



UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2020-2021

N°D'ORDRE : 0488/2021

N°CARTE D'ÉTUDIANT :
CI0416008362

Mémoire pour l'obtention du MASTER

Physique-Chimie

Option : Physique-Chimie appliquée à l'Environnement

THÈME :

**DISPERSION LOCALE DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES EN
SITES INDUSTRIELS : CAS D'UNE CENTRALE D'ENROBES A
CHAUD DE VRIDI (Abidjan, Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE : Des
Sciences et
Technologies de
l'Environnement

Présenté par :

N'GUESSAN Yao Jean Laurent

Jury

**Président : M. KOFFI Bené Jean-Claude, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Encadreur : M. ASSAMOI Eric-Michel, Maître-Assistant,
Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan**

**Examineur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

Soutenu publiquement
le :16/10/2021



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2020-2021

N°D'ORDRE : 0488/2021

N°CARTE D'ÉTUDIANT :

CI0416008362

LABORATOIRE : Des
Sciences et
Technologies de
l'Environnement

Mémoire pour l'obtention du MASTER

Physique-Chimie

Option : Physique-Chimie appliquée à l'Environnement

THÈME :

**DISPERSION LOCALE DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES EN
SITES INDUSTRIELS : CAS D'UNE CENTRALE D'ENROBES A
CHAUD DE VRIDI (Abidjan, Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

N'GUESSAN Yao Jean Laurent

Jury

**Président : M. KOFFI Bené Jean-Claude, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

**Encadreur : M. ASSAMOI Eric-Michel, Maître-Assistant,
Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan**

**Examineur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa**

Soutenu publiquement

le :16/10/2021

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour leurs abnégations dans la formation des étudiants.

Je remercie vivement Monsieur DIBY Brou, Directeur du Laboratoire Sciences et Technologies de l'Environnement, pour son conseil avisé et son implication active dans ce travail.

Je suis très heureux de témoigner ma profonde estime à mon encadreur Docteur ASSAMOI Eric-Michel, l'Université Félix Houphouët Boigny Abidjan, pour m'avoir permis de bénéficier de ses compétences scientifiques et d'avoir accepté de prendre ce travail sous son aile, je lui suis très reconnaissant. Au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, un chaleureux et profond remerciement.

Je remercie Professeur ADON Attoh Marcellin pour son temps précieux qui m'a été consacré, sa générosité et sa personnalité force un grand respect et une admiration considérable de ma part.

Je remercie le Professeur KOFFI Bené Jean-Claude et l'examineur Docteur KOUASSI Adjon Anderson, de m'avoir fait l'honneur d'être dans mon jury et pour l'intérêt qu'ils portent à mon mémoire.

Enfin, une pensée à l'endroit de tous les étudiants avec qui j'ai partagé une salle, un café, un repas ou une console d'ordinateur pendant ces cinq années.

Mes remerciements vont à l'endroit de mon père, ma mère, mes frères et sœurs, pour leurs soutiens et leurs patiences sans lesquels je n'en serais pas là aujourd'hui. Je sais que mon absence a été longue et j'espère pouvoir un jour rattraper le retard. Vous avez toujours ma gratitude éternelle.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	ii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES SUR LA POLLUTION ATMOSMPHERIQUE.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Atmosphère et pollution atmosphérique	3
1.2.1 Atmosphère	3
1.2.2 Pollution atmosphérique.....	6
1.3 Sources de pollution	6
1.3.1 Sources naturelles.....	6
1.3.2 Sources anthropiques.....	7
1.4 Problématique de la pollution industrielle	7
1.5 Différents types de polluants issus de l'activité humaine	7
1.5.1 Polluants réglementés.....	7
1.5.2 Composés organiques.....	10
1.6 Conditions météorologiques.....	10
1.6.1 Vent	11
1.6.2 Stabilité de l'atmosphère.....	11
1.6.3 Gradient thermique.....	12
1.6.4 Précipitation ou pluies	13
1.6.5 Pression atmosphérique.....	13
1.6.6 Critères de stabilité de Pasquill	13
1.7 Impacts de la pollution de l'air.....	14
1.8 Conclusion partielle.....	14
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES	16
2.1 Introduction	16
2.2 MATERIEL.....	16
2.3 Présentation de la zone d'étude	18
2.4 Description de la base de données GDAS.....	18
2.4.1 Données utilisées.....	19
2.5 METHODE	20

2.5.1 Description du modèle HYSPLIT	20
2.5.2 Choix des jours de modélisation	24
2.5.3 Réduction des jours à partir des données pluviométriques	25
2.5.4 Analyse des données de vent sur le site	25
2.5.5 Croisement des journées sans précipitation avec les secteurs de vent favorables...	26
2.6 Conclusion partielle.....	26
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	28
3.1 Introduction	28
3.2 Evolutions des concentrations des polluants.....	28
3.2.1 Evolutions des concentrations des six polluants lors des journées du 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars 2021.....	28
3.3 Comparaison des niveaux de concentrations de notre zone d'étude à ceux de l'OMS..	35
3.4 Comparaisons avec des mesures de concentration in situ dans les capitales africaines.	35
3.5 Conclusion partielle.....	36
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	39
REFERENCES.....	40

LISTE DES ABREVIATIONS

Ar	: Argon
ARL	: Air Resources Laboratory
BUFR	: Forme Binaire Universelle pour la Représentation
CLA	: Couche Limite Atmosphérique
CO	: Monoxyde de Carbone
CO ₂	: Dioxyde de Carbone
COV	: Composés Organiques Volatils
DACCIWA	: Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa
GDAS	: Global Data Assimilation System
GFS	: Global Forecast System
GRIB	: Gridded Binary
HAP	: Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HYSPLIT	: Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IEEE	: Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens
N ₂ O	: Protoxyde d'Azote
NaCl	: Chlorure de Sodium
NCEP	: National Center for Environmental Prediction
NO	: Monoxyde d'Azote
NO ₂	: Dioxyde d'Azote
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NOMADS	: National Operational Model Archive & Distribution System
OECD	: Organisation de Coopération et de Développement Economique
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PM	: Particulate Matter
POLCA	: Pollution des Capitales Africaines
READY	: Système d'affichage et d'applications environnementales en temps réel
SIR	: Société Ivoirienne de Raffinage
SO ₂	: Dioxyde de Souffre

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Classes de stabilité de Pasquill	14
Tableau II: Conditions Météorologiques avec classes de stabilité de Pasquill associées.....	14
Tableau III: Flux rejetés dans l'atmosphère.	24
Tableau IV: Différents secteurs de vents et vitesses associées (en m/s) sur notre site d'étude.	25
Tableau V: Comparaison des niveaux de concentration de notre zone d'étude à ceux de l'OMS.	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Profil vertical de température de l'air (Anthony, 2003)	4
Figure 2: Structure de la couche limite atmosphérique (Turbelin G., 2000).	5
Figure 3: Stabilité et instabilité verticale de l'atmosphère (UVED, 2006).....	12
Figure 4: Comportement d'un panache de fumée en fonction de la stabilité thermique et de l'inversions de température (Diaf <i>et al.</i> , 2003).	13
Figure 5: Vue de la zone d'étude via google earth.....	16
Figure 6: Exemple de données météorologiques provenant de la base de données GDAS du 17 mars 2021.	17
Figure 7: Schéma des approches Eulérienne et Lagrangienne (Assamoi, 2011).	19
Figure 8: Extrait d'un exemple de données d'initialisation du modèle lagrangien de panache pour le gaz COV lors de la journée du 5 janvier 2021.	20
Figure 9: Évolutions des concentrations maximales lors des journées du 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars sur notre site d'étude des différents polluants : a) NO ₂ , b) CO, c) SO ₂ , d) HAP, e) COV et f) PM.....	29
Figure 10: Evolution de la vitesse du vent lors des journées du : a) 13 mars 2021, b) 13 janvier 2021, c) 12 février 2021 et d) 20 mars 2021.	32
Figure 11: Evolution des précipitations lors des journées du : a) 13 mars 2021, b) 13 janvier 2021, c) 12 février 2021 et d) 20 mars 2021.	33
Figure 12: Classes de stabilité lors des journées du : a) 13 mars 2021, b) 13 janvier 2021, c) 12 février 2021 et d) 20 mars 2021.	34

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le siècle dernier, l'explosion démographique, diversification des moyens de transport qui associe au développement des activités humaines de types industriels et agricoles ont entraîné une modification de notre environnement. Les émissions en cause dans la plupart des villes étaient principalement celles de soufre et les carbones noires, dues à l'utilisation du charbon dans les maisons et les industries (Anthony, 2003). Un des épisodes les plus marquants, le grand smog de Londres, survenu au mois de décembre 1952, dura cinq jours et aurait provoqué 3500 à 4000 décès (HMSO, 1954). C'est à cette période que l'on a commencé à mesurer sérieusement la pollution atmosphérique (Dab & Roussel, 2001).

La pollution atmosphérique est responsable, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) du décès de 2,4 millions de personnes dans le monde chaque année (Communiqué de l'OMS publié à Genève, 2006). Ainsi, la pollution atmosphérique semble être les premières perturbations environnementales directement ressenties par les riverains, constituant une menace. Cette situation de pollution entraîne de nombreuses conséquences sur l'homme et sur son environnement à savoir : les maladies respiratoires, l'acidification des cours d'eau, le réchauffement climatique et le trou d'ozone. Par conséquent, la réduction des émissions polluantes passe par la surveillance continue des sites 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 à l'avenir.

Dans la même logique, l'industrie s'est tournée vers la modélisation de la pollution atmosphérique dans le but d'améliorer la sécurité des sites de production et des sites hors production. C'est le cas notamment des centrales de fabrication d'enrobés à chaud pouvant être délocalisées au plus près des besoins autoroutiers. Ces centrales sont sources d'espèces chimiques particulières et gazeuses particulièrement polluantes : CO (Monoxyde de Carbone), NO₂ (Dioxyde d'Azote), SO₂ (Dioxyde de soufre), Poussières, COV (Composés Organiques Volatils) et HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) (Assamoi, 2011). De ce fait, il est urgent de disposer d'une législation en matière de santé publique pour caractériser l'impact des installations industrielles sur la zone locale, qu'il s'agisse d'un impact direct sur la sécurité des populations locales ou d'un impact indirect sur l'eau et les produits agricoles consommés.

Dans le domaine industriel, la modélisation est utilisée dans diverses applications, notamment le contrôle des émissions et la surveillance sur site. Chacune de ces méthodes à sa propre gamme d'échelles de temps et d'espace, ce qui ne permettra de considérer que les principaux phénomènes physiques. Par conséquent, des modèles pouvant simuler de grands mouvements de masse d'air seront utilisés pour des simulations à l'échelle continentale afin d'assurer un suivi

à longue distance des substances toxiques, tandis que le suivi des sites industriels doit prendre en compte la structure des plus petites turbulences pour expliquer l'évolution de la concentration autour d'un site.

C'est donc dans cette optique que cette étude dont le thème est :<< la dispersion locale de polluants atmosphériques en site industriels : cas d'une centrale enrobés à chaud Vridi (Abidjan, Côte d'Ivoire) a été initiée. Notre étude a pour objectif de simuler la dispersion de polluants atmosphériques rejetés par la centrale d'enrobés à chaud située à Vridi (Port-Bouët, Abidjan), usine de fabrication de bitume. Plus spécifiquement, il s'agit d'analyser les données météorologiques sur les 5 premiers mois de l'année 2021 ; simuler les niveaux de concentration via le modèle HYSPLIT et comparer les niveaux de concentration entre la zone d'étude et les seuils de l'OMS. Pour y parvenir, ce présent mémoire s'articule autour de trois parties :

- La première partie, a trait aux généralités sur la pollution atmosphérique ainsi que ses effets sur la santé et l'environnement ;
- La seconde partie porte sur les matériels et les méthodes utilisés tout en présentant notre zone d'étude ;
- Enfin, nous présentons nos résultats suivis d'une discussion dans la partie 3 ;
- Au terme de ce travail, une conclusion appelle les principaux résultats obtenus et en dégage les perspectives.

**PARTIE 1 : GENERALITES SUR LA POLLUTION
ATMOSMPHERIQUE**

1.1 Introduction

Cette partie présente brièvement la structure de l'atmosphère et le problème de la pollution de l'air pour esquisser le cadre de la réalisation de ces recherches à l'avenir. Après avoir insisté sur une certaine généralité concernant ce type de pollution, on présentera les différentes sources de pollution ainsi que les différents types de polluants. Cela nous permettra en suite d'aborder certains aspects liés à la problématique de la pollution industrielle. Par la suite, nous définirons avec leurs échelles spatiales les conditions météorologiques atmosphérique sur la santé des populations.

1.2 Atmosphère et pollution atmosphérique

1.2.1 Atmosphère

L'atmosphère est une couche d'air invisible, constituée d'un mélange gazeux qui enveloppe la terre. Ce mélange comprend surtout de l'azote (N_2 , 78% en volume) et d'oxygène (O_2 , 21% du volume) qui constituent à eux deux 99% de l'air sec. De la vapeur d'eau y est présente aussi à des taux variables. Pour le reste, soit 1 %, on y trouve de l'argon (Ar, presque 1 %), du dioxyde de carbone (CO_2 , 0,03 %), et des traces infimes d'une multitude d'autres gaz : néon, krypton, hélium, ozone, hydrogène.

Les propriétés de l'atmosphère varient selon l'altitude. En effet, l'atmosphère est constituée, en fonction de l'altitude, des strates suivantes : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. Ces dernières sont respectivement séparées par trois zones d'inversions thermiques qui sont : la tropopause, la stratopause et la mésopause. La strate au sein de laquelle s'effectue la dispersion des polluants soumis à notre étude est la troposphère, qui a une limite supérieure d'environ 15 km au-dessus de l'équateur. Dans cette couche, la température y décroît lentement avec l'altitude (6°C par kilomètre) pour atteindre -50 à -60 °C à son sommet. C'est la couche qui contient 80 % de la masse totale de l'air atmosphérique, dont la pression diminue avec l'altitude. C'est donc là que se forment les nuages et que les principaux phénomènes météorologiques liés à la dispersion atmosphérique des polluants, plus précisément dans la couche dite couche limite atmosphérique (CLA) (Florian, 2011). En cas de risques accidentels, le phénomène lié à la dispersion des polluants ne se produit que dans la couche inférieure de l'atmosphère, la couche limite atmosphérique, qui dans la plupart des cas a une épaisseur de plusieurs centaines de mètres (jusqu'à 1 à 2 km) (Anthony, 2003).

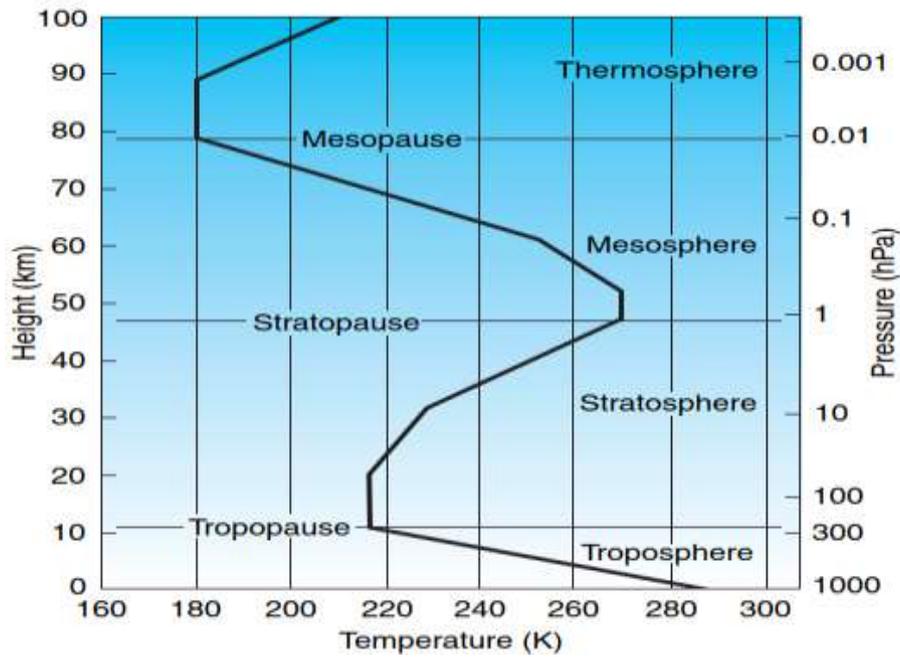


Figure 1: Profil vertical de température de l'air (Anthony, 2003)

Dans ce domaine, il est particulièrement important de connaître la structure du flux du vent et le champ de température, qui seront caractérisés par deux paramètres de base :

- le gradient vertical de vitesse ;
- le gradient vertical de température.

Ces gradients vont particulièrement être influencés principalement par deux mécanismes physiques :

- les effets de frottement de l'air sur le sol. Ces effets dépendent des conditions relatives à l'agencement des reliefs terrestres locaux ;
- les échanges de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Ces échanges vont varier avec le cycle diurne, les conditions météorologiques et la nature du sol.

Selon la situation géographique, ces mécanismes sont plus ou moins actifs et affectent l'épaisseur de la couche limite atmosphérique. Cela dépendra de la rugosité du sol et aussi de certaines conditions météorologiques (ensoleillement, nébulosité,). Ainsi, la couche limite atmosphérique peut être décomposée en deux parties qui sont présentées sur la figure 2 (Turbelin, 2000) :

Une couche de surface dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques dixièmes de l'épaisseur de la couche limite. La force de cisaillement et les flux de chaleur y sont supposés quasiment constants en fonction de l'altitude. La principale force motrice du flux rayonnant est le rayonnement solaire. La distribution verticale de la température provoque également le mouvement vertical des masses d'air de chauffage et de refroidissement à proximité du sol. Le vent est généré en raison de l'équilibre entre la pression, le frottement de l'air et la stratification thermique. La distribution verticale de la vitesse du vent est perturbée par le frottement de l'air au sol. La présence d'obstacles ou de discontinuités peut modifier la trajectoire du vent. Par conséquent, la couche de surface est une zone avec un fort gradient de vitesse du vent. Au sein de la couche de surface, la couche inférieure rugueuse peut être distinguée dans la partie inférieure. Cette zone est généralement caractérisée par une rugosité globale uniforme sur la longueur, qui est liée à la nature du chevauchement.

La couche dite de transition dépasse la couche précédente et s'étend jusqu'à la limite supérieure de la couche limite atmosphérique.

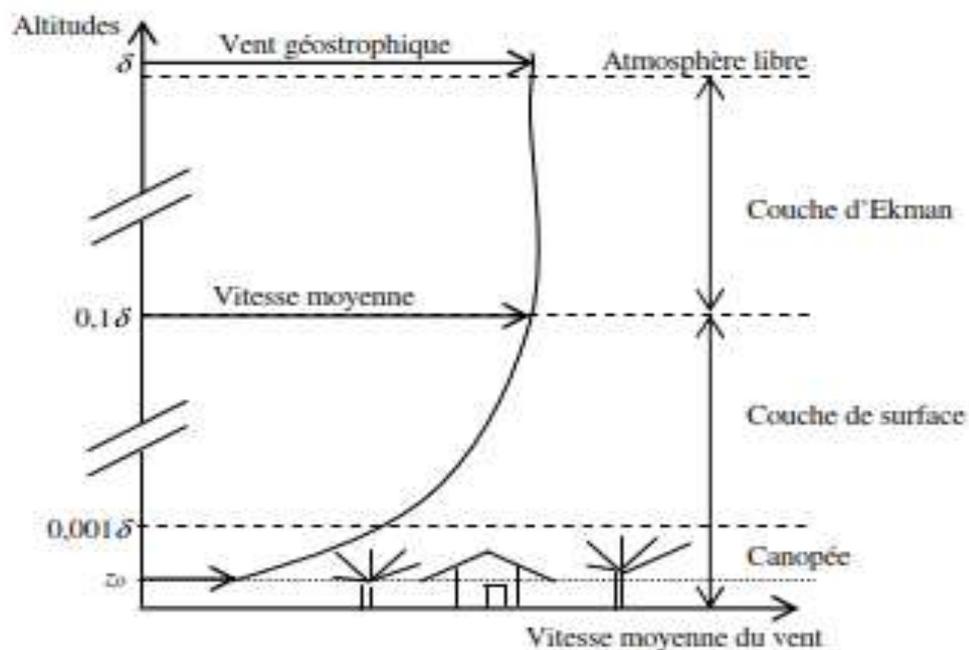


Figure 2 : Structure de la couche limite atmosphérique (Turbelin, 2000).

La force de cisaillement et le flux thermique y deviennent de plus en plus faible jusqu'à être négligeables au sommet. Le champ de vent est produit par l'équilibre entre la force de pression, la force de frottement et la force de Coriolis.

1.2.2 Pollution atmosphérique

Selon la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 1996, la pollution atmosphérique est définie comme : "l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives". Récemment, le bruit et la pollution atmosphérique semblent être les premières perturbations environnementales directement ressenties par les riverains, constituant une menace pour la santé humaine. (Makri & Stilianakis, 2008). Par conséquent, la pollution est généralement le résultat direct du progrès industriel des derniers siècles associée aux émissions continues de polluants liés au processus de combustion, et parfois même des émissions imprudentes (véhicules automobiles, installations industrielles, production d'énergie par combustion...). Depuis quelques dizaines d'années, des études ont montré un lien entre la dégradation de l'environnement et de la santé humaine et la présence de ces polluants dans l'atmosphère (FNORS, 2008 ; Anderson, 2009 ; Monk, 2009).

1.3 Sources de pollution

Les sources de pollution peuvent être soit naturelles (feux de forêt, éruptions volcaniques, ...), soit anthropiques, c'est-à-dire liées à l'activité humaine (Mayer, 1999). Le rejet de polluants peut être accidentel. A titre d'exemple, nous avons l'accident de Seveso en Italie en 1973 entraînant des conséquences dramatiques et souvent mortelles. Pour les rejets chroniques, les conséquences ne sont pas aussi directes et graves que les rejets accidentels, mais l'impact sur l'environnement et la société ne peut être ignoré.

1.3.1 Sources naturelles

Ce sont les sources qui provoquent le rejet de polluants, mais elles n'ont rien à voir avec les activités humaines. Parmi elles, on peut distinguer les sources biologiques des autres sources, et d'autres sources sont liées aux émissions d'origine naturelle liées à la biosphère. Les éruptions volcaniques s'accompagnent de la libération d'une très grande quantité de composés soufrés et sont la principale source naturelle de pollution, tout comme les incendies de forêt naturels et la génération de vagues de mer composées de cristaux de chlorure de sodium (NaCl). Finalement, des phénomènes naturels tels que les nuages de cendres volcaniques des éruptions volcaniques

sont également inclus dans la biogenèse (Arquès, 1998).

1.3.2 Sources anthropiques

Selon la définition, les sources de pollution d'origine humaine sont des sources de pollution liées aux activités humaines. Elle se divise en trois secteurs : l'industrie, le logement et les transports. En raison de processus de traitement ou de fabrication du produit, l'industrie est responsable du point de rejets. Dans le secteur résidentiel (chauffage de bureau), la combustion de combustible fossiles (charbon, lourd) génère beaucoup d'émissions polluants.

1.4 Problématique de la pollution industrielle

Les polluants d'origine industrielle 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, le transport et la transformation des substances oxydantes sont à l'origine des pluies acides. L'émission de 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 (Florian, 2011).

1.5 Différents types de polluants issus de l'activité humaine

Nous avons deux principaux polluants de l'atmosphère issus de l'industrie :

- Les polluants réglementés ;
- Les polluants organiques

1.5.1 Polluants réglementés

Plusieurs polluants sont actuellement réglementés par OMS et font l'objet de mesures continues dans l'air réalisées par les associations de surveillance de la qualité de l'air.

- ✓ Le dioxyde de soufre : SO₂

Ce gaz est produit naturellement par les volcans. Il peut également être produit par différents procédés industriels comme les industries métallurgiques et les raffineries de pétrole. Ce gaz, toxique pour tous les êtres vivants, aide à la création des particules (aérosols sulfuriques) qui empêchent les rayons solaires d'atteindre la terre, ainsi il joue un rôle de refroidissant de la planète (Pascal, 2009). Le dioxyde de soufre provient principalement de la combustion des combustibles fossiles (charbons, fuels, ...), au cours de laquelle les impuretés soufrées contenues dans les combustibles sont oxydées par l'oxygène de l'air en dioxyde de soufre (SO₂). Ce polluant gazeux est ainsi rejeté par de multiples 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, ...). La combustion du charbon est la plus grande source synthétique de dioxyde de soufre, représentant environ 50% des émissions annuelles mondiales, tandis que la combustion de carburant représente plus de 25 à 30%.

✓ Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est le polluant que l'on trouve en proportion la plus importante dans l'atmosphère urbaine (Boussouara, 2010)). C'est un gaz incolore inodore, très diffusible dans l'air. En milieu urbain, on observe les concentrations maximales de CO aux heures de pointe de circulation automobile, à proximité des autoroutes et des grandes artères urbaines (Dieme, 2011). C'est un indicateur du trafic routier.

✓ Oxyde d'azote : (NO_x)

Les NO_x, ou oxydes d'azote, comprennent essentiellement trois molécules : le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) et le protoxyde d'azote (N₂O). Ces molécules peuvent se former par une combinaison entre oxygène et azote de l'air lors d'une combustion, ou par oxydation de l'azote dans les combustibles. Les NO_x favorisent la formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère sous l'effet du rayonnement du soleil. Ils participent aussi au phénomène des pluies acides et à la formation de particules fines dans l'air ambiant. Les principales sources d'émissions de NO_x sont liées aux activités humaines :

- l'industrie : combustion d'énergies fossiles, fabrication de verre, métaux, ciment ;
- le transport routier et maritime à cause des gaz d'échappement ;

Ce sont des gaz fortement toxiques, contrairement au N₂O, qui résultent de l'oxydation de l'azote de l'air par l'oxygène à température élevée, phénomène qui se produit généralement

lors des processus de combustion, en particulier dans les moteurs à combustion interne et les centrales thermiques (Arquès, 1998).

✓ Matières particulaire (PM)

Les poussières sont généralement de fines particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Elles sont définies dans la directive 1999/30 / CE comme des <<particules traversant un trou d'entrée calibré avec un diamètre aérodynamique de 10 μm (dans le cas des PM_{10}) ou de 2,5 μm (dans le cas des $\text{PM}_{2,5}$) avec une efficacité de séparation de 50%. >> . Ces particules proviennent de sources naturelles telles que les éruptions volcaniques, la végétation (pollen, etc.), les incendies de forêt, ou de sources artificielles, telles que les gaz résiduaux industriels, la combustion de combustibles fossiles, etc. On distingue 4 types de particules (C.E, 2008):

- PM_{10} , particules en suspension dans l'air de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm ;
- $\text{PM}_{2,5}$ dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm , appelées « particules fines » ;
- $\text{PM}_{0,1}$ dont le diamètre est inférieur à 1,0 μm , appelées « particules très fines » ;
- $\text{PM}_{0,1}$ dont le diamètre est inférieur à 0,1 μm , appelées « particules ultrafines » ou nanoparticules.

Toutes ces particules sont nocives pour la santé humaine et la végétation. En revanche, seules les particules PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ sont réglementées et spécifiées par les directives de l'OMS. L'augmentation des concentrations en particules dans l'air est corrélée avec l'augmentation des maladies cardiovasculaires, des allergies, des cancers du poumon, ce qui conduit à une diminution de l'espérance de vie (Pascal, 2009).

✓ Ozone (O_3)

L'ozone est un gaz atmosphérique composé de trois atomes d'oxygène. C'est une espèce relativement stable. C'est une molécule remarquable qui joue à la fois le rôle de protecteur et de polluant de la vie sur terre. En effet, on le retrouve en grande quantité dans la stratosphère (entre 15 et 35 km de la surface de la terre) où il joue, de par ses propriétés physiques, le rôle d'absorbeur du rayonnement ultra-violet (UV) du soleil et protège les organismes terrestres de ce rayonnement au pouvoir destructeur. L'ozone agit donc comme un filtre invisible qui protège toutes les formes de vie contre les dangers d'une surexposition aux rayons UV. L'ozone stratosphérique représente 90 % de l'ozone contenu dans l'atmosphère (Bahino, 2018). L'ozone

est un polluant qui voyage et qui présente de ce fait plutôt une problématique régionale que locale.

1.5.2 Composés organiques

✓ Composés Organiques Volatils (COV)

Leur définition a été introduite par la directive 1999/13/CE: « tout composé organique, contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogène, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et bicarbonates inorganiques, ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières » (Zaher, 2012). L'émission anthropique des COV dans l'atmosphère provient de différentes sources, comme la combustion dans des moteurs ou des centrales thermiques.

✓ Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP, dangereux pour la santé car cancérogènes, sont des hydrocarbures aromatiques constitués de plusieurs cycles benzéniques (de 2 à 6, voire 8) accolés selon diverses formes. La majorité des HAP proviennent des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète de matière organique ou de composés carbonés. Les HAP sont la plupart du temps adsorbés sur des particules carbonées. Ils sont également détectés en phase gazeuse, en particulier dans les gaz d'échappement des moteurs à essence ; il s'agit dans ce cas des HAP de masse moléculaire la plus faible (jusqu'à 3 cycles), qu'on appelle HAP légers. Dans les émissions diesel, une grande partie de ces HAP légers est adsorbée sur les particules en compagnie de HAP de masse beaucoup plus grande (4 cycles et plus) : les HAP lourds.

1.6 Conditions météorologiques

Le phénomène de dispersion, qui signifie que les polluants sont dispersés à partir de la source, est primordial car il détermine l'accumulation ou la dilution des polluants dans l'atmosphère. La dispersion dépend de plusieurs paramètres, y compris les conditions météorologiques.

1.6.1 Vent

C'est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la diffusion des polluants. Il utilise la direction et la vitesse pour intervenir à différentes échelles. L'impact du vent sur la pollution de l'air varie considérablement en fonction de l'emplacement de la source. Généralement, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Des conditions de vents faibles dispersent peu les polluants et favorisent des concentrations importantes (Goyal & Rama Krishna, 2002 ; Elminir, 2005). En revanche, des conditions de vents importants augmentent la dispersion des polluants (Fenger, 1999 ; Moreira *et al.*, 2005). Cependant, des vents importants peuvent également entraîner un phénomène d'érosion conduisant à des émissions naturelles de polluants (Alfaro & Gomes, 2001 ; Panebianco *et al.*, 2016).

1.6.2 Stabilité de l'atmosphère

Si l'approximation (atmosphère peut être considérée en équilibre verticale ou hydrostatique) est vraie à l'échelle synoptique où les accélérations verticales sont très faibles, elle est moins vraie à l'échelle aérologique. Le soulèvement peut intervenir par convection si la particule d'air est réchauffée par une source de chaleur extérieure, ou par convection forcée lorsqu'elle rencontre les pentes d'un relief, la surface d'un front, ou une région de convergence des vents. Localisé dans la couche limite atmosphérique (CLA), la convection dite sèche est utilisée par les oiseaux et autre parapentes et planeurs (on parle de thermique).

Lorsque la condensation de la vapeur d'eau intervient, la convection est dite humide, le mouvement ascendant est renforcé par la chaleur latente libérée par la condensation. Si de fortes précipitations sont en jeu et si l'ascendance est forte, le mouvement vertical s'étend sur toute l'épaisseur de la troposphère : c'est la convection profonde illustrée par les cumulonimbus orageux pouvant atteindre et dépasser la tropopause. Notion de stabilité : analogue avec le comportement d'une sphère déplacée de sa position initiale sur divers profils (cf. Figure 3). L'équilibre est stable si, lorsque la particule est déplacée verticalement, celle-ci revient spontanément à sa position initiale dès qu'elle est relâchée. L'équilibre est instable si, lorsque la particule est déplacée verticalement, celle-ci s'éloigne irrémédiablement de sa position initiale dès qu'elle est relâchée. La particule est en instabilité conditionnelle si son équilibre est stable pour les petites perturbations (petits déplacements) et instable pour les grandes. Nous allons maintenant étudier le caractère stable ou instable de l'air atmosphérique dans diverses situations pour un air humide ou saturé. Pour analyser les mouvements verticaux, on se réfère à la

comparaison entre la température T de la particule et la température T_e de l'air environnant, ce qui revient à comparer le poids et la poussée d'Archimède via la force de flottabilité :

$$F = \frac{T - T_e}{T_e} mg \quad (1)$$

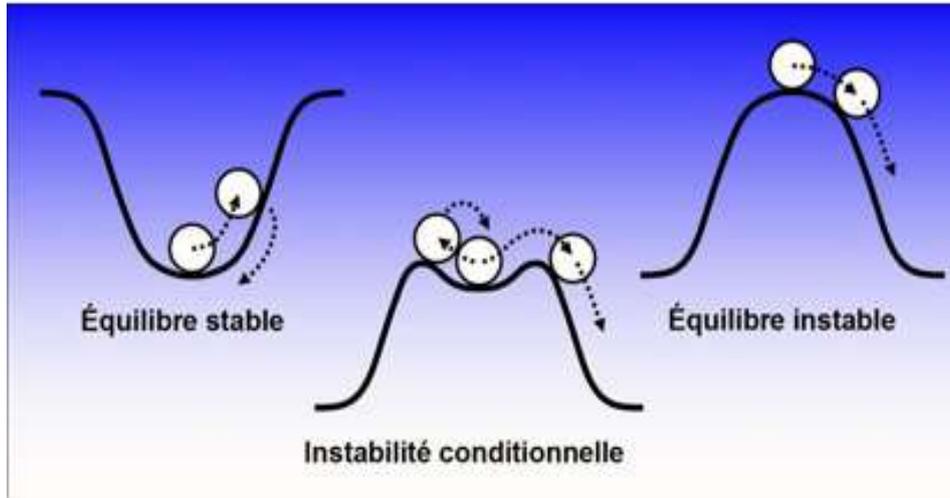


Figure 3 : Stabilité et instabilité verticale de l'atmosphère (UVED, 2006)

Action de la force de flottabilité en fonction des températures T et T_e .

$T > T_e$ Flottabilité positive et Accélération vers le haut, $T < T_e$ Flottabilité négative et Accélération vers le bas, $T = T_e$ Flottabilité nulle et Equilibre.

Dans chaque cas ci-après, la particule est soulevée puis relâchée à un niveau donné.

1.6.3 Gradient thermique

La limite de stabilité des couches atmosphériques à l'équilibre est de -1°C par 100 m de dénivelé en atmosphère sèche. Lorsque l'atmosphère est humide la valeur de ce gradient baisse jusqu'à environ $-0,5^\circ\text{C}/100$ m. En conséquence, lorsque le gradient est inférieur ou égal à $-0,5^\circ\text{C}$ par 100 m, il y a une diffusion normale dans l'atmosphère. La température en altitude est inférieure à la température au sol. Inversement, lorsque le gradient est supérieur à $-0,5^\circ\text{C}/100$ m, la diffusion est faible vers les niveaux élevés de l'atmosphère. Il est même possible, à partir du moment où le gradient devient positif d'avoir une température en haute altitude supérieure à celle à basse altitude : c'est le phénomène d'inversion de température. Il y a une couche d'air chaud en altitude moyenne qui s'oppose à la diffusion de l'air froid au sol (Diaf *et al.*, 2003).

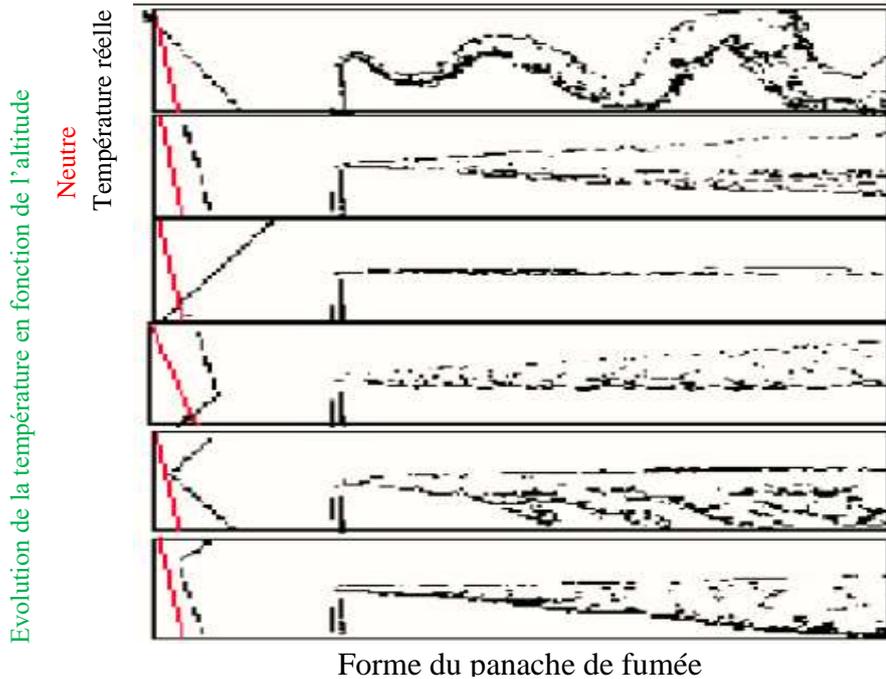


Figure 4: Comportement d'un panache de fumée en fonction de la stabilité thermique et de l'inversions de température (Diaf *et al.*, 2003).

1.6.4 Précipitation ou pluies

Un premier facteur rédhibitoire pour les situations les plus polluantes, est la pluie. Les précipitations lessivant le panache, les gaz et particules de polluants sont entraînés vers le sol (dépôt humide) par les gouttes dès leur l'émission (Assamoi, 2011).

1.6.5 Pression atmosphérique

Dans des conditions de basse pression (basse pression), la turbulence de l'air est généralement très forte et produira un bon état de dispersion. En revanche, pendant des situations anticycloniques (hautes pressions), la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants donc favorise leur accumulation (Dieme, 2011).

1.6.6 Critères de stabilité de Pasquill

Une classification de la stabilité atmosphérique peut être effectuée au travers des classes de Pasquill (Assamoi, 2011) qui varient de A à F : de l'atmosphère la plus instable à la plus stable. Les classes de stabilité peuvent être associées à des conditions météorologiques données (voir les tableaux I et II). La classification de Pasquill reflète le mélange du panache avec l'air

Partie 1 : Généralités sur la pollution atmosphérique

environnant. L'intensité de ce mélange se traduit par une augmentation ou une diminution de la concentration dans le panache.

Tableau I: Classes de stabilité de Pasquill

Vitesses de stabilité	A	B	C	D	E	F
Définition	Très instable	Instable	Légèrement instable	Neutre	Légèrement stable	Stable

Tableau II: Conditions Météorologiques avec classes de stabilité de Pasquill associées.

Vitesse du vent à 10m (m/s)	Ensoleillement			Nuit
	Fort	Modéré	Faible	Modeste
< 2	A	A-B	F	F
2-3	A-B	B	C	E
3-5	B	B-C	C	D
5-6	C	C-D	D	D
> 6	C	D	D	D

A-B : instables C-D : neutres B-C : instable

1.7 Impacts de la pollution de l'air

Depuis quelques décennies, la pollution atmosphérique est devenue une préoccupation importante pour la population et les pouvoirs publics. L'intérêt pour cette problématique complexe n'a fait que croître au fur et à mesure que la connaissance sur les effets de la pollution atmosphérique a évolué. Cette pollution a des effets néfastes sur l'environnement et sur la santé humaine, ce qui se traduit également en termes de coûts économiques (Chi, 2017)

1.8 Conclusion partielle

En somme, ce premier chapitre a permis de présenter le contexte dans lequel se positionne ce travail de mémoire. Aujourd'hui, alors que la mentalité des gens et la prise de conscience des dangers de la pollution de l'air ont changé, les autorités ont renforcé la surveillance et le contrôle. Au cours des 15 dernières années, il y a eu de plus en plus de mesures politiques

Partie 1 : Généralités sur la pollution atmosphérique

nationales et internationales. L'impact de ces mesures sur les constructeurs devient de plus en plus strict et ne doit pas dépasser les quotas d'émission (Ossouh, 2015). Le premier chapitre a également abordé les principales caractéristiques de la couche limite de surface, ainsi que divers aspects de la couche limite de surface de la dispersion atmosphérique afin de rassembler les concepts nécessaires à la compréhension de ce travail.

Le développement des ressources informatiques et de la puissance de calcul, pour des raisons de sécurité, les industriels utilisent de plus en plus la modélisation pour surveiller leurs sites tout en limitant leur impact sur les personnes autour des sites.

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons notre zone d'étude et nous proposons une méthodologie générale couplant sélection climatologique sur les 5 premiers mois de l'année récente 2021 de situations types représentatives de niveaux de pollution sur le site de fabrication de bitume à Vridi, avec dispersion locale des polluants émis.

2.2 MATERIEL

Dans cette étude, nous avons utilisé les éléments suivants :

- Base de données météorologiques et climatologiques (GDAS), dont un exemple de données d'archives est présenté sur la figure 6, fournie par la NOAA ;
- Modélisation de panaches lagrangiens issus de sources d'émission quasi-ponctuelles
- Google Earth : cartographie du site (exemple figure 5)

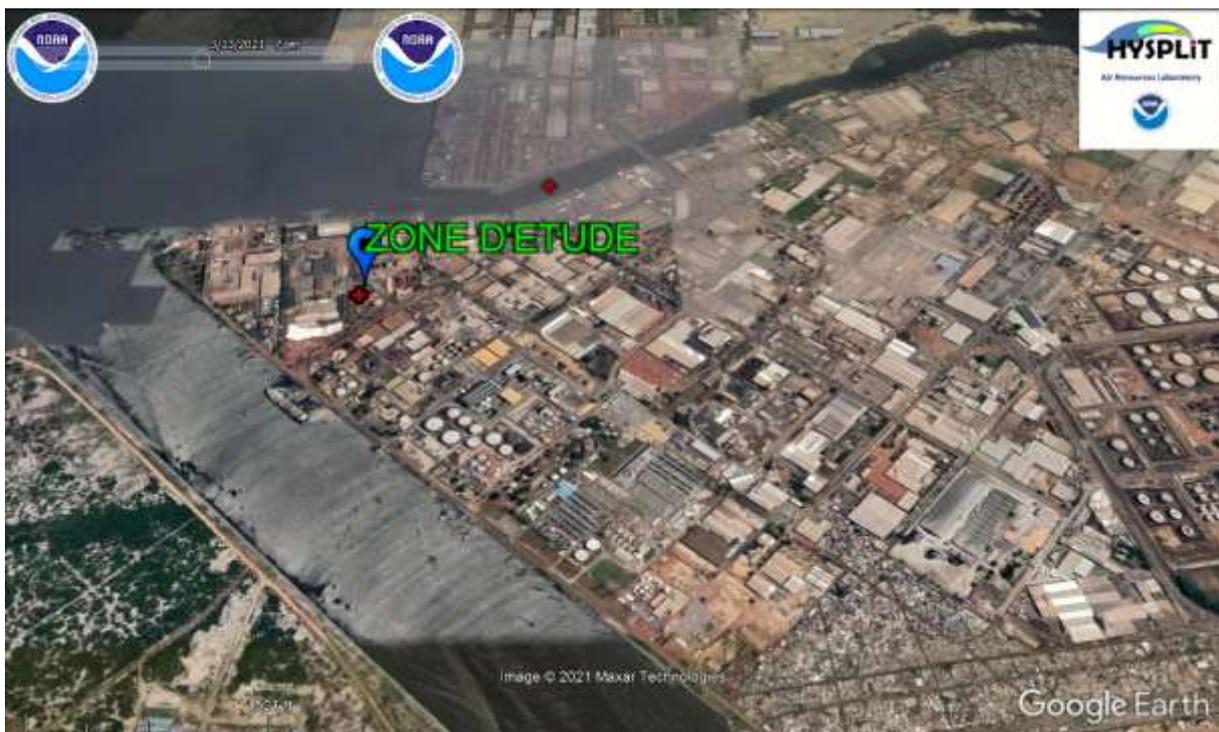


Figure 5: Image de la zone d'étude à travers google earth.

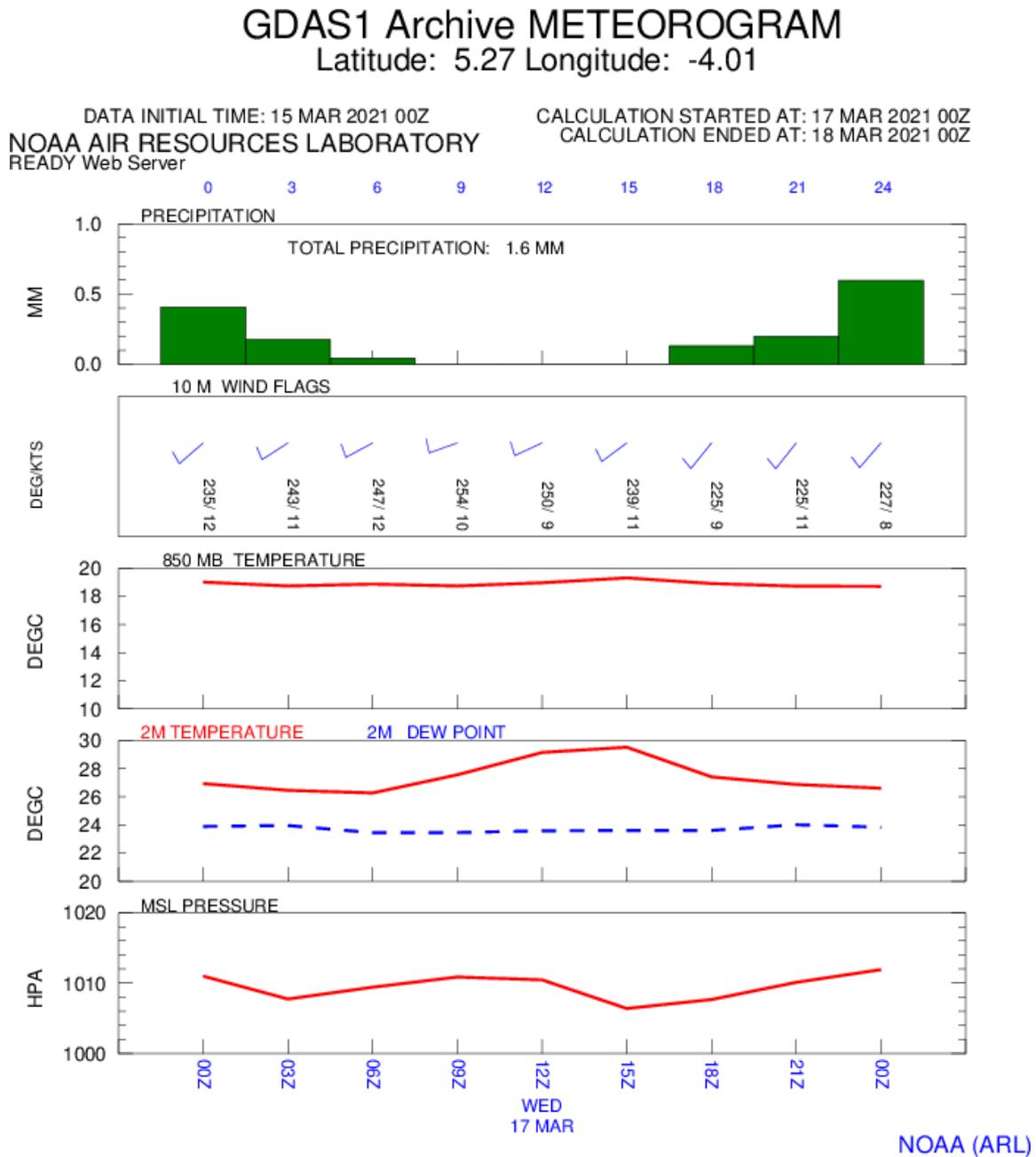


Figure 6: Exemple de données météorologiques provenant de la base de données GDAS du 17 mars 2021.

2.3 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est une zone de la ville d'Abidjan en Côte d'Ivoire, située à Port-Bouët sur la bande lagunaire, entre la lagune Ebrié et l'Océan Atlantique. Elle a pour longitude 4°01W et de latitude 5°27N.

2.4 Description de la base de données GDAS

Le système mondial d'assimilation de données (GDAS) est le système utilisé par le modèle du système de prévision mondial (GFS) du Centre National pour la Prédiction Environnementale (NCEP) pour intégrer les observations dans un espace de modèle quadrillé dans le but de démarrer ou d'initialiser des prévisions météorologiques avec des observations de données. GDAS ajoute les types d'observations suivantes à une grille en trois dimensions d'un modèle d'espace : les observations de surface, les données de ballons, données de profilage de vent, rapports d'avions, observations de bouées, observations radar et observations satellitaires. Les données de sortie GDAS maillées peuvent être utilisées pour initialiser le modèle GFS. En raison de la diversité des types de données assimilées, les données d'entrée sont disponibles dans une variété de formats de données, principalement sous forme binaire universelle pour la représentation des données météorologiques (BUFR) et binaire de l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE). GDAS est un modèle global de prévision météorologique de résolution horizontale $1^\circ \times 1^\circ$ (environ 100 km), qui interpole les données et qui fournit une très importante quantité d'informations météorologiques que l'on sélectionne selon ses besoins. Il y a deux approches pour l'exploitation des données : les approches Eulérienne et Lagrangienne (cf. Figure 7). Ainsi, dans l'approche eulérienne les concentrations sont calculées en intégrant les flux dans chaque maille, tandis que dans l'approche lagrangienne, les concentrations sont calculées en sommant les contributions de chaque « bouffée » de polluant émise dans le panache industriel (Assamoi, 2011). Le format du modèle GDAS est le Gridded Binary (GRIB) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

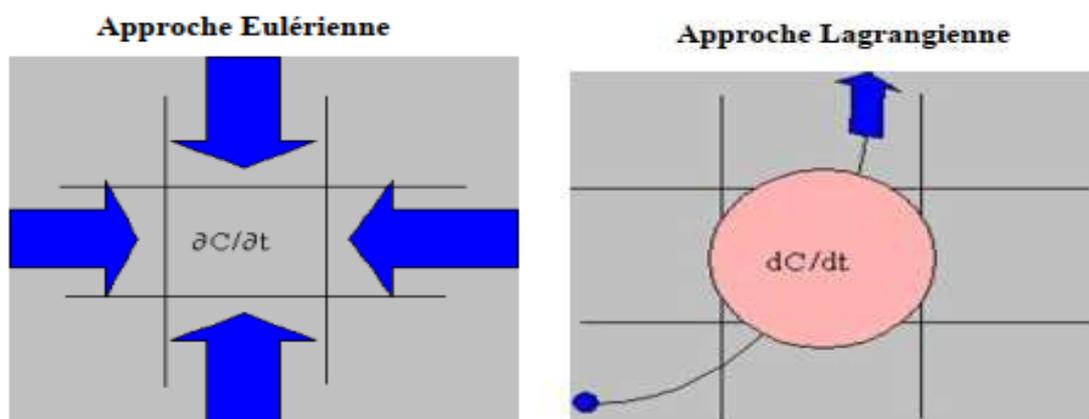


Figure 7: Schéma des approches Eulérienne et Lagrangienne (Assamoi, 2011).

2.4.1 Données utilisées

Le modèle HYSPLIT peut simuler la dispersion de polluants à toutes les échelles par l'approche eulérienne comme lagrangienne. Notre étude se situant dans un domaine autour et proche du point d'émission, le modèle lagrangien de simulation du panache de dispersion est pertinent pour notre propos. Ce modèle fonctionne en couplage avec GDAS. Ce dernier requiert certains paramètres pour son initialisation, lesquels tiennent compte à la fois de la météorologie évolutive chaque jour (épaisseur de la couche limite, nébulosité, vitesse et direction du vent, ...) au site et des conditions d'émissions, telles que vitesse d'éjection des polluants, la hauteur de la cheminée, la température d'éjection. GDAS récupère ensuite les informations nécessaires (classe de stabilité, élévation du soleil, heure du jour, ...) dans la base de données READY. Les polluants concernés par cette étude sont au nombre de six à savoir : Particulate Matter (PM), le dioxyde de Soufre (SO_2), le dioxyde d'Azote (NO_2), le monoxyde de Carbone (CO), les composés Organiques Volatils et les hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP). Les données nécessaires à chaque cas de panache simulé sont présentées sur la figure 8 suivante:

Source Term Parameters

Dispersion direction: Forward
 Backward (Change the default start time!) [More info](#) ▶

Release starting time (UTC):
Current time: 22:57
 year: 21 | month: 01 | day: 05 | hour: 7 | minute: 0 [More info](#) ▶

Source latitude: 5.270000 degrees [More info](#) ▶

Source longitude: -4.010000 degrees (West is negative) [More info](#) ▶

Release top: 100 meters AGL [More info](#) ▶

Release bottom: 0 meters AGL

Release quantity: 5670 g [More info](#) ▶

Release duration: 15 hour(s) | 0 minutes [More info](#) ▶

Runtime Parameters

Total duration: 15 hour(s) [More info](#) ▶

Averaging period/Output interval: 1 hour(s) [More info](#) ▶

Top of averaged layer: 100 meters AGL (must be >= 100m) [More info](#) ▶

Compute center-of-mass trajectory: Yes No [More info](#) ▶

Figure 8: Extrait d'un exemple de données d'initialisation du modèle lagrangien de panache pour le gaz COV lors de la journée du 5 janvier 2021.

2.5 METHODE

2.5.1 Description du modèle HYSPLIT

Le modèle HYSPLIT conçu par Air Resources Laboratory (ARL) est l'un des modèles les plus largement utilisés pour les calculs de trajectoires atmosphériques et de dispersions (Stein et al., 2015) et a probablement été le premier modèle de dispersion disponible pour la communauté scientifique via le Web en 1997. HYSPLIT, initialement développé dans les années 1980 (Draxler, 1982 ; Draxler & Hess, 1998), est un modèle lagrangien de particules / bouffées utilisé pour un large éventail d'applications allant du calcul de trajectoires simples de particules/gaz aux simulations complexes de transports, de dispersions, de transformations chimiques et de dépôts avec des échelles comprises entre 1 et 1000 kilomètres. Les données météorologiques GDAS utilisées par ce modèle sont produites par le Centre National pour la

Prédiction Environnementale (NCEP). À la fin des années 1990, de nombreuses nouvelles fonctionnalités ont été intégrées à HYSPLIT dans sa version 4 (Draxler & Hess, 1998), base des versions actuelles du modèle.

La méthode de calcul du modèle est une combinaison entre un cadre de référence mobile qui suit les parcelles aériennes à mesure qu'elles se déplacent de leur emplacement initial pour la simulation de l'advection, de la dispersion et du dépôt (lagrangien) et une grille tridimensionnelle fixe comme cadre de référence pour calculer les concentrations des polluants (eulérien). Certaines des applications comprennent le suivi et la prévision des rejets de matières radioactives, de cendres volcaniques, de fumée de feu de forêt, de poussières et de polluants provenant de diverses sources d'émission fixes et mobiles. Le modèle de dispersion HYSPLIT est utilisé de manière opérationnelle par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et d'autres agences fédérales pour exécuter des simulations complexes de transports atmosphériques.

Le modèle HYSPLIT a évolué en passant par plusieurs étapes durant cette dernière décennie. Dans la version initiale du modèle (Draxler & Taylor, 1982), un grand nombre de polluants segmentés ont été libérés près de la surface et leur déplacement a été suivi pendant plusieurs jours. Le transport est calculé sur la base d'observations de vent basées sur des données de détection brutes (non interpolées) deux fois par jour. Concernant la version suivante (Draxler & Stunder, 1988), des variables de mélange y ont été introduites en se basant sur le changement spatial et temporel du profil de diffusivité. La vision 3 de HYSPLIT permet le calcul de trajectoires ainsi que le transport et la dispersion de polluants à l'aide d'amas de fumées cylindriques qui croissent avec le temps et sont divisés par la taille de la grille des données météorologiques (Draxler, 1992).

La version 4 d'HYSPLIT a servi de base à la construction de pratiquement toutes les applications de modèles au cours des 15 dernières années. Il a été appliqué pour estimer les dépôts radiologiques de l'accident de Tchernobyl (Kinder, 2001) et pour simuler l'éruption volcanique de Rabaul (Draxler & Hess 1997, 1998). Dans ce cadre de ce travail, c'est la version 4 du modèle HYSPLIT qui a été utilisé.

2.5.1.1 Champs de données météorologiques

Les champs de sortie des modèles météorologiques ne peuvent généralement pas être utilisés directement par des modèles discrets sans beaucoup de pré-traitement, principalement parce que les données doivent être pré-interpolées sur divers systèmes de coordonnées verticales et même horizontale avant la sortie. HYSPLIT peut utiliser diverses données de modèles météorologiques dans ses calculs, allant de la méso-échelle à l'échelle mondiale. Au lieu d'utiliser différentes versions de HYSPLIT pour traiter les variables et les changements structurels de chaque source de données météorologique, il est préférable d'utiliser un préprocesseur personnalisé pour convertir chaque source de données météorologique dans un format compatible HYSPLIT.

2.5.1.2 Advection

Le principe de tout modèle lagrangien est de calculer la dispersion en traçant des particules ou des bouffées. Du fait de l'advection moyenne du vent, le calcul de la nouvelle position au pas de temps $(t + \Delta t)$ détermine la trajectoire que suivra la particule ou la bouffée. En d'autres termes, le vecteur de changement de position $P'(t + \Delta t)$ qu'au cours du temps est calculé à partir de la moyenne des vecteurs de vitesse tridimensionnels \mathbf{V} par rapport à leurs positions initiale (Kindo *et al.*, 2017) par la relation suivante :

$$P'(t + \Delta t) = P(t) + V(p, t)\Delta t \quad (2)$$

Ainsi la position finale est donnée par la relation :

$$P(t + \Delta t) = P(t) + 0,5[V(P, t) + V(P', t + \Delta t)]\Delta t \quad (3)$$

Ou (Δt) est le pas de temps d'intégration qui peut varier au cours de la simulation, $p(t)$ la position initiale $P(t)$ et $P'(t + \Delta t)$ la position de première approximation.

2.5.1.3 Dispersion

Les équations de dispersion sont formulées en termes de composantes de vitesse turbulente. Dans l'implémentation de particules 3D du modèle, le processus de dispersion est représenté en ajoutant une composante turbulente à la vitesse moyenne obtenue à partir des données météorologiques (Kindo *et al.*, 2017) à savoir :

$$X_{final}(t + \Delta t) = X_{moy}(t + \Delta t) + U'(t + \Delta t)\Delta t \quad (4)$$

$$Z_{final}(t + \Delta t) = Z_{moy}(t + \Delta t) + W'(t + \Delta t)\Delta t \quad (5)$$

$$U'(t + \Delta t) = R\Delta t U'(t) + U''(1 + R(\Delta t))^{1/2} \quad (6)$$

$$R(\Delta t) = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{LX}}\right) \quad (7)$$

$$U'' = \sigma_u \lambda \quad (8)$$

U' et W' correspondent aux composantes de la vitesse turbulente, X_{moy} et Z_{moy} sont les composantes moyennes de la position des particules, et X_{final} et Z_{final} sont respectivement les positions finales horizontale et verticale. R est l'autocorrélation de la vitesse turbulente, σ_u est l'écart-type de la vitesse turbulente, T_{LX} une constante lagrangienne, et λ est un nombre généré par ordinateur compris entre 0 et une moyenne σ de valeur égale à 1.

2.5.1.4 Dépôts

Il y a trois façons d'éliminer les particules dans l'atmosphère dans ce modèle : dépôts secs, dépôts humides et désintégration radioactive. Dans le modèle HYSPLIT, l'entraînement est paramétré par la constante d'élimination β (s^{-1}) (Draxler *et al.*, 2013), où le dépôt D de chaque particule de masse M au pas de temps Δt est définie par la relation suivante :

$$D = M\{1 - \exp[\beta_y + \beta_g + \beta_c + \beta_b]\} \quad (9)$$

Où M représente la masse du polluant contenue dans chaque particule ou bouffée. La masse de la particule diminue de D à chaque pas de temps. $\beta_y, \beta_g, \beta_c$ et β_b Représentent les constantes de temps respectivement pour les dépôts sec, humide pour les gaz, humide pour les particules dans les nuages, et humide pour les particules en dessous des nuages. Les différences constantes de temps présentées précédemment peuvent être explicitées.

2.5.1.5 Initialisation du modèle HYSPLIT

Avant de lancer le modèle, les coordonnées géographiques du site (latitude 5,2652076 N et longitude : -4,014539 W) et la hauteur de la colonne atmosphérique entre 0 et 100 m au-dessus du sol sont configurées en premier lieu. La hauteur du cheminée (13 m), la vitesse d'éjection des gaz (0,01 m/s) constituent le fichier d'initialisation du modèle HYSPLIT. Le tableau III ci-

dessous présent les flux rejetés dans l'atmosphère lors d'une journée de fonctionnement de l'usine entre de 7 heures à 22 heures.

Tableau III: Flux rejetés dans l'atmosphère.

Polluants	Flux rejetés kg/h (g/s)	Masse rejetée en 15h (g)
CO	1,477 (0,4103)	5670
NO ₂	0,488 (0,1356)	7322,4
SO ₂	0,277 (0,0631)	3407,4
Poussières	0,038 (0,0106)	572,4
COV totaux	0,378 (0,105)	22156,2
HAP	0,00001 (0,0000003)	0,162

Les valeurs consignées dans le tableau III ci-dessus ont été trouvées en multipliant d'une part les flux obtenus (en g/s) par 3600 secondes pour trouver la quantité de polluant émis en gramme (g) en 1 heure, puis d'autre part en multipliant cette dernière valeur par 15 heures pour aboutir à la quantité de polluant émise pendant 15 heures.

2.5.2 Choix des jours de modélisation

Compte tenu du volume de données à trait par le modèle sur les 5 premiers mois de cette année 2021, il a été question d'étudier plutôt des cas extrêmes de pollutions.

A cet effet, la première sélection a été de tenir compte des secteurs habilités afin de prendre les directions de vent favorables. Par suit, il a fallu tenir compte des cas extrêmes de force de vent : vent faible à nul et fort. En fin les précipitations ont été prises en compte en retenant la précipitation faible à nulle et précipitation forte. En somme nous nous retrouverons avec quatre cas à modéliser :

- (i) vent faible (nul) et précipitations faibles (nulles)
- (ii) vent faible (nul) et précipitations fortes
- (iii) vent fort et précipitation faibles (nulles)
- (iv) vent fort et précipitations fortes

Nous nous altérerons par la suite à dire quelle sont les quatre journées qui correspondent à ces quatre cas évoqués précédemment.

2.5.3 Réduction des jours à partir des données pluviométriques

Pour cette première sélection, nous avons rejeté les conditions pluviométriques favorables à la sédimentation des particules au sol, peu intéressantes du point de vue de la pollution atmosphérique. En considérant tous les jours des 5 premiers mois de l'année 2021 soit 151 jours, nous constatons qu'il y a seulement 10 jours sans précipitation fournis par la base de données GDAS sur notre zone d'étude à Vridi (Port-Bouët Abidjan) : 4 en janvier, 2 en février, 1 en mars 1 en avril et 2 en mai

2.5.4 Analyse des données de vent sur le site

a. Direction du vent

Les données de vents sont des données tri-horaires, soit un total de 1208 valeurs sur les 5 premiers mois de l'année 2021. Ces vents, classés selon 16 directions de provenance et selon leur force en m/s, ont été consignés dans le tableau IV. Ce tableau montre que la classe [2,0-4,0 m/s] est la plus fournie. Ainsi, compte tenu de la limite de vent faible de 6 m/s, nous avons remarqué que les vents inférieurs à 6 m/s représentent un peu plus de 98,84% de la situation.

Tableau IV: Différents secteurs de vents et vitesses associées (en m/s) sur notre site d'étude.

]0,0 ;2,0[[2,0 ;4,0[[4,0 ;6,0[[6,0 ;8,0[Total
Nord		1	0	0	1
Nord-Nord-Est	1	1	0	0	2
Nord-Est	2		0	0	2
Est-Nord-Est	2	1	0	0	3
Est	3	0	0	0	3
Sud-Sud-Ouest	13	247	193	5	158
Est-Sud-Est	1	0	1	0	2
Sud-Est	2	12	2	1	17
Sud-Sud-Est	5	38	17	0	60
Sud	10	123	70	3	206
Sud-Ouest	10	176	130	2	318
Ouest-Sud-Ouest	10	69	30	2	111
Ouest	3	9	3	0	15
Ouest- Nord-Ouest	2	1	2	1	6
Nord-Ouest	2	2	0	0	4
Nord-Nord-Ouest	0	0	0	0	0
s/s-total	66	680	448	14	1208
Fréquence (%)	5,46	56,29	37,09	1,16	100

b. Force du vent

Après avoir caractérisé les vents sur notre zone d'étude, nous considérons maintenant les secteurs et les forces de vents propices à la situation de pollution. D'une part, ce sont des vents compris entre 1 et 6 m/s. D'autre part, après avoir visité notre site de recherche, nous avons constaté qu'en fait ce sont des secteurs Ouest, Ouest-Sud-Ouest, Sud-Ouest, Sud Sud-Ouest, Ouest-Nord-Ouest et Nord-Ouest (représentés en gras dans le tableau IV) qui rejettent des polluants dans les zones résidentielles.

Sur les 1208 valeurs que nous pouvons utiliser, seuls 612 cas sont favorables pour la pollution sur notre site (en raison de la direction de leur source), qui représente 50,66 % des données tri-horaires de vent.

2.5.5 Croisement des journées sans précipitation avec les secteurs de vent favorables

La centrale fonctionnante entre 7 heures et 22 heures, après croisement des journées de faibles précipitations, des secteurs de vent favorables et des vitesses de vents appartenant à la classe [0,0 ; 6,0 m/s], nous retenons 18 situations extrême en matière météorologiques susceptibles de favoriser des journées de pollution sur les 5 premiers mois en 2021 sur notre site d'étude (Vridi-Port Bouet) : 4 en janvier, 6 en février, 3 en mars, 3 en avril et 2 en mai.

2.5.2.4 Sélection des jours favorables à la pollution

En tenant compte du fait que nous voulons voir l'influence de la vitesse du vent sur le panache et aussi les niveaux de concentration auxquelles les habitants de cette zone sont exposés, nous avons jugés nécessaire de retenir 4 situations extrême de la pollution sur notre site d'étude (Vridi) qui sont : 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars dont le vent provient dans des secteurs suivants : Sud-Ouest, Sud Sud-Ouest et Ouest-Nord-Ouest.

2.6 Conclusion partielle

Cette partie a permis de présenter le modèle HYSPLIT. Le modèle HYSPLIT peut être configuré pour décrire correctement divers scénarios. En générale, le modèle HYSPLIT est un système complet pour l'estimation de trajectoires simples de parcelle d'air, de dispersions

complexes et de simulations de dépôts. Cette partie a également été consacrée à la méthodologie générale couplant sélection climatologique sur les 5 premiers mois de l'année récente 2021.

Le couplage HYSPLIT-GDAS nous permettra de voir facilement l'évolution des concentrations dans notre site industriel pour une analyse plus précise lors des quatre situations retenues (13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars).

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Ce travail a pour objectif de simuler la dispersion de polluants atmosphériques rejetés par la centrale d'enrobés à chaud, usine de fabrication de bitumes située à Vridi (Abidjan) sur les 5 premiers mois de l'année 2021 et plus lors des quatre journées "extrêmes". Dans la présente étude, la simulation s'est effectuée à l'aide du modèle HYSPLIT sur les quatre jours évoqués. Cette session présente donc les évolutions des concentrations de ces 4 jours et une étude comparative entre les niveaux de concentrations obtenus et les valeurs limites de l'OMS.

3.2 Evolutions des concentrations des polluants

Nous allons présenter les résultats dans le cas des quatre journées que nous avons évoquée dans le chapitre précédent, à savoir le 13 janvier, le 12 février, le 13 mars et le 20 mars 2021

3.2.1 Evolutions des concentrations des six polluants lors des journées du 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars 2021.

La figure 9 ci-dessous présente les évolutions des concentrations maximales au cours des quatre journées sur notre zone d'étude. En générale, on observe que les concentrations des six polluants ont les mêmes allures au cours des quatre journées. La seule différence est les niveaux de concentrations.

- La figure 9.a.) présente les évolutions des concentrations maximales de NO₂ lors des journées du 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars. Les concentrations de NO₂ obtenues varient de $4,8 \cdot 10^{-4}$ à $1,2 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 13 janvier, $2,6 \cdot 10^{-4}$ à $7,2 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ le 12 février, $3,1 \cdot 10^{-4}$ à $2,2 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 13 mars et $5,3 \cdot 10^{-4}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 20 mars.
- La figure 9.b) présente les évolutions des concentrations maximales de monoxyde de carbone pour les quatre jours. Les concentrations de CO oscillent entre $1,5 \cdot 10^{-3}$ à $3,6 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 13 janvier, $7,9 \cdot 10^{-4}$ à $2,2 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 12 février, $9,4 \cdot 10^{-4}$ à $6,7 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 13 mars et $1,6 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ à $5,4 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 20 mars.
- La figure 9.c) présente les évolutions des concentrations maximales du dioxyde de soufre pour les quatre jours. Les concentrations maximales de SO₂ fluctuent entre $2,2 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ à $5,5 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ le 13 janvier, de $1,2 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ à $3,4 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ le 12 février, de $2,5 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ à $1 \cdot 10^{-3}$ mg/m³ le 13 mars et de $2,5 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ à $8,4 \cdot 10^{-4}$ mg/m³ le 20 mars.

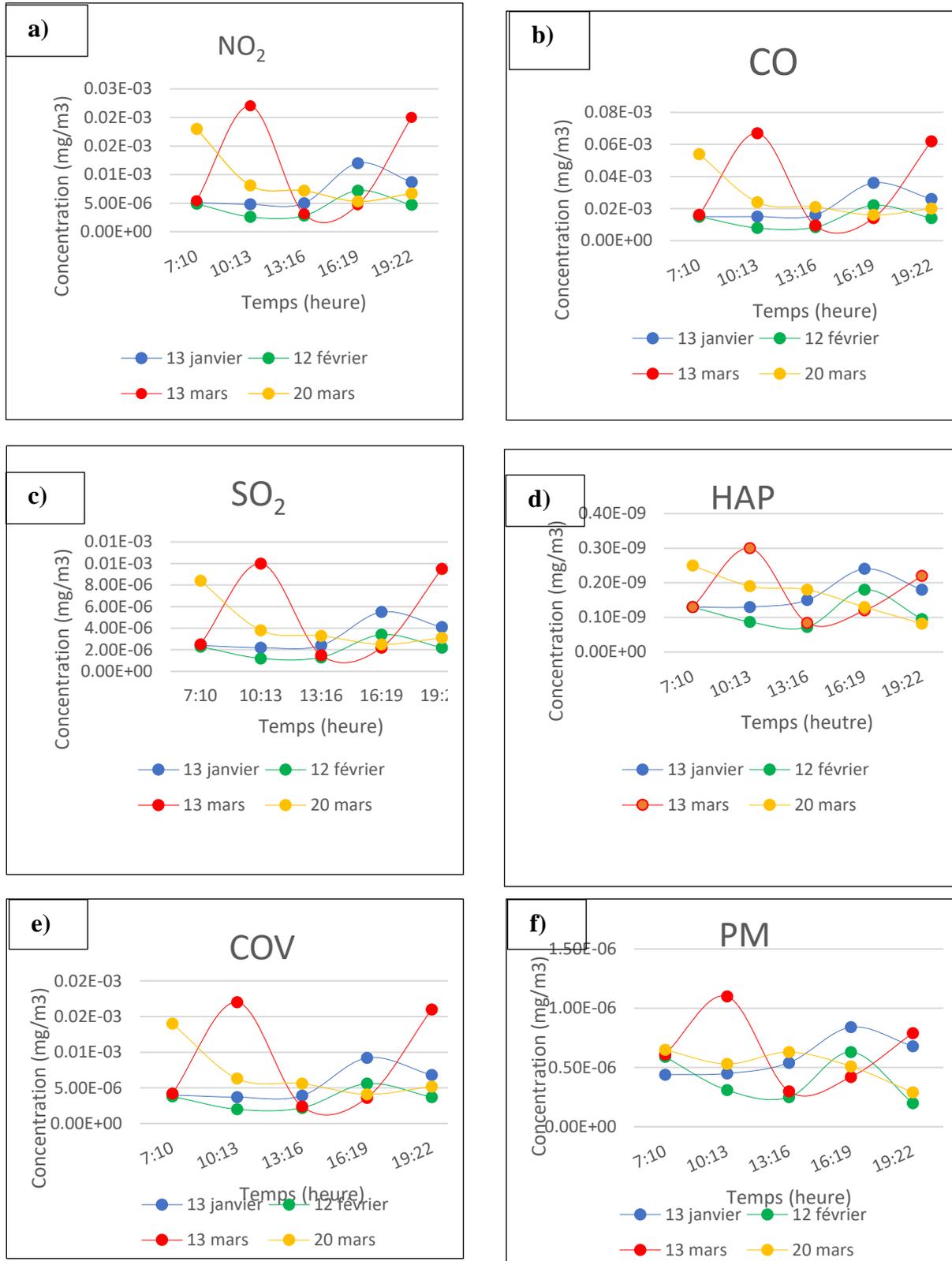


Figure 9: Évolutions des concentrations maximales lors des journées du 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars sur notre site d'étude des différents polluants : a) NO₂, b) CO, c) SO₂, d) HAP, e) COV et f) PM.

- La figure 9.d) présente les évolutions des concentrations maximales des hydrocarbures aromatiques polycycliques sur nos quatre jours. Les concentrations des HAP fluctuent entre $1,3 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ et $2,4 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 13 janvier, $7,2 \cdot 10^{-09} \text{ mg/m}^3$ et $1,8 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 12 février, $8,4 \cdot 10^{-09} \text{ mg/m}^3$ et $3 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 13 mars, $8,2 \cdot 10^{-09} \text{ mg/m}^3$ et $1,8 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 20 mars.
- La figure 9.e) présente les évolutions des concentrations maximales de COV lors des journées du 13 janvier, 12 février, 13 mars et 20 mars 2021 sur notre zone d'étude. Les concentrations maximales varient de $3,7 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ à $9,2 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ le 13 janvier, de $2 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ à $5,6 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ le 12 février, de $2,4 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ à $1,7 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$ le 13 mars et de $4,1 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ à $1,4 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$ le 20 mars.
- La figure 9.f) présente les évolutions des concentrations maximales de PM lors des quatre jours. Les concentrations maximales des particules varient $4 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ à $9,3 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ le 13 janvier, $2 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ à $5,7 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ le 12 février, $6,5 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ à $1 \cdot 10^{-04} \text{ mg/m}^3$ le 13 mars et $2,9 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ à $6,5 \cdot 10^{-05} \text{ mg/m}^3$ le 20 mars.

Nous avons fait une remarque générale. Quel que soit le polluant considéré, les évolutions des concentrations lors des 4 journées retenues sont les mêmes, à la seule différence des valeurs des concentrations. Ainsi, notre analyse pourrait se limiter à un polluant pris sur les 4 journées.

Nous nous attèlerons à expliquer pourquoi nous observons de telles évolutions des concentrations des polluants lors de ces 4 journées. La méthodologie sera d'analyser à partir des paramètres météorologiques tels que le vent, les précipitations et les critères de stabilité de l'atmosphère de Pasquill (voir figures 10, 11 et 12).

En combinant les paramètres vent et précipitations, nous pouvons évoquer que les hausses des concentrations de 7h à 13h lors de la journée du 13 mars 2021 pourraient s'expliquer par les vents faibles ($\sim 2 \text{ m/s}$) associés à des précipitations non existantes dans un contexte de stabilité de l'atmosphère. Ainsi les particules, une fois émises de leur source stagnent et s'accumulent non loin de leur source provoquant une hausse des concentrations. Après 13h, des précipitations interviennent associées à une hausse des vitesses de vent ($\sim 4 \text{ m/s}$), ce qui entraîne un lessivage de l'atmosphère à travers un dépôt humide des polluants d'où leur baisse significative. Enfin, après 19h lors de cette journée du 13 mars 2021, les précipitations s'estompent et le vent baisse également et nous nous retrouvons dans la configuration de 7h à 13h d'où la hausse des concentrations des polluants.

Pendant la journée du 20 mars 2021, les concentrations des polluants baissent tout au long de la journée avec de fortes valeurs relevées pendant la période 7h-10h. Au démarrage de la centrale, il faut noter que l'atmosphère est stable avec des conditions de vent faible (~ 2 m/s) et sans précipitation ce qui engendre une accumulation des polluants qui ne sont pas dispersés, d'où la forte concentration relevée. Par la suite, les conditions météorologiques changent avec l'apparition de faibles précipitations toujours avec des vents constants ($\sim 2,5$ m/s) dans une atmosphère neutre. Ainsi, le dépôt humide intervient et jusqu'à l'arrêt de fonctionnement de cette usine d'où la baisse des concentrations qui a été relevée.

Enfin, pendant les journées du 13 janvier et 12 février 2021 les concentrations des polluants après être sensiblement également dès l'entrée en service de la centrale évoluent de la même manière. L'analyse des paramètres météorologiques montre que ces deux journées sont marquées par de faibles précipitations même si les précipitations de la journée du 13 janvier sont plus importantes que celles du 12 février 2021. De plus, le vent est sensiblement constant lors de cette journée du 12 février (~ 4 m/s) tandis qu'il baisse lors du 13 janvier passant de 5 m/s vers 7h à 1 m/s vers 15h et ensuite repart à la hausse jusqu'à atteindre 4 m/s. L'évolution de ces deux paramètres justifient la similitude de l'évolutions des concentrations des polluants lors de ces deux journées. Les écarts observés entre ces deux journées, proviennent de la faiblesse du vent à partir de 15h lors de journée du 13 janvier et surtout de l'atmosphère qui est neutre. Ainsi les concentrations des polluants suivent une allure sinusoïdale avec les valeurs plus élevées le 13 janvier que le 12 février 2021.

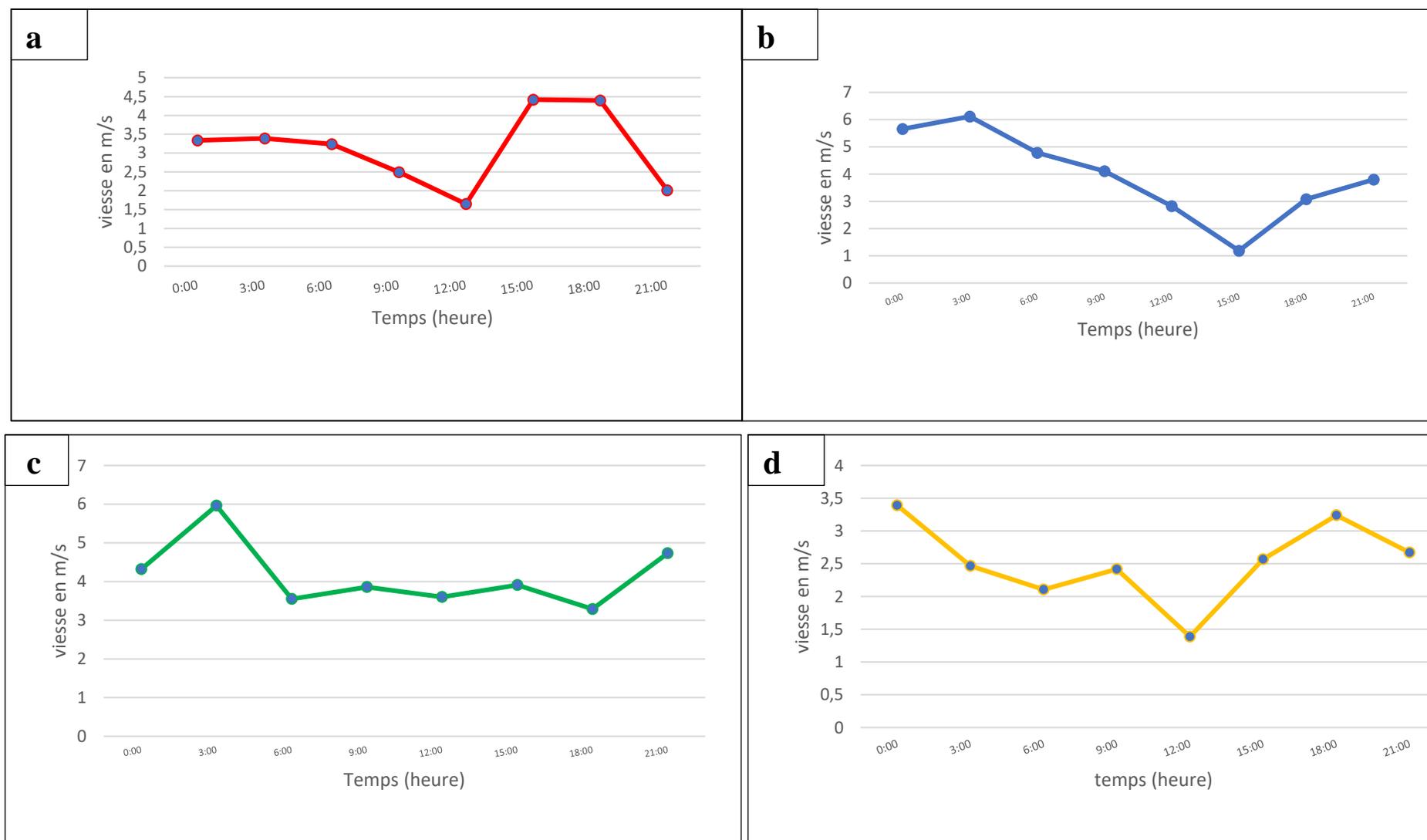


Figure 10: Evolution de la vitesse du vent lors des journées du : a) 13 mars 2021, b) 13 janvier 2021, c) 12 février 2021 et d) 20 mars 2021.

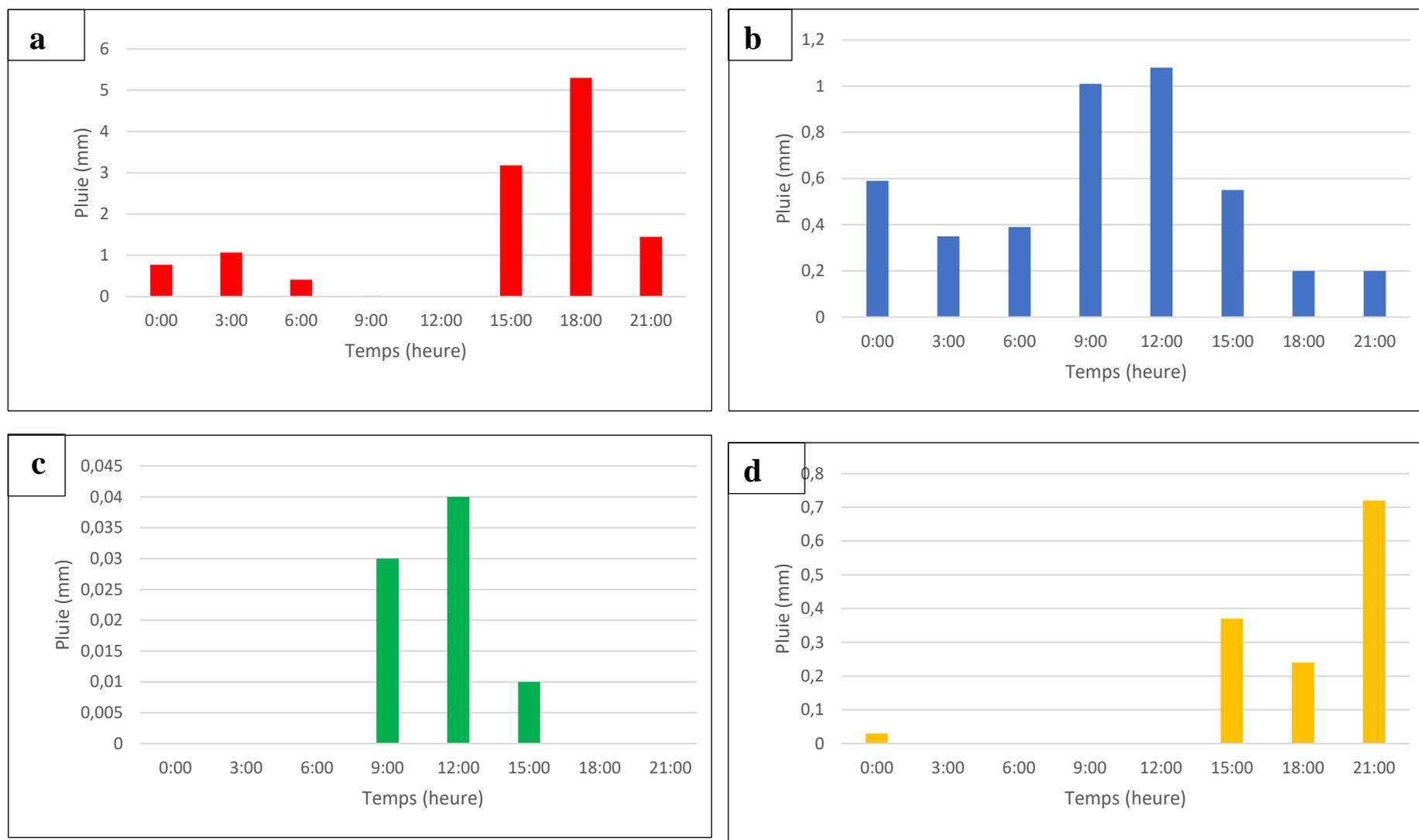


Figure 11: Evolution des précipitations lors des journées du : a) 13 mars 2021, b) 13 janvier 2021, c) 12 février 2021 et d) 20 mars 2021.

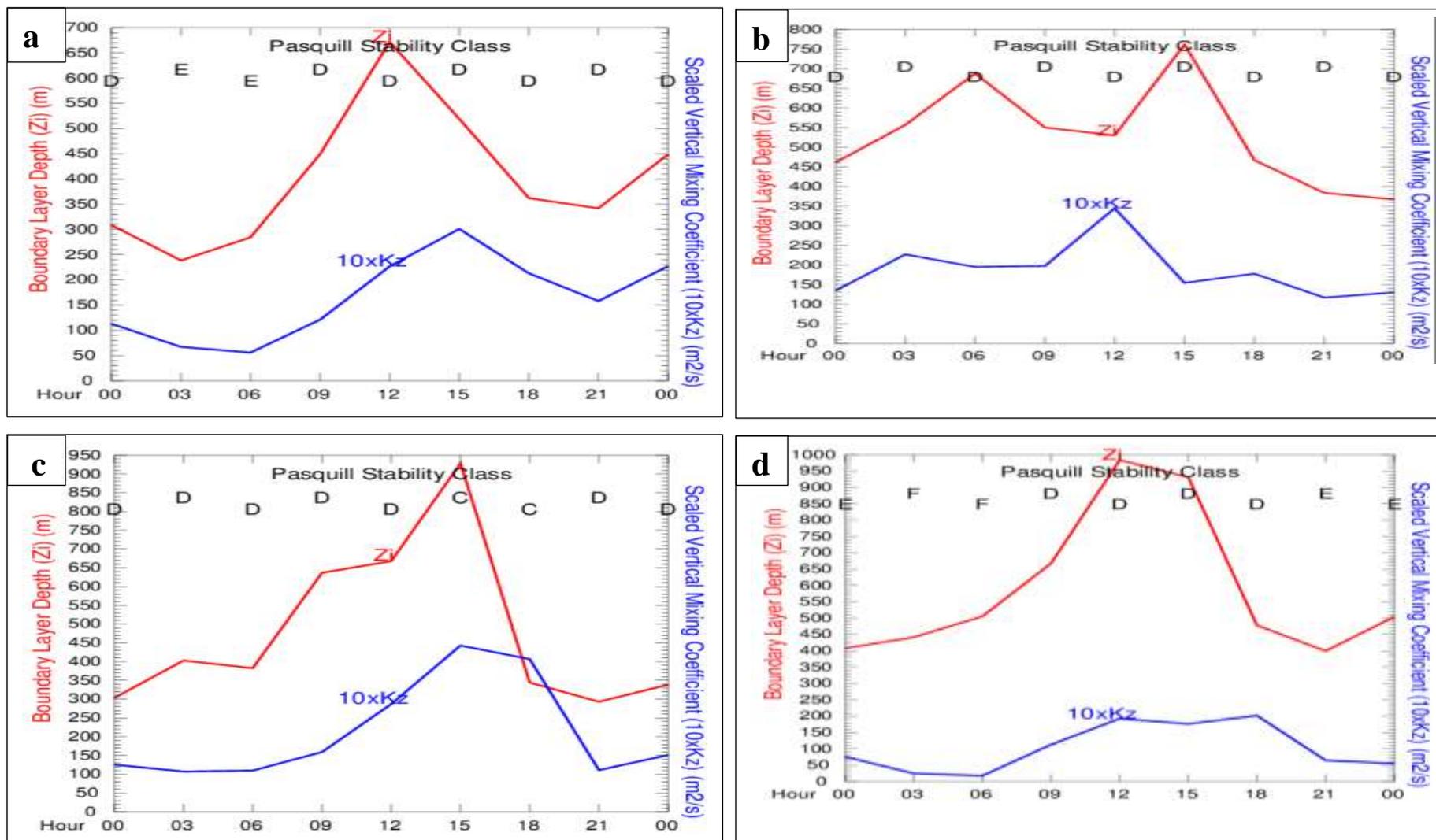


Figure 12: Classes de stabilité lors des journées du : a) 13 mars 2021, b) 13 janvier 2021, c) 12 février 2021 et d) 20 mars 2021.

3.3 Comparaison des niveaux de concentrations de notre zone d'étude à ceux de l'OMS

Tableau V: Comparaison des niveaux de concentration de notre zone d'étude à ceux de l'OMS.

Concentrations maximales en mg/m³							
	13 Janvier	12 février	13 mars		20 mars	Ordre de grandeur	OMS
NO₂	4,8.10 ⁻⁰⁴ - 1,2.10 ⁻⁰³	2,6.10 ⁻⁰⁴ - 7,2.10 ⁻⁰⁴	3,1.10 ⁻⁰⁴ - 2,2.10 ⁻⁰³		5,3.10 ⁻⁰⁴ - 1,8.10 ⁻⁰³	10 ⁻⁰³	2,0.10 ⁻⁰¹
CO	1,5.10 ⁻⁰³ - 3,6.10 ⁻⁰³	7,9.10 ⁻⁰⁴ - 2,2.10 ⁻⁰³	9,4.10 ⁻⁰⁴ - 6,7.10 ⁻⁰³		1,6.10 ⁻⁰³ - 5,4.10 ⁻⁰³	10 ⁻⁰³	3,0.10 ⁻⁰²
SO₂	2,2.10 ⁻⁰⁴ - 5,5.10 ⁻⁰⁴	1,2.10 ⁻⁰⁴ - 3,4.10 ⁻⁰⁴	2,5.10 ⁻⁰⁴ - 1,0.10 ⁻⁰³		2,5.10 ⁻⁰⁴ - 8,4.10 ⁻⁰⁴	10 ⁻⁰³	2,0.10 ⁻⁰²
PM	4,0.10 ⁻⁰⁵ - 9,3.10 ⁻⁰⁵	2,0.10 ⁻⁰⁵ - 5,7.10 ⁻⁰⁵	6,5.10 ⁻⁰⁵ - 1,0.10 ⁻⁰⁴		2,9.10 ⁻⁰⁵ - 6,5.10 ⁻⁰⁵	10 ⁻⁰⁴	5,0.10 ⁻⁰² (PM ₁₀)

Ce tableau ci-dessus présente la comparaison des niveaux de concentration entre la zone d'étude et ceux de l'OMS. Nous constatons que les limites OMS des 4 polluants ci-dessous sont de l'ordre de 10⁻⁰² à 10⁻⁰¹ mg/m³ et plus précisément 2.10⁻⁰² mg/m³ pour le SO₂, 2.10⁻¹ mg/m³ pour le NO₂, 3 10⁻⁰² mg/m³ pour le CO et 5.10⁻⁰² mg/m³ pour les PM₁₀ sur les 24 heures d'exposition. En comparant nos valeurs obtenues et celles de l'OMS nous constatons que les concentrations maximales des polluants de notre étude sont 10 à 100 fois plus petite que celles de l'OMS : ces 4 jours extrêmes ne correspondent donc pas à des cas de pollutions.

3.4 Comparaisons avec des mesures de concentration in situ dans les capitales africaines

Ce paragraphe présente une comparaison entre les valeurs de concentrations maximales obtenues dans cette étude et celles obtenues lors de campagnes de mesure lors des projets POLCA (Pollution des Capitales Africaines) et DACCIWA (Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa) en mettant l'accent sur les polluants NO₂, et SO₂.

Notons que certaines concentrations sont exprimés en ppb et nous avons convertis en mg/m³ selon les correspondances suivantes (Bahino, 2018) :

- 1 µg.m⁻³ NO₂ = 0,53 ppb NO₂ (soit 1 ppb NO₂ = 1,88 µg.m⁻³ NO₂ = 1,88.10⁻³ mg.m⁻³)

- $1 \mu\text{g.m}^{-3} \text{SO}_2 = 0,38 \text{ ppb SO}_2$ (soit $1 \text{ ppb SO}_2 = 2,62 \mu\text{g.m}^{-3} \text{SO}_2 = 2,62.10^{-3} \text{ mg.m}^{-3}$)

Au cours de notre période d'étude, la concentration maximale de NO_2 varie de $4,8.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $1,2.10^{-3} \text{ mg/m}^3$ (0,25 ppb à 0,63 ppb) le 13 janvier, $2,6.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $7,2.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ (0,13 ppb à 0,38 ppb) le 12 février, $3,1.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $2,2.10^{-3} \text{ mg/m}^3$ (0,16 ppb à 1,70 ppb) le 13 mars et $5,3.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $1,8.10^{-3} \text{ mg/m}^3$ (0,28 ppb à 0,98 ppb) le 20 mars. En comparaison avec les autres sites urbains africains, les concentrations maximales de NO_2 sont comparables à celles trouvées par Adon *et al.* (2016) à Dakar (Sénégal) du janvier 2008 à décembre 2009 ($3,9.10^{-2} \text{ mg.m}^{-3}$ - $8,2.10^{-2} \text{ g.m}^{-3}$) et à Bamako (Mali) du juin 2008 à décembre 2009 ($1,7.10^{-2} \text{ mg.m}^{-3}$ - $4,2.10^{-2} \text{ g.m}^{-3}$) sur le site industriel.

Concernant les concentrations maximales de SO_2 , elles varient de $2,2.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $5,5.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ (0,09 ppb à 0,21 ppb) le 13 janvier, de $1,2.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $3,4.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ (0,08 ppb à 0,13 ppb) le 12 février, de $2,5.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à 1.10^{-3} mg/m^3 (0,09 ppb à 0,38 ppb) le 13 mars et de $2,5.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ à $8,4.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ (0,11 ppb à 0,32 ppb) le 20 mars. En Côte d'Ivoire (Bahino, 2018) a montré que les concentrations moyennes de SO_2 obtenues sont $1 \pm 0,3 \text{ ppb}$, $1,3 \pm 0,6 \text{ ppb}$, $1,2 \pm 0,5 \text{ ppb}$ et $1,1 \pm 0,5 \text{ ppb}$ respectivement pour les sites feux domestiques Abidjan (Côte d'Ivoire) du Janvier 2015 à Mars 2017, trafic Abidjan (Côte d'Ivoire) du Janvier 2015 à Avril 2017, feux de décharge Abidjan (Côte d'Ivoire) du Janvier 2015 à Mars 2017 et trafic de Cotonou (Benin) du Décembre 2014 à Avril 2017. Ces niveaux de concentrations sont comparables à ceux trouvés sur les 4 jours dans cette étude. Cette brève comparaison indique que les niveaux élevés des polluants observés dans les villes africaines.

Quand nous prenons les concentrations maximales des matières particulaires (PM) calculées par le modèle HYSPLIT, elles sont similaires à celles mesurées sur le site de Néguela à Bamako ($5,4.10^{-4} \text{ mg/m}^3$ pour les $\text{PM}_{2,5}$) par Kindo *et al.*, (2017).

3.5 Conclusion partielle

En résumant ce travail, on peut dire que la dispersion des polluants atmosphériques et particulaires dans l'atmosphère est très complexe, car une analyse complète de ce phénomène nécessite tous les paramètres météorologiques. Les résultats montrent que :

- ✓ La fumée est concentrée à la source entre 16 heures et 19 heures (13 janvier et 12 février), entre 07 heures et 10 heures le 20 mars, entre 10 heures et 13 heures et entre 19 heures et 22 heures le 13 mars,
- ✓ L'évolution de la concentration maximale dépende du vent, de la précipitation et aussi de la stabilité de l'atmosphère,
- ✓ Les valeurs de concentration maximale obtenues lors des 4 jours extrêmes sont inférieurs aux normes en vigueur de l'OMS d'où ces 4 jours extrêmes ne correspondent donc pas à des cas de pollutions.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion et Perspectives

Dans ce travail de Master, il était question de simuler la dispersion des six polluants (NO_2 , SO_2 , CO , COV , HAP , PM) provenant des émissions de la centrale d'enrobés à chaud située à Vridi lors des 4 cas extrêmes : (i) vent faible (nul) et précipitations faibles (nulles), (ii) vent faible (nul) et précipitations fortes, (iii) vent fort et précipitations faibles (nulles), (iv) vent fort et précipitations fortes. Les objectifs spécifiques se déclinaient en deux (2) axes. Dans le premier axe, il était question d'analyser les données météorologiques sur les 5 premiers mois de l'année 2021, le second axe visait à simuler les niveaux de concentration via le modèle HYSPLIT et comparer les niveaux de concentration entre la zone d'étude et les seuils de l'OMS.

Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé les concentrations atmosphériques des six polluants obtenus par le modèle HYSPLIT sur les quatre journées c'est-à-dire : le 13 janvier, 12 février, 13 mars et le 20 mars 2021. Les résultats montrent que les concentrations maximales du monoxyde de carbone sur les quatre jours sont plus abondantes que les autres polluants et que la fumée est beaucoup concentrée à la source entre 16 heures et 19 heures (13 janvier et 12 février) avec les concentrations maximales $2,6 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$, $1,6 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$ respectivement, entre 07 heures et 10 heures le 20 mars ($5,4 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$), entre 10 heures et 13 heures ($6,7 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$) et entre 19 heures et 22 heures ($6,2 \cdot 10^{-03} \text{ mg/m}^3$) le 13 mars. Ces niveaux des concentrations maximales sont liés à la stabilité de l'atmosphère et aussi les facteurs météorologiques tels que le vent, la précipitation. Toutefois, les activités industrielles sur la zone d'étude pourraient expliquer ces résultats. Les concentrations maximales les plus faibles sont observées au niveau des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) avec les concentrations maximales qui fluctuent entre $1,3 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ et $2,4 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 13 janvier, $7,2 \cdot 10^{-09} \text{ mg/m}^3$ et $1,8 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 12 février, $8,4 \cdot 10^{-09} \text{ mg/m}^3$ et $3 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 13 mars, $8,2 \cdot 10^{-09} \text{ mg/m}^3$ et $1,8 \cdot 10^{-08} \text{ mg/m}^3$ le 20 mars. Aussi, les valeurs des concentrations maximales obtenues sont inférieures à la norme actuelle de l'OMS de sorte que l'impact sur la santé de la population doit être ignoré à court terme. Il ressort de ce travail que les émissions atmosphériques de la centrale ne présentent pas à eux seuls des impacts de pollution sur la population, et que la dispersion est principalement due à la stabilité du vent et de l'atmosphère. Au cours de cette étude, la dispersion des polluants gazeux dans l'atmosphère est très complexe, car pour mener une analyse complète de ce phénomène, tous les paramètres météorologiques doivent être maîtriser.

Conclusion et Perspectives

En perspectives, étant donné que nous avons utilisé qu'un seul modèle, nous ne pouvons pas voir les limites du modèle HYSPLIT. On peut simuler avec deux modèles différents et comparer les résultats obtenus. En vue de continuer la surveillance des niveaux de concentrations des polluants gazeux, il serait bon de simuler sur d'autres sites notamment site industriel de Yopougon.

REFERENCES

- Adon M., Yoboué V., Galy-Lacaux C., Liousse C., Diop B., Doumbia E.H.T., Gardrat E., Ndiaye S.A. & Jarnot C. (2016). Measurements of NO₂, SO₂, NH₃, HNO₃ and O₃ in West African urban environments. *Atmospheric Environment*, 135: 31-40.
- Alfaro S.C. & Gomes L. (2001). Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 :18075-18084.
- Anderson H.R. (2009). Air pollution and mortality: A history *Atmospheric Environment*, 43 : 142-152.
- Anthony U.N.G. (2003). Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multi sources. Thèse de Doctorat, Université Paris 7 (Denis Dederot, France), 104 p.
- Arquès P. (1998). Pollution de l'air : causes, conséquences, solutions, Aix-en-Provence, éditeur Edisud, 207 p.
- Assamoi E.M. (2011). Méthodologie générale d'analyse climatologie-dispersion locale de polluants en sites industriels : cas d'une centrale d'enrobés à chaud. Rapport-enrobé, Toulouse (France), 52 p.
- Bahino D.J.E. (2018). Analyse de la qualité de l'air dans les zones urbaines en Afrique : caractéristique de la pollution gazeuse des espèces chimique NO₂, SO₂, HNO₃ et O₃ à Abidjan et Cotonou. Thèse De Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny (Cocody, cote d'ivoire), 243 p.
- Boussouara K. (2010). Etude des émissions polluantes et des moyens de dépollution dans les moteurs à combustion interne. Thèse de doctorat, Université de Constantine, Algérie, 211 p.
- Conseil Européen. (2008). Directives 2008/50/CE du parlement européen et du conseil concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. pp. 1-44.
- Chi V.N. (2017). Assimilation de données et couplage d'échelles pour la simulation de la dispersion atmosphérique en milieu urbain. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Lyon , France, 303 p.

- Dab W. & Roussel I. (2001). L'air et la ville : les nouveaux visages de la pollution : les nouveaux visages de la pollution atmosphérique. Chapitre 5 : surveiller la qualité de l'air, Hachette Littératures, 218 p.
- Diaf N., Bouchaour M. Merad L. & Benyoucef B. (2003). Paramètre influençant la dispersion de polluants gazeux. *Energie renouvelables*, 2003 : 139-142.
- Dieme D. (2011). Caractérisation physicochimique et étude des effets toxiques sur des cellules pulmonaires BEAS-2B des polluants particulaires de la ville de Dakar (Sénégal). Thèse de doctorat, Université du Littoral (Côte d'Opale, France), 159 p.
- Draxler R.R. & Hess C.D. (1997). Description of the HYSPLIT_4 modeling system NOAA tech. Memo. ERL-224. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 24 p.
- Draxler R.R. & Hess G.D. (1998). Vue d'ensemble du système de modélisation HYSPLIT_4 de trajectoires, dispersion et dépôt. *Australian Meteorological Magazine*, 47 :295-308.
- Draxler R.R. & Stunder BJB. (1988). Modélisation des profils de concentration de traceur vertical de CAPTEX. *Journal of Applied Meteorology*, 27 : 617-625.
- Draxler R.R. (1992). Trajectoires intégrées lagrangiennes à particules uniques hybrides : Version 3.0 - *Guide de l'utilisateur et description du modèle*, 27 : 195,84.
- Draxler R.R. & Taylor AD. (1982). Horizontal dispersion parameters for long-rang transport modelling. *Journal of Applied Meteorology*, 21(3) : 367-372.
- Draxler R.R. (2013). Simulations modèles de l'Organisation météorologique mondiale de la dispersion et des dépôts de radionucléides provenant de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. *Journal Environmental Radioactivity*, 139 :172-184.
- Elminir H.K. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of The Total Environment*, 350: 225-237.
- Fenger J. (1999). Urban air quality. *Atmospheric Environment*, 33 :4877-4900.
- Florian V. (2011). Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Lyon (France), 368 p.

- FNORS. (2008). Santé et environnement dans les régions de France. Rapport du Ministère de la santé, de la Jeunesse, des Sports et de la vie associative, (France) 100 p.
- Goyal P. & Rama K. (2002). Dispersion of pollutants in convective low wind a case study of Delhi. *Atmospheric Environment*, 36: 2071-2079.
- HMSO. (1954). Mortality and morbidity during the London smog of December 1952. Report on Public Health and Medical subjects n°95 (London, Royaume-Uni), 34 p.
- Jacque B. (2002). Problématique de l'environnement dans les transports terrestres. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (I.N.R.E.T.S.), Bron Cédex (France), 5 p.
- Kinder AM. (2001). Simulation du dépôt humide de radio césium de l'accident de Tchernobyl. Thèse de maîtrise, Ecole supérieure d'ingénierie et de gestion, Air Force Institute of Technology, (Sisteron, France), 108 p.
- Kindo C.O., Diarra C. & Ba A. (2017). Simulation of aerosol dispersion of biomass lights in the baoulé loop in Mali by the HYSPLIT model. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 6(4): 180-190.
- Makri A. & Stilianakis N. I. (2008). Vulnerability to air pollution health effects. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211(3-4): 326-336.
- Mayer H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33: 4029-4037.
- Monk P.S. (2009). Atmospheric composition change: global and regional air quality. *Atmospheric environment*, 43: 5268-5350.
- Moreira D.M., Tirabassi T. & Carvalho J.C. (2005). Plume dispersion simulation in low wind conditions in stable and convective boundary layers. *Atmospheric Environment*, 39 : 3643-3650.
- Ossouhou M.G. (2015). Simulation d'un cas de pollution urbaine et impact environnement. Mémoire de Master en Physique de l'Atmosphère, Université Félix Houphouët Boigny-Cocody, Côte d'Ivoire, 78 p.
- Panebianco J., Mendez M. & Buschiazzi D. (2016). PM₁₀ emission, sandblasting efficiency and vertical entrainment during successive wind-erosion events: A wind-tunnel approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 161 : 335-353.

- Pascal L. (2009). Effet à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité. *Revue française d'allergologie*, 49 : 466-476.
- Stein A.F., Ngan F., Draxler R.R. & Chai T. (2015). Utilisation potentielle des ensembles de transport et modèles de dispersion pour applications de prévision. *Wea. Prévisions*, 30 :639-655.
- Turbelin G. (2000). Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent. Thèse de Doctorat, l'Université d'Evry – Centre d'Etudes de Mécanique (d'Ile-de-France), 195 p.
- Zaher A.B. (2012). Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs – méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution. Thèse de Doctorat , Ecole Nationale Supérieure des Mines (Saint-Etienne, France), 214 p.

RÉSUMÉ

Cette étude a pour but de simuler la dispersion de polluants atmosphériques (NO₂, SO₂, CO, COV, HAP, PM) provenant des émissions de la centrale d'enrobés à chaud à Vridi dans la commune de Port-Bouët. L'année choisie est 2021 (5 premiers mois) car c'est l'année la plus récente. Les méthodes utilisées dans cette étude consistaient à initialiser le modèle HYSPLIT couplé à la base de données météorologiques GDAS. Pour y avoir, il a fallu récupérer les données du modèle météorologique d'archive GDAS sur le site d'étude (Vridi), définir les jours extrêmes pour la simulation. Les résultats montrent que les concentrations maximales des six polluants sont élevées le 13 mars de 7h-13h et de 19h-22h que les autres jours. Aussi, l'évolution des concentrations dépende du vent, de la précipitation et de la stabilité de l'atmosphère. Par comparaison avec les valeurs seuils de pollution atmosphérique, il ressort qu'aucun cas de pollution due à la centrale les jours de simulation ne peut être signalé autour du site.

Mots-clés : dispersion locale, polluants atmosphérique, Vridi, HYSPLIT, centrale d'enrobés à chaud.

ABSTRACT

The purpose of this study is to simulate the dispersion of atmospheric pollutants (NO₂, SO₂, CO, VOC, PAH, PM) from emissions from the hot asphalt plant at Vridi in the town of Port-Bouët. The year chosen is 2021 (first 5 months) because it is the most recent year. The methods used in this study consisted in initializing the HYSPLIT model coupled with the GDAS meteorological database. To do so, we had to retrieve data from the GDAS meteorological model archive on the study site (Vridi), define the extreme days for the simulation. 'The results show that the maximum concentrations of the six pollutants are high on March 13 from 7 am to 1 pm and from 7 pm to 10 pm than on other days. Also, the evolution of concentrations depends on wind, precipitation and the stability of the atmosphere. By comparison with the threshold values for atmospheric pollution, it appears that no case of pollution due to the plant on the simulation days can be reported around the site.

Keywords: local dispersion, atmospheric pollutants, Vridi, HYSPLIT, hot asphalt plant.