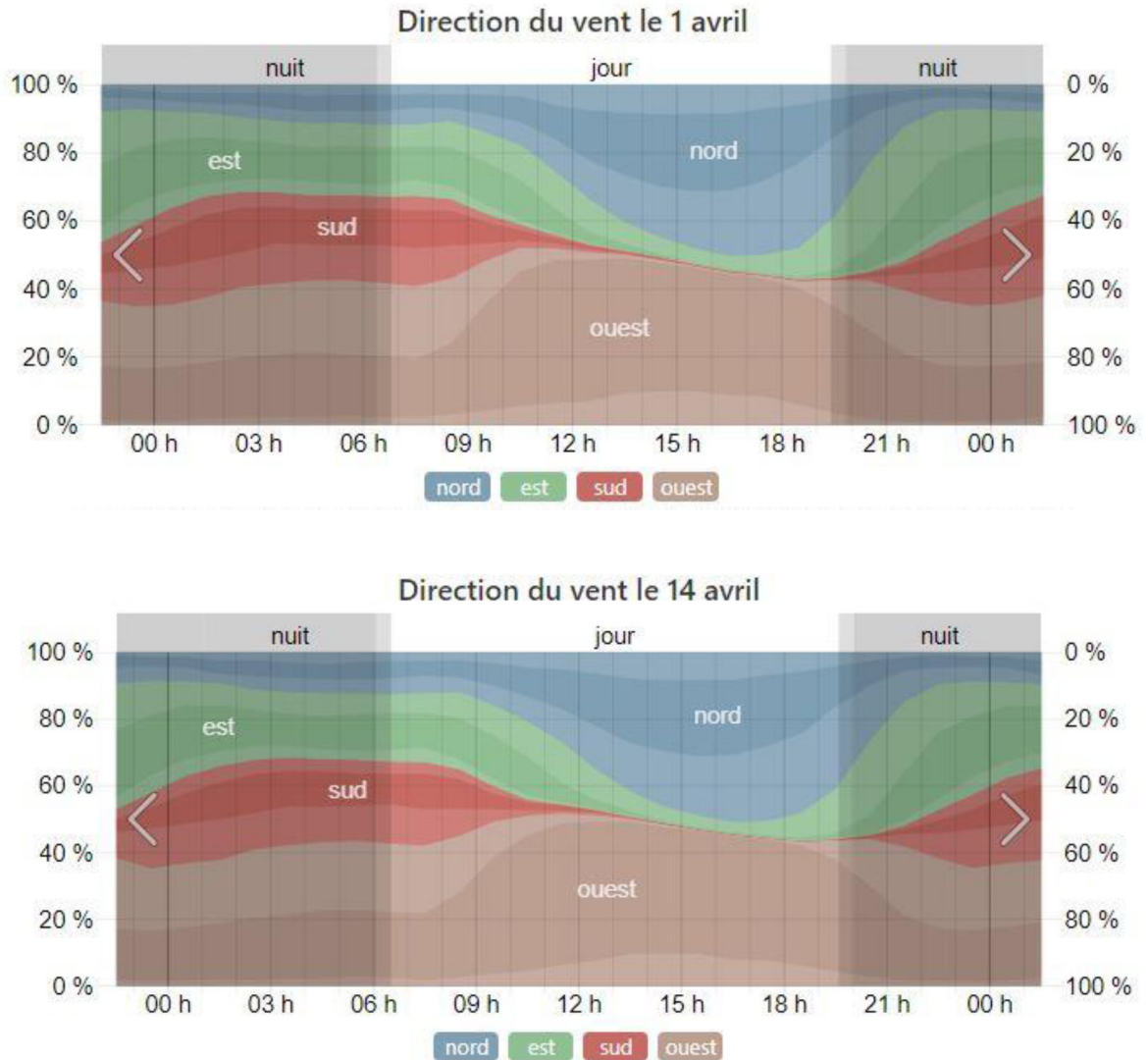


Figure 07 : Directions du vent de la zone d'étude le 1^{er} et le 14 Avril 2020.

**CHAPITRE IV :
MODELISATION ET
SIMULATION DE LA
DISPERSION
ATMOSPHERIQUE**

CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

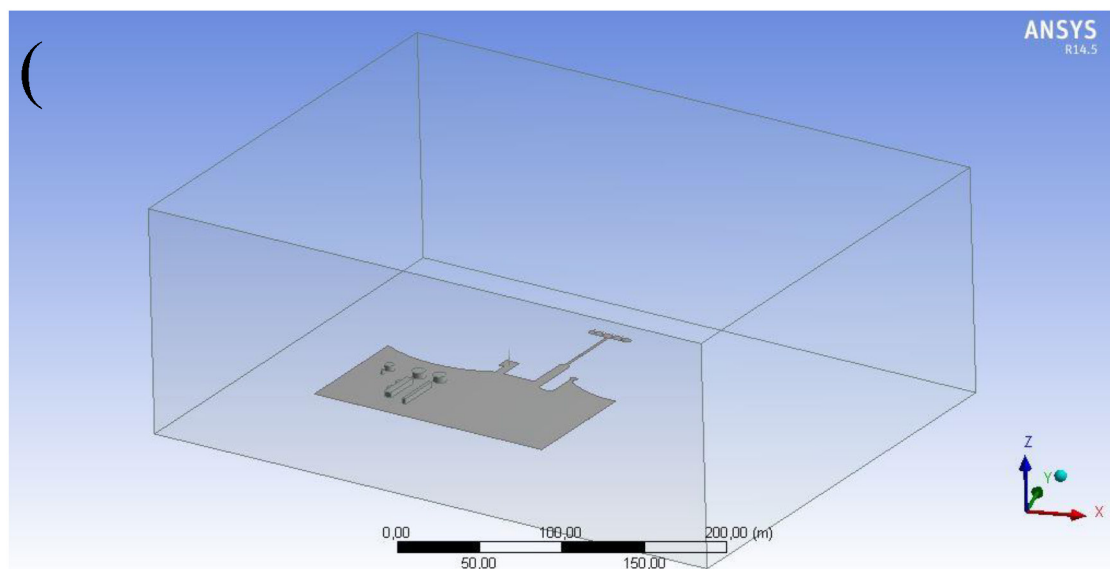
1. Codes de calcul CFD « Ansys CFX 14.5 »

La modélisation en utilisant les codes de calcul de mécanique des fluides (CFD) se situe dans le cadre de la modélisation Eulérienne. Ces modèles CFD sont utilisés à l'échelle locale, ou plus généralement en présence d'obstacles qui perturbent l'écoulement d'air. Ces codes sont basés sur la résolution numérique des équations régissant l'écoulement atmosphérique, telle que celle de Navier-Stokes, la complexité des écoulements et la dispersion du polluant dans cet écoulement [12], [13].

Le système d'équations différentielles, qui définissent l'écoulement en régime instationnaire dans l'espace tridimensionnel du mélange de gaz, du transfert de l'énergie, de transport du gaz est régi par les trois équations de conservation de la masse, de conservation de la quantité de mouvement et de conservation de l'énergie qui sont explicités respectivement par les équations (03), (04), (05) et l'équation d'advection-diffusion (06) (voir chapitre II) [14].

2. Domaine d'étude, maillage et conditions aux limites

Nous nous sommes intéressé d'étudier la dispersion des polluants des gaz torchés du complexe GNL3/Z, le domaine de simulation est focalisé dans la zone industrielle d'Arzew.



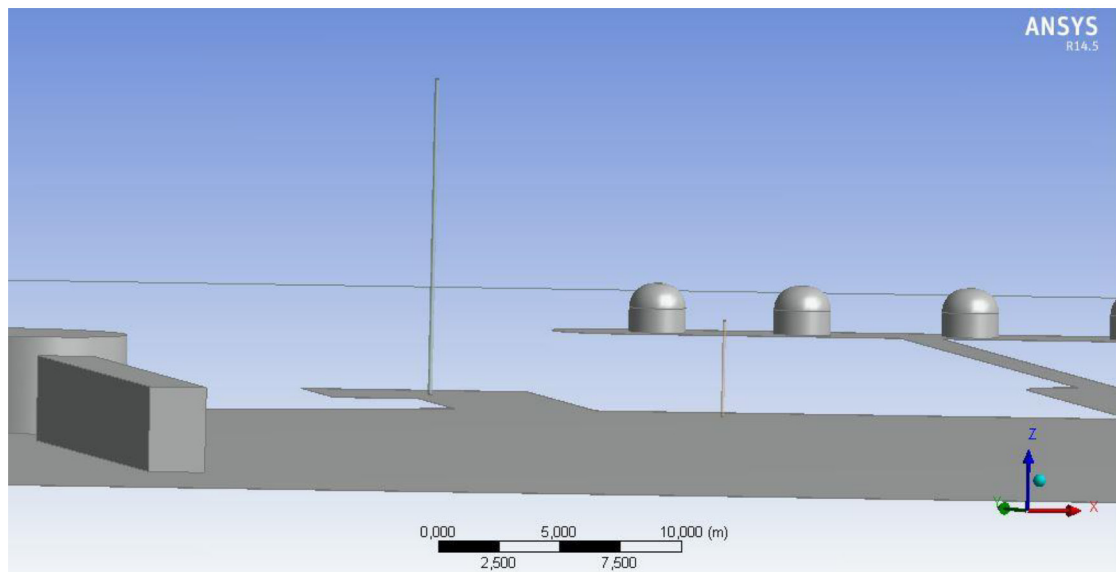


Figure 08 : Vu générale du complexe GNL3/Z et le domaine d'étude.

Pour le domaine de calcul nous avons essayé de nous limiter seulement à une géométrie de 1050 m x 650 m x 650 m où les trois cheminées d'émission (torche chaude, torche froide et torche BP) sont placées à 00 m de l'axe des Y. Les hauteurs des cheminées sont de 129,9 m pour torches chaude et froide avec un diamètre de 1,61 m, et 39,4 m pour la torche BP avec un diamètre de 1,4 m. La Figure 09, ci-dessous, donne toutes les cotations du domaine de simulation de la dispersion.

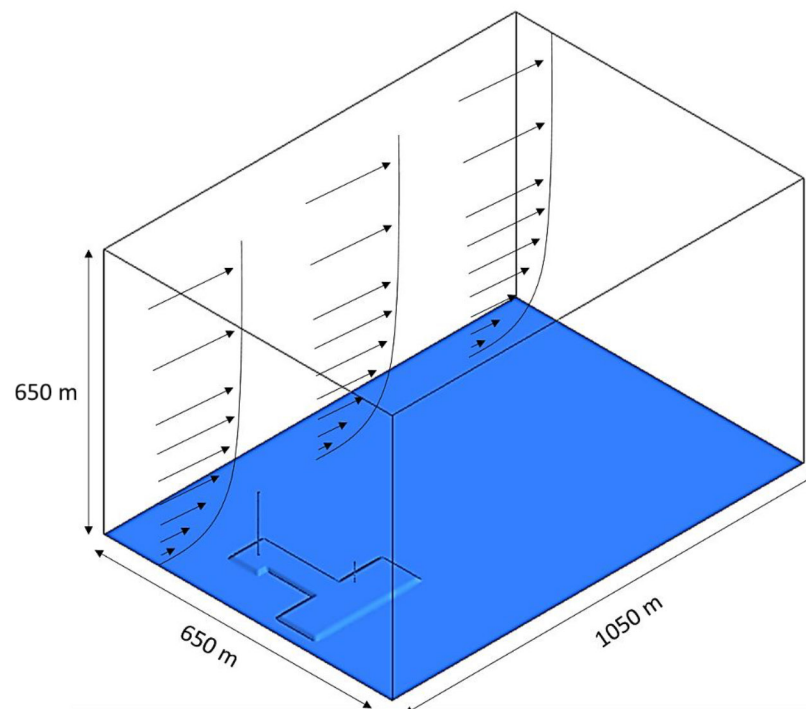


Figure 09 : Domaine de simulation des gaz torchés.

Les conditions aux limites doivent être implémentées et initialement déclarées dans les processus de la modélisation numérique. C'est à partir des conditions insérées que le code débutera les calculs de l'instant initial et poursuivra durant tout au long de la période de simulation.

Ces conditions aux limites sur les variables principales diffèrent selon les frontières du domaine considérées. On considère comme entrées de domaine, la face en amont de l'écoulement du vent, qui est esquissée de manière à respecter la direction du vent dominant dans les dates d'étude. Les bords du côté gauche et droite, supérieur et la face en aval sont considérés comme environnement (atmosphère).

La théorie de Monin-Obukhov est basée sur une analyse dimensionnelle appliquée à la couche de surface atmosphérique. En condition de stratification neutre, où les effets thermiques n'interviennent pas, l'évolution des variables caractéristiques est de type logarithmique, suivant les formulations (01, 02, 03), respectivement pour la vitesse, l'énergie cinétique de turbulence et la dissipation de la turbulence.

Un maillage de tailles variables a été reproduit en cellules tétraédriques, plus fin dans les zones près des cheminées et moyen près du sol. Au total, plus 35 000 de nœuds et plus de 190 000 d'éléments.

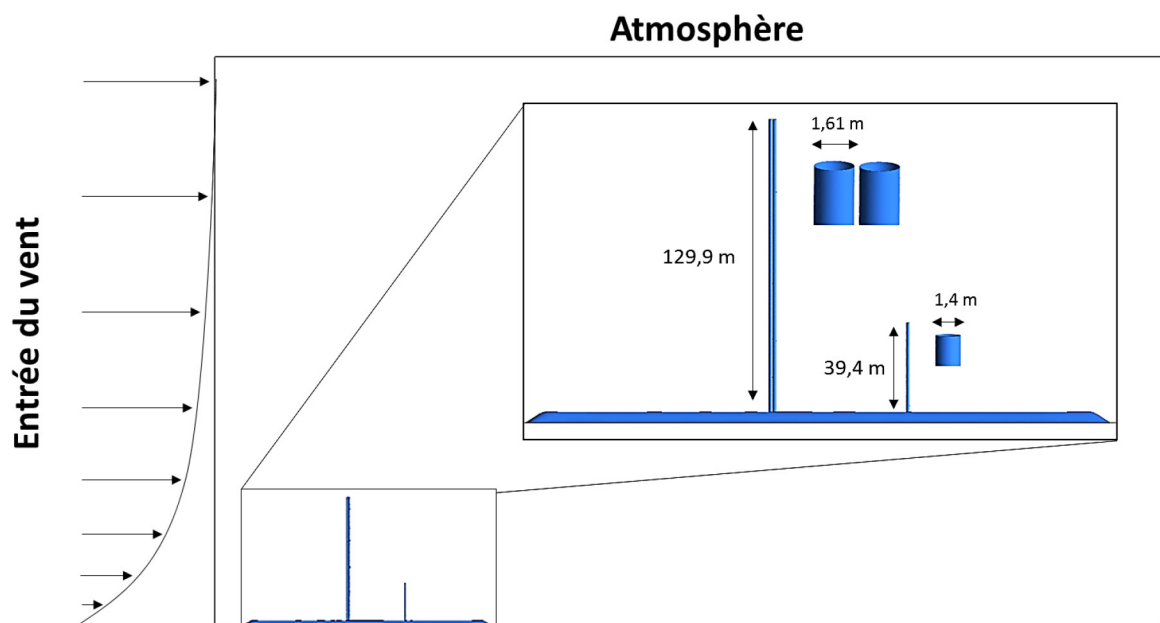


Figure 10 : Conditions aux limites implémentées.

3. Résultats de simulation

3.1. Profil de vitesse du vent

Le profil logarithmique de la vitesse du vent, a été simulé en utilisant l'équation (01) de la théorie de Monin-Obukhov en stratification neutre. L'équation donne une bonne estimation pour le cisaillement vertical du vent, en prenant la vitesse $U^* = 5,88$ m/s à une hauteur $Z_0 = 10$ m. La Figure 11 présente le profil vertical de la vitesse du vent à différentes positions horizontales du domaine de simulation.

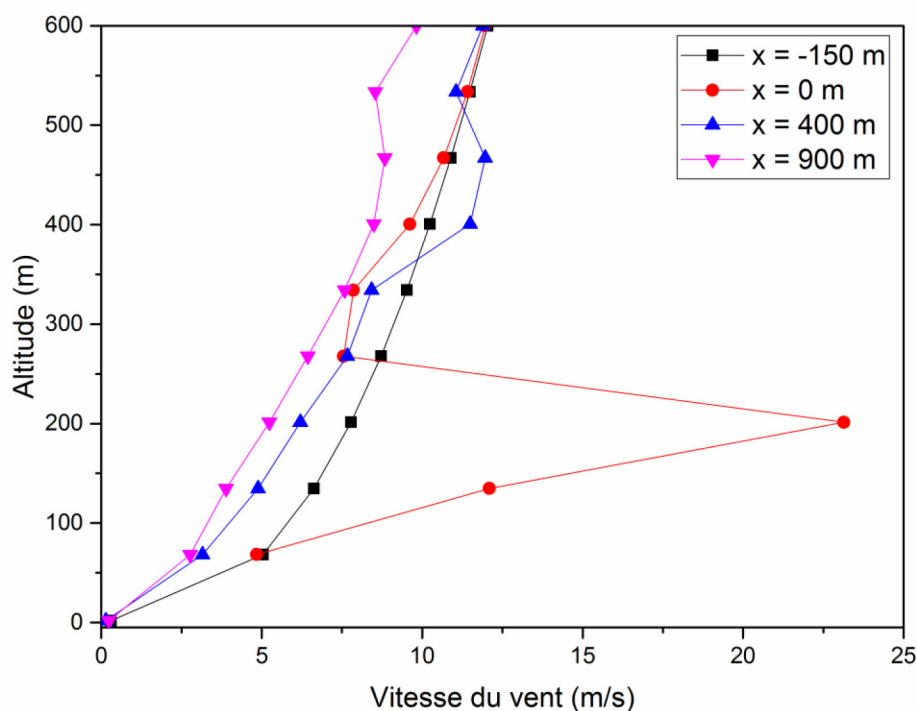


Figure 11 : Profils de vitesses du vent.

Quatre positions horizontales ont été choisies pour vérifier la forme logarithmique du profil de vitesse d'une part et d'autre déterminer avec précision les zones atteintes ou touchées par le panache des gaz torchés.

Dans toutes les positions sélectionnées le profil de vitesse du vent, donne une vitesse minimale de 0 m/s au sol, soit à $z = 0$ m. La vitesse du vent augmente légèrement près de 7 m/s à partir d'une altitude de $z = 120$ m. Le profil indique une augmentation significative à la sortie des torches Chaude et Froide ($z = 200$ m) qui est due à l'ajout de la vitesse de rejet des gaz qui est égale à 21 m/s [15].

3.2. Distribution de la fraction massique de CO₂

Le gaz brûlé dans les torches de GNL3/Z, porte aux environs 55% de CO₂ et de 45 % H₂O d'une densité de mélange de 0,34 kg/m³. Dans ce cas, le gaz torché est moins dense que l'air, il est qualifié de « gaz léger ». En générale, ce type de rejet n'apporte aucune perturbation mécanique à l'écoulement atmosphérique et va se disperser du fait de la seule action du fluide porteur qui est l'air. Le déplacement et la dilution du gaz vont alors dépendre du vent de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique.

La Figure 12 montre l'évolution des contours de la fraction massique de CO₂ en fonction du temps. Selon cette figure, la concentration est maximale au point de rejet plus de 0,01 et puis diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne des sources d'émissions.

Selon les profils des vecteurs de vitesse du vent (voir Figure 13) ces résultats montrent que la dispersion atmosphérique du nuage émit de CO₂ émis par les torches chaude et froide tend à remonter vers le haut sous l'effet d'un courant transversal, par contre, la concentration de CO₂ émise par la torche BP suit une forme linéaire vu au faible débit d'émission rejeté.

Quand le gaz émis est suffisamment moins léger que l'air à température ambiante, mais rejeté à une température assez importante pour que sa masse volumique soit plus petite, l'effet des forces d'Archimède est susceptible de favoriser l'ascension du nuage de gaz.

Et si la vitesse ascensionnelle est suffisante (due au fort débit d'émission dans notre cas), le frottement des bords du nuage avec l'atmosphère lors de l'ascension peut favoriser la dilution (apparition de turbulence sur les bords du nuage). Enfin, le cœur du nuage plus léger que la périphérie peut s'élever plus rapidement avec pour conséquence un accroissement de la surface de contact entre l'atmosphère et le gaz. Tous ces phénomènes sont susceptibles de favoriser la dilution du nuage [16], [17].

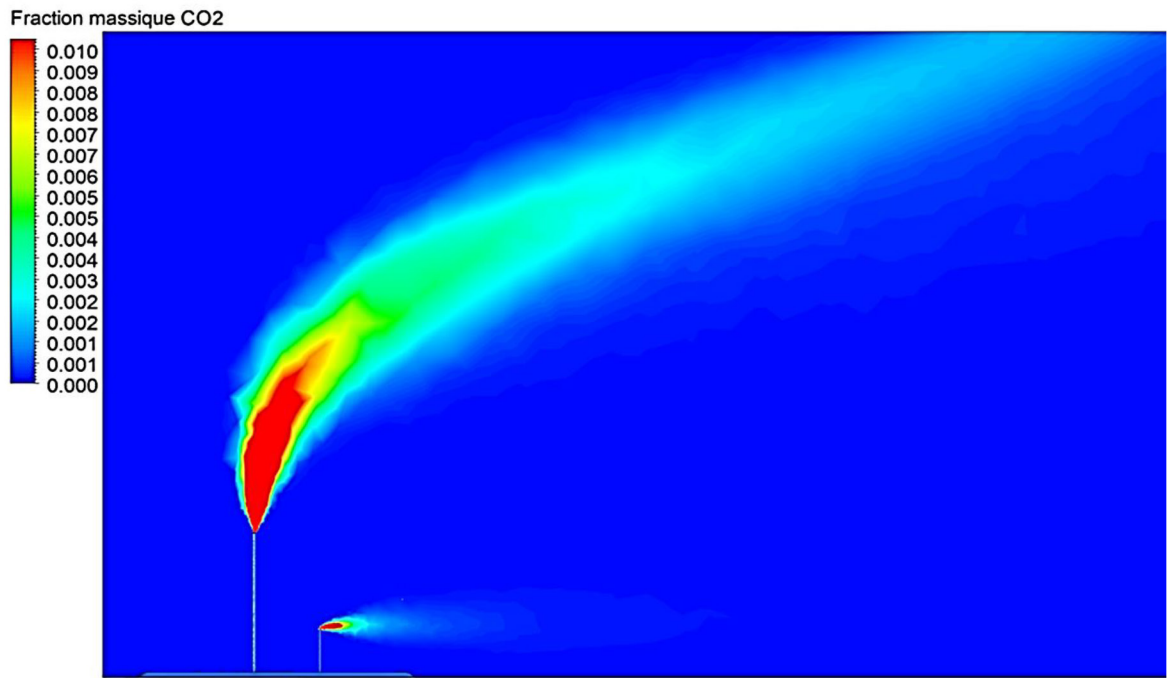


Figure 12 : Profil de la fraction massique de CO₂ émise par les gaz torchés.

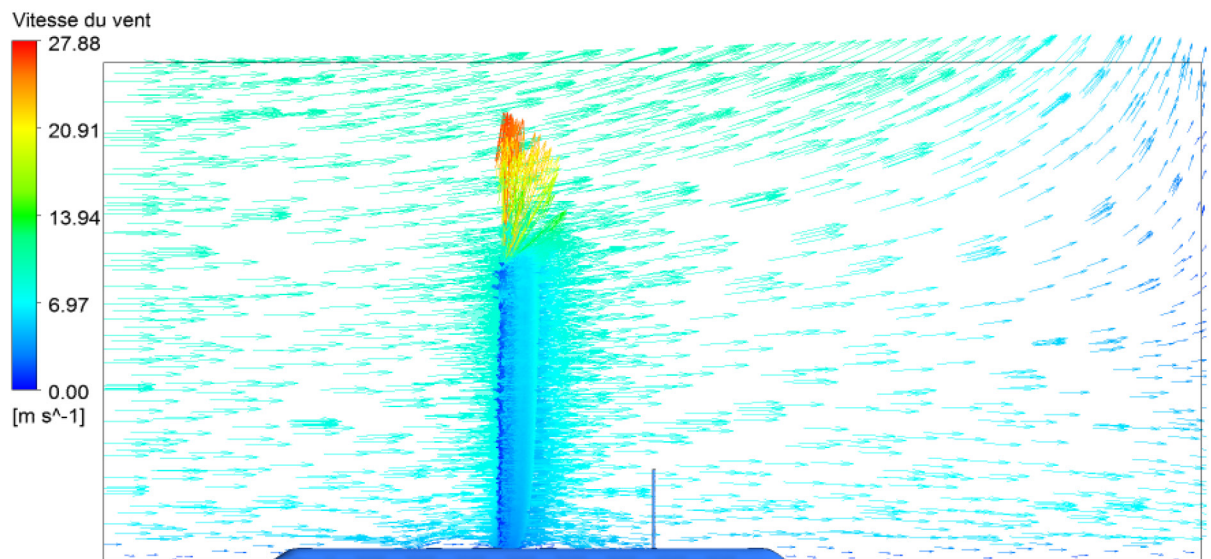


Figure 13 : Vecteurs des vitesses du vent.

3.3. Distribution de la température

La Figure 14 montre l'évolution des contours des températures du gaz torché qui sont dans les environs de 900°C (1170 K) à la sortie des torchés.

Quant aux effets thermiques, ils jouent un rôle significatif sur la dilution. Pour des gaz dont la température est très différente de celle de l'air et du sol, les échanges thermiques vont accélérer la dilution par convection thermique [18].

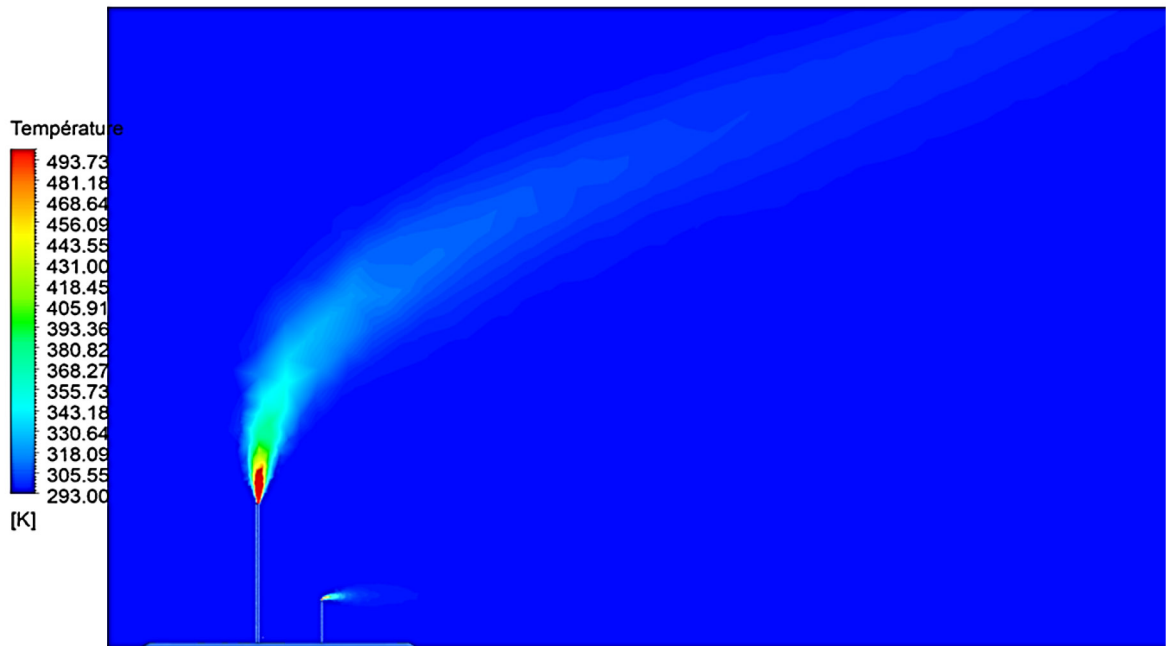


Figure 14 : Profile de la température des gaz torchés.

3.4. Isosurfaces et validation du modèle de simulation

Afin de pouvoir comparer et/ou valider les résultats de simulation, la Figure 15 montre les différentes vues des isosurfaces de la fraction massique du CO₂ de 0.01. L'isosurface est en fait le lieu des points de l'espace pour lesquels la fraction massique de CO₂ émis par les différentes torches du complexe GNL3/Z est constante.

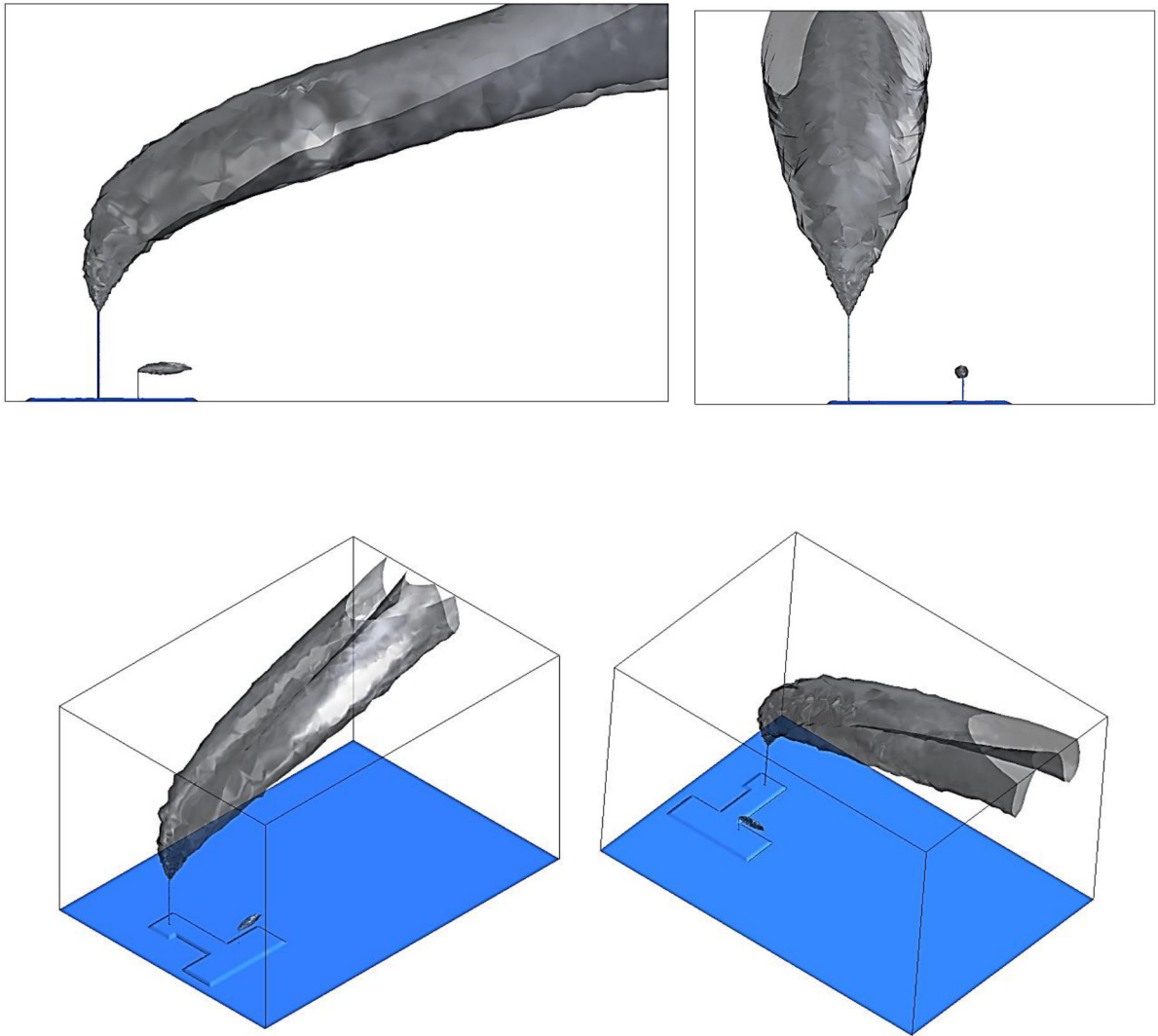


Figure 15 : Différentes vues des isosurfaces de la fraction massique du CO₂ de 0.01.

Faute de moyens expérimentaux pour la confrontation les résultats du modèle CFD et afin de valider nos résultats de la simulation du code ANSYS-CFX. Le seul moyen de validation est la comparaison de nos résultats de simulation aux images réelles prises le 14 avril 2020. Comme précisé sur la Figure 15, on remarque que le panache des fumées obtenu par le code CFD est globalement cohérent avec l'image prise, ce qui valide notre étude dans le laps de temps utilisé dans la simulation.

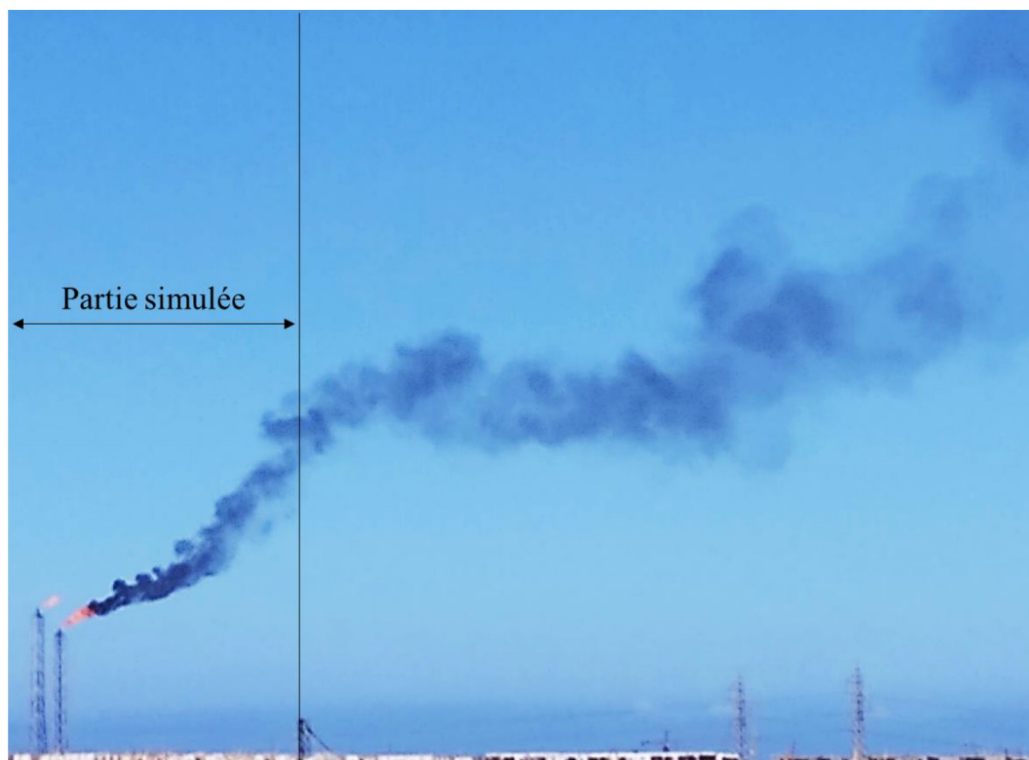


Figure 16 : Image prise le 14 avril 2020.

Conclusion générale

Mener des études sur la dispersion des polluants relève d'une importance capitale surtout quand cela s'agit des émissions d'un parc industriel à proximité duquel se trouve des agglomérations.

La modélisation de la dispersion dans l'atmosphère, des polluants émis par une installation, permet d'évaluer de façon quantitative les impacts sur la qualité de l'air d'un projet industriel ou d'une activité existante. Elle permet d'une part d'établir une cartographie des concentrations moyennes des dépôts des polluants émis et d'autre part de vérifier le respect des normes réglementaires.

Malgré le manque des moyens expérimentaux pour faire une comparative entre les résultats du modèle CFD, néanmoins, on remarque que le panache des fumées obtenu par le code CFD est cohérent avec l'image prise sur le site.

La pollution atmosphérique est une problématique d'actualité auquel les gouvernements tiennent fermement. Etudier la dispersion des polluants du site pétrochimique d'Arzew permet de mieux agir et à temps pour contrecarrer une pollution si elle survient.

Pour finir, ce travail ce n'est qu'une étape préliminaire, et une initiation vers le développement d'un modèle plus adapté pour le suivie des panaches provenant des industries pétrochimiques. On peut dire que le modèle établi dans cette étude, permet de satisfaire l'évaluation spatio-temporelle des polluants dans l'atmosphère.

Références bibliographiques

- [1] V. Winiarek, “Dispersion atmosphérique et modélisation inverse pour la reconstruction de sources accidentelles de polluants,” *Thèse Dr. en Sci. Tech. l’Environnement. Univ. Paris-Est.*, p. 219, 2014, [Online]. Available: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01004505>.
- [2] F. Vendel, “Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d’obstacles complexes : application à l’étude de sites industriels,” *Thèse Dr. en Mécanique. Univ. Lyon.*, p. 368, 2011.
- [3] R. Yoshie, G. Jiang, T. Shirasawa, and J. Chung, “CFD simulations of gas dispersion around high-rise building in non-isothermal boundary layer,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 99, no. 4, pp. 279–288, 2011, doi: 10.1016/j.jweia.2011.01.006.
- [4] A. Belacaid, “Modélisation de la dispersion des polluants dans un milieu marin via les oueds et les émissaires sous-marins. Application à la pollution de la baie de Tanger - Maroc Soutenue,” *Thèse Dr. en Sci. Tech. l’Ingénieur. Univ. Abdelmalek Essaâdi Fac.*, p. 183, 2013.
- [5] F. Allag, “Contribution à l’étude de la dispersion des polluants,” *Thèse Dr. en Sci. Univ. Ferhat Abbas Sétif-1*, p. 126, 2016.
- [6] L. Soulhac, “Modélisation de la dispersion atmosphérique à l’intérieur de la canopée urbaine,” *Thèse Dr. en Mécanique. Ec. Cent. Lyon.*, p. 349, 2000.
- [7] D. Quélo, “Simulation numérique et assimilation de données variationnelle pour la dispersion atmosphérique de polluants,” *Thèse Dr. en Mathématiques Informatique. Ec. Natl. des Ponts Chaussées.*, p. 254, 2004.
- [8] M. Menaouer, “Modelisation numerique de l’evolution de la dispersion des polluants emis par une cheminee,” *Thèse Magister en Phys. Option Phys. énergétique environnement. Univ. des Sci. la Technol. Mohammed BOUDIAF-Oran.*, p. 94, 2013.
- [9] P. Lauret, “Modélisation de la dispersion atmosphérique sur un site industriel par combinaison d’automates cellulaires et de réseaux de neurones,” *Thèse Dr. en Génie l’Environnement. École Natl. Supérieure des Mines Saint-Étienne-France.*, p. 215, 2014.
- [10] B. Mohammedi, S. Hanini, A. Gheziel, and N. Mellel, “Simulation de l’Effet des Obstacles sur la Dispersion Atmosphérique par un code CFD,” *Alger. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 6, pp. 1246–1259, 2020.
- [11] Sonatrach, “Manuel Opérateur GNL3/Z,” *Proj. GNL-3Z Arzew*, p. 236, 2015.

- [12] A. A. Sedighi and M. Bazargan, “A CFD analysis of the pollutant dispersion from cooling towers with various configurations in the lower region of atmospheric boundary layer,” *Sci. Total Environ.*, vol. 696, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133939.
- [13] P. Gousseau, B. Blocken, T. Stathopoulos, and G. J. F. van Heijst, “CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal,” *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 428–438, 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.09.065.
- [14] X. Ma, W. Zhong, W. Feng, and G. Li, “Modelling of pollutant dispersion with atmospheric instabilities in an industrial park,” *Powder Technol.*, vol. 314, pp. 577–588, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.08.062.
- [15] B. Blocken, T. Stathopoulos, and J. Carmeliet, “CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems,” *Atmos. Environ.*, vol. 41, no. 2, pp. 238–252, 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.08.019.
- [16] Z. T. Ai and C. M. Mak, “CFD simulation of flow and dispersion around an isolated building: Effect of inhomogeneous ABL and near-wall treatment,” *Atmos. Environ.*, vol. 77, pp. 568–578, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.034.
- [17] T. van Hooff, B. Blocken, and M. van Harten, “3D CFD simulations of wind flow and wind-driven rain shelter in sports stadia: Influence of stadium geometry,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 1, pp. 22–37, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.06.013.
- [18] H. Kikumoto and R. Ooka, “A numerical study of air pollutant dispersion with bimolecular chemical reactions in an urban street canyon using large-eddy simulation,” *Atmos. Environ.*, vol. 54, pp. 456–464, 2012, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.02.039.