

**UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
CENTRE DE RECHERCHE DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCE TECHNOLOGIE ET  
GEOSCIENCE**

**Unité de Recherche de Formation  
Doctorale en Physique et Application  
Laboratoire d'Énergie, Systèmes  
Électriques et Électroniques (LESEE)  
BP 812: Yaoundé Cameroun  
Email: crfd\_stg@uy1.uninet.cm**



**THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCES**

**Research and Training Unit of Physics  
and Application**

**Laboratory of energy systems,  
Electrical and Electronic**

**P.O.Box: 812 Yaounde Cameroon  
Email: crfd\_stg@uy1.uninet.cm**

**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

**DEPARTEMENT OF PHYSICS**

**LABORATOIRE D'ÉNERGIE, SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES**

**ETUDE D'IMPACT ATMOSPHERIQUE ET SOUTERRAIN DE LA POLLUTION PAR  
MODELISATION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS ISSUS DES REJETS  
INDUSTRIELS : CAS DES CENTRALES THERMIQUES DE YASSA-DIBAMBA ET DE  
MBALMAYO**

**Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/PhD en Physique**

**Option : Énergie et Environnement**

Par

**GOUNE Achille Clovice**

Matricule : **13Y195**

Master en Physique

Sous la co-direction de

**NSOUANDELE Jean Luc**

Professeur, UD

et

**BEN-BOLIE Germain Hubert**

Professeur, UYI

**Année 2024**



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
DEPARTMENT OF PHYSICS

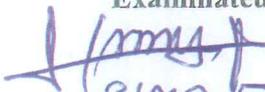
## ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur SIMO Elie et Professeur OWONO OWONO Luc Calvin, respectivement Examineur et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur GOUNE Achille Clovice, Matricule 13Y195, préparée sous la direction du Professeur BEN-BOLIE Germain Hubert et du Professeur NSOUANDELE Jean Luc, intitulée: «ETUDE D'IMPACT ATMOSPHERIQUE ET SOUTERRAIN DE LA POLLUTION PAR MODELISATION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS ISSUS DES REJETS INDUSTRIELS : CAS DES CENTRALES THERMIQUES DE YASSA-DIBAMBA ET DE MBALMAYO», soutenue le 31 Juillet 2024, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique, Spécialité Énergie et Système Électrique et Électronique, option Énergie et Environnement, attestons que toutes les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées.

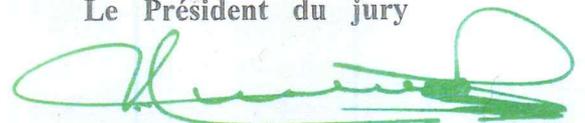
En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé, le 21 AOUT 2024

Examineur

  
SIMO Elie

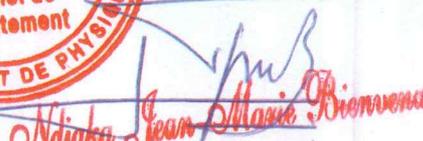
Le Président du jury



Luc C. Owono Owono  
Professeur



Le Chef de Département de Physique

  
Njaka Jean Marie Biemvona  
Professeur

**DEDICACE**

Je dédie ce travail à ma famille

### REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le Professeur NSOUANDELE Jean Luc qui a dirigé ce travail au sein du laboratoire d'énergie, systèmes électroniques et électriques de l'Université de Yaoundé I et dès lors ne s'est jamais lassé de guider mes pas dans le monde de la recherche. Votre disponibilité, votre rigueur scientifique et dévouement au travail, vos critiques, votre modestie et surtout vos conseils en tant que parent constituent la clé de succès de cette étude. Je ne saurais exprimer l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie le Professeur BEN-BOLIE Germain Hubert de m'avoir enseigné et accompagné dans ce travail, je lui exprime ici ma profonde gratitude et qu'il trouve ici, ma sincère reconnaissance dans l'achèvement de ce travail.

Je remercie le feu, Professeur BONOMA Beguide de m'avoir enseigné et initié à la recherche, je lui exprime ici ma profonde gratitude.

Je remercie le Professeur OWONO OWONO Luc Calvin, Vice-Recteur Chargé des Enseignements, de la professionnalisation et du développement des Technologies pour son soutien. Je suis très reconnaissant pour tout ce que j'ai reçu auprès de vous.

Ma profonde gratitude adressée aux personnalités scientifiques qui ont accepté spontanément d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également :

Aux membres du jury pour tout le temps précieux qu'ils ont bien voulu sacrifier afin d'examiner le présent travail.

J'adresse toute ma reconnaissance au chef de département de physique à la faculté des sciences de l'Université de Yaoundé I, le Professeur NJAKA Jean Marie Bienvenue pour ses encouragements et ses multiples conseils qu'il m'a prodigué et ainsi qu'aux enseignants dudit département pour ma formation depuis mon admission à l'Université de Yaoundé I.

J'exprime ma gratitude aux enseignants et associés du Laboratoire d'Energie, des Systèmes Electriques et Electroniques (LESEE), notamment les professeurs NJOMO Donatien, SIMO Elie, TCHINDA René et au feu professeur OBOUNOU Marcel. J'ai apprécié l'aide apportée.

Je remercie :

Le Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile pour ses encouragements et ses conseils. Je suis très reconnaissant pour tout ce que j'ai reçu auprès de vous.

Je remercie le Professeur TAMBA Jean Gaston pour ses conseils et son soutien.

## REMERCIEMENTS

---

Je remercie le Docteur SEUTCHE Jean Calvin pour m'avoir assisté, encouragé chaque jour dans ce travail.

Je remercie tous les camarades du Laboratoire d'Energie, des Systèmes Electriques et Electroniques, ainsi que les amis pour leur contribution à la réalisation de ce travail.

Je remercie la solide équipe de recherche formée par les Doctorants Essombo, Mahamat, Changa, Djoumessi, Sokom, Tchinvang, LatchiBa, Wakiang, Pomkap, Noumbissi, Venant.

Je remercie le staff administratif et le personnel enseignant de l'Université de Yaoundé I.

Je remercie également les familles : MANNOSSABI, MAGNI Marthe pour le soutien moral et l'appui matériel.

Je remercie l'entreprise Eneo pour m'avoir permis d'effectuer mon stage académique au sein de leur structure.

Je remercie le Professeur TCHUENTE Maurice, qui m'a toujours soutenu, encouragé et conseillé dans mes études.

Je remercie le Docteur ZAMBO Benjamen pour son soutien.

Je remercie la famille KEMGAN pour son soutien.

Je remercie toute la communauté FONGO-TONGO de Yaoundé pour son soutien.

Je remercie tous mes frères et sœurs : GOUNE TEGOFACK Dulice Stella, GOUNE TSAPZE Reine Natacha, GOUNE PASSO Borel Juvenal, GOUNE DONFACK Maxime Joel, GOUNE GOUFACK Dorice Laura, GOUNE KENFACK Haudin pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Je remercie ma chérie TANKEU Ingrid pour son soutien, sa patience et ses encouragements.

Je remercie mes tantes et mes tontons, Maman Veronique, Maman Marie Cerimed, Tata Sabine, Tata Mimi, Tata Dorice, Tata Orso, Christian, Donald, Brice, Billy et Boris pour leurs soutiens.

**LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS**

**Symboles physiques :**

$C$  : Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$C_\rho$  : Chaleur massique de l'air à pression constante

$D_m$  : Coefficient de diffusion moléculaire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\vec{E}_D$  : Champ diffusif

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )

$G_t$  : Gigatonnes

$G$  : Gramme

$H$  : Charge hydraulique (m)

$\nabla H$  : Gradient hydraulique

$i_D$  : Intensité (A)

$\vec{J}_D$  : Vecteur densité de courant

$K_x$  : Coefficient de diffusion dans la direction x ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$K_y$  : Coefficient de diffusion dans la direction y ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$K_z$  : Coefficient de diffusion dans la direction z ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$km$  : Kilomètre

$K$  : Coefficient de diffusion ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$k$  : Constante de Von Karman

$k$  : La perméabilité intrinsèque du milieu ( $\text{m}^2$ )

$KH$  : Conductivité hydraulique non saturée (m/s)

$L_{mo}$  : Longueur de Monin-Obukhov (m)

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

---

$MW$  : Mégawatt

$me$  : Milliéquivalent

$m_e$  : La masse de l'eau évaporée (kg)

$m_{se}$  : La masse du sol humide (kg)

$m_{ss}$  : La masse du sol sec (kg)

$N$  : Azote

$ppm$  : Partie par million

$ppb$  Partie par billion

$ppt$  : Partie par trillion

$P$  : La pression (Pa)

$P_o$  : La porosité (%)

$q$  : Moyenne de la chaleur (W/m)

$Q$  : Débit par unité de surface (kg/s)

$Q_{BC}$  : La quantité de chaleur reçue (J)

$Q_{DA}$  : La quantité de chaleur libérée (J)

$Q_s$  : Débit massique (kg/s)

$R$  : Nombre de Richardson

$t$  : Temps (s)

$T$  : Température de l'air (K)

$u_0$  : Vitesse d'écoulement de l'eau dans la direction x (m/s)

$u$  : Vitesse du vent dans la direction x (m/s)

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

$U_*$  : Vitesse de frottement (m/s)

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

---

$v$  : Vitesse du vent dans la direction y

$v_0$  : Vitesse d'écoulement de l'eau dans la direction y (m/s)

$V_d$  : Vitesse de dépôt (m/s)

$V$  : Vecteur vitesse de Darcy (m/s)

$w$  : Vitesse du vent dans la direction z (m/s)

$W$  : Le travail fourni (J)

$W_e$  : La teneur en eau (%)

$w_0$  : Vitesse d'écoulement de l'eau sur l'axe oz (m/s)

$Z_0$  : La hauteur de rugosité (m)

$z$  : La côte dénie selon l'axe vertical (m)

$\rho$  : La masse volumique du fluide (kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  : Coefficient de stockage

**ABRÉVIATIONS**

**BTS** : Basse teneur en soufre

**CTY** : Centrale thermique de Yassa-Dibamba

**CTM** : Centrale thermique de Mbalmayo

**CO**: Monoxyde de carbone

**CO<sub>2</sub>**: Dioxyde de carbone

**CLA** : Couche limite atmosphérique

**CFC** : Chlorofluorocarbone

**COV** : Composé organique volatil

**COVNM** : Composé organique volatil non matériel

**DPDC**: Dibamba Power Development Company

**ENEO** : Electricité du Cameroun

**ENS**: Equation de Navier stoke

**FAO**: Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

**FE** : Facteur d'émission

**GES**: Gaz à effet de Serre

**GPL**: Gaz de pétrole liquéfié

**GIEC**: Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**GGEI**: Le Global Green Economy Index

**HFO** : Fuel lourd

**HAP**: hydrocarbures aromatiques polycycliques

**HTS** : Haute teneur en soufre

**ISO**: International organisation for standardization

**IPE** : Index de Performance Environnemental

## ABREVIATIONS

---

**KPDC:** Kribi Power Development Company

**LATEE :** Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Energie et de l'Environnement

**LFO :** Fuel léger

**MINEP :** Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature

**MCI :** Moteurs à Combustion Interne

**NF:** Norme française

**NO:** Monoxyde d'azote

**NO<sub>2</sub>:** Dioxyde d'azote

**OMM:** Organisation météorologique mondiale

**OMS :** Organisation mondial pour la santé

**O<sub>3</sub>:** Ozone

**PM :** Premier ministre

**PNUE:** Programme des nations unies pour l'environnement

**PTU :** Programme thermique d'urgence

**PAN :** Péroxyacétylnitrate

**POP :** Pollution organique persistante

**PM<sub>10</sub>:** Particule matière de diamètre inférieur à 10

**PMB :** Point Mort Bas

**PMH :** Point Mort Haut

**PA :** pression atmosphérique

**PRG :** Pouvoir de Réchauffement Global

**RIS :** Réseau interconnecté Sud

**SONARA:** société nationale du raffinage du Cameroun

**SO<sub>2</sub>:** Dioxyde de soufre

**UE :** Union européen

**TABLE DES MATIERES**

<b>DEDICACE</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>vii</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xix</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET SOUTERRAINE</b> .....	<b>5</b>
<b>I.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES CENTRALES THERMIQUES AU CAMEROUN</b> ..	<b>6</b>
I.1.1 Localisation géographique des centrales thermiques au Cameroun.....	7
I.1.2 Contexte écologique, social et économique des centrales thermiques au Cameroun.....	8
I.1.3 Cadre réglementaire des centrales thermiques au Cameroun.....	8
<b>I.2 DESCRIPTION DES MOTEURS ET COMBUSTION</b> .....	<b>10</b>
I.2.1 Les Moteurs à combustion interne (MCI) .....	10
I.2.2 Moteurs diesel .....	11
I.2.3 Moteur WARTSILA Vasa .....	12
I.2.4 Fiouls domestique, légers et lourds .....	13
I.2.5 Processus de combustion d'un moteur diesel.....	14
<b>I.3 COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ATMOSPHÈRE</b> .....	<b>18</b>
<b>I.4 LA STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHÈRE</b> .....	<b>19</b>
I.4.1 La couche limite atmosphérique.....	19
I.4.2 La Stabilité de la (CLA) .....	21
<b>I.5 LES FACTEURS INFLUENÇANT LA DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE</b> .....	<b>24</b>
I.5.1 Les Facteurs indirects liés aux paramètres de rejet .....	24
I.5.2 Les Facteurs directs liés aux paramètres météorologies.....	25
<b>I.6 TYPOLOGIE DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES</b> .....	<b>30</b>
I.6.1 Les différents types d'émetteurs.....	30
I.6.2 Les échelles spatiales .....	30
I.6.3 Les catégories des polluants et impact .....	31
<b>I.7 MÉCANISME DE DISPERSION DES POLLUANTS DANS L'ATMOSPHÈRE</b> .....	<b>34</b>

## TABLE DES MATIERES

---

I.7.1 Processus d'émission.....	34
I.7.2 Le processus d'advection-diffusion.....	35
I.7.3 La transformations physico-chimiques .....	36
I.7.4 Le processus de dépôt .....	36
<b>I.8 POLLUTION EN MILIEU SOUTERRAIN.....</b>	<b>37</b>
I.8.1 Le sol.....	37
I.8.2 Le sous-sol .....	38
I.8.3 Principaux types de milieux souterrains.....	39
I.8.4 Caractéristique hydraulique du milieu .....	40
I.8.5 Origine de la pollution milieu souterraine.....	43
I.8.6 Mécanisme de dispersion des polluants dans le sol .....	43
<b>I.9 MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE ET SOUTERRAINE DES POLLUANTS.....</b>	<b>44</b>
I.9.1 Modèles gaussiens.....	44
I.9.2 Modèles lagrangiens.....	45
I.9.3 Modèle de la mécanique des fluides numérique ou approche eulérienne .....	45
I.9.4 Autres méthodes.....	46
I.9.5 Choix du modèle .....	47
<b>CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....</b>	<b>56</b>
<b>II.1 FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PHÉNOMÈNE DE DISPERSION ATMOSPHERIQUE ET SOUTERRAINE.....</b>	<b>56</b>
II.1.1 Caractérisation de la dispersion particules gazeux dans l'atmosphère .....	56
II.1.2 Description du phénomène de dispersion .....	57
II.1.3 Équation générale de dispersion des polluants dans l'atmosphère .....	65
II.1.4 Caractérisation de la dispersion des polluants en milieu souterrain .....	67
<b>II.2 MAILLAGE DU DOMAINE.....</b>	<b>71</b>
<b>II.3 MATÉRIEL ET MÉTHODE EXPERIMENTALE DES MESURES.....</b>	<b>78</b>
II.3.1 Matériel.....	78
II.3.2 Méthode .....	80
II.3.3 Méthode d'estimation des émissions des polluants .....	80
<b>II.4 PRÉSENTATION DES CENTRALES THERMIQUES .....</b>	<b>82</b>
II.4.1 Historique et présentation de la centrale thermique de Yassa-Dibamba.....	82
II.4.2 Historique et présentation de la centrale thermique de Mbalmayo.....	91
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>104</b>

III.1 PERFORMANCE DU COUPLAGE GA-ANN.....	104
III.2 EVALUATION DES EMISSIONS DES POLLUANTS DURANT 5ANS.....	107
III.3 PREDICTION DE L'EVOLUTION DES POLLUANTS DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN.....	109
III.4 PREDICTION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS EN FONCTION DE LA DIRECTION DU VENT EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN .....	113
III.5 PREDICTION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS EN FONCTION DU DEBIT DE LA SOURCE ET DES REGIMES DE VENT EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN .....	114
III.6 PREDICTION DU PROCESSUS DE DEPOT DES POLLUANTS SUR LE SOL EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN.....	116
III.7 PREDICTION DE L'INFILTRATION DU FIOUL DANS LE SOL EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN.....	118
III.8 PREDICTION LA DISPERSION DU FIOUL DANS LA NAPPE PHREATIQUE EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN.....	124
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>129</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>131</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>138</b>
ANNEXE 1 Présentation des données .....	138
ANNEXE1-1 Concentration réelle des polluants mesurée par les micro-capteurs dans le temps à 1000 m de la centrale thermique de Yassa au mois de Mai 2021.....	138
ANNEXE1-2 Concentration réelle des polluants mesurée par les micro-capteurs dans l'espace à proximité de la centrale thermique de Yassa au mois de Mai 2021 .....	138
ANNEXE 1-3 Facteurs d'émissions des principaux polluants.....	138
ANNEXE 1-4 Consommation moyenne de la centrale thermique de Yassa-Dibamba entre Janvier 2017 et Décembre 2021.....	139
ANNEXE 1-5 Durée de fonctionnement moyenne de la centrale thermique de Yassa-Dibamba entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	139
ANNEXE 1-6 Température (°C) dans la ville de Douala entre Janvier 2017 et Décembre 2021 ....	140
ANNEXE 1-7 vitesse du vent (km/h) dans la ville de Douala entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	140
ANNEXE 1-8 Précipitation (en mm) dans la commune Mbalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	141
ANNEXE 1-9 Teneur en eau du sol (en %) dans la commune Mbalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021 issu des résultats de la pratique du séchage.....	142
ANNEXE 1-10 Consommation moyenne de la centrale thermique de Mabalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	142

## TABLE DES MATIERES

---

ANNEXE 1-11 Durée de fonctionnement moyenne de la centrale thermique de Mabalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	143
ANNEXE 1-12 Volume d'hexane décane perdu entre 2017 et 2021 .....	144
ANNEXE 2 : Tableau des normes environnementales au Cameroun.....	144
ANNEXE 2-1 : Tableau sur les valeurs limites d'émissions.....	144
ANNEXE 2-2 : Tableau sur les valeurs limites des substances polluantes .....	145
ANNEXE 3 : Quelques images de la collecte des données .....	146
ANNEXE 4 : Listes de quelques programmes .....	147
ANNEXE 5 : Publications issues de la thèse .....	157

**LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau 1:**Composition de l'air ..... 18

**Tableau 2:** Détermination des classes de Pasquill en fonction de la vitesse du vent et du rayonnement solaire pendant la journée et de la vitesse du vent et du gradient vertical de la température pendant la nuit [34]. ..... 23

**Tableau 3:** Valeurs typiques de rugosité [40]. ..... 28

**Tableau 4:** Grammage de porosité dans les roches ..... 41

**Tableau 5:** Les ordres de grandeur de la perméabilité à saturation de sols homogènes [52]..... 42

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1:</b> Carte électrique du Cameroun permettant de localiser toutes les centrales du pays [20]	7
<b>Figure 2:</b> Moteur WARTSILA Vasa [25]	13
<b>Figure 3:</b> Cénosphères au microscope électrique	14
<b>Figure 4:</b> Les quatre temps du moteur diesel [27]	15
<b>Figure 5:</b> Cycle diesel	16
<b>Figure 6:</b> Schéma structurel de l'atmosphère terrestre et son profil de [30]	19
<b>Figure 7:</b> Représentation des différentes couches de la troposphère [32]	20
<b>Figure 8:</b> Rejet instantané d'un produit [35]	24
<b>Figure 9:</b> Rejet continu d'un produit [35]	25
<b>Figure 10:</b> (a) Rose des vents de Douala et (b) rose des vents de Mbalmayo	25
<b>Figure 11:</b> Différents types de gradients thermiques et qualité de l'air associé; 1: gradient normal, température descendante avec l'altitude; 2: inversion thermique nocturne; 3: inversion thermique diurne de vallée [39]	27
<b>Figure 12:</b> Ecoulement sur une surface à rugosité variable [40]	29
<b>Figure 13:</b> Différentes zones caractéristique d'un écoulement autour d'un obstacle cylindrique	29
<b>Figure 14:</b> Pénétration des particules dans l'appareille respiratoire [43]	33
<b>Figure 15:</b> Résumé de l'ensemble des processus intervenant dans la dispersion atmosphérique des polluants [44]	34
<b>Figure 16:</b> Émissions et immisions et milieu urbain [31]	35
<b>Figure 17:</b> Le processus de transport et de diffusion [31]	35
<b>Figure 18:</b> Aperçu schématique des processus de dépôt sec et dépôt humide gazeux	37
<b>Figure 19:</b> Relation entre zone non saturée et zone saturée [48]	40
<b>Figure 20:</b> Régime hydraulique d'un sol au cours d'un évènement d'infiltrant isolé [49]	41
<b>Figure 21:</b> Type de sol	42
<b>Figure 22:</b> Evolution d'une panache de polluant en aval d'une décharge [54]	43
<b>Figure 23:</b> Quelques processus de transport en milieu poreux saturé [55]	44
<b>Figure 24:</b> représentation graphique d'une fonction sigmoïde	48
<b>Figure 25:</b> Neurone mathématique- Représentation avec une fonction d'activation de type sigmoïde	49
<b>Figure 26:</b> Réseau de neurones en n variables (bleu), neurones cachés (rouge), neurones de sorties (vert)	50
<b>Figure 27:</b> Illustration d'un réseau de neurone récurrent	50

<b>Figure 28:</b> Structure du réseau de neurone artificiel .....	51
<b>Figure 29:</b> Fonctionnement des algorithmes génétiques .....	52
<b>Figure 30:</b> Couplage GA-ANN .....	53
<b>Figure 31:</b> Orientation du vecteur densité d'un courant de diffusion [72] .....	58
<b>Figure 32:</b> Illustration de l'élément volumique de diffusion [72] .....	60
<b>Figure 33:</b> Illustration de l'approximation de Dupuit [76]. .....	69
<b>Figure 34:</b> Maillage du domaine atmosphérique.....	72
<b>Figure 35:</b> L'organigramme de la résolution de la dispersion atmosphérique des polluants .....	74
<b>Figure 36:</b> Maillage du domaine souterrain .....	75
<b>Figure 37:</b> L'organigramme de résolution de la dispersion souterraine des polluants .....	77
<b>Figure 38:</b> (a) Sol humide et (b) Sol sec .....	78
<b>Figure 39:</b> (a) Compteur volumétrique et (b) Analyseurs de fumées portatifs .....	79
<b>Figure 40:</b> (a) Balance numérique et (b) Etuve de dessiccation.....	79
<b>Figure 41:</b> Localisation de la centrale thermique de Yassa- Dibamba.....	83
<b>Figure 42:</b> Surfaces de stockage du combustible .....	84
<b>Figure 43:</b> Circuit de lubrification.....	86
<b>Figure 44:</b> Groupe électrogène de marque BLACK START.....	86
<b>Figure 45:</b> Alternateur STAMFORD .....	87
<b>Figure 46:</b> Modulation de contrôle et commande .....	87
<b>Figure 47:</b> Salle des machines.....	88
<b>Figure 48:</b> Température du mois entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	90
<b>Figure 49:</b> Rose des vents à Douala .....	90
<b>Figure 50:</b> Vitesse du vent entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	91
<b>Figure 51:</b> Centrale thermique de Mbalmayo .....	92
<b>Figure 52:</b> Salle de contrôle .....	93
<b>Figure 53:</b> Groupes électrogènes.....	94
<b>Figure 54:</b> Générateur WARTSILA VASA .....	95
<b>Figure 55:</b> (a) Tank fioul et (b) Tank à eau .....	95
<b>Figure 56:</b> Schéma synoptique du processus de production du groupe électrogène.....	96
<b>Figure 57:</b> Teneur en eau du sol chaque mois entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	97
<b>Figure 58:</b> Situation de la commune de Mbalmayo drainée par le bassin hydrologique du fleuve Nyong [82] .....	99

<b>Figure 59:</b> Organisation du sol sur la commune Mbalmayo [84] .....	101
<b>Figure 60:</b> Les résultats de la prédiction de l'ANN sur l'apprentissage et test .....	105
<b>Figure 61:</b> L'erreur quadratique moyenne (MSE) du réseau de neurone artificiel (ANN) .....	105
<b>Figure 62:</b> La fonction fitness de chaque algorithme à chaque itération .....	106
<b>Figure 63:</b> Comparaison GA-ANN au modèle CFD et gaussien .....	107
<b>Figure 64:</b> Evolution de l'émission CO entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	108
<b>Figure 65:</b> Evolution de l'émission NO <sub>2</sub> entre Janvier 2017 et Décembre 2021.....	108
<b>Figure 66:</b> Evolution chaque mois de l'émission du SO <sub>2</sub> entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	109
<b>Figure 67:</b> Evolution chaque mois de l'émission du PM <sub>10</sub> entre Janvier 2017 et Décembre 2021 .....	109
<b>Figure 68:</b> Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mai 2021 sur la base du modèle GA-ANN .....	110
<b>Figure 69:</b> Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mai 2021 sur la base du modèle GA-ANN .....	111
<b>Figure 70:</b> Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mars 2019 sur la base du modèle GA-ANN.....	112
<b>Figure 71:</b> Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mars 2019 sur la base du modèle GA-ANN.....	112
<b>Figure 72:</b> Dispersion des polluants selon la direction du vent .....	113
<b>Figure 73:</b> Dispersion des polluants selon la direction du vent .....	114
<b>Figure 74:</b> Evolution de la concentration des polluants dans l'espace en fonction du débit massique de la source.....	115
<b>Figure 75:</b> Evolution de la concentration des polluants dans l'espace en fonction de la vitesse	116
<b>Figure 76 :</b> Evolution de la concentration en CO au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba .....	117
<b>Figure 77:</b> Evolution de la concentration en SO <sub>2</sub> au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba .....	117
<b>Figure 78:</b> Evolution de la concentration de NO <sub>2</sub> au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba .....	118
<b>Figure 79:</b> Evolution de la concentration de PM <sub>10</sub> au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba .....	118

**Figure 80:** Courbes d'évolution de la concentration en fonction de la profondeur sur la base du modèle GA-ANN..... 119

**Figure 81:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau..... 120

**Figure 82:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau..... 121

**Figure 83:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau..... 121

**Figure 84:** Evolution de la concentration des polluants en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau ..... 121

**Figure 85:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction la profondeur des différentes valeurs de la teneur en eau ..... 122

**Figure 86:** Evolution de la concentration des polluants en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la porosité ..... 123

**Figure 87:** Evolution de la concentration des polluants en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la perméabilité..... 124

**Figure 88:** Distribution des polluants en 2 dimensions dans la nappe phréatique de la ville de Mbalmayo pour  $Z=5$  m sur la base du modèle GA-ANN..... 125

**Figure 89:** Distribution des polluants en 3 dimensions dans la nappe phréatique de la ville de Mbalmayo pour  $Z=5$  m sur la base du modèle GA-ANN..... 125

**Figure 90:** Evolution de la concentration des polluants pour différentes valeurs de la vitesse de l'eau sur la base du modèle GA-ANN..... 126

## RÉSUMÉ

La pollution atmosphérique et souterraine due aux activités industrielles à risque est de nos jours l'une des premières causes des dommages sur la santé de l'homme et l'environnement. Pour protéger cette santé humaine, une réalisation de l'étude d'impact des activités industrielles à risque est effectuée sur deux zones d'études en utilisant un modèle d'optimisation prédiction. Cette thèse s'effectue dans le cadre législatif défini dans la loi n° 96/12 du 05 août 1996 portant loi-cadre relatif à la gestion de l'environnement. Le but de cette thèse est de limiter l'impact de l'activité des centrales thermiques sur les populations environnantes.

Nous avons d'abord fait une brève présentation générale des différentes centrales thermiques existantes. Par la suite nous avons identifié les différents polluants rejetés dans la nature par les centrales thermiques de Yassa-Dibamba et Mbalmayo. Puis une étude expérimentale réalisée dans les différentes zones d'études nous a permis de déterminer la teneur en eau dans le sol et la quantité de polluant émis dans l'atmosphère. Enfin l'utilisation du couplage algorithme génétique-réseaux de neurones a permis d'optimiser l'estimation de la concentration des polluants en milieu atmosphérique et souterrain.

Le modèle couplé algorithme génétique-réseaux de neurones a été comparé à d'autres modèles utilisés antérieurement et les résultats obtenus ont permis de valider l'utilisation de ce modèle. La modélisation de la dispersion des polluants en milieu atmosphérique et souterrain en tenant compte du vent (direction et vitesse), du débit massique, de la teneur en eau dans le sol, de la porosité efficace et de la perméabilité a montré que les activités des centrales thermiques de Yassa-Dibamba et Mbalmayo ont un impact nocif sur la santé des populations environnantes. Toutefois des mesures d'atténuations ont été proposées et les zones de protections des populations ont été indiquées.

**Mots clés :** dispersion atmosphérique, polluants, dispersion souterraine, optimisation et prédiction, concentration, pollution, modélisation.

**ABSTRACT**

Atmospheric and underground pollution caused by high-risk industrial activities is nowadays one of the main causes of damage to human health and the environment. In order to protect human health, a study of the impact of high-risk industrial activities was carried out on two study areas using an optimisation-prediction model. This thesis is carried out within the legislative framework defined in law no. 96/12 of 05 August 1996, which sets out the framework law for environmental management. The aim of this thesis is to limit the impact of the activity of thermal power stations on the surrounding populations.

We began with a brief overview of the various existing thermal power stations. We then identified the various pollutants released into the environment by the Yassa-Dibamba and Mbalmayo thermal power stations. Then an experimental study carried out in the different study areas enabled us to measure the water content in the soil and the quantity of pollutant emitted into the atmosphere. Finally, the use of a genetic algorithm and neural network coupling was used to optimise the estimation of the concentration of pollutants in the atmosphere and underground.

The coupled genetic algorithm-neural network model was compared with other models used previously, and the results obtained validated the use of this model. Modelling of the dispersion of pollutants in the atmosphere and underground, taking into account wind (direction and speed), mass flow, water content in the soil, effective porosity and permeability, has shown that the activities of the Yassa-Dibamba and Mbalmayo thermal power stations have a harmful impact on the health of the surrounding population. However, mitigation measures have been proposed and protection zones have been indicated.

**Keywords:** atmospheric dispersion, pollutants, underground dispersion, optimisation and prediction, concentration, pollution, modelling

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Durant les années 1960, les travaux sur la dispersion atmosphérique étaient prévus aux applications militaires. Mais à partir des années 1980, avec la mise en place des critères environnementaux et de santé publique, les recherches vont s'orienter vers l'évaluation de la qualité de l'air et l'eau [1]. La surveillance de la qualité de l'air fait suite à un épisode de pollution qui a marqué le siècle, notamment en Décembre 1952 où trois jours de pollution intense à Londres ont provoqués des troubles respiratoires chez des personnes fragiles et causés la mort de 4000 personnes [2, 3, 4, 5, 6, 7]. La pollution est liée au chauffage domestique, à la circulation automobile, en grande partie à la croissance industrielle des pays et à une consommation d'énergie en perpétuelle augmentation. Elle se définit comme l'introduction par l'homme directement ou indirectement des substances ayant des conséquences préjudiciable de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes; ou encore comme tout ce qui altère notre environnement ou notre santé, habituellement sous forme de substances mais aussi sous forme d'ondes [8].

De nos jours, malgré une baisse relative de la pollution avec la mise en place d'une réglementation pour limiter les émissions de certains polluants, une étude d'impact des sources anthropiques de la pollution est une nécessité. Car selon (OMS, 2016), la pollution atmosphérique serait responsable de 3 millions de décès dans le monde par an, près de 90% des décès liés à la pollution de l'air surviennent dans les pays à revenu faible [9]. Selon toujours (OMS, 2019), environ 91% des habitants de la planète respirent un air pollué, ce qui entraîne quelques 7 millions de décès chaque année [10]. Pour (FAO, 2021), la pollution des eaux du sol est peut-être invisible aux yeux de l'homme mais elle compromet la capacité des sols à fournir des services écosystémiques, notamment la production des aliments sûrs, nutritifs et de quantité suffisante [11]. Cette pollution des eaux du sol se définit comme l'altération de la qualité et de la nature de l'eau qui rend son utilisation dangereuse et (ou) perturbe l'écosystème aquatique. Selon (OMM, 2018), chaque année plus de 12 millions de personnes décèdent à cause des risques cachés que recèle notre environnement et notamment l'air que nous respirons, l'eau que nous buvons ou encore des substances chimiques auxquelles nous sommes trop souvent exposés à notre insu [12].

D'après le rapport du (PNUE, 2020), les principales sources anthropiques de la pollution des sols sont les produits chimiques utilisés ou produits comme sous-produits des activités

industrielles, les déchets domestiques et les produits dérivés du pétrole [13]. Au Cameroun, la lutte contre pollution de l'air et des eaux souterraines est un enjeu sanitaire majeur dans toutes nos grandes villes. Car selon (Greening EU cooperation, 2021), l'index de performance environnemental (IPE) place Cameroun 178e place sur 180 pays [14]. La situation dans le domaine de la qualité de l'air est également préoccupante, puisque le Cameroun obtient l'un des plus mauvais résultats au niveau international et figure notamment au bas du classement des pays dans les domaines du traitement des eaux usées, eau et assainissement qui participent tous deux de la santé publique. C'est pour cette raison que des mesures réglementaires sont prises pour réduire la quantité de polluants émis en milieu atmosphérique et souterrain. Ces mesures sont définies par la loi n°96/12 du août 1996 portant loi cadre relative à la gestion de l'environnement, et le décret n°2011/2582/PM fixe les modalités de protection de l'atmosphère [15]. Mais ces mesures restent insuffisantes, car en 2019 sur 100 000 décès au Cameroun 208 sont attribuable à la pollution de l'air [16]. De plus l'analyse des paramètres chimiques à Yaoundé a montré que 51 % des échantillons d'eau souterraine dépasse la norme OMS de 50 mg/l pour le nitrate accroissant le risque de morbidité [17]. Dès cet instant, malgré la mise en place des modèles de surveillance de la qualité d'air et d'eau, la problématique de la pollution de l'environnement reste encore un défi important.

Pour apporter des solutions à cette problématique de la pollution environnementale, nous nous sommes posés plusieurs questions à savoir : Quelles solutions alternatives mettre en œuvre pour une protection durable des populations? Les modèles d'optimisation-prédictions pour leur bonne précision et leur rapidité, peuvent-ils être opérationnels pour estimer l'impact de la pollution sur les récepteurs sensibles? Parmi ces modèles d'optimisation-prédictions, est-il possible d'utiliser le couplage algorithme génétique-réseaux de neurones pour estimer l'impact des sources de pollution sur les populations environnantes? Quelles sont les paramètres qui peuvent influencer sur la dispersion des polluants en milieu atmosphérique et souterrain?

Pour répondre à ces différentes questions de recherche trois hypothèses ont été formulées : Premièrement le couplage algorithme génétique-réseaux de neurones est un modèle d'optimisation et de prédiction, deuxièmement le couplage algorithme génétique-réseaux de neurones peut permettre une bonne estimation de la concentration des polluants à proximité des récepteurs sensible et troisièmement le vent, le débit massique, la porosité efficace, la perméabilité et la teneur en eau peuvent influencer sur la dispersion des polluants.

Ainsi, ce travail a pour objectif de limiter l'impact des substances polluantes issues des rejets des centrales thermiques de Yassa-Dibamba et Mbalmayo sur les populations environnantes par utilisation du couplage algorithme génétique-réseaux de neurones.

Ce travail à plusieurs objectifs visés, on peut citer:

- Identifier les contaminants issus des centrales thermiques
- Présenter et évaluer le couplage algorithme génétique-réseaux de neurones
- Evaluer l'influence des paramètres sources, atmosphériques et souterrains sur l'évolution des polluants
- Evaluer l'impact de l'activité des centrales thermiques sur la qualité de l'air et l'eau
- Identifier les zones de protections
- Proposer des mesures d'atténuation des émissions de polluants.

Cette thèse s'articule autour de trois parties. Dans la première partie, on a la présentation générale des centrales thermiques, les différents polluants émis, les différents facteurs impliqués dans la dispersion de la pollution et les différents modèles existants, leurs avantages et leurs limites. La deuxième partie présentera le matériel et la méthode utilisée pour la collecte et le traitement des données, et la présentation de l'outil de modélisation. La troisième partie est consacrée à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats.

**CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR  
LA POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE ET SOUTERRAINE**

## **CHAPITRE I: REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET SOUTERRAINE**

### **Introduction**

Une brève présentation des centrales thermiques au Cameroun, une description générale de la pollution atmosphérique, souterraine et leurs différentes sources d'émissions feront l'objet de ce chapitre. Puis suivra les différents mécanismes de dispersion en milieu atmosphérique et souterrain. Enfin ce chapitre s'achève par la présentation de l'intérêt des travaux antérieurs, leurs limites et la justification de l'importance de ce travail.

### **I.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES CENTRALES THERMIQUES AU CAMEROUN**

Le Cameroun est engagé depuis 2010 dans un vaste programme de développement visant l'atteinte de l'émergence du Pays à l'horizon 2035. L'atteinte de cet objectif implique un accroissement massif et progressif de la demande énergétique dans divers secteurs d'activités dont la satisfaction actuelle est soutenue difficilement par les sources d'énergie hydroélectrique. Sur le plan de l'électrification, l'extension du réseau national qui ne permet pas d'atteindre les zones rurales de manière optimale exige une production énergétique de plus en plus importante. Ces perspectives ouvrent les portes au développement de toutes les formes d'énergie exploitables dans le pays moyennant la mise en place des mécanismes appropriés. L'énergie thermique, dont le potentiel est considérable sur l'ensemble du territoire national est la solution d'urgence adoptée par le gouvernement camerounais sur le court terme pour résorber le déficit énergétique du pays. Le programme thermique d'urgence (PTU) initié en 2009 et opérationnel depuis janvier 2012, offre actuellement 100 mégawatts (MW) d'énergie supplémentaire au Réseau interconnecté Sud (RIS). Cette énergie est produite par quatre centrales thermiques installées dans les villes de Yaoundé (60 MW), Bamenda (20 MW), Mbalmayo (10 MW) et Ebolowa (10 MW) pour un coût de 22,4 milliards [18]. Bien que le PTU soit une mesure transitoire, les centrales continueront de fonctionner et de contribuer à l'offre énergétique du pays après la mise en service de la centrale à gaz de Kribi. Ce sera alors comme nous l'explique le coordonnateur, une contribution comme « production de secours » en cas d'incident sur les réseaux de transport ou de répartition et surtout pour soutenir les niveaux de tension à certaines extrémités des réseaux. Dans sa note d'information trimestrielle en 2020, l'électricien camerounais eneo a annoncé une baisse de la production de 32,6% des centrales thermiques installées dans le pays pour approvisionner

certaines populations en électricité, par rapport à la même période en 2019. Cette baisse de production dans le thermique, qui a induit de nombreux délestages dans le pays a partiellement été compensée par l'hydroélectricité, dont la production a progressé de près de 3% globalement entre janvier et mars 2020. Ce qui a permis aux centrales de Songloulou et d'Edéa d'assurer 65% de l'offre énergétique au Cameroun sur la période, contre 19% pour la centrale à gaz de Kribi et la centrale thermique de Yassa-Dibamba [19].

### I.1.1 Localisation géographique des centrales thermiques au Cameroun

La (figure1) illustre la carte électrique du Cameroun, qui permet de localiser toutes les centrales du pays

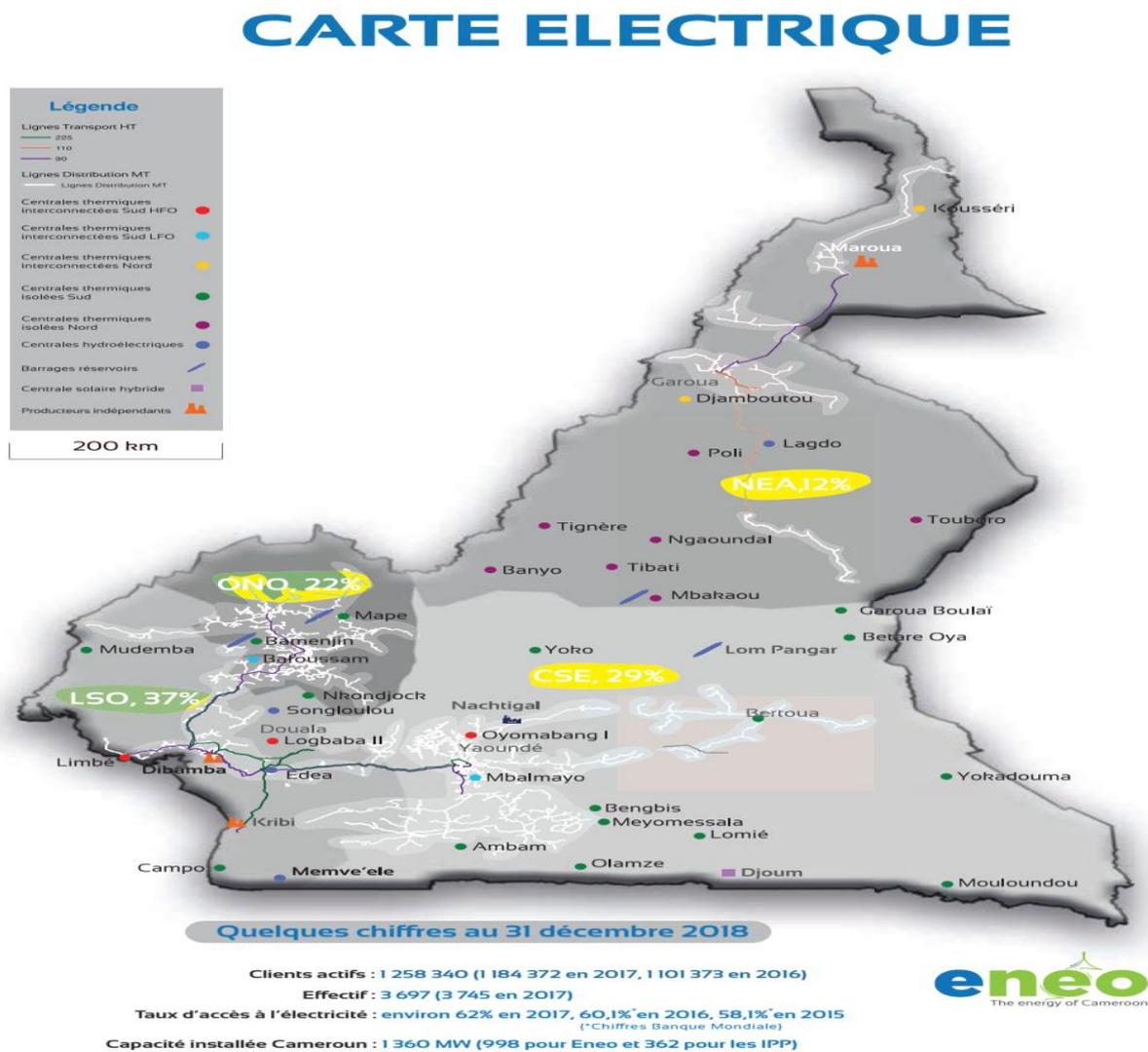


Figure 1: Carte électrique du Cameroun permettant de localiser toutes les centrales du pays [20]

### **I.1.2 Contexte écologique, social et économique des centrales thermiques au Cameroun**

Depuis quelques années, avec l'avancé des progrès scientifiques, plusieurs pays se sont lancés dans la course au développement et le Cameroun n'est pas en reste. C'est ainsi qu'au Cameroun un ensemble de plan de stratégie gouvernemental notamment à but économique et sociale est élaboré pour atteindre l'émergence 2035. Dans ce plan l'énergie électrique occupe une place de choix car l'énergie est le poumon de l'économie et sans énergie il n'y a pas d'activité. Au Cameroun, 73% de la production d'énergie est de source hydraulique et le taux d'accès à l'électricité est de 62% en 2017 [20]. C'est ainsi qu'avec une démographie de plus en plus croissante et une occupation progressive des terres que chaque année, la demande en énergie électrique s'accroît également. Tout ceci pousse le gouvernement d'abord à répondre à la demande sociale, mais aussi pour des soucis de rentabilités économiques à construire des centrales thermiques pour contribuer de manière significative à la croissance socio-économique tout en renforçant l'accès à l'énergie au Cameroun. Cependant ces centrales thermiques sont des sources de pollutions, et les expositions à la pollution de l'air ambiant et à la pollution de la nappe phréatique sont les premiers facteurs de risque de détérioration de l'environnement et de la santé humaine [21, 22]. Cette pollution de la nappe phréatique entraîne également une réaction en chaîne qui commence par une diminution de la biodiversité du sol, réduit les taux d'incorporation de la matière organique et finalement la structure du sol et sa capacité à résister à l'érosion [23]. Donc l'une des conséquences pour l'humanité est de faire face de nos jours sur le plan environnemental aux catastrophes naturelles et sur le plan de la santé aux maladies cardiovasculaires, au choléra dû aux activités industrielles, notamment les centrales thermiques [24]. Pour éviter ces conséquences, des lois réglementant l'activité des centrales thermiques ont été faites au Cameroun.

### **I.1.3 Cadre réglementaire des centrales thermiques au Cameroun**

Le travail que le Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature présente s'effectue dans le cadre législatif défini dans la loi n° 96/12 du 05 août 1996 portant loi-cadre relatif à la gestion de l'environnement et complété par diverses lois sectorielles régissant l'activité industrielle. Il vise à limiter ou à supprimer les rejets des polluants dans l'eau et/ou dans l'air issus de la production de déchets et l'utilisation de certains produits chimiques [15]. C'est ainsi que comme tous les pays modernes qui entreprennent la tâche difficile que représente

le développement durable, voire l'industrialisation dans les conditions de protection de l'environnement, le Cameroun doit s'intégrer au mouvement général de mise en œuvre des normes environnementales contraignantes, et acceptées par les diverses parties prenantes.

La loi cadre n°96/12 du 5 août 1996 régie la gestion de l'environnement au Cameroun. Cette gestion est soumise au respect des différentes conventions et traités auxquels le Cameroun adhère. Les principes qui soutiennent cette loi visent d'une part la prise des précautions pour la prévention des risques de dommages graves et irréversibles à l'environnement, par utilisation des meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable. D'autre part, ils concourent à responsabiliser tout pollueur et à faire contribuer tout citoyen à la protection de l'environnement. La loi n°96/12 du 5 août 1996 portant loi cadre relative à la gestion de l'environnement dispose en son article 17 que « le promoteur ou le maître d'ouvrage de toute installation qui risque, en raison de sa dimension, de sa nature ou des incidences des activités qui sont exercées sur le milieu naturel, de porter atteinte à l'environnement est tenu de réaliser, selon les prescriptions du cahier des charges, une étude d'impact permettant d'évaluer les incidences directes ou indirectes dudit projet sur l'équilibre écologique de la zone d'implantation » Par ailleurs, l'article 6 stipulé que :

Toutes les institutions publiques et privées sont tenues dans le cadre de leur compétence, de sensibiliser l'ensemble des populations aux problèmes de l'environnement. Elles doivent par conséquent, intégrer dans leurs activités des programmes permettant d'assurer une meilleure connaissance de l'environnement.

L'article 7 quant à lui prescrit que: Toute personne a le droit d'être informée sur les effets préjudiciables pour la santé de l'homme et l'environnement des activités nocives, ainsi que sur les mesures prises pour prévenir ou compenser ces effets. En application au décret n° 2005/0577/PM du 23 février 2005 fixant les modalités de réalisation des études d'impact environnemental, la CTY et CTM réalisent à travers nous cette étude d'impact qui lui permettra de contribuer à la protection des composantes environnementales telles que : Les récepteurs sensibles, l'atmosphère, les ressources en eau et la biodiversité. La protection de l'atmosphérique et des nappes phréatiques passe par :

➤La réduction des émissions des substances polluantes (fumées, poussières, gaz toxiques, corrosifs ou radioactifs, odeurs).

➤ La participation à la création des zones de protections dans le but de limiter ou de prévenir un accroissement de la pollution atmosphérique et souterraine suite au développement industriel.

➤ La prise des mesures tendant à l'application des normes existantes notamment le Protocole de Montréal et ses amendements, au développement, à l'utilisation des énergies renouvelables nettes et à la préservation de la fonction régulatrice des forêts sur l'atmosphère.

La protection de la biodiversité par la loi cadre passe par la prise en compte des Articles 31' (1) et 36' (1) qui interdisent les déversements, les écoulements, immersions et incinérations dans les eaux et sur les sols de la juridiction camerounaise. Les textes d'application récemment publiés en matière d'étude d'impact environnemental sont :

- Le décret n° 2005/0577/PM du 23 février 2005 fixant les modalités de réalisation des études d'Impact Environnemental.

- L'arrêté n° 0070 / MINEP du 22 Avril 2005 fixant les différentes catégories d'opérations dont la réalisation est soumise à une Etude d'Impact Environnemental.

- L'Arrêté n° 00004 / MINEP du 03 Juillet 2007 fixant les conditions d'agrément des bureaux d'études à la réalisation des Etudes d'Impact et d'Audits Environnementaux.

## **I.2 DESCRIPTION DES MOTEURS ET COMBUSTION**

### **I.2.1 Les Moteurs à combustion interne (MCI)**

Les moteurs diesel ou à injection, les moteurs à essence ou à allumage commandé ainsi que les turbines à gaz font partie de la classe des moteurs thermiques dont la production de travail mécanique est directement réalisée par la détente des produits de combustion dans les cylindres. Plus spécifiquement, parce que tout leur cycle se déroule entièrement dans un seul organe, l'arrangement piston-cylindre, les moteurs à essence et diesel sont regroupés sous le vocable de MCI. A cause de cette conception qui les rend très versatiles parce que compacts et ayant un bon rendement thermique, ils dominent le secteur du transport et trouvent également des applications dans la production thermique électrique en tant que moteurs d'appoint ou dans des centrales électriques de faible ou de moyenne puissance. Ainsi, l'industrie des MCI est l'une des plus florissantes au monde et donc participe dans les mêmes proportions à la pollution locale et globale de l'environnement. En fonction de la caractéristique mise en avant, les MCI sont eux-mêmes soumis à plusieurs types de classification: à essence ou diesel suivant le type de carburant consommé (essence ou gasoil), à deux ou à quatre temps, mono ou multicylindres, suralimentés

(turbo) ou non, cylindres en ligne ou en V...etc. Il faut indiquer également que la recherche continue d'une plus grande efficacité, a amené les ingénieurs à développer des prototypes particuliers de moteurs à essence (moteurs Wankel) ou diesel (carburant mixte: gasoil-gaz) ou encore de moteurs hybrides (essence à injection)...etc.

### **I.2.2 Moteurs diesel**

Les moteurs thermiques sont essentiellement conçus sur la base de deux principes dont le principe de conservation de l'énergie et celui de l'accroissement de l'entropie. Pour s'affranchir des sentiers classiques, disons que le premier principe peut être traduit tout simplement de la manière suivante: pendant le fonctionnement des Groupes, la combustion du fioul dans les cylindres ne peut libérer au plus que la quantité d'énergie chimique (Pouvoir calorifique du combustible multiplié par sa masse) préalablement contenue dans ces combustibles. Quant au deuxième principe, il a trait au processus de transformation de la chaleur libérée par la combustion en travail mécanique qui s'effectue de la manière suivante : après aspiration puis compression de l'air, la combustion commence après l'injection du gasoil dans l'air densifié. Cette phase s'accompagne toujours par des pertes d'énergie dues d'abord au fait que la combustion n'est jamais totalement complète et ensuite, une partie de l'énergie sera prélevée pour le chauffage des lubrifiants, du bâti du moteur lui-même et une fraction sera enfin perdue par rayonnement et par convection. Le reste de l'énergie va subir une détente qui aura pour effet de produire du travail mécanique et finalement, les produits de combustion (en fait de l'énergie) sont rejetés au milieu extérieur. Ainsi, on se rend compte que la chaleur libérée par la combustion n'a pas été entièrement utilisée pour produire le travail mécanique recherché à cause justement des pertes que nous avons énuméré. Or le but de tout moteur thermique est de réaliser un travail maximum, l'idéal étant que toute l'énergie thermique de départ se transforma en travail. Intuitivement donc, la tentation serait de réduire les pertes d'énergies notamment l'énergie rejetée au milieu extérieur. Il y a lieu de remarquer d'ailleurs qu'en se tenant strictement au premier principe, cela est possible puisque le fondement de celui-ci est que le potentiel énergétique de départ se conserve sans présager de la manière dont elle est transformée, et à la limite ce principe admet que toute l'énergie thermique libérée par la combustion puisse se transformer intégralement en travail. Mais pour le second principe, il y a que sur le terrain les performances d'un moteur thermique peuvent être mesurées à deux niveaux: Premièrement au niveau des performances énergétiques: Pour le gestionnaire d'une centrale thermique, les

performances les plus à suivre sont: la consommation spécifique exprimée en g/kWh, la consommation totale annuelle de carburant (en g ou kg) et la production thermique totale (kWh). On y inclut dans le cas général: la conception même du moteur (essence ou diesel, la forme de la chambre de combustion, le système d'injection...), la qualité des carburants utilisés et leurs adéquations avec le moteur, le nombre de cétane ou d'octane respectivement pour les moteurs diesel et à essence, les rendements thermique effectifs et la puissance effective délivrée. Deuxièmement, au niveau des performances environnementales, dont les plus en vue sont le taux de rejets aux cheminées, les bruits, la contamination des sols due aux fuites d'huile et de carburant.

### **I.2.3 Moteur WARTSILA Vasa**

Dans cette partie, nous nous attarderons à une étude partielle du type de moteur utilisé à la centrale thermique de Yassa-Dibamba (CTY) et de Mbalmayo (CTM) celui de type WARSILA VASA et de marque 18V32LN. Ce moteur est un turbo diesel à 4 temps à refroidissement intermédiaire et à injection directe de combustible. D'une manière générale, nous présenterons quelques-unes de ces pièces essentielles représentées suivant la configuration en V des moteurs. Notons ici que ce type de configuration est bien particulier dans la mesure où le rendement énergétique est plus important que la simple configuration de part ses caractéristiques. Ce qui suit définit les termes utilisés du côté de l'opération ou du côté exploitation, c'est le côté du moteur dans lequel est disposé les commutations (démarrer, arrêter, tableau de bord, régulateur de vitesse). La désignation des cylindres se fait selon la norme ISO 1204 et DIN 6265. Les cylindres désignés à partir de la face d'entraînement dans un moteur à cylindres en V et les cylindres du côté gauche vu depuis le côté entraînement sont étiquetés A1, A2...etc. et le côté droit B1, B2... etc. Pour chaque V présenté on a la configuration interne comme l'indique la (figure2).

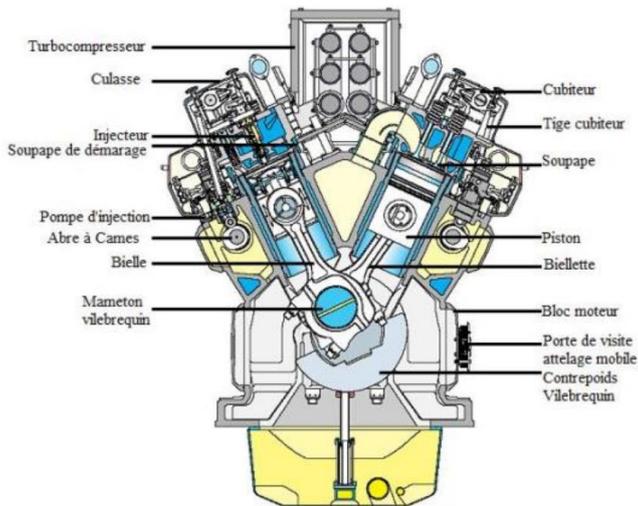


Figure 2: Moteur WARTSILA Vasa [25]

#### I.2.4 Fiouls domestique, légers et lourds

Les fiouls sont des combustibles liquides résultant de la distillation du pétrole brut. On distingue trois types de fioul classés en fonction de leur densité :

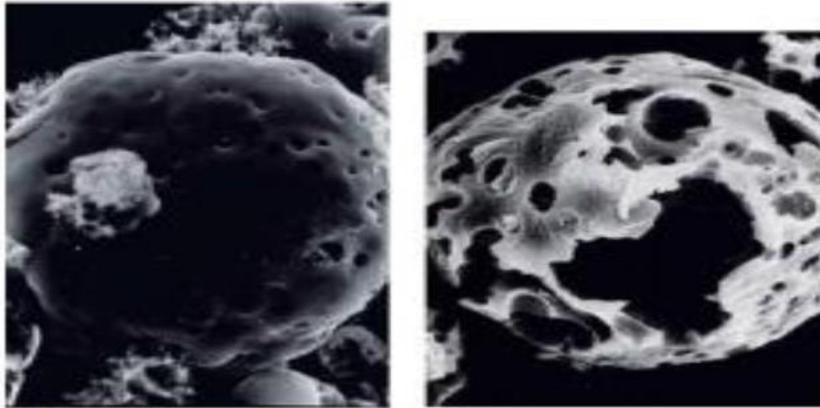
- Le fioul domestique avec une densité comprise entre 0,86 et 0,89 (proche du gasoil)
- Le fioul léger (LFO) issu de la distillation des raffineries, avec une densité comprise entre 0,89 et 0,92 ; (gasoil), utilisé dans la centrale thermique de Mbalmayo.
- Le fioul lourd (HFO) issu de la distillation atmosphérique, avec une densité comprise entre 0,92 et 0,95, utilisé dans la centrale thermique de Yassa-Dibamba.

Le pétrole brut au départ est soumis à une distillation atmosphérique à l'issue de laquelle une partie est traitée sous vide puis par cokéfaction ou par dés-asphaltage, on obtient des fiouls lourds avec une teneur élevée en soufre (HTS). Par contre en utilisant une hydrodésulfuration convertissant des résidus d'une distillation sous vide on obtient des fiouls lourds désulfurés (BTS et TBTS). Les fiouls lourds constituent, dans de nombreuses régions une part de moins en moins importante du « baril » de pétrole brut. Cette production décroissante s'accompagne souvent de tensions sur la qualité des produits, avec des risques de répercussions sérieuses sur le fonctionnement des installations de combustion et sur leurs rejets de polluants. Ces fiouls lourds communément appelés fioul lourd N° 2 se répartissent en trois produits distincts :

- Le fioul lourd HTS (Haute Teneur en Soufre) connue sous le nom de fioul 1500 pouvant contenir jusqu'à 4 % (masse) de soufre ;
- Le fioul lourd BTS (Basse Teneur en Soufre) renfermant moins de 2 % de soufre ;

- Le fioul lourd TBTS (Très Basse Teneur en Soufre) connue sous le nom de fioul 3500 renfermant moins de 1% de soufre. Ces différents teneurs en soufre sont certifiées par la norme NF EN ISO 14596 / NF EN ISO 8754 NF EN 24260

Avant d'être injecté dans la chambre à combustion, le fioul doit être traité avant la combustion afin de réduire au mieux les émissions des polluants, ainsi nous vous proposons le schéma synoptique du fioul non traité (a) et du fioul traité (b) (figure 3).



(a) Fioul non traité (2-10um)

(b) Fioul traité (2-8um)

Figure 3: Cénosphères au microscope électrique

### I.2.5 Processus de combustion d'un moteur diesel

Dans un moteur Diesel, l'allumage est obtenu par une auto-inflammation du carburant suite à l'échauffement de l'air sous l'effet de la compression. Un rapport de compression normal est de l'ordre de 14 à 25. Un tel taux de compression amène la température de l'air dans le cylindre de 700 à 900°C. Cette température étant celle de l'auto-inflammation du mazout, celui-ci s'enflamme spontanément au contact de l'air, sans qu'il y ait besoin d'une étincelle et par conséquent sans système d'allumage [26].

#### ➤ Cycle à quatre temps

Le cycle de fonctionnement du moteur Diesel se décompose en quatre temps : Le premier temps correspond à l'ouverture des soupapes d'admissions et à l'entrée d'air frais ; le deuxième temps correspond à la compression de l'air frais ; le troisième temps correspond à la détente des gaz et le quatrième temps correspond à l'ouverture des soupapes d'échappements et à la sortie des gaz brûlés (figure 4). Le cycle mécanique correspond à

deux allers et deux retours de piston, c'est-à-dire quatre courses, et deux tours de rotation du vilebrequin, soit  $720^\circ$ .

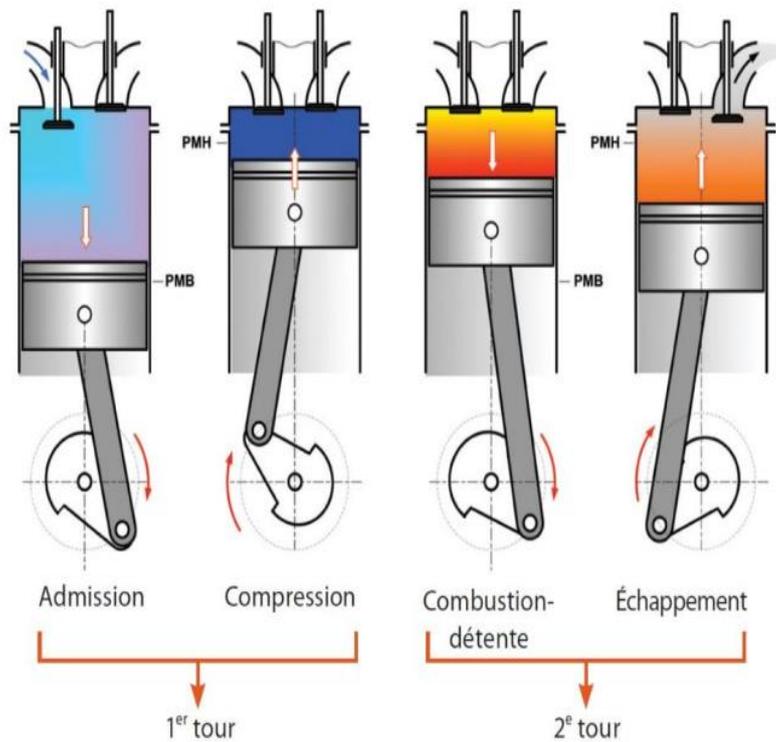


Figure 4: Les quatre temps du moteur diésel [27]

### ➤ Cycle théorique

L'étude des cycles théoriques de moteurs alternatifs à combustion interne permet de connaître l'influence des paramètres de la machine les plus importants, accessibles aux calculs. Les transformations subies par le fluide du cycle théorique sont les suivantes (figure 5) [28].

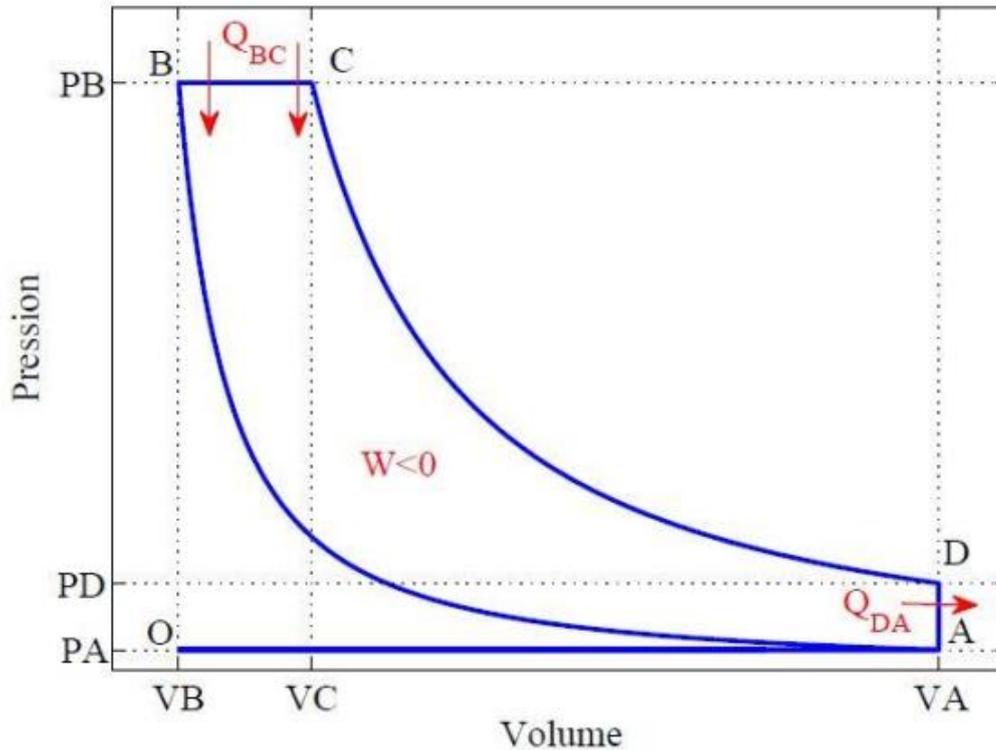


Figure 5: Cycle diesel

$O \rightarrow A$  : Aspiration du gaz à la pression atmosphérique dans le cylindre le long de la droite isobare  $OA$  :  $PO = PA = Pa$  (avec  $Pa$  la pression atmosphérique)

$A \rightarrow B$  : Compression isentropique (sans échange de chaleur avec les parois du moteur).

$B \rightarrow C$  : Combustion instantanée du gaz à pression constante le long de la droite isobare  $BC$  avec une forte élévation de la pression.

$C \rightarrow D$  : Détente isentropique du gaz chaud qui ramène le volume à  $VA$ , mais à une pression au point  $PD$  supérieure à celle de l'atmosphère.

$D \rightarrow A$  : Échappement des gaz brûlés à volume constant. Retour au point de départ  $O$

Le fluide fournit un travail ( $W < 0$ ), reçoit une quantité de chaleur ( $Q_{BC} > 0$ ) et libère une quantité de chaleur ( $Q_{DA} < 0$ ).

Le rendement thermodynamique de cycle théorique :

$$\eta_{th} = \frac{|W|}{Q_{BC}} \quad (1-1)$$

Avec  $W$  le travail fourni et  $Q_{BC}$  la quantité de chaleur reçue

L'application du premier principe de la thermodynamique, la variation d'énergie de système s'écrit :

$$\Delta E = W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0 \quad (1-2)$$

Le rendement thermodynamique s'écrit :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}} \quad (1-3)$$

La quantité de chaleur reçue :

$$Q_{BC} = mc_p(T_C - T_B) \quad (1-4)$$

La quantité de chaleur libérée :

$$Q_{DA} = mc_v(T_A - T_D) \quad (1-5)$$

Le rendement thermodynamique devient :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(T_A - T_D)}{(T_C - T_B)} \quad \text{Avec} \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (1-6)$$

Avec  $c_p$ ,  $c_v$  la capacité thermique massique à pression et à volume constant respectivement et  $\gamma$  est le coefficient poly tropique.

Le fluide est un gaz parfait donc  $TV^{\gamma-1} = C^{cte}$  on pose :

$$T_2 = T_1 r_c^{\gamma-1} \text{ et } \frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} \quad (1-7)$$

On pose  $\varepsilon = \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$ , d'où le rendement thermodynamique devient :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}} \left( \frac{\varepsilon^{\gamma-1} - 1}{\gamma(\varepsilon - 1)} \right) \quad (1-8)$$

### I.3 COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ATMOSPHERE

L'atmosphère représente la couche gazeuse qui constitue l'enveloppe d'un corps céleste comme la terre. L'atmosphère correspond à une couche d'air dont l'épaisseur est de l'ordre de 500km, alors que le rayon de la terre est de 6730km [29].

Les propriétés de l'atmosphère jouent un rôle plus ou moins moteur dans la dispersion d'un produit. Du point de vu de la composition chimique, l'air atmosphérique est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur dont le rôle est important en météorologie. On peut classer ces mélanges en deux catégories qui sont les mélanges permanents et les mélanges variables (tableau 1).

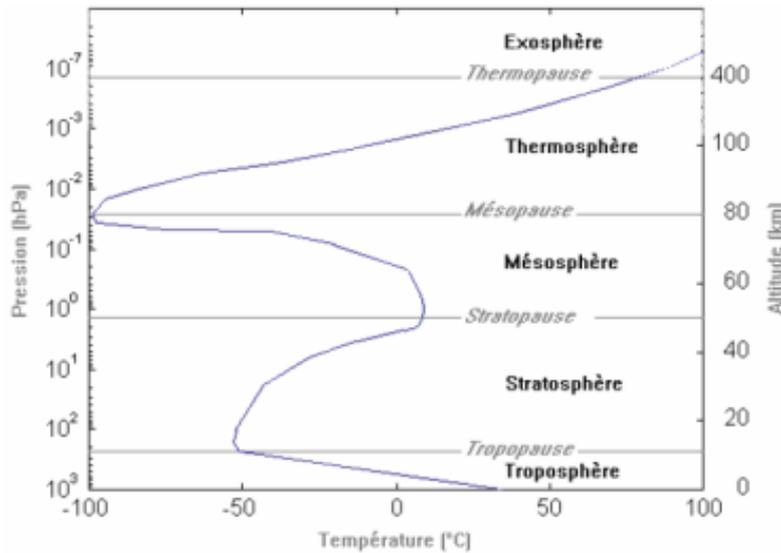
Tableau 1:Composition de l'air

<b>Constituants</b>	
Constituants permanents (l'air purs)	Constituants variables
Gaz principaux	Eau (Extérieur) $H_2O$
Diazotes ( $N_2$ )	Dioxyde de carbone ( $CO_2$ )
Dioxygène ( $O_2$ )	Dioxyde de soufre ( $SO_2$ )
Argon ( $Ar$ )	Ozone ( $O_3$ )
	Dioxyde d'azote ( $NO_2$ )
Gaz traces	
Néon ( $Ne$ )	
Hélium ( $He$ )	
Krypton ( $Kr$ )	
Xénon ( $Xe$ )	
Dihydrogène ( $H_2$ )	
Méthane ( $CH_4$ )	

On estime que 99% de la masse d'air atmosphérique se situe entre le sol et l'altitude de 40km, et les phénomènes météorologies dans cette tranche sont qualifiés d'atmosphère météorologies.

## I.4 LA STRUCTURE VERTICALE DE L'ATMOSPHERE

La structure verticale de l'atmosphère peut être conventionnellement découpée en quatre zones, selon l'altitude et le profil vertical de la température qui donne le plus souvent les différentes couches (figure 6), on peut citer : La troposphère; la stratosphère ; la mésosphère et hétérosphère.



**Figure 6:** Schéma structurel de l'atmosphère terrestre et son profil de [30]

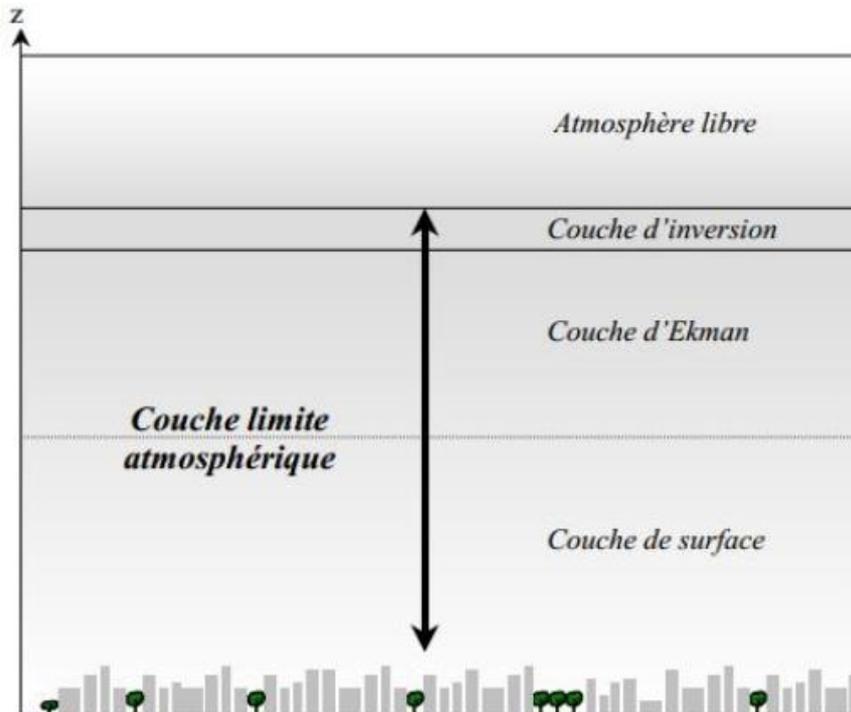
De toutes ces couches, la troposphère est la couche où les polluants sont généralement émis tout près de la surface terrestre, notamment au niveau de la couche limite atmosphérique. C'est la couche qui est située juste au-dessus de la surface terrestre et qui s'étend en altitude sur 8 km à 15 km verticalement dépendamment de la latitude et dans laquelle la température décroît avec la hauteur.

### I.4.1 La couche limite atmosphérique

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) est définie comme la partie de la troposphère directement soumise à l'influence de la surface terrestre (dynamiquement et thermiquement). D'un point de vue dynamique, plusieurs facteurs de surface (rugosité, orographie, évapotranspiration...etc) perturbent l'écoulement du fluide, et l'échelle de réponse est courte (environ une heure). Par ailleurs, d'un point de vue thermique, les variations diurnes du rayonnement solaire entraînent des modifications thermiques à la surface terrestre, le forçage sur l'écoulement est donc plus long (de l'ordre de la journée). Du fait de cette convection thermique

variable, l'épaisseur de la CLA depuis la surface terrestre varie fortement et peut atteindre quelques kilomètres [31].

Au-dessus de la CLA se situe l'atmosphère libre où les champs météorologiques sont déterminés par la dynamique et la thermodynamique de grandes échelles (figure 7).



**Figure 7:** Représentation des différentes couches de la troposphère [32].

Cette couche limite atmosphérique est décomposée en trois grandes parties :

#### ***1.4.1.1 Une couche de surface***

Elle se situe juste au-dessus du sol, elle est présentée à la base de la couche limite atmosphérique de quelques dizaines de mètres dans laquelle les caractéristiques de l'atmosphère varient de moins de 10%.

- La force de cisaillement et les flux de chaleur y sont quasiment constants en fonction de l'altitude. Le principal moteur du flux radiatif est le rayonnement solaire.
- La distribution verticale de température (stratification thermique de l'air) induit aussi des mouvements verticaux des masses d'air chauffées et refroidies à proximité du sol.
- Le vent résulte de l'équilibre entre les forces de pressions, les forces de frottement et de la stratification thermique de l'air. Dans cette région la force de Coriolis est négligeable.

- La sous couche rugueuse : La couche de surface est composée d'une couche rugueuse dont l'épaisseur est de l'ordre de 1 à 3 fois la hauteur de la rugosité et dont les caractéristiques très irrégulières sont fortement influencées par les dimensions et la répartition des éléments rugueux. Celle-ci est donc une zone à fort gradient de vitesse de vent.
- La couche laminaire : En dessous de la couche rugueuse, se trouve la couche laminaire qui n'a que quelques centimètres d'épaisseur : elle se trouve en contact direct avec la surface. Elle est dominée par les effets visqueux.

#### ***1.4.1.2 Une couche d'Ekman (de transition)***

Surmontant la précédente et s'étendant jusqu'à la limite supérieure de la couche limite atmosphérique.

- La force de cisaillement et flux de chaleur y décroissent avec l'altitude, ils deviennent négligeables au sommet de la couche.
- Le champ de vent résulte de l'équilibre entre les forces de pression, les forces de frottement et la force de Coriolis ainsi que de la stratification thermique de l'air. Cette dernière provoque une rotation de la direction du vent à travers la couche (spirale d'Ekman) vers la direction du vent géostrophique propre à l'atmosphère libre.

Plus haut en altitude dans l'atmosphère libre, les forces de frottement n'ont plus d'effet. Le vent résulte uniquement de l'équilibre entre les forces de pression et la force de Coriolis. Le vent dit géostrophique est uniforme, horizontal et très peu turbulent.

#### ***1.4.1.3 Une couche d'inversion***

C'est une couche à partir de laquelle la température croît avec l'altitude, et l'ascendance des particules d'air est bloquée. La nuit lorsque cette couche d'inversion est proche du sol, on a très habituellement une pollution localisée et le jour cette couche se trouve à une certaine d'altitude éloignée du sol permettant une dispersion des polluants.

### **1.4.2 La Stabilité de la (CLA)**

Selon l'importance d'un type de turbulence par rapport à l'autre, l'atmosphère peut être stable, neutre ou instable. Le mouvement d'une particule d'air soumise à une impulsion sur la verticale se voit amplifier ou amortir. Ces trois stabilités types jouent un rôle dans la diffusion et le transport des polluants. La stabilité de CLA peut être caractérisée au moyen du nombre de Richardson, de la longueur de Monin-Obukhov et de la classe de stabilité de pasquill.

- **Nombre de Richardson**

Comme indiqué précédemment, selon l'importance d'un type de turbulence par rapport à l'autre, l'atmosphère peut être stable, neutre ou instable. Le degré de stabilité atmosphérique peut être caractérisé en comparant le gradient vertical de température  $\frac{\partial T}{\partial z}$  au gradient de température adiabatique  $-T$ .

Cette comparaison s'effectue généralement au moyen du nombre de Richardson de gradient, qui intègre à la fois le paramètre lié au gradient de température et celui lié à la vitesse du vent.

$$R_i = \frac{g}{T} \frac{\left( \frac{\partial T}{\partial z} + T \right)}{\left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad (1-9)$$

Avec :

- $R_i < 0$ , une atmosphère instable ;
- $R_i = 0$ , une atmosphère neutre ;
- $R_i > 0$ , une atmosphère stable.

- **La longueur de Monin-Obukhov**

La longueur de Monin-Obukhov permet aussi de qualifier l'importance relative de la turbulence mécanique et de la turbulence convective à une altitude donnée [33]. Elle est donnée par :

$$L_{mo} = - \frac{U_*^3 \rho C_p T}{g k q} \quad (1-10)$$

Avec :

- $\rho$  : masse volumique de l'air  $[kg / m^3]$
- $U_*$  : vitesse de frottement  $[m / s]$ .
- $C_p$  : chaleur massique de l'air à pression constante  $[J / kg.K]$
- $T$  : température de l'air  $[K]$
- $g$  : constante de gravité  $[m / s^2]$
- $k$  : constante de Von Karman  $[0,4]$

- $q$  : moyenne de la chaleur dans la direction verticale [ $W / m$ ]

Ainsi alors :

- $q = 0, L_{mo} \rightarrow \infty$  : le gradient vertical de température est adiabatique et l'atmosphère neutre
- $q < 0, L_{mo} > 0$  : le gradient vertical de température est positif et l'atmosphère stable
- $q > 0, L_{mo} < 0$  : le gradient vertical de température est négatif et l'atmosphère instable

La signification géométrique de cette longueur est la suivante :

- à des altitudes très petites devant  $L_{mo}$ , la turbulence mécanique prédomine ;
- à des altitudes très grand devant  $L_{mo}$ , la turbulence convective prédomine.

Le rapport  $\frac{z}{L_{mo}}$  indique l'importance relative de la turbulence mécanique et de la turbulence

convective à l'altitude  $z$ .

#### - Classes de Pasquill

Pasquill (1961) a défini une méthode permettant de caractériser la stabilité atmosphérique à partir de valeurs de vitesse du vent, du rayonnement solaire et de la nébulosité (tableau2). Cette méthode propose de classer la turbulence atmosphérique en 6 classes, A B C D E F, avec A la classe la plus instable ou turbulente, et la classe F la plus stable ou la moins turbulente. La classe D s'applique le jour ou la nuit par temps couvert, et cela par différentes vitesses de vent. Sa méthode fut légèrement modifiée la même année par Gifford.

**Tableau 2:** Détermination des classes de Pasquill en fonction de la vitesse du vent et du rayonnement solaire pendant la journée et de la vitesse du vent et du gradient vertical de la température pendant la nuit [34].

Vitesse du vent à 10m (m/s)	JOUR			NUIT		JOUR OU NUIT
	Rayonnement solaire			Nébulosité		Ciel couvert
	Fort	Modéré	Faible	4/8-7/8	<3/8	D
<2	A	A-B	B	F	F	D
2-3	A-B	B	C	E	F	D
3-5	B	B-C	C	D	E	D
5-6	C	C-D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

A : Très instable ; B : instable ; C : légèrement instable ; D : neutre ; E : légèrement stable ; F : stable

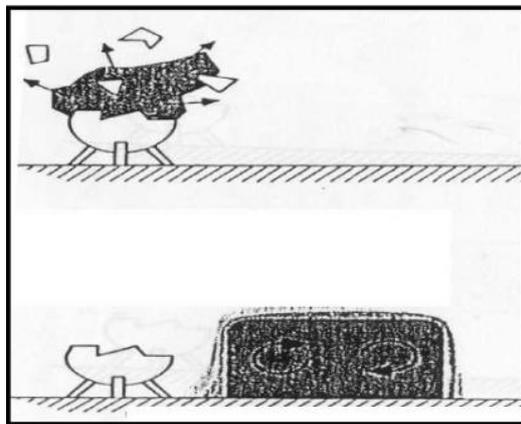
## I.5 LES FACTEURS INFLUENÇANT LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE

Le phénomène de dispersion est très variable dans le temps et dans l'espace. Il dépend principalement de deux facteurs affectant la dispersion dans les basses couches :

- Facteurs « indirects » qui sont liés aux paramètres de rejet.
- Facteurs « directs » dont les deux paramètres sont :
  - Les Conditions météorologiques (vitesse du vent, stabilité thermique de l'atmosphérique, turbulence...)
  - L'environnement ou la structure du paysage (nature du sol, bâtiments, reliefs,...etc.)

### I.5.1 Les Facteurs indirects liés aux paramètres de rejet

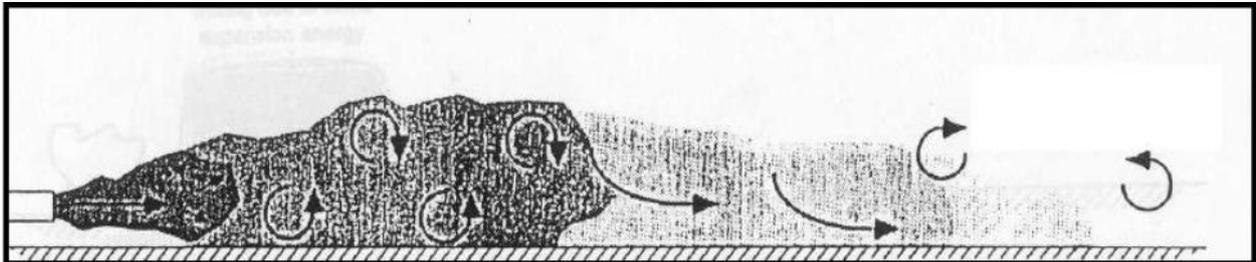
- **Les rejets de type instantané** sont définis par le relâchement immédiat de la totalité d'un polluant, et sont principalement caractérisés par la quantité émise à l'atmosphère et la pression de la capacité au moment de la rupture (éclatement). Le rejet peut être accidentel, comme la fuite d'une cuve d'une substance en direction du sol ou un dégagement de fumées dû à un incendie (figure8).



**Figure 8:** Rejet instantané d'un produit [35].

-**La fuite continue** est le relâchement de polluants lié au procédé de l'installation (rejets de routine) et se produit à partir d'un conduit ou d'une cuve de stockage ou de l'émission par une cheminée d'extraction. Le rejet peut aussi être chronique, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps. Les rejets sont les sous-produits indésirables de toute activité humaine, par exemple : Les gaz d'échappement des voitures, les fumées

d'usines, les chauffages urbains ou toute forme de pollution diffuse (émission de gaz issu d'une décharge) (figure 9).



**Figure 9:** Rejet continue d'un produit [35].

### I.5.2 Les Facteurs directs liés aux paramètres météorologies

Les variables couramment utilisés pour décrire l'atmosphère dont certaines prises en considération pour notre étude sont : la vitesse, la direction du vent, la température, le gradient vertical de température et la pression atmosphérique.

#### I.5.2.1 Le vent

Le vent est de l'air qui se déplace des anticyclones (hautes pressions) vers les dépressions (basses pressions). Il est un phénomène météorologique très variable en direction (figure 10a et 10b).



**Figure 10:** (a) Rose des vents de Douala et (b) rose des vents de Mbalmayo

La vitesse du vent est généralement plus forte le jour que la nuit et c'est l'un des paramètres météorologiques les plus influents sur la dispersion atmosphérique des polluants. Il joue un rôle primordial dans tous les phénomènes d'échanges de matière, d'énergie entre le sol et l'atmosphère. Les conditions de vent peuvent servir à transporter les polluants atmosphériques sur l'environnement urbain, à modérer les conditions microclimatiques urbains si elles sont satisfaisantes. Cependant elles peuvent compromettre le confort des piétons et la sécurité si elles ne le sont pas. Plus le vent augmente, plus les niveaux de pollution seront bas et le vent de faible vitesse conduit à une accumulation locale des polluants [36].

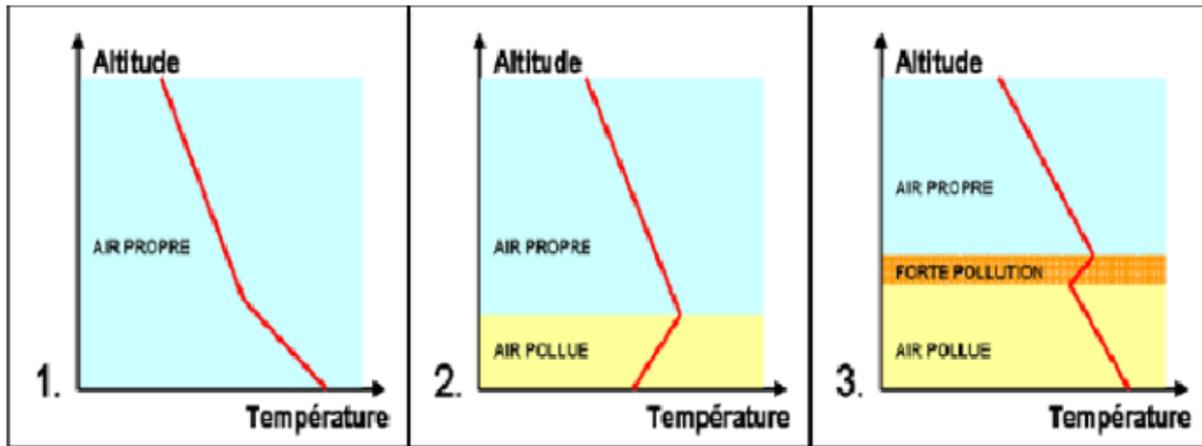
### ***1.5.2.2 La température et l'ensoleillement***

L'ensoleillement provoque le réchauffement des surfaces et conduit à des phénomènes de convection qui correspondent à des mouvements horizontaux et verticaux des gaz dans l'atmosphère, puisqu'un gaz chaud est plus léger et volatil qu'un gaz froid. Lorsque l'air au voisinage du sol est plus chaud qu'en altitude, il a tendance à s'élever, emportant avec lui les polluants (atmosphère instable). Cela favorise la dispersion verticale des polluants qui montent dans l'atmosphère et subissent une détente et un refroidissement. En revanche, si l'air est plus froid au niveau du sol qu'en altitude, les polluants vont avoir tendance à stagner près du sol, c'est le phénomène d'inversion thermique (atmosphère stable) caractérisé par des fortes concentrations atmosphériques [37].

### ***1.5.2.3 Le gradient vertical de température***

Le gradient thermique vertical agit sur l'état thermodynamique de l'atmosphère et détermine sa stabilité verticale. Dans la troposphère, la température diminue avec l'altitude (-1°C pour 100 mètres d'élévation quand l'air n'est pas saturé en vapeur d'eau et de -0,6°C s'il est saturé en vapeur d'eau) et un volume d'air qui s'éloigne de sa position initiale subit donc une variation de température [38]. Cette situation ne freine pas la dispersion verticale des masses d'air, et donc des polluants qui continuent à monter jusqu'à ce qu'ils atteignent un certain équilibre, c'est-à-dire jusqu'à ce que la densité de l'air ambiant soit la même que le gaz montant. Mais il peut exister des situations d'inversion de température à partir d'une certaine hauteur. Dans ce cas, une couche d'air chaud se trouve au-dessus d'une couche d'air plus froid et joue le rôle de couvercle thermique (atmosphère stable). L'air pollué est alors bloqué par cette couche d'air chaud. Ce phénomène contribue à la pollution locale et peut conduire aux pics de pollution. Il se

rencontre dans des situations météorologiques particulières : en début de matinée, suite à une nuit dégagée et sans vent, les couches d'air à proximité du sol se sont refroidies tandis que les couches immédiatement supérieures restent plus chaudes en hiver, lors de conditions anticycloniques (belle journée d'hiver ensoleillée, zone de hautes pressions) avec de faibles vents. Ces épisodes de pollution sont appelés « smog ». La (figure11) présente les trois types de gradient vertical de température les plus fréquents : gradient normal (1), gradient d'inversion thermique nocturne (2) et gradient d'inversion thermique diurne (3).



**Figure 11:** Différents types de gradients thermiques et qualité de l'air associé; 1: gradient normal, température descendante avec l'altitude; 2: inversion thermique nocturne; 3: inversion thermique diurne de vallée [39].

#### 1.5.2.4 La pression atmosphérique

En un point quelconque de l'atmosphère, la pression résulte du poids de la colonne d'air qui surmonte l'unité de surface. La pression décroît avec l'altitude puisqu'en s'élevant dans l'atmosphère on laisse en dessous de soi une colonne d'air de plus en plus importante. Par ailleurs plus l'air est froid, donc dense plus la décroissance de la pression est rapide. L'analyse attentive du champ de pression est particulièrement instructive en météorologie. En effet les mouvements de l'air sont directement liés à la répartition des pressions, et les fluctuations de la pression à un niveau donné intègre toutes les modifications de la nature de l'air dans l'épaisseur de l'atmosphère située au-dessus. Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion. 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 locale.

***1.5.2.5 Aspect dynamique***

**1.5.2.5.1 Influence de la nature des sols : notion de rugosité aérodynamique**

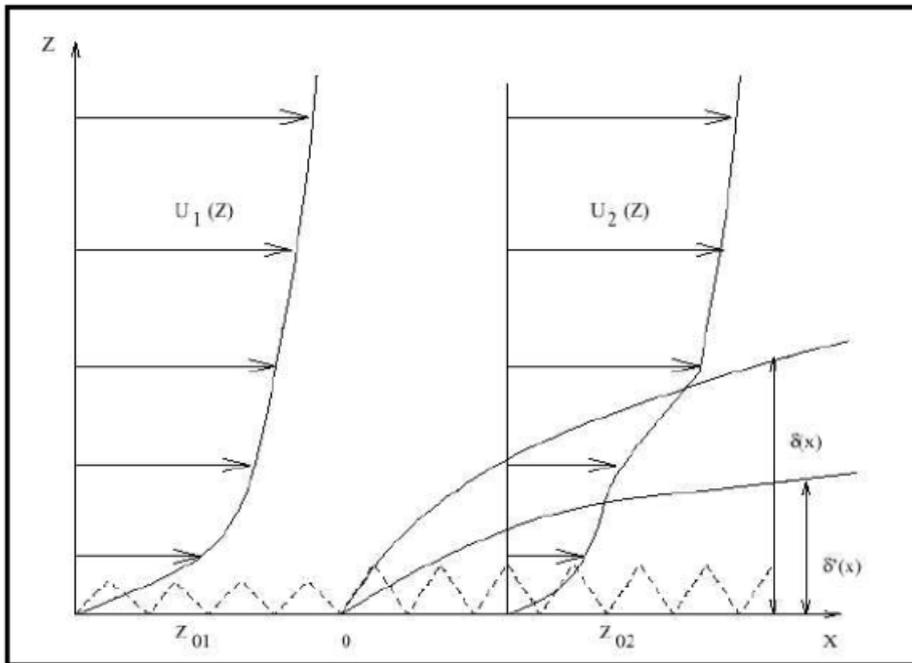
La longueur de la rugosité exprimée en mètre, caractérise l'influence globale de la sous-couche rugueuse (couche de surface) sur le profil de vent. On parle également de taille caractéristique des tourbillons au niveau du sol. Cette rugosité est corrélée à la hauteur des obstacles au sol (tableau3).

Tableau 3: Valeurs typiques de rugosité [40].

Sites caractéristiques	Classes de rugosité	Z0 (m)
Grandes étendues d'eau (mer, océan, lac)	I	De 0.001 à 0.01
Rases compagnes, aéroports	II	De 0.01 à 0.1
Zones faiblement urbanisées, bocages	III	De 0.1 à 0.5
Zone urbanisées, industrielles, forestiers	IV	De 0.5 a 1.5
Centres des villes	V	De 1.5 a 2.5

**1.5.2.5.2 Effet d'un changement de rugosité sur le champ de vent**

Si la nature du sol présente une discontinuité et que la hauteur de la rugosité passe brusquement de la valeur  $z_1$  à  $z_2$ , alors la structure du vent se trouve profondément perturbée en aval du changement de rugosité (figure 12).



**Figure 12:** Ecoulement sur une surface à rugosité variable [40].

### I.5.2.5.3 Effet de la présence d'un obstacle isolée

La perturbation du champ de vent par la présence d'obstacles isolés va dépendre : de la géométrie et des dimensions de l'obstacle ; de son état de surface ; des caractéristiques du vent incident; de l'environnement proche. Si l'on considère un cylindre infini, la structure de l'écoulement est caractérisée par les zones suivantes reportées sur la (figure13) ci-après :

Une zone de déplacement amont (a) est caractérisée par une diminution de la vitesse du vent et une modification de sa direction incidente vers la tangente de l'obstacle. Une surpression est à noter sur la face amont de l'obstacle. Les bords de l'obstacle sont le siège de la séparation d'une couche limite de l'écoulement à la paroi de l'obstacle (b). La zone de cavité (c) est la zone immédiatement en aval de l'obstacle. Le sillage turbulent (d) est caractérisé par la présence de nombreux tourbillons de différentes tailles.



**Figure 13:** Différentes zones caractéristique d'un écoulement autour d'un obstacle cylindrique

## **I.6 TYPOLOGIE DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES**

Les scientifiques ont recensés plusieurs certains d'espèces dans l'atmosphère. Selon la littérature la classification des espèces dépendent des objectifs des domaines d'études de la pollution atmosphérique, généralement cette classification se fait selon ces principaux critères :

- Le type d'émetteur
- Les échelles spatiales
- Les catégories de polluants

### **I.6.1 Les différents types d'émetteurs**

Les inventaires d'émissions posent le problème de l'exhaustivité. Bien souvent, les inventaires recensent les émetteurs qui contribuent le plus significativement aux émissions d'une substance donnée. Parmi tous les émetteurs potentiels de polluants, on a tendance à distinguer différentes catégories d'émetteurs :

- 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).
- Les sources anthropiques : Parmi les sources anthropiques, on oppose souvent les sources fixes, émises par des installations ne se déplaçant pas et des sources mobiles liées aux transports. Une autre notion est également importante pour la caractérisation des sources et de leur distribution géographique: c'est la notion de source ponctuelle, qui caractérise plutôt les grands sites industriels. Elle est étudiée en conjonction avec des données concernant leur localisation, leur capacité, leur activité... etc.

### **I.6.2 Les échelles spatiales**

#### ***I.6.2.1 Les échelles spatiales***

Les différentes typologies de pollution atmosphérique peuvent s'analyser selon 3 catégories, associées à des échelles spatiales spécifiques : la pollution à l'échelle planétaire, la pollution à l'échelle régionale et la pollution de proximité à l'échelle locale.

- **Les pollutions à l'échelle planétaire ou globale**

L'échelle « globale » s'applique comme son nom l'indique à l'ensemble du globe, c'est-à-dire que la concentration du polluant résulte des émissions de polluants provenant de tout point de la terre. On peut citer : La destruction de l'ozone atmosphérique, l'effet de serre, les aérosols en suspension dans l'air...etc.

- **Les pollutions de l'air régionales**

Celles-ci sévissent dans un rayon compris entre 100 et 1 000 kilomètres et exercent leurs effets sur des pas de temps mensuels à pluriannuels. C'est le cas des pollutions acides, de la pollution photo-chimiques...etc.

- **La pollution de proximité**

Cette pollution représente une inertie de la concentration d'un polluant, c'est-à-dire que la variabilité spatiale de la concentration se manifeste sur une distance de l'ordre de la centaine de mètres au kilomètre depuis le lieu d'émission. Une pollution de proximité s'entend comme une pollution ambiante qui ne résulte pas majoritairement de transferts atmosphériques à longue distance et qui est déterminée par le voisinage de sources d'émissions fixes ou mobiles [41].

### **I.6.3 Les catégories des polluants et impact**

Les polluants atmosphériques peuvent être classés en deux catégories :

#### ***I.6.3.1 Les polluants primaires***

Ce sont les polluants qui sont émis directement de la source sans subir une transformation physique ou chimique. Les activités humaines de production industrielle et énergétique sont, avec les transports les principales sources de polluants primaires parmi lesquels le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les hydrocarbures, les métaux lourds, le Plomb, le chlore et les poussières sont émis dans les plus grandes quantités, et surtout sont les mieux connus. En effet, c'est en réalité un cocktail de centaines de substances diverses qui se retrouvent dans l'atmosphère dont certaines en très faible quantité [42].

### *1.6.3.2 Les polluants secondaires*

D'autres polluants nommés polluants secondaire sont formés à partir de réactions chimiques entre les polluants primaires et les constituants présents dans l'atmosphère. C'est le cas de l'ozone (O<sub>3</sub>), qui résulte de la transformation par photochimie de plusieurs polluants dont principalement les oxydes d'azote et les hydrocarbures (COV en particulier).

**Ozone (O<sub>3</sub>)** : C'est la forme toxique de l'oxygène (O<sub>2</sub>) pur et le principal composant du smog des grandes métropoles. Contrairement aux autres polluants, l'ozone n'est pas émis directement par une source particulière. L'ozone proche du sol est un polluant secondaire qui se forme par réaction chimique dans la troposphère (basse altitude) à partir d'oxyde d'azote et de composés organique volatils sous l'action de la lumière.

**Particule fine PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>** : Les particules en suspension constituent un ensemble très hétérogène, compte tenu de la diversité de leur composition, de leur état (liquide ou solide) et de leur taille (de 0,005 à 100 µm). Alors que les grosses particules se déposent rapidement sous l'effet de leurs poids, les petites particules restent en suspension dans l'air. Leur vitesse de chute résultant d'un équilibre entre l'action du champ de pesanteur terrestre ou de la force électrique qui agit sur elles et la résistance du milieu. Les particules de diamètre inférieur ou égal à 10 µm, appelées PM<sub>10</sub> peuvent rester en suspension dans l'air pendant des jours, voire des semaines, et être transportées par le vent sur de très longue distance.

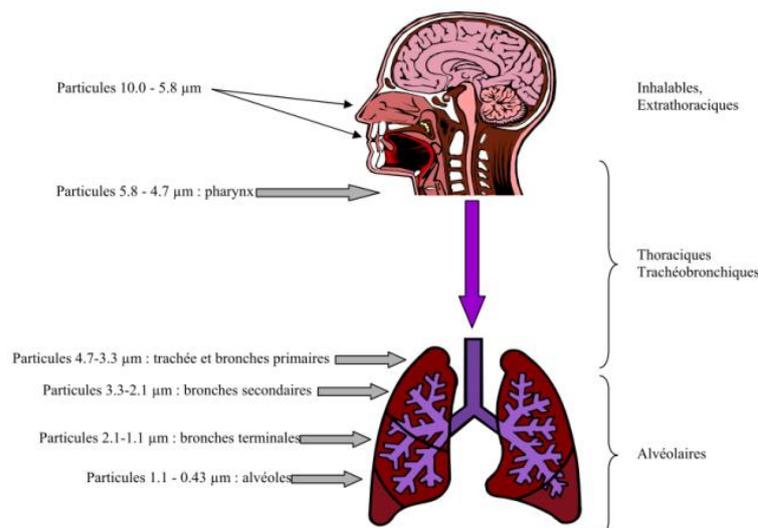
Ces polluants sont issus de différentes sources de pollutions qui sont :

**Source fixe:** Les moteurs diesel des centrales thermiques au cours de la combustion du fioul produisent le monoxyde de carbone (CO), qui est un gaz toxique inodore, incolore et fréquent dans la pollution atmosphérique. Heureusement, il ne persiste pas dans l'atmosphère. Car il se transforme naturellement en CO<sub>2</sub>.

**Source mobile:** Le dioxyde de soufre provient principalement de la combustion des combustibles fossiles (charbon, fioul...etc.), au cours de laquelle les impuretés soufrées contenues dans les combustibles sont oxydées par l'oxygène de l'air O<sub>2</sub> en dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>. Ce polluant gazeux est rejeté par de multiples petites sources mobiles telles que : les bateaux et les véhicules à moteur diesel.

### *1.6.3.3 Impact des centrales thermiques*

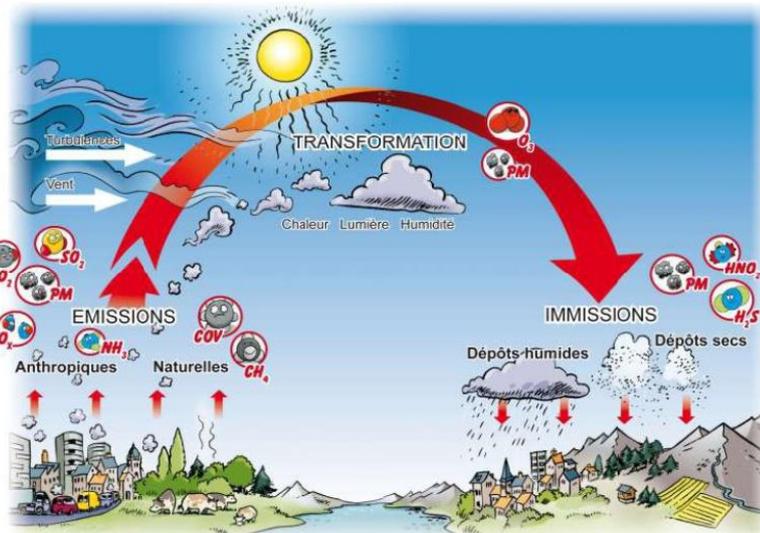
Les émissions futures de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) et poussières pouvant modifier la qualité de l'eau et de l'air sont issues de plusieurs sources parmi lesquelles: La combustion des différents combustibles dans les moteurs thermiques modifiés et existants, les émissions fugitives des stockages existants, les émissions fugitives des unités, les postes de déchargement...etc. Ces rejets bien que rarement supérieurs aux normes, contribuent toutefois à l'augmentation des gaz à effet de serre et à la dégradation de la couche d'ozone. Les polluants émis par la combustion du fioul lourd concourent à rompre l'équilibre complexe entre d'une part les apports permanents de matière provenant des sources naturelles et d'autre part, l'élimination et le recyclage continu de cette matière par divers mécanismes physicochimiques avec pour risque des effets indésirables sur la santé et l'environnement. L'impact des activités liées à la combustion, sur la santé de la population est d'abord fonction de la détermination des émissions, des voies de transfert, des vitesses de déplacement des substances et leur transformation ou leur dégradation qui permettent d'évaluer les concentrations ou les doses auxquelles les populations humaines sont exposées ou susceptibles de l'être. Mais aussi de la cible, donc les populations les plus vulnérables sont : les femmes enceintes, les bébés prématurés, les personnes âgées. Ces dernières seront les plus exposés en ce qui concerne la pollution de l'air aux pathologies telles que: les problèmes respiratoires comme l'asthme, la grippe, la tuberculose dû à l'inhalation ou la pénétration des matières particulaires dont le diamètre est inférieur à 10 micromètre qui va irriter le système respiratoire humain (figure 14), causer les cancers des poumons, les accidents vasculaires cérébraux et la cardiopathie. Pour ce qui est de la pollution des eaux dans le sol nous avons des pathologies telles que : la typhoïde, le choléra, les diarrhées et les maladies de la peau.



**Figure 14:** Pénétration des particules dans l'appareil respiratoire [43].

## I.7 MÉCANISME DE DISPERSION DES POLLUANTS DANS L'ATMOSPHÈRE

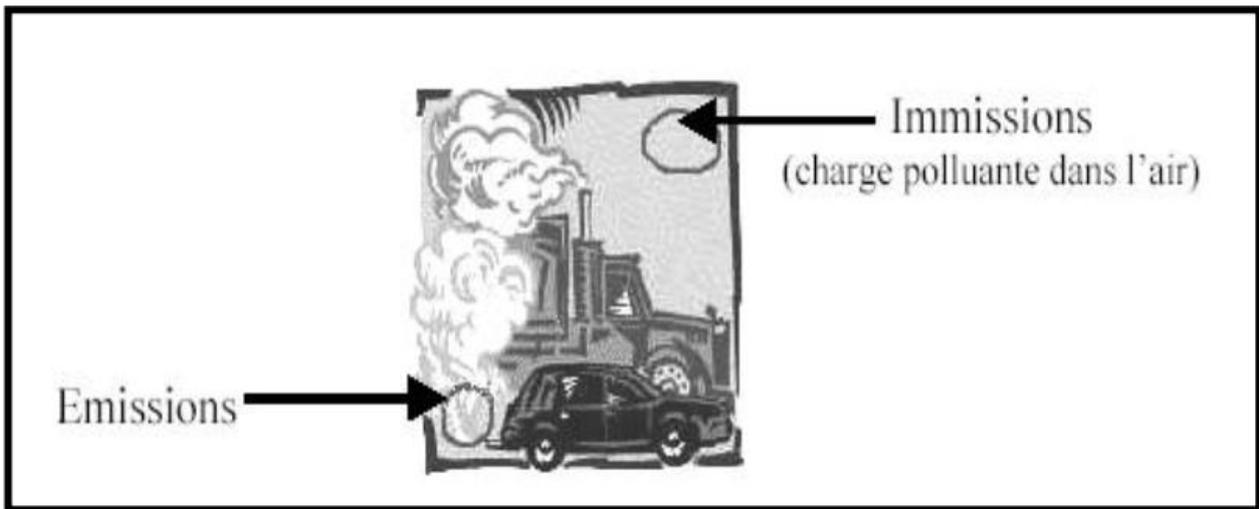
La dispersion est un ensemble de processus qui va de l'émission des substances d'une source de pollution jusqu'au dépôt. Parmi ses processus intervenant dans le mécanisme de dispersion atmosphérique on a: L'émission, les processus d'advection-diffusion, les transformations physico-chimiques, le processus de dépôt (figure 15).



**Figure 15:** Résumé de l'ensemble des processus intervenant dans la dispersion atmosphérique des polluants [44]

### I.7.1 Processus d'émission

Les émissions de polluants atmosphériques sont ponctuelles et instantanées, c'est-à-dire qu'à chaque instant un système peut émettre de nouvelles molécules d'un même polluant (figure 16), à un endroit donné. Etant donné que l'émission ponctuelle d'une molécule à un instant donné est forcément distincte d'une autre molécule émise au même instant et/ou au même endroit, ou à un instant différent et/ou à un endroit différent, les molécules émises peuvent être sommées sur un intervalle de temps donné ou pour une activité donnée, et sur un espace donné. Elles sont ainsi mesurées pour un polluant donné et une source donnée.

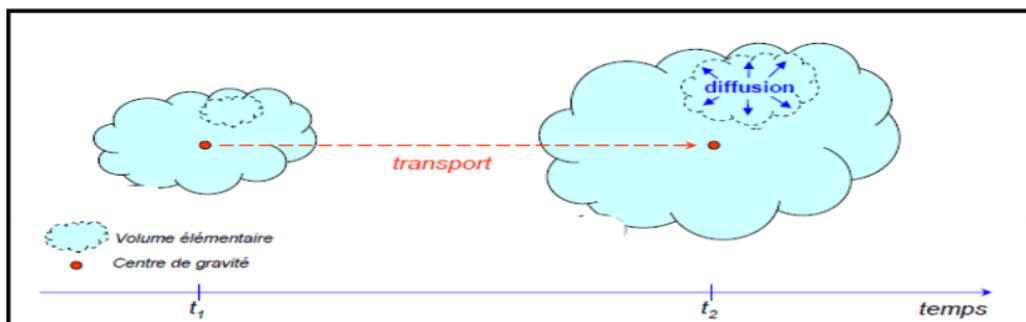


**Figure 16:** Émissions et immissions et milieu urbain [31].

### I.7.2 Le processus d'advection-diffusion

Les particules d'origine automobile qui interviennent dans la dégradation de la santé des populations sont transportées sur des distances assez faibles. La substance émise peut être transportée sur des distances bien plus grandes. Lorsqu'un polluant primaire est émis dans l'atmosphère ou s'infiltré dans le sol, il est soumis aux processus de diffusion et une advection ou transport dont le calcul repose sur le principe de la continuité.

- La diffusion et le transport des polluants dans l'air sont très variables dans le temps et dans l'espace, et dépendent de l'état de l'atmosphère, des conditions météorologiques, des facteurs topographiques, des facteurs anthropiques et des éléments propres aux polluants (figure17).



**Figure 17:** Le processus de transport et de diffusion [31]

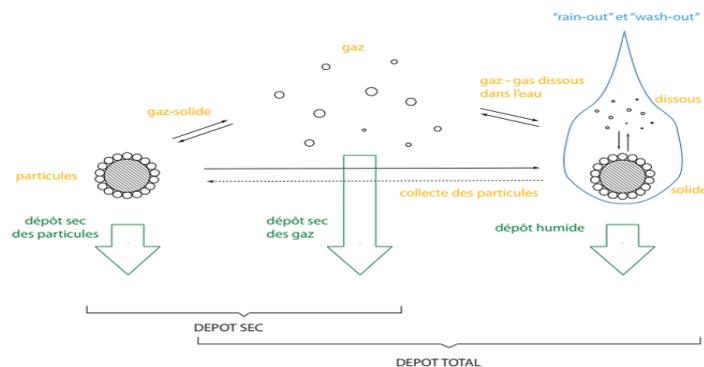
### **I.7.3 La transformations physico-chimiques**

Dans le cas de certains polluants et sous des conditions atmosphériques particulières, il existe des processus de transformation physico-chimiques des polluants primaires en polluants dits secondaires, car non émis directement par les sources [45, 46]. Les transformations sont plus ou moins rapides et ont lieu dans la troposphère et la basse stratosphère. Dans le cas de la formation d'ozone troposphérique à partir des émissions de COV et de NO<sub>x</sub>, les transformations chimiques sont assez rapides, de l'ordre de l'heure. En revanche, dans le processus de formation des précurseurs de diminution de la couche d'ozone, les réactions chimiques sont beaucoup plus longues (quelques mois) dans la mesure où elles nécessitent des conditions atmosphériques (physiques) particulières. Les facteurs qui interviennent le plus dans les processus de transformations sont la stabilité physico-chimique du polluant et les facteurs météorologiques.

### **I.7.4 Le processus de dépôt**

Les polluants atmosphériques peuvent se déposer sur les surfaces bâties, la végétation, les sols et les eaux de surface par des processus « secs », c'est-à-dire des processus qui ne dépendent pas de précipitations (figure 18). Les processus fondamentaux qui mènent à des dépôts secs sont la sédimentation, les impacts par inertie ou interception et la diffusion. Les trois premiers mécanismes concernent seulement les particules alors que la diffusion concerne les polluants gazeux et particuliers. La sédimentation correspond à l'effet de la gravité terrestre sur les particules. Toutes les particules, quel que soit leur taille, sont soumises à la sédimentation. Cependant, seules les particules grossières, celles qui ont un diamètre supérieur à environ 10 microns (PM<sub>10</sub>) ont une vitesse de sédimentation suffisante pour que le processus de sédimentation devienne commensurable avec celui d'impact par inertie (pour des particules de quelques dizaines de microns, la sédimentation est le processus dominant). En effet, la vitesse finale de chute d'une particule résulte de l'équilibre entre la force de gravité et la force de friction de la particule dans l'air. Cet équilibre est représenté mathématiquement par la loi de Stokes. La diffusion d'un gaz ou d'une particule de l'atmosphère vers une surface est généralement décomposée en plusieurs étapes. Pour tous les polluants (gazeux et particuliers), on considère deux étapes qui sont: Premièrement le transfert de l'atmosphère vers la surface par la turbulence atmosphérique, deuxièmement le transfert du polluant dans une couche très fine en contact avec la surface. Les vitesses de dépôt sec varient selon les polluants (molécules gazeuses et particules de différentes tailles), les conditions météorologiques (qui affectent la turbulence) et

le type de surface (sol, végétation, bâti, eau...). Une espèce très soluble comme l'acide nitrique peut avoir une vitesse de dépôt de plusieurs cm/s pendant la journée (c'est-à-dire quand la turbulence atmosphérique est importante). Des particules fines auront une vitesse de dépôt de l'ordre de 0,1 cm/s pendant la journée. Pendant la nuit, les conditions atmosphériques stables peuvent réduire les vitesses de dépôt d'un ordre de grandeur ou plus. En général, les vitesses de dépôt sont plus élevées en milieu forestier qu'en rase campagne. Car pour une même superficie au sol, la surface des feuilles des arbres est beaucoup plus importante que la surface du sol.



**Figure 18:** Aperçu schématique des processus de dépôt sec et dépôt humide gazeux

## I.8 POLLUTION EN MILIEU SOUTERRAIN

### I.8.1 Le sol

Suivant les spécialistes, la définition d'un sol varie. Pour la norme internationale (NF ISO 11074-1) le sol est la partie supérieure de la croûte terrestre constituée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organisme [47]. Pour l'ingénieur, le sol est avant tout une roche meuble, un support, un milieu poreux. Pour l'agriculteur, c'est la couche de terre travaillée par opposition au sous-sol qui ne l'est pas. Pour le pédologue, au plein sens du terme, qui étudie l'ensemble des matériaux et l'activité biologique, c'est l'aspect biologique et géochimique qui domine.

- Propriétés du sol:

Les propriétés du sol qui influencent sur le transfert des contaminants vers les nappes sont : la porosité, la texture, la composition chimico-minéralogique, l'acidité et la teneur en matière organique.

**La porosité** du sol n'est pas saturée par l'eau, elle contient également de l'air dont l'oxygène est utilisé par les racines et l'activité microbienne.

**La texture** du sol peut être décrite qualitativement en fonction de son aspect (graveleux ou fin), ou quantitativement à partir des proportions de particules minérales plus ou moins grossières. Les propriétés agricoles du sol dépendent largement de cette texture :

- Un sol grossier et sableux sera peu compact, bien aéré, il sera bien drainé mais retiendra peu d'eau qui y circulera rapidement.
- Tandis qu'un sol fin ou argileux retiendra beaucoup d'eau, deviendra plastique et collant, humide, puis compact et dur en séchant. On parle de sol<< lourd>> même si sa densité est moindre.

**L'acidité** est un paramètre qui influe sur la spéciation des polluants et donc sur la mobilité de celle-ci.

**La teneur en matière organique** joue un rôle sur son aptitude à retenir momentanément ou à fixer les polluants.

**La composition chimico-minéralogique** joue un rôle important sur son aptitude à retenir momentanément ou à fixer les polluants apportés par infiltration.

Les comportements d'un sol face à une infiltration des polluants seront affectés par ses propriétés. Il sera donc nécessaire de caractériser pour prévoir ou comprendre le comportement des polluants et les conséquences possibles d'une pollution.

### **I.8.2 Le sous-sol**

Le sous-sol comprend les autres couches de la géosphère, mais on ne s'intéressera ici qu'au sous-sol rocheux contenant une nappe (aquifère).

#### **- Propriété du sous-sol**

Le sous-sol est constitué des roches, sous la forme initiale ou sous la forme de produits d'altération. Les propriétés du sous-sol influant sur le transfert des contaminants vers les nappes sont: la porosité efficace, la perméabilité, l'hétérogénéité, la fracturation et la discontinuité qui créent des voies de circulation préférentielle.

Toutes les types de roches ne sont pas susceptibles de recevoir des eaux souterrains et de constituer des aquifères où l'eau soit mobilisable. Cette propriété dépend de la porosité efficace et de la perméabilité de la roche. Les sables, calcaires et granites constituent la majorité des aquifères. Les roches peu poreuses ou presque pas perméables telles que : L'argile, le marne et la

plupart des roches cristallines, constituent rarement des aquifères. Lorsque la plupart de roches constituant le sous-sol sont peu poreuses ou presque pas perméables, les eaux souterraines ne constituent pas des nappes homogènes, mais des réseaux fracturés, on parle alors de milieu fracturé ou fissuré. De ces propriétés dérivent les propriétés hydrauliques de la roche : la perméabilité, conductivité et le gradient hydraulique.

### **I.8.3 Principaux types de milieux souterrains**

#### ***I.8.3.1 Zone non saturée***

La zone non saturée comprend l'ensemble des niveaux du sol et du sous-sol situé au-dessus de la nappe. Ces niveaux sont appelés << non saturés >> car leur porosité ne contient pas seulement de l'eau mais également des gaz du sol (figure 19).

#### **- Propriété**

La première étape du parcours est caractérisée par la grande complexité des processus physico-chimique agissant sur le polluant notamment dans la zone racinaire (30 et 40 premiers centimètres du sol) où se déroule une part importante du processus chimiques et bio-chimiques. Dans cette zone les mouvements de l'eau véhiculant le polluant (pour une pollution miscible) sont complexes et dépendant de la teneur en eau. Celle-ci varie au cours du temps sous l'influence de la pluviométrie, de l'infiltration, de l'hétérogénéité et du degré de fissuration de la zone de non saturation (ZNS).

#### **I.8.3.2 Zone saturée**

Sous la zone saturée on peut rencontrer trois types de milieux souterrains pouvant contenir les nappes, plus ou moins vulnérable à une pollution suivant la profondeur et le degré de fissuration de la zone.

#### **- Les milieux poreux**

A échelle macroscopique, le milieu poreux peut être considéré comme un milieu continu où on n'y distingue pas de cheminements individuels nettement différenciés. Par rapport aux milieux fissurés et karstiques c'est lui qui se prête le mieux à une modélisation.

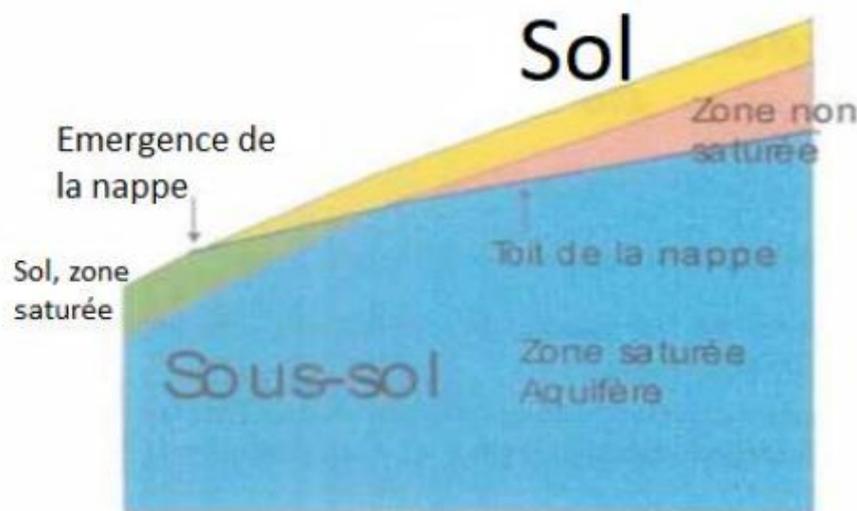
#### **- Les milieux fissurés**

Ces milieux sont constitués par un réseau de fracture non totalement interconnecté et dont l'organisation spatiale (densité, orientation, géométrie) caractérise le réseau aquifère. Leur étude est difficile en raison du peu d'information disponible pour restituer une image. Une pollution

qui se trouve dans un tel milieu sera difficile à suivre en termes de cheminement et de concentration. La modélisation d'un milieu fissuré fait appel à une démarche probabiliste.

- **Les milieux karstiques**

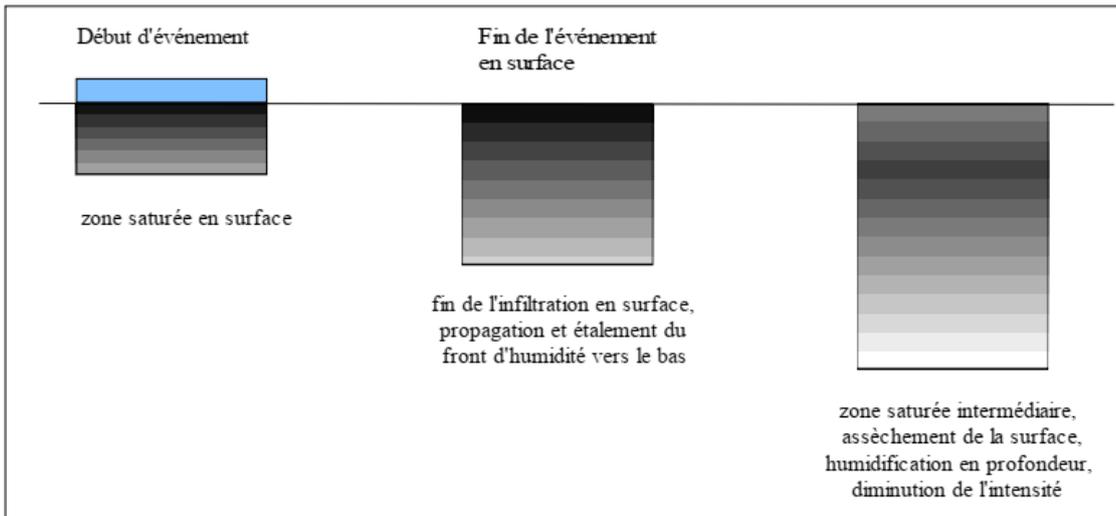
Les aquifères karstiques sont des milieux très particulières où l'eau circule dans la cavité laissée par la dissolution de la roche, variant depuis un ensemble de fracture à peine élargie jusqu'à ceux caractérisés par un véritable réseau de drainage pouvant aller jusqu'à la rivière souterraine. Pour obtenir une information sur la structure des réseaux karstiques on utilise des traceurs artificiels. Mais la prévision des polluants dans un tel milieu s'avère difficile à cause de l'ignorance du réseau souterrain et des voies de cheminements. L'eau liée ne peut pas se déplacer par gravité et ne transmet pas la pression hydrostatique. C'est une eau qui ne peut être extraite que par séchage (thermique ou mécanique).



**Figure 19:** Relation entre zone non saturée et zone saturée [48]

#### **I.8.4 Caractéristique hydraulique du milieu**

Au cours d'une infiltration, le potentiel de pression hydraulique et la teneur en eau varient, le polluant est transporté au cours de l'écoulement du fluide (eau pour une pollution miscible ou non aqueuse) (figure 20). Donc le devenir d'une pollution est sous la dépendance des lois, variables et paramètres descriptifs de l'écoulement de la phase fluide. Ces lois, variables et paramètres, en particulier les lois de darcy, la perméabilité, la porosité efficace, la teneur et la charge hydraulique en eau revêtent des formes différentes selon le nombre de phases et selon que l'on étudie la pollution dans la zone non saturée ou la nappe.



**Figure 20:** Régime hydraulique d'un sol au cours d'un évènement d'infiltrant isolé [49].

- **La porosité efficace**

La porosité totale représente l'ensemble des vides présents dans une roche. Elle s'exprime par le rapport du volume des vides au volume total du milieu. Cette porosité dépend de l'hétérogénéité et l'arrangement des grains, et est affectée par l'érosion chimique et physique. La porosité efficace notée  $p_0$  est le rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet, à son volume total. Cette porosité efficace diminue avec la taille des grains, par exemple l'argile présentant plus de porosité « fermée » que le sable (Tableau 4) [50].

Tableau 4: Grammage de porosité dans les roches

Roches poreuses	$p_0$
Sables	10 – 25 %
Craie	1 – 5 %
Calcaires massifs fissurés	1 – 5 %
Argiles	1 – 2 %

- **La perméabilité**

En cas d’infiltration, le comportement de l’eau dépend du type de sol. Ce dernier existe sur plusieurs dénominations, avec une perméabilité qui évolue en fonction de la taille: Le sol grave (50mm), le sol sableux (2mm), le sol limoneux (0,08mm) et le sol argileux (0,002mm) (figure 21) [51].



**Figure 21:** Type de sol

L’eau ne circule pas en ligne droite dans une nappe et peut emprunter différents chemins pour aller d’un point A à un point B, donc la distance réelle parcourue par les eaux souterraines est donc plus importante que la distance en ligne droite. Il n’est donc pas juste de calculer la vitesse d’écoulement des eaux souterraines comme on détermine la vitesse d’un mobile en faisant le rapport entre la distance et le temps mis par l’eau pour parcourir cette distance. C’est pour cette raison que la notion de perméabilité permet d’appréhender la vitesse réelle des eaux souterraines, en prenant en compte la porosité efficace de la roche traversée [50]. La perméabilité ou vitesse d’écoulement est l’aptitude d’un milieu à se laisser traverser par un fluide. Elle n’est pas une grandeur qui caractérise seulement le milieu, elle dépend aussi du fluide considéré, de la densité et la viscosité. Elle est fonction de la perméabilité intrinsèque caractéristique du milieu poreux (tableau 5).

Tableau 5: Les ordres de grandeur de la perméabilité à saturation de sols homogènes [52]

K (m/s)	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$
Ordre de grandeur km/jour					m/jour	m/semaine		m/mois		m/an
Perméabilité	Perméable			Semi-perméable			Imperméable			
Type de sol	Gravier	Sable grossier à fin pouvant Comporter des graviers				Sable très fin à limon			Argile	

### I.8.5 Origine de la pollution milieu souterraine

Dans le cas des centrales thermiques, l'origine de la pollution des sols provient comme nous l'avons décrit très haut, soit des mauvaises habitudes telles que le déversement du fioul lors du remplissage des stockages, soit par corrosion des cuves enterrées ou même des fuites de canalisation. Ensuite les ruissellements vont provoquer le déplacement des polluants qui peuvent contaminés ainsi la couche supérieure ou inférieure du sol et atteindre dans un certain cas la nappe phréatique souterraine pour les entrainer dans les puits ou les rivières. Dans le cas d'un déversement, les polluants peuvent facilement atteindre la nappe souterraine. La figure 22 ci-dessous nous illustre la situation lors d'un déversement dans une centrale. Le schéma général est le même : le point de départ est la surface du sol puis le transit vertical dans la zone dite non saturée (ZNS) surplombant la nappe, l'arrivée à la nappe puis le cheminement subhorizontal du polluant dans celle-ci avec étalement progressive du panache de polluant beaucoup orienté suivant la direction de l'écoulements de l'eau. Dans les terrains formés de roche meubles (gravier), les eaux souterraines s'écoulent à travers les vides de façon lente, régulière et l'ordre de grandeur de la vitesse d'écoulement dans le gravier est  $10^{-2}$  m/s et dans le sable l'ordre de grandeur varie entre  $10^{-2}$  et  $10^{-5}$  m/s [53].

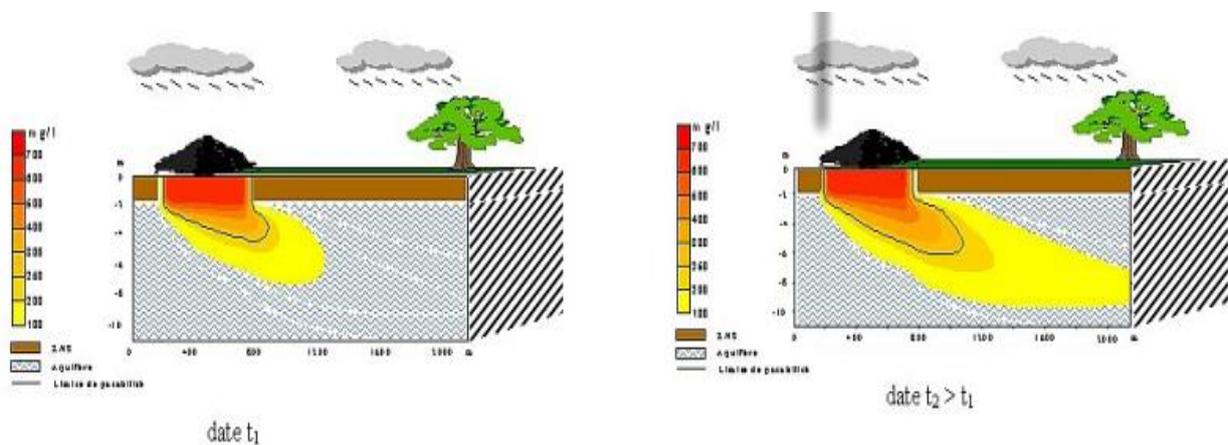
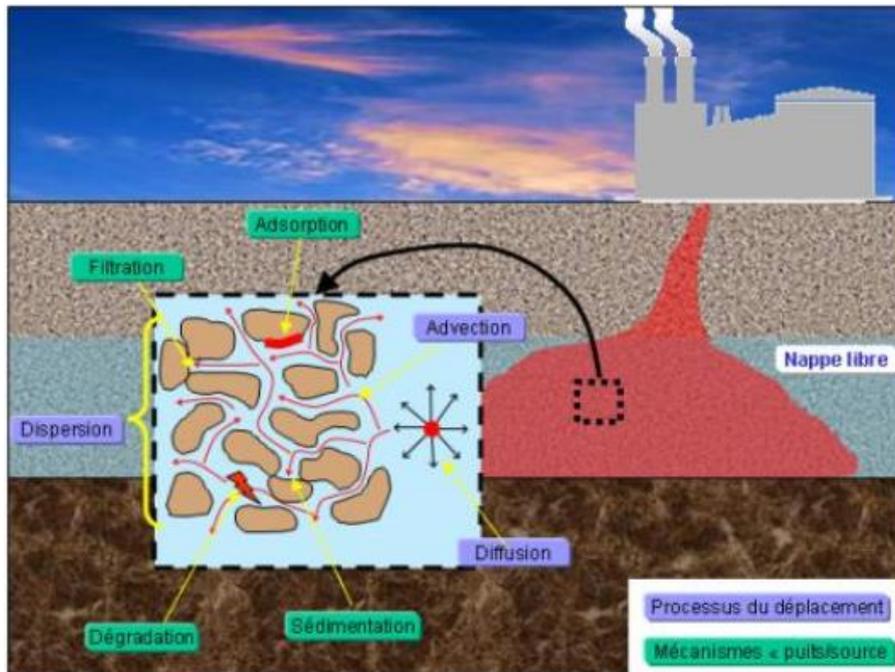


Figure 22: Evolution d'une panache de polluant en aval d'une décharge [54]

### I.8.6 Mécanisme de dispersion des polluants dans le sol

La possibilité de transfert des polluants va dépendre des propriétés physico-chimiques de la source de danger, mais aussi des propriétés du sol, du sous-sol dans lequel elle se trouve. Cela facilitera ou empêchera la migration ou l'expression de cet usage potentiel de mobilité de la

source. L'ensemble des phénomènes physico-chimiques et biologiques à même de se passer dans les sols quand une pollution est constatée sont des phénomènes de volatilisation c'est à dire de transfert de la source volatile, des phénomènes de convections, de biodégradation et d'absorption. Pour mieux comprendre le phénomène de migration des polluants nous allons développer les mécanismes fondamentaux de transport des polluants dans les différents milieux suivant le schéma de dispersion de la (figure 23): les milieux poreux non saturés (sols), le cas particulier des interactions bio-physico-chimiques qui se produisent au niveau des milieux poreux.



**Figure 23:** Quelques processus de transport en milieu poreux saturé [55]

## I.9 MODELISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE ET SOUTERRAINE DES POLLUANTS

### I.9.1 Modèles gaussiens

Les modèles gaussiens sont les premiers modèles de dispersion utilisés sur ordinateur. Leur origine remonte aux travaux de Pasquill (1961), de Doury (1981) et de Briggs (1985) [56]. Ces modèles permettent d'estimer la dispersion des gaz neutres ou passifs (de masse volumique très proche de celle de l'air). Ils sont basés sur des solutions d'advection-diffusion c'est-à-dire l'équation d'évolution de la concentration couplées avec des para métrisations semi-empiriques

des principaux phénomènes physiques. Les modèles gaussiens sont relativement simples et faciles à utiliser, avec des données limitées à l'entrée et une exécution rapide [57], qui fournissent une modélisation rapide adaptée aux études opérationnelles. Cependant ils ne permettent pas de traiter directement des écoulements complexes.

### **I.9.2 Modèles lagrangiens**

Les modèles lagrangiens sont les plus utilisés dans des situations de dispersion complexe avec une turbulence inhomogène, instationnaire ou non gaussienne et ils peuvent simuler à proximité de la source polluante (au contraire de la première génération des modèles gaussiens). Toutefois, ils se caractérisent par des temps de calcul importants (quelques heures à plusieurs jours) surtout dans le cas de plusieurs sources. De plus, ils nécessitent beaucoup des données d'entrée concernant la source, le polluant et l'atmosphère avec un temps important de mise en forme de ces données. La précision des résultats donnés par un modèle Lagrangien dépend du nombre d'éléments suivis dans leur mouvement dans l'atmosphère [58].

Dans la CLA, les échelles de temps du modèle lagrangien et les paramètres de la turbulence dépendent des conditions de stabilité qui sont décrits à l'aide du nombre de Richardson  $R_B = L_{mo} / z_i$ , où  $L_{mo}$  est la longueur de Monin Obukhov, et  $z_i$  est la hauteur du mélange. La longueur de Monin-Obukhov est calculée par l'équation suivante :

$$L_{mo} = -\frac{U_*^3 \rho C_p T}{g k q} \quad (1-11)$$

### **I.9.3 Modèle de la mécanique des fluides numérique ou approche eulérienne**

Les modèles eulériens considèrent un élément de volume et étudient les flux des particules fluides à travers ce volume. L'atmosphère est discrétisée en mailles élémentaires et les équations de la mécanique des fluides sont résolues de façon itérative pour chacune de ces mailles. Ces modèles sont utilisés avec des pas de temps d'une heure et des mailles d'une surface au sol de  $1\text{km}^2$  minimum. La représentation eulérienne consiste à suivre le mouvement des polluants par rapport à un repère fixe. Ces modèles font appel aux équations de Navier Stokes (ENS) construites dans le cadre de la mécanique des milieux continus. Les

modèles eulériens peuvent prendre en compte des descriptions entièrement 3D des champs météorologiques plutôt que des trajectoires individuelles [59, 60]. Ils permettent d'intégrer des conditions d'écoulement complexes (obstacles, topographie marquée) et d'obtenir une analyse fine de la dispersion dans le temps. Cependant, la précision des résultats dépend de la finesse du maillage. Ces modèles sont considérés comme coûteux au niveau de temps de calcul et ils ne sont pas adaptés au voisinage des sources.

### I.9.4 Autres méthodes

Une comparaison entre les modèles eulériens et lagrangiens effectuée par Jonas et al. (2007) a montré que le modèle lagrangien peut décrire le comportement du panache de polluant causé par des flux convectifs pour des petites durées, mais il exige un nombre de particules (masse) suffisant [61]. Le modèle eulérien exige moins de temps de calcul mais le modèle lagrangien est plus efficace dans des conditions de régime transitoire.

Lutman et al. (2004) comparent un modèle gaussien (PANACHE) et un modèle de dispersion des particules lagrangien, ils concluent que le modèle gaussien est plus simple à utiliser, mais il sous-estime les valeurs de la concentration. L'implémentation du processus environnemental dans le modèle lagrangien semble être plus réaliste que dans le gaussien [62].

A côté de ces modèles classiques, d'autres chercheurs ont apportés des modèles alternatifs, c'est le cas de Vendel (2011) qui a utilisé dans ses travaux un modèle couplé Flow'air-3D/SLAM, qui lui a permis de représenter la dispersion sur un site complexe. Cependant le modèle est adapter à un site unique [63].

Pierre Lauret et al (2016) ont utilisé une combinaison d'automates cellulaires et des réseaux de neurones pour modéliser de la dispersion atmosphérique des polluants autour d'un site industriel, l'objectif de leur travail était de mettre en évidence des outils permettant de réduire le temps de calcul nécessaire pour arriver à un niveau de détail important, cependant il constate une augmentation de l'erreur avec le nombre d'itération. Le réseau de neurone utilisé de type récurrent semble devenir instable au cours de la modélisation [64].

Afin de surveiller efficacement les émissions issues une source de pollutions, Sihang Qiu et al (2018) ont développé une modèle prédiction de la dispersion de la concentration des polluants

et d'estimation des émissions des sources. Ce modèle associe les réseaux de neurones, l'optimisation par essaim de particules et la maximisation expectative. Dans leur travail, les réseaux de neurones sont utilisés pour prédire de la distribution des concentrations, l'optimisation par essaim particule et la maximisation expectative sont appliqués pour évaluer les paramètres sources qui accélèrent efficacement le processus de convergence. Toute fois l'estimation des émissions n'est pas assez précis [65].

Rongxiao Wang et al. (2018) ont proposé un nouveau modèle pour l'estimation d'une source hasardeuse en utilisant les réseaux de neurones artificiels couplé à l'hybridation de l'optimisation par essaim de particules et l'algorithme de recuit simulé. Les résultats illustrent que la méthode proposée est capable d'estimer les sources hasardeuses et le champ de vent avec exactitude [66]. Rongxiao Wang et al. (2018) pour résoudre le sérieux problème de santé public causé par causer les polluants issus des zones industrielles, ils ont également travaillé sur la prédiction de la dispersion des contaminants, afin de contrôler la qualité de l'air. Pour cela ils ont utilisé un modèle intégrant les réseaux de neurones et le système AERMOD. Les résultats ont montrés que les concentrations obtenues ne sont assez précis, car le modèle n'intègre pas tous les paramètres de la zone d'étude [67].

Yijun et al. (2022) ont utilisé la modélisation mathématique, qui joue un rôle crucial dans la prévision des concentrations, pour quantifier les voies d'intrusion de vapeur dans les bâtiments à dalle sur sol [68].

Jun et al. (2022) ont travaillé sur l'extraction efficace de cartes de la pollution de l'air à l'aide de l'apprentissage automatique. Dans cet article, ils proposent un modèle d'apprentissage spatio-temporel multicascade pour l'inférence AQ afin de récupérer des cartes de pollution. Les résultats montrent que l'échantillonnage mobile améliore considérablement la capacité de modélisation spatio-temporelle. Cependant avec des mesures d'échantillonnages mobile encore limités, les cartes créées ne sont assez précis [69].

### **I.9.5 Choix du modèle**

Afin d'avoir les résultats assez précis et efficace qui se rapproche de la réalité, on a utilisé l'algorithme génétique couplé au réseau de neurone.

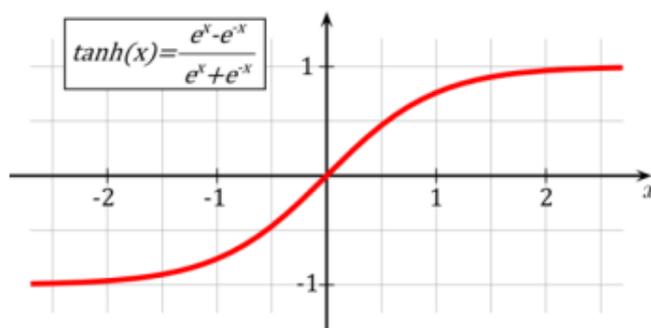
#### ***I.9.5.1 Neurone***

Dreyfus. (2004) présente un neurone comme un opérateur mathématique qui modifie une ou plusieurs variables d'entrée en une ou plusieurs variables de sortie. Les variables d'entrée et de sortie sont stockées respectivement dans un vecteur et un paramètre. Dans la plupart des applications et dans la suite des définitions, on considèrera le vecteur de sortie comme un singleton, donc un scalaire. L'opération réalisée par le neurone est l'application d'une fonction non-linéaire des variables d'entrée et de paramètres spécifiques au neurone :

Le calcul de la sortie du neurone s'effectue en deux étapes. Le calcul préalable du potentiel du neurone est effectué à partir de la somme pondérée des variables d'entrée (vecteur  $x$ ) et des paramètres spécifiques du neurone (vecteur  $w$ ). La fonction  $f$  ou fonction d'activation est alors appliquée au potentiel du neurone. Selon l'objectif d'utilisation du neurone, plusieurs choix sont possibles :

Fonction à seuil telle que la fonction de Heaviside est définie comme suit :

- Fonction sigmoïde : la fonction tangente hyperbolique est la plus couramment rencontrée (figure 24). Elle est continue et dérivable.

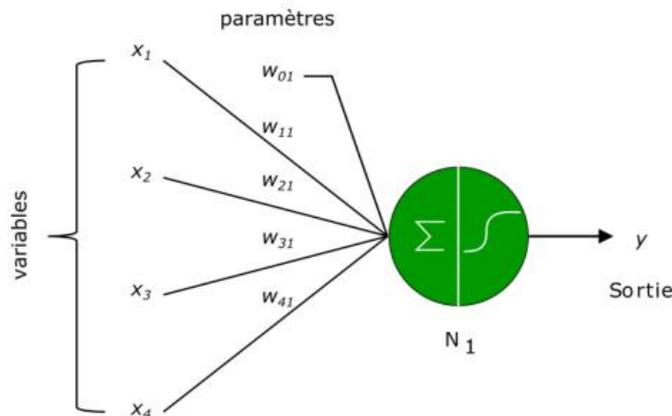


**Figure 24:** représentation graphique d'une fonction sigmoïde

- Fonction linéaire : Il s'agit de la fonction identité.

L'équation du neurone devient alors :

Avec  $f$  la fonction d'activation et respectivement les valeurs des vecteurs des paramètres et des variables d'entrée. On représente généralement un neurone formel (figure 25) par l'illustration suivante :



**Figure 25:** Neurone mathématique- Représentation avec une fonction d'activation de type sigmoïde

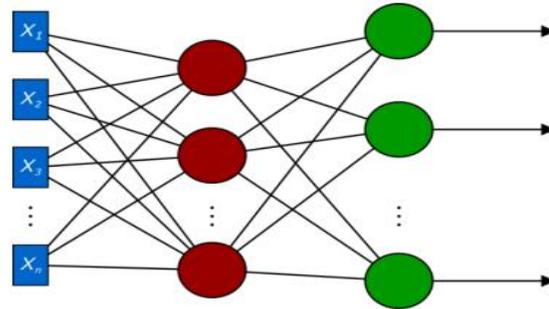
Un prétraitement est nécessaire afin que les différentes variables soient comprises dans le même intervalle afin qu'elles aient la même importance a priori. Ce prétraitement de base des variables d'entrée consiste à les centrer et réduire. D'autre part, il est important que la combinaison linéaire des variables d'entrée et des paramètres ne sature pas la sigmoïde, de manière à éviter l'obtention d'une dérivée nulle, empêchant l'apprentissage.

### 1.9.5.2 Réseaux de neurones

La connexion de plusieurs neurones constitue un réseau de neurone. Le terme de connexion provient lui aussi des similitudes avec l'approche biologique. Cette expression se traduit mathématiquement par des équations et un algorithme. L'intérêt de cette mise en relation réside dans la composition des fonctions non-linéaires réalisées par chacun des neurones. L'architecture de tels réseaux est particulière. On distingue ainsi différentes couches : la ou les couches cachées et la couche de sortie. La valeur de sortie des neurones des couches cachées correspond à une variable d'entrée pour un ou plusieurs neurones d'une autre couche cachée ou de la couche de sortie. La valeur de sortie des neurones d'une couche cachée n'est pas interprétée en général. Sa mesure ne présente pas d'intérêt. La valeur de sortie d'un neurone de la couche de sortie est-elle connue. C'est l'objet de l'utilisation des réseaux de neurones. Dans certains travaux, cette valeur représente une grandeur physique (concentration, vitesse, ... etc.) [70].

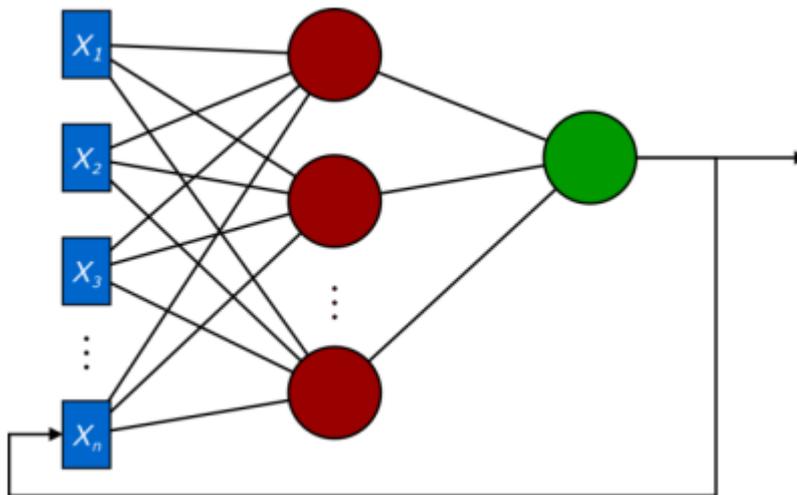
L'architecture d'un réseau de neurone est aussi qualifiée par sa prise en compte éventuelle de l'aspect temporel. On distingue les réseaux de neurones statiques des réseaux de neurones dynamiques. Dans les réseaux statiques, l'information circule de l'entrée vers la sortie, sans

bouclage. De ce fait, un grand nombre de possibilités existent. Néanmoins, la majorité des applications des réseaux de neurones utilisent des réseaux à couches (figure 26).



**Figure 26:** Réseau de neurones en n variables (bleu), neurones cachés (rouge), neurones de sorties (vert)

Chacune des sorties est calculée à partir de la fonction réalisée par le neurone de sortie, elle-même issue des fonctions non-linéaires réalisées par les neurones précédents. Pour chaque calcul de la fonction réalisée par le neurone, le temps de calcul est suffisamment faible pour le considérer comme négligeable. Un réseau de neurone dynamique ou bouclé ou récurrent est un réseau de neurone dont la ou les sorties sont connectées avec une ou plusieurs entrées (figure 27).



**Figure 27:** Illustration d'un réseau de neurone récurrent

Dans le cas de cette étude les réseaux de neurones permettent d'estimer la concentration de polluants dans une zone complexe en tout point de l'espace. Il est composé 1 couche d'entrée, 2 couches cachées et 1 couche de sortie (figure 28). Il utilise le processus d'apprentissage qui

ajuste les paramètres des couches du réseau neuronal afin que l'erreur sur les résultats soit la plus faible possible. Pour se faire, il doit sélectionner les variables et les paramètres d'entrée qui affectent la dispersion des polluants, nécessaires à l'apprentissage. Une augmentation du nombre de neurones dans la couche cachée peut conduire à une augmentation des performances des réseaux de neurones dans la précision des résultats.

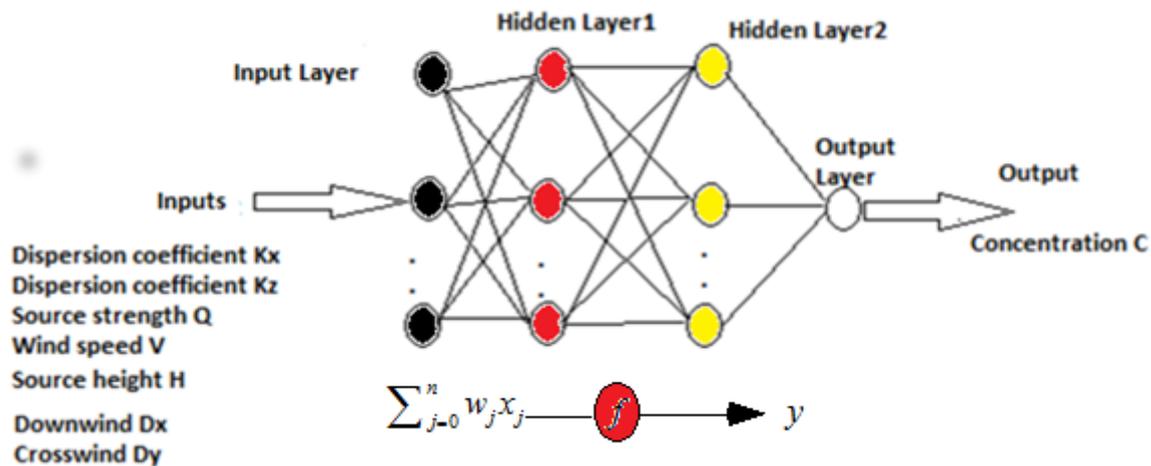


Figure 28: Structure du réseau de neurone artificiel

### 1.9.5.3 Présentation de l'algorithme génétique

L'algorithme génétique (AG) est une suite d'instruction et d'opération mathématique s'appuyant sur les techniques dérivantes de l'évolution naturelle à la recherche de la meilleure fonction objective. Ils ont été adaptés à l'optimisation par John Holland en 1975, également par les travaux de David Goldberg qui ont largement contribué à les enrichir en 1989. Le vocabulaire utilisé est le même que celui de la théorie de l'évolution et de la génétique, on emploie le terme individu (solution potentielle), population (ensemble de solutions), génotype (une représentation de la solution), gène (une partie du génotype), parent, enfant, reproduction, croisement, mutation, génération...etc. Leur fonctionnement est extrêmement simple, on part d'une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales, arbitrairement choisies. On évalue leur performance (Fitness) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs simples : la sélection, le croisement et la mutation [71].

L'efficacité des algorithmes génétiques dépend fortement du réglage des différents paramètres caractérisant ces algorithmes, et qui sont parfois difficiles à déterminer. Des paramètres comme la taille de la population, le nombre maximal des générations, la probabilité de mutation, et la probabilité de croisement. Les deux premiers paramètres dépendent directement de la nature du problème et de sa complexité, et leurs choix doit représenter un compromis entre la qualité des solutions et le temps d'exécution. La probabilité de croisement est liée à la forme de la fonction d'évaluation. Son choix est en général heuristique. Plus sa valeur est élevée, plus la population subit des changements importants. La probabilité de mutation est généralement faible puisqu'un taux élevé risque de conduire vers un optimum local. En revanche, une probabilité faible permet d'assurer une bonne exploration de l'espace de recherche sans perturber la convergence. Le succès des algorithmes génétiques dépend aussi du choix du codage des individus. Dans les problèmes combinatoires, ce codage est souvent suggéré par la nature même du problème, ce qui peut induire de meilleurs résultats. Dans ce document, l'algorithme génétique est évalué et utilisé comme outil d'optimisation (figure 29).

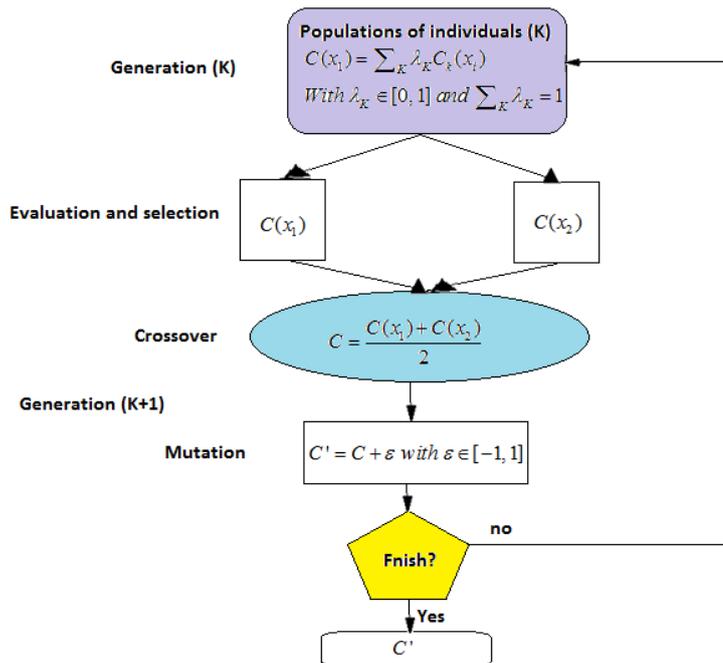


Figure 29: Fonctionnement des algorithmes génétiques

#### 1.9.5.4 Couplage algorithme génétique et réseaux de neurones

Le couplage de GA-ANN est utilisé pour optimiser l'estimation de la concentration des polluants. Cette estimation commence par l'utilisation des opérateurs : sélection, croisement et

mutation. Ce qui permet de faire évoluer les solutions d'une génération (k) à la suivante (k+1) à la recherche de la meilleure fonction objective, qui représente dans cette étude la concentration à la sortie de la cheminé (figure 30). Cette fonction, avec les autres variables d'entrée telles que les termes d'advection  $u \frac{\partial C}{\partial x}$ , les termes de diffusion  $K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ , le terme source (Q) et le coefficient de réaction ( $K_d$ ) sont introduites après discrétisation dans la couche d'entrée des réseaux de neurones afin d'optimiser l'estimation de la concentration au niveau de la couche de sortie. Le modèle de prédiction est basé sur une discrétisation explicite des termes d'advection et de diffusion. Le modèle couplé GA-ANN est représenté comme suit :

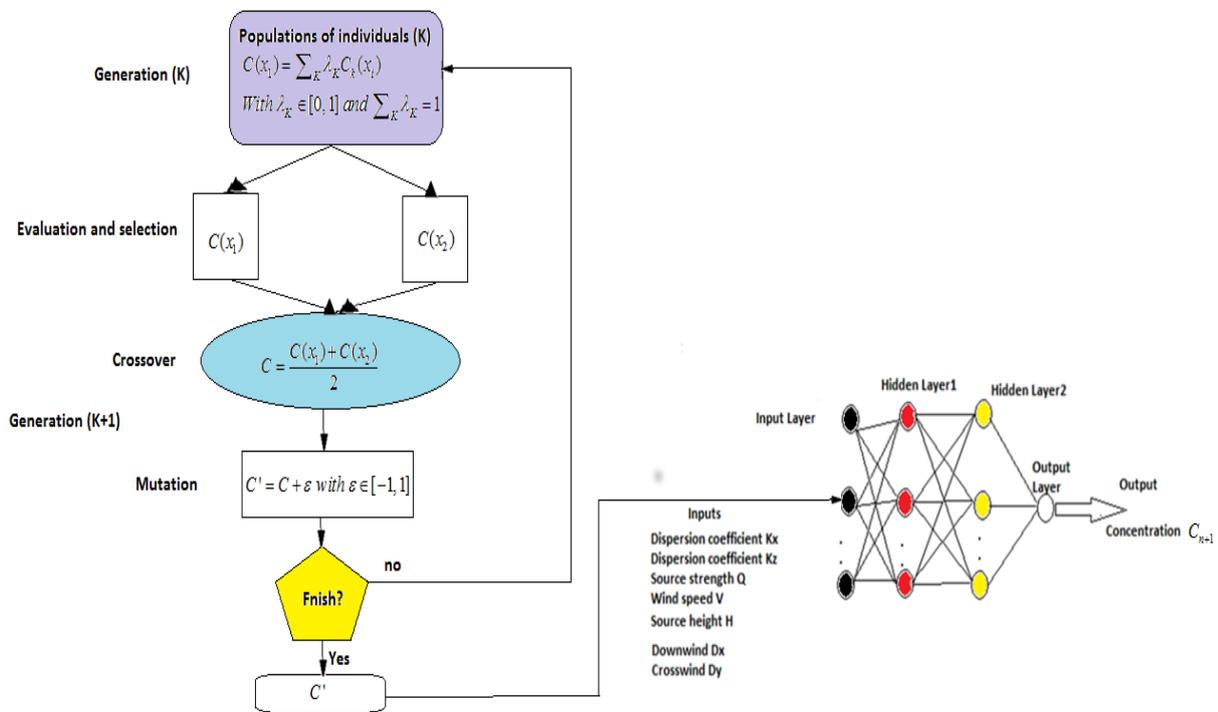


Figure 30: Couplage GA-ANN

### **Conclusion**

Ce chapitre a présenté la revue de littérature de la pollution en milieu atmosphérique et souterraine. L'objectif de ce chapitre était d'avoir une bonne connaissance des différents milieux de dispersion, des mécanismes de dispersion, des facteurs qui ont une influence sur cette dispersion et les différentes sources de pollutions. L'objet du prochain chapitre est de présenter le matériel de collecte des données, la méthode expérimentale utilisée et la méthode d'estimation de la concentration des polluants.

## **CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES**

## CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Introduction

Dans ce chapitre, nous commencerons d'abord par la présentation des outils mathématiques utilisés, ensuite on présentera le matériel de collecte des données et Enfin la méthode expérimentale utilisée pour la collecte et le traitement des données.

### II.1 FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PHÉNOMÈNE DE DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE ET SOUTERRAINE

#### II.1.1 Caractérisation de la dispersion particules gazeux dans l'atmosphère

Un polluant rejeté dans l'atmosphère est soumis aux différents mécanismes qui régissent les écoulements de l'atmosphère. Les trois processus principaux sont :

- L'advection ou transport par le vent dans l'atmosphère dû à la rose du vent
  - Diffusion due à la libération naturelle active des particules mises en suspension par écoulement passif.
  - Dépôt au sol et dans l'hydrosphère : sec ou humide.
- **Concentration locale d'une source**

On définit la concentration locale d'un soluté  $i$  à une position spatiotemporelle  $M$  de coordonnées  $(x, y, z, t)$  par le rapport de la masse de substance concentrée en ce point sur le volume de mélange contenant la substance en ce même point suivant la relation.

La concentration d'un soluté peut encore s'exprimer sous la forme suivante :

$$C(M_i, t) = Q(t) \cdot T(M_i, t) \quad (2-1)$$

Où  $Q(t)$  est la quantité émise par unité de temps correspondante à la source, l'unité est  $kg.s^{-1}$  et  $T(M_i, t)$  est le transport dans l'atmosphère, l'unité est le  $s.m^{-3}$ .

Il est également important de noter que bon nombre d'unités sont utilisées pour exprimer la concentration dans un phénomène de dispersion, nous pouvons énumérés entre autre *particules / m<sup>3</sup>* ; *mol / m<sup>3</sup>* ; *ug / m<sup>3</sup>* ; *m<sub>esp</sub> / m<sub>air</sub>* ; partie par million ppm ; partie par billion *ppb* ; partie par trillion *ppt* .

- **Equations de base du transfert de matière**

Lorsqu'il existe des différences de concentration d'un constituant dans un système, un phénomène de diffusion tend à réduire ces écarts vers une concentration d'équilibre. Ce phénomène est traduit par la première loi de Fick dite de diffusion moléculaire qui est un processus irréversible. Elle stipule que : une substance dans un mélange a tendance à uniformiser sa répartition. Il se forme un flux des zones de forte concentration vers les zones de faible concentration qui exprime la densité de flux massique en fonction du gradient de concentration de soluté, qui est perpendiculaire à l'interface.

$$\vec{J}_D(M_i, t) = -D_i \overrightarrow{\text{grad}} C(M_i, t) \quad (2-2)$$

Ce flux de diffusion est aussi donné par l'expression de

$$\vec{J}_D(M_i, t) = C(M_i, t) \cdot \vec{V}_D(M_i, t) \quad (2-3)$$

### II.1.2 Description du phénomène de dispersion

Considérons un flacon contenant du parfum dans une atmosphère d'air au repos : au bout de quelques instants, nous percevons une odeur. Pourtant, l'atmosphère étant calme, aucun courant d'air n'a pu entraîner les molécules de parfum : on dit qu'elles ont diffusé. En présence de courants d'air, nous aurions senti le parfum plus rapidement : on dit qu'il y a convection, ce qui est caractérisé par un déplacement global de matière. Il apparaît à cet effet que, la dispersion est la combinaison d'un phénomène de transport-diffusion de particules et celui d'un mouvement d'ensemble du support matériel dans lequel évoluent ces particules. Elle se produit couramment dans un système initialement hors-équilibre et se traduit par un courant de concentration partant des régions riches en particules vers les régions pauvres en particules. Elle tend donc à uniformiser la répartition des particules qui se dispersent.

**II.1.2.1 Phénomène de diffusion : Loi de Fick**

**- Vecteur densité de courant de diffusion**

Comme pour les charges électriques, nous définissons un vecteur densité de courant de diffusion de matière  $\vec{J}_D$  dont le flux à travers une surface ( $S$ ) est égal à l'intensité  $i_D$  (figure 31), i.e. au nombre algébrique de particules diffusantes qui traversent une surface ( $S$ ) par unité de temps. Pendant  $dt$ , le nombre de molécules  $dN_D$  qui diffusent ( $S$ ) est :

$$dN_D = i_D dt \tag{2-4}$$

Ainsi, le courant de diffusion qui traverse la même section est donné par la relation

$$i_D = \frac{dN_D}{dt} = \iint \vec{J}_D \cdot d\vec{s} \quad \text{avec } d\vec{s} = ds \vec{n} \tag{2-5}$$

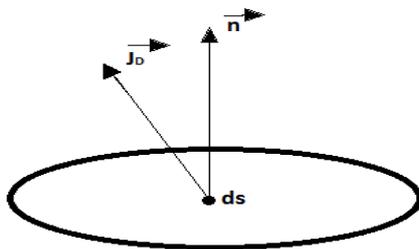


Figure 31:Orientation du vecteur densité d'un courant de diffusion [72]

Par ailleurs, dans un milieu conducteur, il y a proportionnalité entre le vecteur densité de courant  $\vec{J}_D$  et le champ diffusif  $\vec{E}_D$ .

$$\vec{J}_D = K \vec{E}_D \tag{2-6}$$

Dans cette expression,  $K$  est le coefficient de diffusion qui mesure l'aptitude du milieu à transporter les molécules diffusantes.

$\vec{K}(x) = \text{diag}(K_x, K_y, K_z)(m^2 / s)$  est une matrice diagonale dont les éléments sont en général fonction de la position et doivent être estimés par des paramètres empiriques.

### II.1.2.1.1 Première loi de Fick

Le champ diffusif est lié à la concentration  $C$  selon la loi de Fourier

$$\vec{E}_D = -\vec{\text{grad}}C \quad (2-7)$$

En exploitant (2-6) et (2-7) on obtient

$$\vec{E}_D = \frac{\vec{J}_D}{K} = -\vec{\text{grad}}C \quad \text{D'où}$$

$$\vec{J}_D = -K \vec{\text{grad}}C \quad (2-8)$$

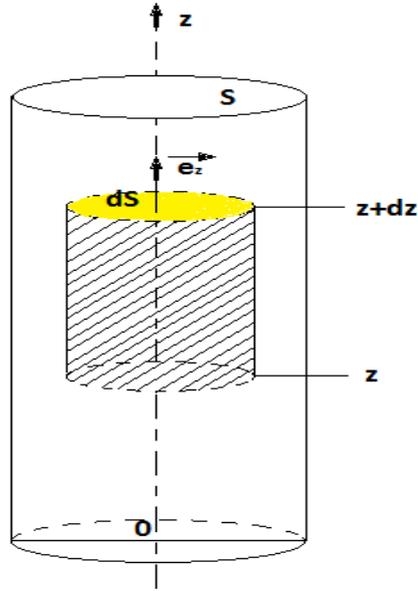
Cette expression représente la première Loi de Fick qui traduit la densité du flux de diffusion d'une particule, diffusant avec un coefficient diffusif  $K$  qui dépend de l'espace et du temps.

### II.1.2.1.2 Équation tridimensionnelle de diffusion de la matière : deuxième Loi de Fick

En considérant un tube vertical, rempli d'un support matériel et dans lequel se produit un phénomène de diffusion (figure 32), caractérisé par un vecteur densité de courant  $\vec{J}_D$  dirigé selon  $\vec{e}_z$  est :

$$\vec{J}_D = -K \frac{dC_D}{dz} \vec{e}_z \quad (2-9)$$

Selon la loi de Fick appliquée au tube considéré, en un point  $M$  donné d'altitude  $z$ , la concentration  $C_D$  de particules diffusantes varie au cours du temps. Considérons alors une portion infinitésimale de tube comprise entre les altitudes  $z$  et  $z + dz$



**Figure 32:** Illustration de l'élément volumique de diffusion [72]

Par définition de la concentration, le nombre de molécules diffusantes contenues dans ce petit volume à tout instant  $t$  est égal  $C_D(z,t).S.dz$ . Pendant une très faible durée, sa variation est donc :

$$C_D(z,t+dt).S.dz - C_D(z,t).S.dz = \frac{\partial C_D}{\partial t}.S.dz.dt \quad (2-10)$$

Une telle variation provient des molécules qui sont :

- D'une part entrées dans le volume par la section d'altitude  $z$ , ce qui représente une perte de particules égales à :

$$\iint \vec{J}_D(z,t).\vec{dS}.dt = \iint \vec{J}_D(z,t).\vec{n}.dS.dt = J_{D,z}(z,t).S.dt \quad (2-11)$$

Et d'autre part sorties du volume par la section d'altitude  $z + dz$ , qui représente une perte de particules égales à :

$$\iint \vec{J}_D(z+dz,t).\vec{dS}.dt = \iint \vec{J}_D(z+dz,t).\vec{n}.dS.dt = J_{D,z}(z+dz,t).S.dt \quad (2-12)$$

On peut définir le nombre de molécules  $dN_D$  diffusées pendant un temps  $dt$  par :

$$dN_D = \frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} S.dz.dt = J_{D,z}(z,t).S.dt - J_{D,z}(z+dz,t).S.dt = -\frac{\partial J_{D,z}}{\partial z}.S.dz.dt \quad (2-13)$$

$$dN_D = \frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} S.dz.dt = -\frac{\partial J_{D,z}}{\partial z}.S.dz.dt \quad \text{D'où} \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J_{D,z}}{\partial z} \quad (2-15)$$

En prenant en compte l'équation de la première loi de Fick suivant l'altitude  $z$ , on parvient à la deuxième Loi de Fick traduisant l'équation unidimensionnelle de diffusion d'une particule à une dimension :

$$\frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C_D(z,t)}{\partial z^2} \quad (2-16)$$

Pour généraliser, considérons que la section précédente soit bornée par un volume ( $V$ ) quelconque. Pendant  $dt$ , la variation du nombre de particules diffusantes qu'il contient est donnée par :

$$\iiint \frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} dV(M).dt = \iiint C_D(M,t+dt).dV(M) - \iiint C_D(M,t).dV(M) \quad (2-17)$$

Cette variation, comme pour le modèle à une dimension examiné précédemment, provient des particules qui, pendant  $dt$  sont :

- Entrées dans le volume ( $V$ ) par diffusion à travers sa surface ( $S$ ). Cela concerne tous les points de ( $S$ ) où le vecteur densité de courant de diffusion  $\vec{J}_D$  a un sens opposé au vecteur normal  $\vec{n}$  (orienté vers l'extérieur car ( $S$ ) est une surface fermée). Ces points donnent donc une contribution négative à l'intensité de diffusion :  $i_D = \oiint \vec{J}_D \cdot \vec{n} dS$ , ainsi

qu'au nombre algébrique total  $dN_D = i_D \cdot dt$  de particules diffusant durant  $dt$  à travers  $(S)$

- Sorties du volume  $(V)$  par diffusion à travers  $(S)$ . Cela concerne tous les points  $(S)$  où le vecteur  $\vec{J}_D$  est orienté dans le même sens que le vecteur normal. Ces points donnent donc une contribution positive à l'intensité  $i_D = \oiint \vec{J}_D \cdot \vec{dS}$  et au nombre algébrique total  $dN_D = i_D \cdot dt$  de particules qui diffusent durant  $dt$  :

$$\text{Par conséquent, } \iiint \frac{\partial C_D}{\partial t} dV \cdot dt = -i_D dt = -\oiint \vec{J}_D \cdot \vec{dS} dt \quad (2-18)$$

D'après le théorème de Green-Ostrogradsky ou théorème de divergence de Gauss, le flux du vecteur densité de diffusion à travers la surface fermée  $(S)$  est égal à l'intégrale volumique de sa divergence :

$$\oiint \vec{J}_D \cdot \vec{dS} = \iiint \text{div}(\vec{J}_D) dV; \quad \frac{\partial C_D}{\partial t} = -\text{div}(\vec{J}_D) = -\vec{\nabla} \cdot (-K \cdot \vec{\nabla} C) \quad (2-19)$$

$$\text{On a : } \frac{\partial C_D}{\partial t} = K \cdot \Delta C_D \quad (2-20)$$

(2-20) représente l'expression tridimensionnelle de la deuxième loi de Fick relative à la diffusion de la matière.

### **II.1.2.2 Phénomène d'advection-convection de la matière**

Afin de parvenir au mieux à établir les équations d'un tel phénomène, nous considérons que le milieu de support de diffusion est fixe ; alors que le phénomène de convection quant à lui, fait intervenir le transport par le vent des concentrations. De manière générale, le phénomène de convection obéit à plusieurs lois dont entre autres :

- **Loi de conservation de la masse**

Elle traduit le fait que le débit massique de particules mises en convection dans un volume élémentaire défini par un déplacement  $\Delta z$  de particules ne varie pas en fonction du temps. Cette loi s'écrit en unidimensionnelle par l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\frac{\partial(m_i)}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial z} \quad (2-21)$$

Où  $m_i = A.C$  désigne la masse linéique de la particule en convection et  $G = Q.C$  est le débit massique de particules. En dérivant partiellement par rapport à l'altitude  $z$  et au temps (2-21), on a l'égalité :

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial A}{\partial t} = Q \frac{\partial C}{\partial z} + C \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (2-22)$$

$$\Rightarrow (A \frac{\partial C}{\partial t} - Q \frac{\partial C}{\partial z}) + C(\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z}) = 0 \quad (2-23)$$

- **Loi de conservation du volume de particules**

La convection des particules dans l'atmosphère obéit à la loi de conservation du volume occupé par celles-ci, ainsi en faisant une identification dans (2-22) et en reportant le résultat dans (2-23),

$$\text{l'égalité } A = Q \text{ nous conduit à : } C = \text{constante} \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2-24)$$

$$\text{D'où} \quad \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (2-25)$$

- **Loi de convection d'une particule dans l'atmosphère**

Elle est traduite par la nullité de l'un et l'autre des termes de l'équation (2-25) et est la caractéristique de la variation de potentiel qui existe entre la source et le point de l'espace atteint par la vitesse de convection, qui est en générale donnée par la rose du vent.

$$A \frac{\partial C}{\partial t} - Q \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2-26)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2-27)$$

Et en posant  $w = \frac{Q}{A}$

Nous définissons cette grandeur comme étant la vitesse du vent dans la direction de convection ( $oz$ ). Ainsi on parvient à l'implication de (2-28) que l'on appelle équation unidirectionnelle de convection :

$$\frac{\partial C}{\partial t} - w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2-28)$$

### II.1.2.2.1 Expression tridimensionnelle de la loi de convection d'une particule dans l'atmosphère.

En considérant les vitesses du vent suivant les trois dimensions, on a la relation suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2-29)$$

$$(2-29) \text{ équivaut à } \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} C = 0 \quad (2-30)$$

$$\text{C'est-à-dire } \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \overrightarrow{\text{grad}C} = 0 \quad (2-31)$$

Cette dernière équation permet d'exprimer la convection d'une particule de concentration  $C$  dans une atmosphère où le vent a pour vecteur vitesse  $\vec{U}$ .

### II.1.3 Équation générale de dispersion des polluants dans l'atmosphère

La dispersion d'une particule dans le temps et l'espace prend en compte d'une part le phénomène de diffusion qui fait intervenir la divergence du gradient de la concentration correspondant à son Laplacien dans le temps à travers l'équation (2-20); d'autre part le phénomène d'advection-convection qui lui, apporte un effet de la météorologie du domaine étudié dans le temps d'après l'équation (2-31). A ces phénomènes, s'ajoute l'apport des différentes autres sources qui génèrent des particules polluantes dans le domaine étudié. Ces conditions répondent au modèle gaussien. Ce modèle a un impact plus important autour de la source dans le cas des polluants primaires et secondaires. Il a une approche numérique plus fiable et les résultats sont obtenus dans les délais. Ainsi, l'équation d'advection-diffusion ou de dispersion de concentration  $C(M,t)$  d'un ensemble de particules polluantes de vitesse  $\vec{U}(M,t)$ , de vitesse de dépôt  $V_d(M,t)$ , avec un pouvoir diffusif  $K(M,t)$  en un point  $M$  de coordonnées spatio-temporelles  $x, y, z, t$ , une décomposition des polluants dans l'air  $R(M,t)$ , dans un milieu où est générée une concentration de particules polluantes issu de la source  $S(M,t)$ , l'équation de dispersion atmosphérique des polluants est obtenue par une combinaison des équations (2-20) et (2-31) : C'est-à-dire par la relation de Navier Stokes :

Equation de dispersion atmosphérique des polluants

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - K_z \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q_s + R - V_d C \quad (2-32)$$

Ce dernier qui reproduit le comportement des polluants dans la zone d'étude, où  $C(x, y, z, t)$  est concentration au point  $M$  et au temps  $t$  en ( $ug/m^3$ ),  $K_x, K_y, K_z$  sont les coefficients de diffusion dans la direction  $x, y, z$  respectivement dont l'ordre de grandeur  $10^{-5}m^2/s$  et  $u, v, w$  les vitesses du vent dans les directions  $x, y$  et  $z$ ,  $Q_s$  est le débit massique ( $kg/s$ ),  $R$  est la décomposition des polluants ( $Sec^{-1}$ ).

$$R = -K_d C \quad (2-33)$$

Avec  $K_d$  le coefficient de réaction et  $K_d C$  qui représente le terme de disparition. Donc l'équation (2-28) devient (2-30)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - K_z \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q_s - K_d C - V_d C \quad (2-34)$$

.

Dans ce travail on étudie également la condition de stabilité atmosphérique, en considérant le profil de vitesse dans la direction des y pour pouvoir évaluer l'influence de la stabilité atmosphérique sur la dispersion c'est-à-dire que  $u = 0$  et  $w = 0$ .

$$v = \left( \frac{u_*}{k} \right) \left[ \text{Ln} \left( \frac{z}{z_0} \right) + \psi \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad (2-35)$$

Avec :

$$\psi = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{4.8}{L} & (L > 0) \\ -2 \text{Ln} \left( \frac{1+\alpha}{2} \right) - \text{Ln} \left( \frac{1+\alpha^2}{2} \right) + 2 \tan^{-1}(\alpha) - \frac{\pi}{2} & (L < 0) \end{array} \right\} \quad (2-36)$$

Dans cette équation,  $\alpha = (1 - 16z/L)^{1/4}$ ,  $u_*$  est la vitesse de friction,  $k$  est la constante de Kalman,  $z_0$  est la hauteur de la rugosité,  $L$  est la longueur de Monin Obukhov [73].

Et en apportant la contribution des dépôts au sol l'équation devient:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q_s - K_d C \quad (2-37)$$

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} = V_d C \quad (2-38)$$

Avec  $K_z$  le coefficient de diffusion vertical et  $V_d$  est la vitesse de dépôt  $m/s$

### II.1.4 Caractérisation de la dispersion des polluants en milieu souterrain

Lors du déplacement des polluants dans les réseaux poreux du sol, l'eau peut entre autre entrainer des éléments sous forme dissoute, plusieurs phénomènes physiques et chimiques peuvent intervenir dans le transport de ces solutés dans cette partie nous considérons le cas d'un soluté inerte (non réactif) où seuls les processus physiques sont pris en compte. Les principaux mécanismes et paramètres associés au transfert des polluants dans les aquifères (constitués par le sol ; zone non saturée ; la nappe et la zone saturée), en particulier au sein du milieu poreux, sont rappelés ci-dessous.

#### - Les lois régissant le phénomène d'écoulement en milieu poreux

L'écoulement de l'eau en milieu poreux saturé est régi par deux équations principales que sont la loi de Darcy et l'équation de continuité.

#### - Loi de darcy

Les écoulements souterrains sont formalisés par la loi de Darcy, valable dans une matrice poreuse homogène et isotrope pour un fluide homogène, isotherme et incompressible, dont l'énergie cinétique est négligeable, quand l'écoulement est laminaire et en régime permanent [74]. La loi de Darcy indique que l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux se fait dans la direction du gradient de charge hydraulique. Le débit dépend aussi d'une caractéristique fondamentale du milieu poreux: la conductivité hydraulique à saturation, qui est l'aptitude du milieu poreux à transmettre l'eau qu'il contient. À l'échelle macroscopique, la loi de Darcy peut être généralisée aux milieux variablement saturés [75].

Pour un fluide compressible (c'est le cas de l'eau), elle s'énonce ainsi qu'il suit

$$v = -\frac{k}{\mu}(\nabla P + \rho g \nabla z) \quad (2-39)$$

Où

$v$  : est le vecteur vitesse de Darcy,  $m.s^{-1}$

$\rho$  : est la masse volumique du fluide,  $kg.m^{-3}$

$\mu$  : est la viscosité dynamique du fluide,  $kg/(m.s)$

$k$  : La perméabilité intrinsèque du milieu,  $m^2$

$P$  : est la pression,  $kg.m^{-1}.s^{-2}$

$g$  : est l'accélération de la pesanteur,  $m.s^{-2}$

$z$  : est la cote déniée selon l'axe vertical,  $m$

Elle exprime la vitesse de filtration en régime permanent ou transitoire en fonction du gradient de pression et de la gravité. En négligeant la variation spatiale de la masse volumique, la loi de Darcy (2-39) se simplifie de la façon suivante :

$$v = -\frac{k\rho g}{\mu} \nabla \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) = K \nabla H \quad (2-40)$$

$H = \frac{P}{\rho g} + z$  : Représente le potentiel hydraulique ou la hauteur piézométrique,  $m$

$K = \frac{k\rho g}{\mu}$  : est le coefficient de conductivité hydraulique ou de perméabilité,  $m.s^{-1}$

Lorsque le milieu poreux est isotrope ou lorsque l'écoulement est unidirectionnel, les coefficients de perméabilité ( $K$ ) et de perméabilité intrinsèque ( $k$ ) sont des coefficients scalaires. Lorsque le milieu dans l'espace à trois dimensions est anisotrope, le coefficient de conductivité est défini par un tenseur symétrique d'ordre 3. Dans les conditions de Dupuit (le fond de la nappe est supposé pratiquement horizontal et la vitesse est constante suivant toutes les verticales et parallèle au fond, (figure 33), conditions qui sont jugées réalistes au vu de l'étude de la plupart des aquifères, en prenant pour origine des côtes le fond de la nappe, et en supposant la pression nulle à la surface libre.

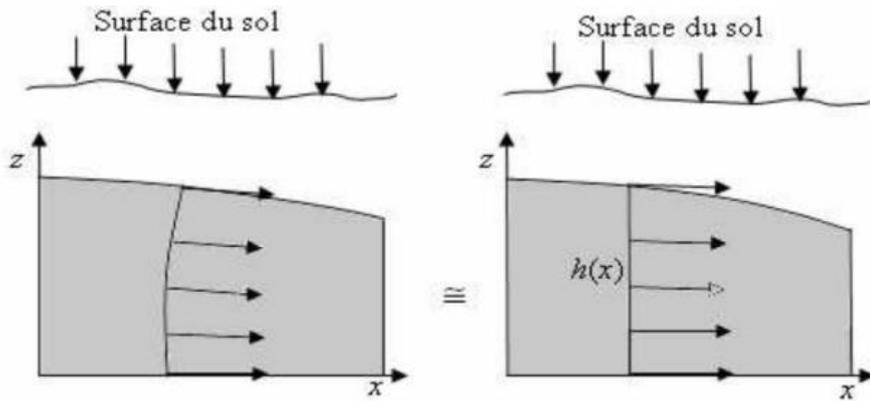


Figure 33: Illustration de l'approximation de Dupuit [76].

On aboutit à l'expression ci-dessous pour une nappe phréatique [77] :

$$Q = \int_{z=0}^{z=H} v dz = -KH \nabla H \quad (2-41)$$

Où

$Q$  : Débit par unité de surface,  $m.s^{-1}$

$K$  : Conductivité hydraulique non saturée,  $m.s^{-1}$

$\nabla H$  : Gradient hydraulique, sans unité

$H$  : Charge hydraulique, m

### - L'équation de convection

Cette équation exprime le principe de conservation de la masse d'un fluide en mouvement. Dans un volume élémentaire, la masse du fluide prélevé ou injecté est égale à la somme de la variation de la masse du fluide durant un intervalle de temps élémentaire et des flux massiques traversant la surface de ce volume. Dans une nappe phréatique, on démontre que cette équation s'écrit :

$$\frac{\partial(\alpha C)}{\partial t} + \nabla \cdot (vC) = Q_s \quad (2-42)$$

Où

$\alpha$  : est appelé coefficient de stockage compris entre 0 et 1

$Q_s$  : Représente le débit massique (kg/s)

- **Diffusion moléculaire**

La diffusion moléculaire est un phénomène indépendant de la vitesse de fluide car elle se produit même en absence d'écoulement. Elle est liée à l'existence de gradient de concentration dans le fluide et provient de l'agitation des molécules qui tendent à homogénéiser la concentration du soluté dans le milieu (migration des molécules de zones de fortes concentrations vers les zones de faibles concentrations). Le flux massique de soluté transporté uniquement par la diffusion est calculé selon une loi de Fick.

$$\frac{\partial(\alpha C)}{\partial t} - \nabla \cdot (D_m \nabla C) = Q_s \quad (2-43)$$

Où  $D_m$  : est coefficient de diffusion moléculaire avec pour ordre de grandeur  $10^{-9} m^2.s^{-1}$

**II.1.4.1 L'équation général de dispersion de soluté en milieu souterrain**

L'eau est le milieu par excellence de transport d'éléments sous forme dissoute. Le transport de ces éléments met en jeu plusieurs phénomènes physiques qui sont entre autres la convection, la dispersion hydrodynamique et des phénomènes chimiques qui sont la diffusion moléculaire, l'absorption, la précipitation/dissolution. Ces phénomènes peuvent favoriser ou retarder le déplacement. Dans le cadre de notre travail, une attention particulière sera accordée au phénomène de convection-diffusion, les autres phénomènes étant supposés négligeables. On peut donc écrire d'après les équations (2-42) et (2-43) déduire l'équation convection-diffusion :

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + \nabla \cdot (vC) - \nabla \cdot (D_m \nabla C) = Q_s \quad (2-44)$$

Dans le cas d'une infiltration du soluté en milieu souterrain suivant l'axe vertical oz on a :

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} - D_m \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = Q_s \quad (2-45)$$

Pour une dispersion du soluté en milieu souterrain suivant l'horizontal ox et oy on a :

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + u_0 \frac{\partial C}{\partial x} + v_0 \frac{\partial C}{\partial y} - D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_m \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = Q_s \quad (2-46)$$

## II.2 MAILLAGE DU DOMAINE

La prédiction de la concentration de polluant en un point du domaine peut être obtenu en effectuant d'abord un maillage du domaine (Figure 34 et 36), puis en discrétisant explicitement par différence finies l'équation d'advection- diffusion afin d'obtenir la valeur approchée de la concentration en chaque pas de temps et d' à partir de la espace. La discrétisation des opérateurs fait à partir de la méthode taylor. L'un ou l'autre des concentrations voisins de la concentration cible sont utilisés comme variables d'entrées par les réseaux de neurones [64].

- Pour une dispersion atmosphérique de polluant on a défini le domaine de définition et des conditions aux limites

$$x, y, z [0, +\infty[ \quad (2-47)$$

$$\begin{aligned} C(0, y, z) &= C_{\max} \\ C(x, 0, z) &= C_{\max} \\ C(x, y, 0) &= C_{\max} \end{aligned} \quad (2-48)$$

$$\begin{aligned} C(+\infty, y, z) &= 0 \\ C(x, +\infty, z) &= 0 \\ C(x, y, +\infty) &= 0 \end{aligned} \quad (2-49)$$

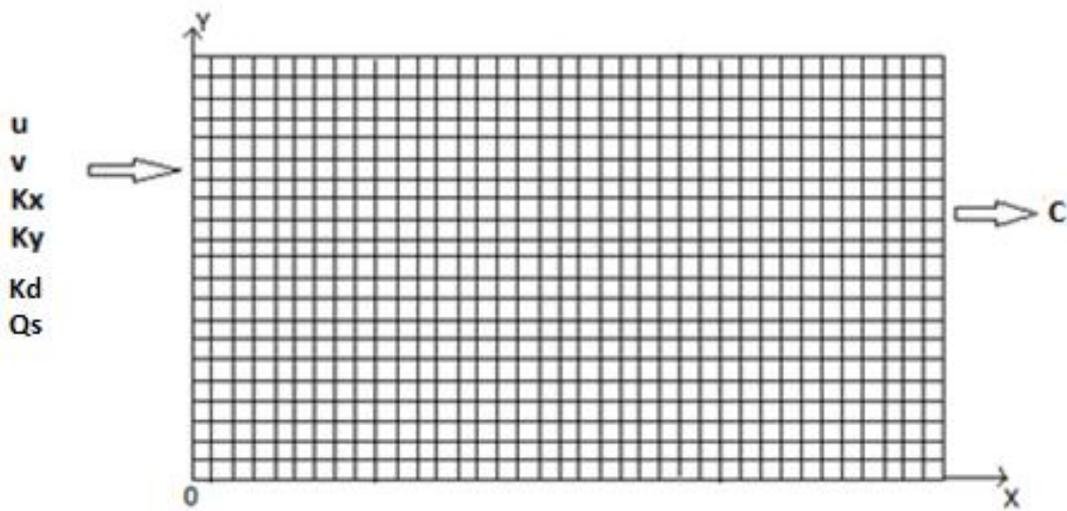


Figure 34: Maillage du domaine atmosphérique

Dans le cas d'une dispersion atmosphérique des polluants on a :

Le terme instationnaire on utilise les différences progressives :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (2-50)$$

Les termes advections et de diffusion moléculaire on a :

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} \quad (2-51)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2} \quad (2-52)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} \quad (2-53)$$

L'équation (2-37) devient :

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + v \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} = K_x \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2} + K_y \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} + K_z \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{(\Delta z)^2} + Q_s - K_d C \quad (2-54)$$

- Pour le cas du processus de dépôt on a :

$$K_z \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} = V_d C \quad (2-55)$$

L'organigramme de résolution pour le cas de dispersion atmosphérique polluant donné par la (figure 35)

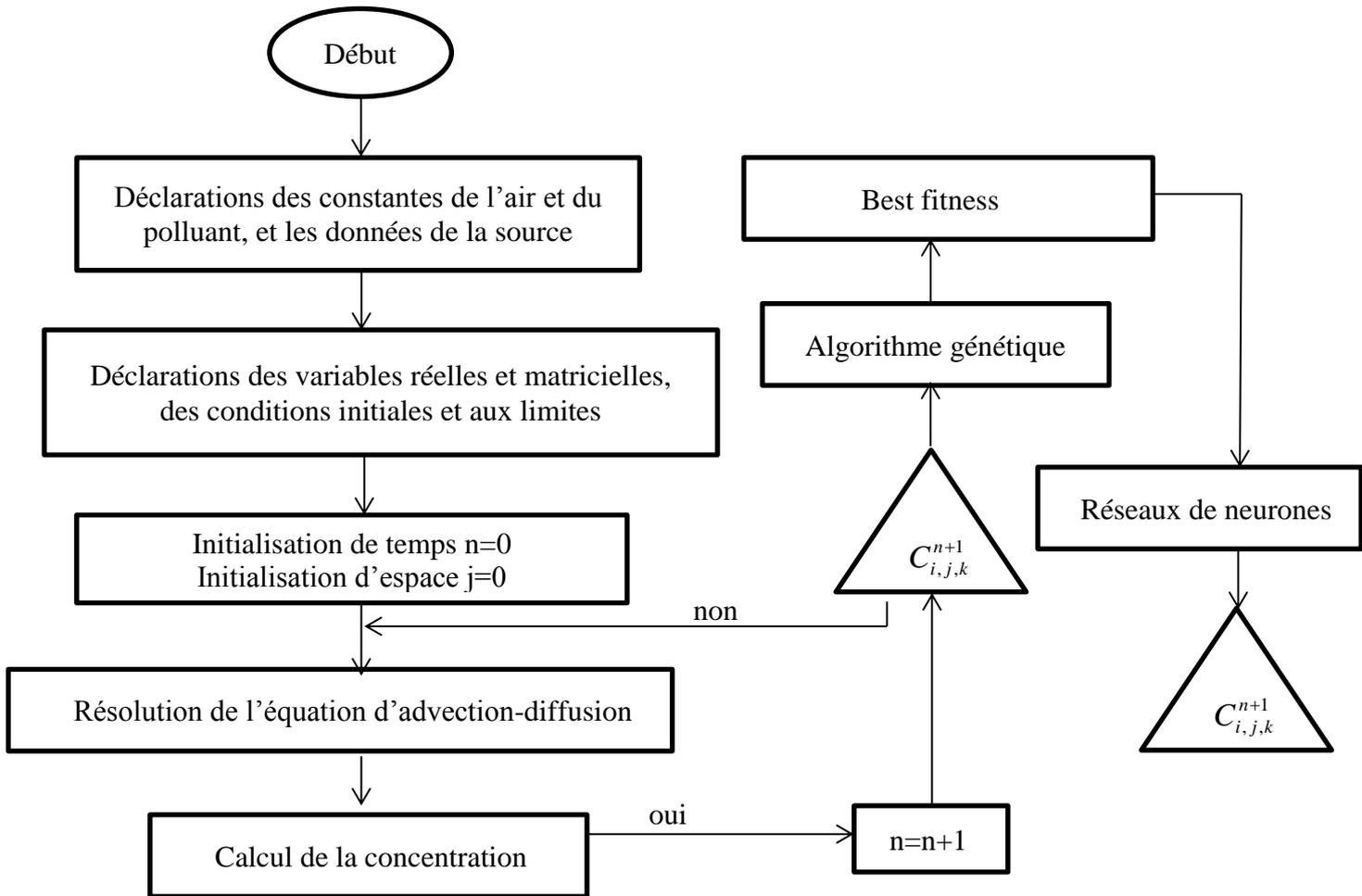


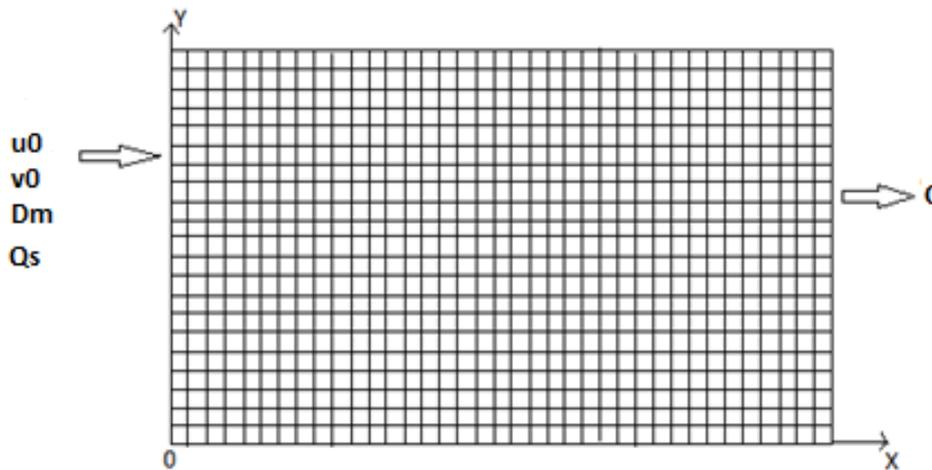
Figure 35: L'organigramme de la résolution de la dispersion atmosphérique des polluants

Pour une dispersion souterraine de polluant on a défini le domaine de définition et des conditions aux limites

$$x, y, z \in [0, +\infty[ \quad (2-56)$$

$$\begin{aligned} C(0, y, z) &= C_{\max} \\ C(x, 0, z) &= C_{\max} \\ C(x, y, 0) &= C_{\max} \end{aligned} \quad (2-57)$$

$$\begin{aligned} C(+\infty, y, z) &= 0 \\ C(x, +\infty, z) &= 0 \\ C(x, y, +\infty) &= 0 \end{aligned} \quad (2-58)$$



**Figure 36:** Maillage du domaine souterrain

. Le terme instationnaire on utilise les différences progressives :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (2-59)$$

Les termes advections et de diffusion moléculaire on a :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (2-60)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} \quad (2-61)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \quad (2-62)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} \quad (2-63)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (2-64)$$

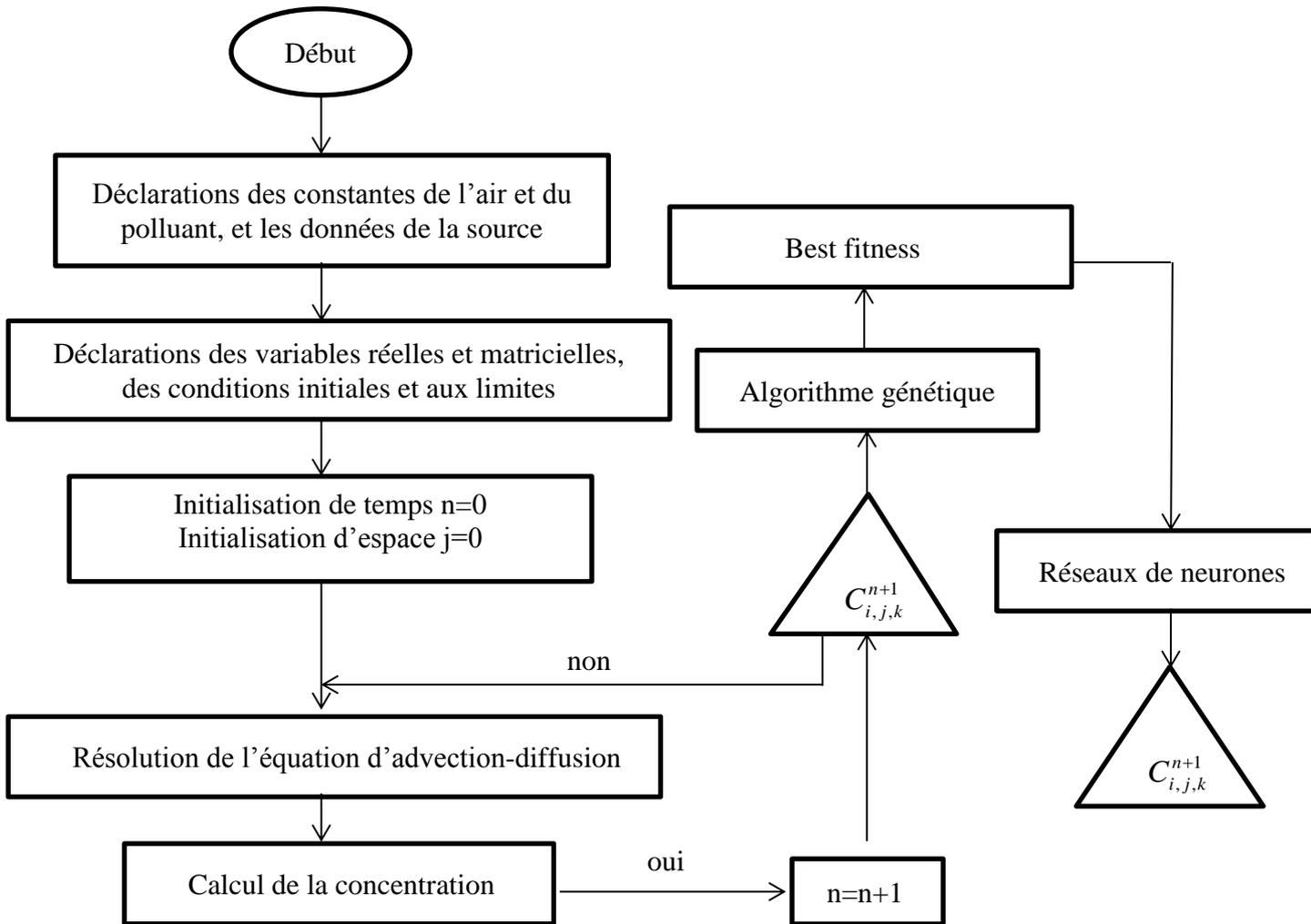
- Pour le cas de l'infiltration du soluté en milieu souterrain suivant l'axe vertical on a :

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + w_0 \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} - D_m \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{(\Delta z)^2} = Q_s \quad (2-65)$$

- Pour le cas dispersion du soluté en milieu souterrain suivant l'horizontal on a :

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + u_0 \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_0 \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} - D_m \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{(\Delta x)^2} - D_m \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(\Delta y)^2} = Q_s \quad (2-66)$$

L'organigramme de la résolution pour le cas de dispersion polluant milieu souterraines donné par la (figure 37)



**Figure 37:** L'organigramme de résolution de la dispersion souterraine des polluants

## II.3 MATÉRIEL ET MÉTHODE EXPERIMENTALE DES MESURES

### II.3.1 Matériel

#### - Echantillons du sol

Le sol utilisé est celle de la ville Mbalmayo à prédominance ferrallitique. Ce sont des sols profonds qui ont une bonne perméabilité, mais peuvent devenir secs à cause de leur faible capacité de rétention d'eau. Après avoir creusé le sol jusqu'à une profondeur de 30m, car c'est à cette profondeur qu'on a des rétentions d'eau fonction de la taille des pores. Par la suite nous avons prélevé quelques échantillons de ce sol (figure 38 a) chaque mois entre 2017 et 2021 que nous avons fait sécher (figure 38 b) afin de terminer la teneur en eau.



**Figure 38:** (a) Sol humide et (b) Sol sec

#### - Matériels techniques

On a utilisé un compteur volumétrique (figure 39a) pour mesurer la consommation de fioul au niveau de la CTY et au niveau de la CTM. Pour ce qui est de l'identification des polluants émis dans l'atmosphère, on a utilisé au niveau de la cheminée de la centrale thermique de Yassa un analyseur de fumé portatif (Analyseurs des Correspondances Multiples) (figure 39b) qui est le matériel le plus utilisé pour l'analyse de fumée émis par les centrales thermiques du réseau Eneo du fait d'un manque sur la chaîne des installations des capteurs et analyseurs de fumées. Il permet de nous informer sur le type de polluants émis dans l'air et le taux de polluant contenu dans la fumée.



**Figure 39:** (a) Compteur volumétrique et (b) Analyseurs de fumées portatifs

- **Matériels de laboratoire**

Dans le cadre de nos travaux au laboratoire de l'école normale supérieure de Yaoundé I, pour déterminer la teneur en eau du sol nous avons d'abord utilisé une boîte étiquetée pour contenir les échantillons de sol, puis une balance numérique a été utilisée pour peser la masse de la boîte contenant les échantillons de sol (figure 40a) et en fin nous avons utilisé une étuve à dessiccation pour le séchage des différents échantillons de sol (figure 40b).



**Figure 40:** (a) Balance numérique et (b) Etuve de dessiccation

### II.3.2 Méthode

#### - Méthode expérimentale pour la détermination de la teneur en eau du sol

Dans le cadre de cette étude un total de 12 échantillons (à raison d'un échantillon de sol par mois), le dispositif expérimental qui nous a permis de déterminer la teneur en eau du sol est la suivante : Tout d'abord nous avons prélevé chaque mois des échantillons de sol humide sur 3 points de la ville de Mbalmayo, puis au laboratoire de sciences physiques de l'école normale supérieur de Yaoundé I nous avons placé les échantillons dans une boîte numérotée au préalable et tarée, et l'ensemble a été pesé à l'aide d'une balance numérique (figure 40a). Une étuve à dessiccation (figure 40b) a permis d'effectuer une dessiccation à 105C°, après quelques 24h, on a pesé une seconde fois pour déduire la masse sèche de chaque échantillon. Enfin après avoir obtenu la masse de l'eau évaporée du sol présentée par la relation (2-55) et on a calculé la teneur en eau du sol présentée la relation (2-56).

$$m_e = m_{se} - m_{ss} \quad (2-55)$$

$$W_e = \frac{m_e}{m_{se}} \times 100 \quad (2-56)$$

$m_e$  : La masse de l'eau évaporée

$m_{se}$  : La masse du sol humide

$m_{ss}$  : La masse du sol sec

$W_e$  : La teneur en eau

### II.3.3 Méthode d'estimation des émissions des polluants

Bien souvent, l'émission des polluants d'un procédé dépend de l'activité qu'il réalise. Par exemple, l'émission dans une centrale thermique va dépendre de son régime de fonctionnement en période d'activité réduite comme en été, elle émettra moins que lorsqu'elle fonctionne à plein

régime. Il est plus simple et plus contrôlable de définir un facteur d'émission à fonction réduite et un facteur d'émission en pleine charge. Du point de vue de chaque procédé, il est également plus logique de considérer que les émissions sont relatives à des régimes de fonctionnement regroupés sous la dénomination des activités. De plus, cela permet de prendre en compte des variations d'activités au cours du temps, ce qui est important notamment pour l'étude de scénario d'émission.

Pour élaborer un inventaire d'émission, il faut donc :

- Identifier les sources (émetteurs) en correspondance avec les substances, dans la zone d'espace et de temps considéré ;
- Pour chaque source, déterminer son activité ;
- Pour chaque source, déterminer son facteur unitaire d'émission ;
- Pour chaque source, déterminer son émission en faisant le produit indiqué ;
- Sommer sur l'ensemble des sources recensées.

Au niveau de la centrale thermique de Yassa-Dibamba, les données ont été collectées et traitées. Le processus de collecte a été la suivante : D'abord le volume de combustible brûlé a été mesuré grâce à un compteur volumétrique. Par la suite le facteur unitaire d'émission pour chaque polluant a été relevé, notamment le CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> grâce à la fiche technique de suivi journalière (Annexe 1). Ce facteur d'émission a permis de convertir la quantité de combustible brûlé en quantité de gaz émis. Enfin sachant que 1 litre de gasoil est égal à 0,032 giga joules, la détermination de la quantité d'émission des polluants s'est faite par calcul dont le principe méthodologique repose sur la relation :

$$E = A \times F_{em} \quad (2-57)$$

$E$  : est l'émission (ou flux d'émission)

$A$  : est l'activité des émetteurs ;

$F_{em}$  : est un facteur unitaire d'émission, le tableau 1 de l'annexe1 indique les facteurs d'émissions des principaux polluants répertoriés.

La réalisation est essentiellement un travail de collecte et de regroupement des données. Ce travail est extrêmement lourd et coûteux. Souvent, les données de base (facteurs d'émissions ou activité) sont mal connues et il est nécessaire de les extrapoler. De plus, les

formats de ces données sont extrêmement variables selon le secteur concerné et les ordres de grandeurs, et ne s'acquièrent qu'avec une solide expérience. La réalisation d'inventaire exige bien souvent la constitution de la base de données très importante. Petit à petit, les choses s'organisent pour automatiser l'observation et la collecte de données de base nécessaires aux inventaires. Dans un contexte réglementaire, la réalisation des inventaires est confiée à des organismes compétents et indépendants, qui ont connaissance des méthodologies d'estimation des émissions et des bases des données associées.

Selon les principales espèces considérées plus haut, de ce qui en ressort de cette centrale thermique, on peut dire que deux principaux milieux peuvent être affectés ; il s'agit du milieu atmosphérique et souterrain. Car ces éléments sont susceptibles de s'évaporer dans l'atmosphère à travers la cheminée d'une source de pollution ou de s'infiltrer dans le sol à partir d'un déversement dans le sol, ces différents polluants peuvent être transportés à partir des vecteurs de transport qui sont : le vent et l'eau. Mais les travaux menés à la centrale de Yassa-Dibamba ont plus un impact majeur dans l'atmosphère à partir de la cheminée et les travaux menés à la centrale thermique de Mbalmayo ont plus un impact dans la nappe phréatique, car les déversements de fioul se font de façon récurrente.

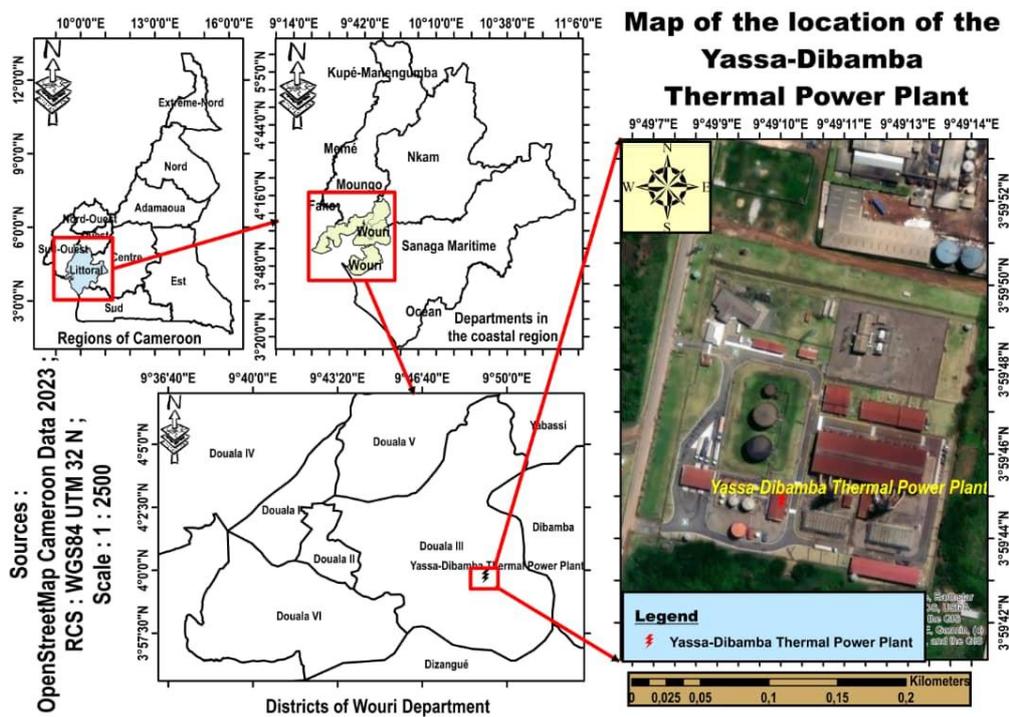
Au niveau de centrale thermique de Yassa, on a utilisé un dispositif arduino (annexe 4) composé d'un capteur Alpha-sense embarqué sur un drone qui permet de mesurer la concentration des polluants à la sortie de la cheminée, d'un logiciel Fritzing qui permet de concevoir de façon entièrement graphique le circuit et d'une carte arduino qui permet de collecter les valeurs de la concentration mesurée par le capteur. Ces différentes valeurs de la concentration mesurée ont été comparées aux valeurs de la concentration calculée par le modèle couplé GA, le but étant d'évaluer la précision de ce modèle.

## **II.4 PRÉSENTATION DES CENTRALES THERMIQUES**

### **II.4.1 Historique et présentation de la centrale thermique de Yassa-Dibamba**

Dans le but de promouvoir le développement du Cameroun sur le plan énergétique et de mettre un terme à cet épineux problème de délestage, le gouvernement camerounais va confier le projet de construction de la centrale thermique à fioul lourd de Yassa-Dibamba à KPDC (Kribi Power Development Company) au mois de mars 2008, cette centrale sera inaugurée en décembre 2009 sous la direction de la KPDC. En janvier 2011, la direction générale de la centrale sera

cédée à la société DPDC (Dibamba Power Development Company) qui aura désormais la lourde charge de gérer au quotidien la centrale thermique. Cette dernière est située sur l'axe lourd Douala-Yaoundé plus précisément à l'entrée de la ville de Douala et à quelques mètres du pont sur la Dibamba entre 3° 59' 44' N et 9° 49' 10' E, dans la subdivision de Douala 3<sup>ème</sup> qui a une population d'environ 1.020.061 d'habitants. Avec une hauteur de 34 m, la centrale thermique de Dibamba est construite sur environ 4 hectares (ha) dans une zone globale d'approximativement 7,7 ha (Figure 41).



**Figure 41:** Localisation de la centrale thermique de Yassa- Dibamba

#### II.4.1.1 Structure de la centrale thermique

Elle comprend: Des équipements de production et transmission d'énergie électrique, y compris huit groupes, un Poste de transformation (11 à 90 KV). Le combustible principal est le fioul lourd (HFO) et le combustible secondaire est le fioul léger ou à faible densité appelé LFO. C'est une centrale d'appoint dont la puissance installée est de 88 MW et la puissance utile est de 86 MW. Ces huit groupes délivrent chacun une puissance de 11 MW sous une tension de 11 KV; chaque groupe générateur est muni : D'un moteur diesel de Type moteur **WÄRTSILÄ 18V38LN** caractérisé par un nombre de cylindres : 18, l'alésages de cylindre : 380 mm, Course : 475 mm,

Régime : 600 tr/min, Puissance nominale : 11099 KW, Sens de rotation: sens horaire, et d'un alternateur type de générateur (**CONVERTEAM P160126**) dont les caractéristiques sont: Puissance apparente: 13457 KVA, Facteur de puissance: 0.8, Tension: 11000V, Courant: 706A, Fréquence : 50 Hz, Puissance de chauffage anti-condensateur 3153.

La centrale est aussi constitué : D'une salle de machine A, d'une salle de machine B, d'une salle de compresseur d'air, d'une salle d'équipements basse tension, d'une salle de commande et de contrôle, d'une salle de traitement de fioul, d'une station de dépotage, des surfaces de stockage de combustible (figure 42), des surfaces de réservoir journalier, d'un réservoir d'eau d'incendie, d'une unité de traitement d'eau d'incendie, d'un réservoir d'eau traité, d'une unité de traitement d'eau, des ateliers et bureaux, des conduits de gaz d'échappements, des radiateurs.



**Figure 42:** Surfaces de stockage du combustible

### - **Circuit d'alimentation en combustible**

Le circuit d'alimentation en combustible a pour rôle d'amener à chaque cylindre une quantité déterminée de combustible parfaitement filtré, parfaitement dosé sous haute pression, à un moment précis et ce quel que soit les conditions d'utilisation du moteur. Il comprend entre autres :

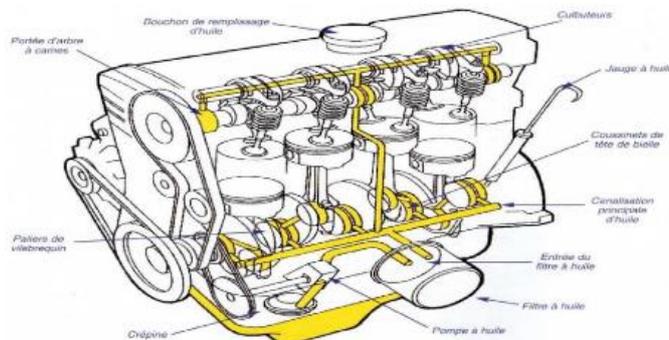
Le réservoir de carburant qui assure un approvisionnement en carburant disponible et utilisable facilement au groupe électrogène, il est situé à l'intérieur du groupe et est contenu par le bâti.

Le pré filtre est monté en série entre le réservoir et la pompe d'alimentation; dont le rôle est d'arrêter les impuretés et d'éliminer l'eau, en suspension dans le gazole, par décantation.

Le filtre est monté en série entre la pompe d'alimentation et la pompe d'injection, son rôle est d'arrêter les plus petites impuretés (2 à 3 microns) afin de protéger la pompe d'injection. Il faut noter qu'il est absolument nécessaire de filtrer soigneusement le combustible avant son entrée dans le circuit haute pression car une impureté infirme soit-elle peut détériorer de façon irrémédiable la pompe d'injection et les injecteurs.

### - circuit de lubrification

Le système de lubrification du moteur a pour rôle de diminuer les résistances passives dues aux frottements des pièces en mouvement les unes par rapport aux autres en facilitant leur glissement (figure 43). La lubrification favorise en outre le refroidissement des différents organes du moteur tout en assurant leur propreté; elle participe aussi à l'étanchéité de la chambre de combustion. Toute absence de la lubrification, se traduit par une élévation de température de frottement qui provoque à long terme, le grippage de l'ensemble piston, bielle, vilebrequin.



**Figure 43:** Circuit de lubrification

- **Refroidissement du moteur diésel**

Le système de refroidissement du moteur a pour fonction: De dissiper le dégagement de chaleur, de maintenir les températures des différents organes à des niveaux compatibles avec une résistance mécanique suffisante.

- **Présentation du groupe électrogène**

Le groupe électrogène de la centrale thermique de Yassa-Dibamba est de marque BLACK START, construit pour fournir une tension composé de 400V sous une puissance active de 375KVA (Kilo Volts Ampère) (figure 44).



**Figure 44:** Groupe électrogène de marque BLACK START

Il est principalement constitué de :

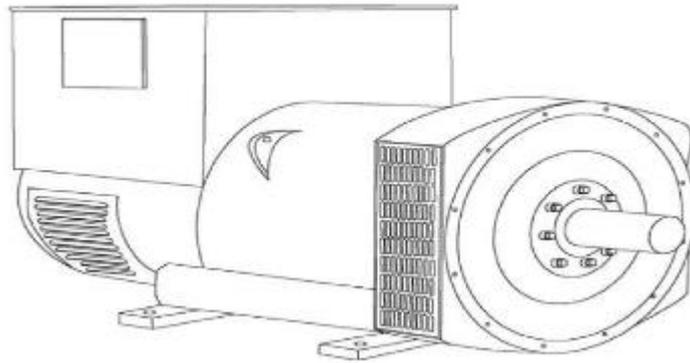
- Un moteur thermique

Le moteur thermique qui entre dans la constitution de notre groupe est un moteur diésel à 4 temps et à injection, de marque VOLVO PENTA et de référence TAD1241 ; son circuit de

combustion est constitué de 6 cylindres en ligne (monté en série). Tournant à une vitesse de 1500 tours par minute.

- Un alternateur triphasé

L'alternateur triphasé qui entre dans la constitution de notre groupe est de marque STAMFORD et de référence HC 434F (Figure 45) dont les caractéristiques sont les suivantes : puissance apparente (S): 375 KVA, puissance active (P): 300 KW (Kilo Watts), tensions : 230/400 V, facteur de puissance : 0,8, fréquence : 50Hz (Hertz).



**Figure 45:** Alternateur STAMFORD

- Un module de contrôle et de commande électronique

Le module de contrôle et de commande est une interface de communication Hommes-machines qui a pour rôle de chapeauter le fonctionnement du groupe en déclenchant l'alarme en cas d'anomalie, en renseignant de manière constante les usagés sur l'état du groupe (figure 46).



**Figure 46:** Modulation de contrôle et commande

### *II.4.1.2 Principe de fonctionnement de l'alimentation du groupe*

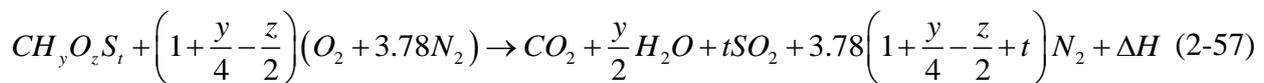
A l'absence totale d'énergie électrique dans la centrale (black-out), en fonction du programme introduit dans l'automate chargé de piloter le groupe et selon le mode de marche du groupe manuel ou automatique (figure 47), ce dernier va lancer le processus de vérification des conditions de démarrage (niveau d'huile, niveau des batteries, niveau du fioul et niveau température d'eau...etc.) ; si ces conditions sont réunies le moteur diesel démarre et atteint son plein régime. Ce moteur entraîne en rotation de l'alternateur qui produira l'énergie électrique alternative à l'aide du phénomène d'auto-induction. La régulation de cette énergie est assurée par le régulateur de tension automatique (AVR) qui est un dispositif électronique dont le rôle est de régler la tension de sortie de l'alternateur. Dès lors le groupe électrogène fournit une énergie électrique suffisante pour alimenter les auxiliaires d'au moins un moteur en cas de black-out causé par des perturbations sur le réseau qui est caractérisé par l'ouverture des disjoncteurs BAO 901 et BAO 902 du jeu de barre de 11KV (Kilo Volts) contrôlé par des relais automate VAMP ; 15s après détection d'une absence de tension sur le jeu de barre 11KV, le Black start grâce aux inverseurs installés dans la boîte de commande va démarrer de manière automatique et alimenter le jeu de barre de 400V (Volts) avec une puissance nécessaire pour alimenter les auxiliaires d'un moteur parmi huit ; choisi par les opérateurs de la centrale, ce moteur va fournir une puissance nécessaire à l'alimentation des auxiliaires des autres moteurs de la centrale; dès lors la centrale pourra à nouveau fournir le maximum de sa puissance.



**Figure 47:** Salle des machines

### **II.4.1.3 Consommation du fioul et Identification des polluants issus des sites industriels**

Aux compteurs de dépotage depuis la mise en fonctionnement de la centrale de Yassa nous avons pu relever en HFO en volume dépoté VHFO = 7573166.31litres. Ainsi, l'analyse élémentaire quantitative du combustible fournit une formule globale  $(CH_yO_zS_t)_n$  où le coefficient n, lié à la masse molaire moléculaire moyenne n'a pas d'influence sur le dosage air carburant. L'équation stœchiométrique de la combustion d'un composé chimique en oxydation dans l'air atmosphérique nous donnera pour des proportions des composés dans l'air de  $(O_2 + 3.78N_2)$ .

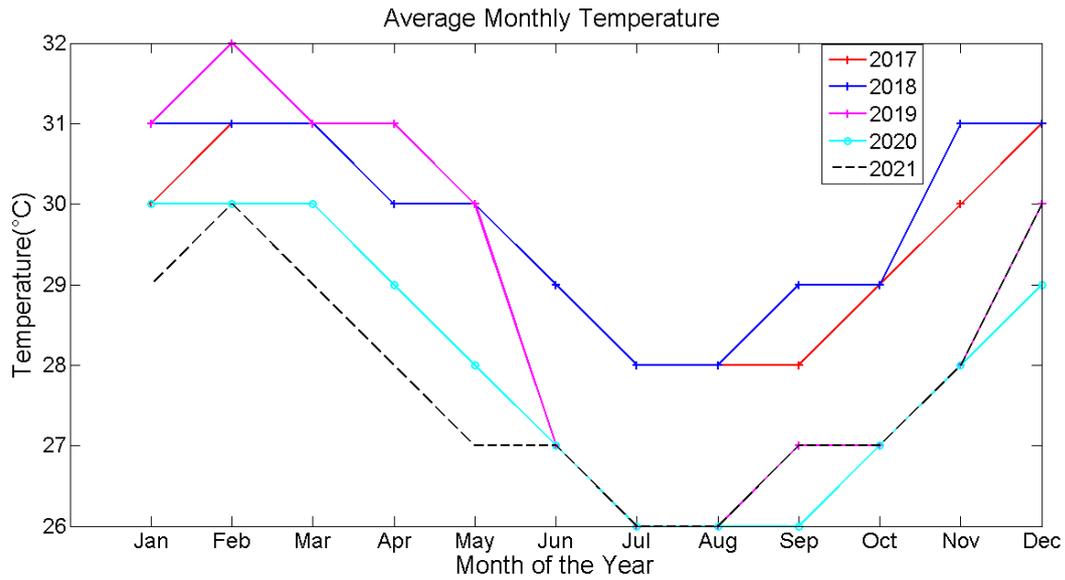


Nous remarquons ici que le combustible utilisé à une proportion très base en oxygène presque' inexistante mais une proportion existante en soufre. Ceci nous amène de par sa formule brute à une équation de combustion dans les rapports stœchiométriques suivants :



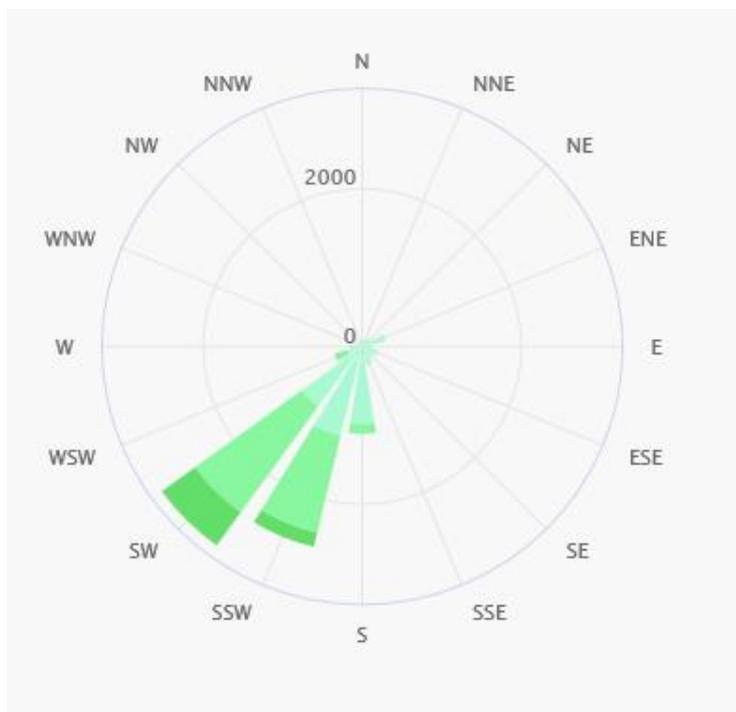
### **II.4.1.4 Météorologies de la ville de Douala**

Les données météorologies sur 5ans proviennent du site meteoblue, historique météo et de la station de l'aéroport de Yaoundé, disponible à la direction nationale de météorologie. On présente la température (figure 48) du mois de janvier au mois de décembre de l'année 2017 à 2021. On observe sur cette figure que Juillet, Août, Septembre 2020 et Juillet, Août 2021 sont les mois où la température est la plus basse avec T=26°C et Février 2019 est le mois où la température est la plus élevée avec T=32°C. Cette température élevée est due à un rayonnement solaire intense au cours de ce mois.



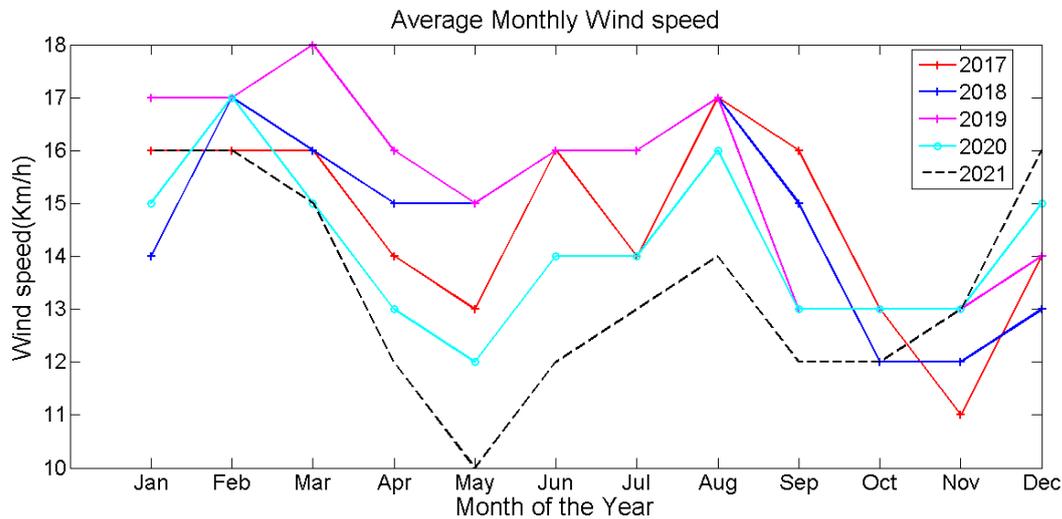
**Figure 48:** Température du mois entre Janvier 2017 et Décembre 2021

La rose des vents est importante pour la prédiction de la direction des polluants dans l’atmosphère. La figure 49 présente la rose des vents générales dans la ville de Douala collectées sur le site meteoblue sur la période de Janvier 2017 à Décembre 2021, où la direction des vents dominants se situe au Sud-Ouest.



**Figure 49:** Rose des vents à Douala

La courbe (figure 50) présente l'évolution de la vitesse du vent entre Janvier 2017 et Décembre 2021. On observe que Mars 2019 sont les mois où la vitesse du vent est la plus élevée avec  $v=18\text{km/h}$ , Mai 2021 sont les mois où la plus basse avec  $v=10\text{km/h}$ . Cette valeur élevée de la vitesse du vent en Mars est due à une instabilité atmosphérique au cours de ce mois.



**Figure 50:** Vitesse du vent entre Janvier 2017 et Décembre 2021

#### II.4.2 Historique et présentation de la centrale thermique de Mbalmayo

Le programme thermique d'urgence (PTU) initié en 2009 et opérationnel depuis janvier dernier, offre actuellement 100 mégawatts (MW) d'énergie supplémentaire au Réseau interconnecté Sud (RIS). Cette énergie est produite par quatre centrales installées parmi lesquelles la centrale thermique de Mbalmayo. La ville de Mbalmayo située à 45km au Sud de Yaoundé la capitale du Cameroun entre le  $3^{\circ}28'06''$  Nord  $11^{\circ}30'51''$  Est (figure 51). La ville se trouve sur des roches mères d'origine schisteuse, ce sont des sols ferrallitiques très fertiles, très perméable et favorable à l'infiltration des eaux dans le sol aidant ainsi à la recharge de la nappe, c'est également des roches acides et leur forte acidité est due au lessivage des bases par les eaux de pluie [78]. Les sols des bas-fonds très sableux, sont plus souvent hydromorphes, la nappe phréatique étant proche de la surface 5 m environ.

Mbalmayo possède une centrale thermique qui utilise deux groupes électrogènes WARTSILA et a une capacité de production de 10MW. Cette centrale d'une hauteur de 32m est

cependant responsable de la pollution atmosphérique, et souterraine par déversement accidentelle des combustibles tels que le fiouls léger. Ces polluants s’infiltrent dans le sol par déversement, fuite de canalisation et par rejet à l’échelle locale et leurs devenir dépendent des paramètres climatiques (précipitations et la teneur en eau) et des paramètres hydrodynamiques (la porosité efficace et la perméabilité). Le schéma général est le même : le point de départ est la surface du sol puis le transit vertical dans la zone dite non saturée (ZNS) surplombant la nappe, l’arrivée à la nappe puis le cheminement subhorizontal du polluant dans celle-ci avec étalement progressive du panache de polluant beaucoup orienté suivant la direction de l’écoulements. Et peuvent donc être dangereux pour la santé des récepteurs sensibles proches de la source, pouvant provoquer des différentes maladies liées à la contamination de l’eau comme le choléra, la diarrhée, la typhoïde...etc.

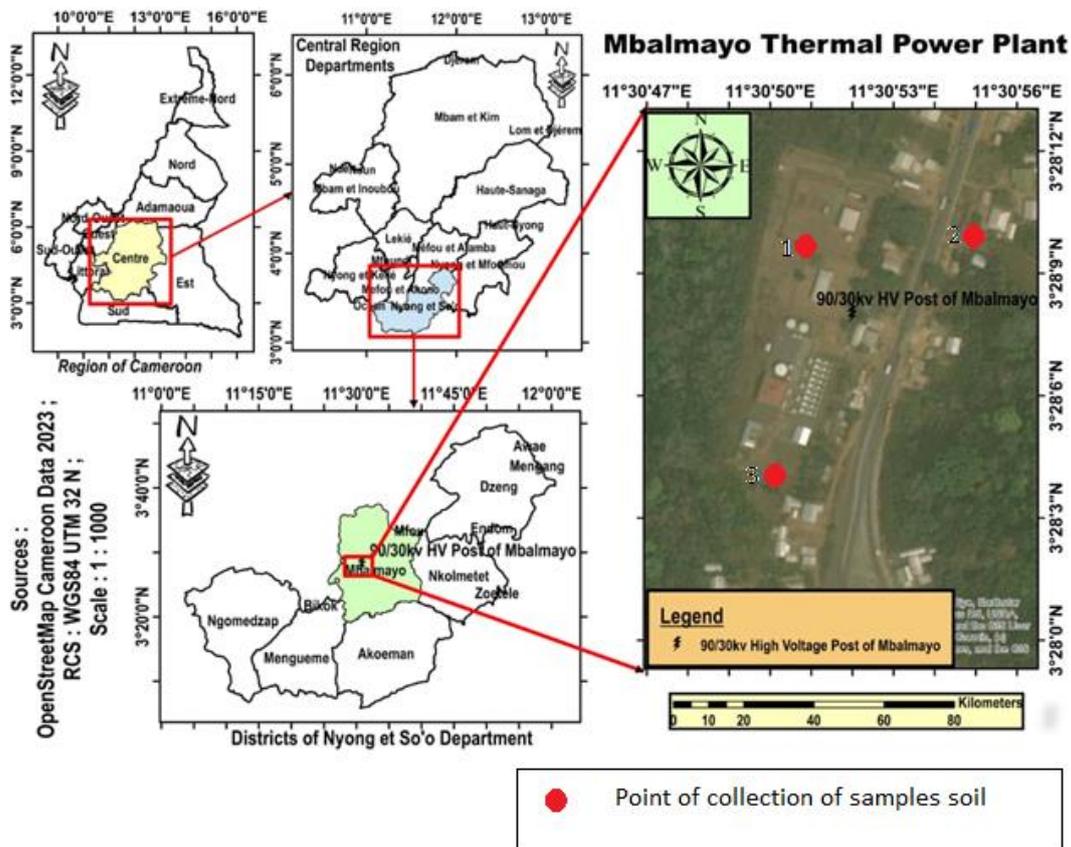


Figure 51: Centrale thermique de Mbalmayo

### *II.4.2.1 Structure de la centrale thermique*

#### **- Salle de contrôle**

La coordination des installations de la centrale thermique de Mbalmayo est faite depuis un poste de contrôle, qui est la partie de la centrale où toutes les machines sont commandées (figure 52). L'énergie produite par la centrale est injectée dans le Réseau Interconnecté Sud (RIS) afin de palier au problème d'approvisionnement pendant les périodes de forte demande et d'étiage.



**Figure 52:** Salle de contrôle

#### **- groupes électrogènes**

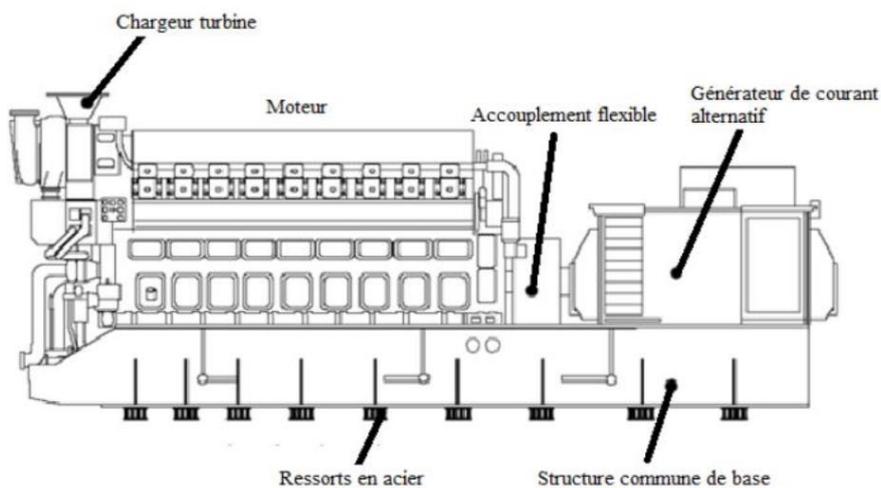
Le groupe électrogène est constituée de neuf(09) générateurs de type Caterpillar dont sept(07) sont opérationnels, de (07) moteurs diesel WÄRTSILÄ Vasa rigidement structurés et montés sur une base commune, la structure de la base commune est installée en acier à ressort boulonné à la fondation, réalisant ainsi une bonne réduction des vibrations. L'accouplement flexible fait en sorte que le générateur et le moteur ne sont pas affectés mutuellement en raison de petits écarts dans l'alignement, par la température ou libre et des forces dynamiques. À côté on a quatre (04) transformateurs. Tous les systèmes externes des tubes sont connectés au moteur

par l'intermédiaire d'un raccord flexible, chaque moteur est équipé de deux cheminées d'environ 1m de hauteur chacune (figure 53)



**Figure 53:** Groupes électrogènes

Régime du Générateur: Le moteur WARTSILA Vasa est un moteur à quatre temps constitué : D'une injection directe chargeur turbo et intercooler, configuration V, le nombre de cylindres 18, diamètre des cylindres 320mm, race 350mm (figure 54). Cylindrée par cylindre 28,15l, nombre de soupapes: 2 soupapes d'admission par cylindre, 2 vannes de sortie, sens de rotation à la recherche en commande dans les deux sens des aiguilles d'alimentation de la vitesse du moteur.



**Figure 54:** Générateur WARTSILA VASA

- **Tanks**

Les tanks sont des réservoirs de stockages, et la centrale dispose de trois grands tanks dont deux servent comme réserve de fioul léger ( $180\text{m}^3$  de capacité chacun) et l'autre comme réserve d'eau ( $300\text{m}^3$  de capacité) (figure 55a et 55b).



(a)



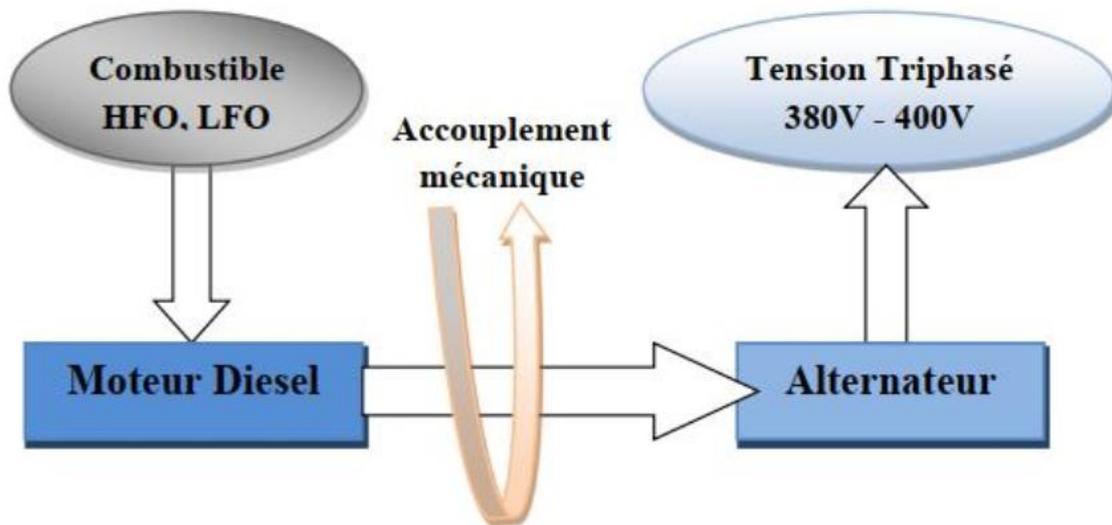
(b)

**Figure 55:** (a) Tank fioul et (b) Tank à eau

#### ***II.4.2.2 Principe de fonctionnement du groupe de la centrale thermique de Mbalmayo***

Le groupe électrogène peut être à démarrage automatique ou à démarrage manuel, son couplage sur l'installation est réalisé par des contacteurs inverseurs. La production d'électricité par un groupe électrogène doit être autonome et ne nécessiter qu'un approvisionnement en combustible. L'électricité est toujours produite par un alternateur. Pour produire le courant, cette génératrice doit recevoir un mouvement rotatif de son arbre d'entraînement, ce mouvement est produit par un moteur thermique diesel équipé d'une régulation mécanique modulant sa vitesse de rotation en fonction de la charge. L'accouplement entre le moteur et l'alternateur est direct sur l'axe moteur par opposition à l'alternateur d'un automobile qui est entraîné par une courroie. Le principe de production du courant par l'alternateur du groupe électrogène entraîné par le moteur du groupe électrogène nécessite que la régulation électronique, le redressement et l'écrêttement du

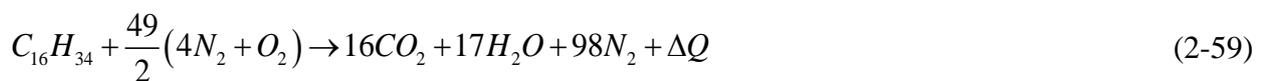
courant électrique soient inclus dans le schéma électrique des composants du groupe électrogène. C'est ainsi que nous vous proposons le schéma synoptique (figure 56).



**Figure 56:** Schéma synoptique du processus de production du groupe électrogène

#### II.4.2.3 Consommation du fioul et Identification des polluants issus des sites industriels

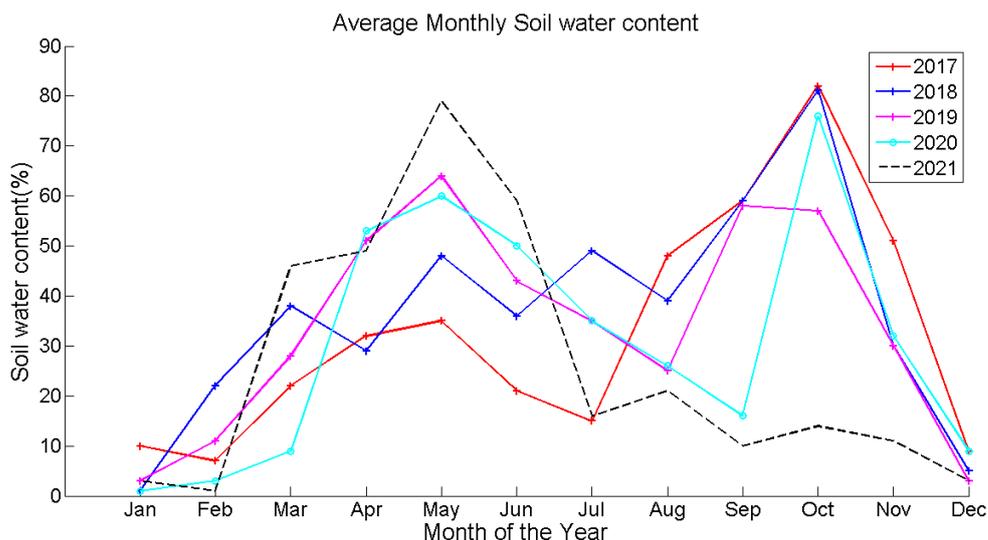
La centrale thermique de Mbalmayo produit de l'énergie thermique qui provient de la combustion de gasoil  $C_{16}H_{34}$  appelé hexane décane qui est un fioul léger, et sa combustion dégage des polluants tel que  $CO_2$  et des particules comme on peut l'observer à partir de l'équation (2-59).



Dans cette centrale thermique, l'origine de la pollution des sols provient du déversement de hexane décane lors du remplissage des tanks à fioul, ou par corrosion des cuves enterrées ou même des fuites de canalisation. Au niveau de la centrale thermique de Mbalmayo, d'importante quantité d'hexane décane sont déversés sur le sol chaque année comme l'indique (Annexe 1-10).

**II.4.2.4 Climat de la ville de Mbalmayo**

Le climat est de type équatorial guinéen à quatre saisons qui s’alternent dans l’année: une grande saison sèche qui s’étend de mi-novembre à mi-mars, une petite saison des pluies qui s’étend de mi-mars à la fin du mois de juin, une petite saison sèche qui s’étend de la fin du mois de juin à mi-août et une grande saison des pluies qui s’étend de mi-août à mi-novembre [79]. La température moyenne annuelle se situe autour de 25,7 °C et la pluviométrie moyenne est de 1800 mm avec un pic au mois d’octobre. Cette répartition du climat résulte globalement de la circulation des masses d’air atmosphériques qui s’effectue de l’équateur vers les pôles et vice-versa, sous l’impulsion des vents appelés alizés. Les vents très fréquents sont humides et soufflent en direction du Sud-Ouest tandis que les vents violents sont orientés vers le nord-ouest. La température de la ville Mbalmayo varie généralement de 20°C à 31°C et est rarement inférieure à 17°C ou supérieur à 33°C [80]. En saison humide la température varie entre 18°C à 28°C et de 16°C à 31°C en saison sèche. La (figure 57) nous présente l’également l’évolution de la teneur en eau entre le mois Janvier 2017 et Décembre 2021. On observe que Janvier 2020 et Janvier 2018 sont les mois où la teneur en eau est la plus faible avec  $W_e=1\%$  et Octobre 2017 est le mois où la teneur en eau est la plus élevée avec  $W_e=82\%$ , car les précipitations sont plus élevées en Octobre.



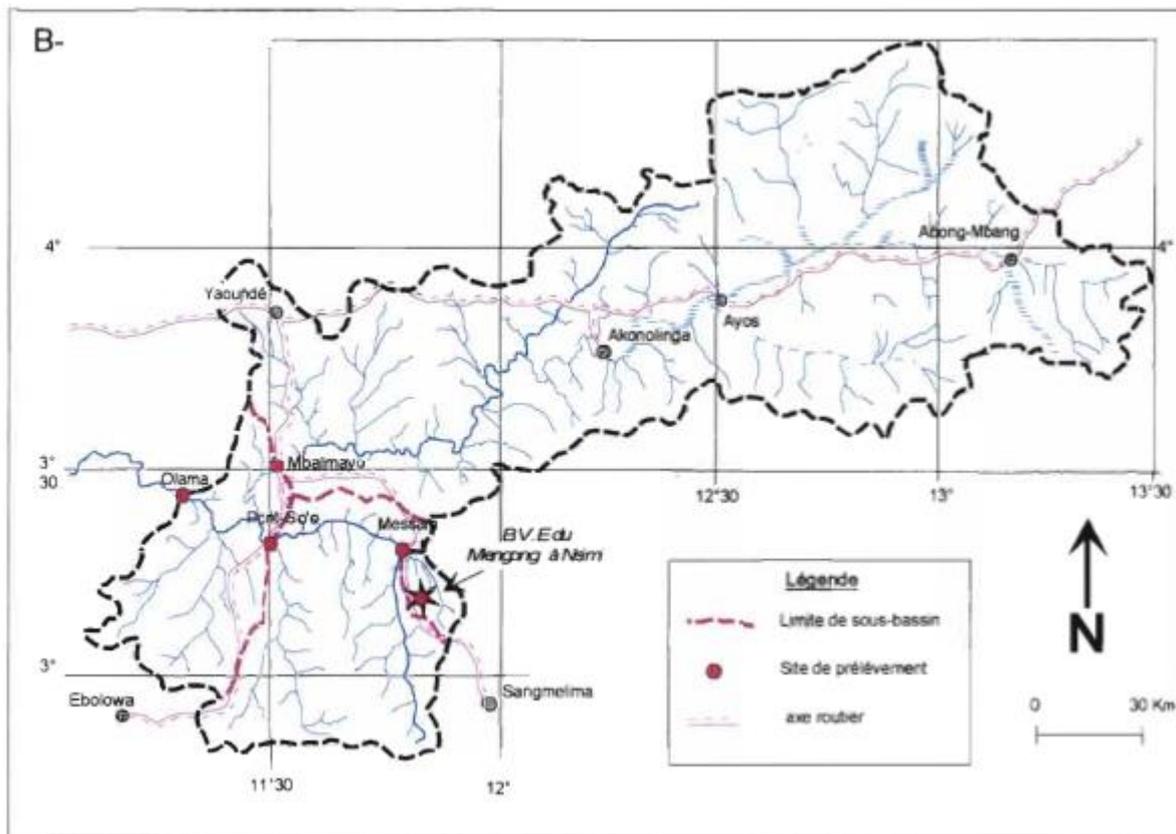
**Figure 57:** Teneur en eau du sol chaque mois entre Janvier 2017 et Décembre 2021

#### *II.4.2.4 Hydrologie de la ville de Mbalmayo*

La commune de Mbalmayo est drainée par de nombreux cours d'eau d'importance variable. Le plus important de par la longueur et le débit est le fleuve Nyong, les autres cours d'eau permanent sont les rivières : konglo, mvolyé, assana, ntoutoumou, mefou, mbare edou, ossobelo, minsolo, mendibvini, beyem, mbeme, akoumbegue, manembeme, akok, manefala, mbamboa, boa, ebolo...etc. Ces cours d'eau sont pour la plupart utilisés pour les besoins domestiques des populations et la pêche.

La rivière Mefou s'écoule dans une direction générale Sud-Ouest jusqu'au fleuve Nyong, quelques kilomètres en amont du pont Est de la ville de Mbalmayo, où l'altitude de la rivière est de 639 m. C'est en amont de ce dernier point de rejet que se trouve la zone de captage actuelle des eaux brutes (Akomnyada II) destinées à la production d'eau potable pour les habitants de la ville Mbalmayo et de ses environs. Le bassin versant de Mefou couvre une surface de 809 km<sup>2</sup>. La station de jaugeage de Nsimalen réduit le bassin à 425 km<sup>2</sup>.

Le réseau hydrographique de la ville est très dense avec les rivières Mfoudi, Mfoulou, Anga'a ainsi que la rivière Mefou qui s'y écoulent. La rivière Mfoundi et ses affluents assurent le drainage naturel des eaux de ruissellement et des eaux superficielles qui sont rejetées dans le Nord-Est de Yaoundé ainsi que dans une grande partie de la zone étudiée. Ceux-ci assurent le drainage naturel des eaux de ruissellement et des eaux superficielles qui sont rejetées. À côté de ces cours d'eau, la ville compte quelques lacs et étangs naturels ou artificiels dont les eaux sont rendues dangereuses pour la santé publique; à cause du déversement des eaux des stations d'épuration non fonctionnelles (cas du lac municipal), des ordures ménagères et des eaux des latrines situées dans les zones marécageuses. Sur le plan morphologique, la ville compte quatre types de terrains qui sont: les crêtes de faible pente dont les terrains sont facilement urbanisables, les collines aménageables, les collines très difficiles à aménager, les fonds de vallée inondables. La (figure 58) montre les précipitations mensuelles et le débit du fleuve Nyong qui en résulte pour l'année hydrologique 1998. Le débit mesuré à Nsimalen varie d'environ 2-3 m<sup>3</sup>/s pendant la saison sèche à 10-15 m<sup>3</sup>/s pendant la saison des pluies [81].



**Figure 58:** Situation de la commune de Mbalmayo drainée par le bassin hydrologique du fleuve Nyong [82]

Le relief de la commune de Mbalmayo est constitué dans l'ensemble de petits plateaux d'altitudes moyennes n'excédant pas les 700m, avec des collines à pentes douces. Il est légèrement incliné vers la partie sud et chaque plateau est entouré de fonds de vallées, drainés par des cours d'eaux d'importances variables, prenant pour la plupart leur source dans le Nyong.

#### II.4.2.5 Pédologie de la ville de Mbalmayo

Les sols de la localité sont à prédominance ferralitiques (faiblement dessaturé, rajeunis appauvris et hydromorphes). Les sols ferralitiques sont constitués sur roches acides moyennement ou fortement dénaturés. Les sols ferralitiques ont de bonnes propriétés physiques. Ce sont des sols profonds qui ont une bonne perméabilité (figure 59), une micro structure stable qui les rend moins susceptibles à l'érosion par rapport aux autres types de sols ; ils sont bien drainés, mais peuvent devenir secs (sècheresse édaphique) à cause de leur faible capacité de rétention d'eau par la fraction minérale du sol [79, 83].

### **Morphologie**

0 à 15cm Brun-gris (10YR 5/2), texture sablo-argileuse fine, structure polyédrique fine bien développée, cohésion faible, sec à frais, non plastique, non collant, porosité forte par tubes et agrégats, niveau important de radicelles, passage distinct et régulier.

15 à 25cm Brun-jaune (10YR 5/4), texture sablo-argileuse avec quelques petits gravillons noirs, structure massive type ciment, cohésion faible, sec à frais, forte porosité tubulaire, passage graduel et régulier.

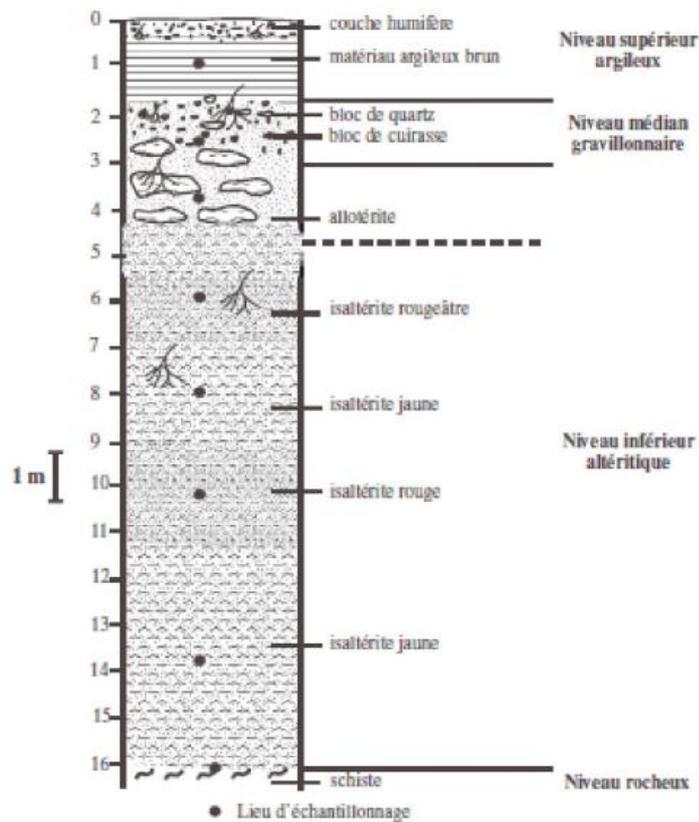
25 à 90cm: Brun-vifs (73YR 5/6), quelques taches noires bien délimitées, texture argilo-sableuse avec quelques gravillons noirs, structure polyédrique moyenne, moyennement développée, peu fragile ferme, sec à frais, bonne porosité tubulaire, pénétration importante des racines, passage brutal et régulier.

90 à 150cm: Rouge-jaune (5YR 5/6), nombreux éléments grossiers : concrétions sub-anguleuses et quartz anguleux ou émoussés de 2 à 5 cm, matrice argileuse à structure sub-anguleuse moyennement développé, ferme, porosité tubulaire, très peu de racines, passage graduel.

150 à 300cm: Rouge-jaune (5YR 5/6) et brun-jaune (10YR 5/8) avec taches noires ou rouges formant un réseau de mailles irrégulières. Feldspaths altérés reconnaissables, texture argileuse avec de nombreux petits quartz plus ou moins altérés, petits gravillons très peu nombreux, structure polyédrique moyenne, moyennement développée, cohésion forte, porosité faible, pénétration racinaire quasi nulle, passage graduel.

300 à 540cm Horizon d'altération, texture de la roche bien Visible, matériau très micacé sablo-limoneux présentant des ségrégations nettes jaunes, rouges et grises.

540 cm : Altérites-argileux et granito-gneissique constituent le réservoir d'eau de l'aquifère.



**Figure 59:** Organisation du sol sur la commune Mbalmayo [84].

### Propriété chimique et Fertilité du sol

Les propriétés chimiques par contre sont moins favorables à cause de leurs faibles capacités de rétention des cations par la fraction minérale du sol. Sous culture intensive, une part appréciable de ces ions sont retirés du système par des exportations (plantes, érosion). Si ces exportations se sont compensées par des apports extrêmes d'engrais où par une longue période de jachère; ces sols se dégradent rapidement. Pendant que toutes les cultures vivrières peuvent y être pratiquées avec de bons rendements lorsque le taux de matières organiques du sol est satisfaisant; du point de vue de l'aménagement il présente de bonnes caractéristiques mécaniques pour la construction des routes et des bâtiments. Les sols hydromorphes se rencontrent dans des zones marécageuses et aux abords de cours d'eau. Ils sont exploités pour les cultures maraîchères de contre saison.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, il a été question de présenter le matériel utilisé pour la collecte des données et la méthode expérimentale permettant le traitement des données. A l'issue de cette méthode expérimentale, on a implémentée les données traitée sur le modèle couplé algorithme génétique- réseaux de neurones qui tient compte du vent (direction et vitesse), du débit massique, de la porosité efficace, de la perméabilité du sol et de la teneur en eau du sol. La modélisation s'est faite à partir d'un ensemble d'équations mathématiques d'advection-diffusion. Dans le prochain chapitre on présentera les résultats obtenus.

## **CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Introduction

Ce chapitre présente les différents résultats physiques obtenus notamment :

- L'évaluation des performances du modèle GA-ANN
- L'évolution de la dispersion de la concentration en milieu atmosphérique
- L'évolution de la dispersion de la concentration en milieu souterrain

### III.1 PERFORMANCE DU COUPLAGE GA-ANN

L'évaluation de la performance d'un modèle de prédiction se fait grâce à certains indicateurs de performances notamment l'erreur quadratique moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation au carré ( $R^2$ ). Un modèle est excellent lorsque l'erreur quadratique tend vers zéro et le coefficient de corrélation au carré tend vers un. (Yanlai et al. 2018) ont utilisé notamment l'erreur quadratique moyenne (MSE) pour évaluer le modèle Deep Multi-output Long Short-Term Memory et (Anastasia et al. 2011) ont utilisé le coefficient de corrélation au carré ( $R^2$ ) pour évaluer les réseaux de neurones artificiels utilisant un perceptron multicouche, ce qui a révélé que ce modèle avait une bonne performance en prédiction.

Dans le cadre de cette étude, l'évaluation des performances des réseaux de neurones artificiels (ANN) sur les données de test s'effectue sur la base des indicateurs performances tels que le coefficient de corrélation au carré ( $R^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne (MSE). Sur la (Figure 60), on observe une grande majorité des concentrations proches de la droite d'ajustement à  $Y=X$ , avec  $R^2$  qui est d'environ 0,88 pour le cas test et d'environ 0,99 pour le cas appris. La (Figure 61) présente la courbe d'évolution de l'erreur quadratique moyenne (MSE) fonction du nombre d'itérations ; on observe que cette MSE diminue avec le nombre d'itération, et que sa meilleure valeur est d'environ 0.00447. Ces indicateurs illustrent tous l'excellente performance de l'ANN sur les données de test, comme l'ont également montré (Rongxiao et al., 2018b) dans leurs travaux. Par conséquent, l'ANN a une bonne précision pour estimer la concentration des polluants.

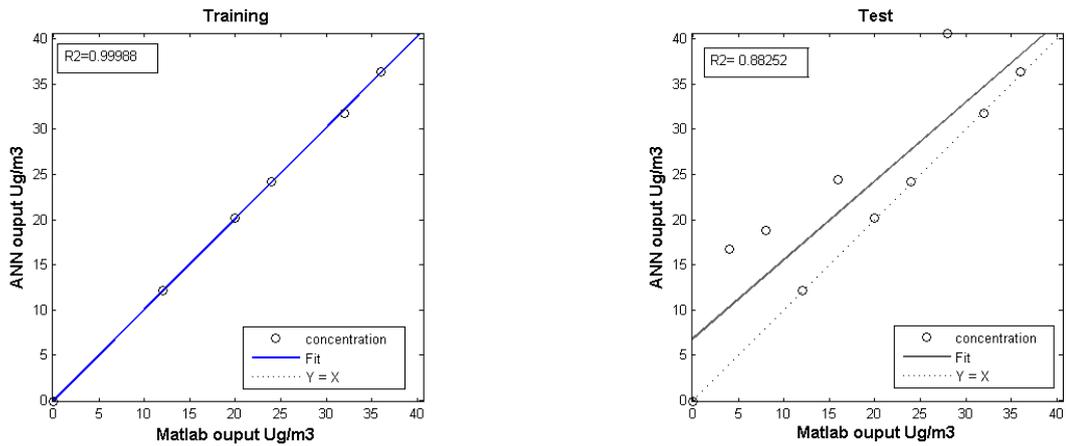


Figure 60: Les résultats de la prédiction de l'ANN sur l'apprentissage et test

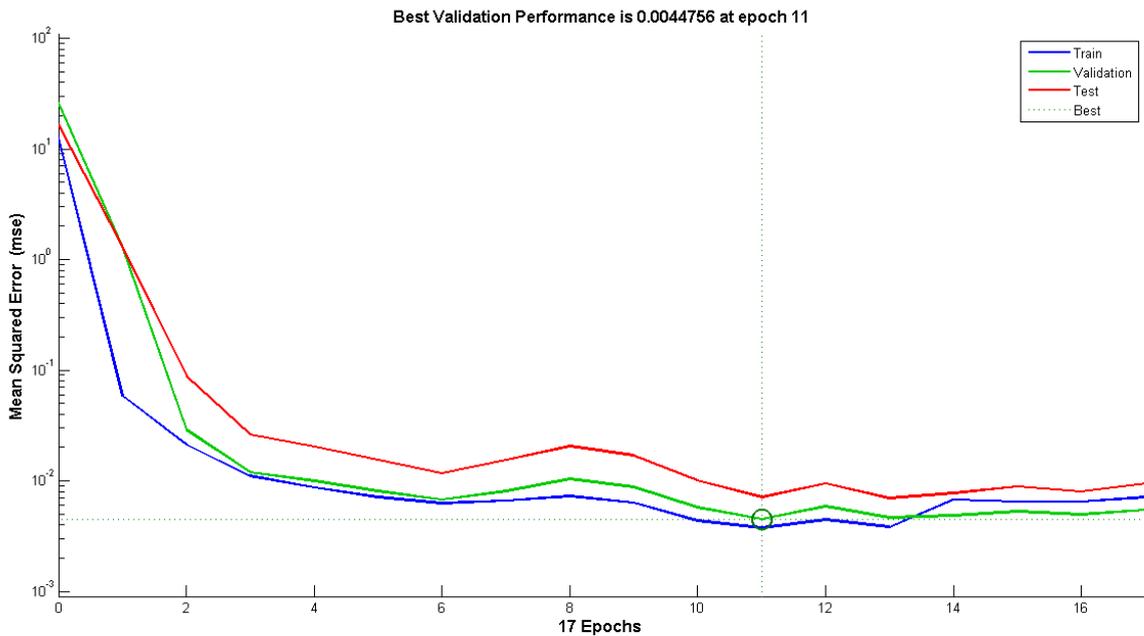
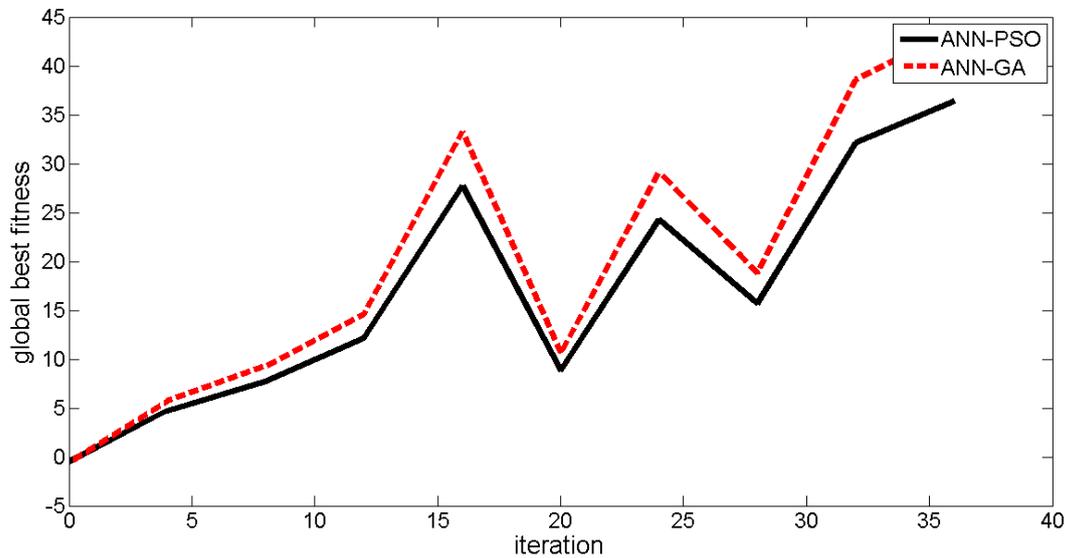


Figure 61: L'erreur quadratique moyenne (MSE) du réseau de neurone artificiel (ANN)

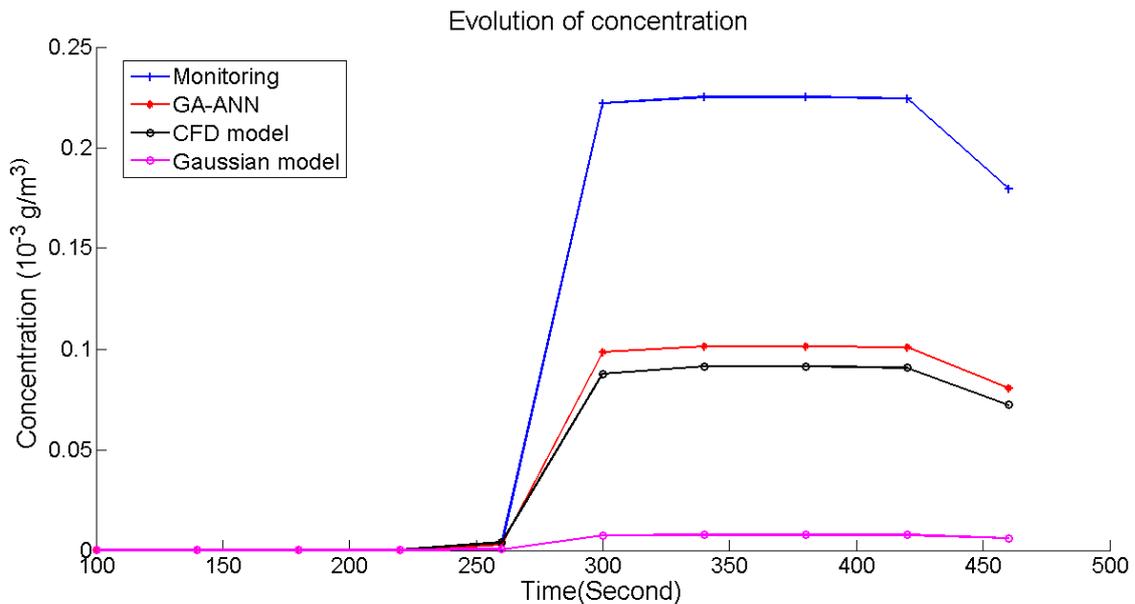
On évalue un modèle d'optimisation en le comparant avec d'autres modèles d'optimisations utilisés antérieurement. La courbe de la fonction objective (figure 62) évalue les performances de deux algorithmes que sont l'optimisation par essaim de particules (PSO) et l'algorithme génétique (GA). On observe que la fonction objective de GA et de PSO croît de manière presque similaire, Cependant comparé à l'algorithme PSO, GA a des valeurs de la fonction objective plus élevées du début jusqu'à la fin du calcul, avec comme maximum de la fonction

objective environ 44. Ce qui traduit que GA permet de minimiser l'erreur afin d'obtenir une solution de plus en plus précise. (Rongxiao et al., 2018a) ont obtenu des résultats presque similaires en comparant la méthode d'optimisation par essaim de particules et l'hybridation optimisation par essaim de particules - recuit simulé.



**Figure 62:** La fonction fitness de chaque algorithme à chaque itération

La présente étude a évalué le modèle couplé GA-AN, le modèle dynamique des fluides numérique (CFD) et le modèle gaussien en leurs comparants avec les capteurs qui sont des outils surveillances opérationnels sur le terrain. Le résultat obtenus à la figure 63 montre que le modèle couplé GA-AN, CFD et gaussien sous-estiment les valeurs de la concentration au-delà d'environ 260 s. Cependant le modèle couplé GA-AN est plus précis dans l'estimation de la concentration au cours du temps que le modèle CFD et le modèle gaussien.



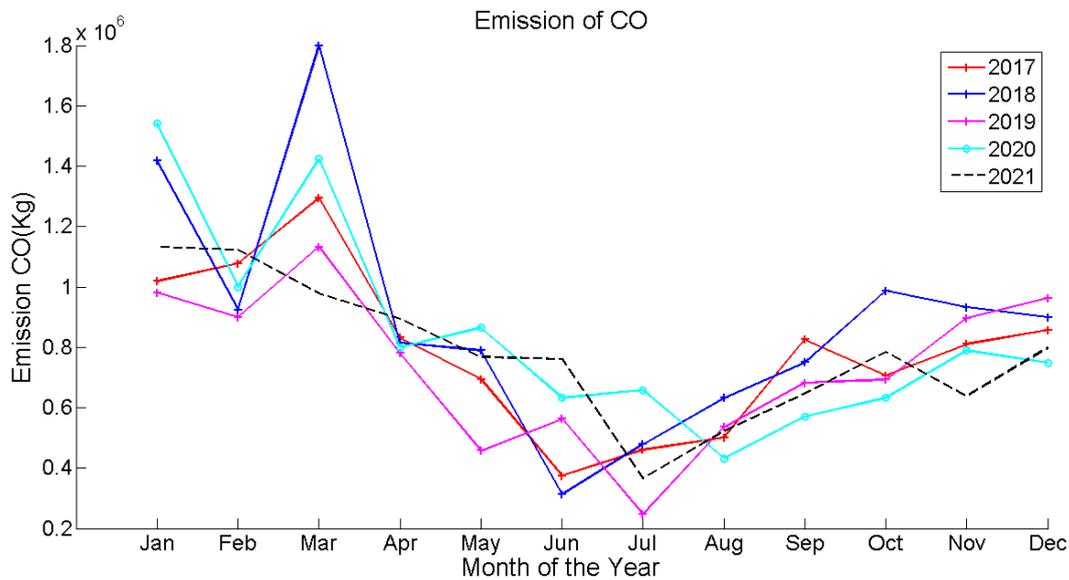
**Figure 63:** Comparaison GA-ANN au modèle CFD et gaussien

### III.2 EVALUATION DES EMISSIONS DES POLLUANTS DURANT 5ANS

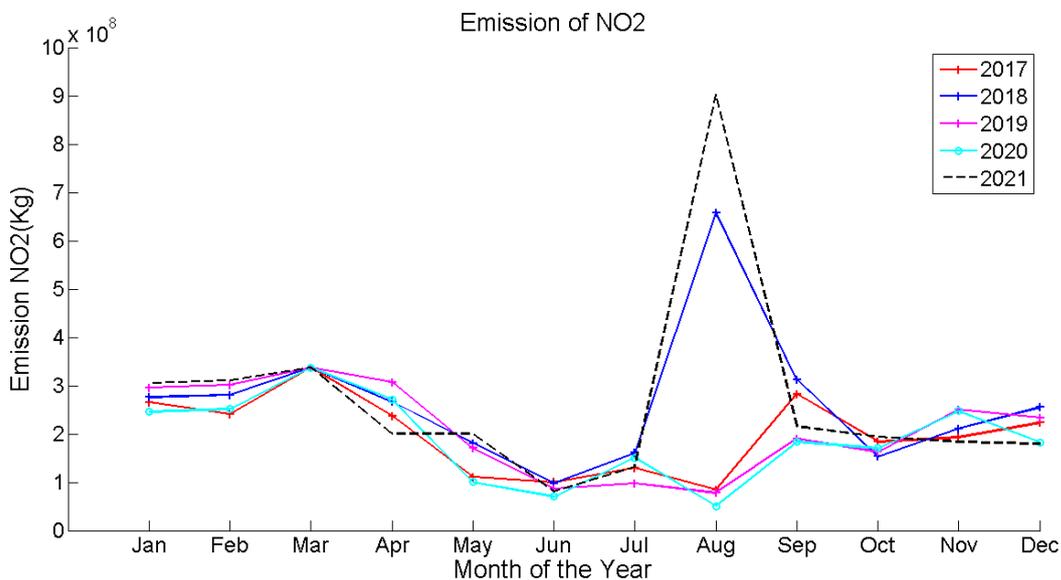
Le calcul des quantités d'émissions des polluants issus de la centrale thermique de Yassa s'est fait entre le mois de Janvier 2017 et Décembre 2021. Les valeurs obtenues de ces quantités d'émissions ont permis de tracer plusieurs courbes.

Les courbes (figures 64, 65, 66 et 67) présentent les émissions du CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> entre le mois de Janvier 2017 et Décembre 2021. On observe sur la figure 64 que l'émission du CO la plus élevée se situe au mois de Mars 2018 avec une valeur d'environ  $E = 1,8 \times 10^6$  kg. Ce pic d'émission est dû à l'absence de traitement des polluants dans la cheminée. Car le traitement des polluants dans la cheminée par décarbonation permettrait de réduire de façon significative les émissions de CO. Sur la figure 65, l'émission du NO<sub>2</sub> la plus élevée se situe au mois d'Août 2021 avec une valeur d'environ  $E = 9 \times 10^8$  kg. Ce pic d'émission est dû à un mauvais ajustement de la quantité d'air et du fioul au cours du mélange. Car un retard sur le mélange de l'air et du fioul baisserait la température de combustion et réduirait de façon significative les émissions de NO<sub>2</sub>. On observe sur la figure 66 que l'émission du SO<sub>2</sub> la plus élevée se situe au mois de Février 2019 avec une valeur d'environ  $E = 1,9 \times 10^8$  kg. Ce pic est dû au fait que le fioul n'a pas subi traitement complet par hydrodésulfuration. Car une hydrodésulfuration efficace du fioul permettrait d'éliminer une grande quantité de soufre et par conséquent réduirait les émissions de

SO<sub>2</sub>. Sur la figure 67, l'émission de PM<sub>10</sub> la plus élevée se situe au mois de Mars 2019 avec une valeur d'environ  $E = 4,4 \times 10^6$  kg. Ce pic est dû à l'absence au niveau de la cheminée d'un système de filtre empêchant le passage de PM<sub>10</sub>. Car la présence de ce système de filtre réduirait significativement les émissions de PM<sub>10</sub> dans l'atmosphère.



**Figure 64:** Evolution de l'émission CO entre Janvier 2017 et Décembre 2021



**Figure 65:** Evolution de l'émission NO<sub>2</sub> entre Janvier 2017 et Décembre 2021

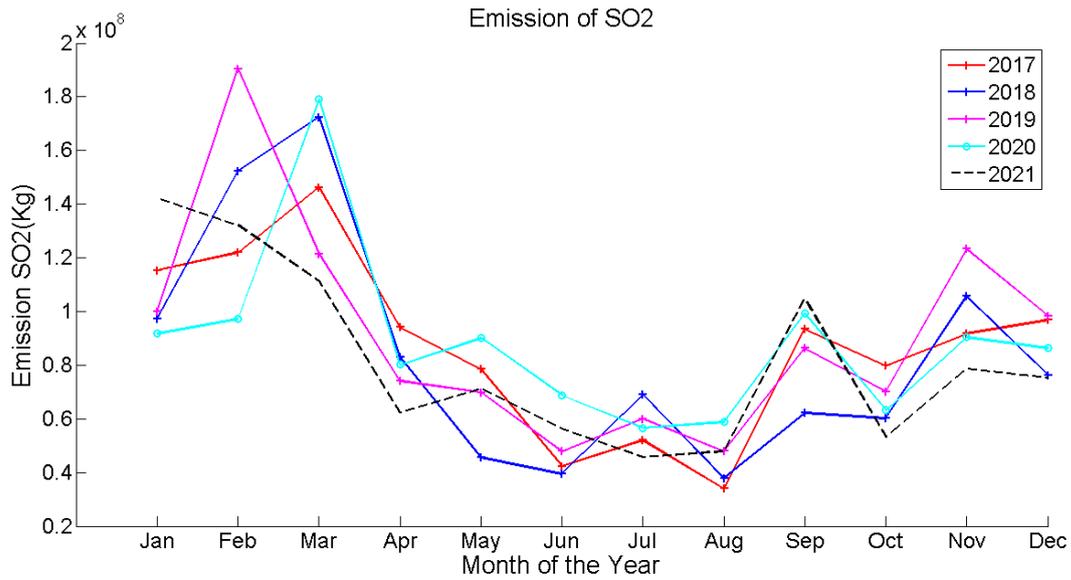


Figure 66: Evolution chaque mois de l'émission du SO2 entre Janvier 2017 et Décembre 2021

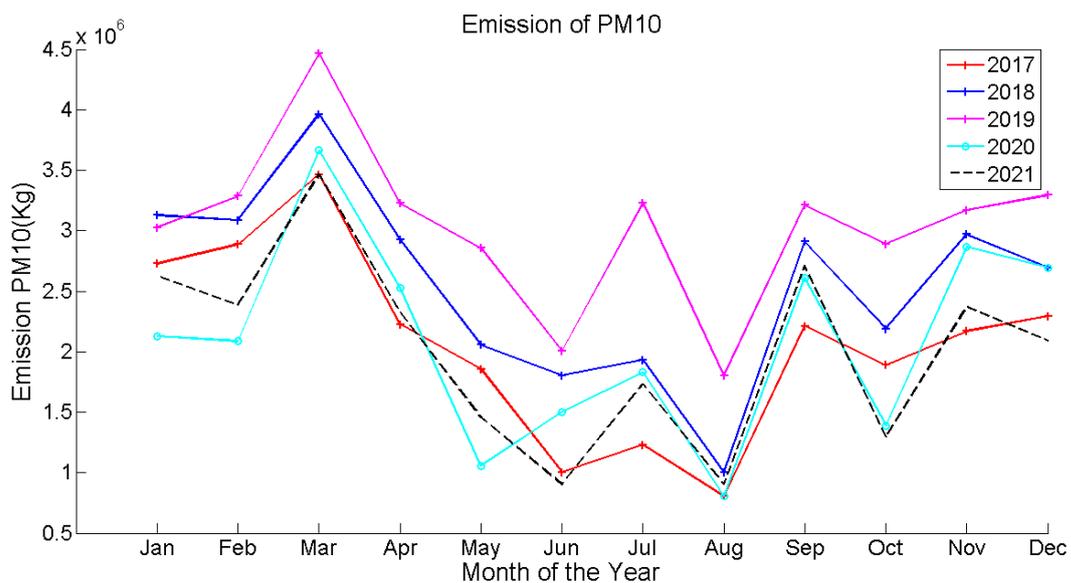
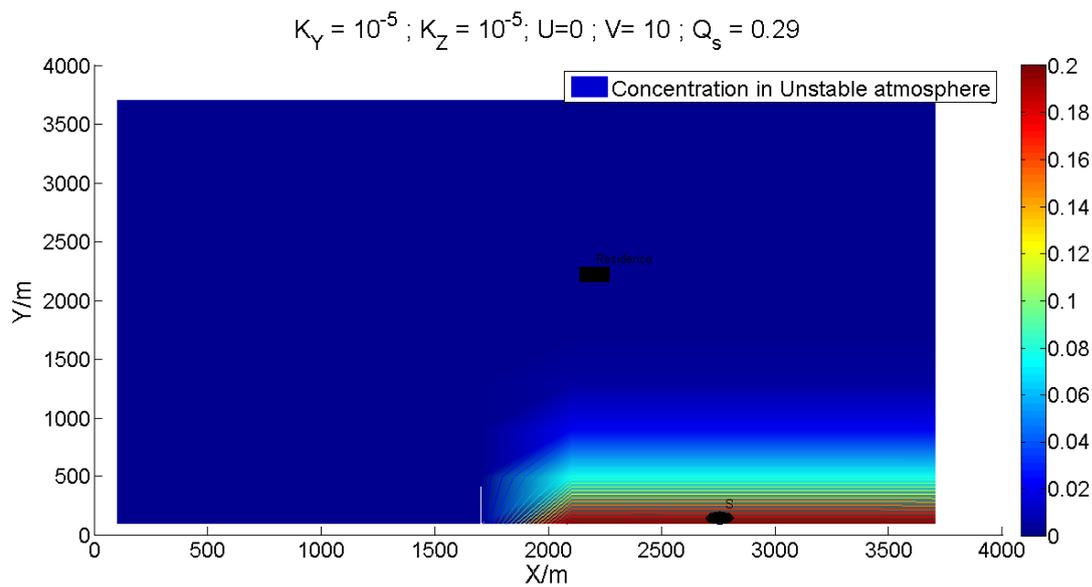


Figure 67: Evolution chaque mois de l'émission du PM10 entre Janvier 2017 et Décembre 2021

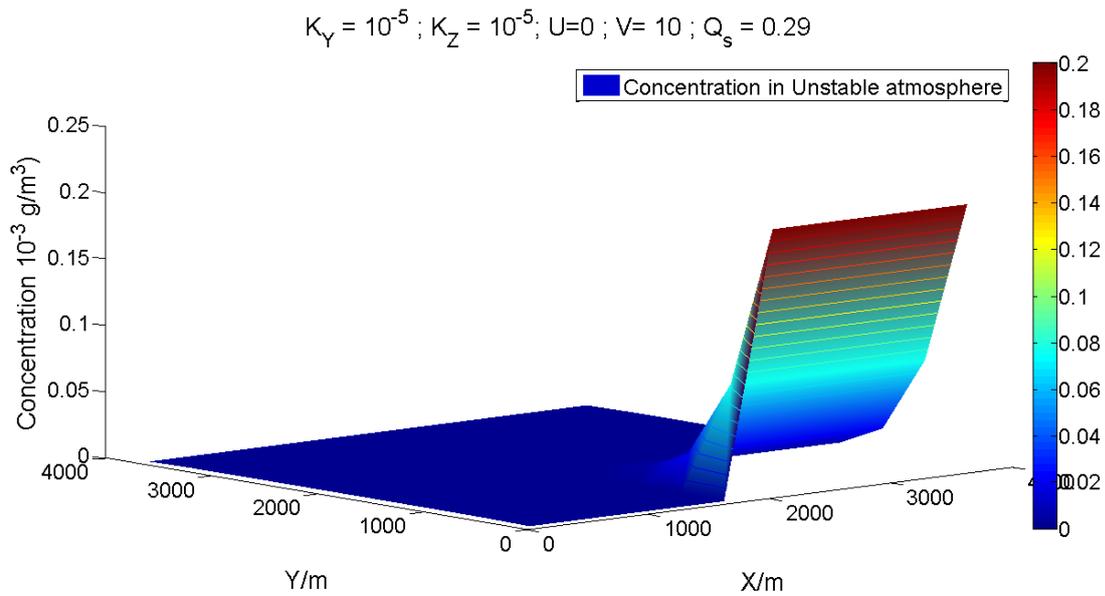
### III.3 PREDICTION DE L'EVOLUTION DES POLLUANTS DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN

En Mai 2021 l'atmosphère est stable, la majorité de ces polluants sont inertes et ne subissent pas de transformation chimique à l'échelle locale, donc le coefficient de réaction  $K_d=0$  ; les coefficients de diffusions  $K_Y=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K_Z=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ; la vitesse du vent  $U=0\text{km/h}$  et  $V=10\text{km/h}$

et le débit massique  $Q_s = 0.29 \text{ kg/s}$ , On observe une distribution en 2 et 3 dimensions de couleurs : du rouge, du jaune, du vert et du bleu (figures 68 et 69). D'abord entre 0 et 200m environ on a la couleur rouge, qui traduit la forte présence de la concentration du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) et les matières particulaires ( $\text{PM}_{10}$ ) à la sortie de la cheminé dont la valeur est d'environ  $0.2 \text{ mg.m}^{-3}$ . Puis entre 300 et 1000m environ on a la couleur jaune et vert qui traduit la faible présence du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) et des matières particulaires ( $\text{PM}_{10}$ ) avec une concentration dont la valeur varie entre 0.14 et  $0.04 \text{ mg.m}^{-3}$ . Enfin au-delà de 1000m environ on a la couleur bleu qui traduit l'absence de polluants, car ayant été compléments dilués dans l'air.

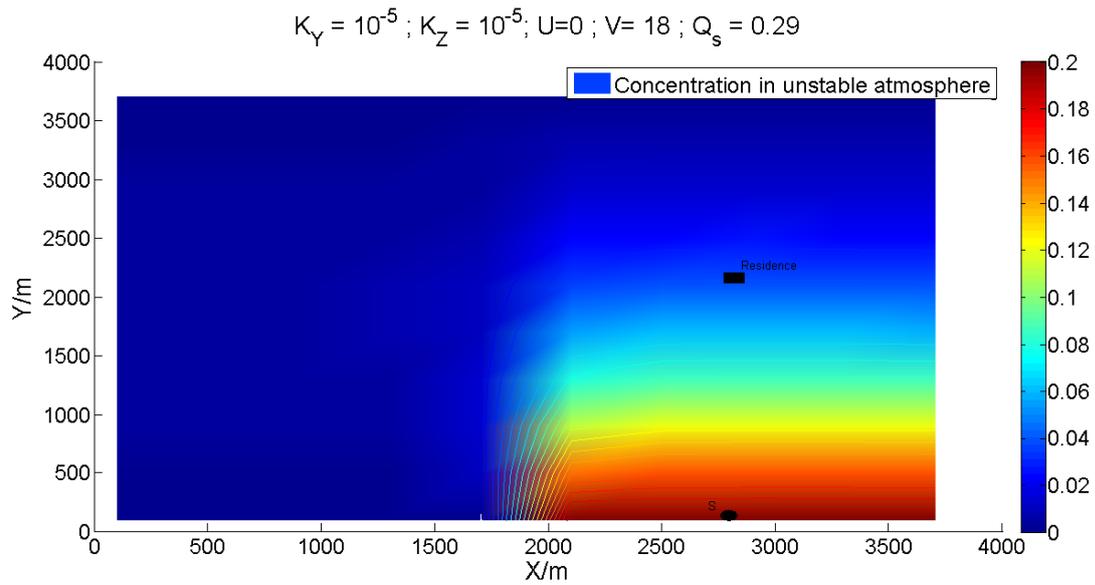


**Figure 68:** Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mai 2021 sur la base du modèle GA-ANN

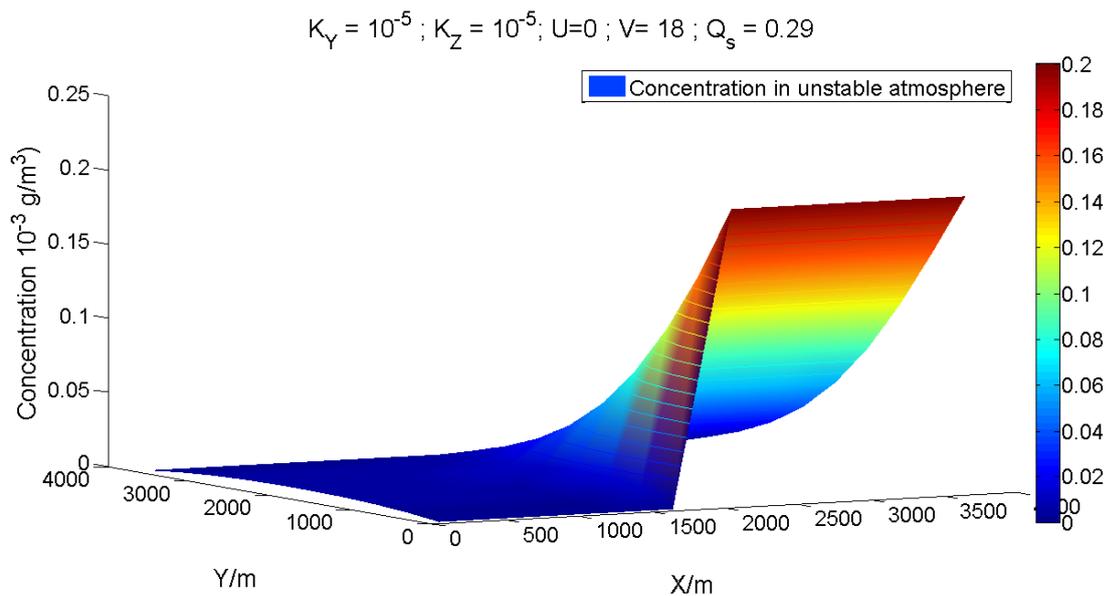


**Figure 69:** Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mai 2021 sur la base du modèle GA-ANN

En mars 2019 l'atmosphère est instable, la majorité de ces polluants sont inertes et ne subissent pas de transformation chimique à l'échelle locale, donc le coefficient de réaction  $K_d=0$  ; les coefficients de diffusions  $K_Y=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $K_Z=10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ; la vitesse du vent  $U=0 \text{ km/h}$  et  $V=18\text{km/h}$  et le débit massique  $Q_s= 0.29 \text{ kg/s}$ , on observe une distribution en 2 et 3 dimensions de couleurs : du rouge, du jaune, du vert et du bleu (figures 70 et 71). Entre 0 et 500m environ on a la couleur rouge traduit la forte présence de la concentration du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), du dioxyde d'azote( $\text{NO}_2$ ) et les matières particulaires ( $\text{PM}_{10}$ ) à la sortie de la cheminé dont la valeur est de  $0.2 \text{ mg.m}^{-3}$ . Puis entre 600 et 2200m environ on a la couleur jaune et vert qui traduit la faible présence du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), du dioxyde d'azote( $\text{NO}_2$ ), des matières particulaires ( $\text{PM}_{10}$ ) dont la concentration varie entre 0.14 et  $0.04 \text{ mg/m}^3$ . Enfin au-delà de 2200m environ on a la couleur bleu qui traduit l'absence de polluants, car ayant compléments été dilués dans l'air.



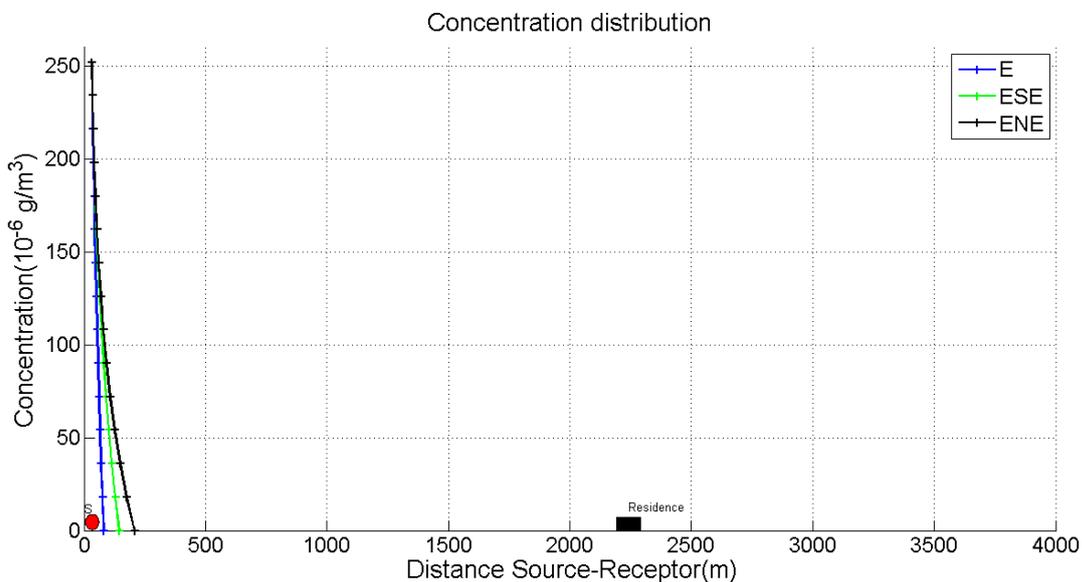
**Figure 70:** Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mars 2019 sur la base du modèle GA-ANN



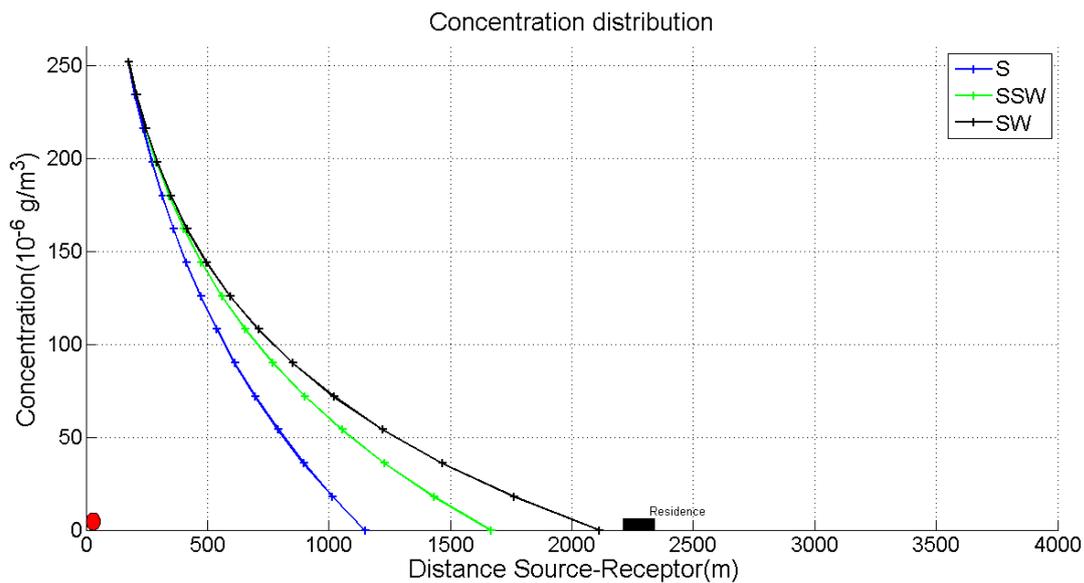
**Figure 71:** Evolution de la concentration des polluants à la centrale thermique Yassa-Dibamba en mars 2019 sur la base du modèle GA-ANN.

**III.4 PREDICTION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS EN FONCTION DE LA DIRECTION DU VENT EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN**

Les courbes (figures 72 et 73) présentent l'évolution de la concentration des polluants pour différentes directions du vent. On observe sur la figure 72 que dans la direction des vents Est la concentration maximale  $C=250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à la sortie de la cheminée de la centrale thermique de Yassa-Dibamba décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 50m; dans la direction des vents Est-Nord-Est la concentration maximale  $C=250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à la sortie de la cheminée de la centrale thermique de Yassa-Dibamba décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 100m. Sur la figure 73 on observe que dans la direction des vents Sud la concentration maximale qui est  $C=250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à la source décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 1200m; la direction des vents Sud-Ouest la concentration  $C=250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à la sortie de la cheminée de la centrale thermique de Yassa-Dibamba décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 2200m. Ce qui traduit l'influence de la direction du vent sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Car on constate que lorsque nous sommes dans la direction des vents faibles on a une faible dispersion des polluants dans l'atmosphère et lorsque nous sommes dans la direction des vents forts on a une forte dispersion des polluants dans l'atmosphère.



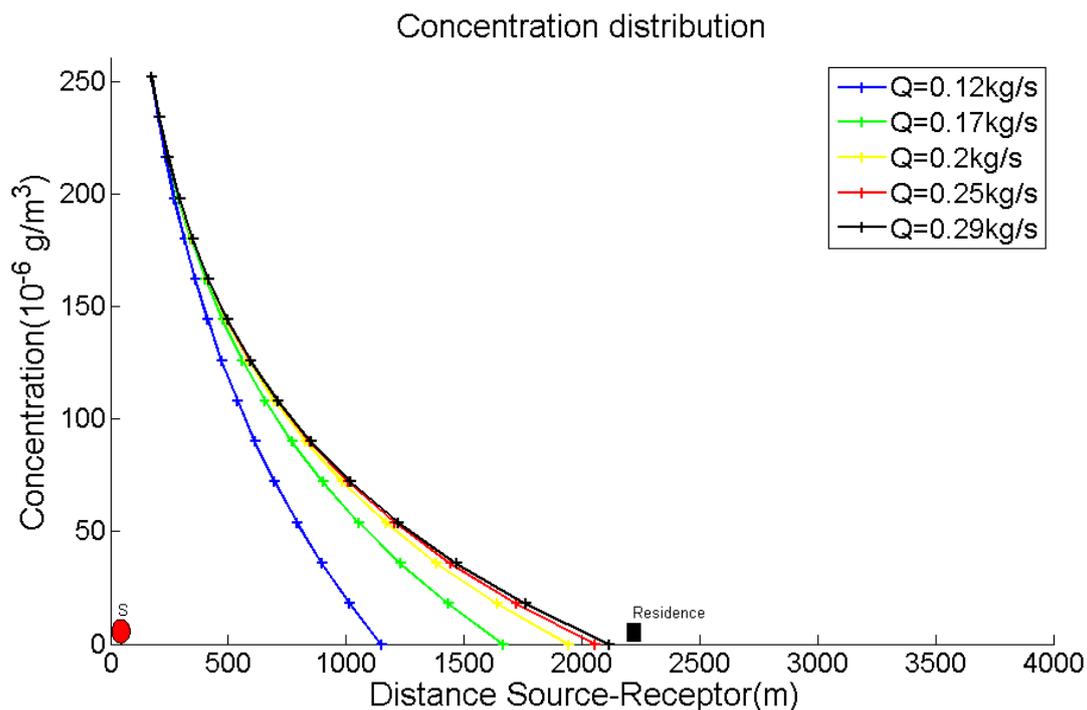
**Figure 72:** Dispersion des polluants selon la direction du vent



**Figure 73:** Dispersion des polluants selon la direction du vent

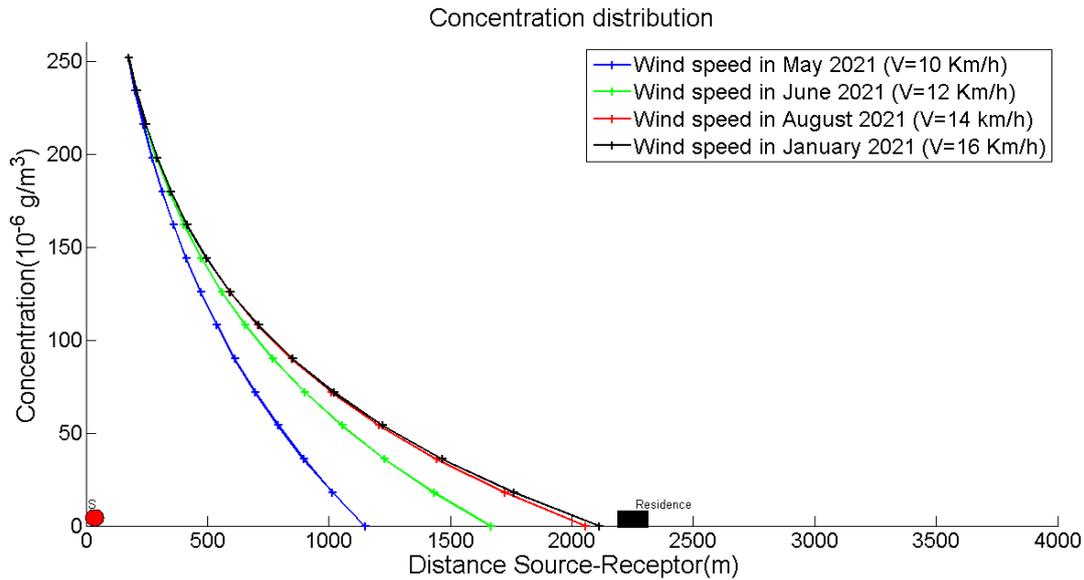
### III.5 PREDICTION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS EN FONCTION DU DEBIT DE LA SOURCE ET DES REGIMES DE VENT EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN

La courbe de la (figure 74) présente l'évolution de la concentration des polluants en fonction de la distance et du débit massique. On observe sur cette figure 74 que lorsque le débit  $Q=0.29\text{kg/s}$  la concentration maximale qui est  $C=250 \mu\text{g/m}^3$  à la sortie de la cheminée de la centrale thermique de Yassa-Dibamba décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 2200m ; lorsque ce débit  $Q=0.12\text{kg/s}$  la concentration maximale qui est  $C=250 \mu\text{g/m}^3$  à la sortie de la cheminée de la centrale thermique de Yassa-Dibamba décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 1200m. Ce qui traduit l'influence du débit massique sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Car plus le débit massique est élevé, plus on constate une forte dispersion des substances polluantes dans l'atmosphère et plus ce débit massique est faible, moins les polluants se dispersent dans l'atmosphère.



**Figure 74:** Evolution de la concentration des polluants dans l'espace en fonction du débit massique de la source

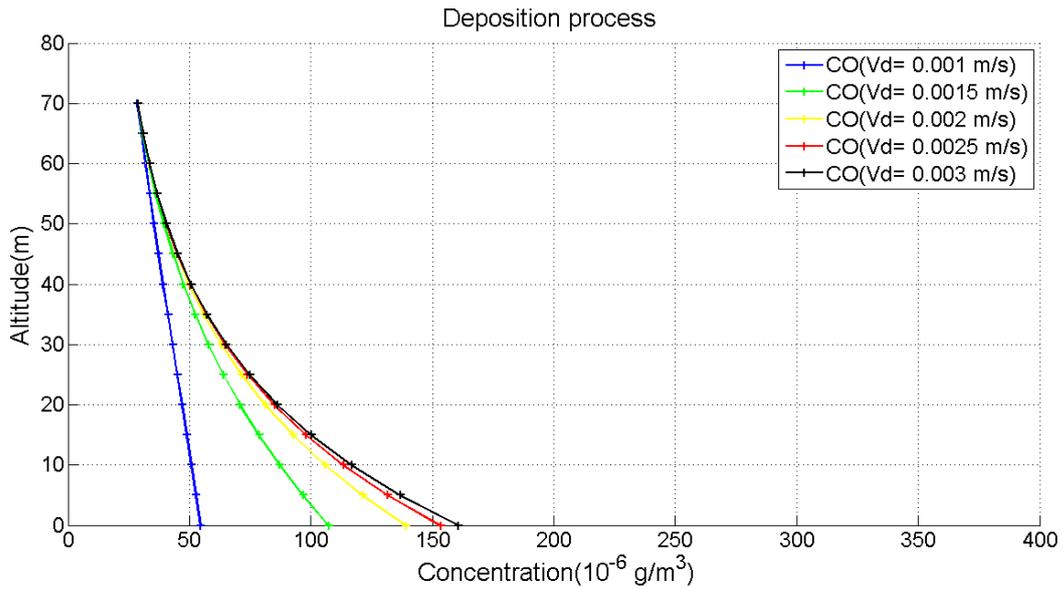
La courbe de la (figure 75) présente l'évolution de la concentration des substances polluantes en fonction de la distance et de la vitesse du vent. On observe sur la figure 75 qu'au mois de Mai 2021 lorsque la vitesse  $V=10\text{km/h}$ , la concentration maximale  $C=250\ \mu\text{g/m}^3$  décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 1200m, et au mois de Janvier 2021 lorsque la vitesse  $V=16\text{km/h}$  la concentration maximale  $C=250\ \mu\text{g/m}^3$  décroît progressivement jusqu'à s'annuler à environ 2200m. Ces résultats traduisent l'influence de la vitesse du vent sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère. Car plus la vitesse du vent est élevée, plus on constate une forte dispersion des substances polluantes dans l'atmosphère et plus cette vitesse du vent est faible, moins les polluants se dispersent dans l'atmosphère. En comparant les concentrations en  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{PM}_{10}$  aux normes et critères de qualités d'air édités par l'état du Cameroun qui sont respectivement de  $40\ \mu\text{g/m}^3$ ,  $50\ \mu\text{g/m}^3$ , de  $30\ \text{mg/m}^3$  et de  $80\ \mu\text{g/m}^3$ , on constate que pour cette période d'étude, à l'exception de la concentration du  $\text{CO}$ , les autres polluants ne respectent pas les normes et critères de qualité d'air dans la zone située entre 0 et 2200m de la centrale thermique de Yassa-Dibamba, cependant au-delà de 2200m les normes et critères de qualité d'air sont respectés dans la zone située au-delà d'environ 2200m.



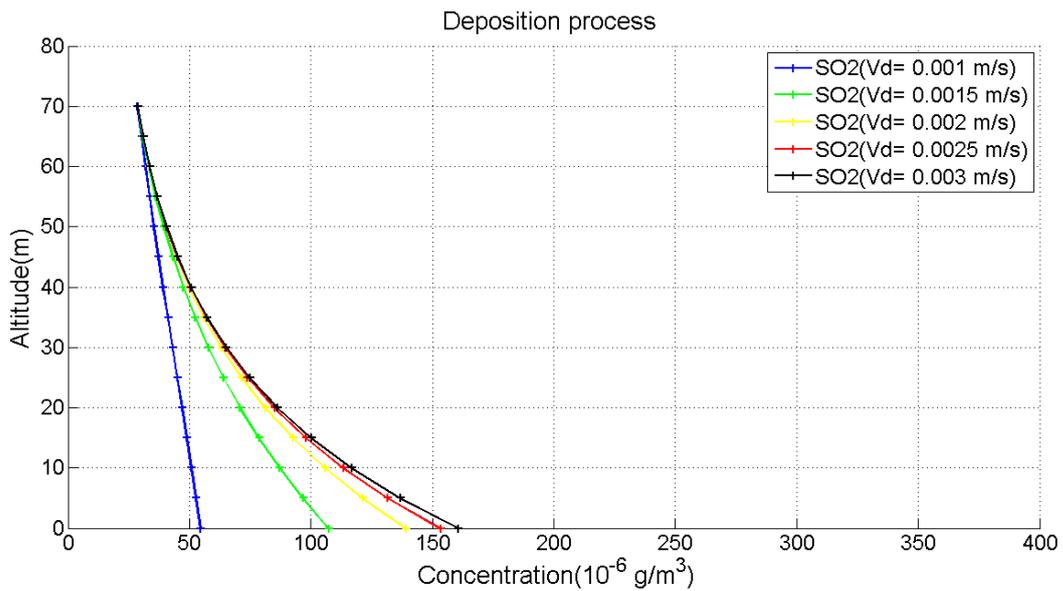
**Figure 75:** Evolution de la concentration des polluants dans l'espace en fonction de la vitesse

### III.6 PREDICTION DU PROCESSUS DE DEPOT DES POLLUANTS SUR LE SOL EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN

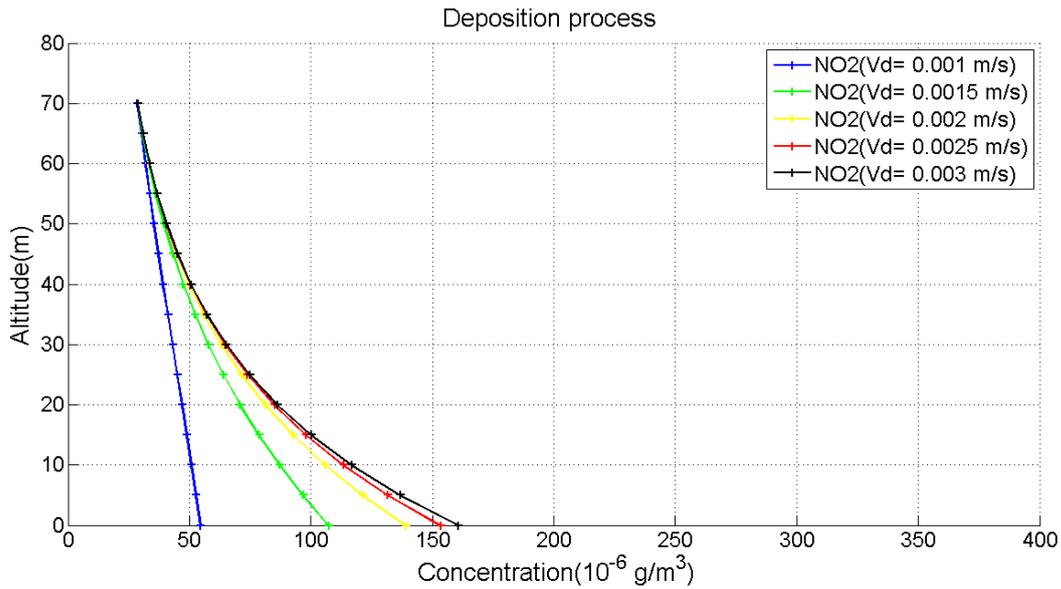
La vitesse de dépôt d'une particule fine qui dépend de sa masse volumique varie entre 0.001m/s et 0.003m/s. Les courbes des (figures 76, 77, 78 et 79) présentent le processus de dépôt de quatre polluants au sol qui sont le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et les matières particulaires (PM<sub>10</sub>). On observe que pour une vitesse de dépôt  $V_d = 0.001 \text{ m/s}$  la concentration de ces polluants au sol est d'environ  $C = 55 \text{ ug/m}^3$  et pour une vitesse de dépôt  $V_d = 0.003 \text{ m/s}$  la concentration de ces polluants au sol est d'environ  $C = 155 \text{ ug/m}^3$ . Ce qui traduit que plus la vitesse de dépôt est élevée plus la concentration des polluants au sol est élevée et plus cette vitesse de dépôt est faible plus la concentration des polluants au sol est faible.



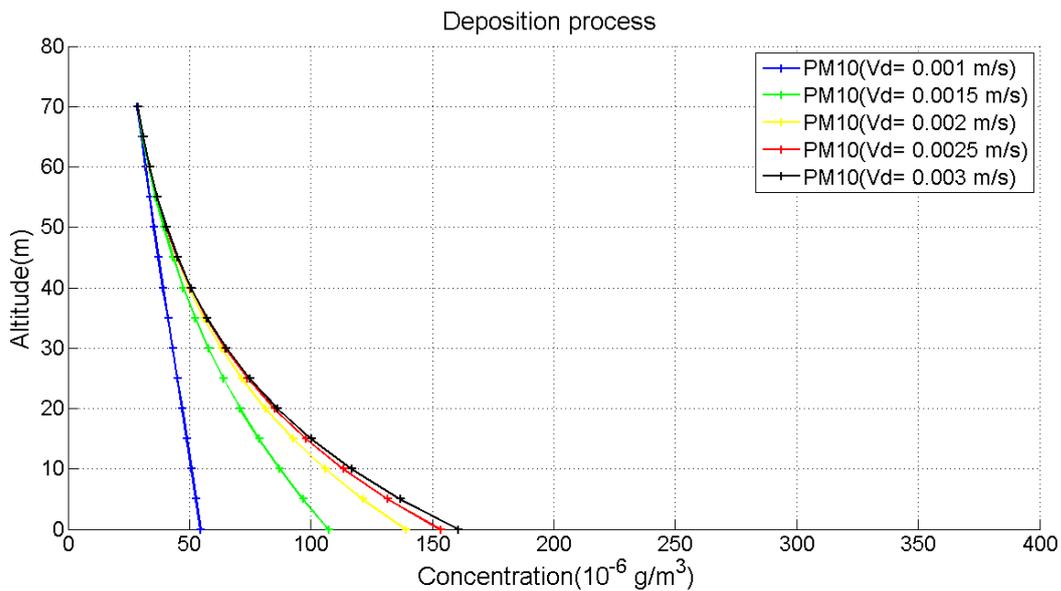
**Figure 76 :** Evolution de la concentration en CO au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba



**Figure 77:** Evolution de la concentration en SO2 au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba



**Figure 78:** Evolution de la concentration de NO2 au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba

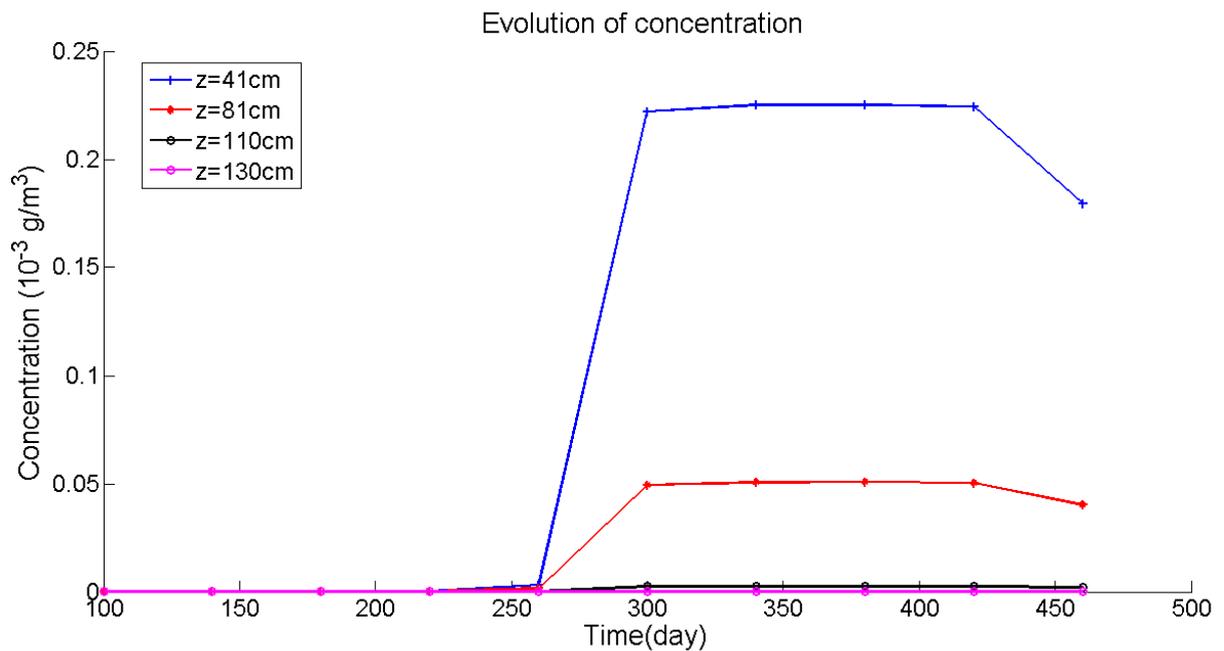


**Figure 79:** Evolution de la concentration de PM10 au sol pour différentes valeurs de la vitesse de dépôt proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba

### III.7 PREDICTION DE L'INFILTRATION DU FIOUL DANS LE SOL EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN

La courbe (Figure 80) présente l'évolution de la concentration du fioul dans le sous-sol de la ville de Mbalmayo en fonction du temps et de la profondeur. On observe que pour une profondeur de  $z=41\text{cm}$ , on a une concentration constante d'une valeur de  $0\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre 1 et 260

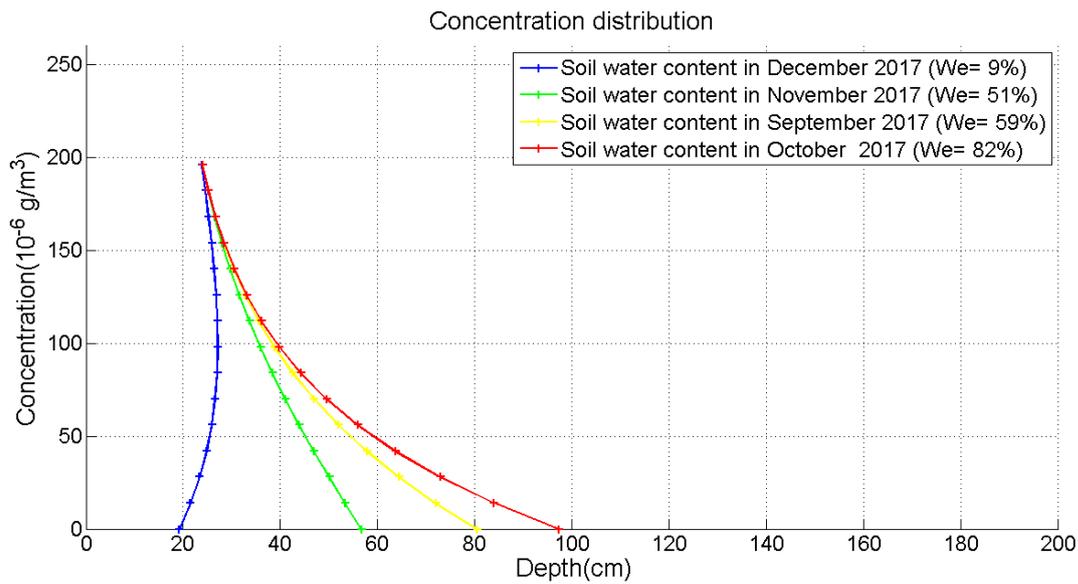
jours. Cette concentration évolue jusqu'à atteindre la valeur maximale de  $0,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre 261 et 270 jours environ. On observe également que pour une profondeur  $z=130\text{cm}$  la concentration du fioul qui est de  $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  le premier jour, reste constante sur toute la durée. Cela signifie que l'évolution de la concentration dépend du niveau de profondeur du sol. Car lorsque nous sommes à une profondeur proche de la surface du sol, on a une forte apparition du polluant à cette profondeur du sol. Toutefois lorsque nous sommes à une profondeur éloignée de la surface du sol, on a une faible apparition du polluant à cette profondeur du sol.



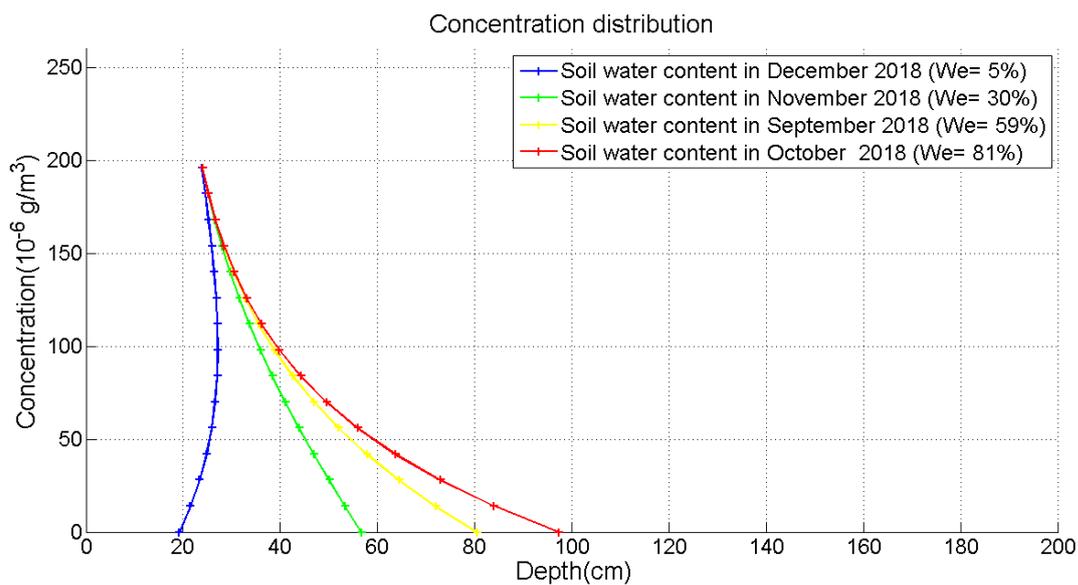
**Figure 80:** Courbes d'évolution de la concentration en fonction de la profondeur sur la base du modèle GA-ANN

La courbe (figures 81,82, 83, 84 et 85) montre l'évolution concentration des polluants en fonction de la profondeur et pour différente valeur de la teneur en eau entre Septembre et Décembre de l'année 2017 à 2021. On peut observer qu'en Octobre 2017 pour une teneur en eau  $W_e=82\%$ , la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g} /\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 98cm. Au mois d'Octobre 2018 pour une teneur en eau  $W_e=81\%$ , la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g} /\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 97cm. Au mois d'Octobre 2019 pour une teneur en eau  $W_e=57\%$ , la concentration du fioul va d'une valeur

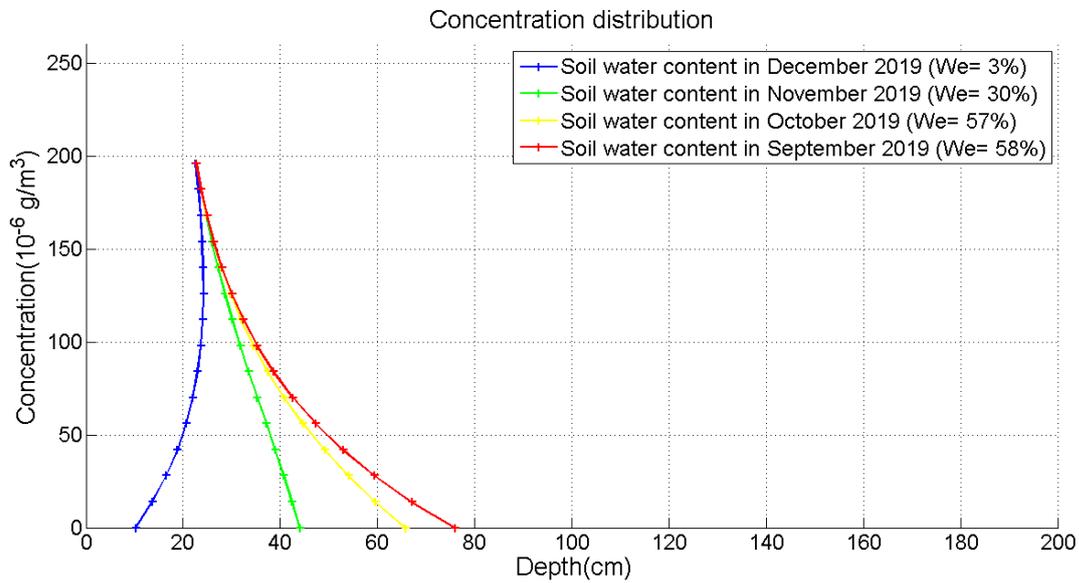
maximale de  $200 \mu\text{g} / \text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 67cm. Au mois d'Octobre 2020 pour une teneur en eau  $W_e=76\%$  la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 81cm. Au mois d'Octobre 2021 pour une teneur en eau  $W_e=14\%$ , la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 60cm. Ce qui traduit que l'infiltration des polluants dans le sol dépend de la teneur en eau, car plus cette teneur en eau est élevée plus les polluants s'infiltrent davantage en profondeur dans le sol.



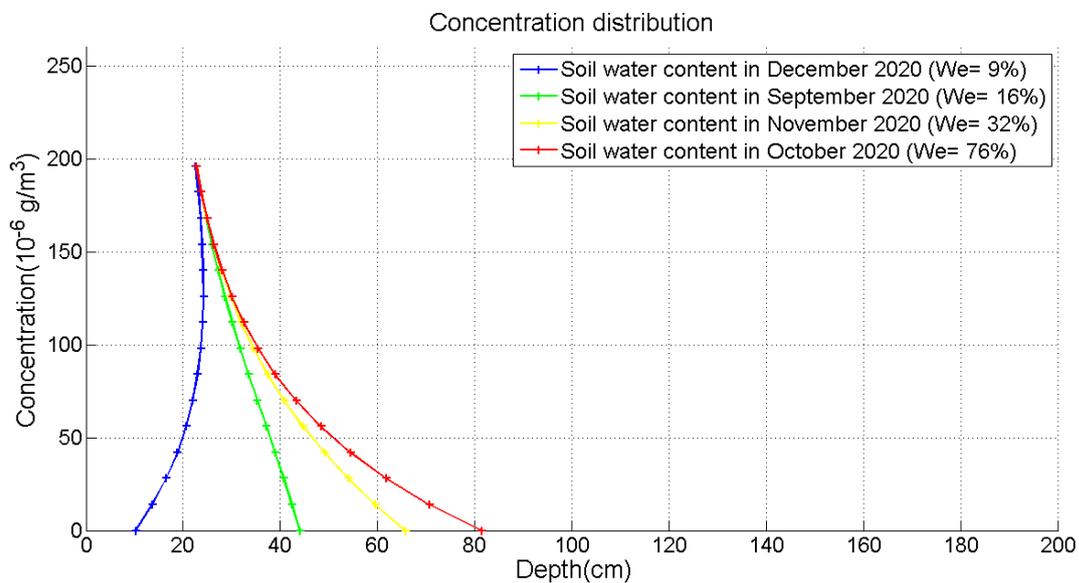
**Figure 81:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau



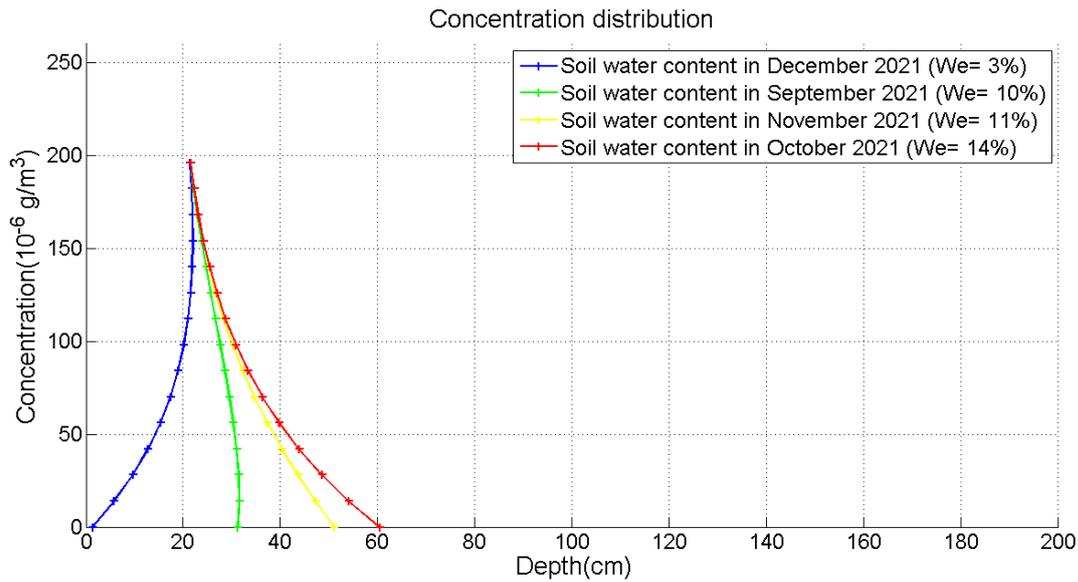
**Figure 82:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau



**Figure 83:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau

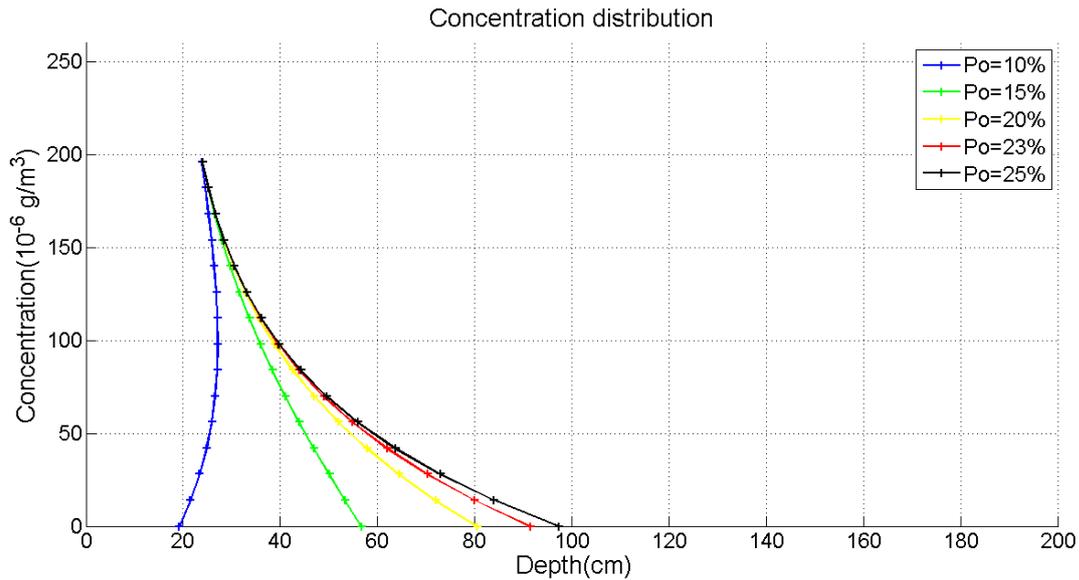


**Figure 84:** Evolution de la concentration des polluants en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la teneur en eau



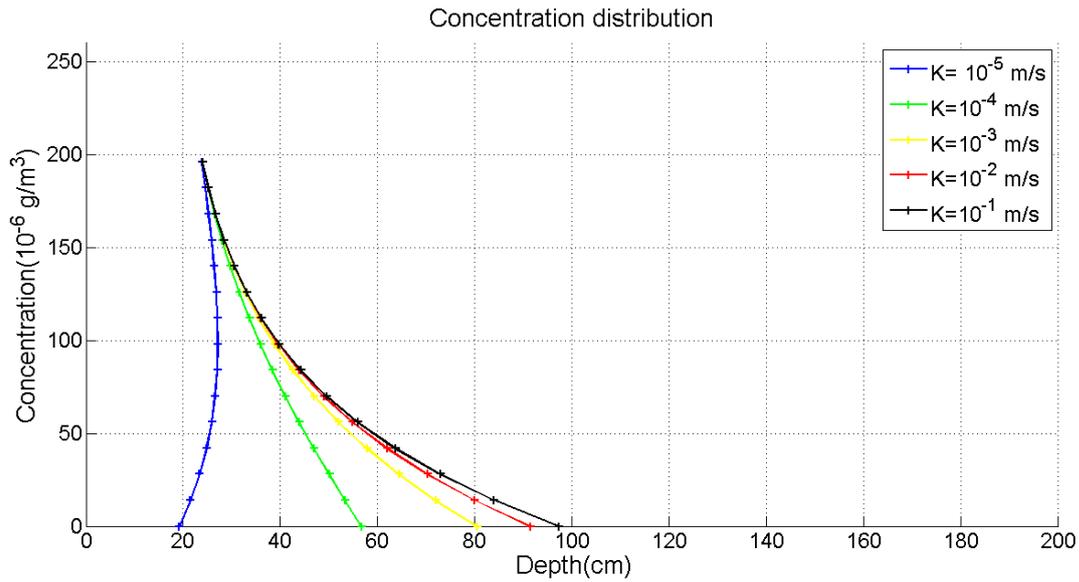
**Figure 85:** Evolution de la concentration des polluants mensuelle en fonction la profondeur des différentes valeurs de la teneur en eau

Le sol de Mbalmyo a une porosité efficace  $P_o$  qui varie entre 10 et 25% selon (Tableau 4). La courbe (Fig. 86) montre l'évolution de la concentration du fioul pour différentes valeurs de porosité efficace dans le sol à proximité de la centrale thermique de Mbalmyo, en fonction de la profondeur. On peut observer que pour une porosité efficace  $P_o=10\%$  la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 20cm et pour une porosité efficace  $P_o=25\%$  la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 98cm. Cela signifie que la porosité efficace est un paramètre très important dans l'évolution du fioul dans le sol, car plus la porosité efficace est élevée, plus le fioul s'infiltré davantage dans le sol et plus la porosité efficace est faible, moins le fioul s'infiltré dans le sol.



**Figure 86:** Evolution de la concentration des polluants en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la porosité

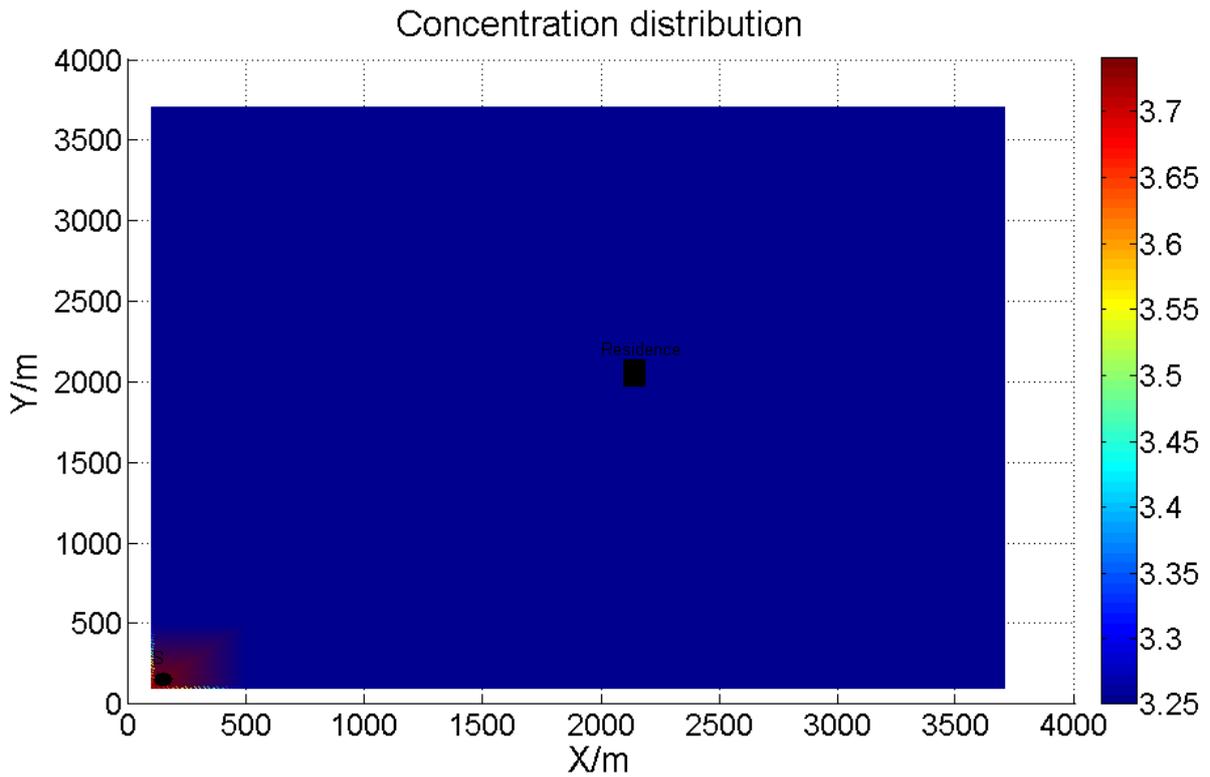
Le sol de Mbalmyo est perméable avec une perméabilité  $K$  qui varie de l'ordre  $10^{-5}$  à  $10 \cdot 10^{-1}$  m/s d'après le (Tableau5). La courbe (figure 87) montre l'évolution concentration du fioul en fonction de la profondeur, pour différentes valeurs du coefficient de perméabilité dans le sol à proximité de la centrale thermique de Mbalmyo. On peut observer que pour un coefficient de perméabilité  $K= 10^{-5}$  m/s, la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 20cm et pour un coefficient de perméabilité  $K=10^{-1}$  m/s, la concentration du fioul va d'une valeur maximale de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le sol décroît progressivement jusqu'à s'annuler à une profondeur d'environ 98 cm. Ce qui traduit que la perméabilité est un paramètre très important dans l'évolution du fioul dans le sol, car plus la perméabilité est élevée, plus les polluant s'infiltrent davantage en profondeur dans le sol et moins la perméabilité est élevée moins le fioul s'infiltrent dans le sol.



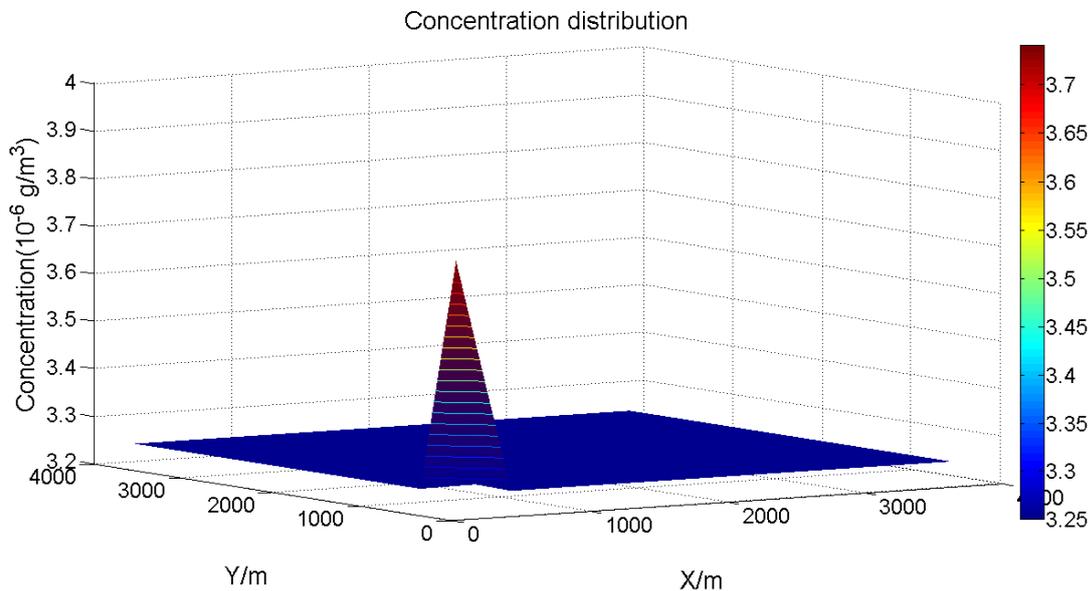
**Figure 87:** Evolution de la concentration des polluants en fonction de la profondeur pour différentes valeurs de la perméabilité

### III.8 PREDICTION LA DISPERSION DU FIOUL DANS LA NAPPE PHREATIQUE EN UTILISANT LE MODELE GA-ANN

Les figures 88 et 89 présentent la distribution de la concentration de polluant au mois d'Octobre 2017 dans la nappe phréatique à proximité de la centrale thermique de Mbalmayo située à 5m de profondeur, avec pour coefficient de diffusion moléculaire de l'ordre  $D_m = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . La couleur rouge représente la concentration du fioul à proximité de la centrale thermique dont la valeur est  $C = 3.7 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ , et la couleur bleu représente l'absence du fioul. Cette absence de fioul est due à la dilution totale du fioul dans la nappe.



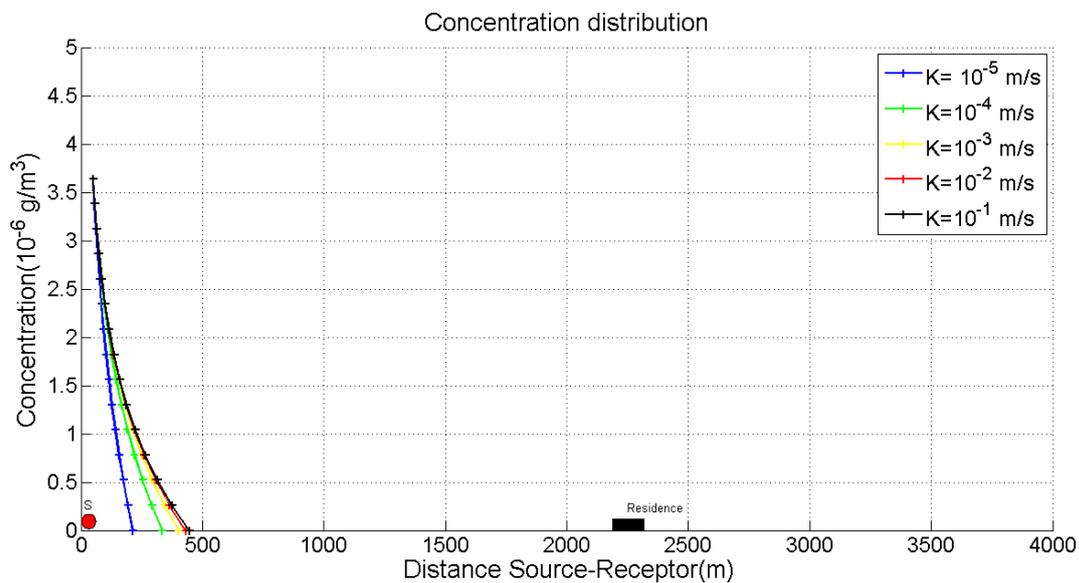
**Figure 88:** Distribution des polluants en 2 dimensions dans la nappe phréatique de la ville de Mbalmayo pour  $Z=5$  m sur la base du modèle GA-ANN



**Figure 89:** Distribution des polluants en 3 dimensions dans la nappe phréatique de la ville de Mbalmayo pour  $Z=5$  m sur la base du modèle GA-ANN

La courbe (figure 90) montre l'évolution horizontale de la concentration des polluants dans la nappe phréatique pour différentes valeurs du coefficient de perméabilité du milieu. On peut observer que pour un coefficient de perméabilité  $K=10^{-5}$  m/s la concentration  $C= 3,7 \mu\text{g}$

$/m^3$  décroît progressivement jusqu'à s'annulé à environ 220m, puis pour un coefficient de perméabilité  $K=10^{-1}$  m/s la concentration décroît progressivement jusqu'à s'annulé à environ 445m. Ce qui traduit que plus le coefficient de perméabilité est élevé plus le fioul se s'éloignent de la centrale thermique de Mbalmayo et se rapprochent des foyers d'habitations, et moins le coefficient de perméabilité est élevé, moins le fioul se disperse et stagne à proximité de la centrale thermique de Mbalmayo. Donc 445 m est la distance à partir de laquelle la concentration du polluant tend à disparaître complètement. En comparant la concentration du fioul dans le sol aux normes et critères de qualité d'eau, on fait le constate que le seuil limite de 50 mg/l est respecté sur toute la zone d'étude. Toutefois on relève une faible présence de fioul dans la nappe phréatique, qui peut compromettre l'exploitation de la nappe phréatique dans l'aménagement des puits et les forages.



**Figure 90:** Evolution de la concentration des polluants pour différentes valeurs de la vitesse de l'eau sur la base du modèle GA-ANN

### Conclusion

En conclusion, la partie expérimentale de nos travaux menés sur le terrain nous a permis de déterminer les valeurs de la teneur en eau dans le sol et les valeurs de la quantité de polluants émis dans l'atmosphère. L'objectif de cette étude était de limiter l'impact des substances polluantes issues des différentes centrales thermiques sur les populations environnantes. Nous avons alors utilisé le modèle couplé algorithme génétique -réseaux de neurones pour estimer la concentration des polluants en milieu atmosphérique et souterrain. Durant la période d'étude entre Janvier 2017 et Décembre 2021 dans la zone de Yassa, on a constaté que Mars 2019 est le mois où la vitesse du vent est la plus élevée avec  $V = 18 \text{ Km/s}$ , et favorable une forte dispersion atmosphérique des polluants. Les résultats obtenus montrent au cours de cette étude que pour une direction du vent donnée plus la vitesse est élevée plus les polluants se rapprochent des foyers d'habitations. Ces résultats montrent également que plus le débit massique est élevée plus les polluants se dispersent vers des foyers d'habitations. Ce qui traduit l'influence du débit massique de la source et du vent (vitesse et direction) sur la dispersion atmosphérique des polluants et par conséquent sur la qualité de l'air au voisinage des zones d'habitations proche de la centrale thermique de Yassa-Dibamba. En comparant les concentrations du  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{PM}_{10}$  aux normes et critères de qualités d'air édicté par l'état du Cameroun qui sont respectivement de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $30 \text{ mg}/\text{m}^3$  et  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , on a constaté qu'à l'exception de la concentration en  $\text{CO}$  les autres polluants ne respectent pas les normes et critères de qualité d'air dans la zone situé entre 0 et 2200m de la centrale thermique. Cependant au-delà de 2200m les concentrations de tous les polluants émis dans l'atmosphère respectent les normes et critères de qualité d'air.

Dans la zone de Mbalmayo durant la période d'étude entre Janvier 2017 et Décembre 2021, on a constaté que Octobre 2017 est le mois où la teneur en eau dans le sol est la plus élevée avec  $w_e = 82\%$ , et favorable à une forte infiltration du fioul en milieu souterrain. Les résultats obtenus montrent les valeurs estimatives de la concentration de fioul dans nappe phréatique issu de la centrale thermique de Mbalmayo en fonction de la teneur en eau du sol, la perméabilité et la porosité efficace. On a observé sur les résultats que ces paramètres ont une influence très significative sur l'évolution du fioul en milieu souterrain. En comparant la concentration maximale du fioul dans la nappe phréatique dont la valeur est  $3,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aux normes et critères de qualité d'eau, on a constaté que le seuil limite de  $50 \text{ mg/l}$  est respecté sur toute la zone d'étude. Cependant on relève une faible présence de fioul dans la nappe phréatique.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Cette thèse s'effectue dans le cadre législatif défini dans la loi n° 96/12 du 05 août 1996 portant loi-cadre relatif à la gestion de l'environnement et complété par diverses lois sectorielles régissant l'activité industrielle. Au cours de cette étude, une démarche scientifique a été menée. Cette démarche s'appuie sur trois approches à savoir :

- L'étude expérimentale au laboratoire, pour mesurer la teneur en eau du sol dans la zone de Mbalmayo;
- L'étude expérimentale au laboratoire, pour mesurer les quantités de polluants émis dans l'atmosphère par la centrale thermique de Yassa-Dibamba ;
- La modélisation de la dispersion des polluants en milieu atmosphérique et souterrain par utilisation du couplage algorithme génétique-réseaux de neurones.

Les résultats obtenus dans cette thèse montrent que :

Dans la zone de Yassa durant la période de Janvier 2017 à Décembre 2021, la température la plus élevée se situe au mois Février 2019 avec  $T=32^{\circ}\text{C}$ . La vitesse du vent la plus élevée se situe au mois Mars 2019 avec  $V= 18 \text{ Km/h}$ . Les vents forts se situent dans la direction Sud-Ouest et les vents faibles se situent dans la direction Est. On a observé que pour une direction du vent donnée plus la vitesse est élevée plus les polluants se rapprochent des foyers d'habitations. On a également évalué le débit massique, et on a constaté que plus le débit est élevé plus les polluants se dispersent vers des foyers d'habitations. Ce qui traduit que le débit massique de la source et le vent (direction et vitesse) ont une influence sur la dispersion atmosphérique des polluants et donc sur la qualité de l'air. En comparant les concentrations du  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  et  $\text{PM}_{10}$  aux normes et critères de qualités d'air en vigueur au Cameroun qui sont respectivement de  $30 \text{ mg/m}^3$ ,  $40 \text{ } \mu\text{g} /\text{m}^3$ ,  $50 \text{ } \mu\text{g} /\text{m}^3$  et de  $80 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ , on a constaté qu'à l'exception de la concentration du  $\text{CO}$ , les concentrations des autres polluants ne respectent pas les normes et critères de qualité d'air dans la zone situé entre 0 et 2200m de la centrale thermique, une zone susceptible de causer les maladies respiratoires aux personnes vulnérables. Toutefois au-delà de 2200m les concentrations de tous les polluants respectent les normes et critères de qualité d'air. Par conséquent le périmètre sécurité se situe au-delà d'environ 2200m.

Comme recommandation adressée aux autorités dans la zone Yassa-Dibamba, il sera très important de déplacer les populations vivants à proximité de la centrale thermique dans un périmètre de sécurité situé au-delà de 2200m et d'orienter la cheminée de la Centrale thermique de Yassa-Dibamba dans la direction Est où les vents sont les plus faibles. Aux exploitants de la

centrale thermique, nous leurs recommandons d'effectuer une décarbonation des polluants au niveau de la cheminée afin d'éliminer une grande quantité de CO, de bien ajuster la quantité de fioul et de l'air au cours de la combustion afin de réduire les émissions de NO<sub>2</sub>, de procéder efficacement à une hydrodésulfuration du fioul afin d'éliminer le soufre et réduire les émissions de SO<sub>2</sub> et d'installer en permanence un filtre empêchant le passage de PM<sub>10</sub> dans l'atmosphère.

On a également évalué l'impact de la centrale thermique de Mbalmayo durant la période de Janvier 2017 à Décembre 2021 en tenant compte de la teneur en eau, de la perméabilité du milieu et la porosité efficace. Les résultats ont montrés que ces paramètres ont une influence très significative l'évolution du fioul en milieu souterrain. En comparant la concentration maximale du fioul dans la nappe phréatique qui est de 3,7 ug/m<sup>3</sup>, aux normes et critères de qualité d'eau, on a constaté que le seuil limite de 50 mg/l n'est pas dépassé sur toute la zone d'étude. Toutefois, on relève la présence d'une faible concentration du fioul dans la nappe phréatique dans un périmètre situé entre 0-445m de la centrale thermique, susceptible de causer les maladies hydriques.

Pour une protection durable des populations vivant à proximité de la centrale thermique de Mbalmayo, il est recommandé d'installer les populations dans un périmètre situé au-delà 445m, de construire une station d'épuration d'eau afin de protéger la nappe phréatique utilisée pour les puits et les forages par les populations environnantes et de protéger au maximum les tuyaux de canalisations afin d'éviter les fuites de fioul.

Ces résultats peuvent permettre aux autorités de réagir avec précision et rapidité en cas d'urgence afin de protéger les populations dans ces différentes zones d'études.

Nous ne pouvons pas prétendre avoir faire le tour des résultats. Ces travaux pourraient donc être améliorés sur plusieurs points :

- Utiliser la méthode des volumes finis pour une meilleure discrétisation des équations d'advection-diffusion.
- Evaluer l'influence de la rugosité du terrain et du coefficient de réaction sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère.
- Evaluer l'impact du processus de décarbonations sur l'élimination du monoxyde de carbone.
- Evaluer l'influence du taux d'absorption du sodium, du magnésium et du calcium sur l'infiltration des polluants dans le sol.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] FANNY, C., «Etude de l'influence de la stratification atmosphérique dans la dispersion des polluants avec un logiciel de mécanique des fluides numérique,» le Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique, Nantes, 2011.
- [2] BOISSEAU, M.; SOUDRE, L.; BOOTHBY, N., «francetvinfo.fr,» franceinfo, 4 12 2020. [En ligne]. [Accès le 10 11 2021].
- [3] GUILLAUME, S., « Météo-paris.com,» Météo-ville, 9 12 2016. [En ligne]. [Accès le 10 11 2021].
- [4] EVE, C., «Radio-Canada.ca,» SCIENCE, 1 12 2016. [En ligne]. [Accès le 1 12 2021].
- [5] PUBLIC HEALTH AND MEDICAL SUBJECTS, «Mortality and morbidity during the London fog of December 1952,» Ministry of Health, London, 1954.
- [6] PAOLO, L., «Pollution atmosphérique: du global au local,» Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble, 2019.
- [7] LEOZ-GARZIANDIA, E., «Les impacts de la pollution de l'air,» Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, Paris, 2019.
- [8] QUEBEC SCIENCE, «Qu'est ce la pollution,» *QUEBEC SCIENCE*, 11 05 2014.
- [9] OMS, «Communiqué de l'organisation mondiale pour la santé,» Genève, 2016.
- [10] OMS, «who.int,» Organisation mondiale de la santé, 22 11 2021. [En ligne]. [Accès le 10 09 2021].
- [11] FAO, «fao.org,» Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, 04 06 2021. [En ligne]. [Accès le 10 11 2021].
- [12] OMM, «wmo.int,» ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE, 31 05 2018. [En ligne]. [Accès le 10 11 2021].
- [13] PNUE, «unep.org,» Organisation des nations unies, 04 12 2020. [En ligne]. [Accès le 10 11 2021].
- [14] Le Global Green Economy Index, «Cameroon profile environmental performance index,» 2020.
- [15] MINEPD, «Normes environnementales et procédure d'inspection des installations industrielles et commerciales au Cameroun,» Le ministère de l'environnement, de la protection de la nature et du développement durable, Yaoundé, 2001.
- [16] PLAN DE MOBILITE URBAINE SOUTENABLE, «Enjeux de la qualité de l'air et leviers d'action pour les villes subsahariennes d'aujourd'hui et demain,» chez *VILLE-POLLUTION-SANTE*, Yaoundé, 2021.
- [17] MINISTERE FEDERAL DE LA COOPERATION ECONOMIQUE ET DU DEVELOPPEMENT, «Etude pilote sur la pollution des eaux de surface et souterraines à Yaoundé et son impact sur la santé des populations riveraines,» Institut national de la statistique, Yaoundé, Yaoundé, 2013.
- [18] ATANGANA, J, D., Programme thermique d'urgence, Yaoundé: Camerlex, 2011.
- [19] «Électricité : faute d'argent, la production des centrales thermiques au Cameroun chute de 32,6% au 1er trimestre 2020,» *INVESTIR AU CAMEROUN*, 22 juin 2020.
- [20] ENEO, «Rapport annuel Eneo,» Energy of Cameroon, Yaoundé, 2018.

- [21] LIU, M.; BI, J.; MA, Z., «Visibility-based PM2.5 concentrations in China:1957-1964 and 1973-2014,» *Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, n° %113161–13169, p. 51, 24 Octobre 2017.
- [22] APTE,J,S.; MARSHALL,J,D.; COHEN, A ,J.; Brauer,M., «Addressing global mortality from ambient PM2.5,» *Environ. Sci. Technol.*, vol. 13, n° %18057–8066, p. 49, 16 June 2015.
- [23] FAO, «Le colloque international du sol,» Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2 5 2018. [En ligne]. [Accès le 7 11 2021].
- [24] ANDRE, J,C.; ROYAL, J,F., «Les fluctuations à court terme du climat et l'interprétation des observations recentes en termes d'effet de serre (Short-term climatic fluctuations and the interprétation of récent observations in terms of greenhouse effect),» *Comptes Rendus de l'Acadeie des Sciences (Series IIA-Earth Planet. Sci.)*, n° %1211–272, p. 28, 1999.
- [25] LOCT, «Localité d' afrique,» Mai 2012.
- [26] IBRAHIM, H.; A.; ILINCA, A.; PERRON, J., «Moteur diesel suralimenté: bases et calculs, cycles réel, théorique et thermodynamique,» Université du Québec, Québec, 2006.
- [27] FOURMENTAL, W.; Nadalon NADALON, L., «Le moteur VCRI de MCE-5 une compression intelligente,» 2012.
- [28] DESBAZEILLE, M, «Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de la vitesse de rotation du vilebrequin,» Université Jean Monnet-Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2010.
- [29] ABDELJOUAD, M., «Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques cas d'étude : ville d'annaba,» Université Mohamed Khider – Biskra, d'Annaba, 2014.
- [30] KORSAKISSOK, I., «Changements d'échelle en modélisation de la qualité de l'air et estimation des incertitudes associées,» Université Paris-Est, Paris, 2009.
- [31] ABDELJOUAD, M., «Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques cas d'étude : ville d'annaba,» Université Mohamed Khider – Biskra, Alger, 2014.
- [32] GOGER, T., «Un indicateur d'impact environnemental global des polluants atmosphériques émis par les transports,» Lyon, 2006.
- [33] OBUKHOV, M., «The main features of turbulent mixing in the surface atmospheric layer,» *Trudy Inst*, vol. 24, 1954.
- [34] PASQUILL, F., «The Estimation of dispersion of wind-borne material,» *Meteorological magazine*, vol. 90, n° %11063, pp. 33-49, 1961.
- [35] INERIS, «Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul),» Direction des Risques Accidentels, 2002.
- [36] DIAF, N. ; BOUCHAOUR, M. ; MERAD, L. ; BENYOUCEF, B., «Paramètres influençant la dispersion des polluants gazeux,» *Energ*, pp. 130-142, 2003.
- [37] JOURDAIN, F, «Modélisation des transferts atmosphériques des polluant,» *Base documentaire 'Innovations en environnement'*, 2007.
- [38] LE CLOIREC, P, «Les composés organiques volatils dans l'environnement,» *Lavoisier TEC & DOC*, 1998.
- [39] RIESENMEY, C., «Evaluation de l'impact d'un centre de stockage de déchets sur la qualité de l'air : approche par méthodes statistiques et modélisation déterministe,» Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2008.

- [40] TURBELIN, G., «Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent,» l'Université d'Evry – Centre d'Etudes de Mécanique d'Ile-de-France, Evry, 2000.
- [41] ISABELLE, R.; HELGA-JANE, S., «Le développement durable, un référentiel pour l'action publique entre attractivité et tensions,» *TERRITOIRE EN MOUVEMENT*, vol. 1, pp. 23-33, 2006.
- [42] ABDELDOUAD, M., «Impact de la morphologie du bâtiment sur la dispersion des polluants atmosphériques cas d'étude : ville d'annaba,» Université Mohamed Khider – Biskra, Annaba, 2014.
- [43] CLOTHILDE, C., «Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation, dossier instrumentation et mesure les oxydes d'azote,» ENSM, Saint-Etienne, 1990.
- [44] DELEAVAL, J. B., «Dynamique des micro-polluants semi-volatils : transferts à l'interface sol-air,» Université de Grenoble, Grenoble, 2014.
- [45] FEDERATION, A., «<http://www.atmo-france.org/>,» Les polluants en question, 15 07 2002. [En ligne]. [Accès le 01 10 2003].
- [46] ADEME, «<http://194.250.150.138/buldair/index.htm>,» buldair, 2003. [En ligne]. [Accès le 12 11 2003].
- [47] IAEA (International Atomic Energy Agency), «Soil sampling for environmental contaminants,» Rapport IAEA-TECDOC-1415, 2004.
- [48] BRGM, «Guide du chercheur,» 2017.
- [49] MARTINELLI, I., «Infiltration des eaux de ruissellement fluvial et transfert de polluants associés dans le sol, urbain vers une approche globale et pluridisciplinaire,» L'institut nationale des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 1999.
- [50] MOHAMMED B, «Les paramètres hydrodynamiques (définitions),» *SIGES*, 2020.
- [51] BERNARD, C.; INSA, L.; ELODIE, B., «Quelle capacité d'infiltration retenir pour le dimensionnement des techniques alternatives ?,» Graie, Villeurbanne, 2020.
- [52] MUSY, A.; SOUTTER, M., «Physique du sol,» *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, p. 337, 1991.
- [53] «[sigessn.brgm.fr](http://sigessn.brgm.fr),» SIGES Seine-Normandie. [En ligne]. [Accès le 2022 04 14].
- [54] LEMIERE, B.; SEGUIN, J. J.; LE GUERN, C.; GUYONNET, D.; BARANGER, PH.; SAADA, A., Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes, BRGM 300, 2008.
- [55] PIEDRAFITA CARNICER, M. V., «La pollution ponctuelle des sols: Le cas des stations-service dans la région de Bruxelles-capitale,» Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, 2006-2007.
- [56] NADINE, A., «Estimation des émissions surfaciques du biogaz dans une installation de stockage des déchets non dangereux,» Ecole des Mines de Nantes, Nantes, 2015.
- [57] LEROY, C.; MARO, D.; HÉBERT, D.; SOLIER, L.; ROZET, M.; LE CAVELIER, S. ; CONNAN, O., «A study of the atmospheric dispersion of a high release of krypton-85 above a complex coastal terrain, comparison with the predictions of gaussian models (Briggs, Doury, ADMS4),» *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 11, n° %1101, p. 937-944, 2010.
- [58] POURTIER, L.; DEIBER, G.; PIET, H., «Modélisation de la dispersion atmosphérique des odeurs,» *Technique de l'ingénieur*, vol. 2, n° %1960, 2007.

- [59] LANGNER, J.; ROBERTSON, L.; PERSSON, C.; ULLERSIG, A., «Validation of the operational emergency response model at the Swedish meteorological and hydrological institute using data from etex and the Chernobyl accident,» *Atmospheric Environment*, n° %132, p. 4325–4333, 1998.
- [60] WENDUM, D., «Three long-range transport models compared to the etex experiment; a performance study,» *Atmospheric environment*, n° %132, p. 4297–4305, 1998.
- [61] JONAS, C, C.; MARCO, T, V.; DAVIDSON, M, M., «Comparison between eulerian and lagrangian semi-analytical models to simulate the pollutant dispersion in the PBL,» *Applied mathematical modelling*, n° %131, p. 120–129, 2007.
- [62] LUTMAN, E, R.; JONES, S,R.; HILL, R, A.; MCDONALD, P.; LAMBERS, B., «Comparison between the predictions of a gaussian panache model and a Lagrangian particle dispersion model for annual average calculations of long-range dispersion of radionuclides,» *Journal of Environmental Radioactivity*, n° %175, p. 339–355, 2004.
- [63] FLORIAN, V., «Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels,» l'Université de Lyon, Lyon, 2011.
- [64] PIERRE, L.; FREDERIC, H.; LAURENT, A.; ANNE, J., «Atmospheric dispersion modeling using artificial neural network based cellular automata,» *Researchgate*, vol. 85, pp. 56-69, 2016.
- [65] SIHANG, Q.; BIN, C.; RONGXIA, W.; ZHENGQIU, Z.; YUAN, W.; XIAOGANG, Q., «Atmospheric dispersion prediction and source estimation of hazardous gas using artificial neural network, particle swarm optimization and expectation maximization,» *ScienceDirect*, vol. 178, pp. 158-163, 2018.
- [66] RONGXIAO, W.; BIN, C.; SIHANG, Q.; LIANG, M.; ZHENGQIU, Z.; YIPING, W.; XIAOGANG, Q., «Hazardous source estimation using an artificial neural network, particle swarm optimization and a simulated annealing algorithm,» *Atmosphere*, vol. 9, n° %14, p. 119, 2018.
- [67] RONGXIAO, W.; BIN, C.; YIDUO, W.; ZHENGQIU, Z.; LIANG, M.; XIAOGANG, Q., «The air contaminant dispersion prediction by the integration of the neural network and aermodsystem,» *International workshop on safety and resilience*, n° %111, pp. 1-5, 2018.
- [68] YIJUN, Y., & QIANG, C., «Screening models of vapor intrusion,» *Vapor intrusion simulations and risk assessments*, pp. 1-33, 2022.
- [69] JUN, S.; HONGWEI, F.; MENG, G.; YIBO, X.; MAOHAO, R.; XIAORAN, L.; YIKE, G., «Toward high-performance map-recovery of air pollution using machine learning,» *ACS EST Engg*, pp. 73-85, 2022.
- [70] PIERRE, L., «Modélisation de la dispersion atmosphérique sur un site industriel par combinaison d'automates cellulaires et de réseaux de neurones.,» Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2014.
- [71] SIDI, M, D.; SOUAD, E.; HALIMA, L., Cours des méthodes de résolution exactes heuristiques et métaheuristiques, Rabat: Université Mohammed V.
- [72] JEAN, G, T ,Y et al., «Vulnérabilité des eaux souterraines et périmètres de protection dans le bassin versant de la mingoa,» *Revue de l'Université de Moncton*, 2009.
- [73] DENGLONG, M.; JIANMIN, G.; HONG, Z.; QINGSHENG, w., «Locating the gas leakage source in the atmosphere using the dispersion wave method,» *sciencedirect*, vol. 63, January 2020.
- [74] MURY, A .; SOUTTER, M., «Infiltration,» chez *Infiltration*, Romandes, Presses

- Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991, pp. 5.1-5.17.
- [75] QUINTARD, Y. M., «Transferts hydrocarbonés en milieux poreux hétérogènes,» cours Postdoctoral, Brazzaville, 2004.
- [76] IFIPS, «transformées inverses de Laplace des fonctions et des distributions,» Université de Paris Sud, Paris, 2008.
- [77] QUINTARD, Y. M., «Transferts hydrocarbonés en milieux poreux hétérogènes, Cours Postdoctoral,» Juillet 2004.
- [78] KONGA MOPOUM, N. K., «Influence de la canopée et du régime de défrichage sur la croissance des jeunes cacaoyers ( *Theobroma cacao*.L) dans la réserve forestière de Mbalmayo,» Université de Yaoundé I, Yaoundé, 2005.
- [79] COMMUNE DE MBALMAYO, «Climat de la commune de Mbalmayo,» *commune de Mbalmayo*, 06 août 2020.
- [80] WEATHER SPARK, «fr.weatherspark.com,» Weather Spark. [En ligne].
- [81] KEBILA, 2008.
- [82] BEDIMO BEDIMO, J. P., «Hydrologie d'un milieu tropical humide - le bassin expérimental de la mengong à nsimi - (Sud Cameroun),» Institut de recherches géologiques et minières, Montpellier, 1999.
- [83] GOUVERNEMENT DU CAMEROUN, «Plan communal de développement de Mbalmayo,» Ministère de l'Économie de la Planification et de l'Aménagement du Territoire, MBALMAYO, 2019.
- [84] ONANA, V. L.; NDOMÉ EFFOUDOU PRISO, E.; KAMGANG KABEYENE BEYALA, V.; EKODECK, G. E., «Essai préliminaire de corrélations entre paramètres altérologiques normatifs et caractéristiques physico-mécaniques des roches et des produits d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud - Cameroun), à l'usage du génie civil,» *CAMEROON ACADEMY OF SCIENCES*, vol. 8, n° 12/3, 2009.
- [85] RIOU, Y., «Comment estimer la dispersion des gaz lourds ?,» *Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches*, n° 11, pp. 23-60, 1989.
- [86] LEES, F. P., «Loss prevention in the process industries,» 2<sup>e</sup> éd., vol. 1.
- [87] ANTHONY, U., «Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources,» École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2003.
- [88] ZAHER BARAKEH, A., «Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs-méthode mixte de classification et de détermination de polluant,» 2013.
- [89] AMPASEL, «Modélisation urbaine de la pollution atmosphérique de l'agglomération stéphanoise,» p. 38, Juin 2011.
- [90] DELETRAZ, G.; PAUL LAMA, A., «impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes,» Mars 1998.
- [91] BOLDUC, J.; MOHAMED, L., «dispersion des polluants atmosphériques,» 2008.
- [92] DIAF, N.; BOUCHAOUR, M.; MERAD, L.; BENYOUCEF, B., «Paramètres influençant la dispersion des polluants gazeux,» *REV ENER REN ICPWE*, p. 139–142, 2003.
- [93] DOUKI, T.; ANNE, M., «Modulation de la génotoxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en mélanges,» 5 Novembre 2009.
- [94] DESBAZEILLE, M., «Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de la vitesse de rotation du vilebrequin,» Université Jean Monnet-Saint-Etienne, Saint-Etienne, 2010.
- [95] OMS, «who.int,» Organisation mondiale de la santé, 27 09 2016. [En ligne]. [Accès le 10

- 11 2021].
- [96] LEVI-ALVARES, S., «Simulations numériques des écoulements urbains à l'échelle d'une rue canyon à l'aide d'un modèle k-epsilon,» Ecole centrale de Nantes, Nantes, 1991.
- [97] SONARA, «étude d'impact environnementale du projet de modernisation des installations de la société nationale du raffinage du Cameroun,» société nationale du raffinage du Cameroun, Yaoundé, 2009.
- [98] BAER, N, S .; BANKS, P, N., «Indoor air pollution-effects on cultural and historic materials,» *Int.J.Museum Management & Curatorship*, n° %14, pp. 9-20, 1985.
- [99] FABRICE, Q.; CLAIRE, R.; GUILLAUME, M.; SALVADOR, J., «Simulation du transfert de polluants dans les sols et les eaux souterraines: recommandations pour le choix du modèle et de la démarche,» *Amphos*, 04 07 2014.
- [100] MARYON, R, H., «Determining cross-wind variance for low frequency wind Meander,» *Atmospheric Environment*, vol. 32, n° %12, pp. 115-121, 1998 .
- [101] GOGER, T., «Un indicateur d'impact environnemental global des polluants atmosphériques émis par les transports,» INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS ET LEUR SÉCURITÉ, Lyon , 2006.
- [102] CHOUCROUN, P., «pollution atmosphérique (CHRU),» Centre de pathologies environnementales professionnelles CHRU de Brest, Brest, 2015.
- [103] LAETITIA, T., «Modélisation dynamique multi-échelle de la pollution atmosphérique en milieu urbain,» Université Paris-Est, PARIS, 2017.
- [104] THOMSON, G., «Air pollution-a review for conservation chemists,» *Studies in conservation*, pp. 147-166, 1954.
- [105] DIREN, ADEME, CSTB.; LABORATOIRE DES MOUVEMENTS HISTORIQUES, «<http://www.pays-de-la-loire.drire.gouv.fr/Env/AI/AIe/8.pdf>,» [En ligne]. [Accès le 05 03 2004].
- [106] CHRISTIAN, S., «Dépôts de polluants atmosphériques et impacts sur les écosystèmes,» Laboratoire commun École des PontsParisTech / EDF R&D, Paris.
- [107] CLAUDE LOUIS MARIE HENRI NAVIER,C,L,M,H, Académie Royal de science, paris, 1845.
- [108] ANTHONY, H, «Les milieux poreux en ingénierie de réservoir,» *Researchgate*, 2020.
- [109] GLOCKNER, S., «Contribution à la modélisation de la pollution atmosphérique dans les villes,» Thèse de doctorat l'université bordeaux I, bordeaux, 2000.
- [110] GREENING EU COOPERATION, «Profil environnemental du Cameroun,» Yale University, Yale, 2021.
- [111] NUMTECH, «Un système de gestion de la qualité de l'air urbaine,» chez *Guide de l'utilisateur*, vol. 3, 2012, p. 264.
- [112] MILLIEZ, M., «Modélisation micro-météorologique en milieu urbain : dispersion des polluants et prise en compte des effets radiatifs,» Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CERE, Centre de Recherche et d'Enseignement en Environnement Atmosphérique, PARIS, 2006.
- [113] ANGHINOLF, D.; PAOLUCCI, M., «A new discrete particle swarm optimization approach for the single-machine total weighted tardiness scheduling problem with sequence-dependent setup times,» *European Journal of Operational Research*, p. 73–85, 2009.

- [114] TANKOU, T, A, S.; ELE A, P.; EMA'A EMA'A, J, M.; OWONO, A, P.; BEN-BOLIE, G, H, «A three-dimensional fractional solution for air contaminants dispersal in the planetary boundary layer,» *Heliyon*, vol. 7, n° %15, 2021.
- [115] SEGALEN, P., «Les sol et ca géomorphologie du Cameroun,» Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M., Bondy..
- [116] TCHAKOUNTE, J., «Les centrales thermiques au Cameroun,» *Camerlex Press*, 12 JUILLET 2012.
- [117] BRGM , «Guide le comportement des polluants dans le sol et les nappes,» BRGM 300, 2008.
- [118] Seutche, J, C.; Nsouandélé, J, L.; Njingti-Nfor.; Tamba, J, G.; Bonoma, B., «Geographical mapping and modelling of noise pollution from industrial motors: a case study of the Mbalmayo Thermal Power Plant in Cameroon,» *Environ Monit Assess*, vol. 191, p. 765, 21 November 2019.
- [119] BOLDUC, J.; LATEB, M., Cours : Couche limite micro-météorologique sca7025, Montréal: UQUAM (Université de Québec à Montréal), 2008.
- [120] HISTORIQUE, «Historique-meteo.net,» [En ligne].
- [121] IGRI, P, M.; VONDOU, D, A.; KAMGA, F, M., «Case study of pollutants concentration sensitivity to meteorological fields and land use parameters over Douala (Cameroon) using aermod dispersion model,» *Atmosphere*, n° %12, pp. 715-741, 2011.
- [122] JIM, A., «Mauna loa observatory,» National park Hawai'i, Hawai'i, 2005.
- [123] PANKOW J. F.; CGERRY J. A., «Dense chlorinated solvent and other dnapls in ground water : history, behavior and remediation,» *Waterloo press*, p. 260, 1996.
- [124] SARAH K, P., «Ancient architectural acoustic resonance patterns and regional brain activity,» *Researchgate*, 1994.
- [125] SEINFELD, J, H., «Atmospheric chemistry and physics of air pollution,» Wiley-Interscience, New York, 1986.
- [126] MÜLLER, E.; FORD, R.; HORT, M.; HUGGETT, L.; RILEY, G.; THOMSON, D., «Parallelisation of the lagrangian atmospheric dispersion model NAME,» *Computer physics communication*, vol. 12, n° %1184, p. 2734–2745, 2013.
- [127] BELLASIO, R.; SCARPATO, S.; BIANCONI, R.; ZEPPA, P., «a new long range lagrangian particle dispersion model and its evaluation against the first etex tracer release,» *Atmospheric environment*, n° %157, p. 244–256, 2012.
- [128] JUAN, S. R. M.; THIerno, D.; BERNARD, C.; MARC, A.; KARIM, L., «Vapor intrusion in buildings: development of semi-empirical models including lateral separation between the building and the pollution source,» *Building simulation*, p. 2031–2049, 2022.

## ANNEXE

## ANNEXE 1 Présentation des données

## ANNEXE1-1 Concentration réelle des polluants mesurée par les micro-capteurs dans le temps à 1000 m de la centrale thermique de Yassa au mois de Mai 2021

Temps (s)	260	262	266	271	278	285	293	300
Concentration (mg/m <sup>3</sup> )	0	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2	0.22	0.22

## ANNEXE1-2 Concentration réelle des polluants mesurée par les micro-capteurs dans l'espace à proximité de la centrale thermique de Yassa au mois de Mai 2021

Distance (m)	30	400	500	640	800	1000	1500	2200
Concentration (µg m <sup>3</sup> )	250	200	150	100	90	75	40	2

## ANNEXE 1-3 Facteurs d'émissions des principaux polluants

Polluants	<i>CO</i>	<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>COV</i>	<i>PM<sub>2,5</sub>µm</i>	<i>PM<sub>10</sub>µm</i>	HAP
Facteurs d'émissions (g /GJ)	1.419	164.2	378.4	0.176	0.8116	3.8859	0.000841

**ANNEXE 1-4 Consommation moyenne de la centrale thermique de Yassa-Dibamba entre Janvier 2017 et Décembre 2021**

MOIS	Conso HFO1	Conso HFO2	Conso HFO3	Conso HFO4	Conso HFO5
1	701972	81144	521174	788144	611555
2	742717	454110	512810	444418	643787
3	481244	541101	790145	690151	701042
4	573157	283282	840121	183140	313058
5	478043	508050	701050	619020	212103
6	258883	354884	299980	400081	550000
7	527071.3	218101	112841	416002	613072
8	206847.363	305021	401420	257201	547892
9	568971	467070	867920	660901	308402
10	486085	427811	310020	551090	106095
11	558286	333211	418244	391210	611103
12	590176	410190	620130	770373	130147

**ANNEXE 1-5 Durée de fonctionnement moyenne de la centrale thermique de Yassa-Dibamba entre Janvier 2017 et Décembre 2021**

MOIS	Durée1(h)	Durée 2 (h)	Durée 3(h)	Durée 4(h)	Durée 5(h)
1	650	800	403	610	540
2	661	299	308	270	450
3	280	321	673	470	648
4	330	98	700	50	154
5	273	380	635	552	81
6	91	163	100	201	346
7	384	82	40	240	549
8	81	150	200	92	355
9	360	259	710	456	141

## ANNEXE

---

10	310	287	161	351	30
11	354	163	221	192	462
12	370	289	401	520	32

### ANNEXE 1-6 Température (°C) dans la ville de Douala entre Janvier 2017 et Décembre 2021

MOIS	Temperature1	Temperature2	Temperature3	Temperature4	Temperature5
1	30	31	31	30	29
2	31	31	32	30	30
3	31	31	31	30	29
4	31	30	31	29	28
5	30	30	30	28	27
6	29	29	27	27	27
7	28	28	26	26	26
8	28	28	26	26	26
9	28	29	27	26	27
10	29	29	27	27	27
11	30	31	28	28	28
12	31	31	30	29	30

### ANNEXE 1-7 vitesse du vent (km/h) dans la ville de Douala entre Janvier 2017 et Décembre 2021

MOIS	Vitesse1	Vitesse2	Vitesse3	Vitesse4	Vitesse5
1	16	14	17	15	16
2	16	17	17	17	16
3	16	16	18	15	15
4	14	15	16	13	12
5	13	15	15	12	10
6	16	16	16	14	12

7	14	16	16	14	13
8	17	17	17	16	14
9	16	15	13	13	12
10	13	12	13	13	12
11	11	12	13	13	13
12	14	13	14	15	16

**ANNEXE 1-8 Précipitation (en mm) dans la commune Mbalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021**

MOIS	Précipitation1	Précipitation2	Précipitation3	Précipitation4	Précipitation5
1	58	7	19	4	20
2	43	134	66	17	6
3	129	227	170	54	276
4	192	175	303	315	291
5	209	289	382	361	475
6	103	213	255	300	354
7	91	292	208	209	93
8	286	232	151	153	124
9	352	356	349	93	59
10	492	488	339	456	82
11	306	178	179	192	65
12	52	27	18	54	18

**ANNEXE 1-9 Teneur en eau du sol (en %) dans la commune Mbalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021 issu des résultats de la pratique du séchage**

<b>MOIS</b>	<b>Teneur1</b>	<b>Teneur 2</b>	<b>Teneur 3</b>	<b>Teneur 4</b>	<b>Teneur 5</b>
1	10	1	3	1	3
2	7	22	11	3	1
3	22	38	28	9	46
4	32	29	51	53	49
5	35	48	64	60	79
6	21	36	43	50	59
7	15	49	35	35	16
8	48	39	25	26	21
9	59	59	58	16	10
10	82	81	57	76	14
11	51	30	30	32	11
12	9	5	3	9	3

**ANNEXE 1-10 Consommation moyenne de la centrale thermique de Mabalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021**

<b>MOIS</b>	<b>Conso LFO1</b>	<b>Conso LFO2</b>	<b>Conso LFO3</b>	<b>Conso LFO4</b>	<b>Conso LFO5</b>
1	128395	95615	98395	115615	158395
2	122914	166132	82914	76132	102914
3	0	1663	52	422	123
4	53178	17673	87421	37240	12981
5	89500	41277	53217	12047	124703
6	17901	11115	40170	94521	10123
7	4482	2874	4482	2874	4482
8	0	0	0	0	0
9	1667	0	11701	124	6744

## ANNEXE

---

10	1585	454	1023	202	854
11	2334	916	1289	423	1487
12	14880	3514	17210	4789	19327

### **ANNEXE 1-11 Durée de fonctionnement moyenne de la centrale thermique de Mabalmayo entre Janvier 2017 et Décembre 2021**

<b>MOIS</b>	<b>Durée1(h)</b>	<b>Durée 2 (h)</b>	<b>Durée 3(h)</b>	<b>Durée 4(h)</b>	<b>Durée 5(h)</b>
1	133	154	165	123	161
2	119	109	52	23	101
3	0	6	28	9	46
4	49	33	51	53	49
5	81	71	64	60	79
6	17	19	43	50	59
7	4	5	35	35	16
8	0	0	0	0	0
9	2	0	58	16	10
10	1	3	57	76	14
11	2	2	30	32	11
12	13.25	6.8	3	9	3

**ANNEXE 1-12 Volume d'hexane décane perdu entre 2017 et 2021**

<b>Année</b>	<b>Volume d'hexane décane perdu (L)</b>	<b>Durée d'écoulement (h)</b>
<b>2017</b>	65,5	215
<b>2018</b>	51,2	155
<b>2019</b>	54,3	170
<b>2020</b>	56,1	201
<b>2021</b>	60,5	204

**ANNEXE 2 : Tableau des normes environnementales au Cameroun****ANNEXE 2-1 : Tableau sur les valeurs limites d'émissions**

<b>Substances</b>	<b>Valeur limite d'émission</b>	<b>Définition statistique</b>
Anhydride sulfureux (SO <sub>2</sub> )	50 µg/m <sup>3</sup> 125 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne annuelle (Moyenne arithmétique) Moyenne journalière
Dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	200 µg/m <sup>3</sup> 40 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne horaire (Moyenne arithmétique) Moyenne annuelle
Monoxyde de carbone (CO)	30 mg/m <sup>3</sup>	Moyenne par 24h ; ne doit en aucun cas être dépassé plus d'une fois par année
Ozone (O <sub>3</sub> )	120 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne sur 8 heures (santé pour la population)
Poussière en suspension <sup>5</sup> (PM 10)	80 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne annuelle

## ANNEXE

	260 µg/m <sup>3</sup>	(moyenne arithmétique) Moyenne sur 24 h ; ne doit en aucun cas être dépassée plus d'une fois par année
Plomb (Pb) dans les poussières en suspensions	2 µg/m <sup>3</sup>	Moyenne annuelle (Moyenne arithmétique)
Cadmium (Cd) dans les poussières en suspension	1,5 ng/m <sup>3</sup>	Moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
Retombées de poussières totales	200 mg/m <sup>2</sup> x jour	Moyenne annuelle (moyenne arithmétique)
Plomb (Pb) dans les retombées de poussières	100 µg/m <sup>2</sup> x jour	Moyenne annuelle (Moyenne arithmétique)
Cadmium (Cd) dans les retombées de poussières	2 µg/m <sup>2</sup> x jour	Moyenne annuelle (Moyenne arithmétique)
Zinc (Zn) dans les retombées de poussières	400 µg/m <sup>2</sup> x jour	Moyenne annuelle (Moyenne arithmétique)
Thallium dans les retombées de poussières	2 µg/m <sup>2</sup> x jour	Moyenne annuelle (Moyenne arithmétique)
amiante		

### ANNEXE 2-2 : Tableau sur les valeurs limites des substances polluantes

<b>Paramètres</b>	<b>Teneur dans Différents milieux de rejets</b>	<b>Teneur les Milieux spécialement protégés</b>
DCO (sur effluent non décanté)	200 mg/l	90 mg/l
Matières en suspension	40 mg/l	30 mg/l

## ANNEXE

---

totales		
DBO5 (sur effluent non décanté)	50 mg/l	20 mg/l
Azote total	20 mg/l	10 mg/l
Phosphore total	10 mg/l	5 mg/l
Hydrocarbures totaux	50 mg/l	20 mg/l
Fluor et composés (en F)	100 mg/l	20 mg/l
Chrome et composés (en Cr3)	1 mg/l	0,5 mg/l
Cuivre et composés (en Cu)	1 mg/l	0,5 mg/l
Arsenic et composés (en As)	1 mg/l	0,5 mg/l
Chrome hexavalent	0,2 mg/l	0,2 mg/l
Cyanures	1 mg/l	0,5 mg/l

### ANNEXE 3 : Quelques images de la collecte des données





#### ANNEXE 4 : Listes de quelques programmes

##### A4-1 Programme évolution de concentration des polluants mensuellement

hold all

hold all

```
% xDate= linspace(datenum('01-01-2022'),datenum('12-31-2022'),12);

% xDate= linspace(MOIS1(1),MOIS1(end),12);

% plot(MOIS1,TENEUR1,'r+-',MOIS1,TENEUR2,'b+-',MOIS1,TENEUR3,'m+-',
'MOIS1,TENEUR4,'co-',MOIS1,TENEUR5,'k--','LineWidth',2);

    plot(HEURE,DIR1,'r+-',HEURE,DIR2,'b+-',HEURE,DIR3,'m+-',HEURE,DIR4,'co-',
'HEURE,DIR5,'k--','LineWidth',2);

%plot(ECO1,'DisplayName','ECO1');plot(ECO2,'DisplayName','ECO2');plot(ECO3,'DisplayNa
me','ECO3');plot(ECO4,'DisplayName','ECO4');plot(ECO5,'DisplayName','ECO5');plot(MOIS1,'
DisplayName','MOIS1');hold off;
    set(gca,'Xtick',linspace(HEURE(1),HEURE(end),24));
%set(gca,'XTickLabel',{'Jan','Feb','Mar','Apr','May','Jun','Jul','Aug','Sep','Oct','Nov','Dec'},'FontSi
ze',18)
% set(gca,'Xtick',MOIS1(1):20:MOIS1(end));
% set(gca,'Xtick',xDate)

% datetick('x','mmm','kepticks')

xlabel('Hour of the day(h)','FontSize',20)
ylabel('Wind direction(°N)','FontSize',20)
legend('1^s^t Jan 2017','1^s^t Jan 2018','1^s^t Jan 2019','1^s^t Jan 2020','1^s^t Jan 2021')
% set(gca,'xlim',[MOIS1(1) MOIS1(end)],'xtick',MOIS1(1):20:MOIS1(end))

% axis([730122,733384,0,1.6])
    set(gca,'FontSize',18)
% set(gca,'XTickLabel',{'J','F','M','A','M','J','J','A','S','O','N','D'},'FontSize',18)
title('Hourly wind direction','fontsize',20);
hold on
```

**A4-2 Programme dispersion des polluants en milieu souterraine et atmosphérique**

```
clc;clear all; close all
dx=400; dy=400;dt =0.000007; Dx=149999999;Dy =100999999; N=10; H=10;
% Q=170;
u=1;Q=5;Kp=0.1;Kd=0.001;
% x=linspace(1,0.1,N);
% y=linspace(1,0.1,N);
% [X,Y]=meshgrid(x,y);
X=zeros(1,N);
Y=zeros(1,N);
C=zeros(N,N);
Cn=zeros(N,N);

X(1,1)=100;
for i=2:N

    X(1,i)=X(1,i-1)+dx;
end

Y(1,1)=100;
for i=2:N

    Y(1,i)=Y(1,i-1)+dy;
end

for i=1:N
    for l=1:N
        C(i,l)=0.0;
    end
end
end
```

---

```

% for i=1:N
%   C(i,N)= (4*C(i,N-1)-C(i,N-2))./3;
%   Cn(i,N)=C(i,N);
%   C(N,i)= (4*C(N-1,i)-C(N-2,i))./3;
%   Cn(N,i)=C(N,i);
%
% end

% size(C);

for j=1:100

    for l=6:N
        C(1,l)=1.0;
        Cn(1,l)=C(1,l);
    end
    for l=1:N
        C(N,l)=0.0;
        Cn(N,l)=C(N,l);
    end
end

for l=2:N-1
    for i=2:N-1
Cn(i,l)= C(i,l) +dt*Dx/(dx.^2).*((C(i+1,l)-2.*C(i,l)+C(i-1,l))....
        +dt*Dy/(dy.^2).*(C(i,l+1)-2.*C(i,l)+C(i,l-1)))...
        +dt.*(-u.*(C(i+1,l)-C(i-1,l))./...
        (2*dx))+Q*dt+ Kp*dt- Kd*C(i,l)*dt;
    end
end
for i=1:N
C(i,1)= (4*C(i,2)-C(i,3))/3;
Cn(i,1)=C(i,1);
C(i,N)= (4*C(i,N-1)-C(i,N-2))/3;

```

```
Cn(i,N)=C(i,N);
end

    for i=1:N
        for l=1:N
            C(i,l)=1.0000002*Cn(i,l);
        end
    end
end

hold on;
surf(X,Y,0.2*C,'FaceColor','yellow','EdgeColor','none')
[C ch] = contour3(X,Y,0.2*C,20); set(ch,'edgecolor','w')
shading interp
camproj('orthographic')
% [c,h] = contour(X,Y,C,9);
% clabel(c,h);
%
% contourf(X,Y,C,9);
% clabel(C,h);
% colormap
% contourf(peaks(20),10);
% colormap hot
% plot (X,1.0000001*C(4,:),'r--',X,1.0000002*C(6,:),'-',X,1.0000003*C(8,:),'k--
','LineWidth',2);
% plot (X,1.0000002*C(6,:),'-',X,1.0000003*C(7,:),'LineWidth',2);
% plot (X,1.000001*C(5,:),'-',X,1.000002*C(6,:),'r--',X,1.000003*C(7,:),'m--','LineWidth',2);
% plot (X,1.0001*C(2,:),'b-+',X,1.0002*C(3,:),'r-*',X,1.0003*C(8,:),'k-o','LineWidth',2);
% surf(X,Y,C)
% contour(X,Y,C);
% legend('concentration en zone non saturée à t=100S')
% legend('concentration au sol')
% legend('concentration to t= 500s')
% legend('concentration au sol par dépôt sec')
```

---

```

%          legend('concentration au sol par dépôt humide')
          legend('Concentration in Unstable atmosphere')
%      legend('S1+S2','S2','S1')
% %      legend('Kd=0.2','Kd=0.3','Kd=0.4')
%      legend('GA-ANN ','CFD model','Gaussian model')
hold on;
% hp = plot(X,1.2*Cn(6,:),'--',Y,1.5*Cn(8,:),'r'); % Scale to make one-sided PSD
% set(hp,'LineWidth',2);
% xlabel('Y(en m)','FontSize',20)
% ylabel('C(x,y,z)(en ug/m3)','FontSize',20)
% legend('ANN couplé GA-PSO ','ANN couplé PSO')
% %      legend('concentration à t=30s')
% legend('FTCS','FTBS')
xlabel('X/m','FontSize',20)
ylabel('Y/m','FontSize',20)
zlabel('Concentration 10^-^3 g/m^3','FontSize',20)

title('K_{Y} = 10^-^5 ; K_{Z} = 10^-^5; U=0 ; V= 10 ; Q_{s} = 0.29','FontSize',20)
% title('Prediction Error')
% legend('Observed','Forecast','Location','NorthWest')
% hold off
set(gca,'FontSize',18)

```

#### A4-3 Programme sur l' infiltration des polluants dans le sol

```

clear all;
%hold off;
clc;
%tic;
%Initialisation des paramètres
Dt=360; %pas temps: 6 minute=360s
D=1.74*0.0000001; %diffusivité en m2/s
Dx=100; %pas espace en m
U=3.3; % Vitesse du vent en m/s
S=0.1; % Terme source en mg/m3.s

```

## % matrice A

```
A=zeros(15,15);
A(1,1)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(1,2)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(2,1)= -D/(Dx*Dx);
A(2,2)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(2,3)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(3,2)=-D/(Dx*Dx);
A(3,3)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(3,4)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(4,3)=-D/(Dx*Dx);
A(4,4)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(4,5)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(5,4)=-D/(Dx*Dx);
A(5,5)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(5,6)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(6,5)=-D/(Dx*Dx);
A(6,6)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(6,7)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(7,6)=-D/(Dx*Dx);
A(7,7)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(7,8)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(8,7)=-D/(Dx*Dx);
A(8,8)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(8,9)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(9,8)=-D/(Dx*Dx);
A(9,9)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(9,10)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(10,9)=-D/(Dx*Dx);
A(10,10)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(10,11)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(11,10)=-D/(Dx*Dx);
A(11,11)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
```

---

```
A(11,12)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(12,11)=-D/(Dx*Dx);
A(12,12)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(12,13)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(13,12)=-D/(Dx*Dx);
A(13,13)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(13,14)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(14,13)=-D/(Dx*Dx);
A(14,14)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
A(14,15)=(U/Dx)-(D/Dx*Dx);
A(15,14)=-D/(Dx*Dx);
A(15,15)=(1/Dt)+(2*D/(Dx*Dx))-(U/Dx);
%disp(A);
%Initialisation des Concentrations
Ci=24; % Concentration Max (à la source)
Cinf=29; % Concentration Min telque: Cinf<240(très loin de lasource)
C=zeros(15,1);
C(1,1)=Ci;
%disp(C);
%Bourcle de formation de la matrice de stockage M des concentrations
% C au point xj et au part de temps (k-1)Dt
M=zeros(15,11);
for k=1:11
for j=1:15
M(j,k)=C(j,1);
end
% matrice B
B=zeros(15,1);
B(1,1)= S-Ci*(-D/(Dx*Dx))-(C(1,1))/Dt;
B(2,1)= S-(C(2,1))/Dt;
B(3,1)= S-(C(3,1))/Dt;
B(4,1)= S-(C(4,1))/Dt;
B(5,1)= S-(C(5,1))/Dt;
```

---

```

B(6,1)= S-(C(6,1))/Dt;
B(7,1)= S-(C(7,1))/Dt;
B(8,1)= S-(C(8,1))/Dt;
B(9,1)= S-(C(9,1))/Dt;
B(10,1)= S-(C(10,1))/Dt;
B(11,1)= S-(C(11,1))/Dt;
B(12,1)= S-(C(12,1))/Dt;
B(13,1)= S-(C(13,1))/Dt;
B(14,1)= S-(C(14,1))/Dt;
B(15,1)= S-((C(15,1))/Dt)-Cinf*((U/Dx)-(D/Dx*Dx));
%disp(B);
%Calcule de la concentration en chaque point xj au part de temps(k-1)Dt
C=A^-1*B;
end
disp(M)
%tracer des courbes
j=0:14;
hold on
plot (M(j+1,3),18*(1*j),'b+-','linewidth',1.5)
plot (M(j+1,4),18*(1*j),'g+-','linewidth',1.5)
plot (M(j+1,5),18*(1*j),'Y+-','linewidth',1.5)
plot (M(j+1,6),18*(1*j),'r+-','linewidth',1.5)
plot (M(j+1,11),18*(1*j),'k+-','linewidth',1.5)
hold on
% plot (100*j,M(j+1,5),'b','linewidth',1.5)
% plot (100*j,M(j+1,5),'g','linewidth',1.5)
% plot (100*j,M(j+1,5),'r','linewidth',1.5)
% plot (100*j,M(j+1,5),'y','linewidth',1.5)
axis([0 200 0 260]);
%title('Evolution de la concentration dans temps')
%title('Influence de la vitesse sur la concentration')
%title('Evolution de la concentration dans l'espace')
xlabel(' Depth(cm)', 'FontSize',20);

```

---

---

```

ylabel('Concentration(10-6 g/m3)','FontSize',20);
% xlabel('X(en m)','FontSize',20)
% ylabel('Y(en m)','FontSize',20)
%legend('t=42min');
% legend('U=1.5m/s');
%legend('t=12min','t=18min','t=42min','t=60min');
% legend('120°N','180°N','240°N');
% legend('Heavy Permeability ','Weak Permeability');
% legend('V=2m/s','V=3m/s','V=4.5m/s','V=5m/s','V=6.5m/s');
% legend('V=3m/s','V=2.7m/s','V=2.5m/s','V=2.3m/s','V=2m/s');
% legend('Q=1.2kg/s','Q=1.7kg/s','Q=2kg/s','Q=2.5kg/s','Q=2.8kg/s');
% legend('Kd=0.5','Kd=0.4','Kd=0.3','Kd=0.2','Kd=0.1');
% legend('Z0=0.5','Z0=1.5','Z0=0.5','Z0=0.1','Z0=0.01');
% legend('January','February','May','September','October');
legend('K= 10-5 m/s','K=10-4 m/s','K=10-3 m/s','K=10-2 m/s','K=10-1 m/s');
title('Concentration distribution','fontsize',20)
grid
%pause(1);
%toc
set(gca,'FontSize',18)

```

#### A4-4 Programme d'optimisation prédiction

```

sbioloadproject gprotein_norules m1
m1=X;
p_array = sbioselect(X,'Type','parameter');
[k4,r4] = sbioparamestim(m1,tspan,xtarget,Ga,p_array,'pso');
% Ga = sbioselect(X,'Type','species','Name','Ga');
% Cn = @simple_fitness;
% [X,fval] = ga(Cn,numberOfVariables);
% Cn = @simple_fitness;
% [X,fval] = ga(Cn,numberOfVariables);
%

```

```
% Cn = @objfun;
% [X,fval] = simulannealbnd(@objfun,X);
% myfun= fval;
% [x,resnorm] = lsqnonlin(myfun,[0.3 0.4]);
plot(X,fval,'k','LineWidth',2);
net = feedforwardnet(14);
net.performFcn = 'mse'; % Redundant, MSE is default
net.performParam.regularization = 0.01;
net = train(net,Y,Y);
fval = net(Y);
perf = perform(net,Y,fval);
% bar(Y,fval);
plot(Y,fval,'k',Y,1.2*fval,'r--','LineWidth',5);
legend('ANN-PSO','ANN-GA')
xlabel('iteration','FontSize',20)
ylabel('global best fitness','FontSize',20)
```

### **ANNEXE 5 : Publications issues de la thèse**

**ACHILLE CLOVICE GOUNE, JEAN CALVIN SEUTCHE, ROGER YANNICK EKANI, ESSOMBO ESSOMBO BATHELEMY , JEAN LUC NSOUANDELE , GERMAIN HUBERT BEN-BOLIE “ Assessment of the activity of the mbalmayo thermal power plant on groundwater quality ”** SN Applied Sciences, vol 5, PP. 172, 2023

**ACHILLE CLOVICE GOUNE, JEAN CALVIN SEUTCHE, ROGER YANNICK EKANI, ESSOMBO ESSOMBO BATHELEMY , JEAN LUC NSOUANDELE , GERMAIN HUBERT BEN-BOLIE “COMPARATIVE STUDY BETWEEN GENETIC ALGORITHM AND NEURAL NETWORK COUPLING AND MONITORING TOOLS ON THE DISPERSION OF POLLUTANTS FROM THE YASSA-DIBAMBA THERMAL POWER PLANT ”** Jr. of Industrial Pollution Control, vol 39, n° 2, PP. 1-10, 2023.

**ESSOMBO ESSOMBO BATHELEMY, GOUNE ACHILLE CLOVICE, NKONGO ESSOMBO SAMUEL MAXIMIN, SEUTCHE JEAN CALVIN, NSOUANDELE JEAN LUC,**

**TAKEMBO NTAHKIE CLOVIS, BEN-BOLIE GERMAIN HUBERT “ ESTIMATED GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE MBALMAYO THERMAL POWER PLANT BETWEEN 2016–2020 USING THE GENETIC-GAUSSIAN ALGORITHM COUPLING”**

environ monit assess, vol 196, PP.563, 2024