



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Matière

# MÉMOIRE DE MASTER

Domaine des Sciences de la Matière  
Filière de Physique  
Spécialité Physique des Matériaux

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**Nour elhouda SAYAD**

**Maroua DENDOUGA**

Le : 20-9-2020

## Modélisation des polluants

---

### Jury :

Dr	Djamel BELAMRI	M.C. « B »	Université Med Khider-Biskra	Président
Pr	Ferhate MOHAMMEDI	Professeur	Université Med Khider-Biskra	Rapporteur
Dr	Nadjoua BENSALAH	M.C. « B »	Université Med Khider-Biskra	Examineur

# Dédicace

Nous *dédions* ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

- ◆ Nos très chers parents.
- ◆ Nos frères et sœurs.
- ◆ Tout ceux qui ont a aidé de près ou de loin dans notre travail.

## Table des matières

Remerciements	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des nomenclatures	vii
Introduction générale	1

### Première partie : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

#### Chapitre 1: Généralité sur les pollutions atmosphériques

1.1. Définition de la pollution atmosphérique.....	2
1.2 les types d'émetteurs .....	3
1.2.1. les sources non-anthropiques ou naturelles.....	3
1.2.2. les sources anthropiques .....	3
1.3. Les polluants atmosphériques.....	4
1.3.1. Les polluants primaires .....	4
1.3.2 .Les polluants secondaires .....	6
1.4. Différentes échelles de la pollution .....	6
1.5. Généralités sur les mouvements d'air dans la basse atmosphérique .....	7
1.5.1. La couche-limite atmosphérique .....	8
1.6. Emissions, transformation et dépôts de polluants .....	9
1. 7. Facteurs météorologiques influent la dispersion des polluants .....	10
1.7.1. La pression atmosphérique .....	10
1.7.2. La température .....	10
1.7.3. Vent .....	11
1.7.4. Les précipitations .....	11
1.7.5. L'humidité .....	12
1.7.6. La topographie .....	12
1.8. Dépôt des polluants .....	12
1.8.1. Les dépôts humides .....	12
1.8.2. Les dépôts secs .....	12

## Deuxième partie : PARTIE EXPERIMENTALE

### Chapitre 2 : Modélisation de la dispersion des polluants atmosphérique

2.1. Définition modélisation de la dispersion atmosphérique.....	14
2.2. Sources ponctuelles .....	15
2.3. Le choix de modèle Gaussien .....	16
2.3.1. Domaine de validité .....	17
2.3.2. Limites du modèle .....	18
2.4. Équations du modèle mathématique .....	18
2.4.1. Dépôt et décantation (Deposition and Settling) la solution Ermak .....	21
2.5. Paramètres atmosphériques .....	22
2.6. Simulation	
2.6.1. Définition Simulation.....	24
2.6.2. Approche numérique et analytique .....	24
2.7. Environnement et langage de programmation .....	25
2.8. Les Résultats.....	25
2.9. Interprétations des résultats .....	31

### Chapitre 03 : Méthodes Outils pour la surveillance

3.1. Satellites : L'observation des nuages depuis l'espace .....	32
3.2. Les types d'observations .....	32
3.2.1. Les drones .....	33
➤ Définition .....	33
➤ Le principe des drones .....	33
➤ Les types des drones .....	33
3.2.2. Le Lidar, radar et sodar .....	35
3.2.2.1. Définition de Lidar .....	35
➤ Principaux modes de fonctionnement.....	36
➤ Modes essentiels d'application du lidar .....	36
3.2.2.2. Définition Le radar .....	38
➤ Principes du radar.....	38

➤ Type de radars.....	38
3.2.2.3. Le sodar (Sonic detection and ranging).....	38
Conclusion.....	41
Références Bibliographiques.....	42
Annexes	ix
Résumé	

# Remerciement

Avant tout nous remercions ALLAH tout puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la chance d'étudier et de suivre cette étude.

La première personne que nous aimerions remercier est notre superviseur, le professeur Ferhate Mohammedi, pour ses conseils, sa confiance et sa patience, qui a grandement contribué et sans lesquels ce travail n'aurait pas pu être réalisé au bon endroit.

Nos sincères remerciements vont à:

- Prof Djamel Belamri, pour avoir accepté la présidence du jury de cette thèse.
- Prof Nadjoua Bensalah, d'accepter d'étudier ces travaux et de faire partie du jury.
- Nos parents, frères, sœurs et amis pour leur soutien et leurs conseils.
- Nos sincères remerciements à ceux qui nous ont aidés et ont contribué au développement de ce message et au succès de cette merveilleuse année universitaire.

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Origines et effets de la pollution atmosphérique.	07
<b>Figure 1.2</b> : Structure de la couche-limite atmosphérique	08
<b>Figure 1.3</b> : Cycle de la pollution atmosphérique	10
<b>Figure 1.4</b> : La variation de la Température et la pression en fonction de l'altitude.	11
<b>Figure 1.5</b> : Emissions, transformation et dépôts de polluants	13
<b>Figure 2.1</b> : Libération d'une panache; illustration schématique des paramètres et des processus.	14
<b>Figure 2.2</b> : Usine de ciment à Biskra (branis_jamoura).	15
<b>Figure 2.3</b> : Diagrammes schématiques dispersion du panache	15
<b>Figure 2.4</b> : La carte des Zones du Foncier industriel	16
<b>Figure 2.5</b> : Schématique du panache gaussien	20
<b>Figure 2.6</b> : Dispersion selon le modèle Gaussien	23
<b>Figure 2.7</b> : Affichage de la solution de panache Gaussien (cross-section Vertical ( $y = 0$ )).	26
<b>Figure 2.8</b> : Affichage de la solution de panache Gaussien (cross-section Horizontal ( $z = 0$ )).	27
<b>Figure 2.9</b> : Effect de de la vitesse du vent sur la dispersion des polluants	28
<b>Figure 2.10</b> : La distribution de la concentration à la surface du sol selon l'une Gaussienne plume.	28

<b>Figure 2.11</b> : Répartition de concentration à la surface du sol selon un panache Gaussien; concentration à sections transversales, parallèles à l'axe y à différentes distances la source.	29
<b>Figure 2.12</b> : Concentration en fonction de la distance-courbes de niveaux	30
<b>Figure 3.1</b> : Vue du satellite Calipso - (Calipso-Cloudsat) en orbite.	32
<b>Figure 3.2</b> : Schéma du principe d'un drone.	33
<b>Figure 3.3</b> : Fonctionnement d'un drone terrestre.	34
<b>Figure 3.4</b> : Schéma de principe Lidar.	35
<b>Figure 3.5</b> : Instruments ; Sodar , lidar et radar profileurs de vent.	39



## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1</b> : Exposant n pour la classe de stabilité	22
<b>Tableau 2.2</b> : recherche empirique avec x en kilomètre	23
<b>Tableau 2.3</b> : Formulation des écarts-types de la dispersion par Briggs	V
<b>Tableau 2.4</b> : Paramétrisation de la dispersion par Doury, en diffusion normale et faible.	VI

## Nomenclature

### SYMBOLES (UNITÉ)

$\pi$  : Pi = 3.14 .

$\sigma_y$  : distribution horizontale de la concentration du panache =  $a x^b$  (m)

$\sigma_z$  : distribution verticale de la concentration du panache =  $c x^d$  (m)

$\nu$  : Viscosité cinématique de l'air (m<sup>2</sup>/s)

$C$  : concentration de polluant à une position définie par les coordonnées, (  $x, y, z$  ) (  $\mu\text{g} / \text{m}^3$  )

$g$  : Accélération de la gravité = 9.81 (m/s<sup>2</sup> )

$h$  - hauteur effective de le panache, [m]

$H$  : Hauteur effective d'émission (m)

$K_y$  : Diffusivité des tourbillons turbulents le long de l'axe y ( m<sup>2</sup>/s )

$K_z$  : Diffusivité des tourbillons turbulents le long de l'axe z ( m<sup>2</sup>/s )

$Q$  : Taux d'émission ou intensité de la source (kg/ s)

$S$  : Terme source / puits (kg/m<sup>3</sup>s )

$T_0$  : Température de l'air ambiant (deg)

$T_g$  : Température du gaz de cheminée (deg)

$u_g$  : Vitesse du gaz de sortie de cheminée, (m / s);

$U$  : Vitesse du vent le long de l'axe x, (m s)

$\lambda$ : Conductivité thermique.

$\mu$ : Viscosité dynamique de l'air (kg / ms)

$\rho$ : Densité des particules (kg / m<sup>3</sup>)

$R$  : Rayon des particules (m)

$d$  : Diamètre de sortie de la panache (m)

## symboles mathématique

$\frac{\partial}{\partial t}$  : Dérivée partielle par rapport au temps.

$\nabla$  : Opérateur gradient

# **INRODUCTION**

La pollution fait partie de notre vie aujourd'hui. Elle affecte l'ensemble de l'écosystème (air, eau, sol et plantes) et il y a une pollution locale, régionale ou mondiale. Il est nécessaire de répondre aux déchets et des polluants qui empoisonnent progressivement notre planète.

Ces dernières années, les problèmes liés à la pollution de l'air sont devenus une source de préoccupation constante pour les pouvoirs publics, les scientifiques et même la société civile, c'est pourquoi une solution doit être trouvée, et parmi les solutions, nous mentionnons la modélisation.

La modélisation est désormais couramment utilisée pour évaluer la dispersion des polluants dans l'environnement (air, sol et eau). Il s'est avéré un outil précieux pour la pré-évaluation des conséquences des rejets potentiels de polluants.

L'objectif de notre travail est de modéliser le transport et la dispersion des polluants dans l'atmosphère à l'aide d'un modèle mathématique.

Ce travail s'articule sur trois chapitres :

Après une brève introduction à ce travail, le premier chapitre a été consacré à une étude bibliographique sur la pollution de l'air, ses sources et les polluants les plus importants et généralités sur les mouvements d'air.

Le deuxième chapitre est une étude détaillée sur modélisation de la dispersion des polluants atmosphérique. En choisissant un modèle gaussien à l'aide des équations mathématiques, utilisés dans cette étude le code et les outils de MATLAB ,et enfin analyser les résultats de modélisation et voir l'évolution de la dispersion des polluants .

Le troisième chapitre est consacré aux méthodes et les outils de surveillance pour l'étude de l'atmosphère ou le changement climatique : Les drones, Le Lidar, radar et sodar.

Enfin ce mémoire se termine par une conclusion générale qui résume tous les résultats de cette étude.

**Première partie :**

**PARTIE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

**Chapitre 1 :**

**Généralité sur les**

**Pollutions atmosphériques**

## 1- LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE :

### 1.1. Définition

La pollution recouvre une multitude de mécanisme et d'actions dont les conséquences sont une dégradation de notre environnement. Il n'est, du fait pas aisé de la définir. Certaines reposent sur le principe que toute modification de la composition normale de l'air est pollution atmosphérique, d'autres y ajoutent des notions de gênes ou de nocivité dus aux composés anormaux qui ont modifié cette composition.

Aujourd'hui, c'est une notion qui fait l'objet de différentes exceptions selon les pays et les divers organismes. Voici ci-dessous quelques-unes des définitions recensées dans la littérature. Selon Le Petit Robert, le terme pollution vient du latin « **polluere** » qui signifié : « Souiller en rendant malsain », la pollution est définie comme la dégradation d'un milieu donné par l'introduction d'un agent physique, chimique ou biologique (polluant). Par extension, la pollution est définie comme la dégradation des conditions de vie » (Le Petit Robert, 1989).

- L'organisation de Coopération et de Développement Economique (**O.C.D.E**) définit la pollution comme étant « L'introduction par l'homme, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie dans l'atmosphère qui entraîne des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes écologiques, à porter atteinte aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement » (**OCDE,1994**). Les conséquences de la pollution atmosphérique autrement dits les impacts (qualifiés de négatifs dans les définitions recensées) revêtent par ailleurs, tantôt un caractère objectif (impacts physiques, écologiques, biologiques, économiques...), tantôt une connotation plus subjective (gêne). La présence de polluants d'origine naturelle (volcans, érosion,...) peut aussi, selon certains organismes, être considérée comme une pollution atmosphérique tandis que d'autres préfèrent réserver le terme de polluants aux seules émissions issues de l'activité humaine.

Toutes les sources de polluants atmosphériques sont d'une façon implicite prises en compte dans les définitions, qu'il s'agisse des sources comme les activités industrielles, domestiques et agricoles, les systèmes de chauffage, ou des sources mobiles avec principalement les transports de marchandises et de personnes. La pollution atmosphérique s'applique en outre aussi bien à l'air extérieur qu'à l'air intérieur des bâtiments. Nous signalons enfin, que le Conseil de l'Europe et l'OCDE insistent sur l'importance des connaissances scientifiques du



moment. La notion d'incertitude est donc au cœur des définitions de la pollution atmosphérique. On remarque que dans ces trois définitions présentées ci-dessus, que la pollution atmosphérique recouvre non seulement les modifications (dégradations) de la qualité de l'air mais aussi les conséquences des changements de la composition de l'air sur le fonctionnement des écosystèmes et des anthroposystèmes. L'objectif de ce chapitre est de donner quelques éléments de compréhension globale en réponse aux questions naturelles suivantes :

- ✓ Les principales sources ou d'émetteurs de pollution atmosphérique
- ✓ Caractéristiques générale de l'atmosphère
- ✓ Quelles sont ces couches de l'atmosphère ?
- ✓ Caractéristiques générales des particules
- ✓ quelles sont les échelles d'impact des divers polluants ?

Ceci permet notamment de donner une classification des pollutions atmosphériques, de préciser quelques ordres de grandeur et de fixer la terminologie que l'on employer par la suite.

## **1.2. Les types d'émetteurs**

Parmi tous les émetteurs potentiels de polluants, on a tendance à distinguer différentes catégories d'émetteurs :

### **1.2.1. Les sources non-anthropiques ou naturelles**

Il s'agit des sources induisant des rejets de substances polluantes mais qui ne sont pas liées à l'activité humaine. Parmi ces sources, on peut également distinguer les sources biogéniques (liées à la présence d'organismes vivants) des autres sources. L'éruption volcanique (dégagement très important de produits soufrés) est un exemple de source naturelle, de même que la production d'embruns marins (particules). Pour les sources biogéniques, il n'est pas toujours évident de classer le type de sources (cas de l'élevage d'animaux) .[1]

### **1.2.2. Les sources anthropiques**

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement par l'homme, cette contamination a plusieurs origines, telles que les gaz d'échappements des véhicules, la combustion des fossiles, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture, les déchets liquides et solides . [2]

### 1.3. Les polluants atmosphériques

#### 1.3.1 Les polluants primaires

Les polluants peuvent être classés comme primaires ou secondaires. Par définition, les polluants primaires sont ceux qui proviennent directement d'une source polluante identifiée, tels que le monoxyde de carbone provenant des processus de combustion et présent dans les gaz d'échappement des voitures, le dioxyde de soufre provenant de l'industrie. Les polluants secondaires ne sont pas émis directement par des sources connues et identifiées. Au contraire, ils se forment dans l'air à la suite de réactions mettant en jeu les composés émis par les sources primaires, notamment lors d'épisodes météorologiques particuliers. Un exemple majeur de polluant secondaire est l'ozone troposphérique, un des nombreux polluants secondaires qui forment le smog photochimique, mais on peut citer aussi les NPA (nitrates de peroxyacétyle) ou encore les COV (composé organiques volatiles) dits « COV secondaires ».

[3]

##### a) Le monoxyde de carbone (CO) :

Les émissions de monoxyde de carbone sont liées à des combustions incomplètes (gaz, charbon, fioul ou bois), elles proviennent majoritairement des gaz d'échappement des véhicules. A fortes teneurs, le monoxyde de carbone peut provoquer des intoxications. [4]

##### b) Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) :

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. Conformément aux directives européennes, une surveillance des principales installations industrielles a été mise en place au cours des années 80 et la mise en œuvre de disposition de réduction à la source a permis une baisse drastique des émissions du SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. [5]

##### c) Les oxydes d'azote (NOX) :

Ils comprennent notamment le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Ce sont des gaz fortement toxiques 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

.C'est dans les zones ayant une forte circulation automobile que nous observons de fortes concentrations en NO et NO<sub>2</sub>. De plus, NO peut réagir avec l'oxygène de l'air pour se transformer en NO<sub>2</sub>. [6]

d) **Les composés organiques volatiles (COV) :**

Leur définition est spécifiée dans la Directive Européenne [7]. Il s'agit des « composés organiques provenant de sources anthropiques et biogènes, autres que le méthane, capables de produire des oxydants photochimiques par réaction avec des oxydes d'azote sous l'effet du rayonnement solaire ». Une autre définition a été introduite par la directive [8]:

« 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 ». L'émission anthropique des COV dans l'atmosphère provient de différentes sources, comme la combustion incomplète dans des moteurs ou des centrales thermiques, l'évaporation de produits raffinés, l'usage de solvants dans l'industrie, les peintures.

e) **Les particules en suspension :**

Ces particules (notées « **PM** » en anglais pour « **Particulate Matter** ») sont d'une manière générale les fines particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Ces particules sont définies dans la directive [8] comme « les particules passant dans un orifice d'entrée calibré avec un rendement de séparation de 50% pour un diamètre aérodynamique de 10 µm (cas des PM<sub>10</sub>) ou de 2,5 µm (cas des PM<sub>2,5</sub>) ». Ces particules proviennent de sources naturelles comme les éruptions volcaniques, la végétation (pollens...), les incendies de forêts... ou de sources anthropiques comme les émissions industrielles, la combustion des fossiles combustibles... On distingue 4 types de particules[7]:

- **PM<sub>10</sub>** particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 10 µm ;
- **PM<sub>2.5</sub>** dont le diamètre est inférieur à 2,5 µm, appelées « particules fines » ;
- **PM<sub>1</sub>** dont le diamètre est inférieur à 1,0 µm, appelées « particules très fines » ;

- **PM<sub>0,1</sub>** dont le diamètre est inférieur à 0,1 µm, appelées « particules ultrafines » ou nanoparticules.

Toutes ces particules sont dangereuses tant pour la santé des êtres humains, que pour la végétation. Par contre, seules les particules **PM<sub>10</sub>** et **PM<sub>2.5</sub>** sont réglementées et ciblées par les Directives Européennes. 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 .[5]

### **1.3.2 .Les polluants secondaires**

N'est pas émis directement en tant que tel , mais se forme lorsque d'autres polluants (polluants primaires) réagissent dans l'atmosphère .

#### **a. L'ozone(O<sub>3</sub>) :**

A très haute altitude, dans la haute atmosphère, l'ozone protège les organismes vivants en absorbant une partie des rayons UV. Mais à basse altitude, là où nous vivons et respirons, c'est un polluant qui irrite les yeux et l'appareil respiratoire, et qui a des effets sur la végétation. Ce polluant n'est pas directement émis dans l'atmosphère mais se forme par réaction chimique à partir d'autres polluants, en particulier les oxydes d'azote et des hydrocarbures, sous l'action des rayons UV du soleil. [4]

### **1.4. Différentes échelles de la pollution (L -distance, T-temps)**

Centre Interprofessionnelles Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) ; les phénomènes relatifs à la pollution atmosphérique se déclinent :

#### **a) La pollution à l'échelle locale (micro-échelle) :**

Où pollution de proximité, s'intéresse à la pollution de l'air dans les grandes villes et les zones fortement peuplées ou se situent la plupart des sources de la pollution aux activités humaines .[9]

L < 10 km - T ~ minutes – heure. [10]

### b) La pollution à l'échelle régionale (mésos-échelle) :

Pollution à longue distance les polluants émis par les activités humaines retombent en partie à proximité des sources les principaux problèmes de pollution a langue distance sont l'acidification, l'eutrophisation et la pollution photochimique. [9]

L ~ 10 – 100 km - T ~ heures – jour. [10]

### c) Echelle synoptique / continentale :

L ~ 1000 km - T ~ jours – semaine. [10]

### d) La pollution à l'échelle planétaire (macro-échelles) :

Ce type de pollution a été mis en évidence au cours des années 80. Avec les observations des chercheurs sur l'effet de serre et la destruction de l'ozone stratosphérique.[9]

L ~ 10000 km - T ~ semaines – mois. [10]

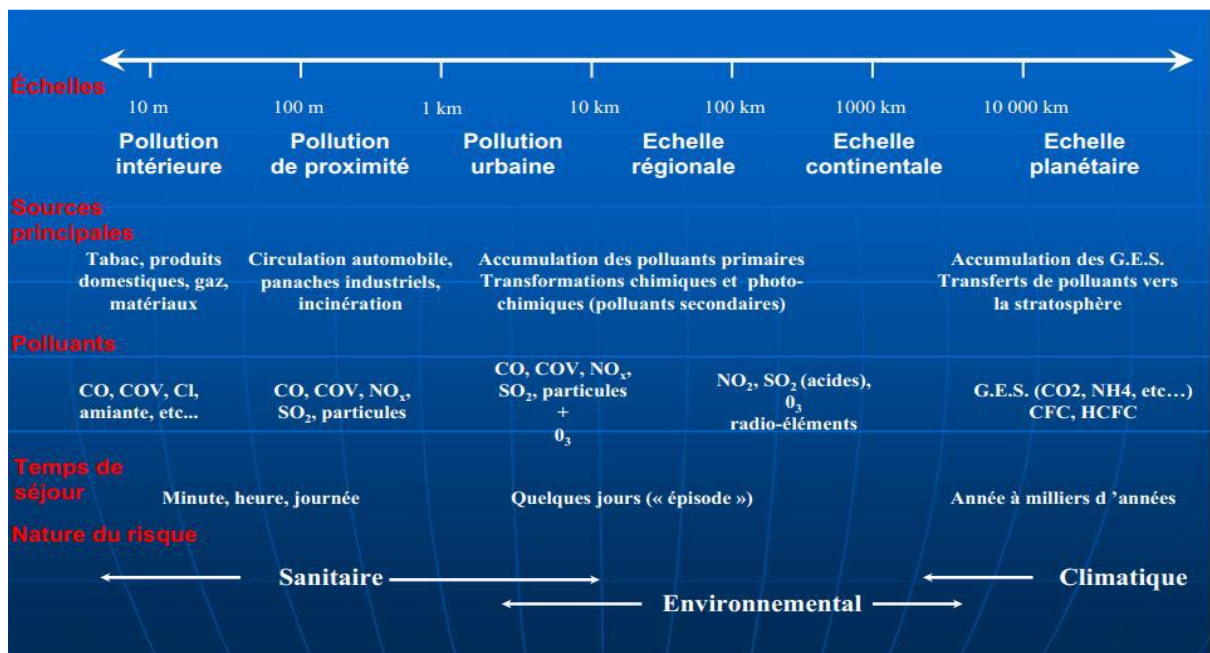


Figure 1.1 : Origines et effets de la pollution atmosphérique. (Source : Actu-Environnement, 2011)

### 1.5. Généralités sur les mouvements d'air dans la basse atmosphérique :

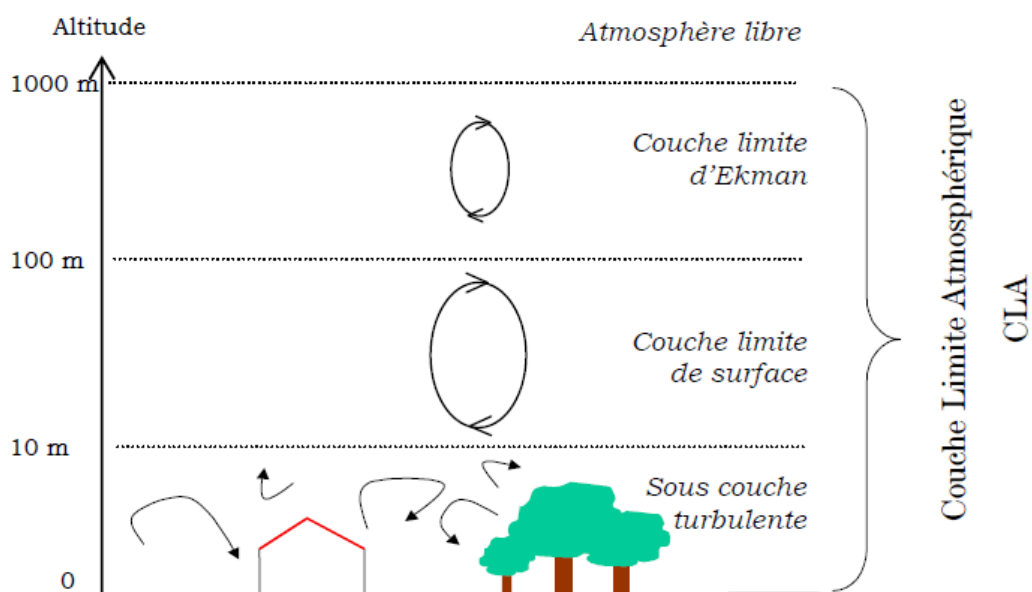
La dispersion des polluants émis dépend de phénomènes ayant lieu dans les basses couches de l'atmosphère. La couche d'air située à proximité du sol est appelée couche-limite atmosphérique. Les termes de couche de mélange, couche turbulente ou couche géographique du fait de l'influence de la surface terrestre sont parfois employés.

### 1.5.1. La couche-limite atmosphérique :

La Couche Limite Atmosphérique est définie comme la partie de la troposphère directement soumise à l'influence de la surface terrestre. Son étude est donc essentielle pour la compréhension des épisodes de pollution.

- D'un point de **vue dynamique**, la CLA est définie comme étant la zone de l'atmosphère où l'écoulement du fluide est influencé par l'interaction avec la surface terrestre directement. Le temps de réponse à un forçage (rugosité, relief, évaporation, transfert de chaleur, etc.) est court, de l'ordre de l'heure.
- D'un point de **vue thermique**, la CLA est la zone de l'atmosphère au voisinage de la surface terrestre dans laquelle la variation diurne du rayonnement solaire est directement perceptible. [11]

d'où la division de la CLA en trois sous couches :



**Figure 1.2** : Structure de la couche-limite atmosphérique (DURRIEU, 1999, p.10)

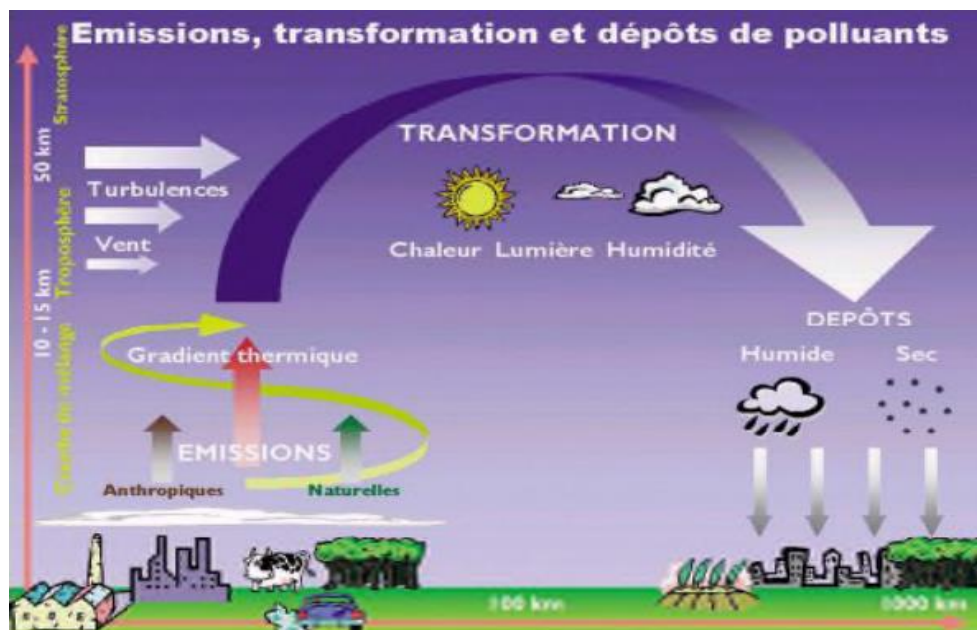
- i. **La couche limite turbulente** : est en contact direct avec le sol. L'épaisseur de cette couche dépend donc de l'état de rugosité de ce dernier. Ce paramètre se calcule à partir de la hauteur des obstacles gênant l'écoulement de l'air. La couche limite turbulente est de ce fait caractérisée par des mouvements d'air turbulents hétérogènes. Son épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres.
- ii. **La couche limite de surface** : est caractérisée par des mouvements turbulents mais mieux organisés. La direction des vents est constante et la température potentielle varie rapidement. Sa hauteur varie de quelques mètres à 50 voire 100 mètres.
- iii. **La couche d'Ekman** : c'est la zone de transition entre la couche limite de surface et l'atmosphère libre. Avec l'altitude, les vents se soustraient à l'influence des frottements terrestres. La direction des vents et leur intensité évolue vers les caractéristiques des vents géostrophiques selon un schéma appelé spirale d'Ekman. La hauteur de cette couche est comprise entre 50 mètres et 2000 mètres. [12]

### 1.6. Emissions, transformation et dépôts de polluants

La pollution atmosphérique ne connaît pas de frontières (Fig. 03) ; Les émissions polluantes sont transportées à des distances variables par les mouvements des masses d'air et les nuages. Pendant leur transport, les substances polluantes sont transformées, l'atmosphère fonctionnant comme une véritable usine chimique.

La dispersion des polluants dans l'air résulte de nombreux facteurs. Cependant, la qualité de la dispersion influe directement sur la qualité de l'air : Si la dispersion est bonne, les concentrations peuvent rester faibles malgré des rejets importants. [12]

A contrario, si la dispersion se fait mal, des émissions relativement limitées peuvent suffire à dégrader la qualité de l'air.



**Figure 1.3** : Cycle de la pollution atmosphérique (Baazaoui, 2009)

### 1. 7. Facteurs météorologiques influent la dispersion des polluants

La dispersion des polluants dans l'atmosphère peut être influencée par des facteurs Météorologiques (vents, températures, précipitations) ainsi que des facteurs topographiques.

#### 1.7.1. La pression atmosphérique :

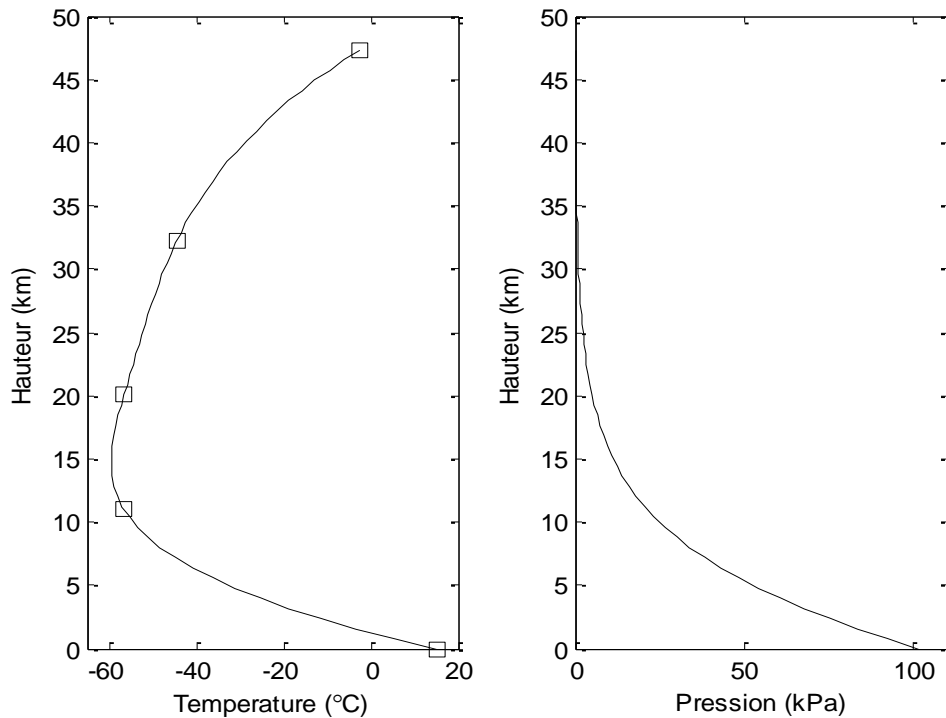
Une basse pression atmosphérique indique une situation dépressionnaire et donc une turbulence de l'air assez forte, ce qui favorise la dispersion des substances polluantes et par conséquent, améliore la qualité de l'air. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution . [13]

#### 1.7.2. La température

Influe se plusieurs façons. Tout d'abord une faible température entraîne un changement de comportement des gens en favorisant une hausse du chauffage urbain et de l'utilisation des véhicules, ce qui augment les émissions. Mais la température agit aussi dans la formation de polluant secondaire tels que l'Ozone .[14]

Le champ de pesanteur, orienté selon la verticale, a tendance à organiser l'atmosphère en couches stratifiées verticalement, dont les limites ont été définies selon les discontinuités dans les variations de température, en fonction de l'altitude (figure 4).





**Figure 1.4.** La variation de la Température et la pression en fonction de l'altitude.

### 1.7.3. Vent

Est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la dispersion des polluants. Il intervient à toutes les échelles tant par sa direction que par sa vitesse. L'influence du vent sur la pollution atmosphérique est très variable selon la position de la source. Généralement la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Au fur et à mesure que les polluants s'élèvent, la dispersion est facilitée par le vent. Plus le vent est fort, plus les niveaux de pollution seront bas. En revanche, un vent de faible vitesse favorise l'accumulation locale des polluants. [15]

### 1.7.4. Les précipitations

D'après [13], les précipitations sont à mettre en relation avec une atmosphère instable, ce qui permet une bonne dispersion des polluants. De plus, elles peuvent entraîner les polluants les plus lourds au sol et favoriser la dissolution de certains polluants. De façon générale, la pluie améliore la qualité de l'air en particulier pour les poussières et les éléments solubles comme le dioxyde de soufre par exemple (SO<sub>2</sub>).

### 1.7.5. L'humidité

Un des principaux rôles de l'humidité est le « captage » des particules polluantes par les gouttelettes d'eau en suspension. En retenant les polluants, elle accroît leur stagnation et peut finir par concentrer ces substances . [16]

### 1.7.6. La topographie

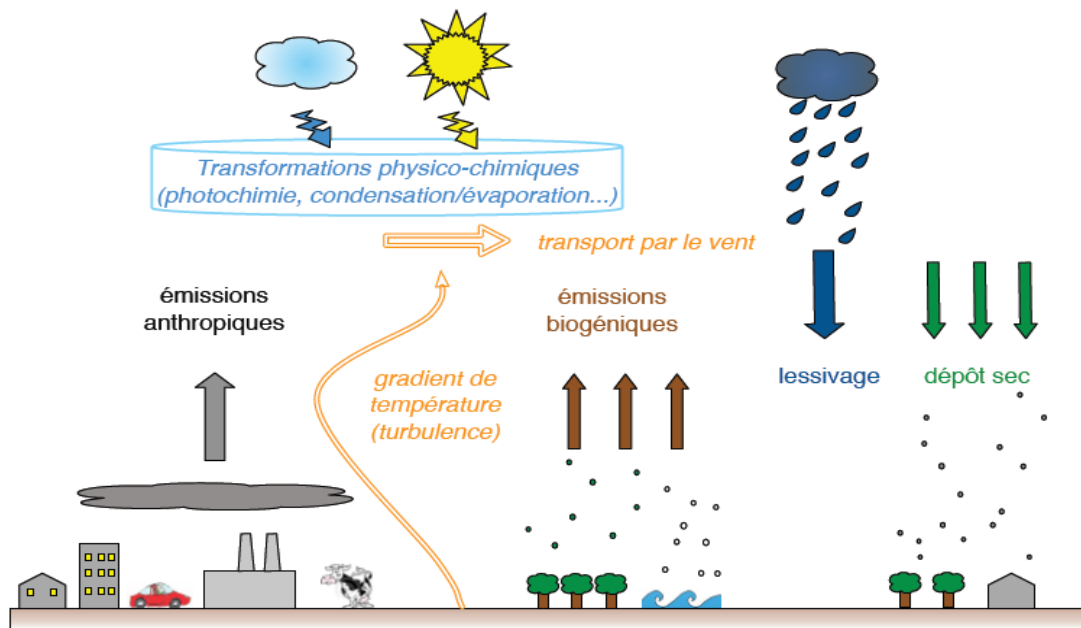
Les effets de la topographie sont essentiels dans les mécanismes de dispersion des polluants. La stabilité atmosphérique combinée à une topographie complexe empêche la circulation de l'air et donc l'évacuation des polluants . [16]

### 1.8. Dépôt des polluants

Dans le langage courant, les phénomènes de retombée de la pollution atmosphérique sont improprement appelés « pluies acides ». Le terme est effectivement peu approprié car la réalité des dépôts de polluants atmosphériques est plus variée et sont loin d'avoir lieu uniquement sous forme humide. On préférera donc les termes de dépôt, déposition, retombée de polluants ou retombées atmosphérique ; termes qui correspondent mieux aux divers modes de transfert des polluants primaires ou secondaires de l'air, sous forme solide, liquide ou gazeuse vers le sol.

Les dépôts ont lieu sous forme sèche ou humide. Quelques processus intermédiaires peuvent être distingués selon la figure et les explications ci-dessous :

- ❖ **Les dépôts humides** : Ils proviennent des précipitations (pluie, neige, bruine, brouillard, brume, givre). Ces dépôts résultent de la solubilisation des polluants gazeux au sein de gouttelettes formées autour de fines particules, ou de l'entraînement mécanique des particules au cours d'événements pluvieux. Les précipitations permettent donc le lavage de l'atmosphère par rabattement au sol des polluants .[17]
  
- ❖ **Les dépôts secs** : Ils sont composés de gaz et de diverses particules solides (poussières, aérosols...) de taille généralement inférieure à 2  $\mu\text{m}$  [18]. et ils consistent, pour les polluants gazeux, en un transfert des molécules de gaz depuis l'atmosphère jusqu'à la surface du sol ou de l'eau.



**Figure 1.5:** Emissions, transformation et dépôts de polluants. (Source : Ademe, 2010).

Les dépôts sec et humide dus au lessivage par les précipitations sont les principaux processus par les quels ces particules sont finalement éliminées de l'atmosphère.

Toujours liés l'un à l'autre dans l'atmosphère, ces deux modes forment le groupe des fines particules, qui jouent un rôle essentiel dans la physico-chimie atmosphérique.

**Deuxième partie :**

**PARTIE**

**EXPERIMENTALE**

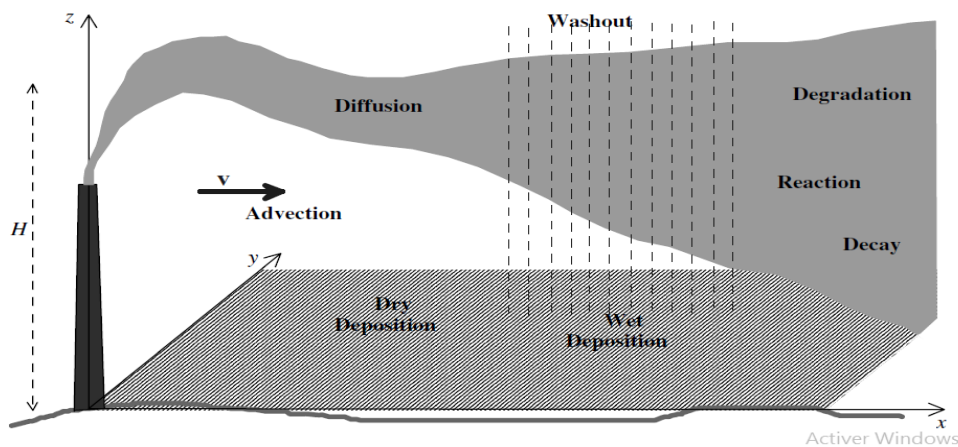
# **Chapitre 2 :**

## **Modélisation de la dispersion des polluants atmosphérique**

L'un des buts de la modélisation de la dispersion atmosphérique est d'obtenir une estimation cartographiée des concentrations de substances gazeuses ou particulaires dans l'atmosphère, suffisamment précise et représentative des conditions réelles, dans le temps et dans l'espace. Afin d'estimer ces concentrations, des données d'entrée doivent être fournies aux modèles, telles que les variables météorologiques et les émissions, ou encore les conditions aux limites du domaine d'étude.

## 2.1. Définition modélisation de la dispersion atmosphérique

La modélisation de la dispersion atmosphérique est une simulation de la dispersion de panaches de pollution dans un contexte et une temporalité donnée, faite à l'aide d'outils mathématiques et de logiciels informatiques et cartographiques. Les modèles cherchent à prendre en compte les conséquences directes et indirectes, dans l'espace et dans le temps des rejets (accidentels ou non) de substances (gaz, particules, aérosols, radionucléides...) indésirables, dangereuses ou toxiques. [19]



**Figure 2.1** : Libération d'une panache; illustration schématique des paramètres et des processus.

## 2.2. Sources ponctuelles

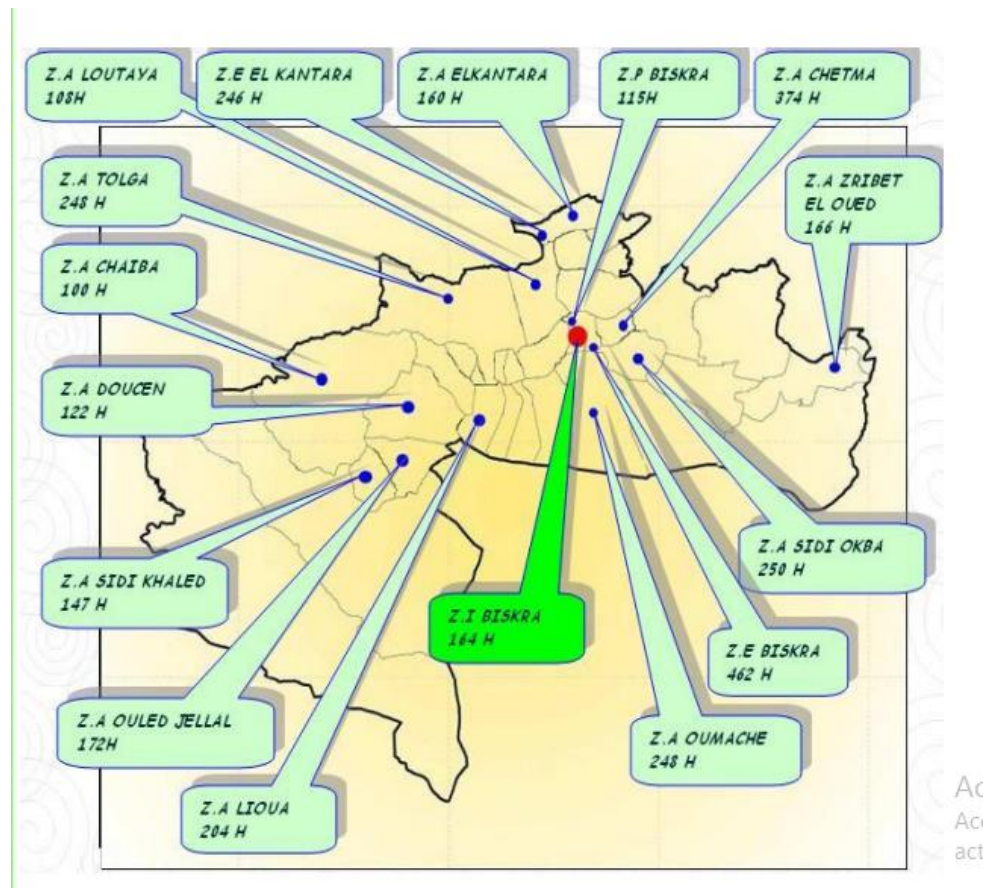
Les modèles de sources ponctuelles sont un moyen de représenter un flux constant de polluants éjectés d'une cheminée utilisé dans ce didacticiel est une distribution gaussienne, qui est une représentation statistique de la dispersion des émissions de la pile dans un espace donné.



**Figure 2.2.** Usine de ciment à Biskra (branis\_jamoura).



**Figure 2.3.** diagrammes schématiques dispersion du panache



**Figure 2.4.** La carte des Zones du Foncier industriel  
(<http://www.andi.dz/PDF/monographies/Biskra.pdf>)

### 2.3. Le choix de modèle Gaussien

Généralement, un processeur météorologique est intégré aux modèles Gaussiens, ce qui en fait un seul logiciel, relativement plus facile à exploiter. « Cette approche Gaussienne, très peu coûteuse en temps de calcul, permet de multiplier le nombre de simulations réalisées et de disposer de moyennes et de statistiques établies sur des bases météorologiques annuelles ou pluriannuelles. En contrepartie, les paramétrages des équations sont simples, ce qui conduit à des approximations parfois rudimentaires de cas particuliers, tels que l'effet du relief ou des bâtiments, qui peuvent avoir une influence non négligeable sur la dispersion, surtout à petite échelle. Cependant, des progrès considérables ont été faits pour adjoindre des modules supplémentaires aux modèles actuellement développés, afin de prendre en compte le plus possible ces situations particulières, même si cela est fait de façon paramétrique



Le modèle Gaussien est un modèle semi-analytique qui permet de modéliser la dispersion d'un gaz du fait de la seule action du fluide porteur, l'air. Le transport et la diffusion du gaz vont alors dépendre du vent et de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique. En considérant la diffusion moléculaire négligeable, la diffusion turbulente homogène et isotrope, le champ du vent est uniforme dans l'espace et la concentration de produit est supposée suivre une distribution Gaussienne le long des plans perpendiculaires à la direction du rejet.

### 2.3.1. Domaine de validité

Le modèle Gaussien s'applique aux rejets de gaz passifs. Le produit rejeté doit donc avoir :

- Une densité à peu près égale à celle de l'air (ou bien il est très dilué).
- Une température identique à celle de l'air.
- Une vitesse initiale relative nulle

De plus, les modèles Gaussiens s'appuient sur un champ de concentration tridimensionnel généré par une source ponctuelle. Il existe cependant des Gaussiens « améliorés » qui savent prendre en compte les mécanismes supplémentaires de dépôts de particules et les fumées d'incendie par exemple. La diffusion moléculaire est négligée devant la diffusion turbulente, La vitesse du vent doit donc être d'au moins 1 à 2 m/s. Dans la plupart des cas, le champ du vent est uniforme avec un profil vertical constant.

Des outils plus élaborés peuvent considérer la variation de la vitesse du vent, de la température de l'air et de la densité de l'atmosphère avec l'altitude. Une couche d'inversion de température peut parfois aussi être prise en compte. La turbulence atmosphérique est prise en compte par l'intermédiaire de classes de stabilité.

### 2.3.2. Limites du modèle

Il faut rappeler que les modèles Gaussiens s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées. De fait, la qualité de ce type de modèle est conditionnée par les éléments suivants :

- La direction et la vitesse du vent doivent être constantes.
- Pas de présence de reliefs, d'obstacles (murs, bâtiments...).
- Le nuage ne doit pas être trop éloigné du sol.
- Distances en général supérieures à 100 m et inférieures à 10 km.

### 2.4. Équations du modèle mathématique :

L'approche initiale pour les dérivés le modèle de dispersion gaussien est la solution du équation de transport, qui ne tient compte que de la diffusion et détermine comment

la concentration change avec le temps [20]:

$$\frac{dc(t)}{dt} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

où  $c$  est la concentration de polluant et  $K$  est la diffusion coefficient. Eq. 1 a une solution analytique:

$$c = \frac{Q}{\sqrt{4Kt}} e^{-\frac{x^2}{4Kt}} \quad (2.2)$$

Où  $Q$  représente la force d'émission (mesurée pour exemple en unités de kg/ s). Le modèle gaussien considère également diffusivités constantes dans l'horizontale ( $y$ ) et la verticale ( $z$ ) direction. Ici, des conditions plutôt idéalisées sont supposées dans afin de dériver le modèle mathématique du processus. Si la diffusion dans le sens horizontal est négligée, le l'équation différentielle suivante est obtenue, qui décrit le processus de dispersion:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} D_z \frac{\partial c}{\partial z} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda c \quad (2.3)$$

Où  $D_y$  et  $D_z$  représentent la diffusivité dans  $y$  et  $z$  directions et représente le taux de décroissance du processus. L'équation en régime permanent du processus de diffusion observé est:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{D_y}{v} \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{D_z}{v} \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\lambda}{v} c \quad (2.4)$$

La solution du système donne:

$$c(x, y, z) = \frac{Mv}{4\pi x \sqrt{D_x D_y}} e^{-\frac{v}{4x} \left( \frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z} \right) - \frac{\lambda}{v} x} \quad (2.5)$$

Eq. 5 représente la solution en régime permanent pour une constante source en 3D. Le produit  $Q = Mv$  représente le taux d'émission en unité [masse /temps ]. Depuis les différentes hauteurs de le panache doit être considéré, Eq. 5 pourrait être modifié pour une source en hauteur H.

Si l'on considère les trois situation de bouffée instantanée dimensionnelle où le temps est considérée la solution devient:

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{\sqrt[3]{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

Où  $\sigma$  est l'écart type de la concentration de bouffée à tout moment  $t$  et

$$r^2 = (x - ut)^2 + y^2 + z^2.$$

Pour une dispersion de bouffée continue dans la direction sous le vent, l'équation suivante décrit la concentration comme une fonction des coordonnées (x, y, z)

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} \left( e^{\frac{-(z-H)}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (2.7)$$

Dans le cas d'un rejet ponctuel et continu de débit Q, à une hauteur H du sol et pour un écoulement uniforme de vitesse  $u$ , le champ de concentration se présente sous forme d'une gaussienne et s'écrit :

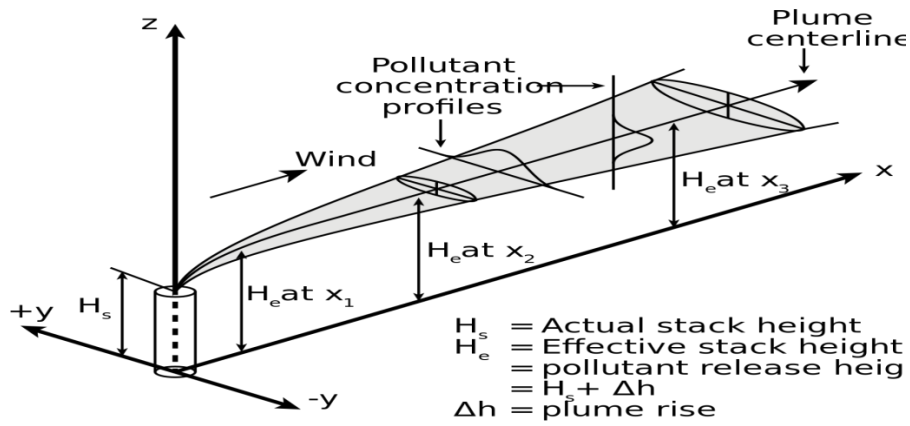


Figure.2.5. Schématisation du panache gaussien (Schuzle et Turner, 1996)

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.8)$$

Où:

$C(x, y, z)$  - concentration de polluant à une position définie par les coordonnées  $(x, y, z)$ , [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ];

$Q$  - taux d'émission moyen, [ $\text{g} / \text{s}$ ];

$u$  - vitesse moyenne du vent, [ $\text{m} / \text{s}$ ];

$H$  - hauteur effective de la panache [ $\text{m}$ ];

$\sigma_y$  - écart type de la direction du vent en latéral, [ $\text{m}$ ];

$\sigma_z$  - écart type de la direction du vent à la verticale ( $\text{m}$ ).

- Pour  $(z = 0)$ , la concentration au niveau du sol à une certaine distance  $x$  sous le vent est:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

- Pour  $(H = 0)$ , Alors l'équation (2-8) devient :

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right)$$

### 2.4.1. Dépôt et décantation (Deposition and Settling) la solution Ermak :

Dans de nombreuses situations pratiques, les particules contaminantes sont plus massives que l'air et ont donc tendance à se déposer hors de l'atmosphère à une vitesse bien définie connue sous le nom de vitesse de sédimentation,  $w_{set}$  [m / s]. Pour les particules sphériques de taille uniforme, la vitesse de sédimentation peut être approximée en utilisant Loi de Stokes [21] :

$$w_{set} = \frac{2\rho g R^2}{9\mu}$$

Où :

$\rho$ : est la densité des particules [kg / m<sup>3</sup>], R : est le rayon des particules [m],

$\mu$ : est la viscosité dynamique de l'air [kg / ms], et g est la gravité accélération [m / s<sup>2</sup>].

Pour intégrer l'effet de décantation, nous complétons le vitesse d'advection avec une composante verticale  $\vec{u} = (u, 0, -w_{set})$

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \cdot e^{-\frac{w_s(z-H)}{2K_z} - \frac{w_s^2 \sigma_z^2}{8K_z^2}} \times \left[ e^{\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \right. \\ \left. - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} \times e^{\frac{W_0(z+H)}{K_z} + \frac{W_0^2}{2K_z^2}} \operatorname{Erf}\left(\frac{W_0 \sigma_z}{\sqrt{2}K_z} + \frac{(z+H)}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \right] \quad (2.9)$$

Où :

$w_0 = w_d - \frac{1}{2}w_s$  C'est-à-dire déterminé par décantation et déposition.

## 2.5. Paramètres atmosphériques

### A. La vitesse du vent au niveau de la panache:

$$u = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^n$$

Où:

$u_0$  - vitesse du vent al 10 m;

$z_0$  - hauteur de référence, 10 m;

$n$  - exposant qui dépend de la catégorie de stabilité atmosphérique et du type de terrain, (Tableau 1).

Stability Class	A	B	C	D	E	F
$n$	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30

**Tableau 2.1.** Exposant  $n$  pour la classe de stabilité

### B. Hauteur effective de la pile:

$$H = h + \frac{1,6 \cdot \exp\left(\frac{\ln f_0}{3}\right) \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \ln(3.5 \cdot x_0)}{3}\right)}{u}$$

Où:

$h$  - hauteur physique de la panache [m];

$$f_0 = 3,12 * 0,78 * u_g * d^2 * \frac{t_g - t_0}{t_g}$$

$$\text{Si} \begin{cases} f_0 > 55 \Rightarrow x_0 = 34 \cdot \exp(0.4 \cdot \ln(f_0)) \\ f_0 \leq 55 \Rightarrow x_0 = 14 \cdot \exp(0.625 \cdot \ln(f_0)) \end{cases}$$

$u_g$  - vitesse du gaz de sortie de cheminée, [m / s];

$d$  - diamètre de sortie de la panache, [m];

$t_g$  - température de sortie du gaz, [K];

$t_0$  - température de l'air ambiant, [K];

**C. - Les écarts types  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$**

A partir de campagnes de mesures sur des rejets de produits, des formules ont été établies, donnant les valeurs des écarts-types de la distribution de la concentration et ceux en fonction :

- De la distance d'éloignement de la source de rejet et du modèle des classes de la stabilité atmosphérique (Pasquill, Turner, Briggs, Hosker). A chaque classe de stabilité, on associe des fonctions de  $\sigma_y(x)$  et  $\sigma_z(x)$ .

✓  $\sigma_y = ax^{0.894}$

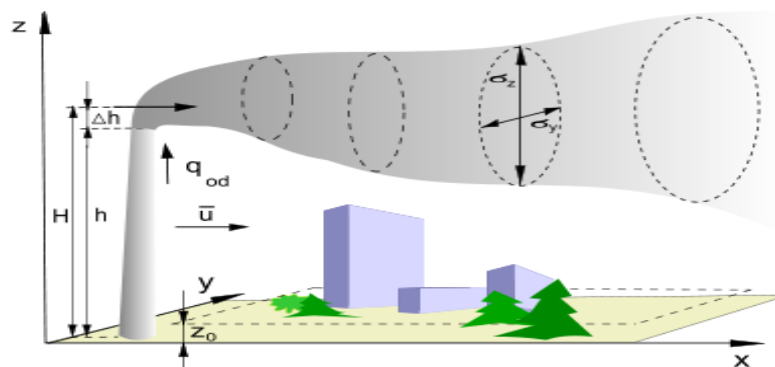
✓  $\sigma_z = cx^d + f$

Où a, c, d et f sont des constantes.

- Ou encore du temps de transfert et de la rugosité du site (Doury). Les écarts types ont été calés pour des rejets relativement importants à la source, et pour des distances de dispersion de l'ordre de la dizaine de kilomètres au maximum. Les paramètres  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  croissent avec la distance x. Leur taux de croissance avec la distance dépend de l'intensité de laturbulence. [22]

	x less than 1 km				x greater than 1 km		
Stability	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104	61.0	0.911	0	61.0	0.911	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34.0
F	34	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.18	-48.6

**Tableau 2.2 :** recherche empirique avec x en kilomètre



**Figure 2.6. :** Dispersion selon le modèle Gaussien

## 2.6. Simulation

### 2.6.1. Définition

La simulation numérique, est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé.

Une simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes dont la description repose sur un modèle mathématique comportant des équations aux dérivées partielles. [23,24]

### 2.6.2. Approche numérique et analytique

La généralisation de l'équation advection-diffusion en 1D, 2D, qui représentée sous la forme

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{u}) = \nabla \cdot (K \nabla C) + P$$

Peut être ramené à EDP elliptique, sachant que Les équations du modèle ont été basées en prenant les conditions de la vitesse du vent et sont résolus en utilisant la méthode des différences finies. Résultats de simulation MATLAB donnent l'idée de concentration le profil d'un polluant suivant X et Y de coordonnées de la direction horizontale dans la période de temps différente. Ensuite, le modèle a été utilisé pour prédire la concentration des polluants à différentes zones et comparée à la concentration observée dans différentes zones. Nous sommes intéressés dans cette section à la diffusion et au transport des polluants dans l'air,

Nous étudions la distribution verticale de concentration sur une zone étendue en supposant que les polluants diffusent passivement dans l'atmosphère.

Dans des modèles plus simples :

- Un exemple connu est la diffusion d'un parfum dans une chambre vide. Si une bouteille de parfum est ouverte et laissée évaporer dans l'air, rapidement on va sentir ce parfum dans la chambre entière. Ainsi, la diffusion a deux principales propriétés : elle est aléatoire dans la nature, et le transport est des régions de fortes concentrations vers les faibles concentrations, on sait aussi par expérience que l'odeur sera plus forte près de la source et de moins en moins forte en éloignant



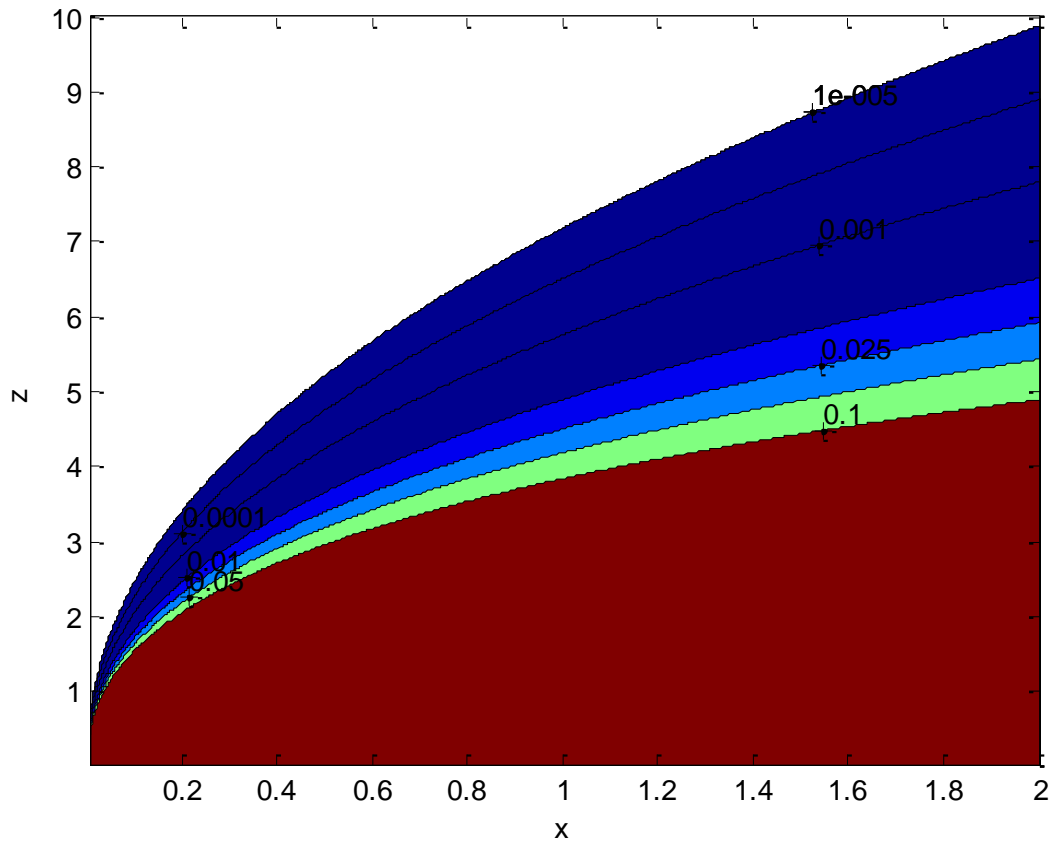
- Pour un autre exemple, on considère une cimenterie qui dégage une poussière toxique, qui va se transporter avec le vent. on cherche à modéliser l'impact des phénomènes d'advection et de diffusion dû à la propagation du polluant dans l'espace (plan 2D), et le temps .[25, 23, 24]

## 2.7. Environnement et langage de programmation

On a utilisés dans cette étude le code et les outils de MATLAB, pour résoudre et de manipuler des expressions mathématiques symboliques et effectuer l'arithmétique à précision variable. Certaines de fonctions symboliques MATLAB pour des tâches telles que la différenciation, l'intégration, la simplification, transformation, et l'équation de résolution. Cette étape de calcul et simulation est la création de scènes optiques virtuelles de site industriel est nécessaire pour le dimensionnement, la quantification des performances et la validation de la chaîne de traitement pour suivre l'évolution des panaches. Ensuite, il faudrait des données d'une série de campagne de mesures réaliser en différentes sites et différentes situations climatiques, afin d'exploiter et valider les approches théoriques d'inversion et les comparer avec les données expérimentales du terrain.

## 2.8. Résultats

Affichage de la solution Gaussien plume



**Figure 2.7.** Affichage de la solution de panache Gaussien (cross-section Vertical ( $y = 0$ )).

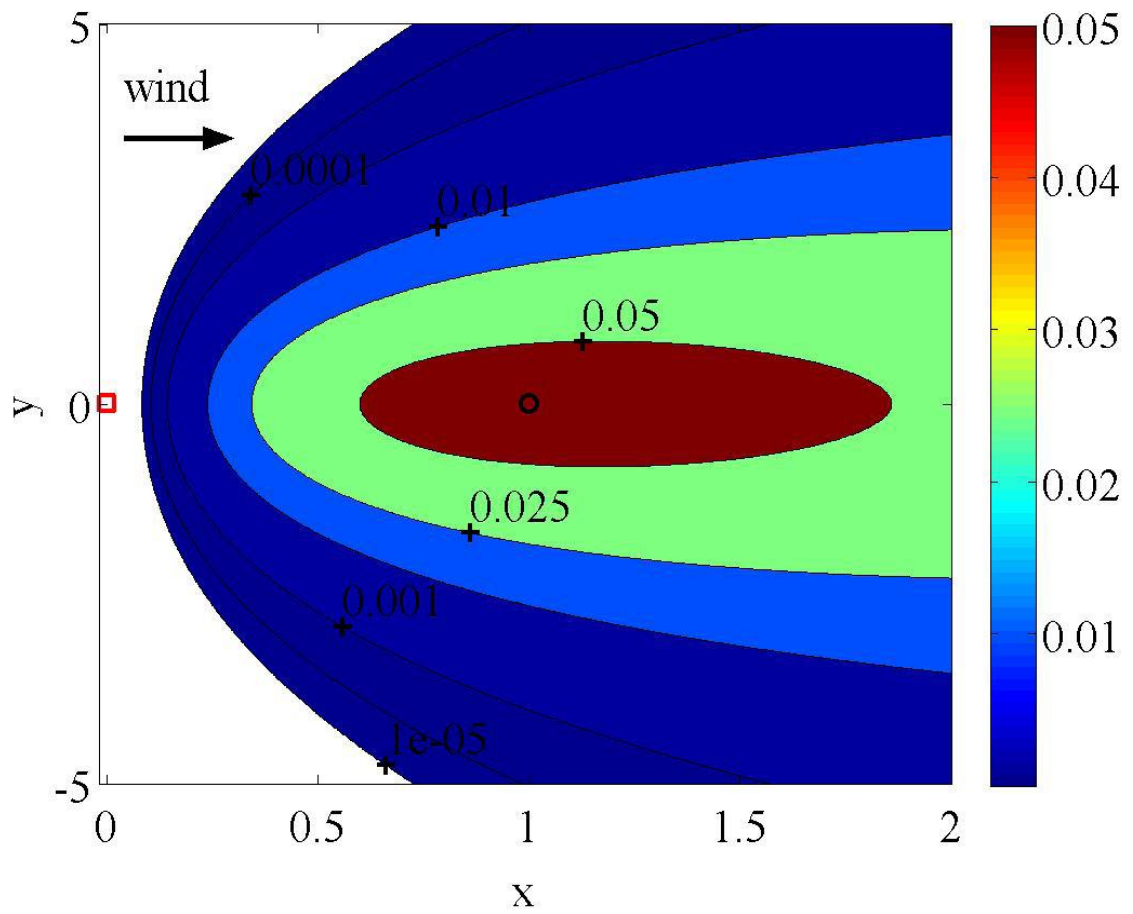
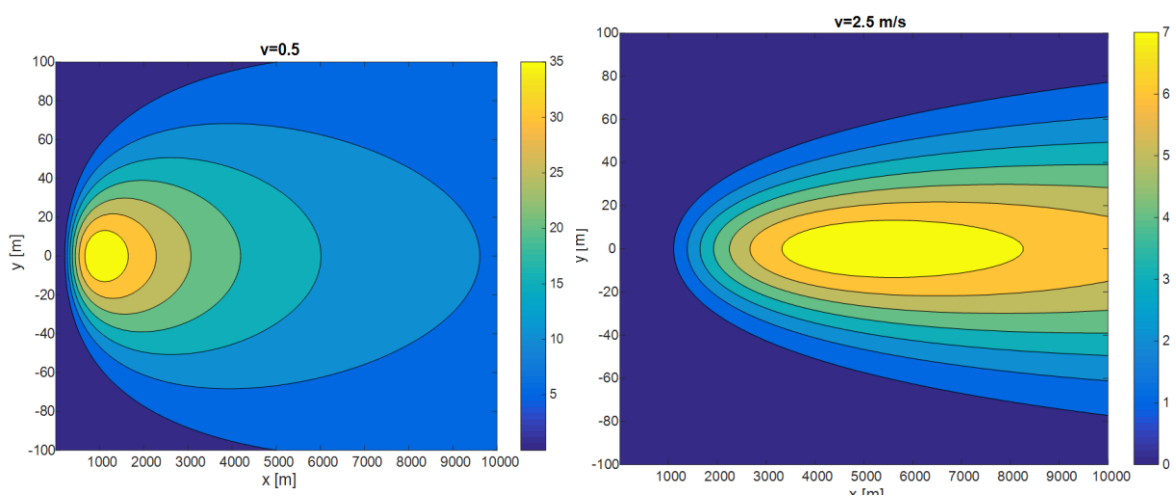
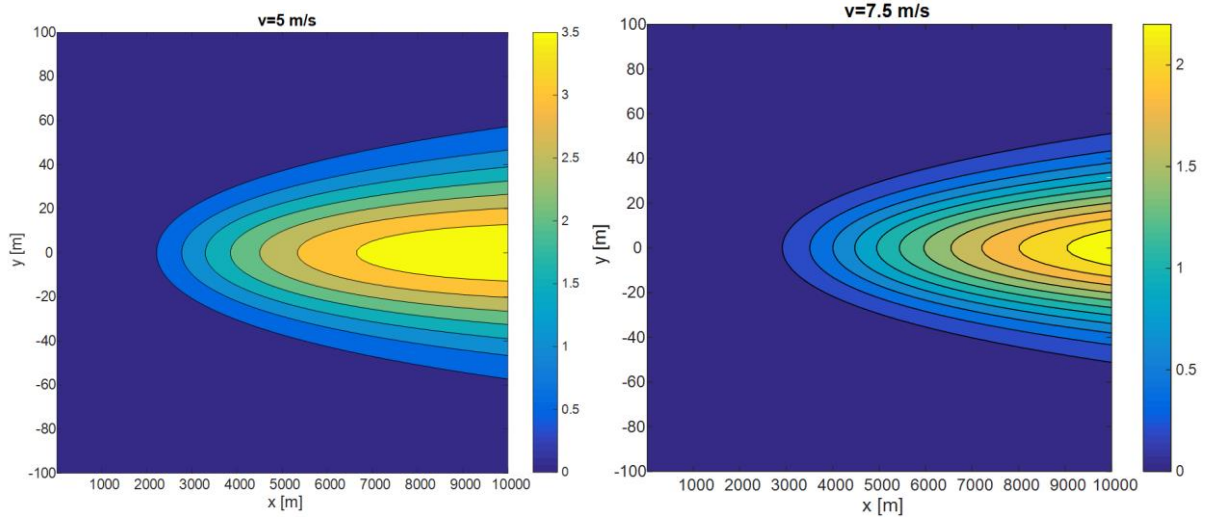
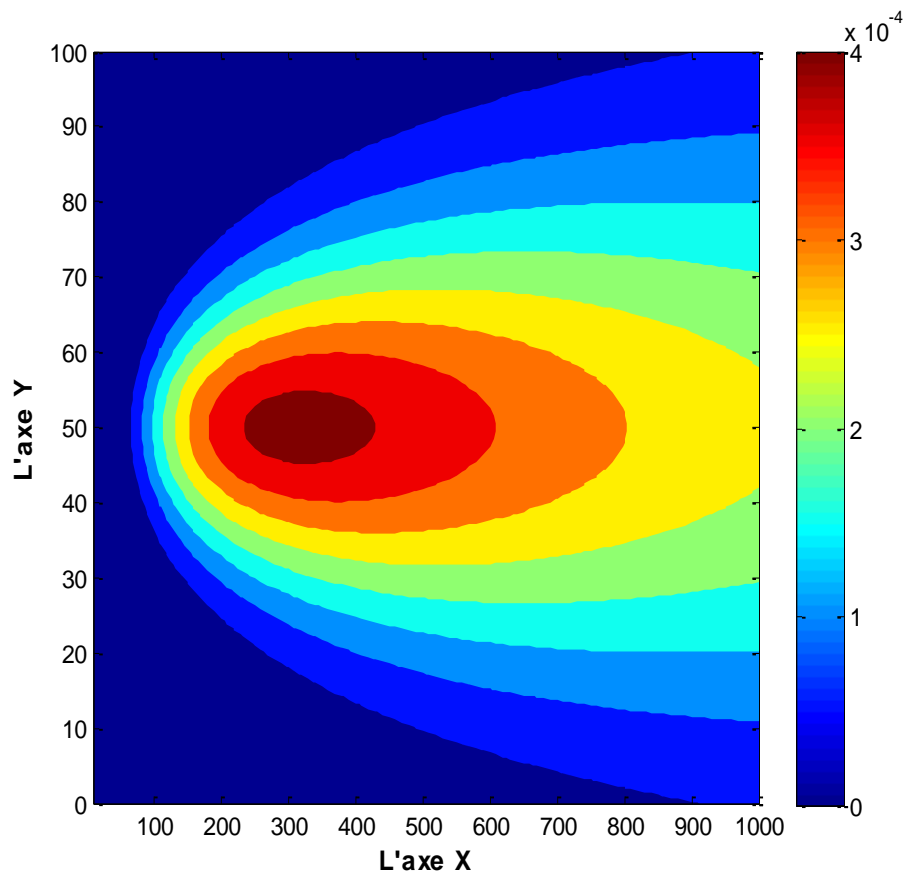


Figure..2.8. Affichage de la solution de panache Gaussien (cross-section Horizontal ( $z = 0$ )).

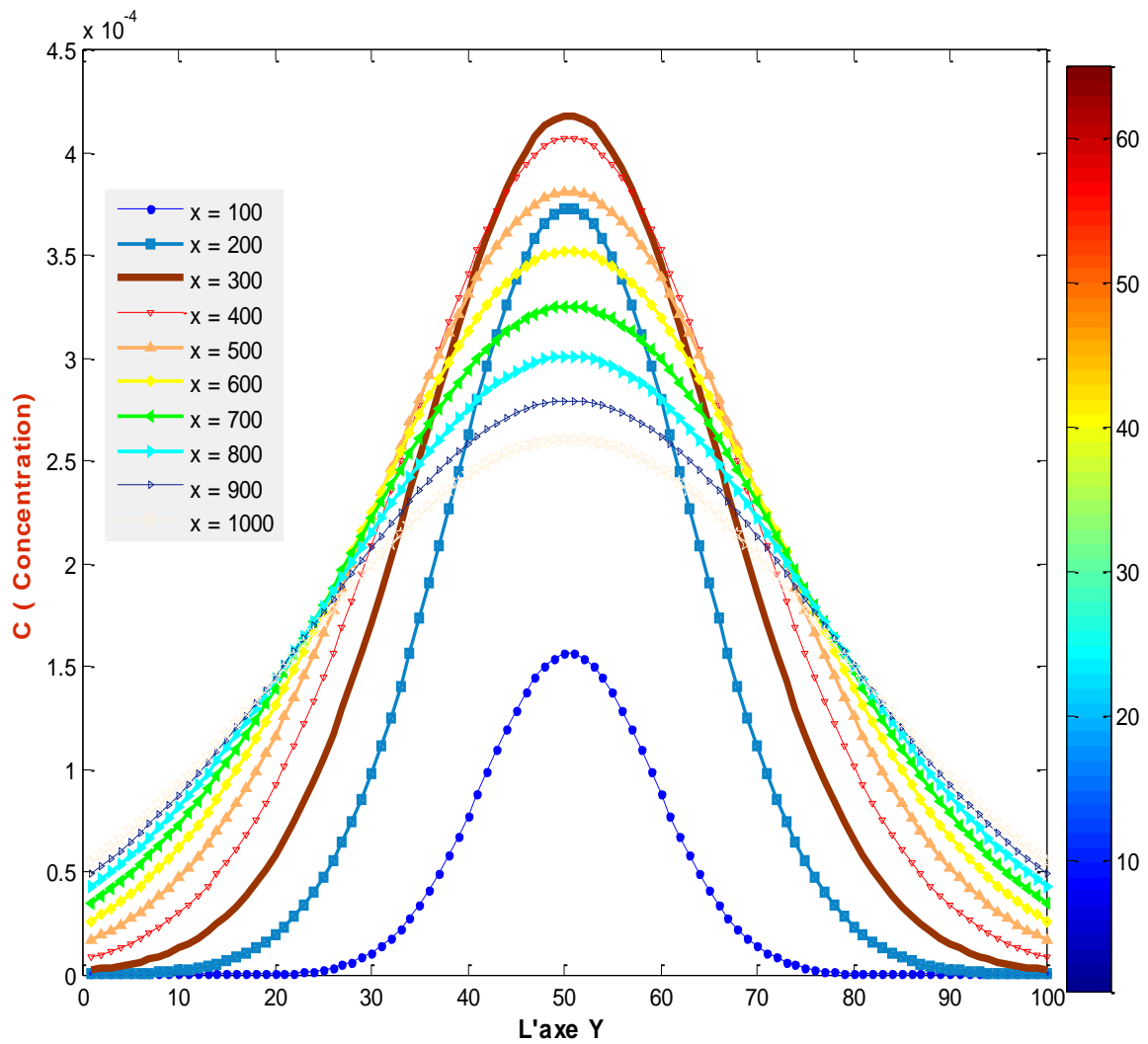




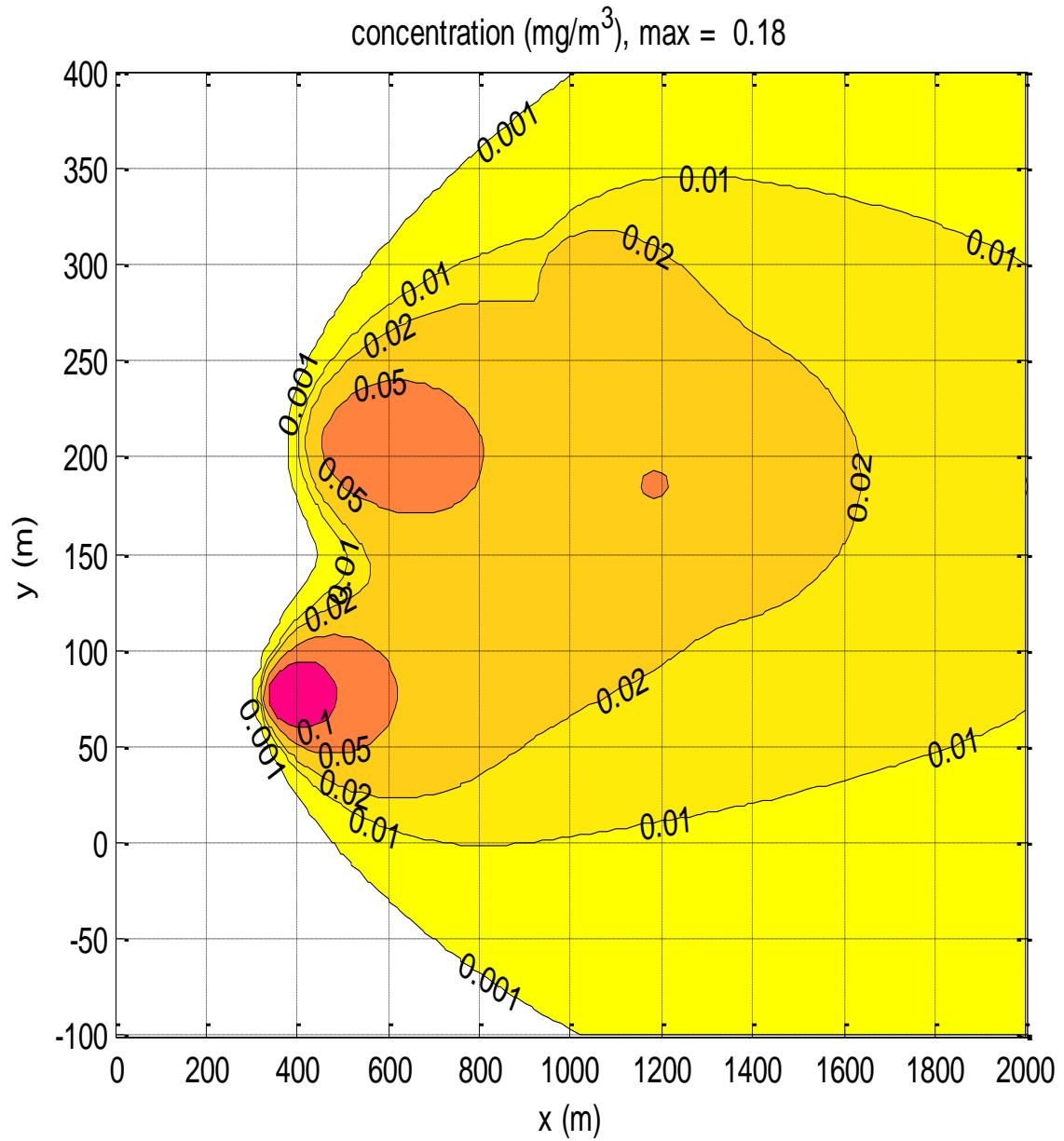
**Figure 2.9.** Effect de la vitesse du vent sur la dispersion des polluants [Spiru Paraschiv, Gelu Coman]



**Figure 2.10.** La distribution de la concentration à la surface du sol selon l'une Gaussienne plume.



**Figure 2.11.** Répartition de concentration à la surface du sol selon un panache Gaussien; concentration à sections transversales, parallèles à l'axe y à différentes distances la source.



**Figure 2.12.** Concentration en fonction de la distance-courbes de niveaux

## 2.9. Interprétations des résultats

Enfin, pour le code ‘‘Matlab’’ et la boîte à outils ‘‘PDE Tools’’, nous supposons des hypothèses pour l'application du modèle de panache Gaussien, Les principales hypothèses et simplifications apportées à l'estimation des incertitudes sont rappelées succinctement ci-après :

- L'émission de fumée est continue et constant.
- Le terrain est relativement plat.
- La vitesse du vent est constante dans le temps et en élévation.
- Dans la direction principale du vent, advection domine la diffusion et la dispersion.
- Les diffusivités dans le sens horizontal et vertical sont constantes, à savoir qu'ils ne changent pas spatialement et temporellement.

Les deux premières figures (2-8) et (2-9) expliquent les contours de concentrations en fonction de hauteur et la vitesse du vent. Les figures [2-10,2-11,2-12] la concentration provient de deux points sources. Nous n'avons pas estimé dans nos calculs la vitesse de sédimentation pour les espèces, ensuite si le polluant est impliqué dans les réactions, à savoir les espèces ne sont reproduites. La détermination de mesure de la concentration dépend d'un grand nombre de paramètres, liés à la chaîne de mesure et à sa mise en œuvre, mais également au principe de similitude et à son application. Nous avons donc été amenés à simplifier l'approche d'estimation des incertitudes par le modèle Gaussien.

Nous avons analysé l'apport des profils atmosphériques de polluants provenant de mesures de calcul de simulation sur la restitution des panaches de polluants atmosphériques.

# **Chapitre 3 :**

## **Méthodes Outils pour la surveillance**



### 3.1. Satellites : L'observation des nuages depuis l'espace

Aujourd'hui, les satellites d'observation sont devenus indispensables pour l'étude de l'atmosphère ou le changement climatique, la gestion des risques, permettent à l'homme d'avoir une vision globale pour localiser les principales masses nuageuses et identifier les types de nuages présents.

Le choix des longueurs d'ondes dépend de l'usage des images : le satellite Spot 5 prend des images dans une bande panchromatique (en « noir et blanc ») pour la cartographie et la surveillance. Trois bandes spectrales visibles (vert, rouge et proche infrarouge). A partir des mesures dans chacune de ces bandes spectrales, il est possible de déterminer la nature et les caractéristiques des objets observés. [26]

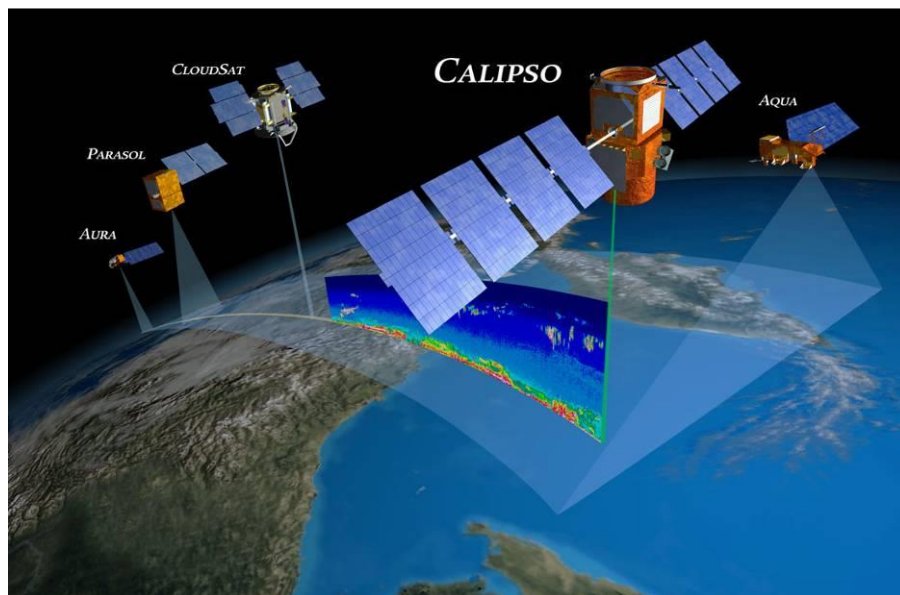


Figure 3.1. Vue du satellite Calipso - (Calipso-Cloudsat) en orbite.

### 3.2. Les types d'observations

- **L'observation est passive** : lorsque le capteur du satellite mesure la lumière réfléchie par la surface des objets éclairés par le Soleil ou la lumière émise par l'objet (rayonnement infrarouge dépendant de la température de l'objet).
- **L'observation est active** : lorsque quand le satellite "illumine" lui-même la scène et mesure le rayonnement réfléchi par cette surface (c'est le cas du drone, radar et lidar).

### 3.3. Les drones

#### 3.3.1. Définition

En français, le terme « drone » peut être utilisé pour décrire sans différenciation, un véhicule aérien, terrestre, de surface ou sous-marin. La classification américaine des véhicules mobiles autonomes sans pilote est plus précise. [26,27]

#### 3.3.2. Le principe des drones

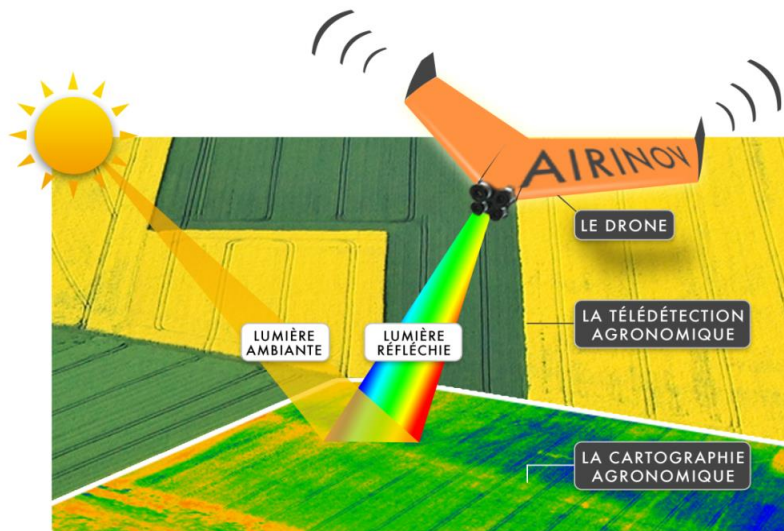
Comme son nom l'indique, il n'y a pas de pilote à bord pour le contrôler, contrairement à ce qui obtient dans l'hélicoptère et des avions. Ils sont en fait trop petit pour tout pilote de les embarquer. Ils sont contrôlés à partir d'un poste de contrôle, qui peut être votre chambre à coucher ou une petite pièce sur le terrain. La caméra montée sur eux peut transmettre des messages à un ordinateur sur le sol et le moniteur humain peut arriver à surveiller l'ensemble de ses activités sur le terrain. Toutes les zones capturées par la caméra sont transmises. Ils peuvent être dirigés par un contrôle à distance aussi. [26,27]



Figure 3.2. Schéma du principe d'un drone.

#### 3.3.3. Les types des drones :

- **Les drones terrestres :** Comme leur nom l'indique, sont conçus pour se déplacer sur la terre ferme. ces machines sont principalement employées pour effectuer du déminage, de la reconnaissance de terrain, de la prévention des risques chimiques. [26,27]



**Figure 3.3.** Fonctionnement d'un drone terrestre.

- **Drone Permettre une carte en 3D de la qualité de l'air :** Un capteur de pollution, capable de mesurer, en temps réel et pour un point précis, la concentration de l'air en particules fines, dioxyde de carbone et dioxyde d'azote. Grâce à cette avancée, il sera possible, à l'avenir, de réaliser des cartes en 3D de la qualité de l'air, ce qui permettra de déterminer quelle couche de l'atmosphère est la plus touchée par la pollution mois. [27]
- **Les drones marins de surface et sous-marins :** Qu'ils se présentent sous forme de modèles portatifs ou de modèles de plus de 600 kg, ces drones servent à accomplir de multiples missions :
  - Inspection d'infrastructures industrielles en mer (éolien, pétrolier, etc.).
  - Inspection de coques de bateaux.
  - Prises de vues sous-marines.
  - Exploration des ressources sous-marines.
  - Cartographie fine des fonds marins. Etc.

Quelques modèles de drones sous-marins : le PowerRay, le Gladius Pro, etc. [28]

### 3.4. Le Lidar, radar et sodar

Lidar, sodar et radar fonctionnent sur le même principe : une onde émise par l'appareil est réfléchiée par la cible. Le temps mis par l'onde pour effectuer son aller-retour indique la distance de la cible, la modification de l'onde retour renseigne sur sa taille, sa nature et sa vitesse (effet Doppler). Radar, lidar et sodar se différencient par la nature de l'onde émise : onde électromagnétique pour le radar, onde lumineuse pour le lidar et onde sonore pour le sodar. [29]

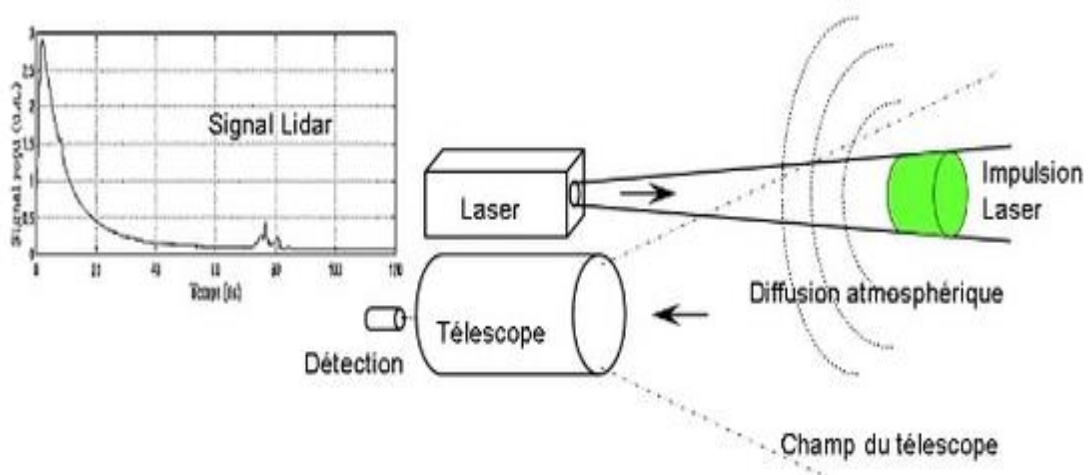


Figure 3.4. Schéma de principe Lidar.

#### 3.4.1. Le lidar

##### 3.4.1.1. Définition

Le lidar (Lights Detection And Ranging ) est un radar spécialisé dans la détection des éclairs, avec un lidar, il est possible de faire des mesures de distance, de la vitesse de déplacement des impacts de foudre, de composition chimique des éclairs et de mesurer leur concentration.

Le lidar c'est une technologie de mesure optique basée sur la propriété d'un faisceau renvoyé vers son émetteur. Le lidar fonctionne dans le domaine du visible et également dans le domaine ultraviolet et infrarouge, d'autre part il utilise un faisceau laser. [30,29]

### 3.4.1.2. Principaux modes de fonctionnement

Le recours à un instrument de mesure tel que le lidar (*Light Detection and Ranging*) est alors une solution adaptée pour combler ces différentes lacunes puisqu'il permet de distinguer efficacement dans un rayon de plusieurs kilomètres, en trois dimensions et en temps réel, la concentration de certains polluants gazeux (ozone (O<sub>3</sub>), dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), composés organiques volatils COV) et la présence d'aérosols [6,7]. En matérialisant cette cartographie physico-chimique ainsi que la stratification verticale d'une partie de l'atmosphère, notamment la couche limite dans laquelle les polluants sont piégés,

L'outil de télédétection active par le technique lidar fournit une connaissance du comportement de l'atmosphère dans sa composante verticale. Les outils satellitaires de télédétection passive associés à l'observation terrestre des conditions météorologiques locales aboutissent à une spatialisation des phénomènes en deux dimensions fortement liés au sol.

L'apport des données satellitaires représentent alors un complément très intéressant dans la gamme des outils d'observation de la brise côtière et de ses interactions avec les aérosols. Cette technologie a connu un essor exceptionnel au cours des deux dernières décennies. [29,30]

### 3.4.1.3. Modes essentiels d'application du lidar

#### I. Lidar rétrodiffusion

Dans ce cas, le facteur important est le coefficient de rétrodiffusion qui contient des informations sur la densité des éléments diffusants. Une version désormais répandue (lidar de Mie), utilisant une source laser Nd:YAG émettant à 1,064 μm, permet de localiser et de mesurer la concentration des couches nuageuses ou de particules dispersées dans l'atmosphère (panaches de fumées, éruptions volcaniques...). D'autres versions plus élaborées ont aussi été développées:

- Le lidar Rayleigh pour mesurer la densité de l'atmosphère stratosphérique et permettant un calcul de profil de température.
- Le lidar Raman pour la mesure de la concentration d'un gaz particulier caractérisé par un décalage spectral donné entre émission et réception. [29,30]

## II. Lidar à absorption différentielle ou lidar DIAL

Dans ce cas, c'est le coefficient d'absorption atmosphérique  $\alpha$  qui est le facteur intéressant. Ce coefficient varie avec la longueur d'onde selon les propriétés spectrales d'absorption de la substance chimique à détecter, sous forme d'aérosol ou de vapeur. Le lidar DIAL utilise au moins deux longueurs d'ondes émises par la source laser : l'une située dans une bande d'absorption ( $\lambda_a$ ) et l'autre non absorbée servant de référence ( $\lambda_0$ ). [29,30]

## III. Lidar Doppler cohérent

Enfin, il faut mentionner un autre mode de fonctionnement important des lidars qui fait appel à la cohérence temporelle des sources laser (contrairement aux lidars incohérents décrits précédemment). Dans ce cas, on utilise une source laser monomode et stabilisée en fréquence, le signal détecté est fourni par un interféromètre qui effectue le mélange cohérent entre l'amplitude du faisceau rétrodiffusé à distance et une petite fraction du faisceau laser émis. Cette technique, analogue à certain technique radar, est sensible au déplacement de fréquence par l'effet Doppler lié au mouvement des particules diffusantes : on obtient ainsi un instrument de mesure du vent ou un anémomètre. Dans ce cas, on utilise le plus souvent des lasers CO<sub>2</sub> émettant vers 10  $\mu\text{m}$  qui procurent la stabilité de fréquence et la puissance nécessaire dans un domaine de transparence atmosphérique infrarouge.

### ➤ Le plus récent des lidars (Le Léandre 2)

C'est un appareil idéal pour mesurer le rapport de mélange dans la stratosphère. Au moyen de calculs différentiels, le lidar Léandre 2 permet une très bonne approche de la densité des molécules d'eau présentes dans la stratosphère, Le lidar Léandre 2 capte les différentes molécules via un laser selon le type d'humidité (en général 7 longueurs d'onde différentes correspondant à 7 couleurs différentes). [31]

### 3.4.2. Le radar

#### ➤ Définition

Le mot radar est dérivé d'un acronyme anglais pour "Radio Detection And Ranging", ce qui signifie détection et localisation par ondes radio. [31,32]

#### ➤ Principes du radar

Le principe de base du radar utilise la transmission d'ondes électromagnétiques qui sont réfléchies par la cible, le signal retourné étant reçu et analysé afin d'obtenir les caractéristiques de la cible. Le radar est utilisé au moins pour détecter la présence ainsi que la position de la cible, mais l'analyse des mesures peut aussi inclure des aspects plus sophistiqués comme sa vitesse et sa distribution spatiale. Bien que souvent comparé aux mesures satellitaires visibles et infrarouges, le radar opère d'une manière totalement différente. Le satellite est un instrument de détection à distance passif car il n'a qu'un récepteur et pas de transmetteur, alors que le système radar possède les deux, étant ainsi un instrument actif. On retrouve le radar sous différentes formes et il peut être installé sur diverses plates-formes (sol, navire, avion, voiture de police et même sur un satellite) mais ce texte se limitera au radar météorologique basé au sol. [30, 32,33]

#### ➤ Type des radars

Les radars météorologiques sont classés selon leur bande de fréquence microondes. Les types les plus fréquents sont : bande S (10 cm), bande C (5 cm) et bande X (3 cm). Plusieurs facteurs influencent le choix d'une bande de fréquence.

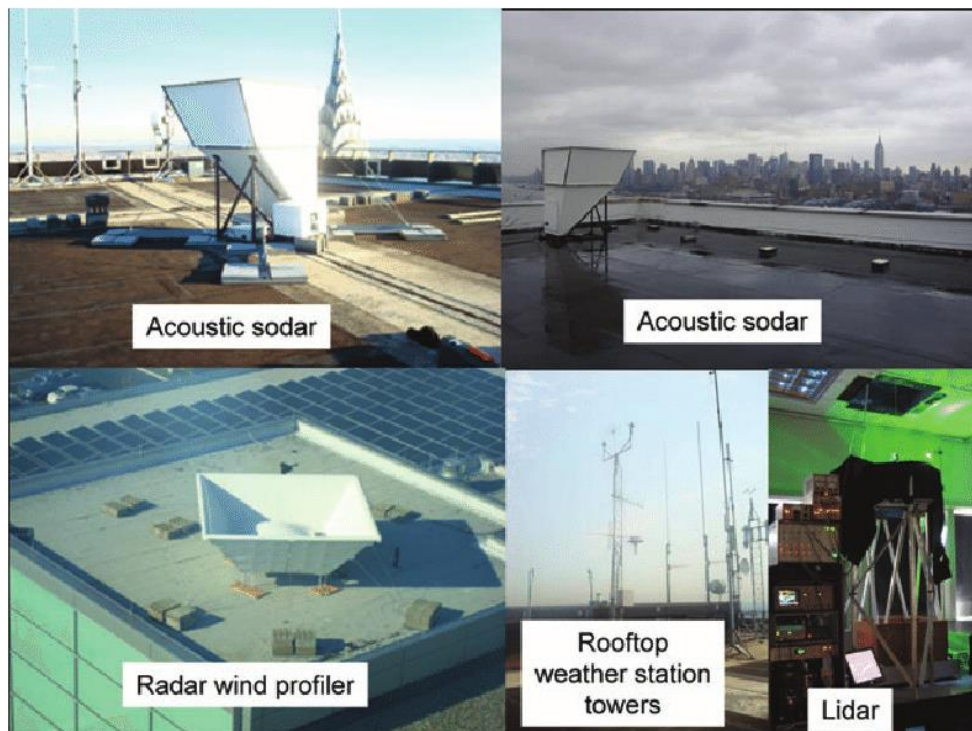
Les courtes longueurs d'onde sont plus sensibles mais ont une atténuation plus forte dans la précipitation que les systèmes à plus grande longueur d'onde. Pour une résolution fixée, le système à grande longueur d'onde requière une plus grande antenne, ce qui est beaucoup plus dispendieux. [31, 32,33]

### 3.4.3. Le sodar (Sonic detection and ranging)

Se propage à la verticale de l'instrument jusqu'à ce qu'il rencontre une différence de densité de l'atmosphère, généralement accompagnée d'un cisaillement de vent. Une partie de l'onde est alors renvoyée et captée par le sodar.

Le temps du trajet permet de déduire la distance verticale de cette discontinuité des couches d'air et le glissement de fréquence permet de calculer la vitesse des couches de vent. Selon la fréquence d'émission sonore et la puissance de l'appareil, les sodars ont une portée efficace maximale de 1000 mètres.

Comme un avantages le vent et structures turbulentes et détection aérosols et nuages, inconvénients mesures près du sol uniquement (de 0 à 600 m) et sensible au bruit de fond. [31]



**Figure 3.5.** Instruments ; Sodar, lidar et radar profileurs de vent.

Cette étude montre qu'il n'existe pas aujourd'hui de procédure standard permettant de connaître la distribution des concentrations en polluants avec une résolution spatiale et une couverture temporelle suffisante en milieu petites ou grandes échelles. Néanmoins, les informations obtenues par chacune de ces méthodes et moyens techniques sont complémentaires et nécessaires à l'observation et la compréhension du phénomène de pollution :

- les mesures effectuées par les stations de mesures permettent une surveillance en temps réel de la pollution,



- les modèles numériques prennent en compte les conditions météorologiques et permettent une analyse et prédiction de la pollution atmosphérique à grande échelle spatiale,

- à petite échelle, les simulations numériques nous renseignent sur l'influence du bâti sur l'écoulement de l'air et sur les phénomènes de stockage des polluants.

- Enfin une cartographie de la pollution atmosphérique à l'aide d'images satellitaires permet de spatialiser les informations nécessaires à la compréhension du phénomène.

La stratégie de fusion de ces différentes sources d'information présentée dans cette étude qui utilise ces différentes informations afin de mettre à profit leur capacité et d'obtenir une meilleure cartographie de la pollution.

# CONCLUSION

La modélisation de la dispersion des émissions provenant de sources de pollution atmosphérique est un outil important pour détecter la distribution et la variation de la concentration des polluants atmosphériques car c'est le meilleur outil pour utiliser les caractéristiques géographiques de la dispersion des polluants.

Lier les résultats de la modélisation de la dispersion des émissions aux logiciels des systèmes d'information est d'une grande importance pour la création de tableaux et de graphiques.

Les résultats obtenus par le code "Matlab" et la boîte à outils "PDE Tools".est L'émission de fumée est continue et constante, Le terrain est relativement plat et La vitesse du vent est constante dans le temps et en élévation.

Le modèle Gaussien représente les émissions ponctuelles comme une série de bouffées, émises les unes à la suite des autres. Chaque panache transporte une quantité donnée de chacune des espèces étudiées et évolue physiquement (forme, taille, déplacement) en fonction des vents en leur centre et indépendamment des autres panaches. La chimie est prise en compte à l'intérieur de chaque bouffée, de même qu'entre deux panaches lorsque ceux-ci se recouvrent.

L'étude de l'atmosphère ou du changement climatique nécessite des méthodes d'outils d'observation Les informations obtenues grâce à ces moyens techniques qui sont complémentaires et nécessaires pour suivre et comprendre le phénomène de pollution.

Le rôle important que jouent les études théoriques et la modélisation mathématique dans la question de la pollution de l'air est clairement évident. Par conséquent, nous recommandons une plus grande attention aux études théoriques dans ce domaine important, fournissant des capacités de recherche et préparant les cadres humains à s'engager dans ce travail scientifique distingué.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Lacour, Stéphanie. "Cours de pollution atmosphérique." *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique France* (2001).
- [2] Miquel, G. Rapport sur les Effets des Métaux Lourds sur l'Environnement et la Santé. Assemblée Nationale Française, N°2979, Paris, 366p. ( 2001).
- [3] Mayer, Helmut. "Air pollution in cities." *Atmospheric environment* 33.24-25 (1999): 4029-4037.
- [4] Airparif. Les différents polluants et leur évolution. Association de surveillance de la qualité de l'air. ( 2010).
- [5] Pascal, Laurence. "Effets à court terme de la pollution atmosphérique sur la mortalité." *Revue Française d'Allergologie* 49.6 (2009): 466-476.
- [6] Arqués P. La Pollution de l'air [Ouvrage]. - [s.l.] : Edisud, 1998.
- [7] C.E. DIRECTIVE 2008/50/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. - [s.l.] : Conseil Européen, 2008. - pp. 152/1 - 152/44.
- [8] C.E. Directive 1999/30/CE DU CONSEIL du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant. - [s.l.] : Conseil Européen, 1999.
- [9] D. BEBBA, N. BEN DEROUICHE, Détection de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures à l'aide d'un bio indicateur lichénique (*Xanthoria parietina*) et quelques végétaux supérieurs (*Casuarina equisetifolia* et *Phoenix dactylifera*) dans la région de Hassi Messaoud, mémoire de master, Université kasdi merbah, Ouargla, 2006.
- [10] Schmitt Foudhil Hadjira. "Dispersion atmosphérique." *Module environnement atmosphérique et qualité de l'air. Rapport-CEREA* (2010).
- [11] Stull, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology Kluwer Academic Publishers The Netherlands No 666. (1988).
- [12] Roul D. Etude des conditions météorologiques de Bariatou : analyse des paramètres météorologiques influençant les concentrations en polluants autour du site. Maîtrise : Sciences et Techniques : "Mesure et traitement des Pollutions et Nuisances" : Université de Pau et des Pays de l'Adour, Météo France Pau-Uzein, Pau (1998 ).

- [13] (Plan Régional de la Qualité de l'Air) P .R.Q.A la région de REUNION. Rapport sur :la représentativité des mesures de la Qualité de l'Air sur le plan spatial et temporel (2007), 80-81pp.
- [14] GUELLE D. et EMMAUEL., Etat de l'air pour l'étude des impacts des transports routiers a proximité des autoroutes .1998 Ed. ADEME (144page).
- [15] Diaf, N., Bouchaour, M., Merad, L., & Benyoucef, B . Paramètres influençant la dispersion des polluants gazeux. *Laboratoire De Matériaux & Energies Renouvelables, Facultés Des Sciences, Université De Tlemcen Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)*, 139-142 pp.
- [16] Deletraz, G., & Paul, E. Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes. *Rapport de la Sociétés-Environnement-Territoires (SET) et du Laboratoire de la montagne alpine (LAMA). Équipe SIG. Espace Serge Martin (1998)*, (144 page).
- [17] MALBREIL Nathalie . La pollution en bordure d'autoroute et son impact sur la végétation. DESS : Ressources Naturelles et Environnement, Université de Metz, CETE de l'Est (1997), (56 page).
- [18] JUSSY, Jean-Hugues. *Minéralisation de l'azote, nitrification et prélèvement radiculaire dans différents écosystèmes forestiers sur sol acide: effet de l'essence, du stade de développement du peuplement et de l'usage ancien des sols*. 1998. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- [19] KRYSTA, Monika. *Modélisation numérique et assimilation de données de la dispersion de radionucléides en champ proche et à l'échelle continentale*. 2006. Thèse de doctorat.
- [20] Škraba, Andrej, et al. "Integrating air-pollution dispersion simulation models and GIS for urban air-pollution emergency management." *Proceedings of International Conference, MATHMOD*. 2012.
- [21] Lushi, Enkeleida, and John M. Stockie. "An inverse Gaussian plume approach for estimating atmospheric pollutant emissions from multiple point sources." *Atmospheric Environment* 44.8 (2010): 1097-1107.
- [22] Paraschiv, Spiru, Gelu Coman, and Lizica Simona Paraschiv. "Simulation of plume dispersion emitted from industrial sources based on Gaussian model." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2123. No. 1. AIP Publishing LLC, 2019.
- [23] Munier, Laurent. *Simulations expérimentale et numérique des effets retardés d'une explosion en milieu clos et en présence de produits liquides*. Diss. Aix-Marseille 1, 2011.

- [24] INERIS : “Estimation des incertitudes liées aux calculs des distances d'effets – Études de sensibilité et propagation d'incertitudes”, Rapport (2006).
- [25] Sportisse, Bruno, and Vivien Mallet. "Calcul Scientifique pour l'Environnement Cours ENSTA." (2005).
- [26] Koh L P, Wich S A : “Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation”. Tropical Conservation Science. 5(2), 121-132. Available online: [www.tropicalconservationscience.org](http://www.tropicalconservationscience.org) , (2012).
- [27] Hardin P J ,Hardin T J : “Small-scale remotely piloted vehicles in environmental research.Geography Compass”. 4(9), (2010).
- [28] <https://www.studiosport.fr/guides/drones/quels-sont-les-differents-types-dedrones.html>
- [29] Huang Y , Yi S., Li Z , Shao S, Qin X :“ Design of highway landslide warning and emergency response systems based on UAV”. Proc. SPIE 8203, (2011).
- [30] 3D LIDAR Camera for Security and Surveillance in Maritime Applications Technical University of Catalonia (UPC) Center for Sensors, Instruments and Systems Development (CD6) ,3BES-01-(2015).
- [31] Lang S : “ LIDAR and SODAR Measurements of Wind Speed and Direction in Upland Terrain for Wind Energy Purposes Remote Sens”., 3, 1871-1901; doi:10.3390/rs3091871 Remote Sensing ISSN 2072-4292 [www.mdpi.com/journal/remotesensing](http://www.mdpi.com/journal/remotesensing) ,(2011).
- [32] Molchanov P, Asmolova O : “Sense and Avoid Radar for Micro-/Nano Robots” (Invited Paper), Security+Defense Conference, Amsterdam, September 24, (2014).
- [33] Gorwaraa A, Molchanov P , Asmolovab O : “Doppler micro sense and avoid radar, , a Planar Monolithics Industries Inc”., 7311-F Grove Road, Frederick, MD, USA 21704; b U.S. Air Force Academy, Colorado Springs, CO, USA 80840

# **ANNEXES**



## Annexe 01

## a. Formulation de Briggs

La formulation des écarts-types  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  proposée par Briggs est dépendante de la classe de stabilité de Pasquill considérée. Pour une dispersion en milieu rural ou en milieu urbain, on considère ainsi les formules suivantes, où  $x$  est la distance à la source (Tab.2).

Classe de Pasquill	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
<b>Dispersion en milieu rural</b>		
A	$0,22x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,20x$
B	$0,15x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,12x$
C	$0,11x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-0,5}$
D	$0,08x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-0,5}$
E	$0,06x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x(1+0,0001x)^{-0,5}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-1}$
<b>Dispersion en milieu urbain</b>		
A-B	$0,32x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,24x(1+0,001x)^{-0,5}$
C	$0,22x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,20x$
D	$0,16x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-0,5}$
E-F	$0,11x(1+0,0004x)^{-0,5}$	$0,08x(1+0,0015x)^{-0,5}$

**Tableau 2.3** : Formulation des écarts-types de la dispersion par Briggs

## b. Formulation de Doury

La formulation proposée par Doury, établie historiquement pour les besoins des autorités de sûreté nucléaire françaises, se distingue en deux classes en fonction de l'intensité de la diffusion verticale mais n'est pas directement liée à la stabilité de l'atmosphère. La dispersion verticale est ainsi considérée comme faible lorsque le gradient vertical de température excède  $-5^\circ\text{C}/\text{km}$ . Au contraire, on la qualifie de normale pour des variations de température inférieures. Les écarts-types  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  obéissent aux relations suivantes :

$$\sigma_y = (K_y t)^{\alpha_y} \quad \sigma_z = (K_z t)^{\alpha_z}$$

où  $t$  est le temps de transport depuis la source, relié à la distance à la source à travers la vitesse du vent supposé uniforme et  $K_y$  et  $K_z$  sont les coefficients de diffusivité turbulente respectivement latéral et vertical.

Dans la suite de l'étude, nous nous placerons en situation de diffusion normale pour les cas de stratification neutre et de diffusion faible en stratification stable. Les paramétrisations proposées par Doury sont rassemblées dans le tableau suivant (Tab.2).

	Temps de transport (s)	$K_y$ (m <sup>2</sup> /S)	$K_z$ (m <sup>2</sup> /S)	$\alpha_y$	$\alpha_z$
Diffusion normale	0 à 240	0,405	0,42	0,859	0,814
	240 à 3280	0,135	1	1,13	0,685
	3280 à 97000	0,135	20	1,13	0,5
	97000 à 508000	0,463	20	1	0,5
	508000 à 1300000	6,5	20	0,824	0,5
	> 1300000	200000	20	0,5	0,5
Diffusion faible	0 à 240	0,405	0,20	0,859	0,5
	240 à 97000	0,135	0,20	1,13	0,5
	97000 à 508000	0,463	0,20	1	0,5
	508000 à 1300000	6,5	0,20	0,824	0,5
	>1300000	200000	0,20	0,5	0,5

**Tableau 2.4** : Paramétrisation de la dispersion par Doury, en diffusion normale et faible

**المخلص :** نمذجة التشتت الجوي هي محاكاة رياضية تصف الطريقة التي يتم بها تفرق الملوثات في الجو المحيط. تُستخدم نماذج التشتت هذه لتقدير تركيز ملوثات الهواء المنبعثة بواسطة المنشآت الصناعية ويمكن استخدامها أيضًا للتنبؤ بالتركيزات المستقبلية عندما تكون معايير مصادر الانبعاث المتغيرة. تشمل المعلمات المستخدمة في نموذج التشتت: الظروف الجوية مثل سرعة الرياح واتجاهها .

الكلمات المفتاحية: نمذجة , التشتت , الهواء , الرياح.

**Résumé :** La modélisation de la dispersion atmosphérique est la simulation mathématique qui décrit la manière dont les polluants, se dispersent dans l'atmosphère ambiante. Ces modèles de dispersion sont utilisés pour estimer la concentration de polluants atmosphériques émis ,par les installations industrielles et peut également être utilisé pour prédire les concentrations futures lorsque les paramètres des sources d'émission sont en changeant. Les paramètres utilisés dans le modèle de dispersion comprennent: les conditions météorologiques telles que la vitesse et la direction du vent.

Mots clés : modélisation, Dispersion, Atmosphère, Vent,

**Summary:** Atmospheric dispersion modeling is the mathematical simulation which describe the way in which pollutants disperse in the ambient atmosphere. These dispersion models are used to estimate the concentration of air pollutants emitted by industrial plants and also can be used to predict future concentrations when the parameters of emission sources are changing. Parameters used in the dispersion model include: weather conditions such as wind speed and direction.

Key words: modeling, dispersion, atmosphère, wind