

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix Travail Patrie

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES

\*\*\*\*\*

CENTRE DE REHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE/  
SCIENCES TECHNOLOGIES ET  
GEOSCIENCES (CRFD/STG)

\*\*\*\*\*

URFD : Physiques et Applications

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

\*\*\*\*\*

Email: crfd stgauy1.uninet.cm

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace Work Fatherland

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTY OF SCIENCE

\*\*\*\*\*

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCES TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES (CRFD/STG)

\*\*\*\*\*

URFD: Physiques et Applications

\*\*\*\*\*

DEPARTMENT OF PHYSICIS

\*\*\*\*\*

E-mail: crfd stgauy1.uninet.cm



## LABORATOIRE D'ENERGIE DES SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

### MODELISATION INVERSE DES SOURCES PONCTUELLES ET D'EMISSIONS SURFACIQUES DANS LES CENTRALES THERMIQUES À CONSOMMATION DU FIOUL AU CAMEROUN POUR UNE ETUDE DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES A L'ECHELLE REGIONALE : CAS DE LA REGION DU CENTRE-CAMEROUN

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

Option : Energie et Environnement

Par :

ESSOMBO ESSOMBO BATHÉLÉMY

Matricule : 12W0700

Master of Science en Physique

Sous la direction de :



**NSOUANDELE Jean Luc**

Professeur, Université de Douala/ENSPD

**BEN-BOLIE Germain Hubert**

Professeur, Université de Yaoundé I

Année Académique 2023-2024



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
DEPARTMENT OF PHYSICS

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

Nous, Professeur DJUIDJE KENMOE Germaine, Professeur EFFA Joseph Yves et Professeur NJANDJOCK NOUCK Philippe, respectivement Examineurs et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur ESSOMBO ESSOMBO Bathélémy, Matricule 12W0700, préparée sous la direction du Professeur BEN-BOLIE Germain Hubert et du Professeur NSOUANDELE Jean Luc, intitulée: « MODELISATION INVERSE DES SOURCES PONCTUELLES ET D'EMISSIONS SURFACIQUES DANS LES CENTRALES THERMIQUES A CONSOMMATION DU FIOUL AU CAMEROUN POUR UNE ETUDE DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES A L'ECHELLE REGIONALE : CAS DE LA REGION DU CENTRE-CAMEROUN », soutenue le 31 Janvier 2025, 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 17 FEB 2025

Examineur

Le Président du jury

*Ok att*  
*Prof. Djuidje Kenmoe Germaine*  
*Depo Univa*



Le Chef de Département de Physique

Le Chef de  
Département

*Jean-Marie Bienvenu*  
Professeur

*Njandjock Nouch Philippe*

## Dédicace

À ma famille

## Remerciements

Je remercie tout d'abord l'Éternel **Dieu** Tout Puissant pour le souffle de vie et tous les bienfaits qu'il m'accorde chaque jour, car c'est par sa grâce et sa volonté que cette thèse trouve son existence.

La recherche présentée ici est le fruit d'un travail personnel durant lequel de nombreuses personnes sont intervenues. Elles sont ici chaleureusement remerciées.

- Mon initiateur, mon parent académique, le feu professeur **BEGUIDE BONOMA†**, Professeur titulaire à l'École Normale Supérieure de Yaoundé I, celui qui m'a donné l'ouverture d'esprit, m'a inculqué l'engouement de la recherche permanente, merci professeur et que le seigneur vous accorde un repos éternel ;
- Mon directeur de thèse, le Professeur **NSOUANDELE Jean Luc**, enseignant à l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Douala (ENSPD) pour m'avoir proposé ce sujet de thèse, pour le travail acharné ainsi que le sens permanent de la recherche qu'il a su m'insuffler ;
- Mon co-directeur de thèse, le Professeur **BEN-BOLIE Germain Hubert**, enseignant à l'Université de Yaoundé I, merci de m'avoir suivi tout au long de ce travail ;
- Les enseignants du département de physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour leurs participations à l'organisation des stages académiques et séminaires qui nous ont permis d'asseoir nos connaissances ;
- Je remercie le Professeur **OWONO OWONO Luc Calvin**, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I et par ailleurs Coordonnateur de l'Unité de Recherche et de Formation Doctorale de Physique et Applications de ladite Université ;
- J'adresse toute ma reconnaissance au Professeur **NDJAKA Jean Marie**, Chef du Département de Physique à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour les encouragements et les multiples conseils qu'il m'a prodigués, ainsi que tous les enseignants de ce département pour la formation reçue depuis mon admission à l'Université de Yaoundé I ;

- A mes jurys de soutenance : Pr. NJANDJOCK NOUCK Philippe ; Pr. DJUIDJE KENMOE Germaine ; Pr. EFFA Joseph Yves et le Pr. HONA Jacques pour avoir examiné ce travail et présidé le jury ;
- Pr. **SIMO Élie** Chef du Laboratoire d’Energie, des Systèmes Electriques et Electroniques (LESEE) ;
- J’exprime ma gratitude aux enseignants et associés du Laboratoire d’Energie, des Systèmes Electriques et Electroniques (LESEE), notamment les Professeurs et Docteurs **donc les noms suivent : NJOMO Donatien ; ESSIMBI ZOBO Bernard ; BODO Bertrand ; BIYA MOTTO ; OBOUNOU Marcel† ; TCHAWOUA Clément ; WOUAFO Paul et aux EDONGUE Hervé ; Docteurs FENDZI Emmanuel et KAMENI Modeste, YANDJIMAIN Justine** pour la qualité des enseignements reçus, leurs conseils et surtout pour leur disponibilité ;
- A l’ancien directeur général d’Eneo **NANA KONTCHOU** pour la confiance placée en ma modeste personne me permettant d’effectuer un stage académique dans sa structure ;
- Mon encadreur professionnel : **M. GUY KOM NOUMSI**, Chef de la Centrale thermique d’OYOM-ABANG pour la disponibilité et le désir de transmettre son savoir ;
- Tout le personnel d’Eneo, en particulier **M. NFANKWE Patrice ; M. Gustave**, pour les sages conseils et les encouragements qu’ils n’ont cessé de me prodiguer durant mon stage ;
- Aux Docteurs **SEUTCHE NDIZE Jean-Calvin ; TAKEMBO NTAHKIE Clovis ; NGO Jean Daniel et OWONO AMOUGOU Olivier** qui ont joué plusieurs rôles dans l’élaboration de cette thèse, ils ont été des grands frères, des aînés qui m’ont permis de voir le cycle recherche dans un sens prometteur et de clôturer ma thèse ;
- À mes frères et sœurs : **YEPPE ESSOMBO Sarah ; NKONGO ESSOMBO Samuel ; MILOKO ESSOMBO Jean-Pierre ; ESSOLE ESSOMBO Cécile ; NZOWA ESSOMBO Thérèse† ; NKWENTY ESSOMBO Emmanuel ; ENDALE ESSOMBO Agnès et NGON ESSOMBO Marie-Claire** pour leurs encouragements ;
- À mon épouse **NOUAZI DAHIE Olive Vannelle** et ma fille **YEPPE ESSOMBO Eva Lumière** pour votre soutien multiforme et le fait d’être à mes côtés à tout moment pendant ce moment délicat et déterminant. Que Dieu vous bénisse abondamment et vous donne un avenir meilleur à mes côtés ;

- À mes oncles et tantes sa **MAJESTE MBONDJO NKONGO Émile<sup>†</sup>**, **ESSAM NKONGO Marcel**, **ESSANGA NKONGO Adolphe** et **YOUKA NKONGO Christine<sup>†</sup>** pour leur soutien immense de parent ;
- À mes cousins et cousines **EBOUEL ECKO Trésor** ; **EPANDA Maximin** ; **SEMA ESSANGA Gertrude ...** pour votre grand soutien multiforme ;
- Aux époux et épouses de mes grands frères et grandes sœurs, **DIMALE Samuel** ; **NTOUBA Pecos** ; **OYONO William** ; **ESSENGUE** ; **Mme NKONGO Alvine** ; **Mme MILOKO Rose** ; **Mme NKWENTY Cynthia** pour leurs actes d'accompagnement à mon égard ;
- À tous mes enfants **ESSOMBO Dimitri** ; **EBONDJE Naomie** ; **YOUKA Joyce EBONDJE Samuella** ; **ESSOMBO Stéphane** ; **NKWETTE Lidvine** ; **BAKAM Grace** ; **DIMENE Ruthe** et **MALEA Emmanuelle ....** Retrouvez ici l'expression de ma plus grande reconnaissance ;
- Une reconnaissance particulière à **ESSON Ferdinand**, **MBATCHOU Sylvestre**, et **Madame MATANTEYOU Yvette** pour leurs modestes conseils et encouragements
- Une reconnaissance particulière au Commissaire **NJOYA Hervé**, chef des infrastructures de la DGSN du Cameroun qui a pu me prendre comme son fils et accepté de m'encourager financièrement ;
- Mes amis : **Dr. GOUNE Achille**, **DOGMO Narcisse**, **KEUTCHAMI Joseph**, et **NGOLLE Stéphane**, vous qui avez toujours cru en moi ;
- À tous mes camarades de la 63<sup>è</sup> promotion de l'ENS de Yaoundé I ;
- À tous mes Camarades de la filière physique de l'Université de Yaoundé I en particulier tous mes camarades du LATEE.

Enfin je remercie tous ceux et celles qui, de près ou de loin ont eu une influence bénéfique quant à l'aboutissement de cette formation et dont je n'ai pas pu mentionner leurs noms ici.

## Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	x
Liste des figures.....	xi
Abréviations.....	xv
Résumé.....	xviii
Abstrat.....	xx
Introduction Générale.....	2
CHAPITRE 1 : Revue de la Littérature.....	5
Introduction.....	6
1.1 Généralités sur la zone d'étude.....	6
1.1.1 Milieu physique.....	7
1.1.1.1 Aspect météorologique.....	7
1.1.1.2 L'air environnant dans la région du centre Cameroun.....	10
1.2 Types de centrales thermiques dans le monde et localisation des Centrales thermiques au Cameroun.....	11
1.2.1 Types de centrales thermiques dans le monde.....	11
1.2.1.1 Les Centrales Classiques (CC).....	12
1.2.1.2 Centrale Thermique à Lit Fluidisé Circulant (CTLFC).....	14
1.2.2 Localisation géographique des Centrales thermiques au Cameroun.....	14
1.3 La Pollution atmosphérique.....	17
1.3.1 Définition.....	17
1.3.2 Historique de la pollution.....	19
1.4 Modélisation inverse.....	22
1.4.1 Principe général et historique.....	22
1.4.2 Les différentes méthodes déjà utilisées dans le principe de la modélisation inverse des polluants dans l'atmosphère.....	23
1.4.3 Les polluants inversées.....	27

1.4.4 Les limites des méthodes inverses et échelles d'application .....	29
<b>1.5 Potentiel énergétique Camerounais ; Présentation des centrales thermiques à fuel dans la région du centre-Cameroun .....</b>	<b>29</b>
1.5.1 Potentiel énergétique Camerounais .....	29
1.5.2 Présentation et description des centrales thermiques à fuel dans la région du centre-Cameroun.....	33
1.5.2.1 Présentation sommaire.....	33
1.5.2.3 Le temps de fonctionnement et consommation.....	34
1.5.2.4 Aperçu de la technologie et procédure générale de production .....	35
<b>1.6 Les caractéristiques du fioul.....</b>	<b>39</b>
<b>1.7 La combustion du fioul .....</b>	<b>40</b>
1.7.1 Généralité sur le fioul.....	41
1.7.2 Processus de production .....	43
1.7.2.1 Le combustible.....	44
1.7.2.2 Le comburant.....	45
1.7.2.3 Proportions relatives entre le combustible et comburant.....	45
1.7.3 Moteur WÄRTSILÄ Vasa 18V32LN.....	48
<b>1.8 Généralités sur l'étude des Performances Environnementales (PE) : Concept et mesure .....</b>	<b>49</b>
1.8.1 Définition du concept de Performance Environnementale.....	50
1.8.2 Composantes principales indispensables pour évaluer la Performance Environnementale dans les centrales thermiques à Fioul au Cameroun.....	52
1.8.3 Les impacts générant les activités dans la centrale thermique à fioul .....	54
1.8.3.1 Impact des activités sur l'eau souterraine et surface .....	54
1.8.3.2 Impact sur la qualité de l'air .....	55
1.8.3.3 Impact des activités sur la biodiversité.....	55
1.8.3.4 Impact des activités sur le sol .....	56
1.8.3.5 Impact des activités sur le milieu humain .....	56
1.8.3.6 Impact cumulatif .....	57
1.8.3.7 Impact des activités sur la santé.....	57
<b>Conclusion.....</b>	<b>60</b>
<b>CHAPITRE 2 : Matériel et Méthodes .....</b>	<b>66</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>67</b>
<b>2.1 Matériels et Méthodologies de base des inventaires d'émissions industrielles .....</b>	<b>68</b>
<b>2.1.1 Inventaires des émissions atmosphériques issues des sites industriels .....</b>	<b>68</b>

2.1.1.1 Méthodes d'évaluation de la consommation du fioul .....	68
2.1.1.2 Méthode d'estimation des émissions de GES hors fluorés .....	70
2.1.1.3 Méthode d'estimation des émissions des polluants .....	73
2.1.2 L'analyse des fumées par des appareils appropriés .....	77
<b>2.2 Dispersion atmosphérique : Des processus à la modélisation numérique .....</b>	<b>77</b>
<b>2.2.1 Caractéristique mathématiques du phénomène de la dispersion atmosphérique .....</b>	<b>77</b>
2.2.1.1 Concentration locale d'une source .....	78
2.2.1.2 Équation de base du transfert de matière .....	79
<b>2.2.2 Description du phénomène de dispersion .....</b>	<b>79</b>
2.2.2.1 Phénomène de diffusion : loi de Fick .....	80
2.2.2.2 Phénomène d'advection-convection de la matière .....	84
2.2.2.3 Équation générale de dispersion des polluants dans l'atmosphère .....	86
<b>2.2.3 Dispersion atmosphérique : Des processus à la modélisation numérique .....</b>	<b>87</b>
2.2.3.2 Les modèles eulériens à grande échelle et à méso-échelle .....	92
2.2.3.3 Les modèles gaussiens .....	92
2.2.3.4 Les modèles lagrangiens .....	95
2.2.3.5 Les modèles de mécanique des fluides à l'échelle locale/urbaine .....	96
<b>2.2.4 Hypothèses de validation et choix de la méthode de résolution du modèle mathématique de la dispersion .....</b>	<b>97</b>
2.2.4.1 Hypothèse méthodique .....	97
2.2.4.2 Le principe du modèle gaussien .....	98
2.2.4.3 Avantages et inconvénients du modèle .....	99
2.2.4.4 Formule de panache gaussien .....	99
2.2.4.5 Développement global du modèle de dispersion des polluants dans l'environnement ..	100
2.2.4.6 Hypothèse de résolution du problème .....	101
2.2.4.7 Discrétisation du problème : Équation (2.54) .....	102
<b>2.3 Méthode par Modélisation inverse .....</b>	<b>106</b>
2.3.1 Estimation des sources par Modélisation inverse .....	106
2.3.2 Équation d'observation .....	108
2.3.3 Observabilité du système .....	109
<b>2.3.4 Conception, programmation et positionnement des capteurs de polluant .....</b>	<b>110</b>
2.3.4.1 Conception électronique du capteur : Utilisation du logiciel Fritzing .....	111
2.3.4.2 Programmation du capteur : logiciel Arduino UNO .....	112

2.3.4.2	Caractéristiques métrologiques du capteur utilisé .....	113
2.3.4.3	Présentation du couplage Algorithme génétique-Gaussien (GA-Gaussian).....	114
2.4	Méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) liée aux centrales thermiques de la région du centre Cameroun .....	119
2.4.1	Définitions des objectifs .....	119
2.4.1.1	Définition .....	119
2.4.1.2	Objectifs .....	120
2.4.2	Définition des champs d'étude et des frontières du système et hypothèses retenues .....	121
2.4.2.1	Unité fonctionnelle .....	121
2.4.2.2	Frontières du système et hypothèses retenues .....	121
2.4.3	Méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impacts .....	123
2.4.4	Logiciel utilisé : OpenLCA .....	127
	Conclusion.....	129
	CHAPITRE 3 : Résultats et discussion .....	131
	Introduction .....	132
3.1	Production énergétique dans les sites industriels de la région du Centre-Cameroun.....	132
3.1.1	Production énergétique dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I (CTO I) .....	133
3.1.2	Production énergétique dans la centrale thermique de Mbalmayo (CTM) .....	135
3.2	Résultats d'analyse d'émission des gaz et polluants.....	137
3.2.1	Estimations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) dans les sites industriels de la région du Centre-Cameroun .....	138
3.2.1.1	Estimations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) dans la Centrale Thermique d'Oyom-Abang I.....	138
3.2.1.2	Estimations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) dans la Centrale Thermique de Mbalmayo (CTM).....	142
3.2.2	Estimations des émissions des Polluants dans les sites industriels de la région du Centre-Cameroun.....	146
3.3	Identification des sources polluantes .....	149
3.3.1	Identification de la source polluante dans le domaine bidimensionnel .....	149
3.3.2	Identification de la source polluante dans le domaine tridimensionnel.....	153
3.3.3	Sources identifiées .....	158
3.4	Estimation des erreurs de la modélisation inverse pour les gaz à effet de serre dans les centrales thermiques : cas de la CTO I.....	160
3.4.1	Émissions simulées dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I (CTO I).....	160

3.4.2 Comparaison des émissions observées et simulées des cinq premiers jours du mois de décembre dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I .....	163
3.5 Résultat lié à l'évaluation des impacts pour une performance environnementale .....	165
3.5.1 Aperçu des rapports sur les performances environnementales entre 2016 et 2022.....	165
3.5.2 Évaluation des impacts environnementaux.....	166
3.5.2.1 Effet de serre .....	167
3.5.2.2 Acidification .....	169
3.5.2.3 Épuisement des ressources abiotiques .....	170
3.5.2.4 Analyse de sensibilité : Influence des distances de transport sur les émissions de GES	170
3.6- Mesures d'atténuations.....	173
Conclusion.....	178
Conclusion générale et perspectives.....	176
ANNEXES.....	193
ANNEXE A : PRESENTATION DES DONNEES .....	193
Annexe B : Centrales thermiques isolées et exploitées par ENEO.....	194
ANNEXE C : Les Base de données .....	196
ANNEXE D : Indice du fioul utilisé et proportion entre le combustible et le comburant .....	196
ANNEXE E : Table recevism de concentration des GES et polluants observées .....	198
PUBLICATIONS ISSUES DE CETTE THESE .....	194

## Liste des tableaux

TABLEAU 1: COMPOSITION CHIMIQUE DE L' AIR SEC .....	11
TABLEAU 2: ÉTUDE DE MODELISATION DES ESPECES INVERSEES ET MESUREES A L'ECHELLE GLOBALE .....	28
TABLEAU 3: ÉTUDE DE MODELISATION DES ESPECES INVERSEES ET MESUREES A L'ECHELLE CONTINENTALE .....	28
TABLEAU 4: ÉTUDE DE MODELISATION DES ESPECES INVERSEES ET MESUREES A L'ECHELLE REGIONALE .....	28
TABLEAU 5: : CENTRALES THERMIQUES (LFO) DU RIS 2010 (SEUTCHE, 2021).....	32
TABLEAU 6: CENTRALES THERMIQUES (HFO) DU RIS 2010 (SEUTCHE, 2021).....	32
TABLEAU 7: CENTRALES THERMIQUES (LFO) DU RIN 2010 (SEUTCHE, 2021).....	32
TABLEAU 8: CENTRALES THERMIQUES (LFO) DU RIE 2010 (SEUTCHE, 2021) .....	33
TABLEAU 9: CERTIFICATION DES CARACTERISTIQUES DU FIOUL. (GUIBET & JEAN-CLAUDE, 2006).....	42
TABLEAU 10: POURCENTAGE MASSIQUE DES ELEMENTS CHIMIQUES DU FIOUL (GUIBET & JEAN-CLAUDE, 2006).....	44
TABLEAU 11: POURCENTAGE MASSIQUE DES ELEMENTS COMPOSANTS LE FIOUL PROVENANT D'UN DEPOTAGE DE LA SONARA (SONARA, 2005).....	44
TABLEAU 12: VALEUR DES INDICES DES ELEMENTS CHIMIQUES DU FIOUL DE SONARA (SONARA, 2005) .....	45
TABLEAU 13: MODE DE TRANSFERT DES POLLUANTS (SEUTCHE, 2021) .....	58
TABLEAU 14: POUVOIR DE RECHAUFFEMENT GLOBAL DES GES DIRECT (HORS FLUORES) (GIEC, 2022) .....	72
TABLEAU 15: LES DIFFERENTES APPROCHES DE MODELISATION ET LEURS ECHELLES ASSOCIEES (WINAREK, 2012)....	88
TABLEAU 16: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU MODELE GAUSSIEN.....	99
TABLEAU 17: CATEGORIES D'IMPACTS PRISE EN COMPTE PAR LA METHODE CML BASELINE. (BENINI ET AL., 2014)..	125
TABLEAU 18: CATEGORIE D'IMPACT DE LA METHODE "CUMULATIVE ENERGY DEMAND. (BENINI ET AL., 2014) .....	126
TABLEAU 19: CATEGORIES D'IMPACTS POUR LA METHODE ReCiPe. (BENINI ET AL., 2014).....	126
TABLEAU 20: FACTEURS D'EMISSION MOYENS DE CO <sub>2</sub> ; CH <sub>4</sub> ET N <sub>2</sub> O DANS LES CENTRALES THERMIQUES AU CAMEROUN (FONTELLE, 2010) .....	138
TABLEAU 21: RECAPITULATIF DES EMISSIONS EMISSES SUR CINQ ANS DANS LA REGION DU CENTRE-CAMEROUN.....	149
TABLEAU 22: RECAPITULATIF DES EMISSIONS THEORIQUES OBSERVEES ET SIMULEES DES CINQ PREMIERS JOURS DU MOIS DE DECEMBRE 2018.....	164
TABLEAU 23: RESUME DES RESULTATS DES INCERTITUDES ASSOCIEES A CHACUN DES GAZ A EFFET DE SERRE DES CINQ PREMIERS JOURS DU MOIS DE DECEMBRE 2018.....	164
TABLEAU 24: RESULTAT D'ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX (METHODE CML 2001) .....	167
TABLEAU 25: ÉMISSION DES GES LORS DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITE POUR DIFFERENTS PAYS EN AFRIQUE ET EN EUROPE (MEUNIER, 2020).....	168
TABLEAU 26: CONTRIBUTION DES IMPACTS ACIDIFICATION DANS LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO.....	169
TABLEAU 27: IMPACT EPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES A LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO.....	170
TABLEAU 28: DIFFERENTS SCENARIO LIES AUX PARAMETRES TRANSPORT .....	171

## Liste des figures

FIGURE 1: LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA CENTRALE THERMIQUE OYOM-ABANG DANS LA VILLE DE YAOUNDE-CAMEROUN .....	8
FIGURE 2: LA COLLINE D'OYOM-ABANG DANS L'ARRONDISSEMENT DE YAOUNDE 7 REGION DU CENTRE-CAMEROUN .....	9
FIGURE 3: LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO (CTM) ET LA RESERVE FORESTIERE DE MBALMAYO .....	10
FIGURE 4: CENTRALE THERMIQUE A CHARBON. (SOURCE : WILLIAM, 12 JUILLET 2000) .....	12
FIGURE 5: CENTRALE THERMIQUE A MAZOUT. (SOURCE : LIGNE, 2002) .....	13
FIGURE 6: CENTRALE THERMIQUE A GAZ DE KRIBI. (SOURCE : GWENAËL, 1996 ; MINEE, 2012).....	14
FIGURE 7: IMAGE D'UNE CENTRALE THERMIQUE À LIT FLUIDISE CIRCULANT (HELE PIERRE, 2005).....	14
FIGURE 8: GEOLOCALISATION DES DEUX CENTRALES THERMIQUES A FIOUL DANS LA REGION DU CENTRE CAMEROUN .....	15
FIGURE 9: CARTOGRAPHIE COMBINEE DES CENTRALES THERMIQUES AU CAMEROUN (SOURCE : ENEO, 2018).....	16
FIGURE 10: ORDRES DE GRANDEUR DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES BASSES DE L'ATMOSPHERE (SOURCE : STULL, 1988) .....	18
FIGURE 11: ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA COUCHE-LIMITE (SOURCE : MENUT, 2003).....	19
FIGURE 12: TEMPS DE VIE DE QUELQUES ESPECES CHIMIQUES ET ECHELLE SPATIALE CORRESPONDANT ISSUS DANS CENTRALES THERMIQUES A FIOUL (SOURCE : PISON, 2005) .....	20
FIGURE 13: PRINCIPE DE LA MODELISATION INVERSE. CTM= CHEMISTRY TRANSPORT MODEL (ELBERN ET AL., 2000) .....	26
FIGURE 14: SCHEMA DE REGULATION DE LA SANAGA (EDC, LESEE, 2019) .....	31
FIGURE 15: : DISPOSITION GENERALE DU GROUPE PISTONS.....	36
FIGURE 16: ILLUSTRATION DE LA SALLE DES MACHINES DANS LES CENTRALES THERMIQUES.....	37
FIGURE 17: QUELQUES EQUIPEMENTS DE LA CENTRALE THERMIQUE .....	38
FIGURE 18: SYNOPTIQUE DE PROCEDURE DE PRODUCTION. (ENEO & CTO, SERVICE D'EXPLOITATION. ARCHIVE. YAOUNDE, 2018) .....	39
FIGURE 19: CENOSPHERES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE (SEUTCHE, 2021).....	43
FIGURE 20: BLOC MOTEUR DE CONFIGURATION V D'UN GROUPE WARTSILA VASA 18V32LN (WARTSILLA, 2021).....	49
FIGURE 21: DEVERSEMENT DES PRODUITS DANS LE MILIEU RECEPTEUR DU A UNE FUITE DANS L'ÉCHANGEUR EAU HUILE SORTANT PAR LA PURGE.....	54
FIGURE 22: PROCESSUS MULTI ETAPES DU DEVELOPPEMENT D'UN CANCER (SOURCE : DOUKI ET MAITRE, 2009) .....	60
FIGURE 23: INSTALLATION DU COMPTEUR EN AVAL DE LA POMPE (INSTITUT, 2000) .....	69
FIGURE 24: ORGANIGRAMME D'ESTIMATION DES QUANTITES D'ACTIVITE NON DISPONIBLES PAR NIVEAU GEOGRAPHIQUE (FONTELLE, 2006) .....	76
FIGURE 25: MODELE DE CAPTEUR KANE251 : ANALYSEUR DE FUMEE.....	77

FIGURE 26: ORIENTATION DU VECTEUR DENSITE D'UN COURANT DE DIFFUSION ..... 80

FIGURE 27: ILLUSTRATION DE L'ELEMENT VOLUMIQUE DE DIFFUSION ..... 82

FIGURE 28: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES LIENS ENTRE REALITE PHYSIQUE, DEVELOPPEMENT THEORIQUE ET SIMULATION INFORMATIQUES (PIERRE LAURET, 2014)..... 90

FIGURE 29: SCHEMA RESUME DES PROCESSUS PRIS EN COMPTE DANS LA DISPERSION DE POLLUANTS EN SITUATION ACCIDENTELLE..... 91

FIGURE 30: CAHIER DES CHARGES DU MODELE (SEUTCHE, 2021)..... 98

FIGURE 31: VUE D'ENSEMBLE DU CAPTEUR KANE251 CONÇUE A PARTIR DU LOGICIEL FRITZING ET INSTALLE DANS LA SALLE D'EXPLOITATION DANS LES SITES INDUSTRIELS ..... 112

FIGURE 32: CARTE ARDUINO ..... 113

FIGURE 33: LA CARTE ARDUINO LA PLUS UTILISEE EST LA CARTE ARDUINO UNO..... 113

FIGURE 34: LES PHASES D'UNE ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ISO 14040, 2006 ; NOUREDDINE HAJAJI ET AL., 2013)120

FIGURE 35: FRONTIERE DU SYSTEME DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE ..... 122

FIGURE 36: PROCESS D'UN LOGICIEL D'ACV ..... 127

FIGURE 37: INTERFACE DU LOGICIEL OPENLCA 1.11.0..... 128

FIGURE 38: PRODUCTION DE L'ELECTRICITE POUR DES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 DANS LA CENTRALE THERMIQUE DE LA D'OYOM-ABANG I- YAOUNDE AU CAMEROUN..... 133

FIGURE 39: CUMUL DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE DURANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 DANS LA CENTRALE THERMIQUE D'OYOM-ABANG I..... 135

FIGURE 40: PRODUCTION DE L'ELECTRICITE POUR DES ANNEES 2016, 2017, 2018, 2019 ET 2020 DANS LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO-YAOUNDE AU CAMEROUN ..... 136

FIGURE 41: CUMUL DE PRODUCTION DE L'ELECTRICITE DURANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ET 2018 DANS LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO..... 137

FIGURE 42: ÉMISSIONS DU CO<sub>2</sub> PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020..... 139

FIGURE 43: ÉMISSIONS DU CH<sub>4</sub> PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 ..... 141

FIGURE 44: ÉMISSIONS DU N<sub>2</sub>O PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020..... 141

FIGURE 45: ÉMISSIONS DU CO<sub>2</sub> PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 ..... 143

FIGURE 46: ÉMISSIONS DU CH<sub>4</sub> PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 ..... 144

FIGURE 47: ÉMISSIONS DU N<sub>2</sub>O PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020..... 145

FIGURE 48: ÉMISSIONS DANS LA CTO DES SOX ET DES NOX PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 :  
A) CONCENTRATION DES SOX DANS LA CTO I ; B) CONCENTRATION DES NOX DANS LA CTO I..... 146

FIGURE 49: ÉMISSIONS DANS LA CTO DES COV ET DES PM PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 :  
A) CONCENTRATION DES COV DANS LA CTO I ; B) CONCENTRATION DES PM DANS LA CTO I..... 147

FIGURE 50: ÉMISSIONS DANS LA CTM DES SOX ET DES NOX PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 :  
A) CONCENTRATION DES SOX DANS LA CTM ; B) CONCENTRATION DES NOX DANS LA CTM ..... 147

FIGURE 51: ÉMISSIONS DANS LA CTM DES COV ET DES PM PENDANT LES ANNEES 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 ET 2020 :  
A) CONCENTRATION DES COV DANS LA CTM ; B) CONCENTRATION DES PM DANS LA CTM..... 148

FIGURE 52: DISPOSITION DES CAPTEURS ET POSITION DES SOURCES DE POLLUTION DANS LES SITES INDUSTRIELS ..... 150

FIGURE 53: LE RESULTAT DE LA DETERMINATION DE L'EMPLACEMENT DE LA SOURCE PONCTUELLE DE POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE A UNE DISTANCE DE 400M DE DISPERSION DU POLLUANT OU DE GAZ..... 151

FIGURE 54: LE RESULTAT DE LA DETERMINATION DE L'EMPLACEMENT DE LA SOURCE PONCTUELLE DE POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE A UNE DISTANCE DE 380M DE DISPERSION DU POLLUANT OU DU GAZ ..... 151

FIGURE 55: LE RESULTAT DE LA DETERMINATION DE L'EMPLACEMENT DE LA SOURCE PONCTUELLE DE POLLUTION  
ATMOSPHERIQUE A UN INSTANT OU LE POLLUANT EST ISSU DE LA SOURCE ..... 152

FIGURE 56: IDENTIFICATION DE LA SOURCE POLLUANTE TRIDIMENSIONNELLE A UNE DISTANCE DE 350 M DE LA  
SOURCE ..... 153

FIGURE 57: LOCALISATION DE LA SOURCE POLLUANTE A 350 M DES CAPTEURS ..... 154

FIGURE 58: IDENTIFICATION DE LA SOURCE POLLUANTE TRIDIMENSIONNELLE POUR UNE DISPERSION DE 200 M DE LA  
SOURCE ..... 155

FIGURE 59: LOCALISATION DE LA SOURCE POLLUANTE A POUR UNE DISPERSION DE 200 M DE LA SOURCE..... 156

FIGURE 60: IDENTIFICATION DE LA SOURCE POLLUANTE DANS LE DOMAINE TRIDIMENSIONNELLE DU POLLUANT A LA  
SORTIE DIRECTE DE LA SOURCE ..... 157

FIGURE 61: LOCALISATION DE LA SOURCE POLLUANTE A POUR UNE DISPERSION DE 0 M DE LA SOURCE..... 158

FIGURE 62: SOURCE DE POLLUTION ATMOSPHERIQUE IDENTIFIEE PRISE PAR DES CAPTEURS A UNE DISTANCE DE 400 M  
..... 159

FIGURE 63: SOURCE DE POLLUTION ATMOSPHERIQUE IDENTIFIEE PRISE PAR DES CAPTEURS A UNE DISTANCE DE 220 M  
..... 160

FIGURE 64: ÉMISSIONS EN KG DES GES PENDANT LES CINQ PREMIERS JOURS DU MOIS DE DECEMBRE 2018..... 161

FIGURE 65: SIMULATION DU TRANSPORT DES GES DE LA JOURNEE DU 1<sup>ER</sup> DECEMBRE 2018 ISSUE DE LA CTO I : A)  
SIMULATION DU CO<sub>2</sub> , B) SIMULATION DU CH<sub>4</sub> , C) SIMULATION DU N<sub>2</sub>O..... 162

FIGURE 66: SIMULATION DU TRANSPORT DES GES DE LA JOURNEE DU 2 DECEMBRE 2018 ISSUE DE LA CTO I : A)  
SIMULATION DU CO<sub>2</sub> , B) SIMULATION DU CH<sub>4</sub>, C) SIMULATION DU N<sub>2</sub>O ..... 162

FIGURE 67: SIMULATION DU TRANSPORT DES GES DE LA JOURNEE DU 3 DECEMBRE 2018 ISSUE DE LA CTO I : A)  
SIMULATION DU CO<sub>2</sub>, B) SIMULATION DU CH<sub>4</sub>, C) SIMULATION DU N<sub>2</sub>O ..... 162

FIGURE 68: SIMULATION DU TRANSPORT DES GES DE LA JOURNEE DU 4 DECEMBRE 2018 ISSUE DE LA CTO I : A)  
SIMULATION DU CO<sub>2</sub>, B) SIMULATION DU CH<sub>4</sub>, C) SIMULATION DU N<sub>2</sub>O ..... 163

FIGURE 69: SIMULATION DU TRANSPORT DES GES DE LA JOURNEE DU 5 DECEMBRE 2018 ISSUE DE LA CTO I : A)  
SIMULATION DU CO<sub>2</sub>, B) SIMULATION DU CH<sub>4</sub>, C) SIMULATION DU N<sub>2</sub>O ..... 163

FIGURE 70: LE NOMBRE TOTAL D'INDICATEUR DE PERFORMANCE ENVIRONNEMENTAL RAPPORTES PAR LES DEUX  
CENTRALES THERMIQUES ENTRE 2016 ET 2022 ..... 166

FIGURE 71: CONTRIBUTION DES DIFFERENTS PROCESSUS AUX EMISSIONS DES GES ..... 169

FIGURE 72: DISTANCE DE LA SONARA AUX DIFFERENTS SITES INDUSTRIELS DE LA REGION DU CENTRE-CAMEROUN  
(CTO ET CTM) ..... 171

FIGURE 73: EFFET DES DISTANCES DE TRANSPORT SUR LES EMISSIONS DES GES..... 173

FIGURE 74 : EFFET DES DISTANCES DE TRANSPORT SUR LES EMISSIONS DES GES.....174

FIGURE 75 : TEMPERATURE DES GAZ A EFFET DE SERRE A L'INTERIEUR DE LA CHEMINEE.....175

FIGURE 76 : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DES FUMEEES SUR L'EVOLUTION DE LA  
CONCENTRATION DES GES DANS LA CHEMINE .....176

FIGURE 77 : INFLUENCE DU DIAMETRE DE LA CHEMINEE SUR LA CONCENTRATION DU GES.....177

FIGURE 78 : DECROISSANCE DE LA HAUTEUR DE LA CHEMINEE EN FONCTION DE LA  
CONCENTRATION DU GES.....177

FIGURE 79 : INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE LA CHEMINEE SUR LA CONCENTRATION DU GES....178

FIGURE 82 : INFLUENCE DE LA DISTANCE DE SECURITE SUR LA CONCENTRATION DU GES.....179

## Abréviations

### ➤ Acronymes

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ACM : Analyseurs de Correspondances Multiples ;

AES-SONEL ; Société Nationale d'Électricité du Cameroun (devenue Eneo) ;

ANOR : Agence des Normes et de la Qualité ;

BTS : Basse teneur en soufre ;

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière ;

CC : Centrale Classique ;

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques ;

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique ;

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer ;

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques ;

COV : composés organiques Volatils ;

COP : Conférence des Parties ;

CTC : Centrale Thermique à Charbon ;

CTM : Centrale Thermique de Mbalmayo ;

CTMa : Centrale Thermique à Mazout ;

CTG : Centrale Thermique à Gaz ;

CTLFC : Centrale Thermique à Lit Fluidisé Circulant ;

CTO : Centrale Thermique d'Oyom-Abang ;

EDC : Electricity Development Corporation ;

ENELCAM : Entreprise Nationale d'Électricité du Cameroun ;

Eneo : Energie of Cameroon ;

EPI : Équipement de protection individuelle ;

FE : Facteur d'émission ;

FOD ; fioul domestique ;

GES : Gaz à effet de Serre ;

GIEC : Groupe International sur l'Evolution du Climat ;  
 GPS : Global Positioning System ;  
 GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié ;  
 HFO : Fioul Lourd ;  
 Hab : Habitants ;  
 HTS : Haute teneur en soufre ;  
 HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ;  
 IFDD : Institut de la Francophonie pour le Développement Durable ;  
 KWh : Kilo Watt heure ;  
 LATEE : Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Énergie et de l'Environnement ;  
 LFO : Fioul Léger ;  
 MINEP : Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature ;  
 MINEE : Ministère de l'énergie et de l'eau ;  
 MJ : Méga Joule ;  
 MT : Moyenne Tension ;  
 OIN : Organisation Internationale de la Normalisation ;  
 OMS : Organisation Mondial de la Santé ;  
 OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement ;  
 ONU : Organisation des Nations Unies.  
 OYO I : Site d'Oyam-Abang I;  
 OYO II : Site d'Oyam-Abang II ;  
 PCI : Pouvoir calorifique inférieur ;  
 PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur ;  
 PDU : Plan de Déplacement Urbain ;  
 PE : Performance Environnementale ;  
 PI : Parc Industriel ;  
 PIB : Produit Intérieur Brut ;  
 PM : Matière Particulaire ;  
 PMB : Point Mort Bas ;  
 PMH : Point Mort Haut ;

PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère ;  
 PRG : Potentiel de réchauffement global ;  
 PRQA : Plan Régional de la Qualité de l'Air ;  
 RIN : Réseau Interconnecté Nord ;  
 RIS : Réseau Interconnecté Sud ;  
 SO.NA.RA : Société National de Raffinerie ;  
 SSE : Sud-Sud-Est ;  
 TBTS : Très Basse Teneur en Soufre ;  
 URE : Utilisation Rationnelle de l'Energie ;

➤ **Lettres et Symboles Grecs**

g/GJ: gramme par GigaJoule ;  
 g/m<sup>3</sup> : gramme par mètre cube ;  
 TJ : TétraJoule ;  
 Ppmv : Partie par millions ;  
 Ppbv : Partie par billions.

## Résumé

Dans ce travail, quelques moyens sont développés pour contrôler, évaluer et réduire les émissions dans l'atmosphère. Il sera question pour nous de retrouver les différentes sources d'émissions aveugles et définir à cet effet un plan de gestion environnemental.

Pour atteindre ces objectifs, des méthodes d'évaluations ont été utilisées pour évaluer ces entités en fonction du niveau d'industrialisation du Cameroun. Quant-aux modèles numériques, ils ont été utilisés pour modéliser la dispersion atmosphérique des polluants à partir de l'équation d'advection-diffusion. La méthode de modélisation inverse développée ici a pour principal but de reconstruire les sources ponctuelles et surfaciques et la présentation des méthodes d'estimation des erreurs à priori pour avoir un résultat sur la possibilité d'inversion des polluants. La méthode d'estimation des polluants est une méthode d'estimation empirique des polluants cadrant avec les normes iso du cadre industriel Camerounais de la détermination des émissions exactes en kg issues des centrales thermiques d'Oyom-Abang I (CTOI) et de Mbalmayo (CTM) durant les années 2016-2020. L'estimation empirique a fait apparaître moyenne journalière de 33,79 kg ; 98,13 kg et 26,38 kg respectivement pour le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), le méthane ( $CH_4$ ) et protoxyde d'azote ( $N_2O$ ).

En ce qui concerne la quantité d'électricité produite, nous pouvons noter qu'en 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020 nous avons respectivement 11264,123 kWh ; 8194,631 kWh ; 22018,608 kWh ; 10566,078 kWh et 12452,835 kWh pour la centrale thermique d'Oyom-Abang et 6173,453 kWh ; 5664,271 kWh ; 6255,271 kWh ; 6231,731 kWh et 5965,904 kWh pour la centrale Thermique de Mbalmayo. L'analyse, il ressort qu'en 2016 et 2017 nous avons une baisse de production par rapport à 2018. Vu ces quantités, il apparaît que les erreurs dans modélisation inverse de ces GES sont comprises [15,70%; 16,18%] pour le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) ; [16,18%; 16,99%] pour le méthane ( $CH_4$ ) et 16,18% pour le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ).

Quant à l'identification des polluants et gaz à effet de serre, les espèces polluantes qui se dispersent facilement dans l'atmosphère sont identifiées à partir de leurs concentrations mesurées en  $kg.m^{-3}$ . La mesure de la concentration des polluants émanant des sources ponctuelles de pollution à l'aide des capteurs a été faite en deux et en trois dimensions (2D et 3D) et les sources identifiées ont été représentées en trois dimensions (3D). Le modèle gaussien a été utilisé comme un modèle de bouffé pour obtenir la forme de la solution dans une échelle locale. Il en ressort que

la méthode gaussienne est une méthode fiable pour une étude de l'identification des sources de pollution à une échelle locale à cause de son domaine de simulation qui s'étend de 1 à 10 *km* et de ses applications qui se résument sur l'impact local et sur les risques industriels.

Afin de faire une évaluation des performances environnementales au sein de ces différents sites industriels, une analyse du cycle de vie (ACV) sera appliquée pour recenser les 15 impacts environnementaux engendrés lors de la production de l'électricité dans ces sites industriels à partir de la méthode IMPACT 2002+.

**Mots clés :** Pollution atmosphérique, Modélisation inverse, Modèle gaussien, Centrale thermique, Atmosphère, Environnement, Analyse du cycle de vie, Algorithme Génétique.

## Abstrat

Growing concern about environmental pollution from human activities at industrial sites is a major issue worldwide. According to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and the 6th IPCC report published on 20 March 2023, it is important to focus on the sources of polluting emissions rather than the consequences. Pollutants contribute effectively to the destruction of the environment. Several means will be developed to monitor, assess and reduce their presence in the atmosphere, to identify the various sources of indiscriminate emissions and to define an environmental management plan for this purpose. The method for estimating pollutants is the empirical method for estimating pollutants in line with the iso standards of Cameroon's industrial framework for determining exact emissions in Kg from the Oyom-Abang I (CTOI) and Mbalmayo (CTM) thermal power plants during the years 2016; 2017; 2018; 2019 and 2020. This method has been shown to be probable, i.e. a daily average of 33.79 kg, 98.13 kg and 26.38 kg respectively for carbon dioxide ( $CO_2$ ), methane ( $CH_4$ ) and nitrous oxide ( $N_2O$ ). As regards the quantity of electricity produced, we can note that in 2016; 2017; 2018; 2019 and 2020 we have respectively 11264.123 kWh; 8194.631 kWh; 22018.608 kWh; 10566.078 kWh and 12452.835 kWh for the Oyom-Abang thermal power plant and 6173.453 kWh; 5664.271 kWh; 6255.271 kWh; 6231.731 kWh and 5965.904 kWh for the Mbalmayo thermal power plant. From these results, it can be seen that production in 2016 and 2017 was lower than in 2018. Given these quantities, the errors in the inverse modelling of these GHGs are: [15,70%;16,18%] for carbon dioxide ( $CO_2$ ); [16,18%;16,99%] for methane ( $CH_4$ ) and 16,18% for nitrous oxide ( $N_2O$ ). As for the identification of pollutants and greenhouse gases, polluting species that disperse easily in the atmosphere are identified on the basis of their concentrations measured in  $kg.m^{-3}$ . The concentration of pollutants emanating from point sources of pollution was measured using sensors in two and three dimensions (2D and 3D), and the sources identified were represented in three dimensions (3D). The Gaussian model was used as a puff model to obtain the shape of the solution on a local scale. It was found that the Gaussian method is a reliable method for studying the identification of pollution sources on a local scale because of its simulation domain, which extends

from 1 to 10 km, and its applications, which are limited to local impact and industrial risk. In order to assess the environmental performance of its various industrial sites, a life cycle assessment (LCA) will be applied to identify the 15 environmental impacts generated during the production of electricity at the industrial sites using the IMPACT 2002+ method.

**Keywords:** Air pollution, Inverse modelling, Gaussian model, Thermal power plant, Atmosphere, Environment, Life cycle assessment, Genetic algorithm.





et polluants dans l’atmosphère dont l’origine reste incertaine au vu des travaux de recherche existant dans la littérature.

La préoccupation croissante concernant l’origine de la pollution environnementale dérivée d’activités anthropiques dans les sites industriels est un problème majeur et d’actualité dans le monde entier. Il sera donc important de s’intéresser à l’origine de ces différentes entités qui créent la pollution environnementale (Tchindjang et al., 2001 ; Bocquet et al., 2011 ; Essombo. , 2024). Le Cameroun est un pays situé en Afrique Centrale, au fond du golfe de Guinée. Il est limité au Nord par le Tchad, à l’Est par la République Centrafricaine, au Sud par le Congo, le Gabon et la Guinée Équatoriale, à l’Ouest par le Nigéria. Les activités exercées au sein du territoire contribuent à la dégradation de l’atmosphère et à la non préservation de la faune et de la flore (Eneo, 2018 ; Seutche, 2021 ; Ministère de l’Énergie et de l’Eau, 2020, Goune et al., 2023). Cette situation complexe et préoccupante nous a poussé à axer cette étude sur le thème « **Modélisation inverse des sources ponctuelles et d’émissions surfaciques dans les centrales thermiques à consommation du fioul au Cameroun pour une étude des performances environnementales à l’échelle régionale : cas de la région du centre-Cameroun** » ; l’objectif général est « **Comment caractériser les différentes sources de pollutions ( polluants et gaz à effet de serre) issus des centrales thermiques à fioul dans la région du centre Cameroun pour une étude de la performance environnementale** ». C’est ce contexte que les objectifs suivants ont été définis pour cette thèse :

- Identification des sources polluantes issues de la CTO et de la CTM ;
- Estimation des erreurs dans la modélisation inverse du rejet accidentel des GES dans l’atmosphère : application de la reconstruction des termes sources ;
- Déterminer les zones impactées à court terme, et à long terme afin d’évaluer leur contamination et proposer les zones d’évacuation éventuelle des populations ;
- Évaluer la performance de la centrale en termes d’impact environnemental.

Cette thèse a pour cadre la pollution atmosphérique à l’échelle régionale en vue d’une performance environnementale, raison pour laquelle notre travail sera reparti en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature. Nous présenterons l’intérêt et les fondamentaux scientifiques de l’étude. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du matériel et des méthodes utilisées pour trouver ces différents résultats escomptés au sein des deux

## Introduction Générale

centrales thermiques. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats d'estimations des polluants et de simulation des modèles présentés, leur analyse et leur discussion en rapport avec les mesures expérimentales.

Une conclusion générale et des perspectives détaillées boucleront notre travail.

# **CHAPITRE 1 : Revue de la Littérature**

## Introduction

Depuis 1988, le GIEC organise chaque année des conférences pour la préservation de la nature et la lutte contre le changement climatique. La COP 21 a permis de donner les directives et différentes solutions permettant de mieux vivre sur notre planète en maintenant le niveau du réchauffement global en dessous de 1,5°C par rapport à l'ère préindustriel. Toutes ces mesures sont prises en raison du fait que les activités faites par l'homme à la surface de la terre en émettant en quantité importante les GES et polluants dans l'atmosphère contribuent efficacement à la perturbation saisonnière et l'augmentation du réchauffement de la planète.

Le Cameroun en particulier qui fait partie des 196 membres du GIEC (GIEC, 2022), subit le réchauffement climatique. L'une des activités effectuées au sein de son territoire est la production et l'approvisionnement en énergie qui se fait à 13% (Eneo, 2018) par des centrales thermiques donc une fonctionne à gaz et deux fonctionnant à fioul lourd et léger dans la région du Centre-Cameroun. En effet, la production de cette énergie à partir de la combustion du fioul dans les moteurs de marque Warsila Vasa18V32LN pollue grandement l'environnement.

Ce chapitre abordera une revue générale bibliographique sur la composition chimique de l'air , des mouvements que subissent des particules émises lors de la combustion du fioul et enfin une revue sur des performances environnementales par des méthodes appropriées.

### 1.1 Généralités sur la zone d'étude

La description de la zone d'étude a pour objectif d'obtenir une connaissance adéquate des sensibilités environnementales ou des composantes qui risquent d'être affectées par les opérations du projet. Dans cette partie, il est question de décrire les composantes physiques, biophysiques, géophysiques et sociales de la région du centre-Cameroun plus précisément les centrales thermiques de Mbalmayo (CTM) et d'Oyom-Abang (CTO). Cette description de l'état initial a été réalisée à partir des informations collectées selon la démarche suivante:

- Une étude bibliographique au cours de laquelle, différents documents ont été consultés et lus ; à partir duquel la synthèse de ces documents fait foi de la quintessence de ce travail ;

- Une visite technique sur le site en juillet 2015 monitorés par des agents Eneo qualifiés dans leurs tâches et qui nous ont permis d’avoir une connaissance optimale sur des activités menées au sein de l’entreprise Eneo ;
- Une visite technique dans le site de la centrale thermique d’Oyom-Abang en tant que stagiaire dans le cadre d’un stage académique en Master II du 15 Octobre au 15 Décembre 2018 pour une durée de deux mois ;
- Une visite technique dans le site de la centrale thermique de Mbalmayo en tant que stagiaire dans le cadre d’un stage de recherche Doctorale du 20 Janvier au 20 Mars 2020 pour une durée de deux mois.
- Plusieurs colloques et séminaires de travail supervisés par les professeurs NSOUANDELE Jean Luc et BEN-BOLIE Germain Hubert ainsi que le professeur SIMO Elie (chef du laboratoire de l’énergie et environnement), dans le but de recadrer les idées innovantes et de rendre plus intéressant ce travail

## **1.1.1 Milieu physique**

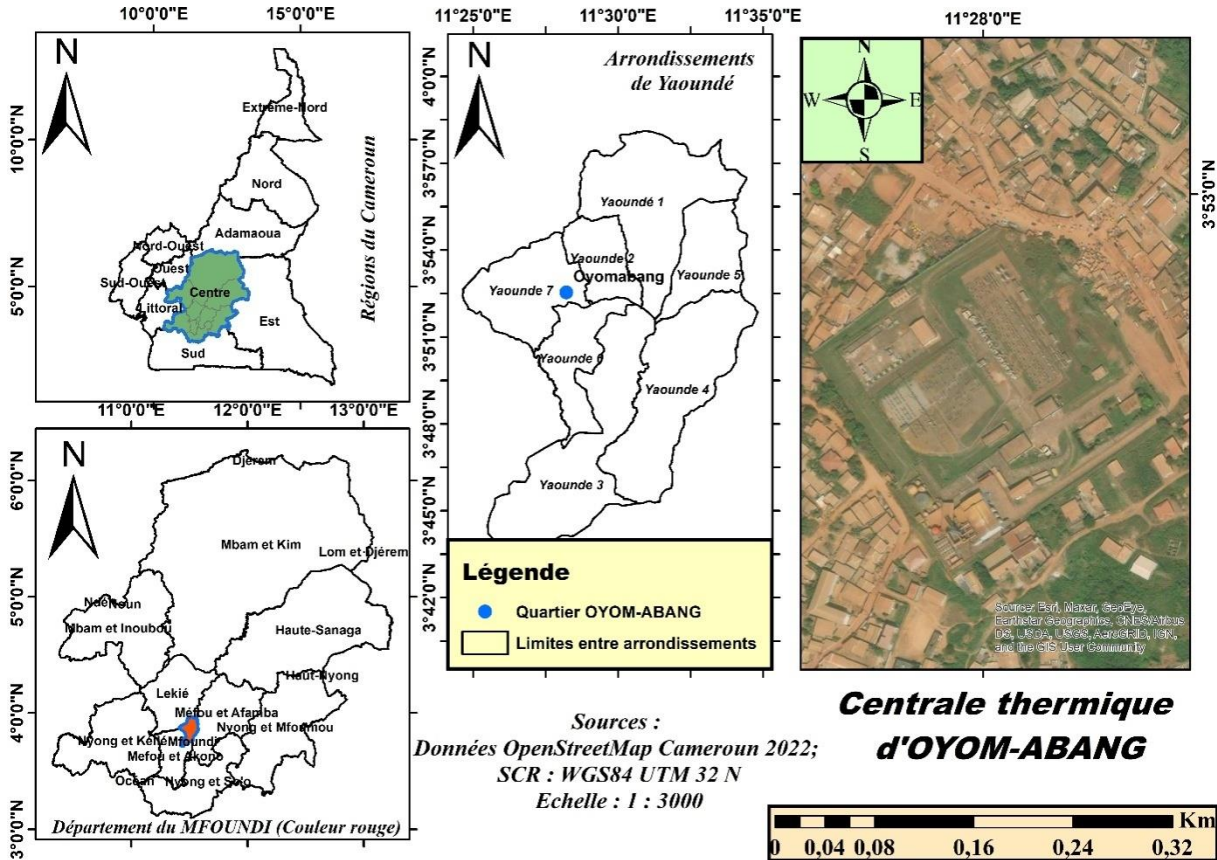
### **1.1.1.1 Aspect météorologique**

- **Centrale Thermique d’Oyom-Abang (CTO)**

Le site de la CTO présente l’aspect d’une plateforme située à environ 775 m au-dessus du niveau de la mer. La colline d’OYOM-ABANG (Figure 2), localisée à l’ouest de la ville de Yaoundé dans le bassin versant de la MEFOU, culmine à environ 850 m d’altitude ; elle est limitée au sud par l’ABIERGUE, affluent de la MEFOU, coulant à 705 m d’altitude. Cette colline au sommet grossièrement arrondie est dissymétrique ; son haut de versant à pente forte (20 à 40 %) auquel fait suite un bas versant à pente plus faible (2 à 20 %) lui donnent un profil convexo-concave.

Elle fait partie du grand ensemble de massifs montagneux à versant abrupt à juxtaposition de dômes rocheux marquant le Nord-Ouest de la région de Yaoundé. Les bas des versants sud et ouest à pente faible sont plus anciennement peuplés que le haut des versants à pente forte. L’occupation s’est faite progressivement par destruction de la forêt primitive du bas vers le sommet de la colline. La figure 1 illustre l’occupation actuelle autour du site, la colline est entièrement colonisée avec

essentiellement des maisons d’habitation en bas de versant jusqu’en haut, mais aussi une juxtaposition des maisons d’habitation et des champs de cultures vivrières vers le sommet.



**Figure 1: Localisation géographique de la Centrale thermique OYOM-ABANG dans la ville de Yaoundé-Cameroun**

Les formations superficielles essentiellement ferrallitiques, mais jeunes et fragiles, sont relativement peu épaisses comparées à celles des collines plus basses généralement cuirassées. Sol mince entre de nombreux blocs rocheux. La roche est un gneiss à deux micas, à grenat et à disthène. Dans ce sol, d’une épaisseur généralement inférieure à un mètre, un horizon brun sombre organo-minéral surmonte un horizon d’altération au contact de la roche gneissique. Les sols des versants présentent de bas en haut, quatre horizons au-dessus du substratum gneissique : un horizon d’altération grisâtre et meubles sableux aux ponctuations rouges violacées, jaunes ou blanchâtres, dans lequel la structure de la roche mère est conservée. Vers le haut, cette structure s’estompe, l’horizon devient de plus en plus rouge, argilo-limoneux (localisation, 2012) ; un horizon graveleux meubles à sables et graviers de quartz et à rares nodules un horizon argileux rouge meuble ; un

horizon brun sombre organo-minéral superficiel. Du haut vers le bas de versant l'horizon graveleux disparaît, tandis que l'horizon argileux rouge devient très épais (plus de 6m).

Le climat dans la région est de type équatorial à deux saisons de pluie (de mars à juin et d'août à novembre). La pluviosité est donc de type bimodal, la hauteur moyenne des précipitations annuelles est de 1700 mm et la température moyenne mensuelle est élevée (27,1°C). Les pluies dans la région ont un potentiel érosif important et en définitive une agressivité annuelle importante. La prospection générale de cette colline a été effectuée du Sud au Nord, à partir du bas de versant jusqu'au sommet pour observer les différents indicateurs de l'érosion hydrique.

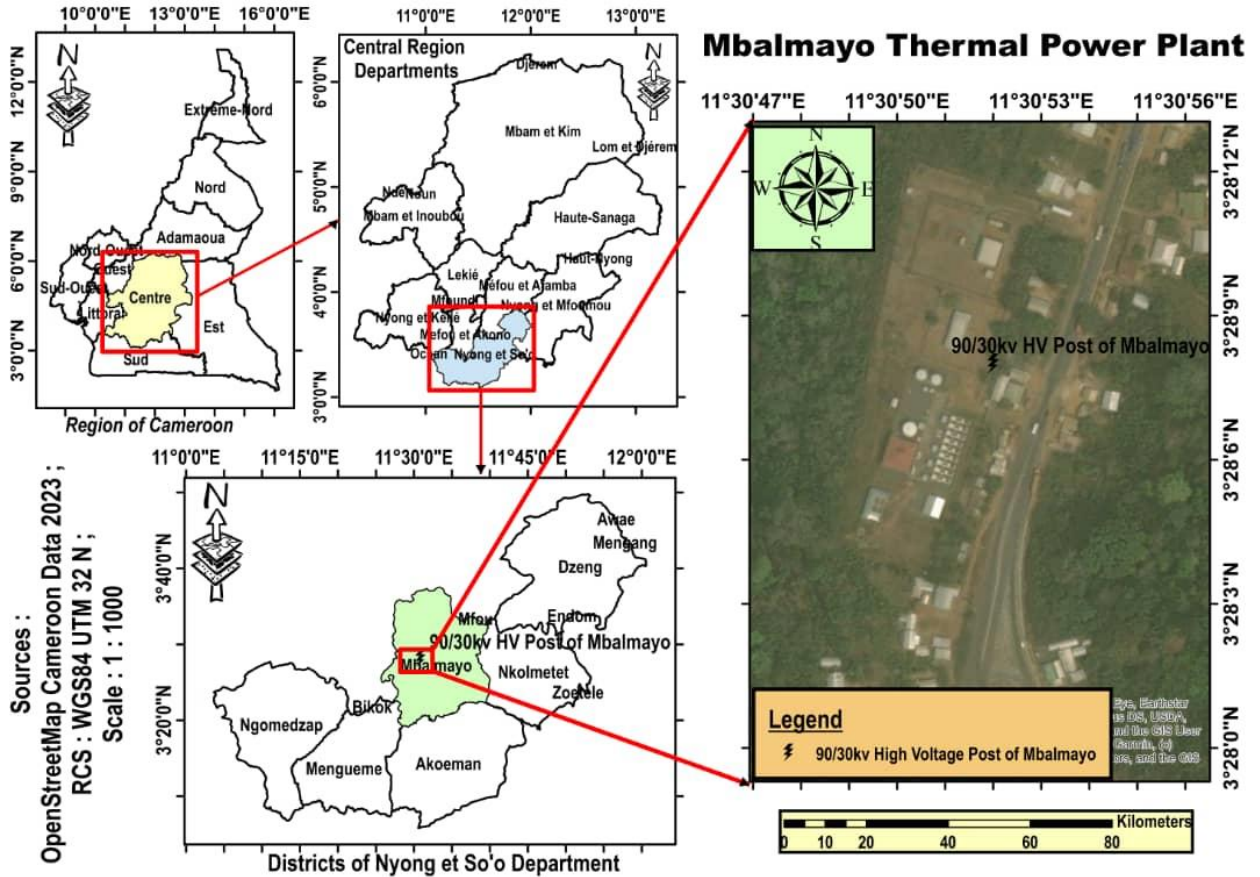


**Figure 2: La colline d'OYOM-ABANG dans l'arrondissement de Yaoundé 7 région du centre-Cameroun**

- **Centrale Thermique de Mbalmayo (CTM)**

La centrale thermique est située à Mbalmayo, une ville située à environ 45 km au SSE de la capitale du Cameroun, Yaoundé. La ville a une population d'environ 300 000 habitants, avec sa richesse en histoire et sa beauté naturelle, elle est devenue l'un des quartiers les plus importants. En raison de sa proximité avec la ville cosmopolite de Yaoundé, elle a connu une forte augmentation de sa population et une expansion de ses activités économiques. C'est la cause primordiale pour laquelle cette centrale thermique a été installée dans cette ville. L'usine est située

dans la réserve forestière de Mbalmayo à 3°28'06"N et 11°30'51"E ; elle occupe une superficie d'environ 1,6 hectare (Figure 3).



**Figure 3: Localisation géographique de la Centrale Thermique de Mbalmayo (CTM) et la réserve forestière de Mbalmayo**

### 1.1.1.2 L’air environnant dans la région du centre Cameroun

Les installations de la CTO et de la CTM sont susceptibles d’affecter la qualité de l’air (tableau 1) du fait de leurs émissions atmosphériques (Essombo et al., 2022b). La pollution atmosphérique constitue un phénomène très complexe. Ce phénomène qui a lieu dans la troposphère (la plus basse couche de l’atmosphère) et plus précisément dans la couche limite atmosphérique.

On distingue deux types d’émissions : les émissions canalisées et les émissions diffuses. Les émissions sont aux maximums canalisés afin d’assurer une dispersion des effluents en hauteur et

de réduire leur impact sur l'environnement. Les émissions canalisées sont produites par l'activité des moteurs à combustion thermique fixe. Les produits émis sont les produits issus de toutes activités de combustion. On peut les citer : l'eau (H<sub>2</sub>O), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) ; le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les poussières et les composés organiques volatils (COV) etc... Ces produits sont dirigés vers les trois (03) cheminées dans la CTO et la CTM qui ont été dimensionnées afin d'assurer une dispersion optimale. Elles sont d'une longueur de 32 m à partir du sol. Les émissions diffuses quant à elles proviennent essentiellement des zones de chargement et déchargement des produits, du stockage des combustibles, du bac de rétention des effluents et de fuites fugitives liées aux systèmes de production. Elles produisent essentiellement des composés organiques volatils (COV) qui sont des hydrocarbures légers dont les quantités et la nature sont variables dans le temps ([Localité, 2012](#)).

**Tableau 1: Composition chimique de l'air sec**

Espèce	Symbole	Fraction molaire
Azote	N <sub>2</sub>	780 000 ppmv
Oxygène	O <sub>2</sub>	210 000 ppmv
Argon	Ar	9 300 ppmv
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	365 ppmv
Ozone	O <sub>3</sub>	1 ppb-10 ppmv
Méthane	CH <sub>4</sub>	1.8 ppmv
Protoxyde d'Azote	N <sub>2</sub> O	310 ppmv

## 1.2 Types de centrales thermiques dans le monde et localisation des Centrales thermiques au Cameroun

### 1.2.1 Types de centrales thermiques dans le monde

On entend par centrale thermique, toute centrale de production d'électricité par utilisation des combustibles chimiques généralement fossiles (Charbon, pétrole et Gaz naturel). On utilise ces combustibles pour produire de la chaleur transformée en énergie mécanique par un cycle moteur thermodynamique, lui-même alimentant un alternateur ([ASPA, 2008](#)).

On distingue deux types de centrales thermiques : les centrales classiques (CC) et les centrales à Lit Fluidisé Circulant (LFC).

### 1.2.1.1 Les Centrales Classiques (CC)

C'est le type le plus répandu et le plus ancien. Il utilise le combustible fossile et fonctionne avec une chaudière à vapeur, chaque chaudière ne pouvant utiliser qu'un seul type de combustible car chacun exige un brûleur spécifique. Il en existe aussi trois sortes suivant les combustibles utilisés (ASPA, 2008).

#### 1.2.1.1.1 Centrale Thermique à Charbon (CTC)

Pour pouvoir être utilisé, le charbon est transformé en fines particules dans un broyeur, puis mélangé à de l'air réchauffé avant d'être introduit sous pression dans le brûleur de la chaudière. La figure 4 suivante nous présente une image d'une centrale thermique à charbon (William, 2000).



Figure 4: Centrale Thermique à Charbon. (Source : William, 2000)

#### 1.2.1.1.2 Centrale Thermique à Mazout (CTMa)

Le mazout, trop visqueux pour être utilisé tel quel, doit être liquéfié en le chauffant avant de l'injecter dans le brûleur. Il a longtemps été le principal combustible utilisé dans les centrales, mais

il a été remplacé par le charbon après le choc pétrolier de 1973. La figure 5 suivante nous présente une image une centrale thermique à mazout.



**Figure 5: Centrale Thermique à Mazout. (Source : ligne, 2002)**

### **1.2.1.1.3 Centrale Thermique à Gaz (CTG)**

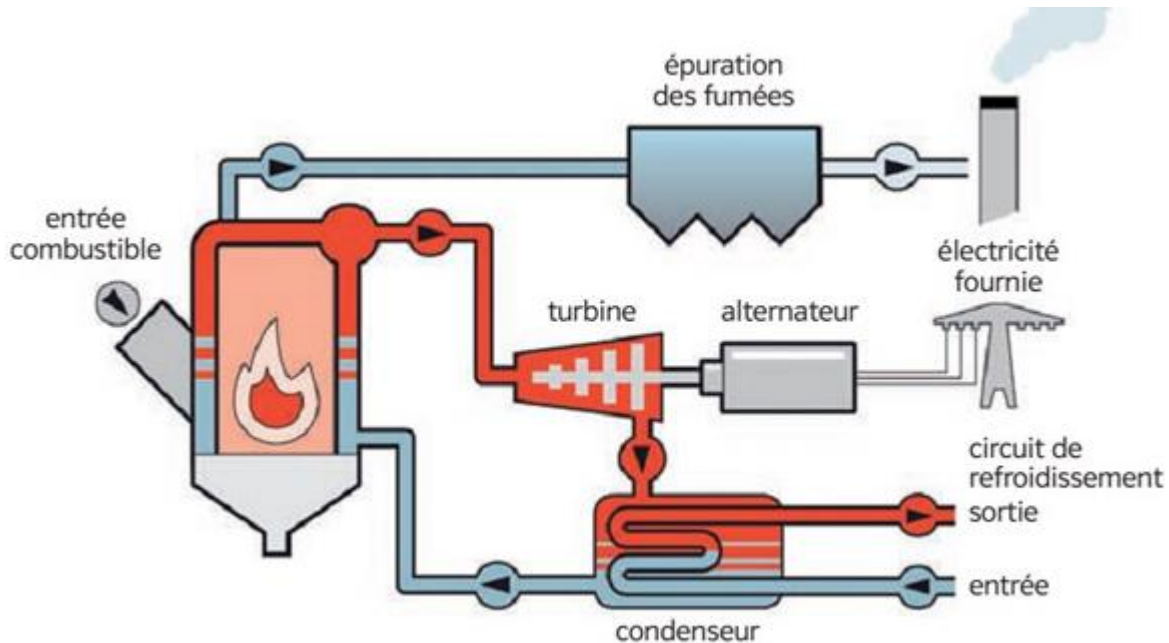
C'est une centrale qui produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion du gaz naturel. Il est à noter que la première centrale thermique à gaz installée au Cameroun est à Kribi au Sud du Pays avec une capacité de 216 MW ; inaugurée en 2012 par S. E Philémon YANG ancien chef du gouvernement Camerounais (2009-2019). L'image de cette centrale est donnée par la figure 6 suivante.



**Figure 6: Centrale thermique à Gaz de KRIBI (Gwénaël, 1996 ; MINEE, 2012).**

### 1.2.1.2 Centrale Thermique à Lit Fluidisé Circulant (CTLFC)

Elle fonctionne comme une centrale classique mais émet moins d'oxydes d'azote et de soufre, grâce à l'ajout de calcaire dans la chaudière et à une température de combustion plus basse. Elle utilise du charbon mais aussi du lignite et divers résidus industriels. La figure 7 suivante nous présente une image d'une CTLFC en plein fonctionnement.

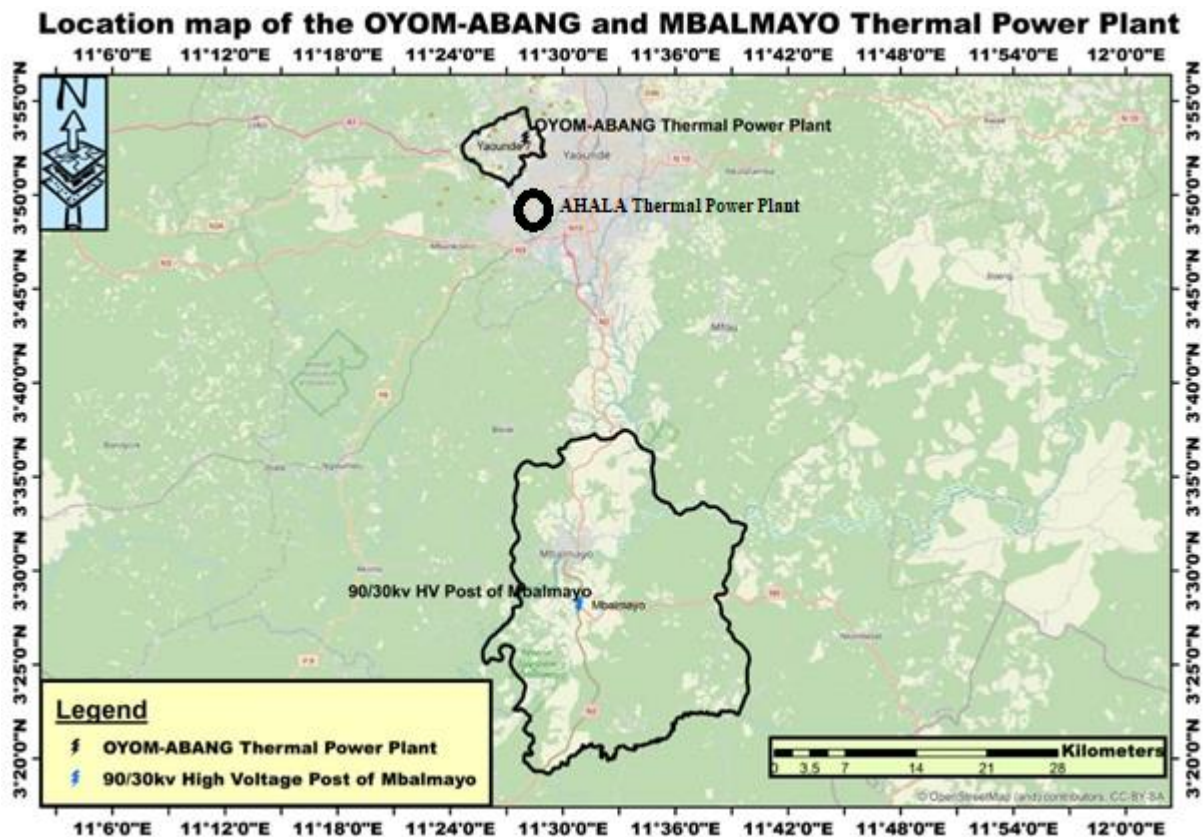


**Figure 7: Image d'une Centrale thermique À Lit Fluidisé Circulant (HELE Pierre, 2005).**

### 1.2.2 Localisation géographique des Centrales thermiques au Cameroun

Afrique en miniature, situé en Afrique sub-saharienne entre 1°40' et 13°05' de latitude Nord et 8°30' et 16°10' de longitude Est, le Cameroun couvre une superficie de 475 442 km<sup>2</sup>. Son extension Nord-Sud, la plus importante est de près de 1300 Km. Le pays s'étend entre le Nigeria, le Tchad, la Guinée Équatoriale ; la République Centrafricaine, le Congo (Brazzaville) et le Gabon. Sa population en 2024 a été estimée à 30 Millions d'habitants, soit une densité de

population d'environ 57 habitants/km<sup>2</sup> (BUCREP, 2024). Ce chiffre intègre en fait une grande diversité entre les villes qui accueillent environ la moitié de la population, des zones rurales très peuplées à l'ouest et à l'Extrême nord et des immenses zones presque vides à l'Est, au Centre et au Nord du pays. Deuxième pays en Afrique détenteur du potentiel hydroélectrique derrière la République démocratique du Congo, le Cameroun regorge par ailleurs d'un potentiel thermique « fioul » d'une puissance installée de 366,96 MW en 2016 (MINEE, 2022) répartie sur 39 centrales thermiques. La région Centre en compte 3 mais deux fonctionnent à fioul (CTO et CTM) et une fonctionne à Gaz (centrale thermique d'Ahala). Celles-ci sont soit attelées aux multiples réseaux interconnectés EST, SUD et NORD, soit isolés dans le but d'approvisionner les populations des zones de campagne. Ces centrales sont réparties comme l'indique les figures 8 et 9. L'électricité est donc un pilier visible pour notre quotidien, alimente nos industries, nos foyers, nos transports et nos technologies. Les centrales thermiques au Cameroun assurent plus de 13% de la production totale de l'électricité.



**Figure 8: Géolocalisation des deux centrales Thermiques à fioul dans la région du centre Cameroun**

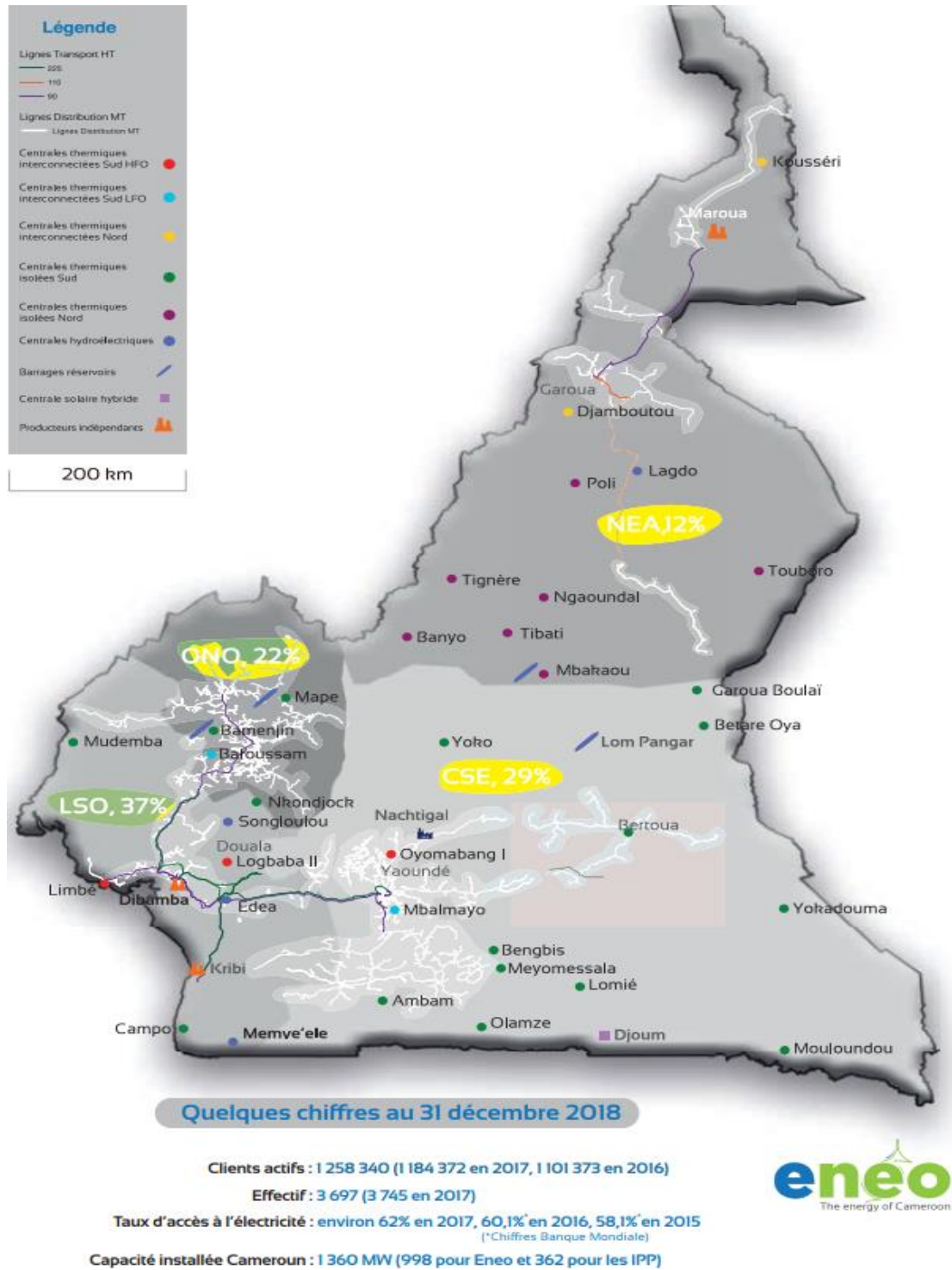


Figure 9: Cartographie combinée des centrales thermiques au Cameroun (Eneo, 2018).

## 1.3 La Pollution atmosphérique

### 1.3.1 Définition

D'après la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie du 30 décembre 1996, l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger l'atmosphère, (Pisson, 2005). Toutes les substances qualifiées de polluants atmosphériques ne sont pas étrangères à l'atmosphère et elles peuvent aussi avoir des conséquences positives pour la vie, comme l'ozone présent dans la stratosphère ou le dioxyde de carbone ou encore d'autres polluants ou gaz à effet de serre. Une substance présente dans l'atmosphère devient donc un polluant si sa concentration est modifiée de telle sorte que « des conséquences préjudiciables » apparaissent.

Cependant, les polluants ne sont pas nécessairement différents des substances émises par des phénomènes naturels. Si les CFC (chlorofluorocarbones) sont produits et émis uniquement par l'homme, des activités humaines comme l'agriculture ou l'élevage conduisent à l'émission de méthane ou de poussières qui sont aussi naturellement émises par les bactéries des marais ou les déserts.

La définition donnée par LAURE prend en compte les différentes échelles spatiotemporelles auxquelles la pollution atmosphérique peut survenir : (i) la macro-échelle, qui est celle des phénomènes globaux comme les changements climatiques, (ii) la méso-échelle, celle des phénomènes qui concernent un continent ou une région comme les pluies acides qui nuisent aux ressources biologiques et aux écosystèmes, (iii) la micro-échelle, qui est celle des phénomènes locaux comme la détérioration des biens matériels, par exemple les monuments, ou les nuisances olfactives excessives, notamment sous le vent de certains types d'usines comme les centrales thermiques (Lambrozo & Guilloso, 2007)

Cette thèse a pour cadre « **la pollution atmosphérique issues des centrales thermiques à l'échelle régionale pour une performance environnementale dans la région du centre Cameroun** » :

- Temporellement, les espèces chimiques d'intérêt en pollution régionale dans la région du centre Cameroun (Yaoundé) ont des temps de vie en heures (Figure 11) qui met en relation l'échelle spatiale et temporelle ; on remarquera notamment l'ozone (O<sub>3</sub>) et les

oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) qui jouent un rôle prépondérant dans la pollution dite photo-oxydante décrite. Les polluants considérés ici quantitativement sont des gaz-traces : leurs concentrations sont au maximum de l'ordre du ppm (partie par million).

- Verticalement, les processus physico-chimiques qui intéressent ces espèces ont lieu dans la couche limite atmosphérique (CLA) et la partie de la troposphère libre située juste au-dessus (figure 10). La CLA est la couche atmosphérique sous l'influence des processus de surface ; c'est donc la partie basse de l'atmosphère dont l'écoulement est influencé par les effets thermiques et dynamiques dus à la surface. Son extension verticale dépend des conditions météorologiques (vitesse du vent, température, pluviométrie etc...) mais reste comprise entre 100 et 3000 mètres maximum. Au-dessus de la CLA, se trouvent la troposphère libre, puis la stratosphère (dès 10 km d'altitude) (Stull, 1988).
- Horizontalement, leurs temps de vie permettent à certaines espèces d'être transportées sur plusieurs dizaines de kilomètres. L'intérêt portera donc sur une grande agglomération et son proche environnement soit un domaine de type Africain plus précisément au Cameroun.

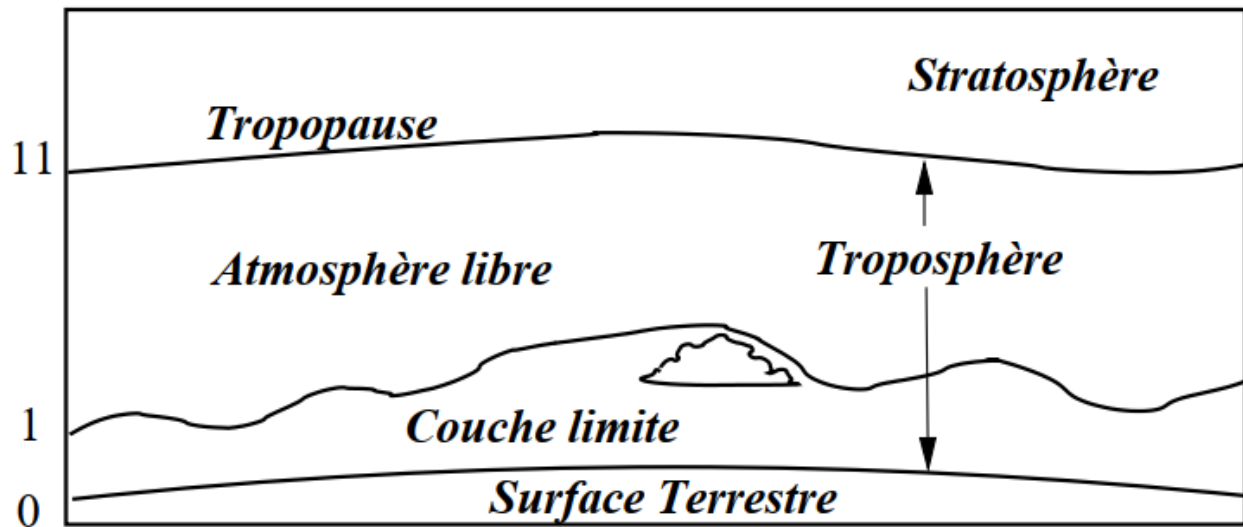


Figure 10: Ordres de grandeur de l'épaisseur des couches basses de l'atmosphère (Stull, 1988)

La hauteur de la CLA est déterminée par les profils verticaux de température et de vent. Elle délimite le volume dans lequel les émissions surfaciques sont diluées et les polluants mélangés. Son évolution au cours de la journée a donc une influence directe sur les concentrations (Figure 11). Lorsque la CLA est instable, la convection permet un mélange des polluants quasiment homogène dans toute la hauteur de la couche.

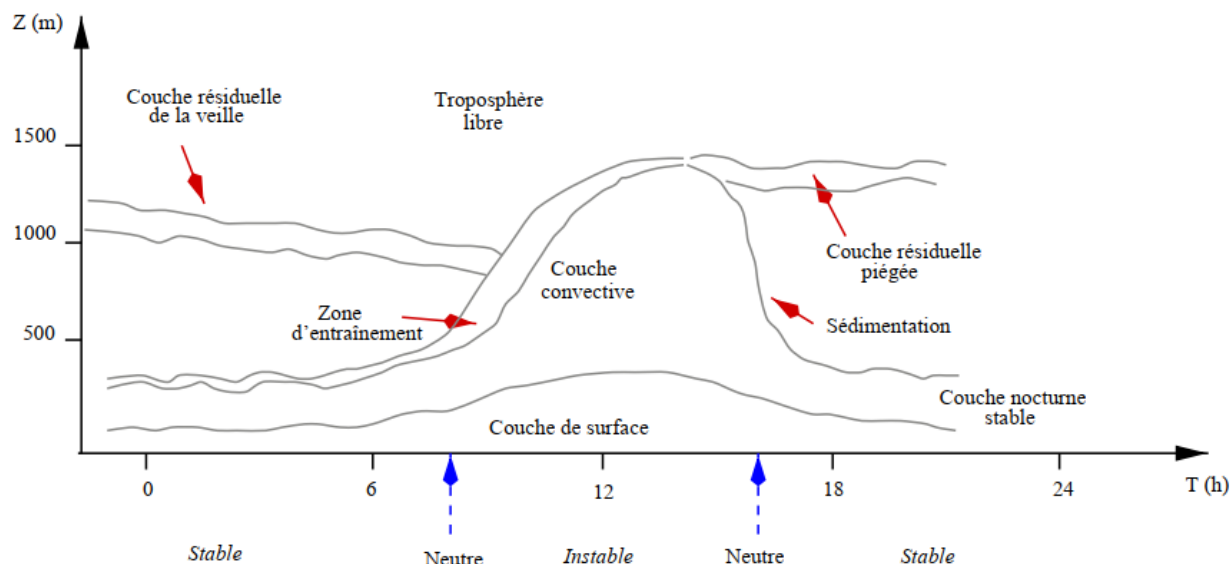


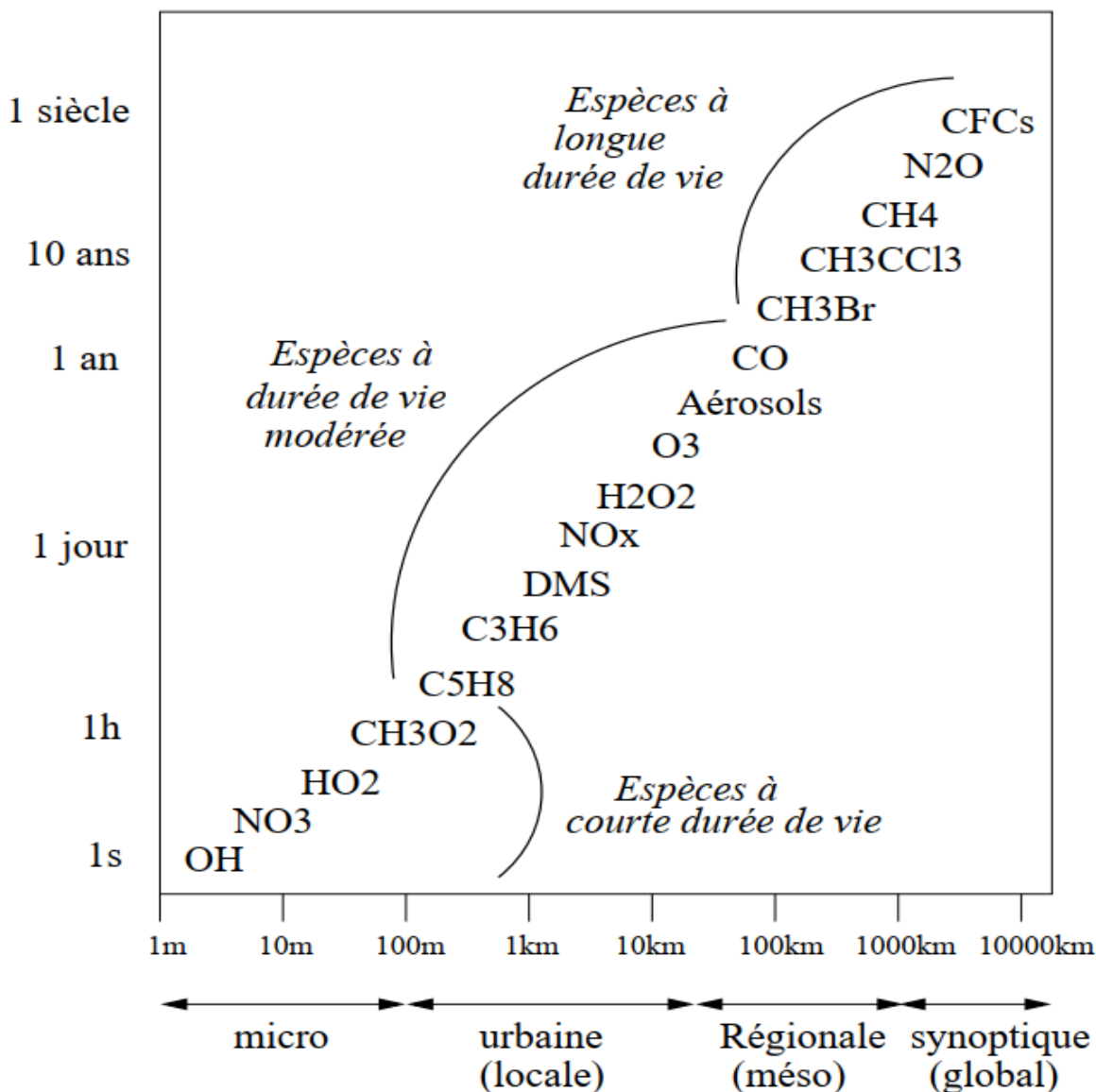
Figure 11: Évolution temporelle de la couche-limite (Menut, 2003).

### 1.3.2 Historique de la pollution

Au XX<sup>e</sup> siècle, la prise de conscience des problèmes posés par la pollution atmosphérique à l'échelle régionale a été ponctuée d'épisodes dramatiques pour la population ou son environnement (Pison, 2005).

En décembre 1930, dans la vallée de la Meuse près de Liège (France), en octobre 1948 à Donora (États-Unis), dans la Pennsylvanie (États-Unis), en décembre 1952 à Londres (Angleterre) et plus récemment en 1986 au lac Nyoss (Bamenda-Cameroun) des pics de morbidité et de mortalité ont été observés. Dans tous les cas, une situation météorologique anticyclonique accompagnée de brouillard s'est maintenu plusieurs jours, ce qui a permis l'accumulation des polluants émis par les industries de la ville. Le dioxyde de soufre, en présence du brouillard, s'est transformé en acide sulfurique, particulièrement agressif, le monoxyde de carbone, présent dans le brouillard s'est transformé en dioxyde de carbone très toxique et pouvant provoquer le cancer. (La figure 12 montre

le temps de vie de quelques espèces chimiques dans l'atmosphère (Pison, 2005). Le terme de « smog », forgé au début du siècle pour décrire l'atmosphère londonienne faite de « smoke » (fumée) et de « fog » (brouillard), a été utilisé pour désigner ce type d'épisodes de pollution (Menut, 2003).



**Figure 12: Temps de vie de quelques espèces chimiques et échelle spatiale correspondante issus des centrales thermiques à Fioul (Pison, 2005).**

Dans le bassin de Los Angeles, dès les années 50, une baisse de la visibilité, des irritations des appareils oculaires et respiratoire humains et des effets néfastes sur les végétaux ont été relevés. La forte densité de population, la forte circulation automobile et l'industrialisation y

ont en effet rencontré une situation géographique et météorologique favorable à la pollution dite « photo-oxydante ».

En France, la prise de conscience des problèmes de pollution atmosphérique par le biais des pluies acides a amené, dans les années 80, aux premières mesures de réduction des émissions (de dioxyde de soufre puis d'autres polluants) et parallèlement a conduit au développement des activités de surveillance et de recherche. L'existence de phénomènes tels que le développement de panaches de pollution sous le vent des grandes agglomérations a commencé à être soupçonnée.

Enfin, en 1996, la LAURE a rendu obligatoire la surveillance de la qualité de l'air au niveau local, sur l'ensemble du territoire depuis l'an 2000, ainsi que l'information du public. Des objectifs de qualité de l'air et des seuils variés (seuils d'information ou d'alerte de la population notamment) ont été établis. Une procédure d'alerte a été instaurée ; elle est gérée par le Préfet, qui doit informer le public et peut prendre des mesures d'urgence telles que la restriction de la circulation ou de certaines activités industrielles en cas de dépassement de seuil. L'élaboration d'un Plan Régional de la Qualité de l'Air (PRQA), de Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA) et d'un Plan de Déplacement Urbain (PDU) pour toute agglomération de plus de 100 000 habitants est également prévue par la loi.

La perception et la connaissance de la pollution atmosphérique ont donc évoluées rapidement et la pollution elle-même a changée avec les années. Comme le montrent les cas dramatiques décrits plus haut, le dioxyde de soufre émis par les industries était l'un des polluants qui posait le plus de problème jusqu'à dans les années quatre-vingts. Les émissions de plomb, présent dans les carburants jusqu'en 2000, étaient également particulièrement préoccupantes. Depuis quelques années, sont devenus inquiétants les pics d'ozone en été et de NO<sub>x</sub> en hiver. L'ozone est un des plus forts oxydants connus et il a un impact négatif sur l'environnement et la santé. Le terme de NO<sub>x</sub> désigne la « famille » regroupant NO et NO<sub>2</sub>. Ce dernier est un gaz irritant pour les voies pulmonaires et peut par exemple provoquer des crises chez les asthmatiques. Enfin, de nouvelles pistes d'étude se dessinent depuis peu : les particules (ou PM) commencent à être mesurées et modélisées ; des questions surgissent au sujet des niveaux de fond (concentration moyenne représentative d'un secteur géographique entier, ambiance de pollution générale) de l'ozone dans la troposphère dont la valeur, de 15 à 20 ppb (partie par milliard) à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, aujourd'hui doublé dans l'hémisphère Nord (Vingarzan, 2004).

## 1.4 Modélisation inverse

### 1.4.1 Principe général et historique

Le but des méthodes inverses est de résoudre le problème inverse c'est-à-dire d'estimer, à partir des observations, les valeurs des paramètres du modèle permettant de retrouver les prévisions souhaitées.

En pratique, les méthodes inverses consistent à minimiser la différence entre l'observation et la prévision pour une variable (ici les concentrations de polluants) afin de mieux estimer certains paramètres (les émissions par exemple) dont dépend celle-ci. La méthode d'inversion modifie les valeurs de départ des paramètres, dites à *priori* (ou « Girst-Guess ») pour obtenir les valeurs optimisées. On appelle dimension du problème (inverse) le nombre de paramètres à inverser, que l'on regroupe en un vecteur d'état. Dans le cas des émissions par exemple, chaque flux de chaque espèce émise constitue un paramètre d'entrée.

Des mesures de concentration sont classiquement utilisées comme contraintes pour l'inversion des émissions. Pour comparer les valeurs des contraintes aux prévisions, on relie le vecteur d'état à l'espace des observations par un opérateur d'observation. Celui-ci n'est autre que le modèle qui permet de calculer les valeurs simulées aux mêmes points que les observations : par exemple, un modèle de chimie-transport qui calcul les concentrations en fonction des émissions puis un système d'interpolation permettant d'obtenir les concentrations simulées aux emplacements des stations de mesure (en général, les points de grille du modèle et les emplacements des mesures ne coïncident pas). La modélisation inverse fait donc partie de la famille des techniques d'hybridation entre mesures et modèle dont le but commun est de définir au mieux l'état d'un système en utilisant le maximum d'informations.

Les premières applications de ces techniques avec des modèles déterministes eulériens ont entraînés le développement de l'assimilation de données pour l'océanologie et la météorologie décrit par (Daley, 1996a ; Daley, 1996b ; Pison, 2005) pour une revue historique. L'assimilation de données consiste à intégrer des informations telles que des observations pour améliorer l'évolution du modèle. Il s'agissait alors de traiter de grandes échelles spatiales sur de longues périodes (« climatologies »). L'application de ce type de techniques à des problèmes concernant les gaz-traces de l'atmosphère est plus récente et porte la trace de cette histoire : (Elbern et al.,

1997) présente l'assimilation de données chimiques dans la troposphère à l'échelle globale et l'ouvrage de (Kasibhatla et al., 2000) permet de faire le lien entre l'atmosphère et l'océan, toujours à l'échelle globale. Parmi les nombreuses classes d'algorithmes qui ont été développées peu à peu, les plus couramment employées aujourd'hui sont l'assimilation séquentielle (qui prend en compte les observations les unes après les autres, dans l'ordre chronologique) et l'assimilation variationnelle (qui prend en compte les observations dans une fenêtre temporelle d'une durée adaptée au problème à traiter). Leur théorie est décrite de manière exhaustive (Talagrand, 1997). Bien que le but de l'inversion, qui est d'estimer des paramètres du modèle, soit différent de celui de l'assimilation de données, les algorithmes développés pour cette dernière ont pu servir de base aux techniques d'inversion proprement dite (Ménard et al., 2004). L'ouvrage de Enting (2002) est consacré aux problèmes inverses rencontrés dans l'atmosphère et (Reeves et al., 2004) traitent de l'inversion des émissions à partir de mesures de concentrations. C'est ce dernier point qui nous intéresse dans le cadre de ce travail et on présente donc, dans ce qui suit, un état de l'art de l'inversion des émissions de gaz-trace dans l'atmosphère à l'aide de modèles eulériens.

#### **1.4.2 Les différentes méthodes déjà utilisées dans le principe de la modélisation inverse des polluants dans l'atmosphère**

Les travaux réalisés jusqu'à présent portent principalement sur l'échelle globale ou continentale et utilisent plus souvent la méthode du filtre de Kalman (Hartley et Prinn 1993 ; Mahowald et al., 1997 ; Wang et Bentley, 2002 ; Gilliland et al., 2003 ; Pison, 2005) que celle de l'adjoint (Müller et Stavrakou 2005). À l'échelle locale et régionale, trois des huit études disponibles utilisent le filtre de Kalman (Chang et al., 1996 ; Chang et al., 1997 ; Winiarek et al., 2014).

Le filtre de Kalman : Originellement, cette méthode est séquentielle et basée sur la relation linéaire entre la modification des contraintes (des observations) et les paramètres pendant la même période (Hartley et Prinn, 1993). Le but du filtre de Kalman est d'obtenir, à un instant donné, la meilleure estimation possible du vecteur d'état compte-tenu des observations disponibles à cet instant. Le principe de l'algorithme basé sur la récurrence, est le suivant :

- 1- On dispose d'un modèle permettant :

- De relier, à n'importe quel instant  $t_n$  le vecteur d'état  $x(t_n)$  aux variables observées  $y(t_n)$  grâce à l'opérateur d'observation  $H_n$  selon :  $y_{sim}(t_n) = H_n x(t_n)$  ;
  - De prévoir le vecteur d'état  $x^f(t_{n+1})$  à l'instant  $t_{n+1}$  ( $x^f(t_{n+1})$ ) où  $t_{n+1}(x^f(t_{n+1}))$  est appelé prévision,  $f$  est mis pour « forecast ») à partir de l'état  $x^a(t_n)$ . L'analyse obtenue à l'instant précédent, soit :  $x^f(t_{n+1}) = M_{n \rightarrow n+1} x^a(t_n)$ . Le modèle  $M_{n \rightarrow n+1}$  étant valable entre les instants  $t_n$  et  $t_{n+1}$ .
- 2- Les covariances d'erreur de la prévision  $x^f(t_{n+1})$ , contenues dans  $P_{n+1}^f$ , dépendent alors des covariances d'erreur de l'analyse  $P_n^a$  et des covariances d'erreur du modèle correspondant à  $M_{n \rightarrow n+1}$ , contenues dans  $Q_n$ . On a :  $P_{n+1}^f = M_{n \rightarrow n+1} P_n^a M_{n \rightarrow n+1}^T + Q_n$ . On remarquera que l'on suppose que les erreurs du modèle et les erreurs de l'analyse ne sont pas corrélées.
- 3- Le gain **optimal**  $K_{n+1}$ , qui contient les poids permettant d'effectuer l'analyse au temps  $t_{n+1}$ , dépend des covariances d'erreur de la prévision  $P_{n+1}^f$  et des covariances d'erreur d'observation correspondant à  $H_{n+1}$ , contenues dans  $R_{n+1}$ . Il est donné par :  $K_{n+1} = P_{n+1}^f H_{n+1}^T [H_{n+1} P_{n+1}^f H_{n+1}^T + R_{n+1}]^{-1} P_{n+1}^f H_{n+1}^T$  contient donc les covariances d'erreur du modèle entre les points de grille et les points de mesure ;  $H_{n+1} P_{n+1}^f H_{n+1}^T$  réduit  $P_{n+1}^f$  aux seuls points de mesure.
- 4- Une fois les poids calculés dans  $K_{n+1}$ , on peut effectuer l'analyse de l'état au temps  $t_{n+1}$ , qui correspond à la prévision effectuée à la première étape « corrigée » par les valeurs utilisables au temps  $t_{n+1}$  contenues dans le vecteur  $y_{obs}(t_{n+1})$ . On a :  $x^a(t_{n+1}) = x^f(t_{n+1}) + K_{n+1} [y_{obs}(t_{n+1}) - H_{n+1} x^f(t_{n+1})]$ . Le vecteur  $y_{obs}(t_{n+1}) - H_{n+1} x^f(t_{n+1})$  contient simplement les écarts entre valeurs mesurées et valeurs simulées  $y_{obs}(t_{n+1}) - y_{sim}(t_{n+1})$ .

5- Enfin, on obtient les covariances d'erreur de la nouvelle analyse  $P_{n+1}^a$  grâce à :

$$P_{n+1}^a = [I - K_{n+1} H_{n+1}] P_{n+1}^f.$$

Il est nécessaire d'initialiser la procédure avec  $x^a(t_0)$  et  $P_0^a$

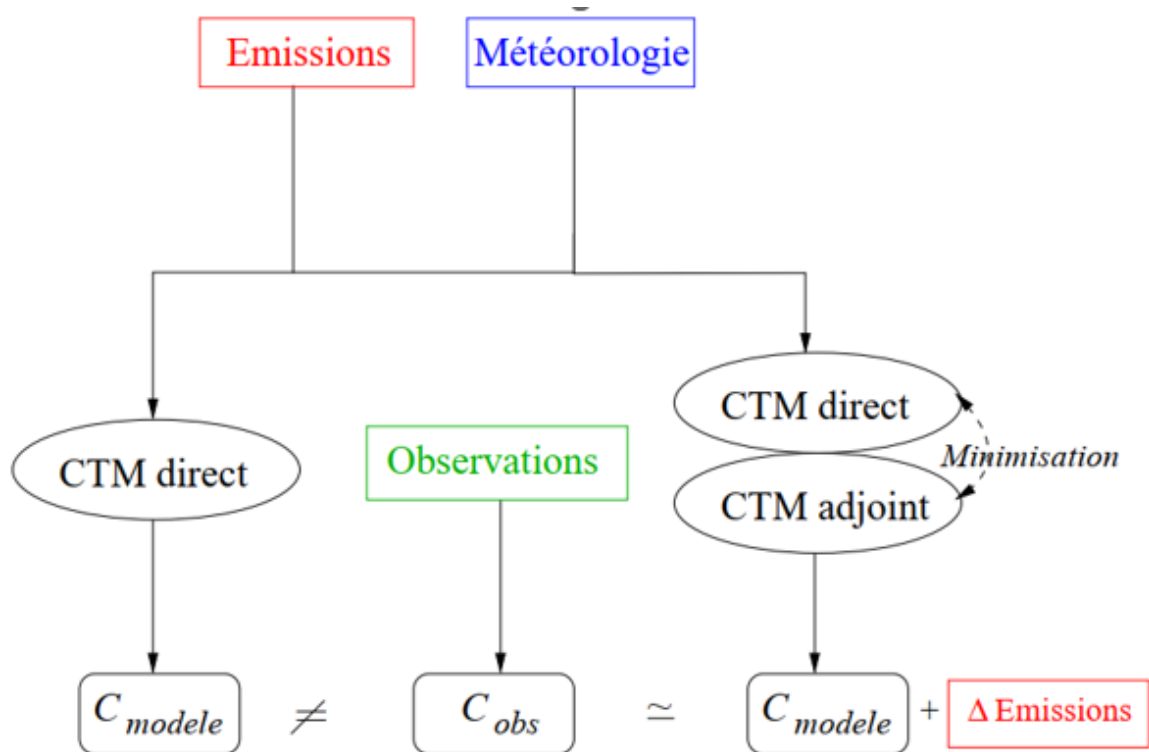
Les problèmes rencontrés en océanologie et météorologie étant en général non-linéaires, le filtre de Kalman dit étendu généralise l'algorithme à des modèles et des opérateurs d'observation non-linéaires en les linéarisant au voisinage de l'analyse à effectuer. Pour les problèmes fortement non-linéaires, il est possible d'utiliser le filtre de Kalman dit d'ensemble, et utilisant les méthodes stochastiques. Enfin, le lissage de Kalman (« Kalman smoother » en anglais) permet d'étendre le filtre de Kalman à une fenêtre temporelle.

L'approche adjointe : Le principe de cette méthode variationnelle est résumé sur la Figure 13. À partir des forçages de la météo et des émissions, le modèle de chimie-transport direct (à gauche) fournit des champs de concentrations que l'on peut comparer aux observations effectuées. La modélisation inverse (représentée à droite) consiste à minimiser la différence entre les concentrations simulées et les concentrations observées en modifiant les émissions. La distance entre les concentrations simulées et concentrations observées est représentée par une fonction coût, qui doit donc être minimisée. La fonction coût bien choisie est calculée par le modèle direct alors que son gradient par rapport aux paramètres (par exemple, les émissions) est fourni par l'adjoint. Celui-ci permet de calculer la dérivée d'une quantité simulée (par exemple, la concentration d'une espèce donnée dans une maille donnée) à tous les paramètres d'entrée (par exemple, tous les flux d'émissions). À partir de la valeur du coût et de son gradient en un point, un minimiseur permet de trouver la correction à apporter aux paramètres pour se rapprocher des observations et répète le cycle direct-adjoint jusqu'à obtenir d'une part un écart minimal entre variables simulées et observées

et d'autre part les corrections qui lui correspondent c'est-à-dire l'ensemble de paramètres (par exemple le cadastre d'émissions) qui donne les meilleurs résultats de simulation. Il existe plusieurs choix de formulation du coût, adaptés aux différents problèmes traités. Cette fonction du vecteur d'état permet en général d'indiquer d'une part, à quel point on souhaite se rapprocher des contraintes et d'autre part, à quel point on peut s'éloigner des paramètres *a priori*. Le coût est donc

exprimé le plus souvent à l'aide de deux vecteurs contenant, pour l'un, les différences entre les concentrations simulées et les contraintes correspondant, pour l'autre, les différences entre les paramètres optimisés et *a priori*. Elle prend alors la forme (Hartley et Prinn, 1995 ; Talagrand, 1997 ; Elbern et al., 2000) :

$$J(x(t)) = (y_{obs}(t) - Hx(t))^T \underbrace{R}_{y(t)} (y_{obs}(t) - Hx(t)) + (x_{fg}(t))^T \underbrace{B}_{y(t)} (x_{fg}(t) - x(t))$$



**Figure 13: Principe de la modélisation inverse. CTM= Chemistry Transport Model (Elbern et al., 2000)**

Où :

- $x(t)$  est le vecteur d'état ;  $t$  n'indique pas un instant dans le temps mais un état de l'optimisation ;
- $H$  est l'opérateur d'observation ;
- $y(t)$  est le vecteur des différences entre les concentrations simulées ( $y_{obs}(t)$ ) et les contraintes correspondant ( $y_{sin}(t) = H_x(t)$ ) ;

- $x(t)$  est le vecteur qui contient les différences entre les paramètres optimisés ( $x(t)$ ) et a priori ( $x_{fg}(t)$ , fg pour « first-guess » ou ébauche) ;
- R est la matrice des covariances d'erreur d'observation. Ses termes diagonaux correspondent directement aux variances et les termes extra-diagonaux représentent les éventuelles corrélations entre ces erreurs, qui peuvent être importantes par exemple dans le cas de mesures effectuées avec le même instrument, comme à bord d'un satellite ;
- B est la matrice des covariances d'erreur du modèle et est souvent appelée matrice de « background ». Ses termes diagonaux sont des poids qui s'appliquent aux composantes du vecteur des différences entre paramètres optimisés et a priori. Ils permettent donc de pénaliser les solutions de l'optimisation qui s'éloignent trop de l'a priori en prenant en compte son incertitude. Ceci est particulièrement utile dans les cas où cette incertitude n'est pas trop élevée. Les termes extra-diagonaux de la matrice de « background » permettent d'ajouter d'autres informations a priori dans l'espace des paramètres à inverser telles que :
  - Des liens temporels. Ceci est particulièrement utile en météorologie puisque l'on traite des phénomènes continus. Si une erreur sur la température est constatée à l'heure t, la même erreur est très probablement présente à  $t + \Delta t$ .
  - Des liens spatiaux. Les termes de la matrice établissent une corrélation spatiale entre les espèces émises au même moment dans tout le domaine. À l'échelle continentale, des fonctions de corrélation peuvent être élaborées pour représenter une zone cohérente comme un désert par exemple.

### 1.4.3 Les polluants inversés

Les plus récentes des études d'inversion d'émissions effectuées avec des modèles de chimie-transport eulériens tridimensionnels sont indiquées dans les Tableaux 2 ; 3 et 4. Les méthodes inverses ont principalement été utilisées à l'échelle globale (couvrant toute la planète) ou continentale.

Les résultats obtenus consistent non seulement en de nouvelles valeurs pour les sources, mais aussi en une réduction de l'incertitude sur celles-ci, qui peut atteindre 75% pour un hémisphère entier dont les résultats sont récapitulés ci-dessous :

**Tableau 2: Étude de modélisation des espèces inversées et mesurées à l'échelle globale**

<b>Échelle globale</b>		
<b>Références</b>	<b>Espèces inversées</b>	<b>Espèces mesurées</b>
Harley et Prim (1993)	CFC1 <sub>3</sub>	CFC1 <sub>3</sub>
Hein et al., (1997)	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
Mahowald et al., (1997)	CFC1 <sub>3</sub>	CFC1 <sub>3</sub>
Bousquet et al., (1999a)	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Houweling et al., (1999)	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
Bergamaschi et al., (2000)	CO	CO <sub>2</sub>
Kaminski et Heimann (2001)	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Jacob et al., (2002)	Acétone	Acétone
Pétron et al., (2002)	CO	CO
Bödenbeck et al., (2003)	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Pétron et al., (2004)	CO	CO (sat)
Gumey et al., (2005)	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Müller et Stavrou (2005)	CO, NO <sub>x</sub>	CO, NO <sub>x</sub> (sat)

**Tableau 3: Étude de modélisation des espèces inversées et mesurées à l'échelle Continentale**

<b>Échelle Continentale</b>		
Wang et Bentley (2002)	CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
Gilliland et al., (2003)	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>
Wang et al., (2004)	CO, NO <sub>x</sub>	CO, NO <sub>y</sub>

**Tableau 4: Étude de modélisation des espèces inversées et mesurées à l'échelle Régionale**

<b>Échelle Régionale</b>		
<b>Référence</b>	<b>Espèces inversées</b>	<b>Espèces mesurées</b>
Mulholland et Seinfeld (1995)	CO	CO
Chang et al., (1996 ; 1997)	Isoprène ; CO	Isoprène ; CO
Elbern et al., (1997)	Étude théorique	
Elbern et Schmitdt (1999)	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Elbern et al., (2000)	NO, COV	O <sub>3</sub>
Mendoza-Dominguez Russell (2001)	COV, CO, NO <sub>x</sub>	COV, CO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NO <sub>y</sub> , O <sub>3</sub>
Quélo et al., (2005)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub>	NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> ,
Bocquet et al., (2012)	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub>
Winiarek et al., (2014)	Césium (Cs-137); Iode(I- 131)	Césium (Cs-137); Iode(I- 131)

#### 1.4.4 Les limites des méthodes inverses et échelles d'application

Les techniques d'assimilation de données furent originellement développées pour traiter des problèmes météorologiques. Ces problèmes dépendent des conditions initiales. En effet, les équations régissant l'écoulement atmosphérique étant fortement non-linéaires, la qualité des conditions initiales a une influence déterminante sur celle des résultats de l'intégration complète du modèle.

##### Les problèmes de chimie-transport

Les problèmes de chimie-transport sont beaucoup moins non-linéaires. Ils sont du type conditions aux limites. Les principaux paramètres, dont la qualité détermine celle des sorties du modèle, sont en effet les sources surfaciques et, dans le cas de la pollution à l'échelle régionale, les concentrations aux limites du domaine étudié, qui peuvent jouer un rôle prépondérant lors de certains épisodes (Menut et al., 2000) pour le cas de l'Île-de-France. Les théories développées pour la météorologie ne peuvent être appliquées directement à l'étude d'espèces chimiques à long temps de vie à l'échelle globale et sont encore plus difficiles à adapter au cas de la pollution à l'échelle régionale. Nous nous proposons donc de répertorier les limitations des méthodes d'inversion des émissions en général, qui sont principalement dues aux incertitudes et aux erreurs des mesures, du modèle et de ses données d'entrées, puis les différences entre les échelles d'application :

- Les limites dues aux mesures : toutes les informations nécessaires ne sont pas disponibles ;
- Les limites dues au modèle : les erreurs dues au modèle n'ont pas une influence minimale ;
- Différence entre les échelles d'application : les limites mathématiques de l'optimisation doivent être prises en compte dans tous les cas.

### 1.5 Potentiel énergétique Camerounais ; Présentation des centrales thermiques à fuel dans la région du centre-Cameroun

#### 1.5.1 Potentiel énergétique Camerounais

Le Cameroun regorge un vaste potentiel d'énergie diversifié. La maîtrise de celui-ci permettra la mise sur pied d'une politique de développement accélérée et d'optimisation à l'échelle nationale de ces ressources. Cela lui permettrait non seulement d'accroître la sécurité énergétique mais également de baisser les coûts de production des filières énergétiques, comme par exemple l'approvisionnement en électricité à partir des moyens de production à combustible fossiles, à énergie éolienne, à énergie solaire, à énergie de biomasse, à énergie géothermique et à énergie hydroélectrique.

En ce qui concerne l'énergie éolienne, la grande surface du pays est couverte par des vents moyens de 2-4 m/s à la hauteur de 100 mètres. Le Potentiel éolien existe de manière plus élevée dans le nord du Cameroun et de la région du littoral. Les régions du nord ont des vents dont la vitesse moyenne est de l'ordre de 5-7 m/s.

En ce qui concerne le Potentiel à Énergie solaire, le Cameroun a un bon potentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire. Dans les parties les plus appropriés, l'irradiation solaire moyenne est estimée à 5,8 kWh/m<sup>2</sup>/jour tandis que le reste du pays voit communément 4.9kWh/m<sup>2</sup>/jour. L'énergie solaire est actuellement utilisée dans les systèmes de production distribuée, en particulier pour l'alimentation du réseau de télécommunications cellulaires et pour certains établissements publics (université, lycée, hôpital, mairie, etc). Cependant, seulement environ 50 installations photovoltaïques existent actuellement (les solutions solaires aux besoins énergétiques prioritaires des populations rurales des pays en développement, 1988).

Troisième plus grand potentiel de la biomasse : le Cameroun en Afrique subsaharienne, avec 25 millions d'hectares de forêts couvrant les trois quarts de son territoire. Malheureusement, l'utilisation non contrôlée et durable de cette ressource a conduit à une déforestation importante dans tout le pays, avec un taux de déforestation de 200 000 hectares par an et une régénération de 3 000 ha/an. Comme principales utilisations de la biomasse dans le pays : Chauffage et lumière pour la majorité de la population rurale. L'utilisation de l'huile de palme pour le biodiesel est aussi une perspective viable pour le pays. Actuellement, environ 108 000 hectares de terres sont couverts par du palmier à huile. Toutefois, entre 2001 et 2006 un total de 30 000 hectares de forêt ont été défrichés pour permettre l'expansion des cultures d'huile de palme. (Cameroon Country Report, 2014)

Le potentiel énergétique géothermique est inconnu mais on repère de brusque élévation des températures des cours d'eaux dans les zones comme : la région de Ngaoundéré, le Mt Cameroun, le Mt Manengoumba. (Cameroon Country Report, 2014)

Le Cameroun est le deuxième plus grand potentiel hydroélectrique en Afrique subsaharienne. D'un potentiel total estimé à 23 GW, avec un potentiel de production de 103 TWh par an. Il y a trois principales installations dans le pays : EDEA (263 MW) ; SONGLOULOU (388 MW) et Lagdo (72 MW). Le potentiel pour les petites installations hydroélectriques (jusqu'à 1 MW) est estimé à 1.115 TWh, principalement dans l'Est et l'ouest du Cameroun, mais ce potentiel doit encore être correctement exploité.

Notons qu'à ces principales installations s'ajoutent des projets de nouvelles centrales comme celle de Mekin (15 MW en 2016), de Kribi (+100 MW en 2017), de Memve'ele (211 MW en 2017) et de Nachtigal (330 MW en 2018 pour 420 MW en 2020), permettra de porter cette capacité installée à environ 1980 MW à l'horizon 2020 (Banque Mondiale, 2013). La figure 14 ci-dessous montre le schéma de régulation du réseau principal de la Sanaga.

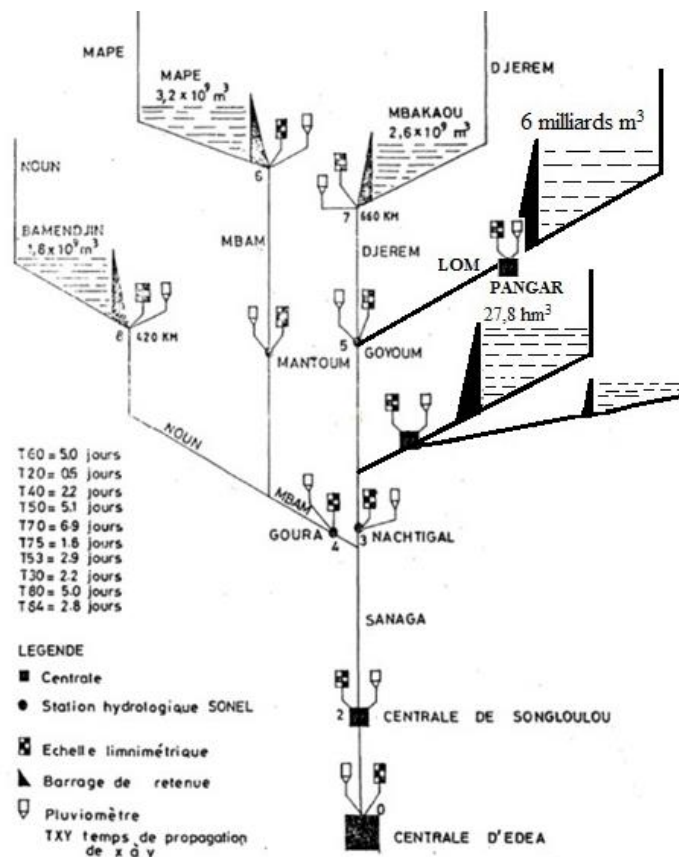


Figure 14: Schéma de Régulation de la Sanaga (EDC, LESEE, 2019)

Le parc de production thermique au Cameroun est actuellement constitué des centrales thermiques interconnectées et isolées. En ce qui concerne les réseaux interconnectés on dénombre trois réseaux : le RIS, le RIN, et le RIE.

S'agissant du RIS, il est principalement réparti sur les quatre localités de Douala, Yaoundé, Bafoussam et Limbé et est composé de deux types de centrale thermique, celle au Fioul lourd (HFO) et l'autre au fioul léger (LFO) (voir tableaux 5 et 6).

**Tableau 5 : Centrales thermiques (LFO) du RIS 2010 (Seutche, 2021)**

Centrales Thermiques (LFO)	Oyomabang2	Bassa 2 Bassa 3		Bafoussam	Total RIS
Localité	Yaoundé	Douala	Douala	Bafoussam	
Puissance installée	8 x 1,6 MW	2 x 4,5 et 3 x 3,2 MW	11 x 1,6MW	2 x 4,5 et 1 x 4,6 MW	63 MW
Puissance disponible	10,2 MW	7,2 + 7,7 MW	14 MW	10,9 MW	50,5 MW
Date de mise en service	2 000/01	1 979 & 2001	2 000/01	1 986 & 2 004	

**Tableau 6: Centrales thermiques (HFO) du RIS 2010 (Seutche, 2021)**

Centrales Thermiques (Fioul lourd HFO)	Oyomabang 1	Limbe	Total RIS
Localité	Yaoundé	Douala	
Puissance installée	3 x 6,5 MW	5 x 17 MW	104,5 MW
Puissance disponible	18,5 MW	80 MW	98,5 MW
Date de mise en service	Transformée au HFO en 2004	2 004	

Quant 'au RIN, le seul moyen de production thermique disponible est situé à Djamboutou près de la ville de Garoua qui est le principal centre de consommation du réseau (Tableau 7). Il existe aussi une petite centrale de 1 MW à Ngaoundéré en secours qui ne fonctionne plus. De plus, trois petites centrales isolées (3,8 MW) alimentent les localités de Kousseri, Poli, et Touboro.

**Tableau 7: Centrales thermiques (LFO) du RIN 2010 (Seutche, 2021)**

Centrales Thermiques (Fioul lourd LFO)	Constructeur	Type de Groupe	Puissance installée (KW)	Puissance Disponible (KW)
DJAMBOUTOU	MAN	16V 32/36	5000	4500
	MAN	16V 32/36	5000	4500
	MWM		1300	1200
	MIRRLESS	K8 MAJOR	2400	1800
<b>Total</b>			13,7MW	12MW

En ce qui concerne le troisième réseau interconnecté de l'Est, la principale centrale est d'une puissance installée de 9,6 MW à Bertoua. Elle alimente les principales localités urbaines raccordées au réseau. Nous dénombrons cinq autres centrales thermiques en zone rurale alimentant les centres isolés de Garoua Boulaï (0,3 MW), Bétaré Oya (0,1 MW) et Yokadouma (0,1 MW) (Tableau 8). La capacité totale de ces six centrales de production est de 12 MW (mais 6 MW sont disponibles en début 2006) assurant une production d'environ 40 GWh. (Ministère de l'Eau et de l'ENERGIE-PDSE 2030, JUILLET 2006) (Eneo, 2018).

**Tableau 8: Centrales thermiques (LFO) du RIE 2010 (Seutche, 2021)**

Centrales Thermiques (Fioul lourd LFO)	Constructeur	Type de Groupe	Puissance installée (KW)	Puissance Disponible (KW)
<b>BERTOUA</b>	Caterpillar	3516 B	1600	1400
	Caterpillar	3516 B	1600	1500
	Caterpillar	3516 B	1600	1450
	Caterpillar	3516 B	1600	1500
<b>Total</b>			6,4MW	5,9 MW

Au Cameroun nous avons constaté des zones qui ne sont pas interconnectées sur le système des trois réseaux Nord, Sud et Est. Pour cela des petits groupes diesel de moins de 500 kVA alimentent une trentaine de centres isolés. L'ensemble de ces installations représente environ 14 MW. Voir **Annexe B**.

## 1.5.2 Présentation et description des centrales thermiques à fuel dans la région du centre-Cameroun

### 1.5.2.1 Présentation sommaire

La **CTO** et **CTM** sont les centrales thermiques du Réseau Interconnecté Sud (RIS) géré par la société Eneo.

- La **CTO** : Située dans la région du centre-Cameroun précisément dans la ville de Yaoundé au quartier OYOM-ABANG. Elle est subdivisée en deux parts : la centrale thermique d'OYOMABANG I et la Centrale thermique d'OYOMABANG II et produit en électricité 13 MW.
- La **CTM** : Située dans la région du centre-Cameroun précisément dans la ville de Mbalmayo et produit en électricité 10 MW.

### **1.5.2.2 Fonctionnement des deux centrales thermiques**

Pour satisfaire les attentes de la hiérarchiques et celles des utilisateurs, le travail est organisé par le chef de la centrale au-dessus duquel se trouve un divisionnaire exerçant en synergie avec deux sections qui comportent un personnel qualifié pour assurer le bon fonctionnement des équipements. Il s'agit des équipes des exploitants dont le rôle est comparable à celui d'un chauffeur de voiture, constitués des équipes de quarts s'alternant à des périodes de huit heures successivement, et de deux équipes de maintenance constituées par les mécaniciens dont les tâches concernent les pannes mécaniques et les électriciens qui résolvent tous les problèmes liés aux pannes électriques tout au long de la journée. Ces deux dernières équipes font des interventions programmées et sur incidence.

Il est à noter que la centrale thermique d'OYOM-ABANG (CTO) est divisée en deux sous centrales I et II sur le même site et se partage le même personnel. Jusqu'en 2004 elles étaient équipées par des groupes électrogènes Diésel de marque CATERPILAR3516B WARTSILA VASA 18V32LN utilisant uniquement du gazole (LFO). Depuis cette date et compte tenu de la demande sans cesse croissante OYOM-ABANG I (OYOI) a subi une conversion en combustible, ceci amène à l'utilisation au fioul lourd (HFO) plus économique mais plus émetteur en termes de polluants dans l'atmosphère.

### **1.5.2.3 Le temps de fonctionnement et consommation**

Depuis que les centrales ont été construites, elles servent de centrale d'appoint au Réseau Interconnecté Sud (RIS). Le temps de fonctionnement prévu lors de l'installation dépendait de la demande en consommation, celle d'OYOM-ABANG approvisionnait plus les populations du Centre et plus précisément de Yaoundé pendant les différentes années tandis que celle de Mbalmayo approvisionnait les populations de Mbalmayo et du Sud-Cameroun (Eneo & CTO, Service d'exploitation, Archive, Yaoundé, 2018 ; Localité d'Afrique : [En ligne], mai 2018) :

- 2002-2004 : La centrale (OYO I et OYO II) constituée de trois groupes WARTSILA pour OYO I et de dix groupes Caterpillar fonctionnant exclusivement en LFO (OYO II) tournant 24h/24.
- 2004-2008 : Les centrales OYO I OYO II constituée des groupes WARTSILA, subit des modifications et des ajouts d'auxiliaires de traitement du nouveau combustible (HFO) il tourne en moyenne 16h par jour, de même pour OYO II qui ne subit aucune transformation mais une réduction du temps de fonctionnement.
- 2008-2015 : Les centrales OYO I ET OYO II fonctionnent 10 heures par jour. Notons que cela n'a été possible pour nous que d'avoir des données de temps de fonctionnement journalier, voire annuelle que pendant la période 2016-2020. De plus, de nouvelles centrales thermiques isolées en appoint sur le réseau interconnecté sont nouvellement construite ceci induisant à une légère fluctuation des productivités et du temps de fonctionnement de la centrale. Elles ne tournent plus fréquemment mais dans la gamme de 18heures-23heures depuis 2015 dont une moyenne de 5heures par jour
- Depuis la construction de la CTM, elle fonctionne avec les moteurs constitués des groupes WARTSILA VASA 32V18LN.

La consommation dans les moteurs se fait grâce aux compteurs de dépotage depuis la mise en fonctionnement dans les deux centrales où nous avons pu relever en HFO en volume moyenne dépoté VHFO = 6372149,66 litres et pour LFO un volume moyenne dépoté de VLFO = 5310494,25 litres (annexe C.2).

#### **1.5.2.4 Aperçu de la technologie et procédure générale de production**

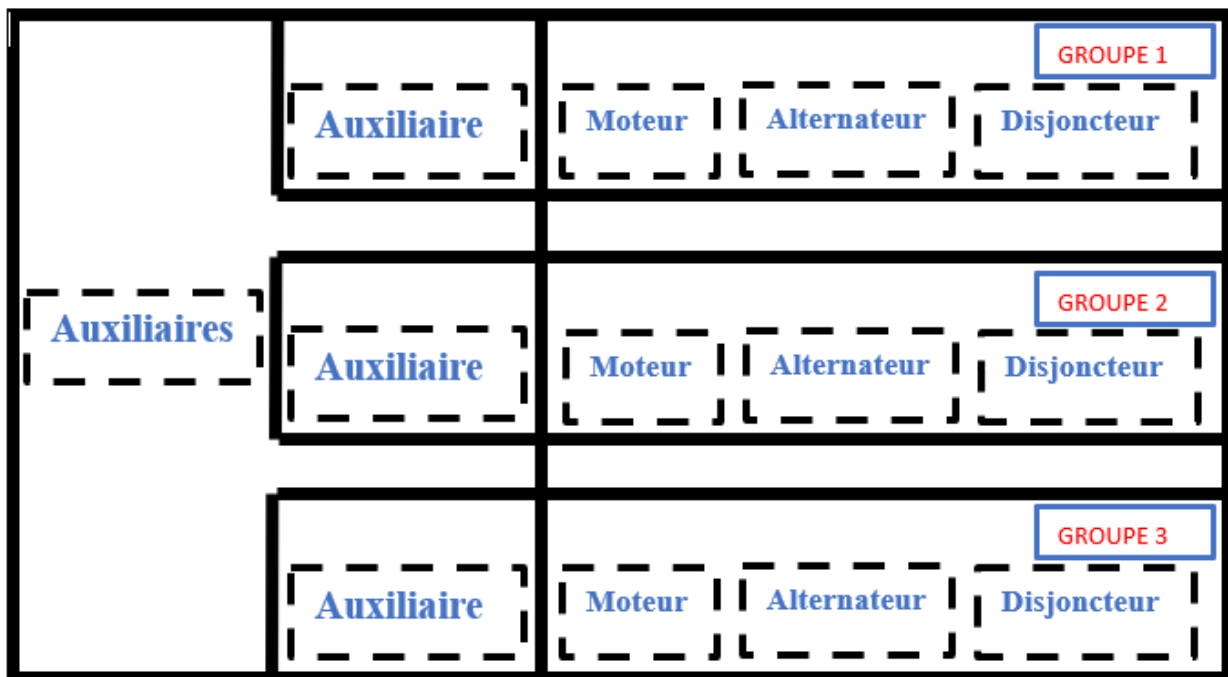
La disposition générale des équipements dans le site est présentée en trois grandes zones parmi lesquelles : la zone de production OYO I, OYO II et une partie appelée Poste qui est le siège des jeux de barres et des transformateurs élévateurs abaisseurs de très haute tension. Nous noterons ici que cette zone est très utile dans le processus d'approvisionnement des populations environnantes et de Yaoundé. La CTO I a été construite en 2000. Elle occupe les 25% de l'aire du site. Cette Centrale a une puissance installée de 19.668 MW, avec une puissance disponible de 18

MW. Elle est équipée de trois groupes WARTSILA turboalternateurs de 6,556 MW chacun à une tension de 15 kV disposés dans la salle des machines. Elle évacue son énergie à travers un transformateur 15/90 kV sur le réseau 90 kV.

Chaque groupe est constitué de plusieurs éléments, à savoir :

- Un moteur diésel ;
- Un alternateur ;
- Un disjoncteur ;
- Des auxiliaires du groupe.

Ces trois groupes ont en commun un certain nombre d'auxiliaires et la figure 15 ci-dessous illustre la disposition générale du groupe.



**Figure 15: Disposition générale du groupe pistons**

- Le moteur diésel de chaque groupe est constitué et logé dans les cylindres. Il démarre à air comprimé de 30 bars et fonctionne avec du fuel LFO (Light Fuel Oil) et du HFO (Heavy Fuel Oil). Il utilise de l'huile mobile Gard 440 pour sa lubrification ;
- L'alternateur fournit une puissance maximale de 6,556 MW sous une tension de 15 KV, c'est un alternateur à auto-excitation ;

- Le disjoncteur du groupe fonctionne sous une tension de 15 KV et protège le groupe contre les différents défauts électriques pouvant survenir lors du fonctionnement ;
- Les auxiliaires du groupe sont un l'ensemble des organes utiles pour la mise en service et le fonctionnement du groupe ; il s'agit entre autres des éléments suivants : le filtre à gasoil le filtre à huile, le séparateur d'huile, la pompe multi fuel, les résistances de préchauffages, les vannes, électrovannes et distributeurs, ventilateur, armoire électrique de commande etc...

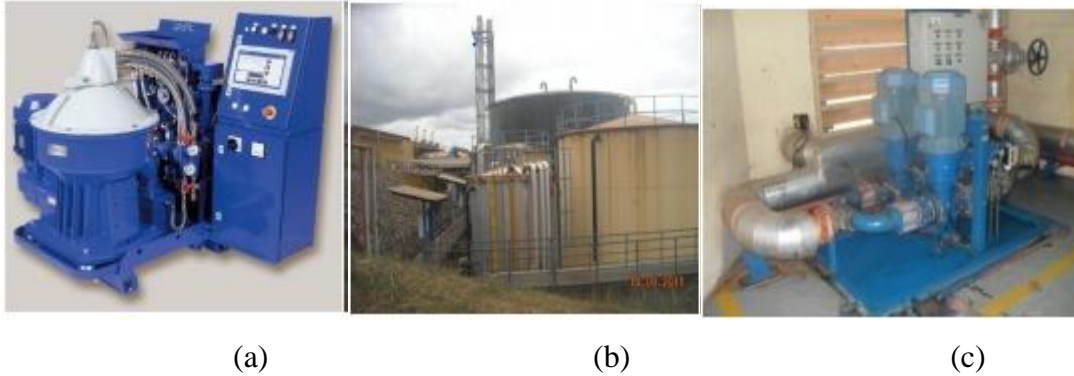
La figure 16 présente la disposition des machines dans la salle des machines OYO I



**Figure 16: Illustration de la salle des machines dans les centrales thermiques**

Chaque groupe est constitué de plusieurs éléments. Présentons d'abord quelques-uns qui entreront dans le traitement du fioul avant la chambre de combustion.

- **Le moteur diésel** de chaque groupe est constitué de 18 pistons logés dans les cylindres. Il démarre à air comprimé de 30 bars et fonctionne avec du fuel LFO (Light Fuel Oil) et du HFO (Heavy Fuel Oil). Il utilise de l'huile Mobile Gard 440 pour sa lubrification.
- **Un Séparateur**, le SU d'Alfa Laval qui purifie le fioul par centrifugation. Il permet d'enlever de l'eau et toutes les particules solides se trouvant dans le HFO et de ré-circulé le HFO se trouvant dans le Buffer tank (Figure 17a).



**Figure 17: Quelques équipements de la centrale thermique**

- a) Séparateur HFO de type Alfa Laval ; b) Aire de Rétention tous les tanks de stockage ; c) Pompe de dépotage HFO.
- **Une pompe de transfert** qui permet l'envoi du combustible vers le buffer tank ou vers le day tank.
  - Plusieurs **tanks de stockage** de combustible (LFO, HFO), La cuve de stockage du HFO de capacité  $1000 \text{ m}^3$ , la cuve de stockage LFO de  $300 \text{ m}^3$ , le buffer tank ou réservoir tampon de  $30 \text{ m}^3$  de capacité, le day tank ou réservoir journalier de  $80 \text{ m}^3$  de capacité et celui de réservoir des boues de capacité  $30 \text{ m}^3$  tous retenus dans un bac de rétention en cas de déversement ou écoulement (Figure 17b).
  - **Une pompe de dépotage** qui assure le transfert du combustible, du camion-citerne vers les tanks de stockage. Il est situé dans la salle de dépotage (Figure 17c).

La procédure de production de la centrale est basée sur le simple principe d'un groupe électrogène sauf qu'ici on traite au préalable le combustible à l'aide d'un certain nombre d'auxiliaires cités plus haut. Une fois traité on l'injecte dans un moteur thermodynamique celui-ci produisant une énergie mécanique attelée à l'aide d'un système de couplage à un alternateur qui produira en fin de chaîne une énergie électrique transformée, élevée et mis sur le RIS. On peut le résumer à travers le synoptique de production de la figure 18.

Le HFO étant un combustible sale et impur pour une combustion propre il doit être préalablement traité. Le combustible HFO après dépotage est transférée au réservoir intermédiaire au moyen de l'unité pompe de transfert ceci grâce à la vanne de remplissage automatique trois voies. Le combustible est transféré du réservoir intermédiaire vers le réservoir quotidien à travers

les modules de pompage, de chauffage et le séparateur, c'est à ce niveau que la purification du combustible a lieu. Une fois traité il est injecté dans le moteur à l'aide de trois sous-systèmes. À la sortie du moteur, l'énergie est transformée et envoyée dans un alternateur puis mise à la disposition des clients après traitement au poste de transformation.

Le synoptique de la procédure de production ci-dessous permet d'apercevoir plusieurs sous-systèmes mis en jeu lors de la combustion du fioul.

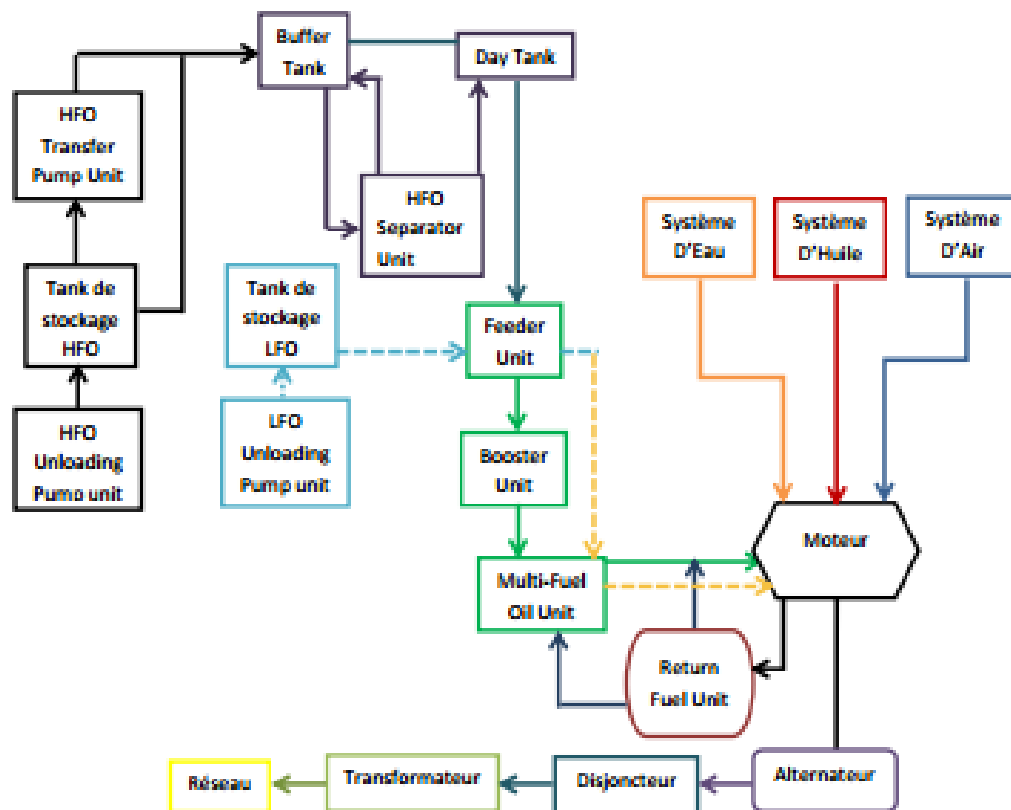


Figure 18: Synoptique de procédure de production de l'énergie dans la CTO et la CTM (Archive Eneo).

## 1.6 Les caractéristiques du fioul

La police de l'Eau et de l'Air est souvent consultée en urgence pour les problèmes de pollution par des hydrocarbures issus de fuites accidentelles à fioul de particuliers et lors de la combustion.

C'est pourquoi lors de la réunion du groupe de travail forage du 18 septembre 2008, il a été demandé au BRGM d'établir des recommandations d'intervention en cas de pollution de la nappe ou de l'air dans le cadre des opérations « Appui à la police de l'Eau et de l'air ».

Dans cette même optique, la notion de COP (conférence of the party en anglais) qui est une convention cadre des Nation Unies, dont le but est la réduction des émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à projeté le développement par la réduction des GES.

Récemment du 02 au 14 décembre 2018, une grande conférence s'est tenue à Katowice en Pologne précédée de celle de BORN en Allemagne puis celle de Marrakech au Maroc et ensuite celle qui a été très médiatisée à Paris en France du 30 novembre au 12 décembre 2015 a permis de conclure un accord engageant 200 Etats à réduire leurs émissions des gaz à effet de serre (GES). Cet accord avait pour ambition final de stabiliser le réchauffement climatique dû aux activités humaines « nettement au-dessous » de 2°C d'ici 2100 (par rapport à la température de l'ère préindustrielle) en renforçant les efforts pour atteindre la cible de 1,5°C.

Le fioul est un produit issu du raffinage (c'est-à-dire schématiquement de la distillation) du pétrole. On distingue trois types de fuel 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) avec une densité comprise entre 0,89 et 0,92 ; (gasoil) ;
- Le fioul lourd (HFO) avec une densité comprise entre 0,92 et 0,95.

## 1.7 La combustion du fioul

L'étude des phénomènes de combustion présente un grand intérêt pour la compréhension de la pollution. C'est pourquoi de plus en plus de travaux leurs sont consacrés. Ils permettent déjà une modélisation de la dispersion des polluants. Dans cette partie, il sera question de parler de la combustion du fioul de façon générale et plus précisément celui utilisé dans les centrales thermiques de Mbalmayo et d'Oyom-Abang. Enfin nous présenterons les zones affectées lors de cette combustion.

## 1.7.1 Généralité sur le fioul

Les fiouls sont des combustibles liquides résultant de la distillation du pétrole brut. Ils se divisent en deux classes.

- Les combustibles distillés, soutirés en phase gazeuse des colonnes de distillation des raffineries, (pétrole lampant, gasoil ou fuel-oil domestique) ;
- Les combustibles résiduels (fioul lourd) qui sont directement issus de la distillation atmosphérique.

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 désalphaltage. On obtient aussi 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 tension 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 appelé fioul lourd N° 2 se répartissent en trois produits distincts :

- Le fioul lourd HTS (Haute Teneur en Soufre) connu 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) connu sous le nom de fioul 3500 renfermant moins de 1% de soufre.

Ces différentes teneurs en soufre sont certifiées par la norme NF EN ISO 14596 / NF EN ISO 8754 NF EN 24260 ([Eneo & CTO, Service d'exploitation. Archive, Yaoundé, 2018](#)).

Les autres caractéristiques requises pour les fiouls lourds sont la viscosité, le point d'éclair, la volatilité, la teneur en eau et en insolubles. Toutefois, d'autres critères de qualité des fiouls lourds sont fréquemment mesurés et contrôlés, car ils conditionnent le fonctionnement des brûleurs

industriels. Le tableau 9 montre les valeurs moyennes et les plages usuelles de variation de ces paramètres. Ce fioul est de couleur noir ou brun noir et peut contenir une forte proportion d'hydrocarbures aromatiques parmi lesquels des hydrocarbures polycycliques ayant 4 à 6 noyaux

**Tableau 9: Certification des caractéristiques du fioul. (Guibet & Jean-Claude, 2006)**

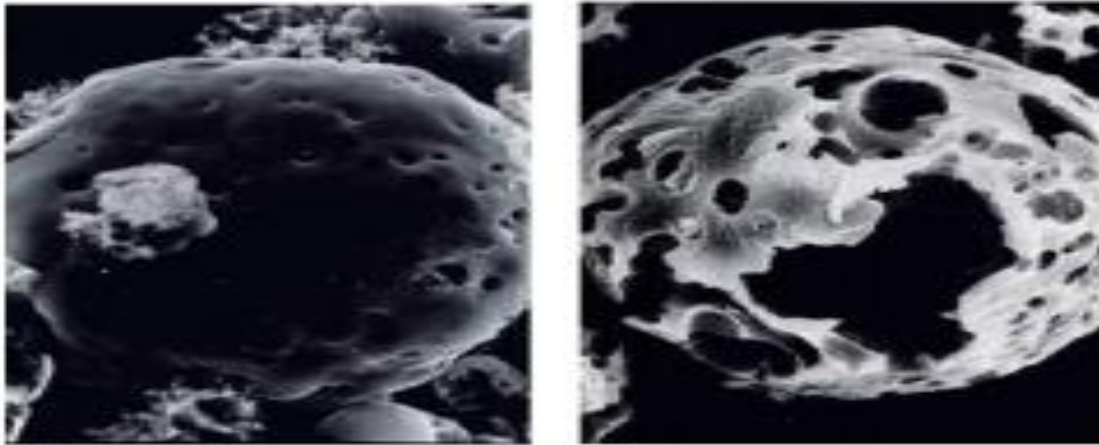
Caractéristique	Fuel N°2 ordinaire		Fuel n°2 BTS		Fuel N°2 TBTS		Méthode de mesure
	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage	
Masse volumique à 15 °C .....(kg/m <sup>3</sup> )	1020	980-1050	1000 (1)	980-1025	985	940-1010	NF T 60-101
Viscosité à 100 °C ..... (mm <sup>2</sup> /s)	< 40						NF T 60-100
Teneur en soufre ..... [% (masse)]	3,10	2,00-4,00	1,8	1,00-2,00	0,95	0,55-1,00	NF M 07-025
Eau ..... [% (masse)]	Moyenne : 0,10 Plage : 0,05 à 0,50						NF T 60-1 13
Teneur en insolubles par filtration à chaud ..... [% (masse)]	Moyenne : 0,10 Plage : 0,05 à 0,20						NF M 07-063
Résidu Conradson ..... [% (masse)]	17	10-21	15	10-18	12	10-16	NF T 60-1 16
Asphaltènes ..... [% (masse)]	9	3-15	7	2-10	6	2-10	NF T 60-115
Cendres ..... [% (masse)]	0,05	0,01-0,10	0,04	0,01-0,10	0,04	0,01-0,10	NFM 07-045/EN7
Vanadium ..... (mg/kg ou p.p.m.)	120	30-250	70	30-150	50	30-120	NF M 07-027
Sodium ..... (mg/kg ou p.p.m.)	Moyenne : 30 Plage : 10 à 100						NF M 07-038
Nickel ..... (mg/kg ou p.p.m.)	Moyenne : 50 Plage : 20 à 150						Torche à plasma
Azote ..... [% (masse)]	Moyenne : 0,45 Plage : 0,20 à 0,70						NF M 07-058 ASTM D 3228

(1) Moyenne théorique : en pratique, les masses volumiques des fuels BTS se répartissent pour l'essentiel de part et d'autre de la fourchette 995-1005.

L'identification des caractéristiques des fiouls utilisés ont été fait suivant le certificat de la SONARA. Nous pouvons dire que celui utilisé est le fioul lourd N°2 TBTS (Très Basse Teneur en Soufre inférieur à 1%) qui est un combustible dont nous étudierons la combustion afin de rechercher les impacts sur l'environnement plus tard.

Nous pouvons observer sous un microscope électronique les molécules entrant dans la composition chimique du fioul, mais ici il a deux formes selon le traitement additif (Figure19). Les fiouls lourds additifs avec Octapower 2200 ont été testés sur une chaudière d'essai au laboratoire du centre de recherche de TOTAL (CRES). Plus de 80 essais ont été réalisés et ont permis d'optimiser la formulation de cet additif de combustion répondant aux objectifs fixés : baisse

directe des imbrûlés carbonés ; baisse indirecte des oxydes d'Azote (après optimisation du réglage)  
; baisse du point de rosée acide d'environ 10°C ; baisse de l'encrassement du brûleur



a) Fioul non traité (2-8  $\mu\text{m}$ )

b) Fioul traité (2-10  $\mu\text{m}$ )

**Figure 19: Cénosphères au microscope électronique (Seutche, 2021).**

## 1.7.2 Processus de production

Le terme « combustion » s'applique à l'ensemble des phénomènes (réactions chimiques) qui se manifestent quand un corps combustible se combine partiellement ou en totalité avec un autre corps appelé comburant, en dégageant de la chaleur. La combustion comprend deux phénomènes essentiels qui sont : l'auto-inflammation et la propagation. Ce dernier phénomène est la conséquence du premier et est un phénomène ayant un grand impact sur l'environnement.

### ➤ L'auto-inflammation

Soient  $T$  et  $P$  la température et la pression du milieu réactionnel. Soit  $C$  la concentration en combustible ou plus généralement composition de réactifs. On parlera d'inflammation lorsque ces paramètres dépassent ou atteignent un certain seuil critique où l'oxydation exothermique s'est accélérée jusqu'à l'emballement.

### ➤ La propagation

Pour qu'il y ait propagation il faudra que  $P$ ,  $T$  et  $C$  atteignent ou dépassent un certain seuil critique et de plus, que des effets de parois et des phénomènes de coincement ne viennent

pas l'empêcher. En effet, on sait que la propagation n'a pas lieu au voisinage des parois et qu'elle nécessite une distance minimale appelée « distance de coincement ».

La combustion est une réaction mettant en jeu deux espèces : le comburant (oxydant) et le combustible (réducteur) dont l'ensemble constitue le milieu réactionnel bien défini

### 1.7.2.1 Le combustible

D'une manière générale, un combustible conventionnel de type industriel ou domestique est un mélange complexe de composés organiques divers dans lequel on retrouve les éléments chimiques avec des masses molaires et pourcentages massiques consignés dans le tableau 10.

**Tableau 10: pourcentage massique des éléments chimiques du fioul (Guibet & Jean-Claude, 2006)**

Éléments chimiques	Carbone (C)	Oxygène (O)	Hydrogène (H)	Azote (N)	Soufre (S)
Masse molaire (g/mol)	12	16	1	14	32
% en masse	87,9	0,0	10,8	0,4	0,9

D'après le certificat de qualité lors d'un dépotage à la centrale nous avons pu relever les informations précises sur les pourcentages massiques récapitulés dans le tableau 11 ci-dessous. Notons que celui du carbone est peu variable chez les fiouls lourds TBTS variant d'une plage de 85-88% en masse.

**Tableau 11: Pourcentage massique des éléments composants le fioul provenant d'un dépotage de la SONARA (SONARA, 2005)**

Éléments chimiques	Carbone (C)	Hydrogène (H)	Soufre (S)
Masse molaire en (g/mol)	12	1	32
% en masse	87,6	12,02	0,378

Le pourcentage massique de l'oxygène et de l'azote étant inexistant car ils ont un pourcentage massique nul dans le fioul lourd TBTS mais quasi-existant chez les HTS et BTS. En utilisant une méthode de calcul particulière (voir annexe D) tout en considérant une masse de 1kg de fioul. En remarquant pour ce qui est de la masse molaire total  $M_T$  nous pouvons appliquer aux données supérieures et obtenir les résultats récapitulés dans le tableau 12 :

$$M_T = 12x + y + 32r$$

**Tableau 12: Valeur des indices des éléments chimiques du fioul de SONARA (SONARA, 2005)**

Éléments chimiques	C	H	S
Masse pondérales (kg)	0.876	0.1202	0.0378
Indice des éléments	X mol	Y mol	Z mol
Valeurs des indices	73	120	1

Nous obtenons une formule brute de combustible HFO dont l'expression est :  $C_{73}H_{120}S_1$

### 1.7.2.2 Le comburant

D'une manière générale, un comburant de type industriel est constitué d'oxygène proprement dit plus ou moins dilué d'azote. Il répond à la formule générale :  $O_2 + xN_2$ . Trois cas se présentent alors :

- Si  $x = 0$ , on est en présence d'oxygène pur ;
- Si  $x = 3,78$ , on est en présence d'air atmosphérique ;
- Si  $x < 3,78$ , on est en présence d'air enrichi en oxygène.

L'énorme majorité des combustions de type industriel utilise l'air atmosphérique comme comburant. La composition de l'air sera : 21% d' $O_2$  et 79% de  $N_2$  en volume alors que 23% d' $O_2$  et 77% de  $N_2$  en masse.

### 1.7.2.3 Proportions relatives entre le combustible et comburant

Un procédé consiste à comparer le rapport combustible/comburant à un rapport de référence dit rapport stœchiométrique. L'expression qui définit la richesse du milieu réactionnel est donnée par la relation :

$$\varphi = \frac{(\text{Combustible})_{\text{reel}}}{(\text{Comburant})_{\text{reel}}} \frac{(\text{Comburant})_{\text{stœchiomle}}}{(\text{Combustible})_{\text{stœchiomle}}} \quad (1.1)$$

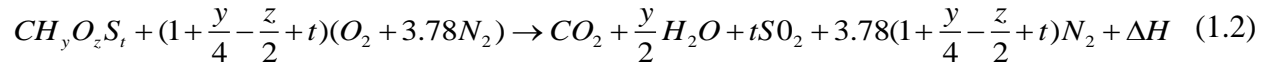
- Si  $\varphi = 1$ , on a un mélange stœchiométrique : c'est une combustion neutre opérant sans excès ni défaut de comburant ; c'est-à-dire en milieu stœchiométrique. Les fumées émises renferment du  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$  sans imbrûlé ni oxygène libre. Elle est dite « théorique ». Elle présente cependant un intérêt pratique du fait que son étude conduit à établir des réactions caractéristiques de la nature des réactifs.
- Si  $\varphi > 1$ , Combustion réductrice, défaut de comburant (ou excès de combustible) on a un mélange riche (en combustible) mais en défaut de comburant (symbole d) : c'est une combustion réductrice. Sur le plan économique, la combustion réductrice ou combustion ménagée sert à la valorisation chimique du combustible (thermochimie : carbonisation, gazéification) : l'industrie chimique a beaucoup de besoins en produits de base tels que gaz de synthèse ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) par exemple.
- Si  $\varphi < 1$ , on a un mélange pauvre (en combustible) mais en excès de comburant (symbole e) : c'est une combustion oxydante. Il s'agit d'une combustion dont le principe est appliqué dans le vaste domaine de la « production de chaleur ». Elle est dite « oxydante » du fait qu'elle se déroule avec excès de comburant. Elle est dite complète » du fait qu'au même titre que la combustion neutre théorique, les réactions chimiques se déroulent d'une manière idéale pour conduire à la formation exclusive de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , et  $\text{SO}_2$ .

On établit les expressions de 
$$\begin{cases} e(\%) = 100 \left( \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \text{ pour } \varphi < 1 \\ d(\%) = 100 \left( 1 - \frac{1}{\varphi} \right) \text{ pour } \varphi > 1 \end{cases}$$

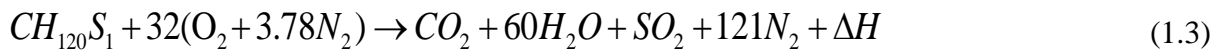
Où d et e sont des paramètres sans dimension

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 basse 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 :



La combustion complète et totale de la masse  $m$  de combustible doit, théoriquement faire intervenir :  $(X + \frac{Y}{2} + Z)$  mol de dioxygène ce qui correspond à :  $(X + \frac{Y}{4} + Z) V_m$ . Mais de manière générale une partie du dioxygène nécessaire est apportée par le combustible lui-même de sorte que l'on ait un volume de dioxygène égale à :  $(X + \frac{Y}{4} + Z - \frac{t}{2}) V_m$ . Ce schéma nous montre d'après les calculs effectués en annexe D que le Volume d'air  $V_a = 10,9983 dm^3(n) / Kg$  et le Volume de fumée sèche :  $V_f = 11,67142 dm^3(n) / Kg$ . Ces différentes valeurs nous permettront d'évaluer le rapport stœchiométrique  $\phi$  et on aura pour :

➤ La fraction  $(\frac{\text{combustible}}{\text{comburant}})_{stoch} = \frac{1}{10,9983}$  ;

➤ La fraction  $(\frac{\text{combustible}}{\text{comburant}})_{réel} = \frac{1}{30}$

Fraction définissant la valeur propre pour le modèle WÄRTSILÄ Vasa 18V32LN

Il vient un rapport de  $\varphi = 0,37$ . Nous constatons ici que  $\varphi < 1$ ; c'est une combustion oxydante et les produits de combustion sont les suivants :  $CO_2$ ;  $H_2O$ ;  $SO_2$ . Dans certains cas de combustion réductrice liés à plusieurs problèmes, on peut rencontrer les composés organiques volatiles (COV), les monoxydes de carbones (CO), les oxydes d'azotes (NOx), les fines particules...

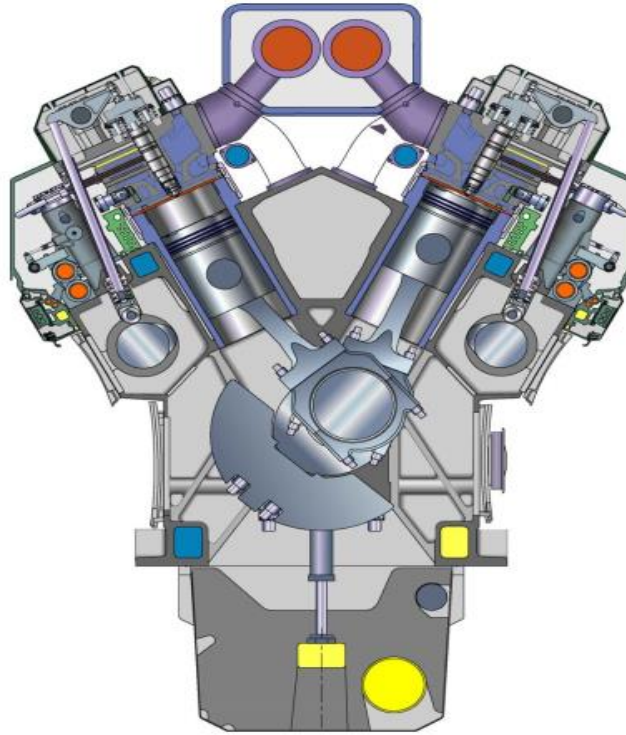
### 1.7.3 Moteur WÄRTSILÄ Vasa 18V32LN

Dans cette partie, nous nous attarderons sur une étude partielle du type de moteur utilisé. Ce moteur est un moteur turbo diesel à 4 temps à refroidissement intermédiaire et à injection directe de combustible. Ce moteur de type WARTSILA18V32LN et suralimenté par WÄRTSILÄ VASA (figure 20).

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 particulière dans la mesure où le rendement énergétique est plus important que la simple configuration de par ses caractéristiques. Ce qui suit définit les termes utilisés.

Le côté de l'opération ou le côté exploitation est le côté du moteur dans lequel est disposé les commutations (démarrer, arrêter, tableau de bord, régulateur de vitesse). La conduite de fin est le côté sur lequel se trouve la roue, l'extrémité libre du côté opposé au disque. La désignation des cylindres se fait selon la norme ISO 3744 et DIN 6265 (ISO 3744, 1994).

Conditions de référence : Les principales données du moteur sont : Cylindre de diamètre (320 mm) 12,6 pouces ; Carrera (350 mm) 13,8 pouces ; Déplacement par cylindre (28,15l) ; 1718 pouces cube normalement, la rotation du moteur est dans le sens horaire. (WARSILA 18V32LN). La pression atmosphérique est 100 kPa (1,0 bar) ; La température ambiante 298 K (25°C) ; l'humidité relative 30% ; refroidisseur d'air de charger 298 K (25 ° C).



**Figure 20: Bloc Moteur de configuration V d'un groupe WARTSILA VASA 18V32LN (Wartsilla, 2021)**

## **1.8 Généralités sur l'étude des Performances Environnementales (PE) : Concept et mesure**

Depuis plusieurs années, plusieurs entreprises ont pris conscience de la nécessité de développer un outil d'évaluation de leur performance environnementale. La performance environnementale (PE) est une mesure efficace pour promouvoir le développement industriel (Dong Huijuan et al., 2018). Ce développement a fait germer dans le monde le processus d'implantation des Parc Industriel (PI). Après le premier PI à Manchester au Royaume-Uni, les États-Unis ont établi le deuxième PI en 1951, la Chine, après sa réforme et sa politique d'ouverture à la fin des années 1970, un grand nombre de PI ont été développés (Côté et Reid 1997 ; Yu et al., 2015 ; Dong et al., 2018). Quant au Cameroun, la notion de parc industriel naît dans l'esprit après l'indépendance, au cours des années 1960. La première, celle de Bonaberie (Douala-Cameroun) est créée en 1968 (Essomè Edimo J-R, 2007) et compte actuellement plus de 50 entreprises industrielles qui constitueraient donc le premier parc industriel au Cameroun et d'autres en ont

suivis dans d'autres villes du territoire National telles que Yaoundé, Limbé, Nkongsamba .... Cette avancée a permis d'accroître le développement économique avec un produit intérieur brut (PIB) d'environ 194 Milliard de FCFA. Cependant, un développement progressif accentué mais moins rapide des PI a également induit des problèmes environnementaux croissant tels que les déchets solides, des émissions environnementales, l'épuisement des ressources et le changement climatique (Dong Huijuan et al., 2013, 2018) dans le monde entier (le cas récent est celui de la France, dans l'extrait du journal du lundi 18 Juillet 2018 à 6h00 GMT+1, la France a été écrasé par la chaleur en atteignant les 40°C) et au Cameroun nous avons observés par exemple la catastrophe du lac Nyos en 1986.

En partant de tout ce qu'on a pu constater au niveau de la littérature concernant la prise en compte par les entreprises à fioul, des aspects sociaux et environnementaux en plus des aspects économiques, on peut conclure que celles-ci sont obligées de suivre la tendance en mettant en place une gestion environnementale reflétant leur véritable performance environnementale. Sauf que cette PE est difficilement mesurable étant donné son caractère intangible. À ce niveau-là, plusieurs auteurs ont essayé de standardiser quelques indicateurs de la PE, mais malheureusement la plupart n'ont pas réussi à mettre en place des méthodes de mesures faciles et fiables. Souvent ils proposent des modèles de mesures difficilement utilisables par les entreprises puisqu'ils font appel à des modèles économétriques et mathématiques. Surtout que les gestionnaires de ces entreprises préfèrent toujours des méthodes de mesures simples, faciles à appliquer et adaptable à tout secteur d'activité. (Turki, 2009).

Nous cherchons au niveau de cette section d'éclaircir la notion de Performance Environnementale et de mettre en évidence les différentes méthodes d'évaluation et de mesures proposées au niveau de la littérature traitant de cette notion.

### **1.8.1 Définition du concept de Performance Environnementale**

Selon Turki (2009) : « *La performance environnementale représente une des composantes d'un concept plus large, à savoir la performance organisationnelle* ». C'est la composante qui traite tout ce qui touche à l'environnement au niveau de la stratégie globale de l'entreprise tels que

le cycle de vie des produits, la consommation de matières premières et même les investissements financiers destinés à maîtriser et à contrôler toutes sources de gaspillages de matières premières au niveau du processus de production. Turki (2009) propose de classer les définitions du concept de PE en deux catégories : une catégorie qui considère la PE comme un concept unidimensionnel et une catégorie qui la considère comme un concept multidimensionnel.

La première catégorie prend seulement en compte soit les externalités négatives produites par les entreprises. À ce niveau-là, les entreprises ne peuvent être qualifiées de performantes environnementales que si et seulement si elles parviennent à maîtriser et à réduire les volumes de leurs rejets dans la nature. Sauf que certains auteurs exigent la prise en compte du degré d'utilisation des ressources en plus des externalités négatives. (Markower, 1994 ; Wee et Quazi, 2005). Cette définition a été déjà proposée par Porter et Van der Linde (1995) qui affirment que les rejets représentent un vrai manque à gagner par les entreprises. C'est une forme d'inefficience dans l'utilisation des ressources devenues de plus en plus rares et chères. En d'autres termes, cette première catégorie de définition du concept de PE émane du concept d'éco-efficience selon lequel les entreprises ont intérêt à produire plus en utilisant moins de ressources naturelles et en générant moins de déchets et d'externalités négatives.

Il existe aussi une autre définition dans le cadre de cette deuxième catégorie, beaucoup moins soutenue par la littérature que la précédente, selon laquelle la PE des entreprises est évaluée selon sa conformité et son respect de la législation environnementale en vigueur (Denning et Shastri, 2000). Selon cette définition, une entreprise n'est performante que si et seulement si elle respecte et applique les règles environnementales imposées par les autorités publiques. En général cette catégorie de définition est très critiquée et souvent qualifiée d'incomplète puisqu'elle ne tient compte que d'une seule dimension alors qu'ils existent une multitude de dimensions dans la PE. Ceci nous amène à la deuxième catégorie, la catégorie de définition multidimensionnelle, selon laquelle la PE est un concept qui englobe un ensemble de dimensions, d'où l'appellation multidimensionnelle. En effet, dans sa série ISO14044 parue en 1996, l'Organisation Internationale de Normalisation (OIN) définit la performance environnementale comme étant : « *Les résultats mesurables du système de management environnemental, en relation avec la maîtrise par l'organisme de ses aspects environnementaux, sur la base de sa politique environnementale, de ses objectifs et cibles environnementaux* » (OIN, 2006).

En d'autres termes, selon cette deuxième catégorie, une entreprise est performante lorsqu'elle dispose d'un Système de Management Environnemental (SME) conformément à la norme ISO14001, sauf que selon Turki et al. (2017), cette définition limite le champ d'action des entreprises du fait qu'elle se base sur une vision purement gestionnaire. Pour remédier à ce problème, l'ISO (OIN) a proposé une autre définition plus globale dans sa norme ISO14031 selon laquelle, la PE englobe tout résultat issu de la gestion environnementale de l'entreprise. Même ce deuxième essai de définition est jugé trop général par rapport au problème de spécification des aspects environnementaux à prendre en compte dans la mesure de la PE vu le grand nombre d'indicateurs environnementaux qu'on peut trouver, que ce soit de nature gestionnaire et/ou technique. En l'absence d'une définition complète et englobant tous les aspects du concept de PE, Turki propose une définition selon laquelle : *« la performance environnementale est le résultat des efforts gestionnaires et techniques de l'entreprise dans la protection de l'environnement et dans la variation des pressions écologiques »*. Reste maintenant à savoir, comment peut-on mesurer et évaluer la PE des entreprises et quelles sont les méthodes proposées à travers la littérature.

### **1.8.2 Composantes principales indispensables pour évaluer la Performance Environnementale dans les centrales thermiques à Fioul au Cameroun**

Pour pouvoir juger la PE d'une entreprise, il est indispensable avant tout de trouver un compromis concernant les composantes et les indicateurs environnementaux capables d'évaluer et mesurer toutes les composantes environnementales de toute stratégie environnementale. Sachant que, selon Turki : *« La composante environnementale représente un aspect de la performance environnementale, alors que les indicateurs environnementaux constituent des mesures numériques de cet aspect, qui peuvent être financiers ou non »*. En effet, vu le caractère multidimensionnel du concept de PE, plusieurs aspects et indicateurs ont été proposés à travers la littérature sur ce sujet. Chaque essai propose un ensemble d'indicateurs et de composantes selon le type de problématique environnementale en question et surtout selon le secteur d'activité étudié.

Parmi les études traitant la méthode de mesure de la PE on trouve, le projet européen intitulé *Mesuring Environmental Performance (MEPI, 2001)* qui propose cinq composantes principales à savoir : les rejets solides, les rejets liquides, les rejets atmosphériques, la consommation d'eau et la consommation d'énergie (*Berkhout et al., 2001*). Sauf que selon Turki, ces résultats sont relatifs aux secteurs d'activités étudiés et ne peuvent être généralisés. Une autre étude intitulée *Global Reporting Initiative (Gri, 2006)* propose aussi sept composantes principales de la PE :

- Les matières, soit la quantité de matières premières utilisées ;
- L'énergie, soit la quantité d'énergie utilisée ;
- L'eau, soit la quantité d'eau consommée ;
- La biodiversité, qui correspond aux impacts importants dans des produits et/ou des services de l'entreprise sur la biodiversité ;
- Les rejets, à savoir toutes les émissions (liquides, solides et atmosphériques) de l'entreprise ;
- Les produits et les services, c'est-à-dire les principaux impacts environnementaux des produits et ou des services de l'entreprise ;
- La conformité, qui concerne les sanctions financières et non financières prise par le gouvernement.

Plusieurs autres initiatives ont essayé de spécifier les composantes de la PE telles que, la Table Ronde Nationale sur l'Environnement et l'Économie (TRNEE) dénombrant cinq aspects environnementaux : la qualité de l'air, la qualité de l'eau douce, les émissions de gaz à effet de serre, la couverture forestière et l'étendue des terres humides (*trnee, 2003*). On peut citer aussi l'essai de Jung et al. (*2001*) qui proposent trois principales composantes : l'intrant (input : consommation d'énergie et de matières premières), l'extrait (output : externalités négatives produites par l'entreprise) et le processus (l'installation de nouveaux équipements et le recyclage des matières).

Vu l'absence de compromis concernant les composantes de la PE, rendant difficile l'élaboration d'un modèle standard capable de regrouper tous les aspects environnementaux possibles, Turki propose un modèle qu'il estime facilement adoptable par les entreprises et qui s'appuie sur trois principales composantes à savoir: la composante stratégique, qui évalue les

efforts gestionnaires de l'entreprise dans le domaine de la protection de l'environnement; la composante opérationnelle, qui évalue la quantité de rejets de la firme (essentiellement liquides, solides et atmosphériques) et de matières premières et d'énergies utilisées; la composante relationnelle, qui évalue la nature des relations entre l'entreprise et ses partenaires (Turki, 2009).

### 1.8.3 Les impacts générant les activités dans la centrale thermique à fioul

#### 1.8.3.1 Impact des activités sur l'eau souterraine et surface

L'activité au sein des centrales thermiques dans la région du centre Cameroun génère des déchets (dégradables et non dégradables) qui sont des sources de pollution des eaux, il s'agit :

- Des déchets industriels et domestiques ;
- Des déversements accidentels d'hydrocarbures ou de produits chimiques voir Figure 21 ;
- Les effluents liquides (eau grise, eau noire, eau de production, eau de drains ouverts et fermés).



**Figure 21: Déversement des produits dans le milieu récepteur dû à une fuite dans l'échangeur eau huile sortant par la purge**

Ces effluents contiennent des hydrocarbures provenant des eaux de production, huiles, métaux lourds provenant des eaux de drainage.

### **1.8.3.2 Impact sur la qualité de l'air**

Les émissions futures de gaz (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO) et poussières pouvant modifier la qualité de l'eau et de l'air seront 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 pollutions émises 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 physico-chimiques avec pour risque des effets indésirables sur la santé et l'environnement. Les émissions des gaz à effet de serre font et feront l'objet d'un suivi particulier au cours de notre étude.

Toutefois, des équipements spécifiques et appropriés seront mis en place pour réduire au maximum, à long terme les gaz qui détériorent la qualité de l'air. La modernisation des centrales thermiques, l'amélioration de la qualité de ces équipements augmentera leurs rendements.

### **1.8.3.3 Impact des activités sur la biodiversité**

Les activités menées dans les centrales thermiques produisent des déchets solides et liquides qui sont déversés dans l'atmosphère dans les bacs des effluent liquides solides pour suivre un traitement après par la société BOCOM, soit à travers des rigoles de drainage hors du site, par fuite ou par non contrôle d'un déversement. Ces rejets pourront être à l'origine de la modification des caractéristiques physico-chimiques du milieu et une modification de l'habitat des espèces floristiques et même fauniques de la zone. Il faut noter l'apparition de nouvelles espèces affectionnant les milieux pollués et les hydrocarbures. On a donc une variation de la biodiversité, due à la perturbation de l'équilibre écologique

De plus le dépérissement soudain constaté surtout depuis 1980 semble relever des causes tout à fait inhabituelles. Les responsables considèrent que la pollution atmosphérique est l'un des nombreux éléments participant aux dépérissements forestiers. En France, le programme DEFORPA (Dépérissement des Forêts Attribué à la Pollution Atmosphérique) ainsi que des recherches en laboratoire, ont montré que les causes du dépérissement forestier sont très complexes telles que sols de mauvaise qualité, sécheresses anormales, présence des polluants dans l'atmosphère principalement la pollution acide et l'ozone (Temhoua, 2008).

#### **1.8.3.4 Impact des activités sur le sol**

Les quantités d'hydrocarbure utilisées vont augmenter, du fait de la demande grandissante en énergie des populations. Une partie, même moindre s'échapper des pompes, des tuyaux, des auxiliaires de traitements du fioul avant injection. Il existe parfois des fuites au niveau des chemises des moteurs qui peuvent provoquer la pollution des sols et par infiltration celle de la nappe phréatique principale source d'eau potable ravitaillant les populations environnantes.

Par ailleurs, le transport routier moyennement intense au sein de la centrale durant les activités liées au dépotage, les vibrations créées lors des démarrages et fonctionnement des moteurs pourraient jouer un rôle dans la dégradation de la chaussée et même l'affaissement des sols (croule terrestre). Notons ici que la structure de la croule (dômes rocheux) est un facteur de transmission des vibrations un peu plus au niveau de la lithosphère (manteau supérieur est à l'origine de la dynamique des plaques tectoniques) zone de vibration sismique.

#### **1.8.3.5 Impact des activités sur le milieu humain**

Les activités liées à la production de l'électricité par combustion du fioul sont une source de revenus pour le pays et une source d'emplois pour tous les camerounais mais en particulier pour les populations de la zone du site de production. Autant la création de nouveaux emplois sera bénéfique, autant elle peut être une source de conflits ou de perturbations socio-économiques. Les emplois générés par le projet seront limités puisqu'il n'y n'en aura pas assez pour tous les jeunes

demandeurs. Cette situation d'insuffisance pourrait générer une compétition entre les populations et entraîner des conflits sociaux.

Par ailleurs, de par le caractère temporaire de certains de ces emplois, notamment ceux liés aux activités de génie civil (projet de réfection du parking des camions de dépotage hors site), ces opportunités d'emploi pourraient avoir des effets néfastes sur la vie sociale dans la zone. À long terme, elles pourraient générer des conflits non négligeables entre Eneo et les populations utilisatrices de la voie principale. L'accroissement du petit commerce aux alentours des centrales et la demande additionnelle en structures d'accueil (sanitaires, hébergement) seront les résultats de cet impact.

### **1.8.3.6 Impact cumulatif**

Les impacts cumulatifs sont le résultat du cumul et de l'interaction de plusieurs effets directs et indirects générés par le fonctionnement des installations dans le temps et l'espace et pouvant conduire à des changements brusques ou progressifs des milieux. La répétition des effets ponctuels dans le temps et l'espace a conduit à l'analyse des effets cumulatifs. Il s'agit de la bioaccumulation des sédiments et déchets solides au niveau de certaines composantes organiques qui ne peuvent plus être assimilés par le milieu récepteur et le modifier. De même, les activités menées dans le passé par les différentes centrales thermique de la région du centre ainsi que celles entreprises par les autres établissements voisins à l'instar du Parc National du Génie-civil, Société BUNS sont susceptibles d'avoir des effets négatifs et positifs cumulés sur l'environnement du site (SONARA, 2019).

### **1.8.3.7 Impact des activités sur la santé**

L'évolution des effets sur la santé de la population, des activités liées à la combustion est fonction de la détermination des émissions, des voies de transfert et 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. Certaines maladies récurrentes existent dans le voisinage de la centrale entre autres le paludisme, les problèmes respiratoires, la fièvre, les diarrhées, la typhoïde, la grippe, la tuberculose, les maladies de la peau. La plupart de ces pathologies sont en faible rapport avec les activités de la centrale. A l'heure actuelle aucune étude ni mesure ne permettent de définir précisément l'impact de la centrale sur le développement des problèmes ou maladies respiratoires. Toutefois, l'évaluation de l'impact sanitaire considère trois types d'exposition (SONARA, 2019) :

- Une exposition par inhalation dans le cadre résidentiel, situé à proximité immédiate du site.
- Une exposition par ingestion directe (ex : eau contaminée) ou indirecte, c'est à dire les jardins potagers et les pâturages, situés à proximité immédiate du site ou bien par l'ingestion d'aliments d'origine animale préparés à partir d'animaux élevés, chassés ou pêchés sur ou à proximité du site.
- Une exposition par absorption cutanée.

Ces différents modes de transfert des polluants en fonction du milieu récepteur sont récapitulés dans le tableau 13 ci-dessus.

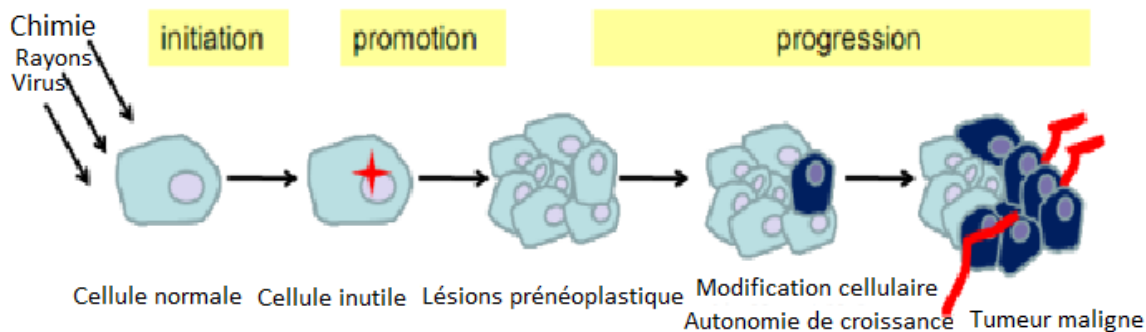
**Tableau 13: Mode de transfert des polluants (Seutche, 2021)**

Milieux contaminés	Mode de transfert des polluants
Air	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispersion des sources diffuses et canalisées</li> <li>- Émission des poussières ou de particule du sol dans l'atmosphère</li> <li>- Valorisation des polluants sous forme gazeuse à partir du sol</li> <li>- Dépôt sur les sols ou les hydro systèmes</li> </ul>
Eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lixiviation</li> <li>- Battement de la nappe</li> </ul>
Eaux superficielles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ruissellements, inondations</li> <li>- Alimentation par des eaux souterraines contaminées</li> </ul>
Sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lixiviation</li> <li>- Ruissellements, inondations</li> <li>- Émission des poussières ou de particules du sol dans l'atmosphère puis de position sur le sol</li> <li>- Émission sous forme gazeuse dans l'atmosphère puis dissolution et dépôt sur le sol</li> <li>- Battement de la nappe contaminée</li> </ul>
Plantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prélèvement par des racines puis transfert vers la partie aérienne de la plante</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Émission des particules du sol dans l'atmosphère puis déposition sur les feuilles</li> <li>- Émission des gaz à partir du sol puis absorption par des feuilles</li> </ul>
Animaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prélèvement par ingestion, inhalation et contact cutané</li> <li>- Bio magnification dans la chaîne alimentaire bioconcentration</li> </ul>

Les HAP qui sont des composés ubiquitaires de l'environnement dont les niveaux de concentration sont très variables, en fonction de l'urbanisation, du chauffage résidentiel et du trafic, et peuvent atteindre des concentrations particulièrement élevées en milieu industriel, entraînant un risque pour la santé des sujets exposés. La surveillance de l'exposition des populations aux HAP est donc un enjeu considérable pour estimer les risques sanitaires notamment cancérogènes des populations et passe par le développement de bio marqueur d'exposition et de bio marqueur d'effet génotoxique (Douki and Maitre, 2009).

Les populations sont exposées à des mélanges complexes pouvant exercer entre eux des effets additifs, synergiques ou inhibiteurs de polluants dont la composition chimique est très variable en fonction des sources d'émission. L'estimation des risques liés à l'exposition aux HAP est rendue difficile par le fait que les populations sont pratiquement toujours exposées à des mélanges souvent complexes et divers, ce qui les rend difficiles à caractériser. Afin de contourner cette difficulté, différentes approches s'appuyant sur un composé de référence représentative de l'ensemble des autres composés du mélange ont été élaborées. Dans cette approche, les données de toxicité obtenues chez l'homme ou chez l'animal pour un ensemble de mélanges sont appliquées à un autre mélange qui lui ressemble suffisamment afin d'estimer les risques potentiels de cancer chez l'homme ce dernier est un processus multi étapes avec trois grandes étapes (figure 22): initiation, promotion, progression (Douki and Maitre, 2009).



**Figure 22: Processus multi étapes du développement d'un cancer (Douki et Maitre, 2009).**

Le risque par inhalation directe par voie d'exposition principale, pour les composés émis (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, poussières et COV) représente le principal scénario d'exposition aux émissions d'une centrale. L'ingestion, par voie d'exposition secondaire, suite à un transfert au travers de la chaîne alimentaire des substances déposées au sol. L'absorption cutanée. L'exposition par ingestion paraît beaucoup plus incertaine que celle par inhalation. Il apparaît cependant que la source d'exposition principale concerne le portage main-bouche par les enfants résidant autour du site des retombées des émissions atmosphériques.

D'une part l'exposition aux substances rejetées dans l'eau, du fait de leur dilution généralement très importante dans l'émissaire aqueux, ne présente qu'un risque très faible. L'exposition caractérisée pour chaque voie d'exposition, par sa durée, sa fréquence et par le niveau de concentration peut être à l'origine de :

- Troubles respiratoires et à moindre degré des troubles cardiaques et hématologiques (SO<sub>2</sub>) ;
- L'irritante pour les yeux, la peau, les muqueuses et peut provoquer des troubles respiratoires.

## Conclusion

Au terme de ce chapitre dont l'objectif était de faire une revue de la littérature en se référant sur notre cas d'étude qui est la zone du centre-Cameroun. Un rappel exhaustif s'est fait sur les lois liées à la réglementation en terme du respect des lois environnementales. La suite de notre concerne

la généralité des différentes espèces inversées par les différentes méthodes de la modélisation inverse et enfin une étude synoptique sur des performances environnementales a été faite avec une revue efficace et détaillée. Le deuxième chapitre sera axée l'analyse des méthodes d'estimations des gaz à effet d serre (GES) et des polluants émis lors de la combustion du fioul et la mise sur pied d'un outil de performances environnementales dans les deux sites industriels.



## **CHAPITRE 2 : Matériel et Méthodes**

## Introduction

Les politiques environnementales nationales se sont inspirées des règles internationales, elles-mêmes fondées sur les approches méthodologiques de la gestion durable. Le gouvernement Camerounais, à travers le Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (MINEP) en collaboration avec d'autres structures étatiques, est chargé de la mise en œuvre des instruments juridiques liés à la gestion environnementale. Ce chapitre présente en amont les méthodes d'analyses d'impacts applicables au secteur industriel et notamment aux méthodes d'estimation des émissions des GES et des polluants. Méthodes liées résolution des équations de transport des polluants et la méthode liée l'inventaire des impacts environnementaux lors de la production de l'électricité dans centrales thermiques de la région du centre-Cameroun.

La mise en œuvre et l'applicabilité de la méthode de couplage algorithme génétique-modèle gaussien (GA-Gaussian) ont été utilisées pour optimiser l'estimation des émissions des GES et des polluants atmosphériques. Ce même modèle de couplage nous a permis de faire un échelonnage des espèces inversées par la méthode de la modélisation inverse au cours du temps. Néanmoins, ces modèles sont fortement dépendant d'une bonne connaissance des conditions atmosphériques ainsi que le mouvement des particules dans l'atmosphère qui caractérise spatialement et par leur évolution temporelle de l'identification des sources polluantes. Quelques connaissances intégrées en électronique ont été impératives et souhaitables pour intégrer la notion de capteurs programmable afin d'identifier chaque polluant dans l'atmosphère avec une échelle considérée ( $5,33 \times 6,85 \text{ cm}^2$ ). Ces capteurs identifient les polluants à partir d'un signal analogique et envoient le signal numérique via un microcontrôleur intégré. Ce signal reçu à la sortie donne une valeur de la concentration de l'espèce à identifier. Puis temporellement la source devient caractérisée.

Il en ressort de cette analyse que l'application de la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) pour une évaluation de la meilleure performance environnementale est appliquée à la centrale thermique d'Oyom-Abang ainsi que celle de Mbalmayo.

## **2.1 Matériels et Méthodologies de base des inventaires d'émissions industrielles**

### **2.1.1 Inventaires des émissions atmosphériques issues des sites industriels**

#### **2.1.1.1 Méthodes d'évaluation de la consommation du fioul**

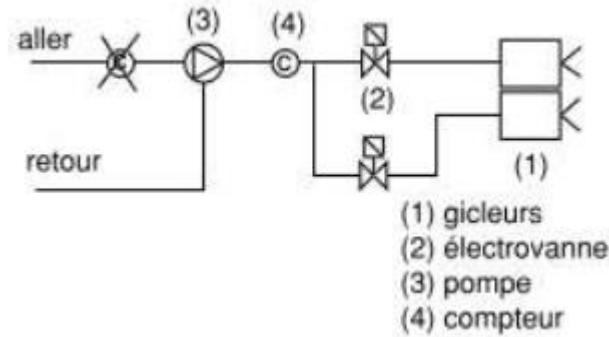
Parmi les différentes centrales thermiques étudiées, plusieurs types de méthodes d'évaluation de la consommation ont pu être répertoriées et exploitées suivant des facteurs intrinsèques. Celles-ci sont fonction du temps de fonctionnement, l'espace et le secteur liés aux types de raccordement que connaissent les centrales isolées et interconnectées. Ces méthodes tiennent compte d'une non linéarité dans le flux de consommation. Ainsi, l'énergie produite en fonction du temps implique une déperdition dans le temps pendant le processus de combustion et particulièrement à la consommation de fioul. Ce dernier indicateur de perte de puissance évolue suivant le même rythme que les heures de fonctionnement. Mais il est quantifié de manière différente. Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la consommation du fioul :

➤ **La règle graduée**

Fixée sur les tanks de stockage et munie d'un curseur déplaçable qui donne des valeurs approximatives consommées. Généralement elle ne dispose pas d'une information précise, causée par une impossibilité de détection des faibles variations.

➤ **Le captage volumétrique**

Basé sur un principe de piston oscillant. Pour mesurer la consommation du moteur, un compteur généralement placé en aval de la pompe et en amont des électrovannes est utilisé (Figure 23). À cet endroit, le compteur ne comptabilise que le volume de fioul effectivement consommé. Notons que ces compteurs à fioul ont une marge d'erreur de moins de 1%.



**Figure 23: Installation du compteur en aval de la pompe (Institut, 2000)**

➤ **La mesure de la consommation en litre**

En considérant le temps de fonctionnement du brûleur au moyen d'un compteur horaire suivant la formule empirique donnée par l'équation (2.1).

$$C = 3,75 \times 10^{-3} \times D \times \sum_{i=1}^n H_i \times \sqrt{\frac{P}{7}} \quad (2.1)$$

**C**= Consommation en tonnes de fioul durant une période déterminée ;

**D** = Débit du gicleur en gal/h précisé sur la fiche d'entretien du brûleur ;

**P**= Pression de la pompe d'alimentation en bars, précisée sur la fiche d'entretien du brûleur ;

**H<sub>i</sub>**= Nombres d'heures de fonctionnement du brûleur sur la période choisie.

En plus du compteur horaire, un compteur de déclenchement du moteur permet de déceler des dysfonctionnements (Institut, 2000).

➤ **La méthode du niveau d'activité**

Elle évalue la consommation de fioul en tenant compte des paramètres liés à la fin de production de la chaîne. C'est ainsi que l'expression de l'activité suivant l'équation (2.2) est ramenée aux unités de tonnage tout en sachant que dans nos centrales, la consommation est exprimée en unités de volume après dépotage.

$$A_j = 9,6 \times P \times C_{Sj} \times 10^{-6} \times \sum_{i=1}^n T_{i,j} \quad (2.2)$$

$A_j$  = Consommation de fioul en tonnes du jour j ;

$P$  = Taille de l'unité (MW) ;

$T_i$  = Temps en (h) de consommation pour le jour les heures i du jour j ;

$C_{sj}$  = Consommation spécifique de fioul par unité d'énergie électrique produite du jour j en (th/KWh).

### 2.1.1.2 Méthode d'estimation des émissions de GES hors fluorés

L'estimation des émissions de GES passe par plusieurs étapes. D'abord l'identification de l'activité susceptible de produire des émissions ensuite établir des degrés de priorités aux divers GES. Notons ici que le GIEC a accordé la priorité la plus grande à trois GES directs tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), et le protoxyde d'Azote (N<sub>2</sub>O). (GIEC-a, 2006).

La règle générale qui prévaut à l'établissement d'un bilan d'émission est la suivante :

- Utiliser en priorité (pour l'industrie), des facteurs d'émissions spécifiques relatifs à des installations individuelles dès lors qu'ils peuvent être justifiés ;
- Utiliser des facteurs d'émissions spécifiques nationaux : pour le Cameroun, nous disposons de ceux appliqués au Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA), de l'Agence des Normes et de la Qualité (ANOR) et de pour l'élaboration des inventaires officiels vue les ratifications faites liées à la pollution environnementale ;
- Dans les cas où ces facteurs d'émissions ne sont pas adaptés, nous utiliserons les facteurs d'émissions des instances internationales (GIEC) (GIEC, 2022).

Pour assurer une certaine cohérence dans les évaluations des émissions et pour produire des chiffres comparables avec les inventaires internationaux, nous nous proposons d'utiliser les facteurs d'émissions du GIEC.

## A- Émissions de CO<sub>2</sub>

L'évaluation par calcul des émissions de CO<sub>2</sub> produits par la combustion peut se faire à trois niveaux, tel que redéfini dans les lignes directrices 2022 du GIEC : Niveau 1 ; 2 ; 3. Les méthodes de niveau 1 sont basées sur l'estimation des émissions à partir de la teneur en carbone des combustibles disponibles sur les principales activités de combustion. Les méthodes des niveaux 2 et 3 sont utilisées surtout par les pays en voie de développements et les pays développés car elles nécessitent un inventaire détaillé de l'équipement des infrastructures et des facteurs d'émissions. Dans le cadre de notre étude, nous allons utiliser les méthodes de niveau 2. Les estimations des émissions nationales seront alors fondées sur les quantités de combustibles consommées et sur la teneur en carbone des combustibles.

En ce qui concerne la combustion, les émissions de dioxyde de carbone peuvent être calculées avec une très grande précision à partir d'un bilan du carbone contenu dans le combustible. Le pouvoir calorifique inférieur et la teneur en carbone du combustible, nécessaire à ce calcul, peut être mesurés avec précision par l'exploitant ou obtenu auprès de son fournisseur. Le calcul des émissions de dioxyde de carbone lié à l'utilisation énergétique des combustibles comporte 5 étapes qui peuvent faire l'objet des contrôles présentés ci-dessous par l'inspection des installations classées :

- Détermination de la quantité de combustible consommée au cours de l'année N ;
- Calcul de la consommation énergétique à partir de la quantité de combustible consommée et du Pouvoir Calorifique Inférieur (**PCI**) du combustible ;
- Calcul des émissions potentielles de carbone à partir de la consommation énergétique et du facteur d'émissions de carbone ;
- Calcul du carbone réellement oxydé à partir des facteurs d'oxydation ;
- Conversion du carbone oxydé en émissions de CO<sub>2</sub>.

## B- Émissions de Méthane CH<sub>4</sub> et protoxydes d'azotes N<sub>2</sub>O

Pour une estimation des émissions de Niveau 2, les données suivantes sont nécessaires pour chaque catégorie de source et chaque combustible :

- Données sur la quantité de combustible brûlée dans la catégorie de source, exprimée en unité énergétique.
- Un facteur d'émission par défaut pour chaque gaz.

L'équation (2.3) utilisée dans les travaux de Darío & Watterson (2006) et de Seutche et al (2018) nous présente de façon quantitative l'évaluation des émissions à partir des données d'activités.

$$\mathbf{\acute{E}missions}_{\text{GES}} = \mathbf{Donn\acute{e}e\ d'activit\acute{e}} \cdot \mathbf{(Facteur\ d'\acute{e}mission)}_{\text{GES}} \quad (2.3)$$

$\mathbf{\acute{E}missions}_{\text{GES}}$  : Sont les émissions des gaz à effet de serre donné par type de combustible (kg) ;

**Consommation combustible** est la quantité de combustible brûlé (TJ) ;

**(Facteur d'émission)<sub>GES</sub>** est le Facteur d'émission par défaut d'un GES donné par type de combustible (kg. Gaz/TJ).

Les **facteurs d'émissions** permettent de convertir une donnée d'activité en quantité de gaz émis. La multiplication de cette quantité par le PRG du gaz étudié permet de quantifier l'impact climatique dont l'unité est la tonne équivalent dioxyde de carbone notée t $\acute{e}qCO_2$ .

$$\mathbf{\acute{E}missions}(t\acute{e}qCO_2) = \sum_{\text{gaz}} \left[ \mathbf{\acute{E}missions}_{\text{gaz}} \times \mathbf{PRG}_{\text{gaz}} \right] \quad (2.4)$$

Dans beaucoup de cas, les facteurs d'émissions intègrent déjà les PRG et convertissent directement la donnée d'activité en t $\acute{e}qCO_2$ . La durée de vie dans l'atmosphère des GES peut s'avérer considérable, de sorte que leur potentiel de réchauffement global à l'horizon 100 ans soit très élevé. Comme l'indique le tableau 14 ci-dessous.

**Tableau 14: Pouvoir de réchauffement global des GES direct (hors fluorés) (GIEC, 2022)**

GES (hors fluorés)	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
PRG (à 100 ans)	1	25	298
Durée de vie (ans)	50-200	1220	2000

### 2.1.1.3 Méthode d'estimation des émissions des polluants

L'étude des Centrales thermiques a permis la collecte des données sur le combustible durant plusieurs années. Les espèces cibles sont les matières particulaires PM (2.5µm et 1 µm), PM (10µm), les oxydes de soufre SO<sub>x</sub>, les oxydes d'azotes NO<sub>x</sub>, les monoxydes de carbones (CO) et les composés organiques volatiles (COV). L'estimation de ces émissions s'est faite au moyen de deux bases de données (ANNEXE C) dans laquelle toutes les informations reliant les émissions ont été compilées au niveau de l'unité de base. Elle tient compte de 7 paramètres :

- Le type de moteur thermique ;
- Le type de combustible ;
- Le secteur géographique ;
- La consommation de fioul par unité d'électricité fourni ;
- Le temps de fonctionnement ;
- Le pourcentage des éléments constituants chimiquement le fioul ;
- La technologie de commande des émissions de PM, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, COV et de CO.

La centrale thermique est une entité à laquelle est associé le facteur d'émission utilisée dans l'expression mathématique. Elle rend compte d'une activité émettrice.

En considérant séparément les différentes catégories de sources (surfaciques, grandes sources ponctuelles et éventuellement linéaires), les émissions sont estimées pour chacune des activités émettrices élémentaires retenues pour l'inventaire.

Une description plus détaillée d'une substance, un intervalle de temps de fonctionnement et une entité géographique s'illustre par la formule (2.5) (Fontelle, 1995) :

$$E_{s,t,z} = \sum_{a,i,f} \left[ A_{a,i,f,t,z} \times \sum_p \left[ F_{s,a,i,f,p} \times P_{a,i,f,p} \right] \right] \quad (2.5)$$

Dans laquelle,

**A** : Quantité d'activité (unité pertinente définie par l'expert) ;

**F** : Facteur d'émission (quantité de polluant/quantité d'activité) ;

**P** : Fraction de secteur, d'activité, de combustible et de procédé ;

**a** : Indice relatif au type de source ;

**f** : Indice relatif au type de combustible ;

**i** : Indice relatif au secteur économique ;

**p** : Indice relatif au procédé ;

**s** : Indice relatif à la substance ;

**t** : Indice relatif à l'intervalle de temps ;

**z** : Indice relatif à l'entité géographique.

Les émissions d'une activité donnée sont exprimées par la formule générale (2.6) (Fontelle, 2006).

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a} \quad (2.6)$$

Dans laquelle,

**E** : Émission relative à la substance s et à activité a pendant le temps t, et s'exprime en gce.

**A** : Quantité d'activité relative à l'activité a pendant le temps t, (en MWh) ;

**F** : Facteur d'émission relatif à la substance s et à l'activité a. (en gce / MWh).

$A_{a,t}$  et  $F_{s,a}$  dans (2.6) sont déterminés par huit (08) combinaisons plus fines de l'activité regroupant généralement une opération, une technologie et un produit.

De cette expression on revient à l'expression (2.7) en considérant des modèles spécifiques comme celle de l'activité ou l'émission est rapporté à un seul paramètre relatif à l'activité. Les grandes sources ponctuelles comme les centrales thermiques sont étudiées individuellement.

Au Cameroun les heures de charge maximale se faisant pendant des intervalles de temps bien précis, permettant ainsi la mesure permanente des émissions de la zone d'étude. La méthode utilisée se base sur le principe de la conservation de la matière et peut être appliquée aux émissions de certaines substances telles que le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), le trioxyde de soufre (SO<sub>3</sub>), le dioxyde d'Azote (NO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), par le bilan matière. Cette expression empirique se décrit par la relation (2.7) (Fontelle, 1995) :

$$E = Q_c \times T_{pe} (1 - R_p) \times \frac{M_{pf}}{M_{pe}} \quad (2.7)$$

Dans cette expression,

$E$  : Émission de la substance polluante P sous la forme f au débouché à l'atmosphère et s'exprime en (Kg) ;

$Q_c$  : Débit-massique du combustible ( $Kg.s^{-1}$ ) ;

$T_{pe}$  : Teneur de la substance P dans le combustible entrant dans l'installation (en %) ;

$R_p$  : Rétenion de la substance P dans l'installation (en %) ;

$M_{pf}$  : Masse molaire de la substance P sous forme f au débouché a l'atmosphère ( $kg.mol^{-1}$ ) ;

$M_{pe}$  : Masse molaire de la substance P ( $kg.mol^{-1}$ ).

Les émissions annuelles de chaque centrale ont été successivement calculées sur la base d'unités spécifiques de consommation de fioul, des facteurs liés à la précision, la représentativité et leur durée de vie, puis associées au niveau régional (Voir organigramme de la figure 24).

Ces émissions de PM, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> et les CO issues des centrales ont été estimées à base des équations (2.8), (2.9), (2.10) et (2.11) plus adaptées et plus précises aux zones d'étude (Zhao Yu et al., 2008 ; Zhu Liu et al., 2015).

$$E_{SO_x,i} = \sum_j \sum_k \sum_l A_{i,j,l} \times Scont_j \times (1 - Sr_k) \times (1 - \eta_j) \quad (2.8)$$

$$E_{CO_x,t} = \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m A_{j,i,l} \times Ccont_m \times (1 - Cr_k) \times \frac{M_{CO,m}}{M_{C,m}} \quad (2.9)$$

$$E_{NO_x,i} = \sum_k \sum_m \sum_n A_{i,k,m,n} \times EF_{NO_x,k,m,n} \quad (2.10)$$

$$E_{PM_y,i} = \sum_k \sum_n \sum_l \sum_m A_{i,k,l} \times AC_m \times (1 - ar_k) \times f_{k,y} \times C_{k,n} \times (1 - \eta_{n,y}) \quad (2.11)$$

Où les indices  $i, j, k, m, n$  et  $y$  sont respectivement pour chacune de ces équations et adaptées à la forme empirique de l'équation (2.9) ; la répartition géographique ; le type de technologie ; le type de combustible utilisé ; la technologie de commande d'émission ou technologies de procédées d'émission. Les termes  $A, S_{cont}, S_r, C_{cont}, C_r, EF, AC, ar, f, C,$  et  $\eta$ , (Zhu Liu et al., 2015) sont respectivement :

$A$  : Consommation spécifique fonction du temps de fonctionnement ;

$S_{cont}$  : Pourcentage en soufre dans le combustible ;

$S_r$  : Quantité de soufre retenue dans les cendres ;

$C_{cont}$  : Teneur en Carbone du combustible entrant dans le moteur ;

$C_r$  : Rétention du Carbone dans l'installation ;

$EF$  : Facteur d'émission relatif à la substance et à la consommation ;

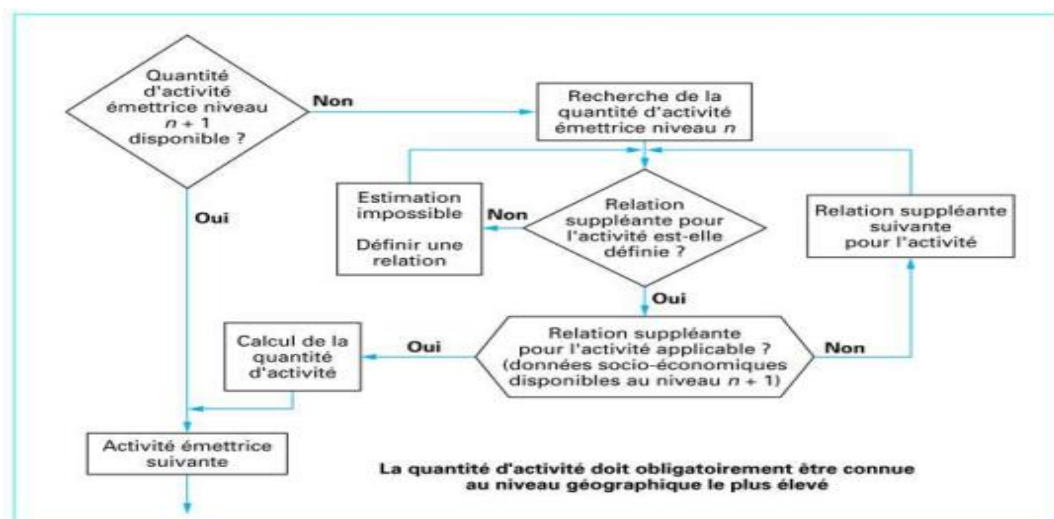
$AC$  : Teneur en cendre du combustible ;

$Ar$  : Rapport inférieur des cendres ;

$f$  : Fraction de masse de la particule selon leur taille ;

$C$  : Taux d'application du procesus de commande des émissions ;

$\eta$  : Suppression efficace de la technologie de commande d'émission (Commission Européenne, Juillet 2006).



**Figure 24: Organigramme d'estimation des quantités d'activité non disponibles par niveau géographique (Fontelle, 2006)**

## 2.1.2 L'analyse des fumées par des appareils appropriés

Dans l'estimation des GES et des polluants, la méthode la plus certaine est l'utilisation des analyseurs de fumées telles que l'ACM 32 (Analyseurs des Correspondances Multiples) et bien d'autres comme tel. Ils sont fixés à la sortie des cheminées et effectuent des relevés sur des petites quantités d'échantillons. Cette méthode est plus fiable en raison des capteurs de concentration fixés tout au long des conduits (figure 25). Notons que certaines centrales thermiques du réseau Eneo utilisent les capteurs portatifs du fait d'un manque sur la chaîne des installations des capteurs et analyseurs de fumées.



Figure 25: Modèle de capteur KANE251 : Analyseur de fumée

## 2.2 Dispersion atmosphérique : Des processus à la modélisation numérique

### 2.2.1 Caractéristique mathématiques du phénomène de la dispersion atmosphérique

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

- Le 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.

### 2.2.1.1 Concentration locale d'une source

On définit la concentration locale d'un soluté  $i$  à une position spatiotemporelle  $M$  de coordonnées  $(x ; y ; z)$ , 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 :

$$C = \frac{\text{Masse de la substance}}{\text{Volume du fluide}} = \frac{M}{v} \quad \text{En [Kg/m}^3\text{]} \quad (2.12)$$

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

$$C(M_i, t) = Q(t) \cdot T(M_i, t) \quad (2.13)$$

Où

$Q(t)$  : La quantité de gaz émise par unité de temps correspondant à la source ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ;

$T(M_i, t)$  : Le temps (s).

Il est également important de noter que bon nombre d'unités sont utilisées pour exprimer la concentration dans un phénomène de dispersion, nous pouvons énumérer entre autres particule/m<sup>3</sup>, mol/m<sup>3</sup>, g/m<sup>3</sup>, μg/m<sup>3</sup> ; molaire  $m_{esp} / m_{air}$  ; partie par million ppm ; partie par billion ppb ; partie par trillion ppt.

### 2.2.1.2 Équation 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 du soluté, qui est perpendiculaire à la surface.

$$\vec{j}(Mi,t) = -D_i \overrightarrow{\text{grad}C}(Mi,t) \quad (2.14)$$

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

$$\vec{j}(Mi,t) = C(Mi,t) \cdot \vec{V}_d(Mi,t) \quad (2.15)$$

**Avec :**

**$D_i$**  : est le coefficient de diffusion ;

**$C$**  : est la concentration du polluant ;

**$V_d$**  : la vitesse de l'écoulement.

### 2.2.2 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 diffusées. En présence des 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.

### 2.2.2.1 Phénomène de diffusion : loi de Fick

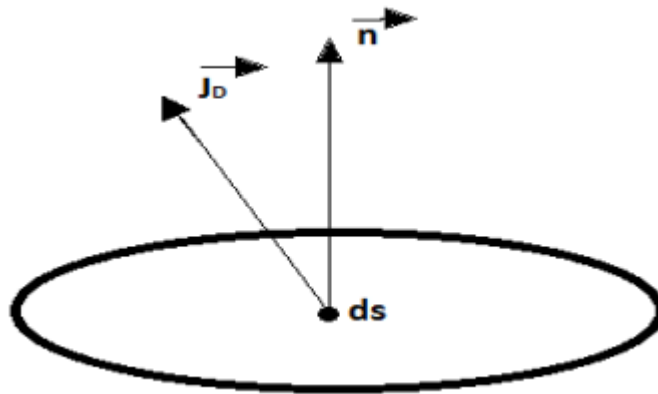
#### a) Vecteur densité de courant de diffusion

Comme pour les charges électriques, nous définissons un vecteur densité de courant de diffusion de matière  $\vec{j}$  dont le flux à travers une surface (S) est égal à l'intensité  $i_D$ , c'est-à-dire au nombre algébrique de particules diffusantes qui traversent une surface (S) par unité de temps (figure 26). Pendant dt, le nombre de molécules  $dN_D$  qui diffusent (S) est :

$$dN_D = i_D dt \quad (2.16)$$

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

$$i_D = \frac{dN_D}{dt} = \iint \vec{j}_D \cdot \vec{ds} \quad \text{Avec } \vec{ds} = ds \vec{n} \quad (2.17)$$



**Figure 26: Orientation du vecteur densité d'un courant de diffusion**

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

On a alors :

$$\vec{j}_D = K \vec{E}_D \quad (2.18)$$

Dans cette expression,  $K$  est le coefficient de diffusion qui mesure l'aptitude du milieu à transporter les molécules diffusantes.  $K(\vec{x}) = \text{diag}(K_x, K_y, K_z)$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) est une matrice diagonale dont les éléments sont en général fonction de la position et doivent être estimés par des paramètres empiriques.

### a) Première loi de Fick

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

$$\vec{E}_D = -\overrightarrow{\text{grad}C} \quad (2.19)$$

En exploitant (2.18) et (2.19) on obtient :

$$\vec{E}_D = \frac{\vec{j}_D}{K} = -\overrightarrow{\text{grad}C} \text{ d'où } \vec{j}_D = -K \overrightarrow{\text{grad}C} \quad (2.20)$$

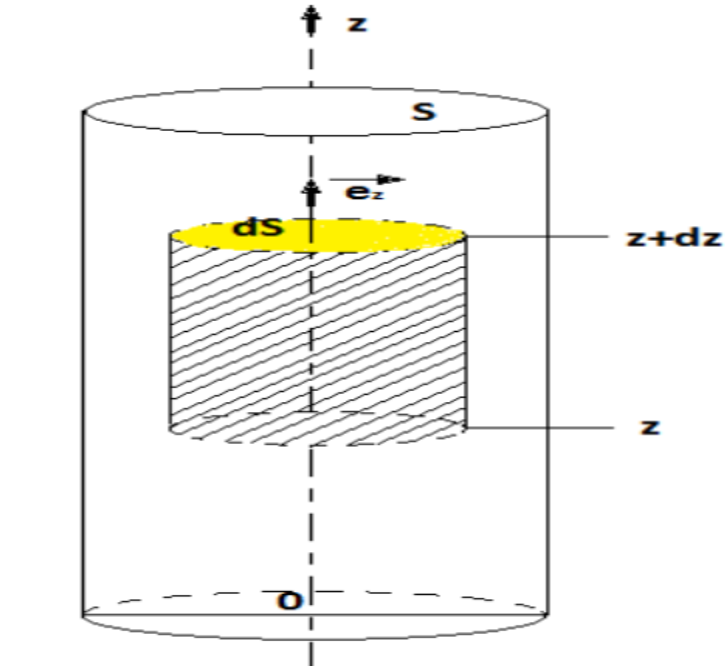
Cette expression représente la première Loi de Fick qui traduit la densité du flux de diffusion d'une particule, diffusant avec un coefficient diffusif  $K$  qui dépend de l'espace et du temps.

### b) Équation tridimensionnelle de diffusion de la matière : deuxième loi de Fick

Considérons un tube vertical (figure 27), rempli d'un support matériel et dans lequel se produit un phénomène de diffusion caractérisé par un vecteur densité de courant  $\vec{j}_D$  dirigé selon  $\vec{e}_z$

$$\vec{j}_D = -K \frac{dC_D}{dz} \vec{e}_z \quad (2.21)$$

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  $z+dz$ .



**Figure 27: Illustration de l'élément volumique de diffusion**

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

$$C_D(z, t + dt) \cdot S \cdot dz - C_D(z, t) \cdot S \cdot dz = \frac{\partial C_D}{\partial t} S \cdot dz \cdot dt \quad (2.22)$$

Une telle variation provient des molécules qui sont :

- D'une part entrée dans le volume par la section d'altitude  $z$ , et qui représentent une perte de particules égale à :

$$\iint \vec{j}_D(z, t) \cdot \vec{dS} dt = \iint \vec{j}_D(z, t) \cdot \vec{n} dS dt = j_{D,s}(z, t) \cdot S \cdot dt \quad (2.23)$$

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

$$\iint \vec{j}_D(z + dz, t) \cdot \vec{dS} dt = \iint \vec{j}_D(z + dz, t) \cdot \vec{n} dS dt = j_{D,s}(z + dz, t) \cdot S \cdot dt \quad (2.24)$$

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

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

$$dN_D = \frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} S \cdot dz \cdot dt = -\frac{\partial J_{D,z}}{\partial z} S \cdot dz \cdot dt$$

D'où :

$$\frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J_{D,z}}{\partial z} \quad (2.25)$$

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 :

$$\frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} = -K \frac{\partial^2 C_D}{\partial z^2} \quad (2.26)$$

Avec  $K$  est le coefficient de diffusion.

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 :

$$\iiint \frac{\partial C_D(z,t)}{\partial t} dV(M) \cdot dt = \iiint C_D(M, t+dt) \cdot dV(M) - \iiint C_D(M, t) \cdot dV(M) \quad (2.27)$$

Cette variation, comme pour le modèle à 1dimension (1D) 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  $\overrightarrow{J_D}$  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 :  $i_D = \oint \overrightarrow{J_D} \cdot \overrightarrow{dS}$ , ainsi qu'au nombre algébrique total  $dN_D = i_D dt$  de particules diffusant durant  $dt$  à travers ( $S$ ).
- Sorties du volume ( $V$ ), par diffusion à travers ( $S$ ). Cela concerne tous les points de ( $S$ ) où le vecteur  $\overrightarrow{J_D}$  est orienté dans le même sens que le vecteur normal ? Ces points donnent

donc une contribution positive à l'intensité  $i_D = \oiint \overline{J_D} \cdot \overline{dS}$  et au nombre algébrique total

$dN_D = i_D dt$  de particules qui diffusent durant  $dt$  :

Par conséquent,  $\iiint \frac{\partial C_D}{\partial t} dV \cdot dt = -i_D dt = -\oiint \overline{J_D} \cdot \overline{dS} \cdot dt$

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 :

$$\oiint \overline{J_D} \cdot \overline{dS} = \iiint \text{div}(\overline{J_D}) dV ; \frac{\partial C_D}{\partial t} = -\text{div}(\overline{J_D}) = -\overline{\nabla} \cdot (-K \overline{\nabla} C) \quad (2.28)$$

On obtient donc :

$$\frac{\partial C_D}{\partial t} = K \cdot \Delta C_D \quad (2.29)$$

Cette expression représente en trois dimensions la deuxième loi de Fick relative à la diffusion de la matière.

### 2.2.2.2 Phénomène d'advection-convection de la matière

Afin de parvenir à mieux établir les équations d'un tel phénomène, nous considérons que le milieu 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 :

#### a) 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 de façon unidimensionnelle par l'équation aux dérivées partielles suivantes :

$$\frac{\partial(ml)}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial z} \quad (2.30)$$

Où

$ml = A.C$  désigne la masse linéique de la particule en convection et  $G=Q.C$  est le débit massique des particules. En dérivant partiellement par rapport à l'altitude  $z$  et au temps ; on a l'égalité.

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial A}{\partial t} = Q \frac{\partial C}{\partial z} + C \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (2.31)$$

Si  $H=A$ , on a :

$$\Rightarrow \left( H \frac{\partial C}{\partial t} - Q \frac{\partial C}{\partial z} \right) + C \left( \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.32)$$

### b) Loi de conservation du volume des 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 (2.31) et reportant le résultat dans (2.32) l'égalité  $A=Q=C$  nous conduit à :

$$\Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{D'où} \quad \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (2.33)$$

### c) Loi de conservation d'une particule dans l'atmosphère

Elle est traduite par la nullité de l'un et l'autre des termes de l'équation (2.32) et est la caractéristique de la variation du potentiel qui existe entre la source et le point de l'espace atteint par la vitesse de convection, qui est en général donnée par la rose de vent.

$$A \frac{\partial C}{\partial t} - Q \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2.34)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{A}{Q} \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

Et en posant  $U = -\frac{Q}{A}$

Nous définissons cette grandeur comme étant la vitesse du vent dans la direction de convection (oz). Ainsi on parvient à l'implication de (2.35) que l'on appelle équation unidirectionnelle de convection

$$\frac{\partial C}{\partial t} - U \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2.35)$$

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

Alors :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \vec{\nabla} C = 0 \quad (2.36)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} - \vec{U} \overline{\text{grad} C} = 0 \quad (2.37)$$

### 2.2.2.3 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 (2.29) ; 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 (2.34). A ces phénomènes, s'ajoute l'apport des différentes autres sources qui génèrent des particules polluantes dans le domaine étudié. Ainsi l'équation d'advection-convection et donc de dispersion de concentration C(M,t) d'un ensemble de particules polluantes de vitesse  $\vec{U}(M,t)$  avec un pouvoir diffusif  $K(M,t)$  en un point M de coordonnées spatio-temporelles x, y, z, t dans un milieu où est générée une concentration de particules polluantes S(M,t), est obtenue par une combinaison des équations (2.32) et (2.36), c'est-à-dire par la relation de Navier Stokes :

$$\frac{\partial C(M,t)}{\partial t} + \vec{U}(M,t) \vec{\nabla} C(M,t) = \vec{\nabla} \cdot (K(M,t) \cdot \vec{\nabla} C(M,t)) + S(M,t) = 0.$$

Soit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - \left( K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S = 0 \quad (2.38)$$

### 2.2.3 Dispersion atmosphérique : Des processus à la modélisation numérique

La modélisation comprend à la fois la modélisation physique et la modélisation numérique. Ces deux types d'études sont complémentaires (Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles). Deux grands types de modèles liés aux milieux d'étude peuvent être distingués :

- Les modèles online qui résolvent les lois de conservation et prennent en compte des couplages entre les équations décrivant l'écoulement et l'évolution des concentrations de polluants. Ces modèles sont particulièrement utilisés pour la qualité de l'air. Elles tiennent compte de la constitution de l'atmosphère en particules et l'influence sur les circulations d'air et sur les forçages thermiques notamment radiatifs. Par contre en situation accidentelle ce couplage est de moindre importance, voire inexistant ;
- Les modèles offline qui ne résolvent que les lois de conservation de la masse et considèrent donc que l'influence des polluants sur les champs météorologiques est négligeable.

Ceux-ci peuvent donc être pré calculés et utilisés comme données d'entrée du modèle. Les équations décrites dans la partie précédente se placent dans ce cadre, et c'est également dans ce cadre que se situe la suite de ce travail. En effet, en plus du fait que l'influence des polluants sur l'écoulement est faible en situation accidentelle, les méthodes d'estimation de sources présentées ici nécessitent l'usage intensif des modèles de dispersion, typiquement en faisant varier le terme source mais à écoulement fixé. En conséquence, l'utilisation de modèles online, en plus d'être coûteuse, ne se justifie pas.

Parmi les modèles offline, diverses approches sont envisageables, suivant les situations (accidentelles, qualité de l'air) et surtout les échelles modélisées, c'est-à-dire la taille du domaine sur lequel les calculs de dispersion sont effectués. On distingue généralement l'échelle locale (jusqu'à quelques dizaines de kilomètres), l'échelle régionale (quelques centaines de kilomètres), l'échelle continentale (quelques milliers de kilomètres) et l'échelle globale. Parmi les différentes

approches possibles, nous avons choisi de détailler celles qui, à l'heure actuelle, sont les plus utilisées, notamment en situations opérationnelles, et qui permettent de couvrir les différentes échelles citées précédemment.

- Les modèles eulériens de chimie-transport à grande échelle et méso-échelle (CTM, Chemistry- Transport Model). Il s'agit d'une approche déterministe, très utilisée en prévision de qualité de l'air, en étude d'impact ou en situation accidentelle et qui peut être utilisée à l'échelle régionale ou continentale, à condition de fournir en entrée du modèle des champs météorologiques pré calculés à l'échelle correspondante.
- Les modèles lagrangiens particuliers : à partir d'une ou de plusieurs sources ponctuelles (ou récepteurs), un grand nombre de particules numériques sont émises. Le modèle suit alors la trajectoire de chaque particule, son mouvement étant composé d'une composante déterministe liée au champ de vent moyen et d'une composante stochastique qui décrit la variabilité due à la turbulence. La concentration de polluants est ensuite évaluée en fonction de la répartition de ces particules numériques.
- Les modèles gaussiens : à l'échelle locale et sous certaines hypothèses simplificatrices, peut conduire à des formules analytiques calculant les concentrations dans des panaches ou des bouffées de polluants. Ces modèles présentent l'avantage d'un coût de calcul très faible.
- Les modèles de mécanique des fluides (CFD : Computational Fluid Dynamics) : à l'échelle "très" locale, en particulier en milieu urbain ou plus généralement en présence d'obstacles qui perturbent l'écoulement d'air, la CFD permet de calculer, en résolvant les équations de Navier-Stokes sur un maillage fin et en prenant en compte la présence des obstacles, des écoulements complexes avec une bonne précision. L'évolution de la concentration de polluant peut alors être calculée sur le même maillage, soit dans le même temps soit par la suite.

Les différents types de modèles sont répertoriés dans le tableau 15. Les modèles que nous ne présenterons pas en détail sont les modèles "extrêmes", dédiés soit à la modélisation à très petite échelle (DNS pour Direct Numerical Simulation, et LES pour Large Eddy Simulation), du fait des coûts calculs engendrés, soit à la modélisation à très grande échelle spatiale ou temporelle (les CTM couplés avec les modèles de météorologie et les modèles de prévision climatique).

**Tableau 15: Les différentes approches de modélisation et leurs échelles associées (Winarek, 2012)**

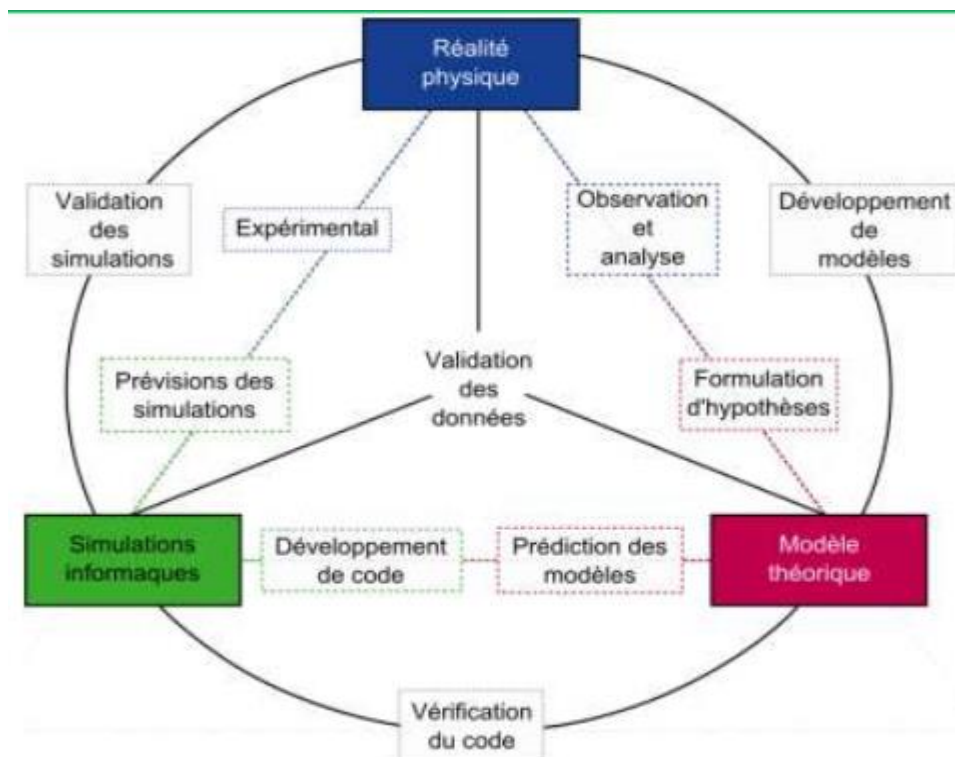
Type de modèle	Domaine de simulation	Application
CFD ( <i>online ou offline</i> )		
DNS	Échelle très locale ~ 1km	Recherche (turbulence)
LES	Échelle très locale ~ 1km	Recherche (turbulence)
RANS	Échelle très locale ~ 1km	Environnement complexe, urbain
Modèles <i>offline</i>		

Modèles gaussiens	Échelle locale ~ 1–10km	Impact local, risque industriel
Modèles lagrangiens	Échelle locale ~ 10km Échelle régionale ~ 100km Échelle continentale ~ 1000km	Risque industriel, biologie
Modèle eulériens de chimie-transport	Échelle régionale ~ 100km Échelle continentale ~ 1000km	Prévision (photochimie) Impact à grande échelle
Modèle globaux	Echelle globale ~ 10000km	Transport intercontinentale
Modèles online à grande échelle CMT couplé GCM (Global Climate Model)	Échelle continentale Échelle globale	Recherche (photochimie) Impact climatique

À partir de ce schéma (Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics, 2002), deux types de modèles peuvent être décrits :

- Les modèles conceptuels, créés en analysant et en observant les systèmes physiques ;
- Les modèles informatisés qui sont les programmes opérationnels qui implémentent les modèles conceptuels.

Le développement, la vérification et la validation d'un modèle est progressif, de l'observation et la mesure de la réalité à la modélisation, de l'utilisation du modèle pour simuler des écoulements et enfin comparer ces simulations à la réalité. Cette méthodologie est illustrée dans la figure 28



**Figure 28: Représentation schématique des liens entre réalité physique, développement théorique et simulation informatiques (Pierre Lauret, 2014)**

Ainsi, les modèles conceptuels peuvent être vérifiés à partir de la comparaison entre les solutions fournies par le modèle informatisé et d'éventuelles solutions analytiques ou des solutions fournies par les modèles de référence. La validation est effectuée à partir de la comparaison avec des données issues d'expérimentations. Ces différentes approches présentent chacune des avantages et des inconvénients.

### 2.2.3.1 Formalisme : Équation de chimie-transport dans l'atmosphère

Considérons une espèce  $X_i$  de concentration  $C_i$  dans l'atmosphère, modélisée sous forme gazeuse ou comme une particule mono-dispersée. Cette espèce est soumise aux processus détaillés dans la partie précédente et schématiquement rappelé sur la figure 29 : transport, diffusion, filiation radioactive, dépôt sec et lessivage.



**Figure 29:** Schéma résumé des processus pris en compte dans la dispersion de polluants en situation accidentelle.

### Équation d'advection-diffusion-chimie

Nous faisons l'hypothèse que la dynamique de l'écoulement n'est pas influencée par les polluants, et qu'en conséquence les champs météorologiques (notamment les champs de vent) sont connus. L'évolution de la concentration  $c_i$  est donnée par l'équation d'advection-diffusion-chimie (2.39), qui découle du principe de conservation de la masse :

$$\underbrace{\frac{\partial c_i}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{\text{div}(uc_i)}_{(2)} = \underbrace{\text{div}(D_{m_i} \nabla c_i)}_{(3)} + \underbrace{\chi_i(c_i)}_{(4)} + \underbrace{\sigma_i}_{(5)} + \underbrace{P_i(c_i)}_{(6)} \quad (2.39)$$

Avec :

- (1) Le terme instationnaire ( $kmol.m^{-3}.s^{-1}$ );
- (2) Le terme d'advection qui représente le transport par l'écoulement d'air, dépendant du champ de vent  $u = (u_x, u_y, u_z)$  exprimé en ( $kmol.m^{-3}.s^{-1}$ );

- (3) Le terme diffusif ou de diffusion moléculaire ( $kmol.m^{-3}s^{-1}$ ), décrite par une loi de Fick. La matrice diagonale  $D_{mi}$  contient les coefficients de diffusion moléculaire et dépend de l'espèce  $X_i$ . Coefficient de diffusion de la substance  $m^2.s^{-1}$  ;
- (4) Le terme de production ou de destruction de  $X_i$  par filiation radioactive éventuelle ( $kmol.m^{-3}s^{-1}$ ). Si l'espèce n'est pas radioactive, ce terme est nul, sinon il dépend des concentrations  $C = (c_1, \dots, c_n)$  de l'ensemble des n espèces dans la chaîne de filiation ;
- (5) Les émissions (positives) ( $kmol.m^{-3}s^{-1}$ ) ;
- (6) Les pertes par dépôt. ( $kmol.m^{-3}s^{-1}$ ).

### 2.2.3.2 Les modèles eulériens à grande échelle et à méso-échelle

Dans un modèle eulérien, le domaine de calcul est discrétisé en une grille de calcul. Par des méthodes numériques adaptées et en supposant que la concentration au centre de la maille est représentative de la concentration moyenne dans la maille contenante (hypothèse valable plus largement pour toutes les grandeurs : vitesses de vent, etc.). Le modèle résout alors l'équation d'advection-diffusion-chimie suivante, issue de l'équation (2.40).

$$\frac{\partial c_i(x,t)}{\partial t} = -div(u(x,t)c_i(x,t)) + div(\rho(x,t)K(x,t)\nabla \frac{c_i(x,t)}{\rho(x,t)}) + x_i(c(x,t), x,t) + P_i(x,t) + \sigma_i(x,t)$$

(2.40)

Dans cette équation,  $c_i(x,t)$  représente la concentration moyenne de l'espèce  $X_i$  en  $x$  et à l'instant  $t$  et  $u(x,t)$  est le champ de vent moyen.  $K$  est la matrice de diffusion turbulente  $\rho$  est la masse volumique de l'air. Les champs météorologiques (champs de vent, précipitations, etc.) sont précalculés par des modèles adaptés à l'échelle désirée et fournis en entrée du modèle de dispersion.

### 2.2.3.3 Les modèles gaussiens

Les modèles gaussiens permettent de représenter la dispersion à l'échelle locale (dans les premières dizaines de kilomètres autour d'une source). Ces modèles fournissent une formulation analytique de la concentration de polluant et sont donc simples et peu coûteux à mettre en œuvre. Deux types de modèles gaussiens existent :

- Le modèle de panache, ou gaussien stationnaire, modélise la dispersion dans une situation météorologique supposée uniforme et stationnaire. Le panache émis par une source ponctuelle est modélisé par une distribution gaussienne dans deux directions (horizontale orthogonale au vent, et verticale) ;
- Le modèle à bouffées modélise une émission instantanée par une bouffée gaussienne dans les trois directions et dont le centre est "transporté" par un champ de vent éventuellement non uniforme et non-stationnaire. Un rejet de polluant est donc modélisé par un ensemble de bouffées gaussiennes qui rendent compte de la dispersion du polluant.

### Modèle gaussien de panache

Dans le cadre de la modélisation par une distribution gaussienne d'un panache issu d'une source ponctuelle, nous faisons les hypothèses suivantes :

- La source d'émission est une source ponctuelle continue de débit constant  $Q_s$  ;
- Les conditions météorologiques sont uniformes et constantes ;
- Le vent est suffisamment important pour que la diffusion turbulente dans la direction du vent soit négligeable en comparaison de l'advection.

Dans ce cadre, en plaçant l'axe  $x$  dans la direction du vent, la concentration de polluant est donnée par la formule analytique de l'équation (2.41) (Korsakissok, 2009) :

$$c(x, y, z) = \frac{Q_s}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2} + \frac{(z+z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.41)$$

Où  $(x_s, y_s, z_s)$  représente les coordonnées de la source et  $u$  la vitesse du vent moyen.

Cette formule prend en compte l'influence du sol, mais pas les dépôts. Les écart-types  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$

sont estimés par des formules empiriques reposant sur la stabilité de l'atmosphère telles les formules de Briggs (Doury, 1976).

### Modèle gaussien à bouffées

Dans le cas (plus général) d'un modèle instationnaire, le panache est représenté sous la forme d'une série de bouffées gaussiennes dans les trois directions. Dans ce cas, la concentration d'une bouffée peut s'écrire suivant l'équation (2.42).

$$c(x, y, z) = \frac{Q_s}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \bar{u}} \exp\left(-\frac{(x-x_s)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[ \exp\left(-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.42)$$

Q est la quantité totale émise pour constituer la bouffée.  $(x_s, y_s, z_s)$  sont les coordonnées du centre de la bouffée. Les formules de dispersion pour  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$  sont en général les mêmes que dans le cas du panache gaussien.

Pour les paramétrisations qui ne donnent pas de formulation spécifique pour  $\sigma_x$  (dans la direction du vent), celle de  $\sigma_y$  est utilisée.

Ainsi en discrétisant une source continue de quantité totale Q par une série de bouffée telle que :

$$Q = \Delta t_{puff} \sum_{i=0}^{N_{puff}} Q_s^i \quad (2.43)$$

Où

$Q_s^i$  est le débit massique de la source entre l'instant  $t_i = t_0 + i\Delta t_{puff}$  et  $t_i + 1$ , alors la concentration en un point est donnée par la somme des contributions de toutes les bouffées issues de la source.

Ce type de modèle est parfois appelé modèle semi-lagrangien. En effet, le calcul de l'évolution d'une bouffée au cours du temps est, comme dans un modèle lagrangien, décomposé entre un mouvement déterministe lié à l'advection par le champ de vent moyen (calcul des coordonnées du centre de la bouffée) et une composante qui rend compte de l'impact de la turbulence (ici distribution gaussienne dans les trois directions autour de ce centre).

### 2.2.3.4 Les modèles lagrangiens

Dans un modèle eulérien, on observe, dans une grille fixe, l'évolution des concentrations d'un polluant porté par un fluide en mouvement. Le point de vue des modèles lagrangiens est différent : il s'agit maintenant de suivre la trajectoire de particules numériques émises à partir des sources dans le modèle. Au cours de son déplacement et au temps  $t$ , une particule  $k$  est caractérisée par sa position  $X_k(t)$  et sa masse  $m_k(t)$ . L'évolution de la position est décrite par l'équation (2.44) (Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant : determination of the source term, atmospheric dispersion, 2012):

$$X_k(t + \Delta t) = X_k(t) + V_k(X_k(t)) \Delta t \quad (2.44)$$

Les processus de perte, c'est-à-dire la décroissance radioactive et les dépôts sec et humide sont pris en compte dans l'évolution de la masse  $m_k$ , qui est décrite par l'équation (2.45) :

$$m_k(t + \Delta t) = m_k(t) e^{-\tau \Delta t} \quad (2.45)$$

Le coefficient  $\tau$  est la somme des contributions des différents processus de perte tels que la décroissance radioactive, le dépôt humide et le dépôt sec. On définira particulièrement la décroissance radioactive telle que :

$$\tau = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad \text{Où } T_{1/2} \text{ est la demi-vie de l'espèce modélisée}$$

Finalement, la concentration moyenne de polluant à la position  $x$  et au temps  $t$  est donnée par l'estimation de la masse totale de particules dans un volume  $\Delta V(x)$  autour de la position  $x$  par la formule lagrangienne de l'équation (2.46) :

$$c(x, t) = \frac{1}{|\Delta V(x)|} \sum_{k=1}^N \delta_k(x, t) m_k(t) \quad (2.46)$$

$\delta_k(x, t)$  vaut 1 si la particule  $k$  de masse  $m_k$  est située dans le volume  $\Delta V(x)$  à l'instant  $t$  et 0 sinon.  $N$  est le nombre total de particules. L'équation 1.30 montre que la concentration, dans un modèle lagrangien, est une fonction discrète de l'espace et du temps.

### 2.2.3.5 Les modèles de mécanique des fluides à l'échelle locale/urbaine

Les modèles de mécanique des fluides (CFD) se situent dans le cadre de la modélisation eulérienne, pour la modélisation à grande échelle. À l'échelle urbaine, l'influence des différents processus est différente. Afin de prendre en compte pleinement l'influence des obstacles dans la dispersion de polluant, il est nécessaire de considérer des modèles capables de calculer les écoulements complexes induits par la géométrie. Les écoulements dans la couche de surface sont décrits par les équations fondamentales de la dynamique des fluides (Stull, 1988 ; Garrat, 1992), adaptées à l'échelle considérée.

L'équation (2.47) de conservation de la masse (sous hypothèse d'anélasticité) s'écrit, en suivant la convention d'Einstein :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.47)$$

L'équation (2.48) de conservation de la quantité de mouvement est décrite par les équations de Navier-Stokes adaptées à la CLA à échelle locale, c'est-à-dire que les forces de Coriolis sont négligées, ainsi que les termes de sphéricité :

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{(2)} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{(3)} + \underbrace{g_i}_{(4)} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}}_{(5)} \quad (2.48)$$

Où

- (1) est le terme d'inertie ( $kmol.m^{-3}s^{-1}$ );
- (2) est le terme d'advection ( $kmol.m^{-3}s^{-1}$ );
- (3) est le terme gradient de pression ;
- (4) est le terme de gravité ;
- (5) représente les effets visqueux de l'air, considéré comme un fluide newtonien.

L'équation (2.49) décrit l'équation de la conservation de l'énergie qui s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + S_\theta \quad (2.49)$$

Où  $\theta$  est la température potentielle de l'air,  $C_p$  sa capacité calorifique,  $\lambda$  la conductibilité thermique moléculaire et  $S_\theta$  un terme source ou puits.

Enfin, l'équation (2.50) de transport de la concentration  $c$  de polluant, considéré passif chimiquement :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} + P + \sigma \quad (2.50)$$

Où

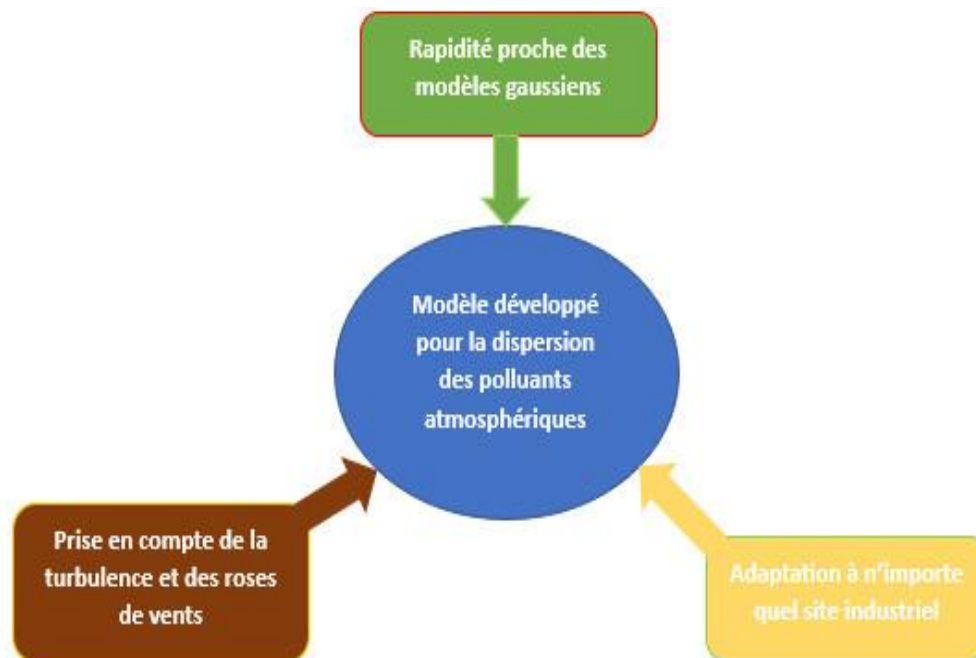
$D_m$  est le coefficient de diffusion moléculaire massique,  $P$  traduit les processus de perte (dépôts) et  $\sigma$  un terme source.

## 2.2.4 Hypothèses de validation et choix de la méthode de résolution du modèle mathématique de la dispersion

### 2.2.4.1 Hypothèse méthodique

Comme vu dans le chapitre précédent, la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles dans le champ proche est tributaire d'un grand nombre de variables. La modélisation de tels phénomènes de manière précise se révèle être une difficulté de premier plan pour les industriels lors des études d'impacts, de dangers et en situation d'urgence. D'une part, les modèles simples et rapides ne sont pas utilisables en champ proche et obstrué. D'autre part, les approches plus précises telles que la CFD ou les méthodes de chimie-transport sont beaucoup plus lentes. Un certain nombre d'initiatives ont été développées afin de réduire le temps de calcul d'un côté et augmenter la précision de l'autre. Par ailleurs, certaines des méthodes ainsi créées sont spécifiques à une zone d'étude ce qui rend leur utilisation localisable.

Dans le cadre de ce travail, le système a été réduit à deux dimensions (plan horizontal) afin d'alléger les temps de calculs. Le passage 2D vers la 3D est une fixation du déplacement suivant (Oz) et les deux restants (Ox) et (Oy). La figure 30 ci-après représente le cahier de charges du modèle développé dans ce travail :



**Figure 30: Cahier des charges du modèle.**

### 2.2.4.2 Le principe du modèle gaussien

Il est basé sur les solutions analytiques de l'équation d'advection-diffusion. Dans ce type de modèle, la plupart des processus de dispersion sont pris en compte à l'aide des paramétrisations spécifiques sans résolution des équations de mécanique des fluides. Pour calculer les concentrations des polluants dans l'air, le panache est assimilable à un cône à l'intérieur duquel la concentration suit une distribution gaussienne selon un axe perpendiculaire au vecteur. Ce modèle est une simplification des équations mécaniques des fluides appliqués au transport et à la diffusion des polluants. Ses caractéristiques sont compatibles avec la modélisation de la diffusion des polluants. Ces modèles sont bien adaptés à des études opérationnelles (calcul en temps réel, étude d'impact) car ils nécessitent des temps de calculs limités et permettent ainsi l'étude d'un grand nombre de cas. Ils fournissent des résultats acceptables dans les situations pour lesquelles ils ont

été paramétrés (ces paramétrisations disponibles varient d'un modèle à un autre). Ils sont cependant difficilement acceptables dans des situations d'écoulement très compliquées (reliefs, obstacles multiples) ou lorsqu'il est nécessaire de traiter des processus physico-chimiques complexes.

### 2.2.4.3 Avantages et inconvénients du modèle

**Tableau 16: Avantages et inconvénients du modèle gaussien**

Avantages	Inconvénients
Pression analytique	Source continue ; Pas d'obstacle ; Pas de reliefs
Simplicité de programmation	Champ de vent uniforme (en vitesse et direction)
Temps de calcul faible	Les résultats pas trop précis
Température abondante pour les paramètres	La Qualité des résultats dépend des paramètres

### 2.2.4.4 Formule de panache gaussien

Pour une émission ponctuelle continue, le débit  $Q$  est constant. Cette hypothèse suggère que la concentration en un point ne varie pas au cours du temps ; en pratique, il s'agit donc de considérer des concentrations moyennes sur un temps suffisamment long (correspondant souvent au temps d'intégration d'un instrument de mesure), c'est-à-dire que le débit  $Q$  du polluant est constant dans le temps et notre terme source  $f$  peut s'écrire sous la forme suivante :

$$f(M, t) = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z - H) \quad (2.51)$$

Où :

$\delta(\cdot)$  : Représente la fonction de Dirac dont l'unité est  $[m^{-1}]$  ;

$H$  : Est la hauteur de la couche d'inversion ou la hauteur effective en m

En cas de la dispersion souterraine  $H$  représente toujours la hauteur de la couche d'inversion car le polluant s'infiltré d'abord dans le sol avant d'être en contact avec le vecteur transport qui est l'eau.

- Du fait de la météorologie constante il n'y a donc plus de dépendance explicite au temps (on parle parfois de « gaussien stationnaire ») ;

On a alors : 
$$\frac{\partial C(M, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.52)$$

- L'effet de la diffusion turbulent dans la direction  $x$  du vent est négligeable comparaison de l'advection (approximation de la panache étroit).

D'où :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} \gg K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{et} \quad u \frac{\partial C}{\partial x} \gg D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

On peut donc écrire l'équation stationnaire (2.53) dans le cas de la dispersion des polluants par :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q \delta(x) \delta(y) \delta(z - H) \quad (2.53)$$

### 2.2.4.5 Développement global du modèle de dispersion des polluants dans l'environnement

L'équation (2.54) illustre une forme tridimensionnelle complète du modèle physique de dispersion d'un polluant. C'est-à-dire :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - (K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}) + S = 0 \quad (2.54)$$

En tenant compte des hypothèses simplificatrices élaborées au chapitre précédent, et en prenant notre source ponctuelle au point  $(0, y_s, H)$ , l'équation (2.55) d'advection-diffusion prend la forme suivante :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q_s \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.55)$$

Cette équation décrit la distribution des particules ou des gaz émis par une source plane en présence du vent. Dans ce cas  $C$  est la concentration des polluants,  $u$  la composante de la vitesse du vent selon l'axe ( $ox$ ),  $K$  le coefficient de diffusion turbulente et  $Q_s$  le débit de fumées émises à la source.

### 2.2.4.6 Hypothèse de résolution du problème

#### a) Condition initiale

Nous savons qu'à la sortie de la cheminée i.e. en  $x=0$  la concentration de la fumée est maximale. La concentration initiale prendra alors la valeur suivante :

$$C(0, y, z) = \frac{Q_s}{u} \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.56)$$

#### b) Domaine d'étude du problème

Étant donné qu'il n'est pas exact de supposer qu'un panache s'étende dans tout l'espace, notre domaine d'étude sera posé comme suit :

$$0 \leq x \leq L ; 0 \leq y \leq L ; 0 \leq z \leq L$$

Où  $L$  est la valeur limite de  $x$ ,  $y$  et  $z$  que peut atteindre le polluant.

#### c) Conditions aux limites

Au cours du déplacement des polluants, on constate que plus on s'éloigne de la valeur maximale, c'est-à-dire à  $x=0$  pour atteindre les différentes valeurs limites, la concentration des polluants diminue progressivement et tend à s'annuler. Cela nous conduit donc à écrire :

$$\begin{cases} C(L, y, z) = 0 \\ C(x, \pm L, z) = 0 \\ C(x, y, L) = 0 \end{cases} \quad (2.57)$$

Pour éviter toute réflexion afin que le polluant puisse se déplacer librement suivant l'axe  $(Ox, oy)$  ; on tiendra également compte des conditions aux flux suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2.58)$$

#### 2.2.4.7 Discrétisation du problème : Équation (2.54)

Pour y parvenir, nous allons faire usage de la méthode numérique classique dite des différences finies. Cette méthode utilise une grille de calcul régulière ce qui a pour avantage la facilité d'implémentation et la rapidité des calculs. Le chemin le plus approprié pour approximer les solutions découlant d'une équation aux dérivées partielles est l'utilisation de la série de Taylor :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + Q_s \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.59)$$

Cette équation sera discrétisée à partir du schéma de discrétisation centré en espace.  $\Delta x$  sera assimilé au temporel.  $\Delta y$  et  $\Delta z$  quant à eux seront pris comme pas en espace.

Le domaine de solution est couvert par les lignes de grilles suivantes :

$$\begin{cases} x_k = k\Delta x; k = 1, \dots, N_x \\ y_i = i\Delta y; i = 1, \dots, N_y \\ z_j = j\Delta z; j = 1, \dots, N_z \end{cases} \quad (2.60)$$

On approche la solution  $C(k\Delta x, i\Delta y, j\Delta z)$  par  $C_{i,j}^k = C(x_k, y_i, z_j)$  et les dérivées par une expression dite aux différences et dont on peut vérifier la validité (et l'ordre) à l'aide d'un développement de Taylor.

$$\frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta x} = \frac{K_y}{u} \left( \frac{C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{K_z}{u} \left( \frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) + \frac{Q_s}{u} f_{i,j}^k \quad (2.61)$$

Par arrangement suivant l'espace k, on obtient la forme progressive suivante :

$$C_{i,j}^{k+1} = \frac{\Delta x k_y}{u (\Delta y)^2} (C_{i+1,j}^k + C_{i-1,j}^k) + \frac{\Delta x k_z}{u (\Delta z)^2} (C_{i,j+1}^k + C_{i,j-1}^k) + 1 - \frac{2\Delta x}{u} \left( \frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) C_{i,j}^k + \frac{\Delta x Q_s}{u}$$

(2.62)

Avec :

$$f_{i,j}^k = \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.63)$$

Posons

$$R = \frac{\Delta x}{u} \left( \frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) \quad (2.64)$$

$$R_{xy} = \frac{\Delta x k_y}{u \Delta y^2} \quad (2.65)$$

$$R_{xz} = \frac{\Delta x k_z}{u \Delta z^2} \quad (2.66)$$

D'où :

$$C_{i,j}^{k+1} = [1 - 2R] C_{i,j}^k + R_{xy} (C_{i+1,j}^k + C_{i-1,j}^k) + R_{xz} (C_{i,j+1}^k + C_{i,j-1}^k) + \frac{\Delta x Q_s}{u} \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.67)$$

Condition de stabilité

$$\frac{C_{i,j}^{k+1} + C_{i,j}^k}{\Delta x} = \frac{k_y}{u} \left( \frac{C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{k_z}{u} \left( \frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) \quad (2.68)$$

Supposons que la valeur de  $C_{i,j}^k$  subit une perturbation  $\xi_{i,j}^k$ . La nouvelle solution numérique devient alors  $C_{i,j}^{k'} = C_{i,j}^k + \xi_{i,j}^k$ , en écrivant que  $C_{i,j}^{k'}$  vérifie le schéma discret, on obtient :

$$\frac{\xi_{i,j}^{k+1} + \xi_{i,j}^k}{\Delta x} = \frac{k_y}{u} \left( \frac{\xi_{i+1,j}^k - 2\xi_{i,j}^k + \xi_{i-1,j}^k}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{k_z}{u} \left( \frac{\xi_{i,j+1}^k - 2\xi_{i,j}^k + \xi_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) \quad (2.69)$$

Supposons que :

$$\xi_{i,j}^k = \sin(ip\Delta y) \sin(jq\Delta z) e^{-rk\Delta x} \quad (2.70)$$

$$\xi_{i+1,j}^k = \sin((i+1)p\Delta y) \sin(jq\Delta z) e^{-rk\Delta x} \quad (2.71)$$

$$\xi_{i-1,j}^k = \sin((i-1)p\Delta y) \sin(jq\Delta z) e^{-rk\Delta x} \quad (2.72)$$

En remplaçant ces trois expressions dans (2.69), on obtient :

$$\frac{e^{-rk\Delta x} - 1}{\Delta x} = \frac{-4k_y}{u\Delta y^2} \sin^2\left(\frac{p\Delta y}{2}\right) - \frac{4k_z}{u\Delta z^2} \sin^2\left(\frac{q\Delta z}{2}\right) \quad (2.73)$$

$$\left| e^{-rk\Delta x} \right| < 1 \Rightarrow \left| 1 - \frac{4\Delta x}{u} \left( \frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) \right| < 1 \quad (2.74)$$

D'où :

$$\frac{\Delta x}{u} \left( \frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) \in \left] 0; \frac{1}{2} \right[ \quad (2.75)$$

Donc le schéma de discrétisation (2.68) ne peut être utilisé que si et seulement s'il remplit la condition de stabilité (2.74).

Discrétisation des conditions initiale et aux limites

- Condition initiale

$$C(0, y, z) = \frac{Q_s}{u} \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.76)$$

$$C_{i,j}^1 = \frac{Q_s}{u} \delta(i) \delta(j) \text{ Pour } k = 1 \text{ et pour tout } i = \dots N_x \text{ et } j = \dots N_z \quad (2.77)$$

$$\text{Pour tout } \begin{cases} k = 1 \dots N_x \\ i = 2 \dots N_y - 1 \\ j = 2 \dots N_z - 1 \end{cases}$$

- Conditions aux limites de type Newman en  $y = 0$  et en  $y = L$

L'équation à discrétiser est la suivante :

$$\left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=0,L} = 0 \quad (2.78)$$

$$\left. \frac{C_{i+1,j}^k - C_{i-1,j}^k}{2\Delta y} \right|_{y=0,L} = 0 \quad (2.79)$$

$$\frac{C_{2,j}^k - C_{0,j}^k}{2\Delta y} = 0 \quad \text{D'où} \quad C_{2,j}^k = C_{0,j}^k \quad (2.80)$$

Déterminons l'approximation  $C_{1,j}^{k+1}$  et de  $C_{N_y}^{k+1}$  en nous servant de l'équation (2.57) et (2.80)

$$C_{1,j}^{k+1} = [1 - 2R]C_{1,j}^k + 2R_{xy}C_{2,j}^k + R_{xz} [C_{1,j+1}^k + C_{1,j-1}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(1) \delta(j) \quad (2.81)$$

En se servant de l'équation (2.32) et pour la valeur limite  $L$  correspondante à  $N_y$  on a :

$$C_{N_y+1}^{k+1} = C_{N_y-1}^k \quad (2.82)$$

$$C_{N_y+1}^{k+1} = [1 - 2R]C_{N_y,j}^k + 2R_{xy}C_{N_y-1,j}^k + R_{xz} [C_{N_y,j+1}^k + C_{N_y,j-1}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(N_y) \delta(j) \quad (2.83)$$

Les conditions aux limites de type Newman en  $z = 0$  et en  $z = L$

$$\text{La condition sur le flux en } z \text{ est donnée par : } \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0,L} = 0 \quad (2.84)$$

$$\text{Sa forme discrétisée est la suivante : } \left. \frac{C_{i,j+1}^k - C_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \right|_{z=0,L} = 0 \quad (2.85)$$

De la même façon que précédemment, déterminons l'approximation de la concentration

$$C_{i,1}^{k+1} = C_{i,N_z}^{k+1} \quad (2.86)$$

$$C_{i,1}^{k+1} = [1 - 2R]C_{i,1}^k + 2R_{xy}C_{i,2}^k + R_{xz} [C_{i+1,1}^k + C_{i-1,1}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(i) \delta(1) \quad (2.87)$$

$$C_{i,N_z}^{k+1} = [1 - 2R]C_{i,N_z}^k + 2R_{xy}C_{i,N_z-1}^k + R_{xz} [C_{i+1,N_z}^k + C_{i-1,N_z}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(i) \delta(N_z) \quad (2.88)$$

Ces différentes approximations de concentrations nous permettent de déterminer la distribution des polluants partant de la source vers leurs points limites en des points distincts dans le plan  $(oy, oz)$ . Elles tiennent compte de la condition météorologique, du coefficient de diffusion et du débit de polluant à la sortie de la cheminée.

## Approximation de la concentration moyenne des polluants

Nous avons calculé et représenté à des positions  $x$  données, la moyenne de la concentration des polluants suivant  $(oz)$  et  $(oy)$  respectivement, donné par les formules suivantes :

$$\langle C \rangle_z = \frac{1}{N_z} \int_0^z C(x, y, z) dz \quad (2.89)$$

$$\text{Et } \langle C \rangle_y = \frac{1}{N_y} \int_0^y C(x, y, z) dy \quad (2.90)$$

## 2.3 Méthode par Modélisation inverse

### 2.3.1 Estimation des sources par Modélisation inverse

L'estimation et la reconstruction du terme source de traceur atmosphérique dépend de l'équilibre entre la charge d'information dans l'ensemble d'observation et le nombre de paramètres source à récupérer. Ainsi que la nature de la relation entre la source et le récepteur, afin de fournir un modèle numérique de transport atmosphérique (ATM). La relation source-récepteur ([Wiiniarek et al., 2012](#)) est :

$$\mu = H\sigma + \varepsilon \quad (2.91)$$

Où  $\mu \in \mathbb{R}^d$  est le vecteur de mesure,  $\sigma \in \mathbb{R}^N$  est le vecteur source,  $H$  est la matrice jacobienne du modèle de transport qui est linéaire dans ce contexte pour des particules gazeuses et particulaires. Il est clair que  $H$  intègre également le contexte d'observation. Le vecteur  $\varepsilon \in \mathbb{R}^d$  est appelé erreur d'observation dans ce travail, il représente aussi les erreurs instrumentales, ainsi que les erreurs de représentativités. La matrice jacobienne est mal conditionnée ce qui entraîne à affirmer que la relation (2.91) est un problème inverse mal posé ([Enting, 2002](#) ; [Wiiniarek et al., 2012](#)).

L'équation (2.91) de la relation source récepteur constitue un problème inverse mal posé ([wiiniarek et al., 2012](#)) et en plus les moyens de télédétection étant essentiellement indisponibles, comme dans le cas des radionucléides ([Bocquet, 2005](#)) le nombre d'observation sera donc limité. Pour pallier l'absence des contraintes et mieux paramétrer la source avec un nombre limité de

variable, il faut faire correspondre cela aux méthodes dites paramétriques qui régulariseront le problème inverse et permettront même de calculer la fonction densité de probabilité pour des paramètres par des techniques d'échantillonnages stochastique (Delle Monache et al., 2008 ; Yee et al., 2008). Par application de l'approche variationnelle sur le terme source  $\sigma_k$  à l'aide des concentrations théoriques, d'une modélisation de la dispersion et des dépôts atmosphériques des espèces à considérer (Wiiniarek et al., 2012 ; Saunier et al., 2019) supposent que le vecteur de mesure  $\mu$  dans  $\mathbb{R}^d$  peut être décrit comme un problème linéaire.

Les erreurs d'observation  $\varepsilon_k$  définies dans l'équation (2.91) sont généralement supposées gaussiennes suivant une distribution normale (Saunier et al., 2019) :

$$p(\varepsilon_k) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\mu - H_k \sigma_k)^T R^{-1} (\mu - H_k \sigma_k)}}{\sqrt{(2\pi)^d [R]}} \quad (2.92)$$

Où  $R = E[\varepsilon_k \varepsilon_k^T]$  est la matrice de covariance des erreurs d'observations et  $[R]$  son déterminant.

Un fort inconvénient des erreurs d'observation gaussiennes est qu'elles donnent plus de poids aux valeurs des concentrations plus élevées qu'aux valeurs faibles car c'est la valeur de la différence modèle-mesure qui est prise en compte dans la fonction densité de probabilité (pdf). Plusieurs solutions ont été proposées pour surmonter cette difficulté (Saunier et al., 2017). Celle la plus probable est de choisir une distribution log-normale des erreurs d'observation développée par R. Abida et M. Bocquet en 2009 avec une densité de probabilité (pdf) définie par :

$$p(\varepsilon_k) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\ln(\mu) - \ln(H_k \sigma_k))^T R^{-1} (\ln(\mu) - \ln(H_k \sigma_k))}}{\sqrt{(2\pi)^d [R]}} \quad (2.93)$$

En supposant des erreurs d'observations log-normales, l'application de l'inférence bayésienne conduit à :

$$p(\sigma_k / \mu) = \frac{p(\mu / \sigma_k) p(\sigma_k)}{p(\mu)} = \frac{p(\varepsilon_k) p(\sigma_k)}{p(\mu)} \quad (2.94)$$

À partir de cette inférence, pour obtenir l'estimation à posteriori, maximale  $p(\sigma_k / \mu)$ , il faut maximiser la vraisemblance  $p(\mu / \sigma_k)$ , ce qui revient à maximiser  $\ln p(\mu / \sigma_k)$  et en minimisant la fonction coût suivante  $J(\sigma_k)$  :

$$J(\sigma_k) = \frac{1}{2} \ln |R| + \frac{1}{2} (\ln(\mu) - \ln(H_k \sigma_k))^T R^{-1} (\ln(\mu) - \ln(H_k \sigma_k)) \quad (2.95)$$

Où  $J(\sigma_k)$  mesure la différence de log entre les prédictions du modèle  $H_k \sigma_k$  et la mesure réelle  $\mu$  comme décrite dans (Saunier et al., 2017). Le principal inconvénient des erreurs d'observation log-normales est qu'elles accordent trop d'importance à des valeurs de concentration très faibles. Une façon d'atténuer l'influence de petites valeurs de concentration est d'introduire un seuil  $\theta$  dans la fonction coût suivant :

$$J(\sigma_k) = \frac{1}{2} \ln |R| + \frac{1}{2} (\ln(\mu + \theta) - \ln(H_k \sigma_k + \theta))^T R^{-1} (\ln(\mu + \theta) - \ln(H_k \sigma_k + \theta)) \quad (2.96)$$

Cela tempère les valeurs de  $J(\sigma_k)$  s'il existe de grandes différences entre les concentrations observées et simulées, en particulier pour des faibles concentrations avec des valeurs juste au-dessus de la limite de détection. Dans ce travail nous avons choisi l'erreur d'observation log-normale pour la matrice  $R$  utilisée. On suppose que  $R$  est diagonale et que la variance d'erreur est la même pour tous les éléments de la diagonale (propriété d'homoscédasticité) (Wiiniarek et al., 2011) :

$$R = r^2 I_d, r > 0 \quad (2.97)$$

En effet, en minimisant  $J(\sigma_k)$ , cela correspond à écrire :

$$J(\sigma_k) = \sum_{i=1}^d (\ln(\mu_i + \theta) - \ln(H_k \sigma_k)_i)^2 \quad (2.98)$$

Cette dernière expression s'appuie sur un certain nombre de modèles plus sophistiqués pour la statistique des erreurs d'observation. Avec un petit nombre d'observation, ils pourraient s'avérer moins robustes et trop artificiels.

### 2.3.2 Équation d'observation

Dans l'équation en posant  $\mu = y$  ;  $C = H$  ;  $\sigma = X$  et  $\varepsilon = b$ , l'équation (2.91) devient :

$$y(n) = CX(n) + b(n) \quad (2.99)$$

Cette équation exprime alors l'observation du système à l'aide d'un réseau de capteurs disposés sur la zone d'observation (atmosphère) où chaque terme représente une matrice.

La matrice  $C$  permet de faire les observations à partir du vecteur d'état. Elle comporte autant de lignes que de capteurs. Comme pour la matrice  $R$ , chaque ligne de la matrice  $C$  est une image de la position géographique du capteur. En effet, tous les termes d'une ligne sont nuls sauf celui correspondant à l'endroit où est positionné le capteur. Cette matrice permet donc d'avoir l'évolution temporelle de la concentration en certains points de la zone. Ce sont ces signaux temporels qui serviront pour les traitements ultérieurs. La forme de la matrice  $C$  est la suivante :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$b(n)$  est un bruit blanc de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ . Il modélise les erreurs de mesures au niveau des capteurs.

### 2.3.3 Observabilité du système

La notion d'observabilité des systèmes linéaires a été introduite par Kalman ([Gilbert, 1963](#)). Son objectif principal était d'élaborer une loi de commande (commandabilité) pour la source permettant de caractériser la relation source-capteurs et d'assurer l'identifiabilité du modèle numérique pour relier l'entrée, le vecteur d'état et les sorties du système surveillé.

Un processus est dit observable si toute transition de l'état du processus affecte tôt ou tard les variables de sortie. Cette préoccupation de l'observabilité est née de l'idée qu'avec un nombre de sortie normalement inférieur à celui des variables d'état, la connaissance de la sortie à un instant donné ne saurait alors renseigner complètement sur l'état du système à cet instant. Kalman a donc posé le problème de la façon suivante : peut-on connaître l'état à un instant à partir de l'observation de la sortie pendant un certain temps fini ? ce qui revient à compenser le défaut d'information instantanée (dû au fait que nombre de capteur  $n_c < lL$ ) par la durée pendant laquelle on obtient une définition de l'information.

Le système est dit complètement observable si de l'observation de la sortie  $y = [y(k_0), y(k_0 + T), \dots, y(k_0 + nT)]^T$  entre  $k_0$  et  $k_0 + nT$ , on peut déduire l'état du système  $X(k_0)$  à l'instant initial  $k_0$ .

Pour le cas de notre système (cas d'un système linéaire), on aura pour  $n$  mesures effectuées entre les instants  $k_0$  et  $k_0 + nT$ , le système observable sera décrit par :

$$\begin{bmatrix} y(k_0) \\ y(k_0 + T) \\ \cdot \\ \cdot \\ y(k_0 + nT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C\hat{A} \\ \cdot \\ \cdot \\ C\hat{A}^{n-1} \end{bmatrix} X(k_0) \Leftrightarrow y = OX(k_0) \quad (2.100)$$

Ce système à  $n$  équations linéaires et  $lL$  inconnues possède une solution unique pour  $n = lL$  qui est  $X(k_0) = O^{-1}y$ , si la matrice d'observabilité  $O$  est de rang plein, c'est-à-dire égal à  $lL$ . Pour cela,  $lL$ , équations indépendantes sont nécessaires, ce qui oblige à obtenir  $lL$  mesures dans le cas mono-capteurs.

### 2.3.4 Conception, programmation et positionnement des capteurs de polluant

Par définition, un capteur de polluant est un composant qui transforme la concentration d'une espèce gazeuse dans un environnement gazeux en une variation de tension, de courant ou d'impédance électrique (Permy et al., 1994). Dans notre étude nous allons utiliser les capteurs à gaz chimique pour identifier nos polluants dans l'atmosphère, car ce sont les plus utilisés pour la reconnaissance des espèces gazeuses dans un environnement gazeux complexe. Ils sont constitués d'une couche sensible et d'un système de transduction. Cette couche réagit avec son environnement gazeux qui en retour modifie ses propriétés physiques et chimiques.

Les capteurs utilisés auront pour objectif de fournir les informations analogiques car les informations dans notre environnement sont de nature analogique puis grâce au microcontrôleur

de l'Arduino, ces informations seront converties en données numérique grâce au convertisseur **CAN** (Convertisseur Analogique Numérique).

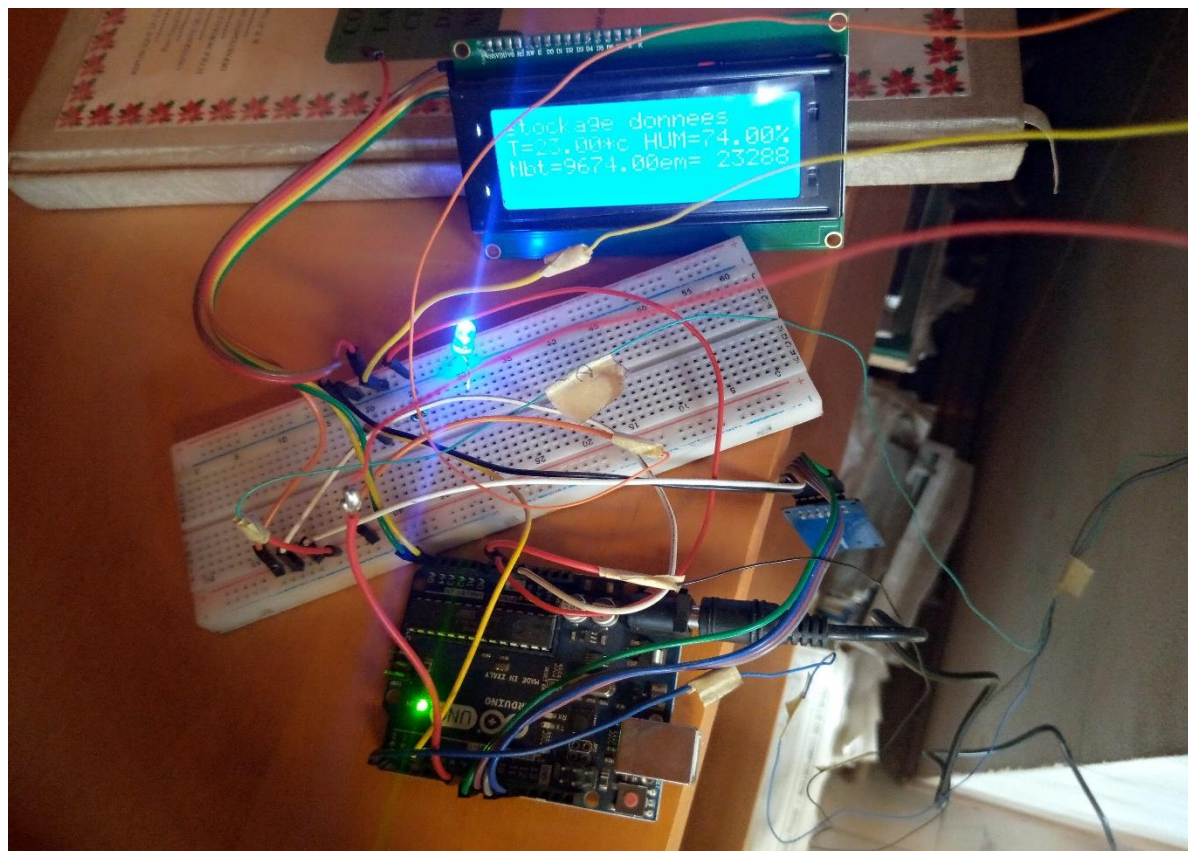
CAN est un élément qui convertit les informations analogiques en informations numériques. Ainsi ces informations converties peuvent être envoyées dans les fichiers **LCD 1602** pour lire les valeurs de la concentration grâce au code **ASCII** pour chaque programme intégré.

### 2.3.4.1 Conception électronique du capteur : Utilisation du logiciel Fritzing

Fritzing est un logiciel libre et gratuit de conception de circuit imprimé permettant de concevoir de façon entièrement graphique le circuit et d'en imprimer le typon. La version autoriser pour notre machine est Fritzing.0.9.3b. C'est dans ce logiciel via son interface que nous allons monter notre capteur dit multi-capteur. Fritzing contient déjà les outils permettant de concevoir notre capteur qui sera multifonctionnel, et capable d'identifier tout polluant et gaz qui y échappent à partir de sa particularité du système 3S (sensibilité, sélectivité et stabilité). La figure 31 donne une image du laboratoire expérimental conçu partir du logiciel Fritzing.

Le système de transduction va traduire cette variation de propriété physique en un signal électrique, qui pourra être émis par le capteur et à chaque émission du signal, le système met sur pied un autre système de microcontrôleur appelé **chaîne de mesure**. La chaîne de mesure est constituée d'un ensemble de moyen et des procédures techniques qui permettent la mise à disposition de la qualité de l'air appelé **capteur de pollution** ou de gaz qui permet de mesurer le méthane, l'hydrogène, le monoxyde de Carbone, le dioxyde de Carbone, les Nox ... Pour concevoir notre capteur plusieurs étapes seront à modéliser :

- **La plaque à essai** : où l'on voit les composants telles qu'elles sont dans la réalité et où l'on construit le montage ;
- **La vue schématique** : représentant le schéma fonctionnel du capteur ; afin d'observer ou de modifier le circuit dans ses vues ;
- **Circuit imprimé** : nous permet de concevoir et d'exporter les circuits imprimés simple ou double face ;
- **Le code** : partie réservée au programme conceptuel pour l'expérimentation. Il sera généré par le logiciel Arduino.



**Figure 31: Vue d'ensemble du capteur KANE251 conçue à partir du logiciel Fritzing et installé dans la salle d'exploitation dans les sites industriels.**

### **2.3.4.2 Programmation du capteur : logiciel Arduino UNO**

La carte Arduino a été construite en 2005 par un groupe d'étudiants et professeurs Italien dans le but de faciliter la programmation des microcontrôleurs. La carte Arduino est présentée à la figure 32. Le microcontrôleur permet, à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs ; la carte Arduino est donc une carte électronique de prototypage donc le principal composant est le microcontrôleur (figure 33). C'est une diode électroluminescente (LED) au battement de fréquence 100 000 milli secondes. Notre programme réalisé peut être consulté en (annexe E : programme Arduino UNO concentration des polluants).

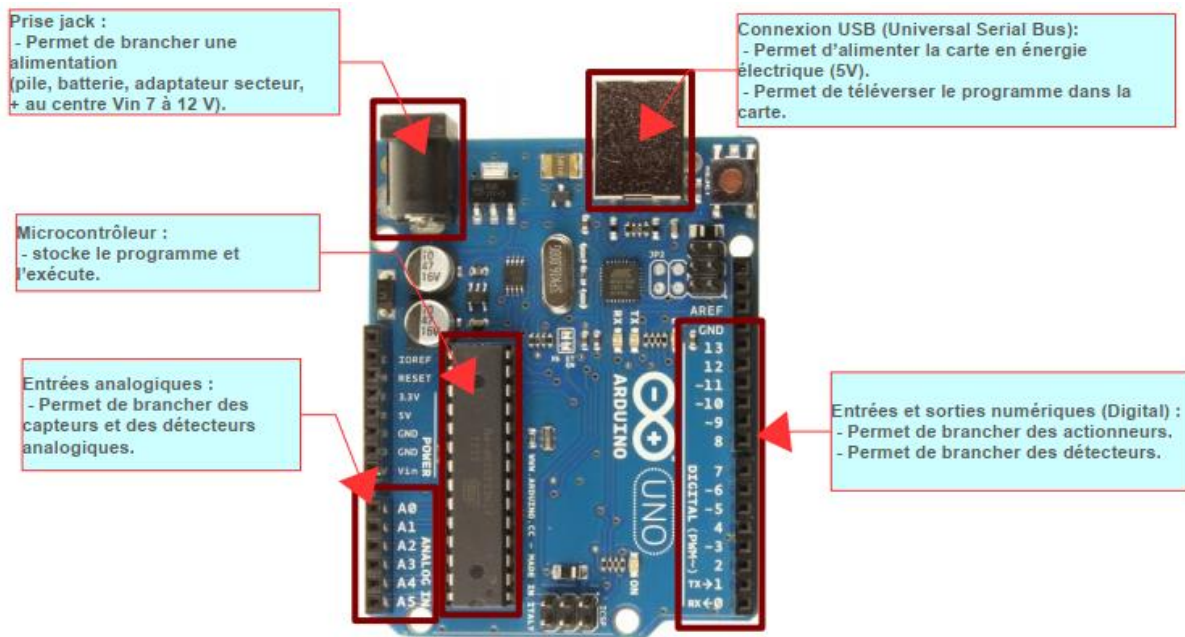


Figure 32: Carte Arduino



Figure 33: Carte Arduino UNO

La figure 33 nous donne à partir de la sortie et en fonction du type de polluant, la valeur de la concentration mesurée. Ce processus pourra donc être intégré dans le logiciel Matlab version 2016b.

### 2.3.4.2 Caractéristiques métrologiques du capteur utilisé

Comme nous avons décidé de travailler avec des capteurs de gaz chimique, il est important de rappeler les caractéristiques principales de ces composants. Les 3 paramètres les plus importants

constituent ce qui est couramment appelé les « 3S » (Pijolat, 1997) : sensibilité, sélectivité et stabilité.

- **Sensibilité** : Par définition, il s'agit du rapport entre la variation élémentaire de la grandeur de sortie fournie par le capteur et la variation élémentaire de la grandeur à mesurer. Pour un capteur de gaz de type semi-conducteur, la sensibilité sera donc la variation de la conductance de sa partie sensible par rapport à la variation de la concentration de l'espèce gazeuse à laquelle il sera dédié. La sensibilité est exprimée en Siemens (ou Ohm-1) par ppm ;
- **Sélectivité** : C'est l'une des caractéristiques les plus importantes des capteurs de gaz. Par définition, la sélectivité est l'aptitude d'un dispositif à détecter quantitativement la présence d'un gaz indépendamment des variations de concentrations des autres gaz susceptibles d'interférer. On parle d'une sélectivité absolue lorsqu'un capteur ne répond qu'à une seule espèce gazeuse, et que sa réponse n'est pas affectée par la présence d'une autre espèce. La sélectivité est dite relative si on dispose d'un capteur qui répond à différentes espèces susceptibles d'être présentes dans son environnement gazeux ;
- **Stabilité** : C'est un paramètre qui caractérise la dérive du signal des capteurs au cours d'une plus ou moins longue durée d'utilisation même si les conditions de mesures sont constantes.

Ces dérives peuvent être corrigées dans certains cas en effectuant périodiquement un calibrage « de zéro » (Baraleh, 2018) c'est à dire une mesure dans une atmosphère de référence (généralement sous un air de composition contrôlée appelé « air zéro »).

### 2.3.4.3 Présentation du couplage Algorithme génétique-Gaussien (GA-Gaussian)

L'estimation des émissions des polluants non florés est faite à partir du couplage Algorithme génétique-Gaussien (GA-Gaussian). C'est est un nouveau modèle permettant d'exploiter les mesures des émissions obtenues par la méthode empirique du deuxième niveau d'industrialisation. Cette méthode empirique est axé aux pays en voie de développement ; elle est proposée et

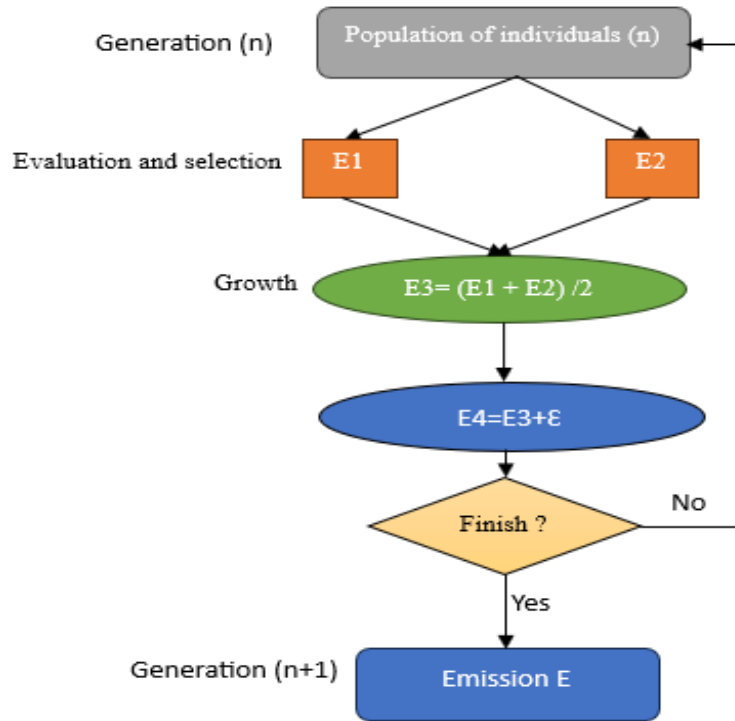
développée dans la suite de notre travail afin de prédire l'évolution de la concentration dans le temps dans une atmosphère où est implanté nos centrales thermiques.

- **Presentation de l'algorithme génétique**

En 1975, les Algorithmes génétiques (AGs) ont initialement été développés par John Holland. Mais le succès de la méthode on la doit beaucoup plus aux travaux de ([Goldberg, 1988](#)), et leur applicabilité a été faite pour la résolution des problèmes d'optimisations difficile avec des variables discrètes et continues. L'algorithme génétique est une méthode d'optimisation stochastique qui utilise les techniques de la sélection naturelle à la recherche de la fonction objectif la plus élevée et produit des solutions quasi optimales avec un effort de calcul modéré. D'après les travaux de ([Noaman & Barker, 1999](#) ; [Bellatreche et al., 2006](#) ; [Elhoussaine et al., 2008](#) ; [Rongxiao et al., 2018](#)) c'est un processus qui s'appuie sur les techniques de la génétique à savoir : le croisement, la mutation et la sélection. Ils sont trop gourmands en temps de calcul, mais efficacement très puissants pour trouver la solution globale d'après [Hanaa, et al. \(2013\)](#).

A partir d'une population initiale de solution (émission), on évalue les performances de chaque solution grâce à la fonction objective dite fonction fitness. Cette fonction permet de créer par évaluation de la population précédente une nouvelle population de solution potentielle par utilisation des opérateurs évolutionnistes simples (le croisement, la mutation et la sélection) jusqu'à trouver une solution de l'estimation des émissions satisfaisante.

L'optimisation est un processus essentiel dans la modélisation de la dispersion atmosphérique. Elle permet ici de développer les techniques plus fiables dans le but de modéliser notre système et de trouver une solution se rapprochant beaucoup plus de la réalité. La solution obtenue à partir des algorithmes génétiques sera dite solution optimale et c'est elle qui sera utilisée pour savoir l'évolution de la concentration des polluants dans la cheminée par utilisation de l'équation d'advection-diffusion. L'organigramme de l'algorithme génétique (figure 34) nous donne le processus utilisé pour obtenir la solution optimale



**Figure 34 :** Fonctionnement de l'Algorithme Génétique

- **Présentation du modèle gaussien**

Le modèle gaussien est un modèle de dispersion qui permet de résoudre la plupart des problèmes de dispersion (Beychok, 2005 ; Terek et al., 2016). Il se base toujours sur la loi normale uniforme car il a une facilité de produire les résultats à cause de ses hypothèses simplificatrices étayées par Daly et Zannetti, (2007). Le modèle gaussien se définit selon le fait qu'un polluant s'échappe dans une source de pollution. Dans ce cas, la concentration est donnée à partir de l'équation (2.111).

$$C(x, y, z, H, Q) = \frac{Q \cdot D}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \left[ e^{\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right] \quad (2.111)$$

Où C'est la concentration d'un polluant en un point (x, y, z) ;

Q : représente le taux d'émission en kilogramme par heure de la source i en temps t ;

U : représente la vitesse de rejet en mètre par seconde en temps t du GES dans la cheminée

;

$\sigma_y$  et  $\sigma_z$  représentent les écarts-type des distributions de concentration dans le sens de la direction du vent. Ces deux paramètres sont sélectionnés selon la classe de stabilité de Guifford-Pasquill détaillées à partir des travaux de Pasquill et Smith (1983) et ses écarts-type de dispersion sont déterminées à partir de la table de Briggs (Hanna et al., 1982 ; Tarek et al., 2016) et la classe de stabilité B sera choisie pour ce calcul.

H : représente la hauteur de la cheminée où se trouve la source par rapport à la terre ;

D : représente l'effet de décomposition du polluant et calculée à partir de l'équation (2.112)

$$D = \begin{cases} e^{-\left(\frac{Kx}{U}\right)}; & K > 0 \\ 1; & K = 0 \end{cases} \quad (2.112)$$

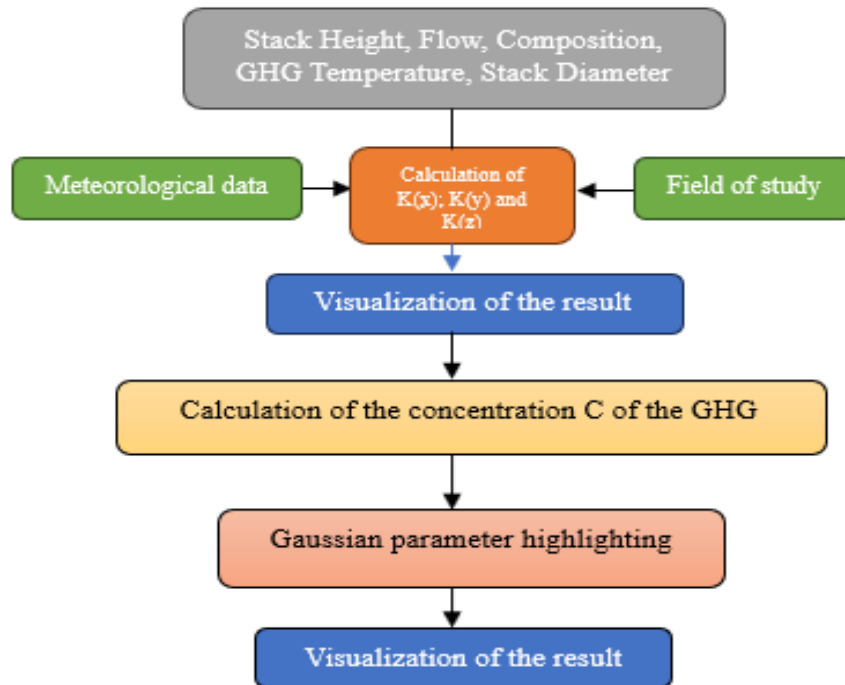
Où  $x$  est la distance dans la direction du vent,  $U$  est la vitesse du polluant et  $K$  est le coefficient de décomposition.

Selon les travaux de (Ouedraogo, 2006a) et de (Ouedraogo, 2006b), la valeur optimale de la concentration  $C$  et la hauteur  $H$  de la cheminée sont liées par la relation donnée par l'équation (2.113) suivante :

$$C = \frac{0.23Q}{aUH^2} \quad (2.113)$$

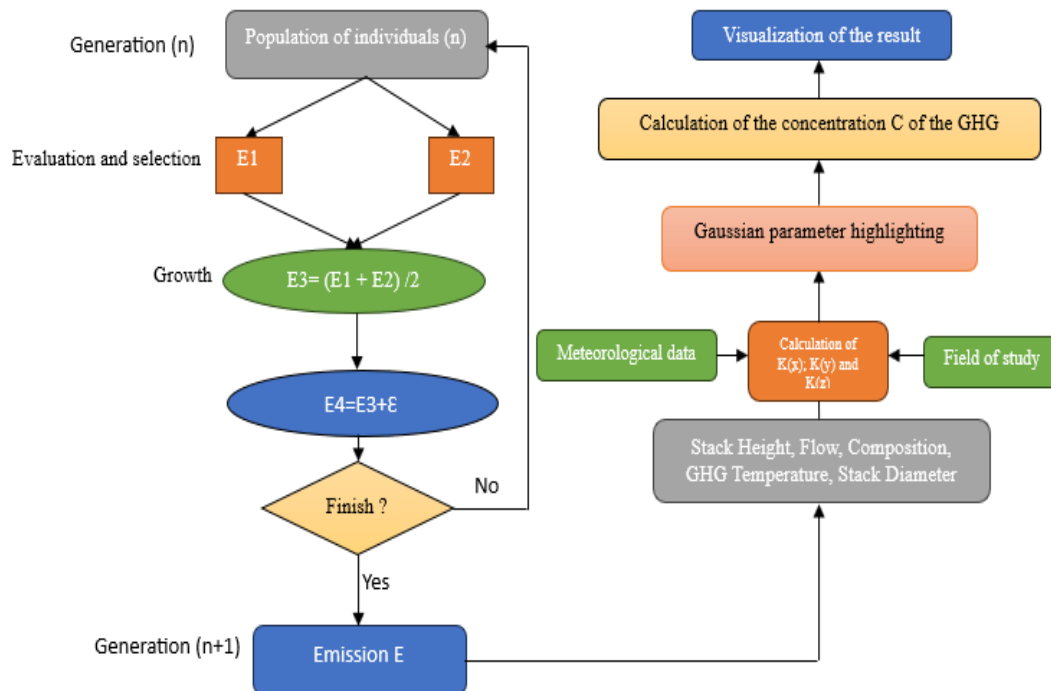
$$\text{En posant } a = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}$$

L'organigramme du modèle gaussien (figure 35) de dispersion est donné par :



**Figure 35 :** Organigramme du modèle gaussien

L'organigramme du couplage GA-Gaussian (figure 36) est décrit par :



**Figure 36 :** Organigramme de l'algorithme de couplage GA-Gaussian

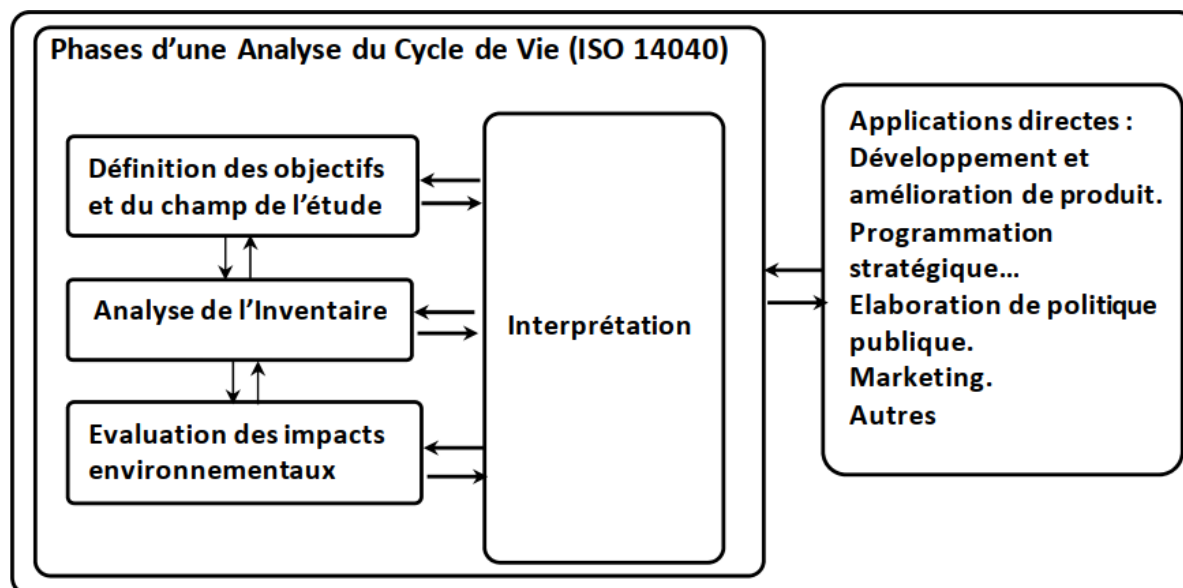
## 2.4 Méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) liée aux centrales thermiques de la région du centre Cameroun

L'étude menée ici est méthodologiquement encadrée par une norme qui définit des règles précises. La raison de cet encadrement est l'utilisation pour laquelle l'étude est prévue. Une ACV est utilisée pour comparer l'influence globale des produits sur l'environnement. Afin de pouvoir comparer un produit de manière pertinente, ce produit doit être décrit de manière à pouvoir évaluer facilement cette pertinence. La première étape d'une ACV est prévue à cet effet, les règles de description dictées par les normes ISO 14040 et 14044 orientent l'étude vers son utilisation future. Il s'agit de la définition des objectifs et du champ.

### 2.4.1 Définitions des objectifs

#### 2.4.1.1 Définition

L'ACV est une méthode qui étudie les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit (« du berceau au tombeau »), de l'acquisition de la matière première à sa production, son utilisation et son élimination (ISO 14040, 2006). Il s'agit donc d'un outil servant à évaluer la charge environnementale totale d'un produit ou d'une activité (Iannone Raffaele et al., 2015). L'ACV permet de réaliser des études comparatives entre produits ou procédés ayant la même fonction, d'identifier les étapes d'un processus qui entraîne le plus grand impact environnemental, de développer de nouveaux produits ou procédés, de mettre sur pied ou orienter des politiques publiques et de guider le choix des matières premières, des sources d'énergies, des types d'emballages, des filières de traitement des rejets, etc. La méthodologie à employer lors de la réalisation d'une ACV a été normalisée à la fin des années 1990 (Noureddine Zouhour et al., 2013). L'ACV est, ainsi, composée de quatre étapes (figure 37) : (1) Définition des objectifs et du champ de l'étude ; (2) Analyse de l'inventaire ; (3) Évaluation des impacts du cycle de vie et (4) Interprétation des résultats (ISO 14040, 2006).



**Figure 37 : Les phases d'une Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040, 2006 ; Nouredine Hajjaji et al., 2013)**

Pour plus d'orientations et de spécification dans l'une des phases la plus importante de la méthodologie, pour le choix influençant l'ensemble de l'étude, le but principal est d'évaluer la performance environnementale lors de la production journalière de l'électricité dans les centrales thermiques implantées dans la région du centre Cameroun en estimant les impacts environnementaux par la méthode d'ACV.

L'analyse centrée sur la production de l'électricité met en évidence les différentes performances environnementales dans chaque secteur de passage jusqu'à la production finale de l'électricité. La définition de l'unité fonctionnelle (UF) ici est basée sur la production journalière de l'électricité dans les centrales thermiques d'Oyom-Abang (CTO) de Mbalmayo (CTM).

### 2.4.1.2 Objectifs

Depuis plusieurs décennies, le monde est à la recherche de l'énergie pour le bon fonctionnement des entreprises et pour subvenir aux besoins des générations présente et future sans toutefois mesurer les causes immédiates sur la santé et l'environnement tout entier. Le Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (MINEP) en collaboration avec la Convention-Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) mènent des missions

spécifiques pour lutter contre les dégâts causés par les activités au sein des centrales thermiques dans le monde et particulièrement au Cameroun. Les centrales thermiques étant des unités de production de l'électricité à grande échelle dans tout le monde entier par utilisation du combustible fossile (Noureddine Hajjaji et al., 2013) et en tant que technologie ayant le plus d'attrait selon les organismes demandeurs, la production de l'électricité au moyen d'une vis (CTO et CTM) reliée à un alternateur, sera l'objet de cette analyse du cycle de vie.

La méthodologie utilisée pour cette étude a été élaborée selon la norme ISO 14040 et 14044. L'utilisation de cette norme est un atout pour la pertinence et la légitimité de l'étude. Une analyse du cycle de vie d'un produit étant un outil permettant de comparer un cycle de vie d'un produit à d'autre selon l'impact environnemental, il est donc légitime d'utiliser une méthode normalisée. Une analyse du cycle de vie étant un processus spécifique non généralisé, il a été nécessaire de prendre un cas particulier sur lequel l'étude est portée. Pour des raisons de représentativité et de facilité, les centrales qui seront prises en compte pour cette étude seront : Les centrales thermiques d'Oyom-Abang (CTO) de Mbalmayo (CTM) situées dans la région du centre Cameroun.

## **2.4.2 Définition des champs d'étude et des frontières du système et hypothèses retenues**

### **2.4.2.1 Unité fonctionnelle**

L'unité fonctionnelle (UF), optée dans cette étude, est « la production journalière (kilowattheure) d'électricité ». Cette unité nous permet, en particulier, de comparer notre système avec d'autres systèmes de production d'électricité pour d'autres pays.

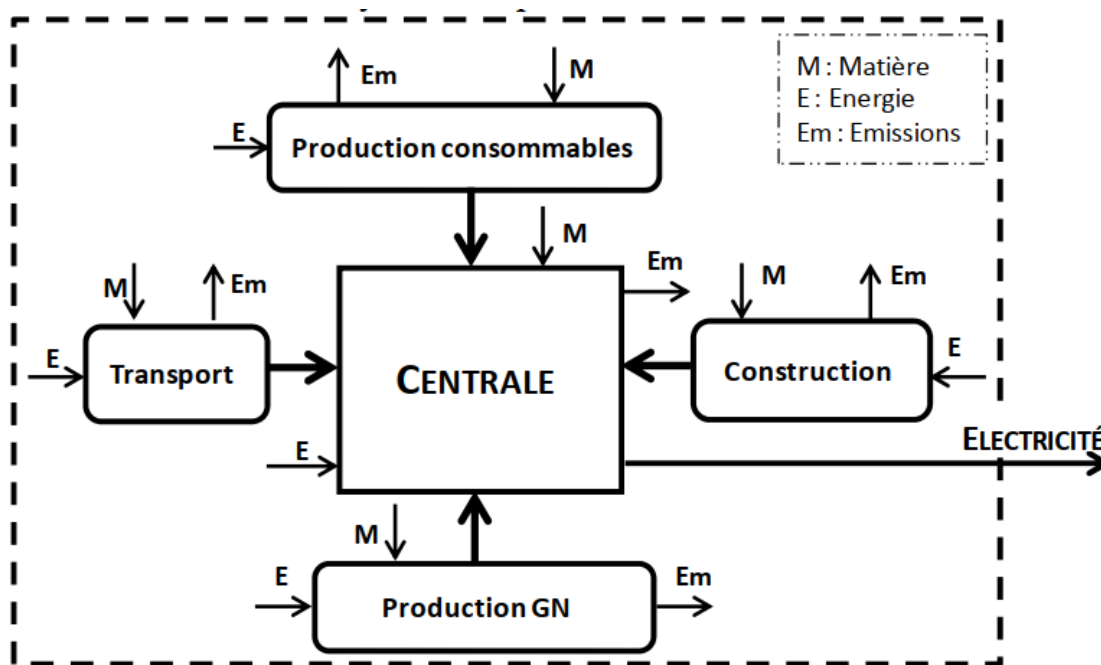
### **2.4.2.2 Frontières du système et hypothèses retenues**

La délimitation générale du système est représentée à partir de la figure 35. Le système présenté dans cette figure comprend plusieurs éléments et procédés pris en compte dans l'analyse du cycle de vie. L'analyse englobe l'approvisionnement en matériaux et en énergie, le cycle de vie du produit et les émissions dans l'environnement.

Le système de production de l'électricité dans ces centrales est scindé en cinq processus (sous-systèmes) à savoir :

- Production du GN : Production du gaz naturel (GN) ;
- Productions consommables : Production des produits consommables de la centrale (huile, produits chimiques, etc.) ;
- Transport : Transport du GN et des produits consommables ;
- Centrale : Phase d'exploitation (Production de l'électricité dans la centrale) ;
- Construction : Construction de la centrale.

La figure 38 présente les frontières du système de production d'électricité étudié.



**Figure 38 : Frontière du système de production de l'électricité**

Le GN exploité au Cameroun est de 70% à 80% d'origine Camerounaise. Vue l'indisponibilité du modèle gaz Camerounais dans les bibliothèques du logiciel OpenLCA, on adopte le modèle Africain, désormais disponible dans OpenLCA, comme modèle représentatif du GN alimentant les centrales thermiques à fioul dans la région du centre Cameroun. Dans le cas de base, la longueur des pipelines transportant du GN depuis la SONARA jusqu'aux sites industriels de la région du centre est d'environ 313,7 km pour la centrale thermique d'Oyom-Abang et 350 km pour la centrale thermique de Mbalmayo. Cette distance fera l'objet d'une étude de sensibilité pour envisager l'effet d'une éventuelle modification de longueurs des pipelines sur les performances environnementales

de la Centrale. Le module construction de la centrale comprend la fabrication des matériaux de construction et l'aménagement des bâtiments. Vu le manque de données nécessaires et l'absence d'une stratégie de recyclage claire, la phase démentiellement de la centrale est considérée dans notre étude. Notre étude ne prend pas, également en considération la phase de fabrication des équipements de la centrale. Le procédé de production de l'électricité nécessite des produits chimiques consommables à prendre en considération, en termes de production et transport, lors de l'ACV. Pour bien se rendre compte des termes transport (GN et produits consommables de la centrale), on les a regroupés dans un même module appelé "Transport". Manifestement, les impacts environnementaux engendrés par un véhicule de transport résultent essentiellement des émissions lors de la combustion de carburants. Dans les bases de données du logiciel Open LCA, ces impacts dépendent de : (1) type de véhicule, (2) quantité du produit transporté et (3) distance parcourue. Ces deux derniers paramètres sont regroupés dans un seul indicateur, le nombre de kilogramme kilomètre (kg.km), qui est le produit de la masse transportée en (kg) par le nombre de kilomètres parcourus. Dans notre scénario (cas de base), la valeur de la distance du transport des différents consommables est prise et est égale à 200 km. La variation de la distance de transport fera, également, l'objet d'une étude de sensibilité.

### **2.4.3 Méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impacts**

Pour faire l'inventaire du cycle de vie, plusieurs méthodes ont été utilisées. La raison de la diversification des méthodes tient en premier lieu d'une contrainte liée aux données d'inventaire et en deuxième lieu à la volonté du commanditaire de l'analyse du cycle de vie.

Pour obtenir des résultats cohérents, la sélection des catégories d'impact a été réalisée comme suit :

- ❖ Dans l'impossibilité de modifier les catégories d'impact au sein des FDES et PEP, les catégories sont choisies sur la base de leurs fiches afin d'obtenir un maximum de résultats au sein des FDES et PEP. Il a donc fallu reprendre les catégories d'impacts apparaissant le plus souvent dans les fiches ;

- ❖ Sur la base de la sélection réalisée à partir des fiches, une première méthode a été sélectionnée afin d'obtenir des résultats pour les mêmes catégories d'impacts. Ensuite, deux autres méthodes ont été utilisées pour compléter les résultats d'inventaire ;
- ❖ Le fait d'uniformiser les catégories d'impact permet d'augmenter la complétude des résultats. De cette manière, chaque valeur d'impact au terme du travail sera de meilleure qualité. En effet, un résultat d'inventaire basé sur des données incomplètes est difficilement utilisable.

Concrètement, sur la base des FDES et PEP, les catégories d'impacts choisies sont :

- ❖ **Le potentiel de réchauffement climatique** : il s'agit de l'impact lié aux modifications de la composition de l'atmosphère qui engendre une augmentation globale de la température à la surface terrestre. Cet accroissement de la température est dû aux émissions de gaz à effets de serre dont la concentration augmente dans l'atmosphère. L'unité utilisée pour exprimer les résultats obtenus pour cette catégorie est le Kg.éqCO<sub>2</sub> ;
- ❖ **La diminution de la couche d'ozone** : il s'agit de la contribution du cycle de vie au phénomène de disparition de la couche d'ozone stratosphérique protégeant la croûte terrestre du rayonnement solaire. La disparition de cette couche est liée à la présence de gaz détruisant l'ozone tels que les CFC. L'unité de quantification de l'impact est le Kg.éqCFC-11 ;
- ❖ **Eutrophisation** : phénomène lié à la présence d'éléments nutritifs tels que les matières organiques, les nitrates, etc. Le résultat est la modification de la composition des eaux par des mécanismes biologiques avec principalement, la diminution de la concentration en oxygène dissout qui bouleverse les équilibres biologiques au sein du milieu aquatique. Cet impact sur l'environnement est exprimé au moyen du Kg.éqPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> ;
- ❖ **Création d'ozone photochimique** : catégorie d'impact exprimant la création d'ozone photochimique responsable du phénomène de smog. L'unité utilisée est le kg.éqC<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ;
- ❖ **Consommation d'eau** : expression de la consommation d'eau durant tout le cycle de vie de chaque produit. Cette consommation est exprimée en m<sup>3</sup> d'eau ;
- ❖ **Consommation d'énergie primaire** : consommation de l'énergie primaire renouvelable et non renouvelable durant tout le cycle de vie pour chaque produit, sous-produit ou processus élémentaire. La consommation d'énergie primaire s'exprime en MJ ;

- ❖ **Pollution de l'eau** : substances polluantes relâchées durant l'ensemble du cycle de vie dans les différents milieux aquatiques. Les quantités sont exprimées en fonction de leur toxicité en Kg.éq 1,4 dichlorobenzène.

Les catégories d'impacts choisies sont issues des méthodes d'évaluation de type « baseline ». Il s'agit en fait des catégories d'impacts les plus utilisées dans les différentes analyses de cycle de vie. Le fait d'utiliser ces catégories communément employées est utile pour les futures comparaisons avec d'autres systèmes de production d'énergie.

Les différentes méthodes adoptées pour évaluer les impacts environnementaux à partir de la méthode d'ACV sont :

- ❖ **CML Baseline** : La méthode d'évaluation CML fut mise au point au sein de l'université de Leiden en 2001 (Benini et al., 2014). Cette méthode englobe 1700 flows et peut être utilisée selon deux méthodes différentes. La méthode non-baseline qui fait intervenir une cinquantaine de catégories d'impacts et la méthode baseline qui évalue l'inventaire du cycle de vie selon les catégories d'impact les plus utilisées. On compte pour cette partie de méthode onze catégories d'impacts inventoriées dans le tableau 17.

Tableau 17: Catégories d'impacts prise en compte par la méthode CML baseline. (Benini et al., 2014)

<i>Method : CML (baseline)</i>	
<i>Impact category group</i>	<i>Name of the impact category in the method</i>
<i>Acidification</i>	Acidification potential – average Europe
<i>Climate change</i>	Climate change – GWPI
<i>Depletion of abiotic resource</i>	Depletion of abiotic resource – elements, ultimate reserve
	Depletion of abiotic resource – fossil fuels
<i>Ecotoxicity</i>	Freshwater aquatic ecotoxicity – FAETP inf
	Marine aquatic ecotoxicity – MAETP inf
	Terrestrial ecotoxicity – TETP inf
<i>Eutrophication</i>	Eutrophication – generic
<i>Human toxicity</i>	Human toxicity – HTP inf
<i>Ozone layer depletion</i>	Ozone layer depletion – ODP steady state
<i>Photochemical oxidation</i>	Photochemical oxidation – high Nox

- ❖ **Cumulative energy demand** : Cette méthode d'évaluation du cycle de vie est uniquement basée sur les flux d'énergies primaires nécessaires au cycle de vie. Elle permet de connaître les différents types d'énergie et leur quantité respective pour le cycle de vie d'un produit

ou service. La méthodologie se base sur une méthode publiée par Ecoinvent. Une extension de la méthode, et donc des facteurs de caractérisation, fut nécessaire pour inclure les flux apportés par les autres bases de données telles que ELCD (Benini et al., 2014). On compte pour cette partie de méthode huit catégories d'impacts inventoriées dans le tableau 18.

Tableau 18: Catégorie d'impact de la méthode "Cumulative energy demand. (Benini et al., 2014)

Method: Cumulative Energy Demand (CED)		
Impact Category group	Name of the impact category in the method	Reference Unit
Non-renewable resources	Fossil	MJ
	Nuclear	MJ
	Primary forest	MJ
Renewable resources	Biomass	MJ
	Geothermal	MJ
	Solar	MJ
	Wind	MJ
	Water	MJ

- ❖ **ReCiPe** : La méthode d'évaluation ReCiPe fut élaborée pour combiner deux autres méthodes à savoir la méthode Eco-Indicator 99 et la méthode CML. La méthode se divise en deux selon le niveau de caractérisation. Premièrement, les indicateurs midpoint qui caractérisent jusqu'aux catégories d'impacts et deuxièmement, les indicateurs endpoint qui caractérisent jusqu'aux catégories de dommages (dommages sur la santé humaine, et dommages sur la disponibilité des ressources) (Benini et al., 2014). On compte pour cette partie de méthode dix-huit catégories d'impacts inventoriées dans le tableau 19.

Tableau 19: Catégories d'impacts pour la méthode ReCiPe. (Benini et al., 2014)

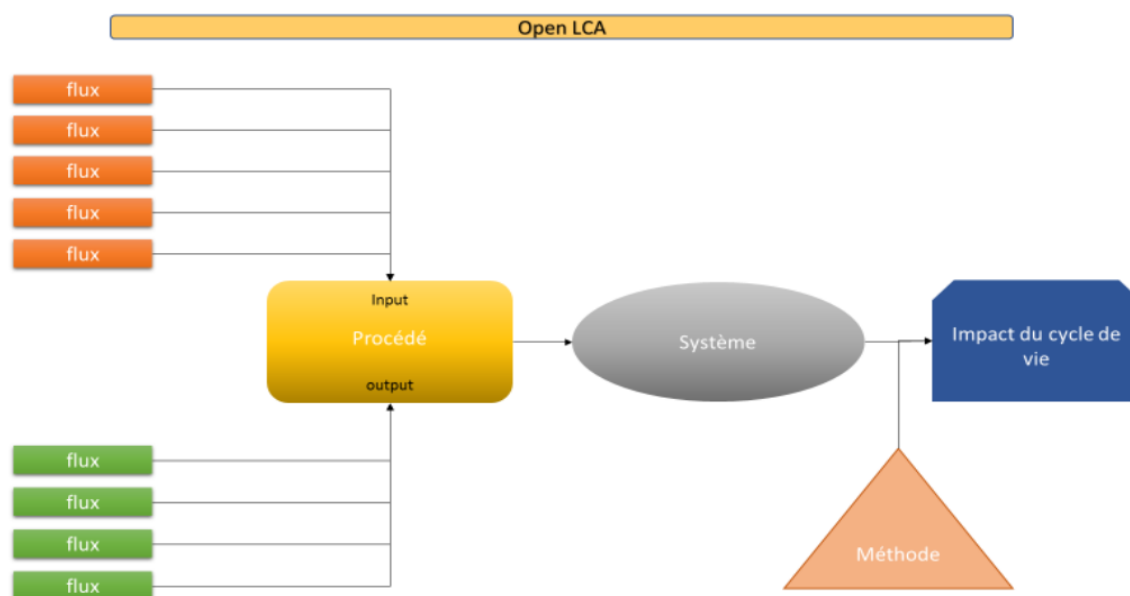
Method: ReCiPe midpoint (E, H & I)				
Impact category group	Name of the impact category in the method			
<b>Acidification</b>	Terrestrial acidification	TAP500-E	TAP100-H	TAP20-I
<b>Climate Change</b>	Climate Change	GWP500-E	GWP100-H	GWP20-I
	Fossil depletion	FDPinf-E	FDP100-H	FDP20-I
<b>Depletion of abiotic resource</b>	Metal depletion	MDPinf-E	MDP100-H	MDP20-I
	Water depletion	WDPinf-E	WDP100-H	WDP20-I
	Freshwater ecotoxicity	FETPinf-E	FETP100-H	FETP20-I
<b>Ecotoxicity</b>	Marine ecotoxicity	METPinf-E	METP100-H	METP20-I
	Terrestrial ecotoxicity	TETPinf-E	TETP100-H	TETP20-I
<b>Eutrophication</b>	Freshwater eutrophication	FEPinf-E	FEP100-H	FEP20-I
	Marine eutrophication	MEPinf-E	MEP100-H	MEP20-I
<b>Human toxicity</b>	Human toxicity	HTPinf-E	HTP100-H	HTP20-I
<b>Ionising radiation</b>	Ionising radiation	IRPinf-E	IRP100-H	IRP20-I

<b>Land use</b>	Agricultural land occupation	ALOPinf-E LOP-E	ALOP100-H LOP-H	ALOP20-I LOP-H
	Natural land transformation	LTPinf-E LTP-E	LTP100-H LTP-H	LTP20-I LTP-H
<b>Ozone layer depletion</b>	Urban land occupation	ULOPinf-E	ULOP100-H	ULOP20-I
	Ozone depletion	ODPinf-E M2E-E	ODP100-H M2E-H	ODP20-I M2E-H
<b>Particular mater</b>	Particular mater formation	PMFPinf-E	PMFP100-H	PMFP20-I
<b>Photochemical oxidation</b>	Photochemical oxidation formation	POFPinf-E	POFP100-H	POFP20-I

La méthode ReCiPe a été utilisée pour l'obtention du résultat sur la consommation d'eau.

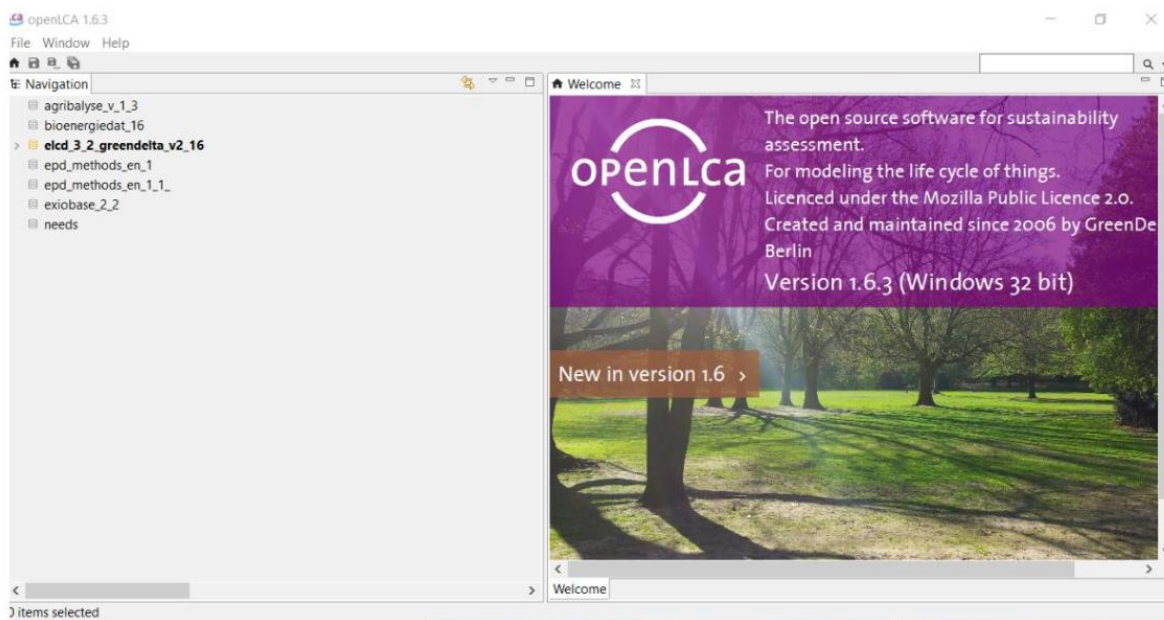
#### 2.4.4 Logiciel utilisé : OpenLCA

Le logiciel OpenLCA traite de l'analyse du cycle de vie et fournit gratuitement un outil permettant de les réaliser. L'utilisation d'un logiciel informatique se révèle souvent indispensable tant les informations à traiter sont nombreuses (Jolliet et al., 2010). Le principe de fonctionnement du logiciel est basé sur des bases de données qui contiennent des flux qui sont inventoriés pour réaliser des procédés à partir desquels on peut créer des systèmes de produits. L'évaluation de l'inventaire du cycle de vie se fait lorsque les systèmes de produits sont construits en choisissant une méthode et en l'appliquant dans l'étape de calcul réalisé par le programme de la figure 39.



**Figure 39 : Process d'un logiciel d'ACV**

L'interface du logiciel Open LCA version 1.11.0 est présenté par la figure 40.



**Figure 40 : Interface du logiciel OpenLCA 1.11.0**

La colonne de gauche présente les différentes bases de données qui ont été importées dans le programme.

Les flux présents dans les différentes méthodes peuvent être des flux élémentaires tels que l'émissions de CO<sub>2</sub> dans l'air, ou alors il peut s'agir de flux issus d'un processus comme l'énergie électrique produite par la technologie thermique. Chaque base de données contient six volets nécessaires à la création d'une analyse de l'inventaire d'un cycle de vie. L'utilisation des volets se fait de manière graduelle comme illustré dans le schéma ci-dessus. La première étape est de créer un flux de référence qui représente le produit étudié. Ensuite, il faut créer un procédé et définir la référence quantitative qui est le flux de référence. Ce flux sera repris dans les outputs du procédé. Le procédé se construit en ajoutant les différents flux répertoriés durant l'inventaire du cycle de vie. Lorsque tous les flux ont été intégrés au procédé (les inputs et les outputs) le système du produit peut-être créé. Enfin, l'analyse de l'inventaire du cycle de vie se calcule en définissant la méthode à adopter. Lorsque la méthode a été sélectionnée, le programme peut calculer l'impact du cycle de vie dans les différentes catégories d'impacts. En regroupant plusieurs systèmes de produit, le programme permet également de monter un projet et d'obtenir un rapport automatique décrivant

l'ensemble du projet. L'utilisation de ce programme pour la réalisation de l'étude ici présentée, s'est limitée à l'analyse de l'inventaire du cycle de vie.

## Conclusion

Le couplage Algorithme génétique modèle gaussien a été utilisé dans cette partie pour résoudre l'équation d'advection-diffusion. Cette équation discrétisée avec la méthode des différences finies centrée en espace et en temps nous a permis d'avoir des meilleures estimations de la concentration des émissions des polluants et GES. En se basant premièrement sur les méthodes empiriques du deuxième niveau d'industrialisation donc le Cameroun s'aligne à cet effet. Cette méthode est principalement axée sur l'évaluation de la consommation du fioul consommé dans les moteurs VASILA VASA 18V32LN. En suite la détermination de la quantité d'énergie électrique produite dans les CTO I et CTM ont été les facteurs clés pour notre étude. Dans la deuxième partie, nous avons développé une autre approche appelée méthode de modélisation inverse pour l'identification des GES et des polluants en mettant en exergue la notion de capteurs conceptionnels, programmés et pour déterminer les concentrations des émissions des polluants et GES. La troisième partie avait pour objectif l'étude des performances environnementales. Cette étude a été faite à partir de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans les centrales thermiques à fioul dans la région du centre-Cameroun.

## **CHAPITRE 3 : Résultats et discussion**

## Introduction

Ce chapitre vise à inventorier les différents résultats à partir des différentes méthodes utilisées en application dans la centrale thermique d'Oyom-Abang et la centrale thermique de Mbalmayo.

### 3.1 Production énergétique dans les sites industriels de la région du Centre-Cameroun

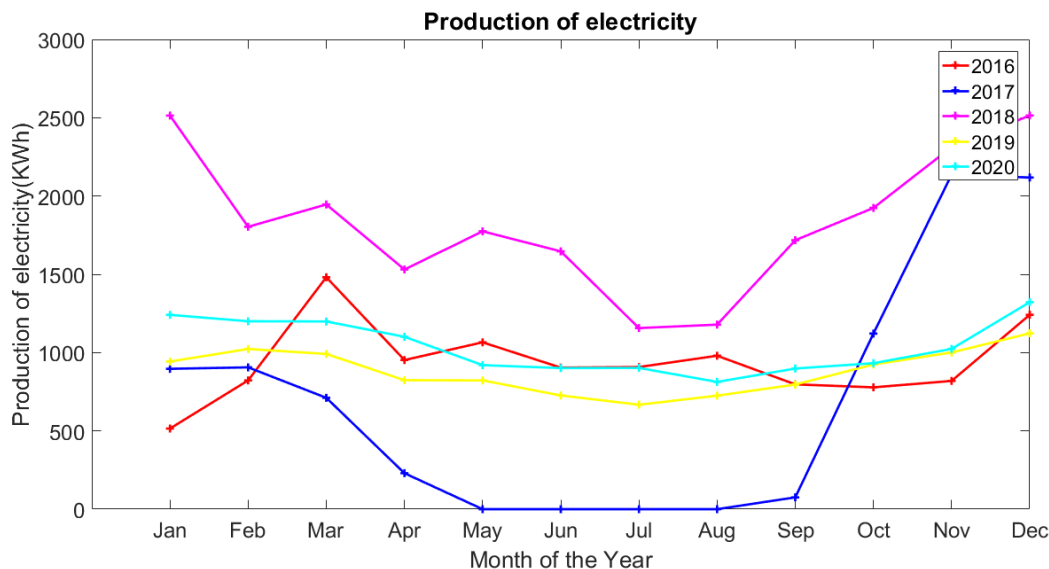
À partir des données collectées dans la société Eneo durant mes deux passages dans ses différents sites industriels notamment celui de Oyom-Abang et celui de Mbalmayo, nous pouvons noter que :

- La période allant du 15 Décembre 2018 au 15 Février 2019, notre stage s'est déroulé à la centrale thermique d'Oyom-Abang dans laquelle nous nous sommes familiarisés, puis le travail a pris son envol secteur par secteur, jusqu'à l'achèvement total de notre stage le 15 Février 2019.
- Visant à achever l'éthique nécessaire pour une étude plus pratique et davantage professionnelle, la période du 20 Janvier 2020 au 20 Mars 2020 sonna par un deuxième stage, mais cette fois ci à la centrale thermique de Mbalmayo, où par notre prise de conscience en 2018, nous avons effectués notre stage en toute quiétude et dans une atmosphère stable. Durant cette période nous avons fait la mise en œuvre des capteurs atmosphérique visant à mesurer par la méthode de captage les concentrations des différents GES et polluants issus des cheminées de la centrale.

Au cours de ce double stage, effectué à la centrale thermique d'Oyom-Abang et Mbalmayo, la collecte des différentes données a été effective. L'analyse de ces données s'est faite dans deux laboratoires (laboratoire de l'énergie de l'école normale supérieure de Yaoundé I et le laboratoire d'analyse des technologies de l'énergie et de l'environnement). Puis s'en est servi le traitement des données à suivi à partir de plusieurs logiciels à savoir : Microsoft Excel 2016 pour le traitement effectif de nos différentes données, le logiciel Matlab version 2016a pour tracer les courbes et programmer les équations mathématiques du phénomène d'advection-diffusion entre (2016 - 2020). Les logiciels OpenLCA et Arduino ont été utilisés notamment pour une étude d'analyse du cycle de vie et la conception des capteurs.

### 3.1.1 Production énergétique dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I (CTO I)

La production énergétique dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I (CTO I) s'est faite à partir de la collecte des données et la figure 41 nous présente la production de l'électricité durant les années 2016, 2017, 2018, 2019 et 2020.



**Figure 41 : Production de l'électricité pour des années 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020 dans la centrale thermique de la d'Oyom-Abang I.**

Il est à noter que la CTO I est une unité de production de l'énergie. Elle soit 13 MW (Eneo, 2018) d'énergie lors de son implantation en 2015. Cette production de l'énergie montre la mise en fonctionnement des différents moteurs de la centrale. L'énergie est produite dans cette unité journalièrement dans la plage d'intervalle 17h à 22h et au plus tard à 23h où nous observons une production très maximale.

Nous constatons que les mois les plus importants en termes de production forte pour ces cinq années sont Janvier, Février Novembre et Décembre :

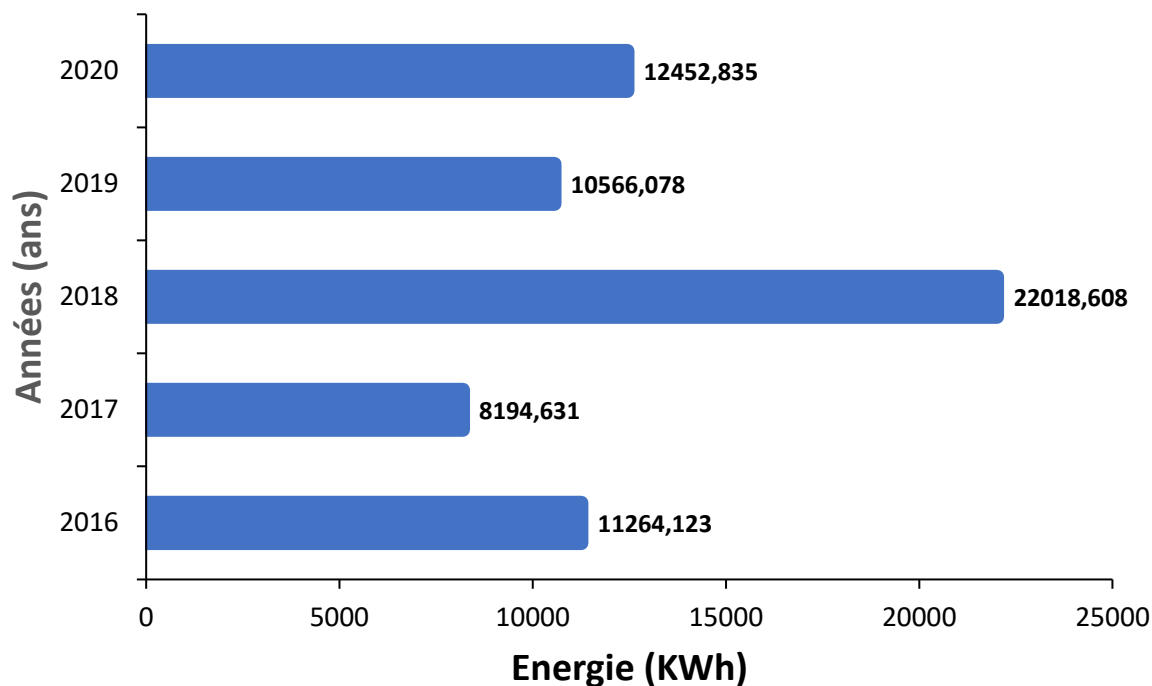
- En 2016, la production maximale était observée aux mois de Décembre et Mars soit 1241 et 1481 KWh. Cette hausse était dû à l'arrivée de la saison sèche et de la période mouvementée des fêtes de fin d'années où les populations consomment de façon

considérable l'énergie électrique dans les ménages (Seutche et al., 2015). Tandis que les mois les moins défavorables sont de Avril à Octobre, où nous observons une décroissance exponentielle de la production de l'électricité dans la centrale. Cela est dû au débit d'eau qui aurait augmenté dans les cours d'eaux. Ce qui impliquerait un impact positif de la production de l'électricité dans les barrages hydroélectriques au Cameroun et en occurrence le barrage de SONGLOULOU (Implanté sur la Sanaga-Cameroun et ayant une capacité de production de 384 MW donc sa cote de retenue est de 528 m) (Eneo, 2018).

- En 2017, la production maximale était observée entre les mois de Novembre et de Décembre soit 2136 et 2654 KWh. Cette hausse était dû à l'arrivée de la saison sèche et de la période mouvementée des fêtes de fin d'années. Une production moins maximale est observée entre Janvier et Mars. Par contre nous observons une décroissance exponentielle de la production dans la centrale à partir du mois d'Avril jusqu'à Septembre. Cette baisse est dû au débit d'eau qui aurait augmenté dans les cours d'eaux, qui aurait un impact positif de la production de l'électricité dans les barrages hydroélectriques au Cameroun. Entre les mois de Mai et d'Août, la production est nulle, à cause d'une panne mécanique au niveau du refroidisseur principal et cela a pris plus de temps pour remettre en service (période de réparation de la panne) car il fallait importer un nouveau refroidisseur.
- En 2018, le système de refroidissement étant déjà en place, les trois moteurs étaient déjà en plein fonctionnement ; cela permettait donc d'avoir une production considérable sur tous les mois. Mais la production maximale était observée entre le mois d'Octobre jusqu'à Janvier soit jusqu'à 2514 KWh en Décembre. Cette hausse était dû à l'arrivée de la saison sèche et de la période mouvementée des fêtes de fin d'années où les populations consomment de façon considérable l'énergie électrique dans les ménages et aussi d'autre part une augmentation croissante de la population environnante sur le Réseau Interconnecté Sud (RIS). Tandis que les mois où nous observons une décroissance d'Énergie dans la centrale partent de Février à Août. Cela est dû au débit d'eau qui aurait augmenté dans les cours d'eaux, ce qui aurait un impact positif dans la production de l'électricité dans les barrages hydroélectriques au Cameroun.
- En 2019 et 2020, les trois moteurs étant toujours en plein fonctionnement, la production est moyenne. Nous observons en 2019 une production minimale et maximale de l'ordre de 667,11 MWh et 1123,241 MWh respectivement au mois de juin et Décembre. Tandis qu'en 2020 la production minimale est de 812,221 MWh au mois de Juillet et 1322,133 MWh comme production maximale au mois de Décembre.

La figure 42 nous présente ici le cumul de la production de l'électricité durant les années 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020 dans la CTO. Dans la CTO, les années 2016 et 2017 ont connus des productions en énergie soit 11264,123 KWh en 2016 et 8194,631 KWh en 2017, tandis qu'en 2018, 2019 et 2020 nous avons enregistré un cumul de production soit 22018,608 KW/h ; 10566,078 KW/h et 12452,835 KW/h. Nous constatons qu'en 2018 la production était plus maximale par rapport aux autres années et nous remarquons que la production est restée décroissante jusqu'à

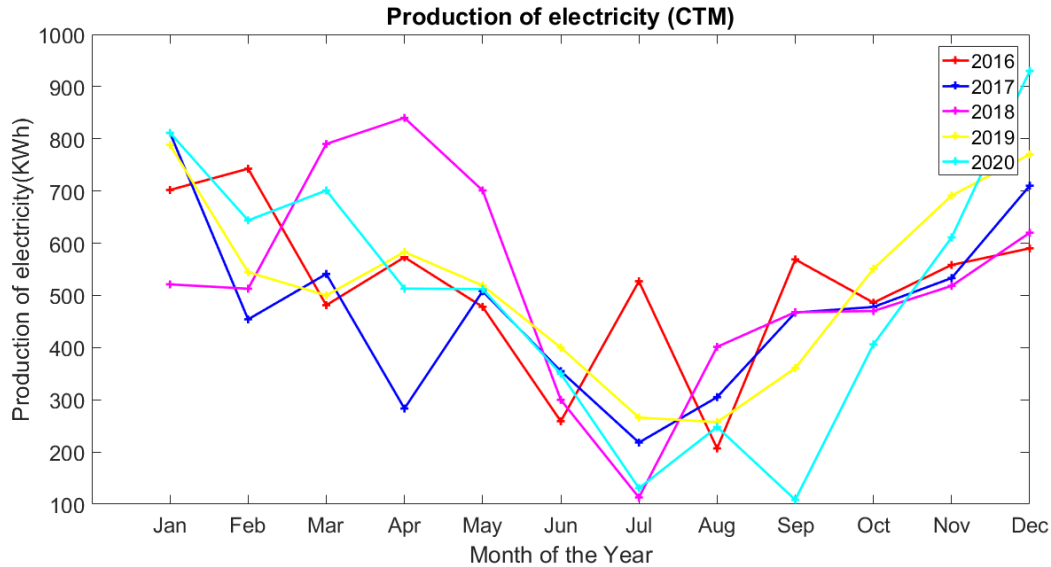
2019 mais croit légèrement en 2020. Mais la population étant grandissante, nous pouvons déduire que d'autres sources d'approvisionnement d'énergie ont vu le jour en l'occurrence la centrale photovoltaïque de DJOUM dans le SUD-CAMEROUN.



**Figure 42 : Cumul de production de l'électricité durant les années 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020 dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I.**

### 3.1.2 Production énergétique dans la centrale thermique de Mbalmayo (CTM)

À partir des données collectées dans la société Eneo durant mon stage allant du 20 Janvier 2020 au 20 Mars 2020, le traitement de ces données à partir du logiciel Microsoft Excel 2016 et le logiciel Matlab version 2016a nous a permis d'illustrer formellement la production de l'énergie en Kilowattheure ( $KWh$ ) dans la centrale thermique Mbalmayo-Yaoundé. La figure 43 nous présente la production de l'électricité au cours des années 2016, 2017, 2018, 2019 et 2020.



**Figure 43 : Production de l'électricité entre 2016-2020 dans la centrale thermique de Mbalmayo.**

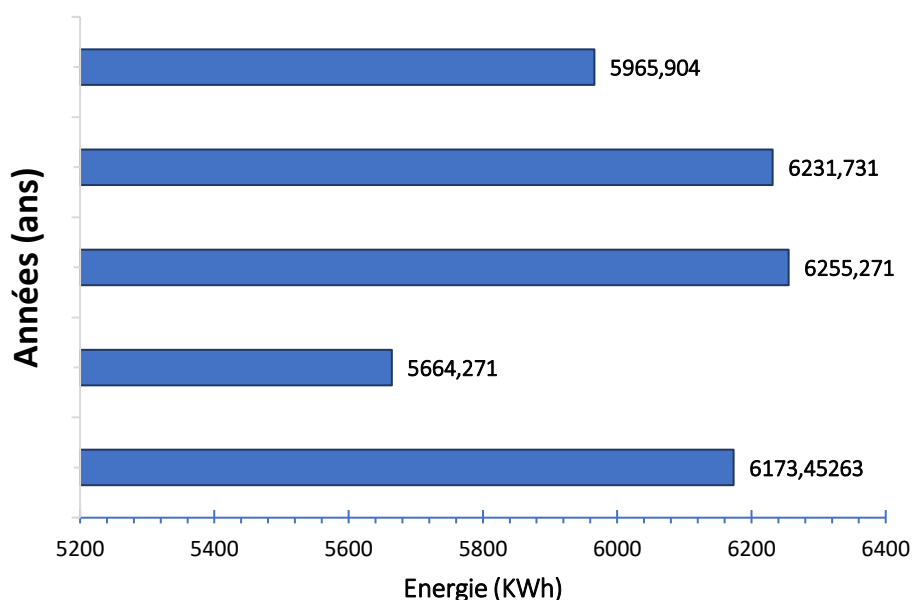
Il est à noter que la CTM est une unité de production de l'énergie. Elle produit 10 MW (Eneo, 2018) de production d'énergie lors de son implantation. Cette production de l'énergie montre la mise en fonctionnement des différents moteurs de la centrale. L'énergie est produite dans cette unité journalièrement dans l'intervalle 17h à 22h ou encore au plus tard à 23h où nous observons une production très maximale.

Nous constatons que les mois les plus importantes en termes de production forte pour ces cinq années sont Janvier, Février, Mars, Novembre et Décembre. Nous observons une production très importante :

- De Septembre à fin Mars nous constatons une élévation très considérable de la production énergétique jusqu'à atteindre des maximums suivants pour chaque année : 742,71 KWh en janvier 2016 ; 811,44 KWh pour décembre 2017 ; 840,12 KWh en Décembre 2018 ; 788,14 KWh en Janvier 2019 et en fin une hausse très considérable pour une valeur de 930,14 KWh en Décembre 2020. Nous pouvons dire avec conviction que cette hausse est la cause essentielle de la baisse du débit d'eau dans le fleuve Songloulou occupant le barrage qui en elle a une capacité de production de 384 MW avec une cote de retenue de 528.
- De fin Mars à fin Août nous constatons une grande baisse de production énergétique considérable. En 2016 nous avons constaté une baisse exponentielle jusqu'à 206,84 KWh de production en Août 2016 ; en 2017 une baisse de 218,10 KWh au mois de Juillet ; en 2018 une baisse jusqu'à 112,84 KWh au mois de juillet ; en 2019 une baisse de 257,201 KWh au mois d'Août et en fin l'année 2020 nous enregistrons une baisse jusqu'à 108,402

KWh en mois d’Août. Nous pouvons justifier cette baisse par le fait que le débit d’eau dans le fleuve Songloulou ou abrite le barrage de songloulou a considérablement augmenté pour équilibrer la balance énergétique du Réseau Interconnecté Sud (RIS).

La figure 44 nous présente ici le cumul de la production de l’électricité durant les années 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020 dans la CTM. Dans la CTM, les années 2016 et 2017 ont connues des productions en énergie soit 6173,453 KWh en 2016 et 5664,271 KWh en 2017, tandis qu’en 2018, 2019 et 2020 nous avons enregistré un cumul de production soit 6255,271 KW/h ; 6231,731 KW/h et 5965,904 KW/h. Nous constatons qu’en 2018 la production était maximale par rapport aux autres années et nous remarquons que la production est restée décroissante jusqu’à 2020. Mais la population étant grandissante, nous pouvons déduire que d’autres sources d’approvisionnement d’énergie ont vu le jour en l’occurrence la centrale photovoltaïque de DJOUM dans le SUD-CAMEROUN.



**Figure 44 : Cumul de production de l’électricité durant les années 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020 dans la centrale thermique de Mbalmayo**

### 3.2 Résultats d’analyse d’émission des gaz et polluants

### 3.2.1 Estimations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) dans les sites industriels de la région du Centre-Cameroun

L'estimation des émissions de GES s'est faite sous la base de la méthodologie présentée par le GIEC combinée avec le couplage du modèle GA-Gaussian. Nous avons fait un résumé propre à notre travail. La présentation des résultats de ces émissions tient compte des facteurs d'émission du GIEC (GIEC, 2022).

#### 3.2.1.1 Estimations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) dans la Centrale Thermique d'Oyom-Abang I

Durant les années 2016 à 2020, les émissions des Gaz à effet de serre évaluées dans la CTO sont considérables. Dans les centrales thermiques, le facteur d'émission est exprimé en fonction de l'intensité des polluants produits ou de l'énergie thermique consommée ou encore de la production d'énergie dans la centrale. Le tableau (20) nous donne une récapitulation des facteurs d'émissions des différents gaz à effet de serre utilisés par rapport au type de combustible utilisé dans la centrale thermique d'Oyoma-Abang I, (S. Nazari et al., 2010).

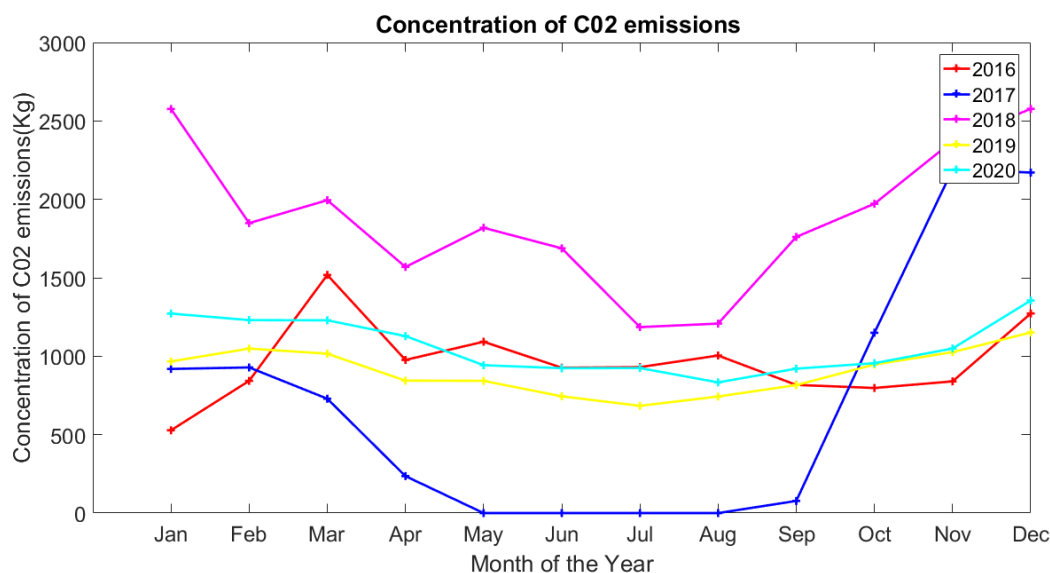
**Tableau 20: Facteurs d'émission moyens de CO<sub>2</sub> ; CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O dans les centrales thermiques au Cameroun (Fontelle, 2010).**

FUEL type	Emission Factor $g.KWh^{-1}$		
	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$
Heavy oil	1025 ± 16	3000	600
Gaz Oil	1083 ± 17	3170	634

##### 3.2.1.1.1 Estimation des émissions de CO<sub>2</sub>

Notons déjà que les émissions du CO<sub>2</sub> sont fonctions de la consommation du HFO et du LFO soit 1.025 fois de cette consommation et aussi de l'énergie produite. En se référant donc à la figure 45 ; nous constatons qu'on atteint des pics de 1,64 t ; 2,2 t ; 2,69 t et 1,8 t de CO<sub>2</sub> émis dans

l'atmosphère respectivement en Mars 2016, Décembre 2017, Décembre 2018, Février 2019 et Décembre 2020. Cela est dû au besoin en énergie croissante et à une baisse du niveau d'eau dans les barrages par conséquent, une baisse de production d'énergie hydroélectrique qui coïncidait avec la période dominante et croissante de la saison sèche. D'autre part entre les mois de Mai et Août, on assiste à une baisse d'émissions du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (jusqu'à 0 t de CO<sub>2</sub> émis en année 2017 entre les mois à Mai et Août). Cette diminution est dû à une augmentation de la quantité d'eau dans les barrages d'où une production forte et optimale d'énergie hydroélectrique. De plus, les émissions totales sur 5 ans de CO<sub>2</sub> en équivalent CO<sub>2</sub> selon les recommandations du GIEC sont évaluées à 17,6940 kt.CO<sub>2</sub>éq soit une moyenne de 0,37713 kt CO<sub>2</sub>éq par an. Si nous intégrons toutes les centrales thermiques en fonctionnement nous allons comprendre les raisons du réchauffement climatique accéléré que nous vivons actuellement (Annexe A, Tableau A3). La figure 45 nous présente en termes de quantité, l'estimation des émissions du CO<sub>2</sub> durant la période 2016-2020.



**Figure 45 : Émissions du CO<sub>2</sub> entre 2016 et 2020.**

L'estimation des émissions du CO<sub>2</sub> sont fonction de la consommation du HFO ou du LFO soit 1,025 fois de la production en électricité (Seutche et al., 2015 ; Beny et al., 2018). Nous constatons que :

- En 2016 l'estimation des émissions est maximale au mois de mars soit 1642,00 kg et minimale au mois de janvier soit 527,80 kg ;

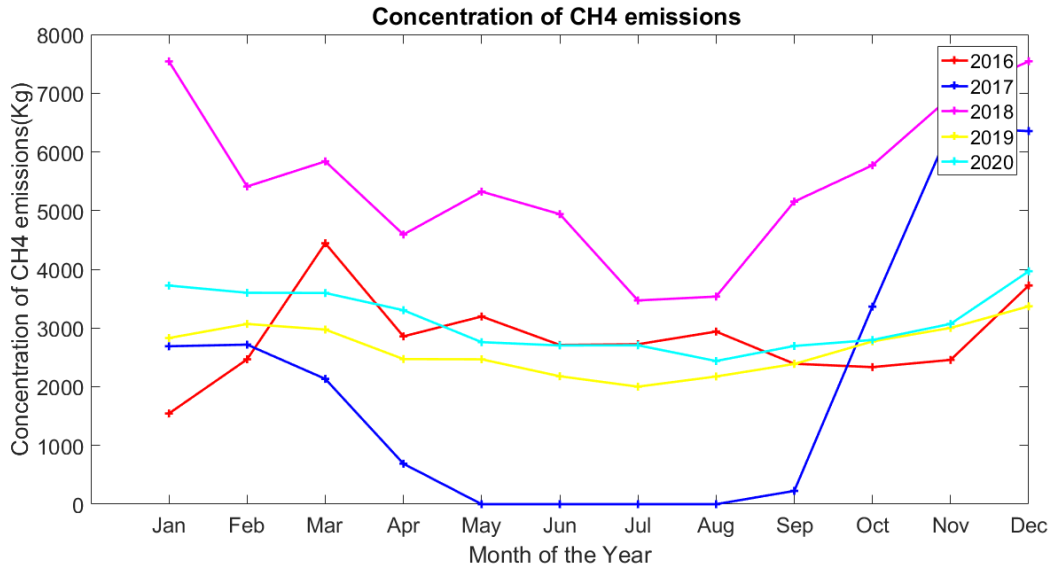
- En 2017 l'estimation des émissions est maximale au mois de décembre soit 2200,49 kg et 0 Kg à partir du mois de mai jusqu'en août ;
- En 2018 l'estimation des émissions est maximale au mois de décembre soit 2694,90 kg et minimale au mois de juillet soit 1186,00 kg ;
- En 2019 et 2020 les estimations des émissions ont évolué très peu comparées aux autres années jusqu'à atteindre une valeur 1199,23 kg en 2019 et 1800,42 kg en 2020.

Cette variation des émissions est simplement due à une consommation élevée du combustible (HFO et LFO).

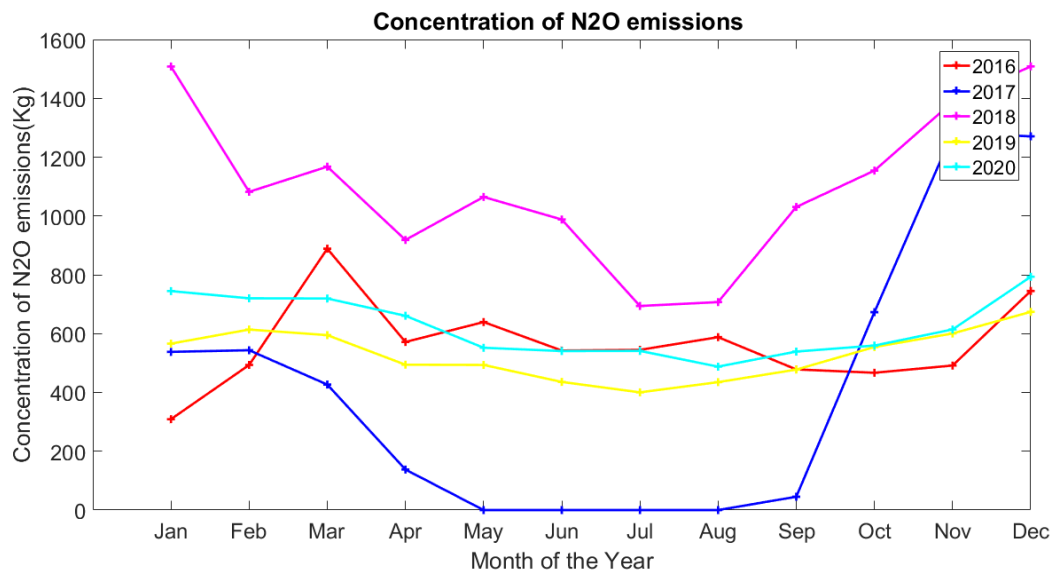
Nous pouvons à cet effet conclure que la centrale thermique d'Oyom-Abang rejette pendant les Cinq ans en moyenne 8527,23 kg d'émission du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Soit 1705,45 kg par an ; 142,12 kg par mois et 4,74 kg d'émission moyenne du CO<sub>2</sub>. Quoi qu'on fasse et vu la quantité d'émission, nous pouvons dire que la centrale thermique de Oyom-Abang est une unité de contribution pour la destruction de l'environnement.

### 3.2.1.1.2 Estimation des émissions de N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>

L'estimation des émissions du méthane et de protoxyde d'azote est proportionnelle à l'énergie produite, comme dans l'estimation du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère. Nous constatons que les variations sont aussi nettement liées à la consommation du HFO et du LFO. De plus les mesures faites (figure 46 et 47) nous montrent une variation similaire à celle du CO<sub>2</sub> selon les années, preuve d'une inter corrélation entre les GES émis. On obtient pour les cinq années, des émissions variant de 0 kg (2017) à 7543,02 kg (2018) de CH<sub>4</sub> et 0 kg (2017) à 1508,60 kg (2018) de N<sub>2</sub>O émis dans l'atmosphère. De plus pour les cinq ans des émissions de GES équivalents CO<sub>2</sub> estimés à 0,0271470 Kt CO<sub>2</sub>eq et 0,0886575 kt CO<sub>2</sub>eq respectivement de CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O et des valeurs respectives de 0,000045679 Kt CO<sub>2</sub>eq 0,00010889 Kt CO<sub>2</sub>eq par an vu les recommandations de la GIEC (voir annexe 1 du tableau 3). Les figures 46 et 47 nous présentent en termes de quantité d'estimation des émissions du CH<sub>4</sub> et du N<sub>2</sub>O durant les années 2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020.



**Figure 46 : Émissions du CH<sub>4</sub> entre 2016 et 2020.**



**Figure 47 : Émissions du N<sub>2</sub>O entre 2016 et 2020.**

De ce qui précède, la combustion du HFO et du LFO dans les différents moteurs de la CTO implique un rejet considéré des GES (Figure 46) et (Figure 47). Le niveau d'émission de ces GES sur les moteurs varie en fonction de la quantité du combustible brûlé dans les moteurs, par conséquent de la durée de fonctionnement des moteurs lors de la combustion. Nous pouvons donc noter que :

- En 2016 l'estimation des émissions du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales au mois de Mars soit respectivement 4443,63 kg et 888,72 kg et minimale au mois de janvier soit respectivement 1544,64 kg et 308,92 kg.
- En 2017 l'estimation des émissions du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales au mois de décembre soit respectivement 6354,33 kg et 888,72 kg à partir du mois de mai jusqu'en août.
- En 2018 l'estimation des émissions du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales au mois de décembre soit respectivement 7543,02 kg et 1508,60 kg et minimale au mois de juillet soit respectivement 3469,89 kg et 693,97 kg.
- Pour les années 2019 et 2020, les estimations des émissions ont évoluées très peu comparées aux autres années jusqu'à atteindre une valeur 3369,723 kg en en Décembre 2019 et 3966,399 kg en Décembre 2020 pour les émissions du CH<sub>4</sub>. Quant aux émissions du N<sub>2</sub>O nous atteignons les valeurs maximales de 673,944 kg pour Décembre 2019 et 793,279 kg en Décembre 2020. Nous avons aussi observé les émissions minimales : pour les CH<sub>4</sub>, 2001,333 kg en Août 2019 et 2438,529 kg en 2020 ; et pour les émissions du N<sub>2</sub>O, nous avons 400,266 kg en Juillet 2019 et 487,70 kg en Août 2020.

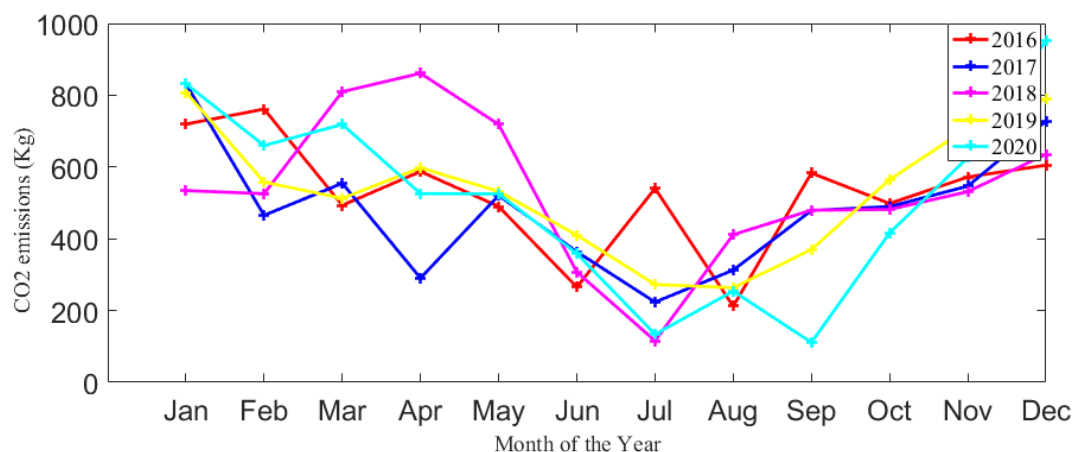
Cette interprétation provoque une analyse de position en admettant que les concentrations du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales en Décembre 2018 et minimale en Août 2017.

### **3.2.1.2 Estimations des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) dans la Centrale Thermique de Mbalmayo (CTM)**

#### **3.2.1.1.1 Estimation des émissions de CO<sub>2</sub>**

Notons déjà que les émissions du CO<sub>2</sub> sont fonctions de la consommation, soit 1,025 fois la consommation. En se référant donc à la figure 48, nous constatons qu'on atteint un pic de 0,9534 t de CO<sub>2</sub>eq émis dans l'atmosphère au mois de Décembre 2020. Cela nous permet d'obtenir certains mois défavorables tels que Mai, Juin, Juillet et Août. Pour ces cinq années, on assiste à une baisse d'émission du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (jusqu'à 0.3kt de CO<sub>2</sub>eq). Cela est dû à une augmentation de la quantité d'eaux dans les barrages d'où une production forte d'énergie hydroélectrique. De

plus, les émissions totales sur cinq ans de CO<sub>2</sub> en équivalent CO<sub>2</sub> selon les recommandations du GIEC sont évaluées à 17,6940 kt.CO<sub>2</sub>eq soit une moyenne de 0,37713 kt.CO<sub>2</sub>eq par an. Si nous intégrons toutes les centrales thermiques en fonctionnement nous allons comprendre les raisons du réchauffement climatique accéléré que nous vivons actuellement (Annexe A, Tableau A3).



**Figure 48 : Émissions du CO<sub>2</sub> entre 2016 et 2020.**

Les émissions du CO<sub>2</sub> sont fonctions de la consommation du HFO ou du LFO soit 1.025 fois de la production en électricité (Seutche et al., 2015 ; Beny et al., 2018 ;). Nous constatons que :

- En 2016 l'estimation des émissions est maximale au mois de Janvier soit 719,52 kg et minimale au mois d'Août soit 223.52 kg ;
- En 2017 l'estimation des émissions est maximale au mois de Janvier soit 831,73 kg et minimale au mois de Juillet soit 223.55 kg ;
- En 2018 l'estimation des émissions est maximale au mois de Avril soit 861,12 kg et minimale au mois de Juillet soit 115.66 kg ;
- En 2019 l'estimation des émissions est maximale au mois de Janvier soit 807,84 kg et minimale au mois de Juillet soit 263,63 kg ;
- 2020 l'estimation des émissions a évolué très considérablement comparées aux autres années jusqu'à atteindre une valeur 953,40 kg en Décembre comme valeur maximale et 133.98 kg en Juin comme valeur minimale.

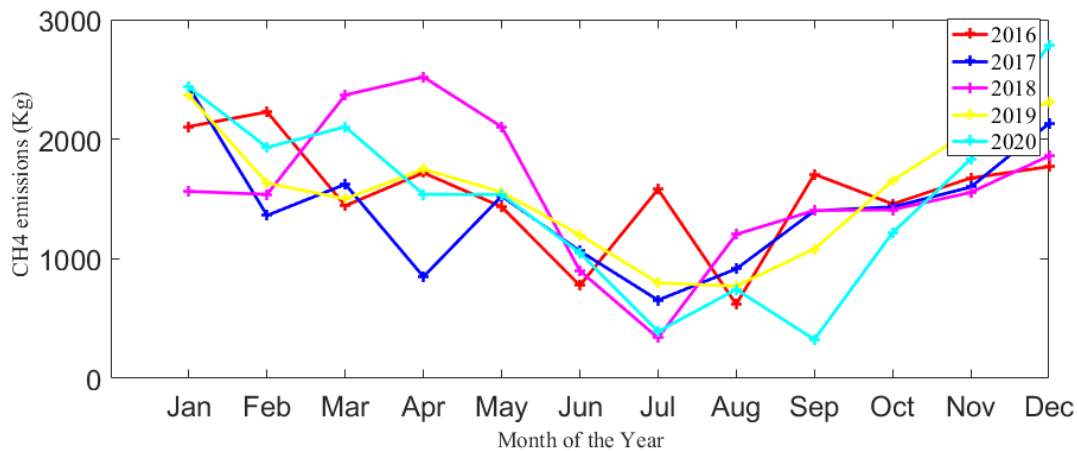
Cette variation des émissions est simplement due à une consommation élevée du combustible (HFO et LFO).

Nous pouvons à cet effet conclure que la centrale thermique de Mbalmayo rejette pendant les Cinq ans en moyenne 3711,54 kg d'émission du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Soit 742,31 kg par ans ; 61,86 kg par mois et 2,06 kg d'émission moyenne du CO<sub>2</sub>. Quoi qu'on fasse et vu la quantité

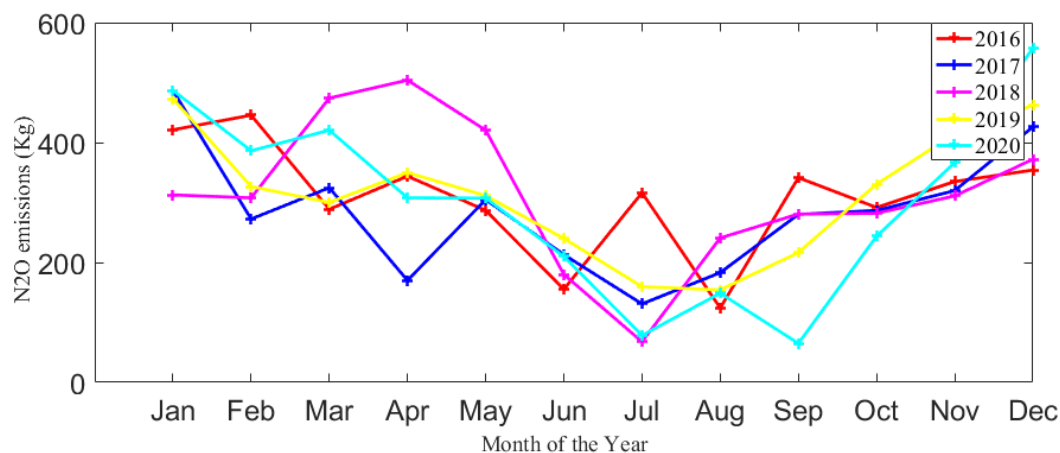
d'émission, nous pouvons dire que la centrale thermique de Mbalmayo est une unité de contribution pour la destruction de l'environnement.

### 3.2.1.1.2 Estimation des émissions de N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>

L'estimation de méthane (CH<sub>4</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est proportionnelle à l'énergie produite et comme dans l'estimation du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère. Nous constatons que les variations sont nettement liées à la consommation du HFO et du LFO. De plus les mesures faites (voir figure 49 et figure 50) nous montrent une variation similaire à celle du CO<sub>2</sub> selon les années, preuve d'une inter corrélation entre les GES émis. On obtient pour les cinq ans des émissions de GES variant de 0.6 à 2,7 kg de CH<sub>4</sub> et 0,2 à 0,5 kg de N<sub>2</sub>O émis dans l'atmosphère. De plus pour les trois ans des émissions de GES équivalents CO<sub>2</sub> sont estimés à 0,0271470 kt.CO<sub>2</sub>eq et 0,0886575 kt.CO<sub>2</sub>eq respectivement de CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O et des valeurs respectives de 0,000045679 kt.CO<sub>2</sub>eq 0,00010889 t CO<sub>2</sub>eq par an vu les recommandations de la GIEC.



**Figure 49 : Émissions du CH<sub>4</sub> entre 2016 et 2020.**



**Figure 50 : Émissions du N<sub>2</sub>O entre 2016 et 2020.**

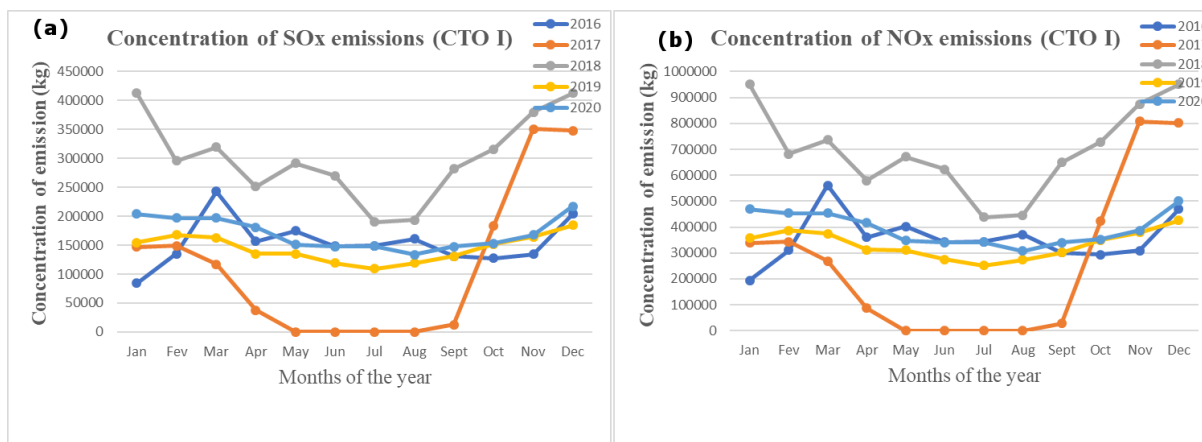
De ce qui précède, la combustion du HFO et du LFO dans les différents moteurs de la CTO implique un rejet considéré des GES (Figure 46) et (Figure 47). Le niveau d'émission de ces GES sur les moteurs varie en fonction de la quantité du combustible brûlé dans les moteurs, par conséquent de la durée de fonctionnement des moteurs lors de la combustion. Nous pouvons donc noter que :

- En 2016 l'estimation des émissions du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales au mois de Janvier soit respectivement 2105,92 kg et 421,18 kg et minimale au mois de janvier soit respectivement 620,54 kg et 124,108 kg.
- En 2017 l'estimation des émissions du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales au mois de décembre soit respectivement 2434.32 kg et 486.864 kg et minimale au mois de Juillet soit respectivement 654.,303 kg et 130,86 kg.
- En 2018 les concentrations du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales au mois de décembre soit respectivement 1860,39 kg et 378,078 kg et minimale au mois de juillet soit respectivement 338,523 kg et 67,705 kg.
- Pour les années 2019 et 2020, les concentrations ont évoluées comparées aux autres années jusqu'à atteindre une valeur 2364,432 kg en en Janvier 2019 et 2790,441 kg en Décembre 2020 pour les émissions du CH<sub>4</sub>. Quant aux émissions du N<sub>2</sub>O nous atteignons les valeurs maximales de 472,886 Kg pour Janvier 2019 et 558,088 kg en Décembre 2020. Nous avons aussi observé les émissions minimales : pour les CH<sub>4</sub>, 771,603 kg en Août 2019 et 325,206 kg en Septembre 2020 ; et pour les émissions du N<sub>2</sub>O, nous avons 159,601 kg en Août 2019 et 487,70 kg en Septembre 2020.

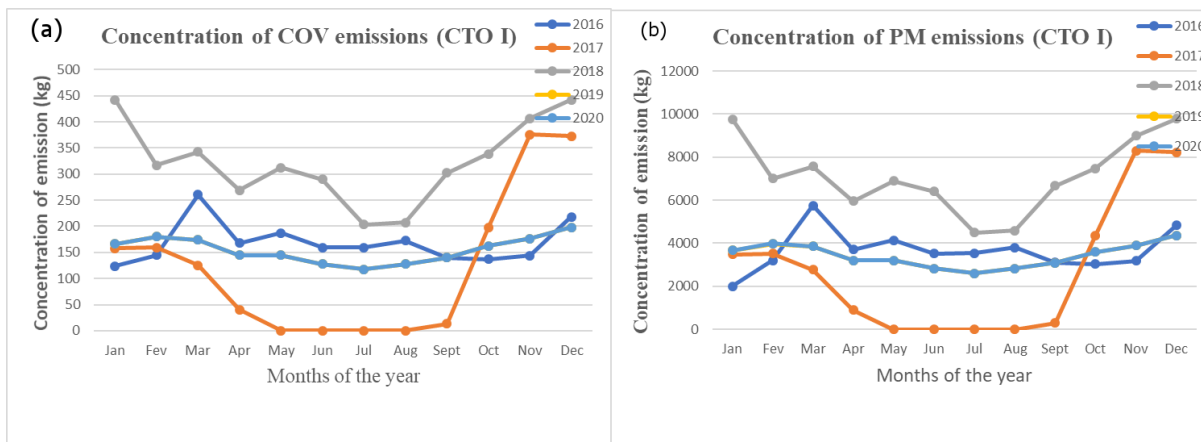
Cette interprétation provoque une analyse de position en admettant que les concentrations du méthane (CH<sub>4</sub>) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) sont maximales en Janvier 2019 et en Décembre 2020 et minimale en Août 2019.

### 3.2.2 Estimations des émissions des Polluants dans les sites industriels de la région du Centre-Cameroun

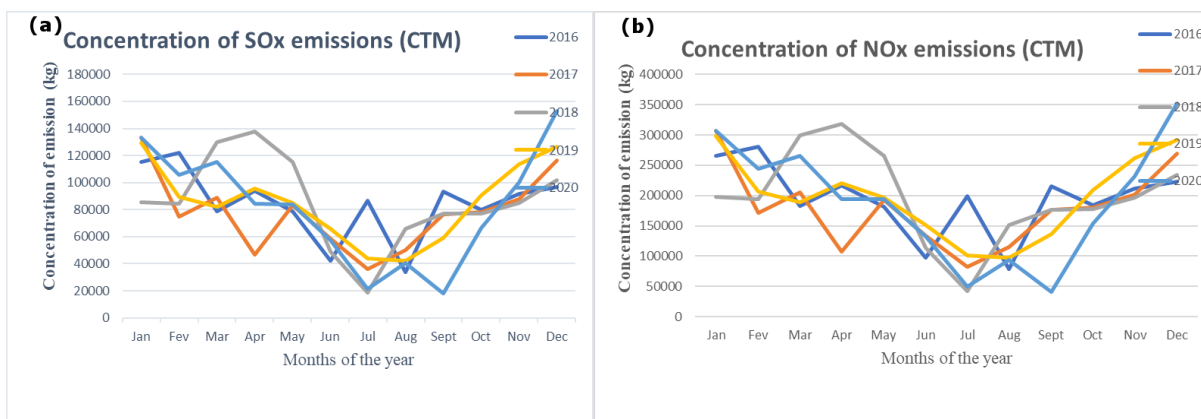
Ces études ont été possibles grâce aux valeurs empiriques relevées aux différentes centrales thermiques. Ainsi, la détermination de la consommation volumétrique de fioul pour chaque moteur s'est faite analytiquement et a permis une quantification des émissions de polluants. Les émissions des polluants se sont présentées sur cinq ans (2016 ; 2017 ; 2018 ; 2019 et 2020) en fonction de chaque centrale (CTO et CTM). Les émissions de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, COV et PM des deux centrales thermiques ont été représentées en fonction des équations mathématiques intégrant des niveaux de consommation volumétrique, des facteurs d'émissions et surtout des indices donnant une précision sur la quantité à évaluer. Les figures 51 ; 52 ; 53 et 54 présentent l'estimation des émissions des différents polluants issus des deux centrales thermiques à fioul dans la région du Centre-Cameroun entre 2016 et 2020.



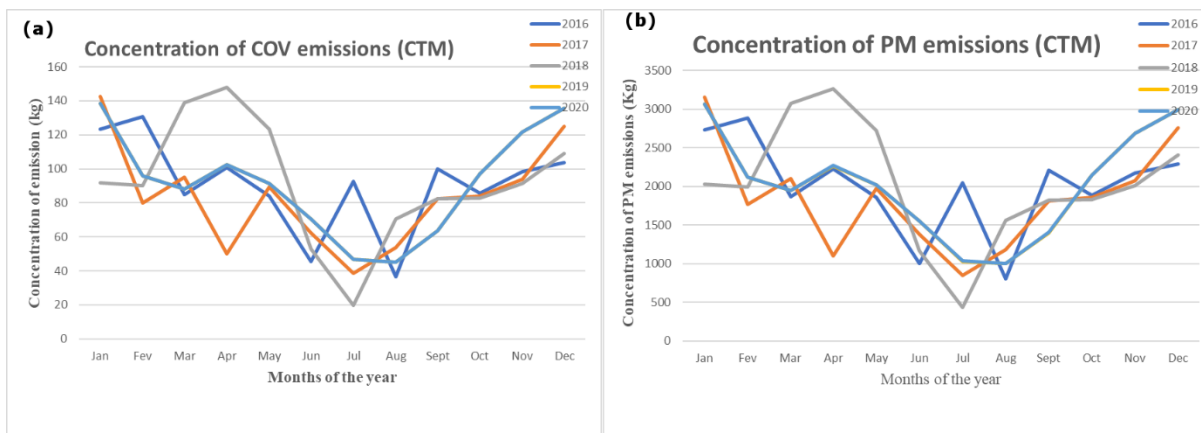
**Figure 51 : Émissions dans la CTO des SO<sub>x</sub> et des NO<sub>x</sub> entre 2016 et 2020 : a) Émissions des SO<sub>x</sub> dans la CTO I ; b) Émissions des NO<sub>x</sub> dans la CTO I**



**Figure 52 : Émissions dans la CTO des COV et des PM entre 2016 et 2020 : a) Émissions des COv dans la CTO I ; b) Émissions des PM dans la CTO I**



**Figure 53 : Émissions dans la CTM des SOx et des NOx entre 2016 et 2020 : a) Émissions des SOx dans la CTM ; b) Émissions des NOx dans la CTM**



**Figure 54 : Émissions dans la CTM des COV et des PM entre 2016 et 2020 : a) Émissions des COV dans la CTM ; b) Émissions des PM dans la CTM**

D'une manière générale, les variations des principaux polluants sont simultanées ; ceci dans le sens de la consommation en HFO et en LFO car la productivité énergétique augmente le taux de polluants atmosphériques. Les polluants les plus répandus dans l'atmosphère sont les NOx et SOx de l'ordre maximal des mille kilogrammes et ceci s'explique par leur concentration dans le fioul. De plus, la centrale ne dispose pas d'une unité de traitement du fioul avant injection dans les moteurs. D'autre part, les valeurs des émissions annuelles pendant cinq ans présentés, nous montrent pour la plupart des polluants des quantités inférieures aux valeurs limites préconisées par le MINEE. En comparant les valeurs du tableau 3 de l'annexe 1 sur les limites des polluants nous constatons que les valeurs émises sont inférieures aux valeurs limites à 0,1 près de même pour celles des SOx ; par contre, nous observons des rapprochements de l'ordre des unités pour ce qui est des valeurs de NOx. Si nous regardons le cas des poussières et des Composés Volatils Organiques, nous remarquerons une infériorité des valeurs émises par rapport aux limites de l'ordre de 0,001. Ces différentes valeurs nous permettent de dire que les rejets des polluants atmosphériques pour ce qui concerne les centrales thermiques de la région du Centre-Cameroun sont au seuil des valeurs limites préconisées par le ministère de l'environnement. On peut se poser un certain nombre de questions si toutes les centrales thermiques du réseau Eneo : la quantité de polluants émis sont respectées ? Sinon quelles sont les mesures à prendre pour réduire ou atténuer complètement ses impacts dans l'environnement ?

### 3.2.3 Récapitulatif des émissions dans la région du centre Cameroun

Les émissions des GES et des polluants dans la région du Centre-Cameroun ne sont pas à négliger. Car les centrales thermiques à fioul étant des pôles d'émissions, contribuent très considérablement à la destruction de l'environnement à l'issue de la production de l'électricité par combustion du fioul lourd ou léger. Lors de cette combustion, les gaz à effet de serre et polluants sont échappés pendant nos cinq années d'étude et continu jusqu'à présent. Il en ressort que durant ces cinq ans une grande quantité d'émissions pour chaque gaz et polluant a été émise et récapitulé dans le tableau 21.

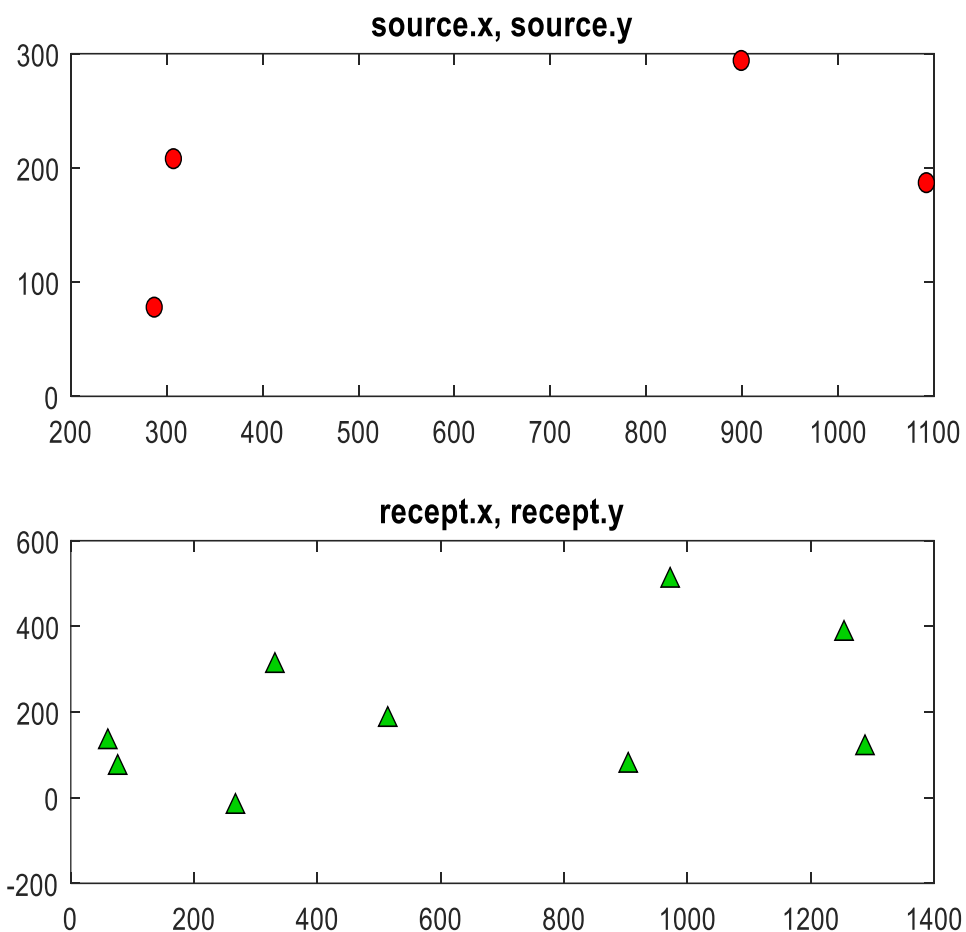
**Tableau 21: Récapitulatif des émissions émises sur cinq ans dans la région du centre-Cameroun**

	<b>CTO</b>	<b>CTM</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Moy/Jr</b>
<b>Émissions des GES en Kilogramme (kg)</b>				
<b>CO<sub>2</sub></b>	8527,228184	3711,5414	4449,3847	2,4380
<b>CH<sub>4</sub></b>	24957,7410	10863,0480	17910,3945	9,8139
<b>N<sub>2</sub>O</b>	3105,3081	2243,7001	1069,8016	0,5862
<b>Émissions des polluants en Kilogramme (kg)</b>				
<b>SO<sub>x</sub></b>	1366020,3600	594570,8270	1960591,1870	108,9177
<b>NO<sub>x</sub></b>	3148003,0600	1370192,4500	4518195,5100	2510,1086
<b>PM</b>	1429,18248	609,1786	2038,3611	1,1324
<b>COV</b>	31558,3695	13452,4284	45010,7979	25,0059

### 3.3 Identification des sources polluantes

#### 3.3.1 Identification de la source polluante dans le domaine bidimensionnel

L'identification de l'emplacement des sources ponctuelles de la pollution atmosphérique est détectée à partir de différents capteurs. Pour identifier la source d'émission, le nombre de capteurs et leurs positionnements sont réglés pour les mêmes types de résultat, à partir de leurs coordonnées comme l'a dit (Victor, 2014 ; Chaiwino et al., 2021). Le positionnement des capteurs s'identifie à partir de la zone où l'estimation de la concentration est minimale ou quasi nulle (Chaiwino et al., 2021), afin de bien observer la propagation des particules issues de la source dans la zone impactée (figure 55).



**Figure 55 : Disposition des capteurs et position des sources de pollution dans les sites industriels**

Les particules identifiées sont : les GES tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et les polluants identifiés tels que  $\text{SO}_x$ , les  $\text{No}_x$ , les particules métras ( $\text{PM}_{1,2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$ ), les HAP et les COV. Les trois capteurs choisis pour la visualisation des polluants sont tels que : le capteur du milieu est le principal, suivi de celui de gauche et de celui du bas qui pourront efficacement identifier le polluant à partir de la première iso concentration visible ou la concentration identifiée serait de l'ordre  $10^{-3} \text{kg.m}^{-3}$ .

Les résultats de l'emplacement des capteurs pour l'identification de la source ponctuelle dans une centrale thermique sont présentés dans les figures 56 ; 57 et 58.

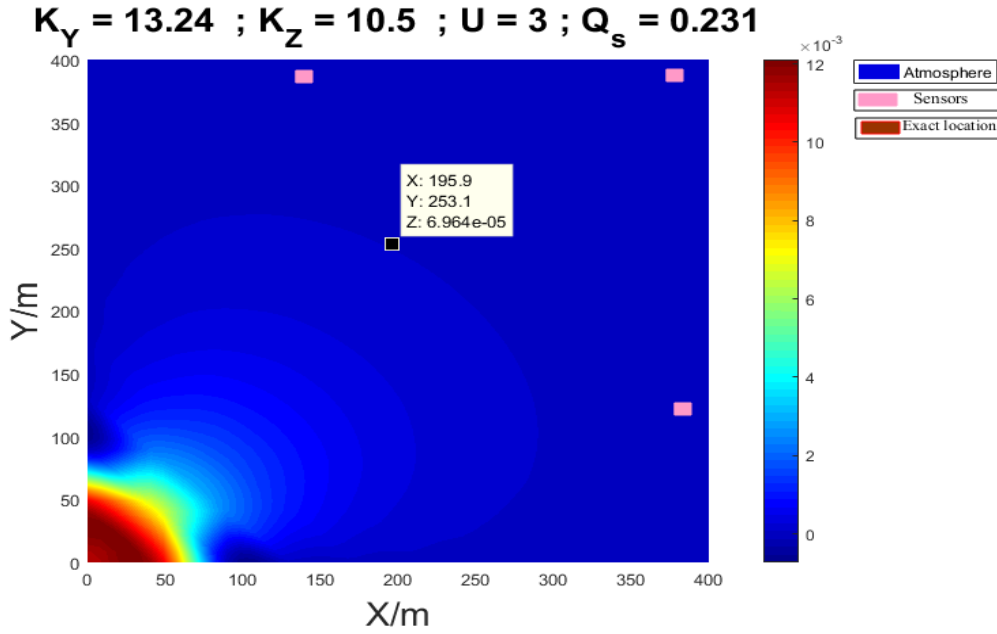


Figure 56 : Le résultat de la détermination de l'emplacement de la source ponctuelle de pollution atmosphérique à une distance de 400m de dispersion du polluant ou de gaz.

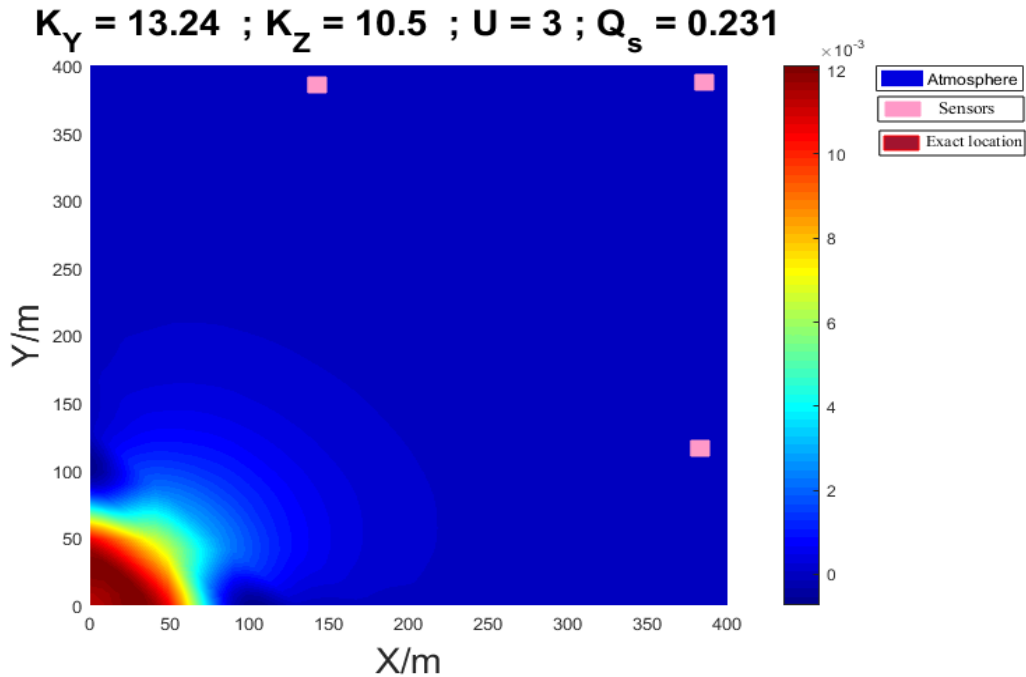
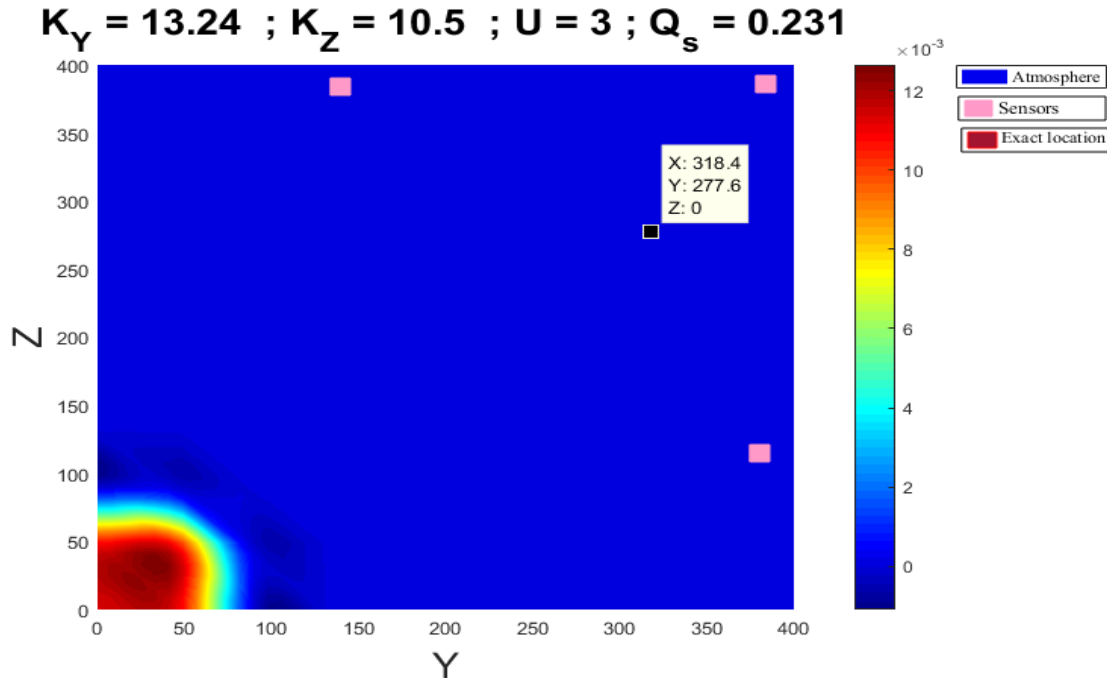


Figure 57 : Le résultat de la détermination de l'emplacement de la source ponctuelle de pollution atmosphérique à une distance de 380 m de dispersion du polluant ou du gaz.



**Figure 58 : Le résultat de la détermination de l'emplacement de la source ponctuelle de pollution atmosphérique à un instant où le polluant est issu de la source.**

Le positionnement des trois capteurs est pris en compte en fonction de la distance de dispersion du polluant ou du gaz. Nous pouvons donc identifier notre source en maintenant nos capteurs à la même position afin d'observer progressivement le polluant de l'atmosphère vers la source où il est issu.

Pour la figure 56, les meilleurs emplacements prédits des capteurs sont donnés pour mieux observer les gaz et polluants afin d'identifier la source. L'emplacement du capteur principal prédit est (398,8;398,8) avec une concentration de  $5,813.10^{-12} kg.m^{-3}$  qui est estimée très faible. Pour le second capteur le meilleur emplacement prédit pour mieux observer la source est (138,8;398,8) avec une concentration quasi négligeable de  $2,203.10^{-12} kg.m^{-3}$  et pour le troisième capteur le meilleur emplacement pour une meilleure identification est (391,8;106,1) avec une concentration quasi négligeable de valeur  $3,242.10^{-12} kg.m^{-3}$ .

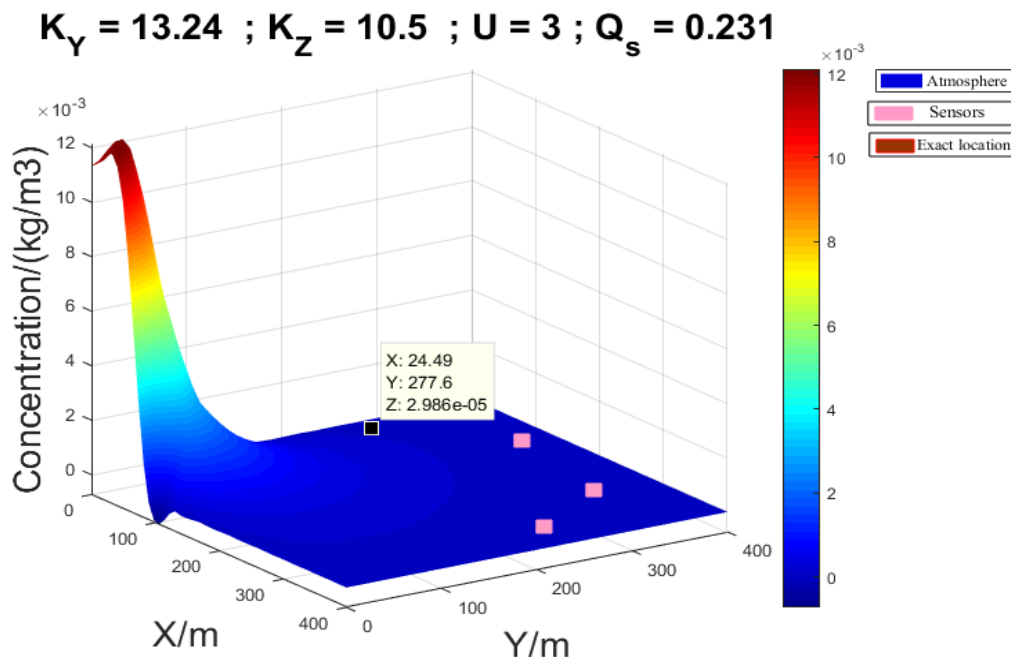
Pour les figures 57 et 58, les emplacements les mieux prédits sont les mêmes car en ces points nous observons une concentration nulle en chacun de ces points. Les capteurs identifient le rapprochement systématique progressivement vers la source car les premières iso concentrations

se situent au niveau des points (250;250) et (150;150). Pour la figure 57 la concentration est toujours de l'ordre de  $10^{-5} \text{ kg.m}^{-3}$  tandis que la figure 58 nous montre une source complètement identifiée.

Ces différents résultats présentent une atmosphère en 2D dont la dispersion du polluant est effective, comme (Kadriet al., 2013 ; Chaiwino et al., 2021), la source sera identifiée à partir des points où la concentration sera maximale. Le rapprochement de la source s'observe linéairement à partir des iso concentrations minimales ou nuls à des iso concentrations maximales. Nous pouvons donc dire à partir des points de concentration maximale qui se rapprochent de la source que, la source est identifiée progressivement et prête à être caractérisée.

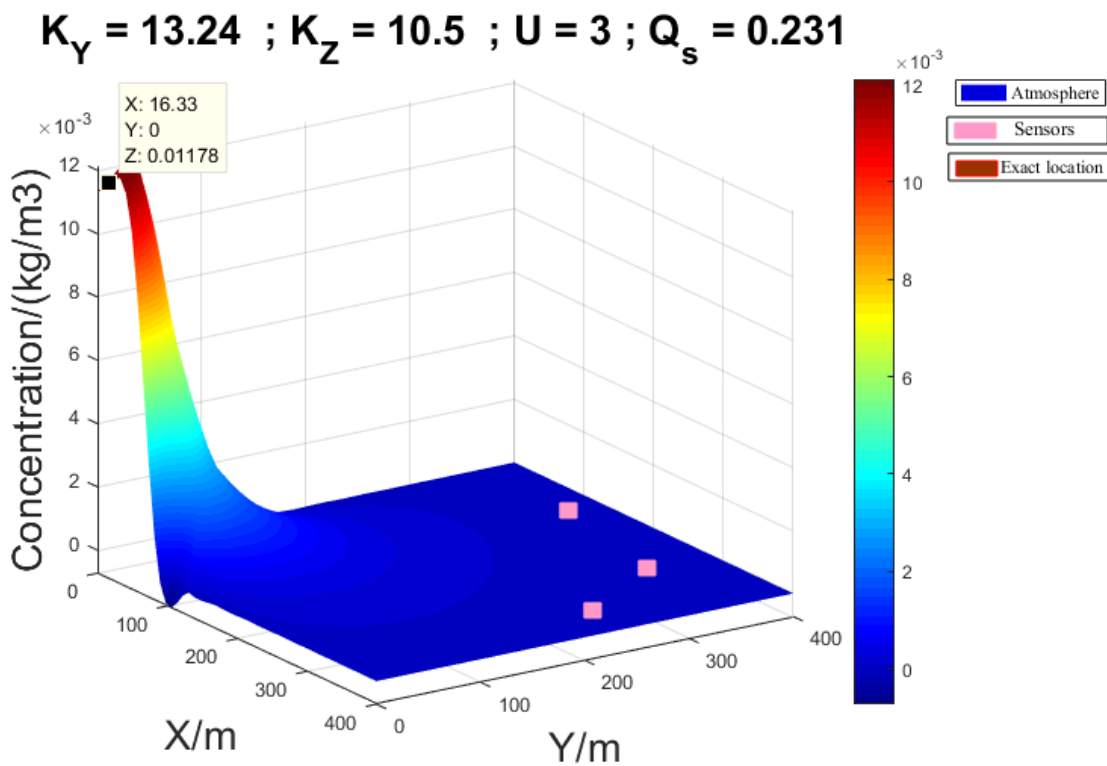
### 3.3.2 Identification de la source polluante dans le domaine tridimensionnel

Selon les figures 59 à 60, le couplage GA-Gaussian produit et affiche aussi les meilleurs résultats de l'emplacement prévu pour identifier la source de pollution en 3 dimensions (3D). Nous pouvons faire des observations à travers ces six figures.



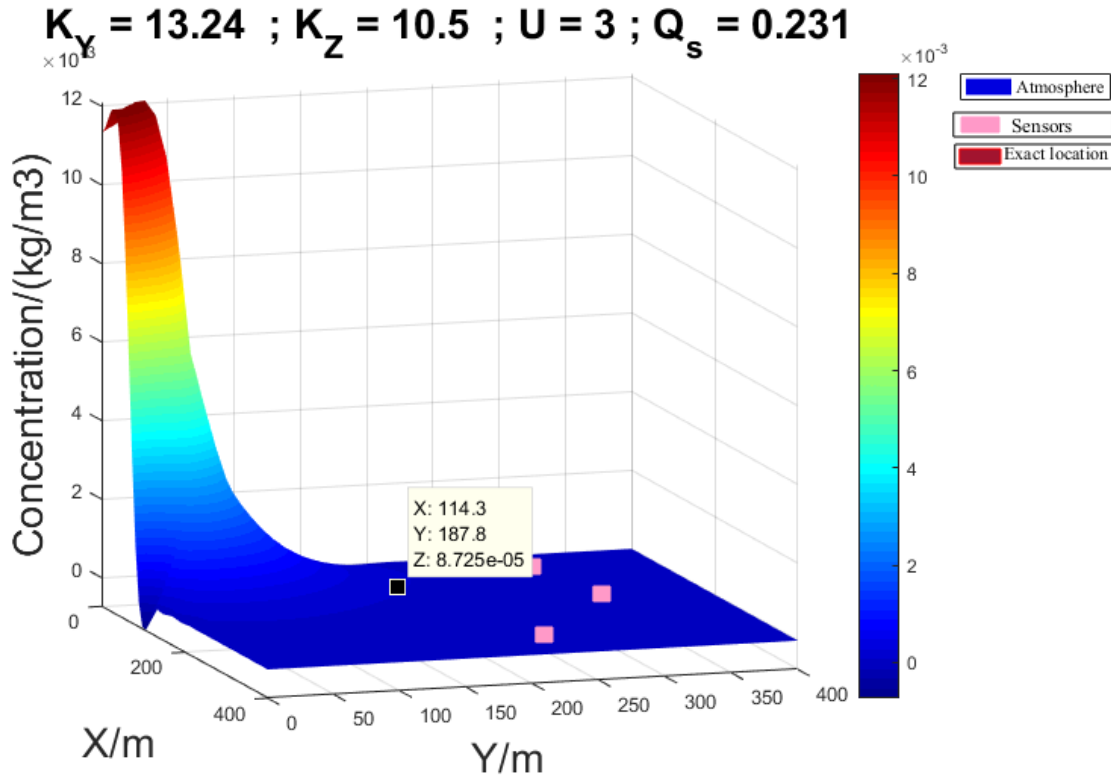
**Figure 59 : Identification de la source polluante Tridimensionnelle à une distance de 350 m de la source.**

La figure 59 nous présente toujours une identification du polluant qui s'est dispersé à 350 m sur les axes. Elle nous présente la disposition de trois capteurs à des positions donc nous avons une concentration quasi nulle. Nous constatons que les capteurs commencent à identifier la première iso-concentration qui nous donne une concentration estimable et considérable pour une valeur de  $2,88.10^{-5} \text{ kg.m}^{-3}$  et nous permet d'observer un rapprochement progressif vers la source à partir des autres iso-concentrations. De plus, de ce panache gaussien à partir de la première iso, la source vue est identifiable, puisque le capteur nous montre le sens de progression du polluant issu de la source.



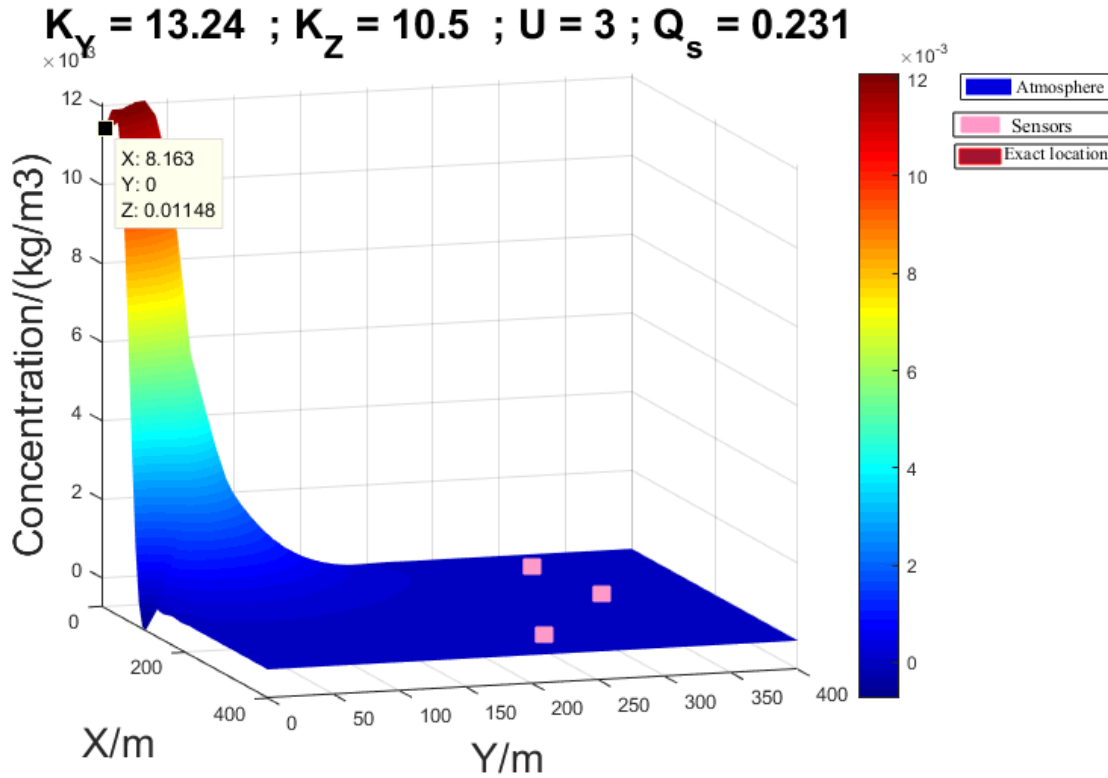
**Figure 60 : Localisation de la source polluante à 350 m des capteurs.**

La figure 60 nous présente toujours une identification du polluant qui s'est dispersé à 350 m sur les axes. Elle nous montre directement la valeur de la concentration à la source. Nous trouvons une valeur très maximale de la concentration  $0,01178 \text{ kg.m}^{-3}$  qui est considérée comme la plus grande valeur de la concentration issue de la source et identifiée par les capteurs.



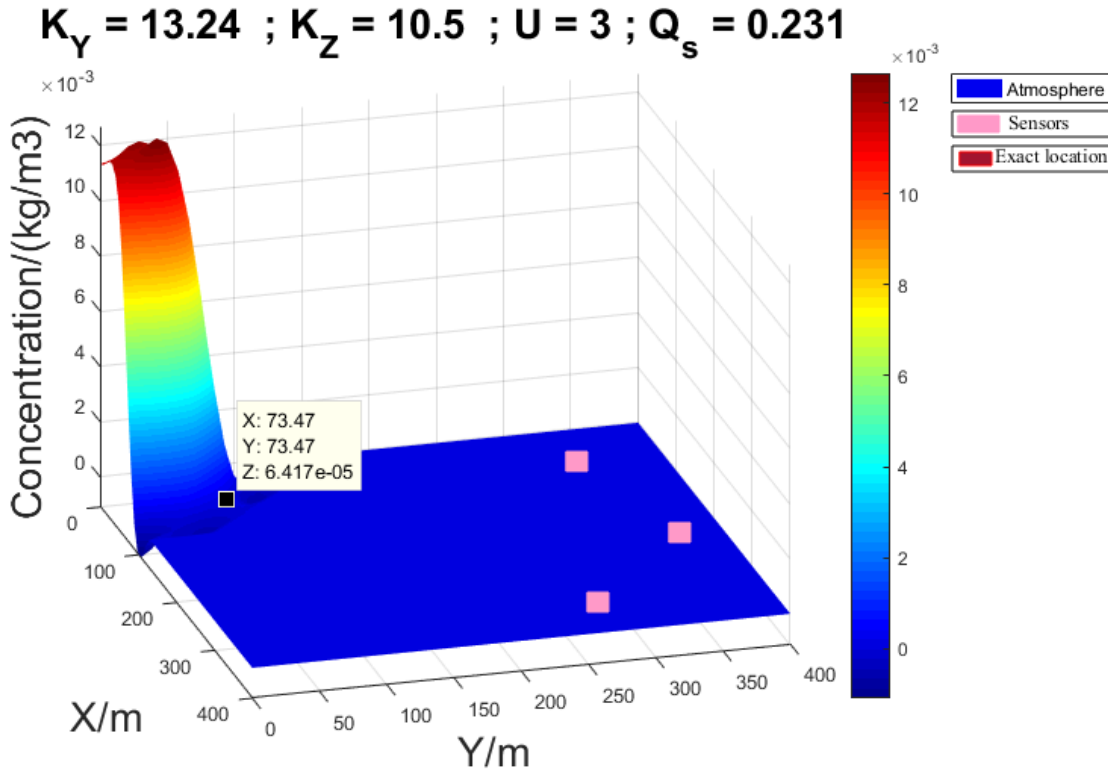
**Figure 61 : Identification de la source polluante Tridimensionnelle pour une dispersion de 200 m de la source.**

La figure 61 nous présente une identification pour une dispersion de 200 m du polluant dans l'atmosphère. Nous constatons que la première iso-concentration est identifiée à partir d'une concentration qui a une valeur de  $8,725 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Et cette concentration nous permet d'observer un rapprochement progressif vers la source à partir des autres iso-concentrations. De plus, de ce panache gaussien à partir de la première iso, la source vue est identifiable, puisque le capteur nous montre le sens de progression du polluant issu de la source.



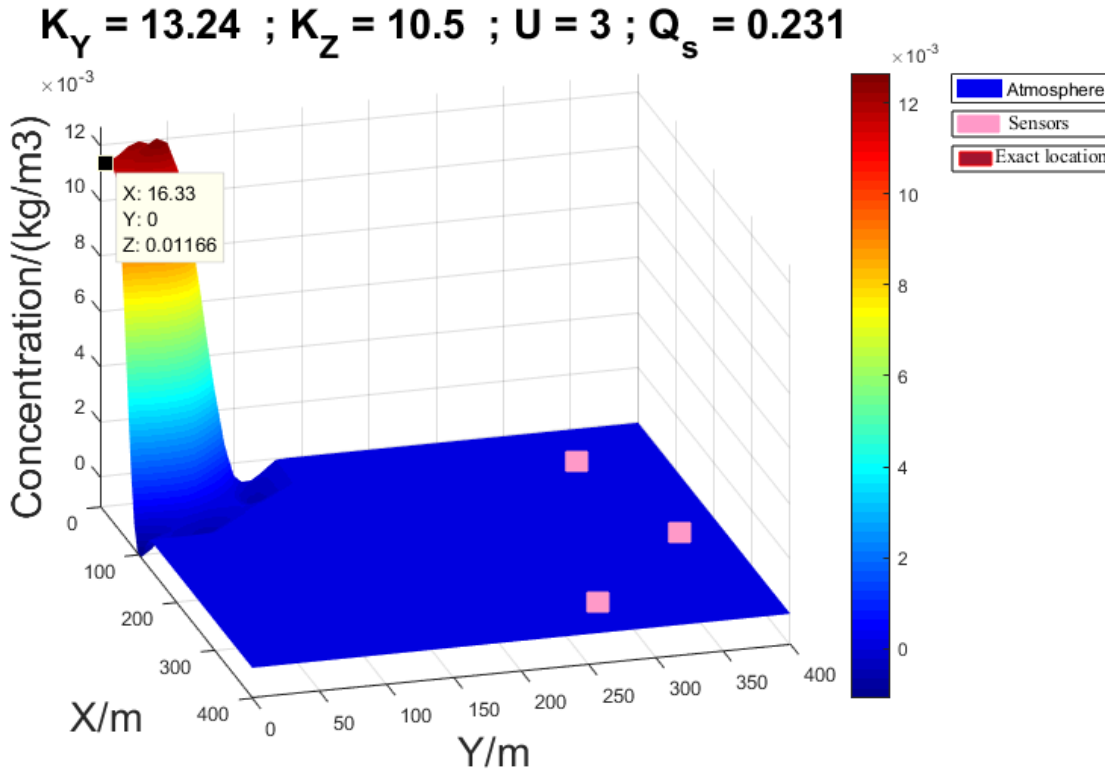
**Figure 62 : Localisation de la source polluante à pour une dispersion de 200 m de la source**

La figure 62 nous présente toujours une identification du polluant qui s'est dispersé à 200 m sur les axes. Elle nous montre directement la valeur de la concentration à la source. Nous trouvons une valeur très maximale de la concentration qui est  $0,01148 \text{ kg.m}^{-3}$  et qui est considérée comme la plus grande valeur de la concentration issue de la source et identifiée par les capteurs.



**Figure 63 : Identification de la source polluante dans le domaine Tridimensionnelle du polluant à la sortie directe de la source**

La figure 63 nous présente les polluants qui sortent directement de la source. La première iso-concentration est repérée ou identifiée par des capteurs pour une valeur de  $6,417 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . De cette valeur nous pouvons observer une bouffée de polluants accumulés vers la source, donc nous pouvons dire avec exactitude que la source à identifier est proche.



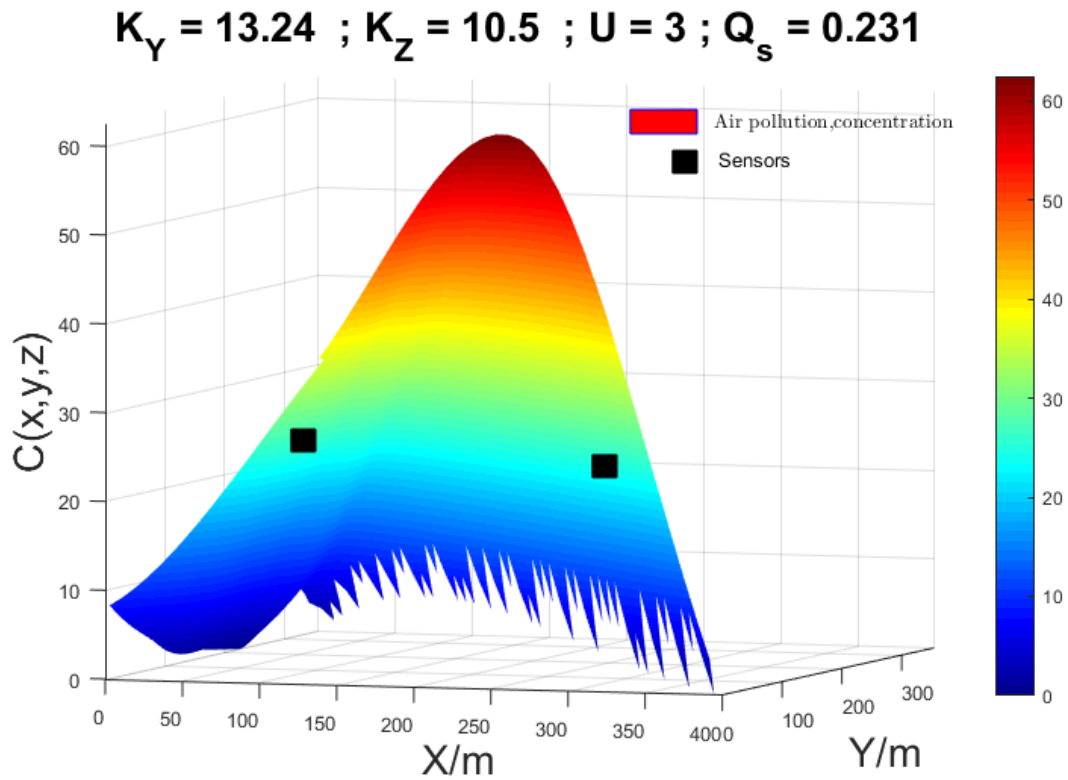
**Figure 64 : Localisation de la source polluante a pour une dispersion de 0 m de la source**

La figure 64 nous présente une identification du polluant directement à la source. Elle nous montre directement la valeur de la concentration à la source. Nous trouvons une valeur très maximale de la concentration  $0,01166kg.m^{-3}$  qui est considérée comme la plus grande valeur de la concentration issue de la source et identifiée par les capteurs.

### 3.3.3 Sources identifiées

Les résultats suivants permettent donc d'avoir un emplacement exact des sources de pollution identifiées. À partir du schéma numérique de l'équation (39), les figures 65 et 66 illustrent comment l'algorithme identifie localement la source de pollution pour les deux cas d'identification en 3D ci-dessus. Nous avons ainsi considéré trois cas pour différents nombres de pas de temps. D'après les résultats de l'expérience, la méthode gaussienne est également capable d'identifier l'emplacement de la source ponctuelle en se basant sur une solution approximative d'un système

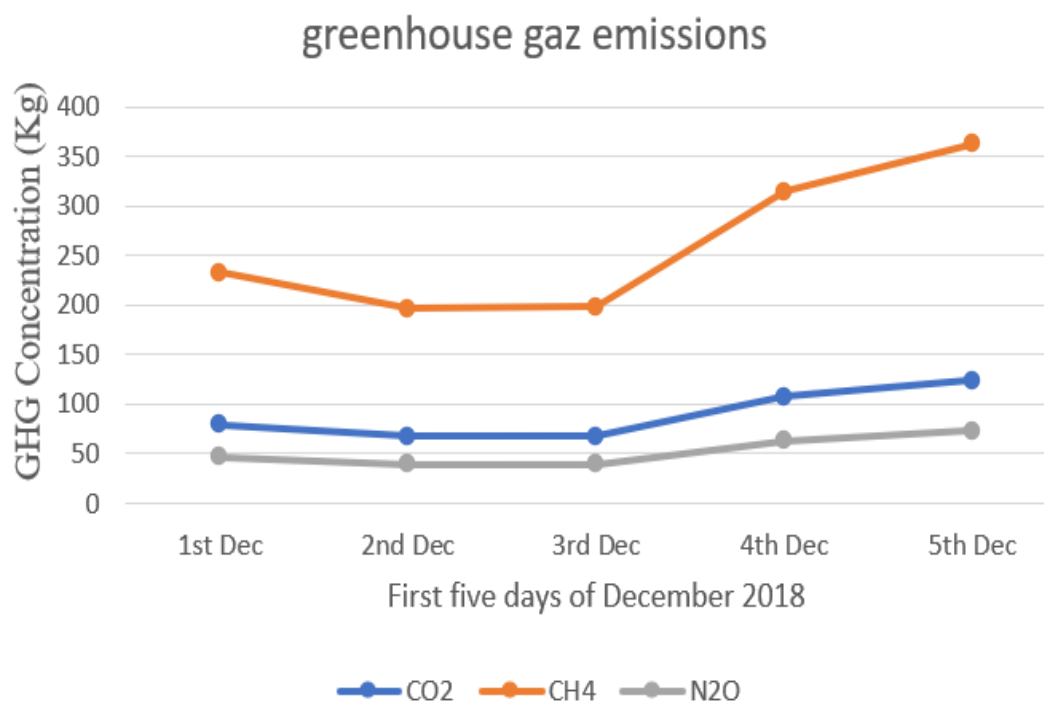
d'EDP. Ses sources identifiées sont belles et bien en accord avec les travaux de Wipawinee et al. (2021).



**Figure 65 : Source de pollution atmosphérique identifiée prise par des capteurs à une distance de 400 m.**

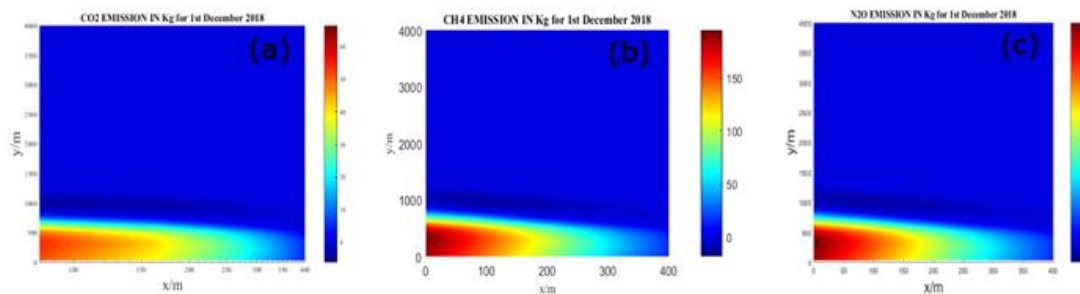


Dans notre contexte actuel, pour la détermination des erreurs d'estimation des GES dans la CTO I, nous avons utilisé deux méthodes : La méthode empirique d'estimation des GES du deuxième niveau pour donner en termes de concentration la quantité de GES à la centrale pour des journées 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> de Décembre 2018. La deuxième méthode utilisée est le modèle de couplage GA-Gaussian, qui consiste à partir du logiciel MATLAB version 2016b de faire une simulation par modélisation inverse des concentrations théoriques de calculée et de relever les valeurs. Il serait donc important de faire un cadrage de restriction en évaluant pour les cinq premiers jours du mois le plus important de l'année 2018 en termes d'émissions des gaz à effet de serre générés (figure 67).

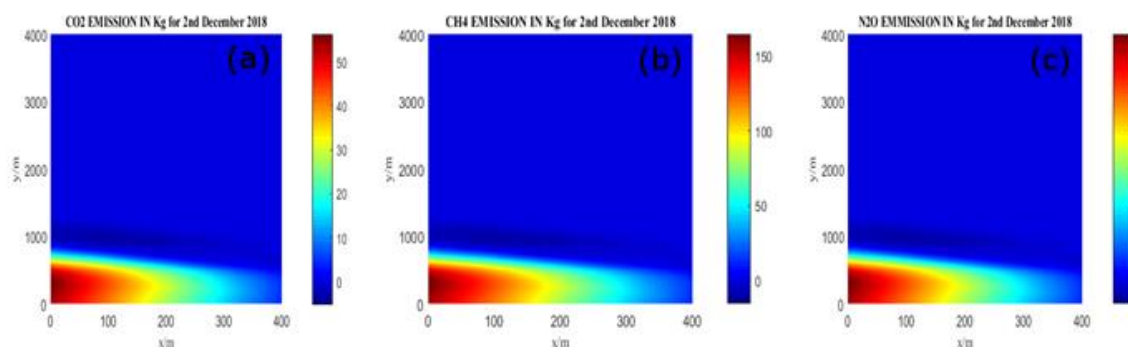


**Figure 67 : Émissions en Kg des GES pendant les cinq premiers jours du mois de Décembre 2018**

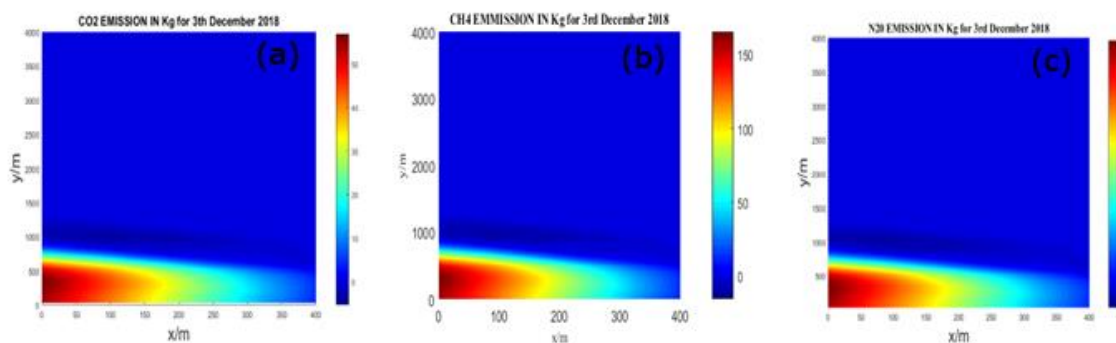
Les simulations de la dispersion des GES dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I ont été menées pour comparer les résultats de la simulation avec les données de mesure disponibles sur les retombées quotidiennes des GES. Les Émissions simulées pour les 5 premières journées du mois de Décembre 2018 sont présentées à partir des figures 68 ; 69 ; 70 ; 71 et 72 suivantes : 3,28 ; 3,29 ; 3,30 ; 3,31 et 3,32.



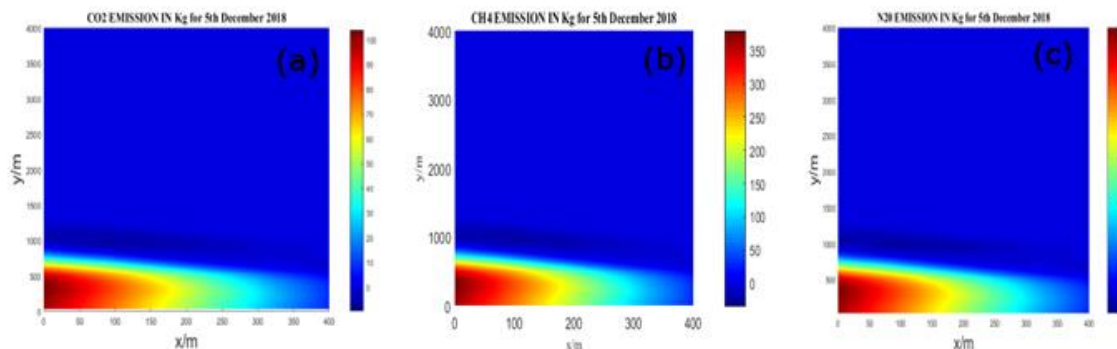
**Figure 68 : Simulation du transport des émissions des GES de la journée du 1<sup>er</sup> Décembre 2018 issue de la CTO I : a) simulation du CO<sub>2</sub>, b) simulation du CH<sub>4</sub>, c) simulation du N<sub>2</sub>O**



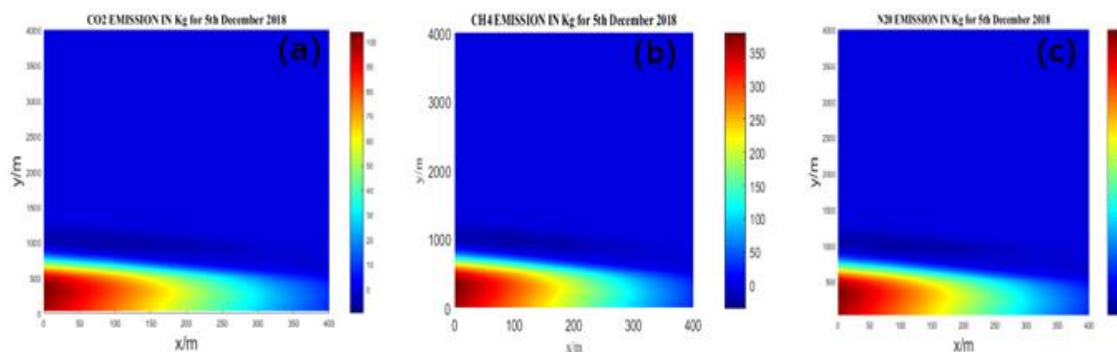
**Figure 69 : Simulation du transport des émissions des GES de la journée du 2 Décembre 2018 issue de la CTO I : a) simulation du CO<sub>2</sub>, b) simulation du CH<sub>4</sub>, c) simulation du N<sub>2</sub>O**



**Figure 70 : Simulation du transport des émissions des GES de la journée du 3 Décembre 2018 issue de la CTO I : a) simulation du CO<sub>2</sub>, b) simulation du CH<sub>4</sub>, c) simulation du N<sub>2</sub>O**



**Figure 71 : Simulation du transport émissions des des GES de la journée du 4 Décembre 2018 issue de la CTO I : a) simulation du CO<sub>2</sub>, b) simulation du CH<sub>4</sub>, c) simulation du N<sub>2</sub>O**



**Figure 72 : Simulation du transport des émissions des GES de la journée du 5 Décembre 2018 issue de la CTO I : a) simulation du CO<sub>2</sub>, b) simulation du CH<sub>4</sub>, c) simulation du N<sub>2</sub>O**

### 3.4.2 Comparaison des émissions observées et simulées des cinq premiers jours du mois de décembre dans la centrale thermique d'Oyom-Abang I

Le tableau 22 ci-dessous nous donne le récapitulatif de la quantité en kilogramme de la concentration des différents GES issus de la centrale thermique d'Oyom-Abang I.

**Tableau 22: Récapitulatif des émissions théoriques observées et simulées des cinq premiers jours du mois de décembre 2018**

Date	Emissions Observées			Emissions Simulées		
	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$
<b>1<sup>er</sup> Dec</b>	79,38625	232,35	46,47	66,54067	194,7530	38,95066
<b>2 Dec</b>	67,0555	196,26	39,252	56,1703	164,5028	32,9006
<b>3 Dec</b>	67,59875	197,85	39,57	56,9863	165,8355	33,1671
<b>4 Dec</b>	107,5635	314,82	62,964	90,15851	263,8784	52,7757
<b>5 Dec</b>	123,9840	362,88	72,576	103,9219	304,1617	60,8324

Ces différentes valeurs permettent de dire que les rejets de ces GES sur la CTO sont de trois types : dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), le Méthane ( $CH_4$ ) et le Protoxyde d'Azote ( $N_2O$ ). On peut se poser un certain nombre de question sur toutes les centrales thermiques du réseau interconnecté du Cameroun par rapport à la quantité de GES émis. Est-ce mesurable ? Peut-on définir un scénario sur 50 ans pour maîtriser et contrôler cette pollution ? si oui quelles sont mesures à prendre pour réduire ou partiellement atténuer ce danger sur l'environnement ? Pour cela nous avons choisi mener une étude sur cinq jours pour évaluer les erreurs quadratiques des différents GES issus de la CTO durant le mois de décembre 2018 (tableau 23).

**Tableau 23: Résumé des résultats des incertitudes associées à chacun des Gaz à effet de serre des cinq premiers jours du mois de décembre 2018**

Date	Gaz à Effet de Serre		
	Dioxyde de Carbone ( $CO_2$ )	Méthane ( $CH_4$ )	Protoxyde d'Azote ( $N_2O$ )
<b>1<sup>er</sup> Dec</b>	16,18%	16,18%	16,18%
<b>2 Dec</b>	16,23%	16,99%	16,18%
<b>3 Dec</b>	15,70%	16,18%	16,18%
<b>4 Dec</b>	16,18%	16,18%	16,18%
<b>5 Dec</b>	16,18%	16,18%	16,18%

Le tableau 23 ci-dessus nous présente les erreurs quadratiques des différents GES des cinq premiers jours du mois de décembre 2018 entre les concentrations observées et les concentrations simulées. Nous constatons que pour le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) l'erreur varie entre 15,70% et 16,18% ; pour le Méthane ( $CH_4$ ) l'erreur varie entre 16,18% et 16,99% et pour le Protoxyde d'Azote ( $N_2O$ ) on trouve une erreur de 16,18%.

De cette analyse et interprétation nous pouvons affirmer que ces erreurs quadratiques sous forme de pourcentage pour la reconstruction d'une source d'émissions sont en accord avec les travaux publiés par (Wiiniarek et al., 2012).

### **3.5 Résultat lié à l'évaluation des impacts pour une performance environnementale**

#### **3.5.1 Aperçu des rapports sur les performances environnementales entre 2016 et 2022**

Un aperçu des rapports sur la performance environnementale sera fourni dans cette partie du travail. Un nombre total d'indicateurs sera mentionné entre 2016 et 2022 dans le but d'évaluer les rapports environnementaux par secteur d'activité au sein des deux centrales thermiques. Les cinq groupes d'indicateurs à évaluer sont :

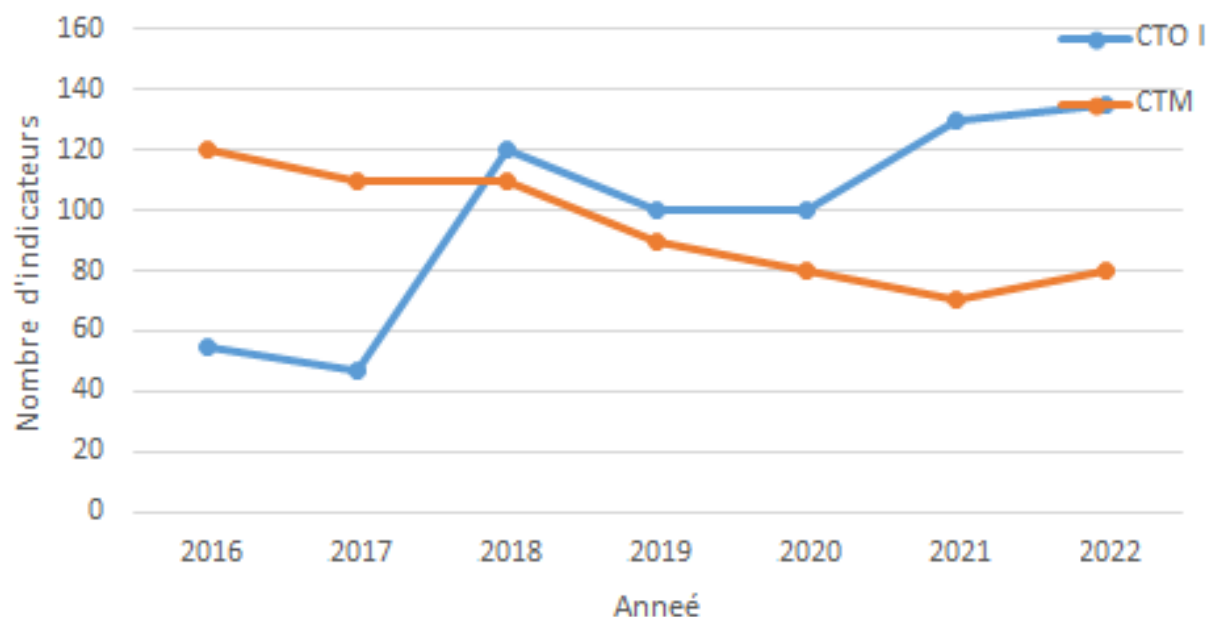
- Les indicateurs de fonds (type de centrale, fournisseurs, le type de moteurs ; le nombre de moteurs, le nombre de ventilateurs) ;
- La gestion environnementale (coût et gestion) ;
- Les intrants (le HFO et le LFO) ;
- Les extrants (émissions atmosphériques et déchets) ;
- Les impacts environnementaux (l'acidification ; le changement climatique ...).

Les rapports des performances environnementales diffèrent d'un site à un autre car le rapport d'approvisionnement est complètement différent en termes de la quantité de combustible utilisé et du nombre d'assesseurs disponibles.

Cette étape constitue la partie la plus délicate de la démarche de mise en place d'une évaluation des performances environnementales. Nous allons présenter ci-dessous quelques informations qui sélectionnent les indicateurs de performance environnementale les mieux adaptés pour la production de l'électricité (annexe B). Il n'existe pas vraiment de listes prédéfinies d'indicateurs de performance "idéaux" ; raison pour laquelle il a été préférable pour nous de définir les indicateurs de performance qui sont propres à Eneo sur la base :

- De ses besoins et du public ciblé ;
- Des aspects et impacts significatifs qu'elle a mis en évidence au préalable.

Il est donc à noter que la société Eneo vu ses rapports de tendances rapporte de nombreux indicateurs (figure 73) entre 2016 et 2022. Typiquement la société rapporte 50 à 100 indicateurs permettant d'avoir des variations significatives pour chaque centrale.



**Figure 73 : Le nombre total d'indicateurs de performance environnementale rapportés par les deux centrales thermiques entre 2016 et 2022**

### 3.5.2 Évaluation des impacts environnementaux

Dans cette partie, la base de données ecoinvent\_311 est utilisée pour l'étude d'ACV et la méthode CML2001 est retenue pour évaluer huit impacts environnementaux à savoir (CML 2001 2001) :

- Effet de serre ;
- Acidification ;
- Eutrophisation ;
- Toxicité humaine ;
- Épuisement des ressources abiotiques ;
- Destruction de la couche d'ozone stratosphérique ;
- Écotoxicité aquatique : eau douce ;
- Écotoxicité aquatique : eau de mer.

Le tableau 24 présente l'ensemble des impacts environnementaux déterminés par la méthode CML 2000. Pour simplifier la présentation et la discussion des résultats, l'interprétation touchera seulement trois impacts : effet de serre, acidification et épuisement des ressources abiotiques

**Tableau 24: Résultat d'évaluation des impacts environnementaux (Méthode CML 2001)**

	Impact category	Reference unit	Result
1	Aquatic acidification	kg SO2 eq	9,95031
2	Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	391947,7
3	Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	1,05445
4	Carcinogens	kg C2H3Cl eq	12,18054
5	Global warming	kg CO2eq	462,1855
6	Ionizing radiation	Bq C-14 eq	156135
7	Land occupation	m2org.arable	2924,932
8	Mineral extraction	MJ surplus	42,11481
9	Non-carcinogens	kg C2H3Cleq	153,8396
10	Non-renewable energy	MJ primary	35089,47
11	Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0,000267
12	Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	3,603497
13	Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,252112
14	Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	70,08043
15	Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	269481,5

### 3.5.2.1 Effet de serre

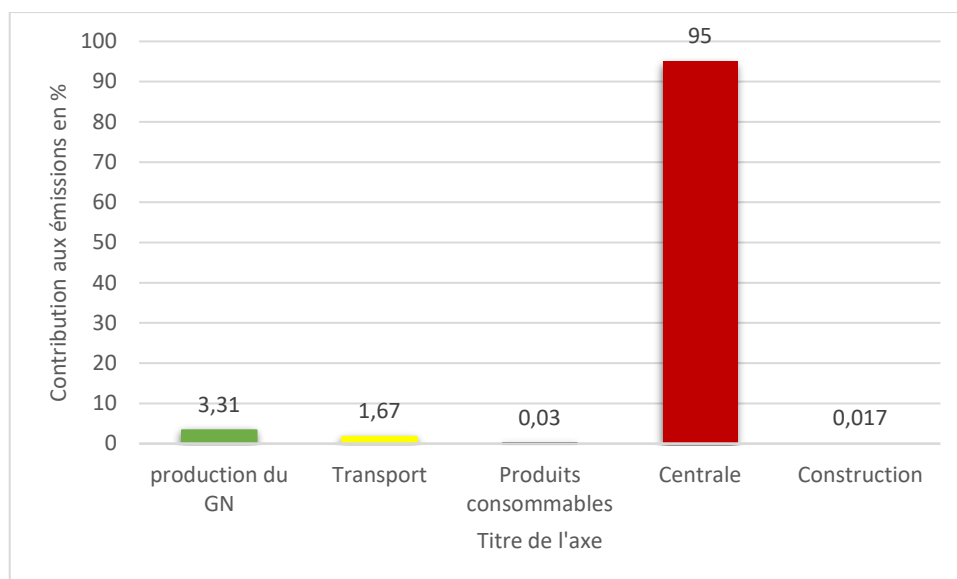
La production de l'électricité s'accompagne par des émissions de gaz à effet de serre. Notre étude montre que la production de neuf Mégawatt d'électricité engendre une émission d'environ 462,1855kg éq.CO<sub>2</sub>. Le tableau 25 présente les émissions de GES lors de la production d'électricité

pour d'autres pays. On remarque que les émissions des GES dans le site demeurent légèrement inférieures à la moyenne européenne. Les émissions des GES sont directement liées à la nature de la source énergétique pour produire l'électricité, ainsi si l'hydraulique et le nucléaire sont les plus propres au niveau du CO<sub>2</sub> (c'est d'ailleurs le seul et unique argument écologique des industriels du nucléaire), le charbon est le plus sale. Ainsi la France (mix électrique : thermique : 11,5%, nucléaire : 73%, hydraulique : 15,5%) est l'un des pays le moins émetteur des GES lors de la production électrique (Noureddine et al., 2013). La multitude de centrales au charbon, notamment en Angleterre et en Allemagne, fait de ces deux pays de grands émetteurs des GES en Europe. Par rapport aux centrales thermiques en Afrique nous avons cité deux pays

**Tableau 25: Émission des GES lors de la production d'électricité pour différents pays en Afrique et en Europe (Meunier, 2020)**

Pays	Cameroun	Tunisie	France	Belgique	Allemagne	Italie	Royaume Unis
Kgéq.CO2/KWh	462,18	460	90	290	600	59	640

La figure 74 montre que le processus "centrale" (processus de production d'électricité) est la principale source des émissions des GES avec une contribution d'environ 95% des émissions de la filière. Ceci s'explique par les grandes émissions du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) lors de la combustion du GN dans les foyers des chaudières. À signaler que le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est un gaz à effet de serre ayant un très fort potentiel de réchauffement climatique à 100 ans (296 fois plus que leCO<sub>2</sub>).



**Figure 74 : Contribution des différents processus aux émissions des GES**

### 3.5.2.2 Acidification

La production de l'électricité peut s'accompagner d'émission de substances responsables du dépôt d'acides dans le sol et dans l'eau : acidification. Le tableau 26 montre qu'environ 9,95031 kgéq.SO<sub>2</sub> sont émises pour la production de neuf Mégawatt d'électricité. Le processus de production du gaz naturel contribue d'environ la moitié de ces émissions. Ceci est imputé à la grande émission du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) lors de l'extraction et la purification du gaz naturel. Le SO<sub>2</sub> peut se transformer au contact avec l'eau en acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) qui constitue par la suite les pluies acides. Le processus transport contribue d'environ 26% des émissions acidifiantes de la filière. Ceci est dû aux émissions de SO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub> (donnant l'acide nitrique par contact avec la vapeur d'eau) dans les échappements des moyens de transport.

**Tableau 26: Contribution des impacts acidification dans la Centrale Thermique de Mbalmayo**

Total filière (kg éq.SO <sub>2</sub> )	Contribution (%)				
	Production GN	Production consommable	Transport	Centrale	Construction
9,95031	53	0,67	25,94	19,50	0,89

On constate donc que dans cette catégorie la production du gaz naturel domine.

### 3.5.2.3 Épuisement des ressources abiotiques

L'épuisement des ressources abiotiques quantifie les ressources non renouvelables consommées tout au long du scénario de production d'électricité. Le tableau 27 présente les résultats de l'étude d'impact « épuisement des ressources abiotiques » exprimés en (kg éq.Sb) évalués par la méthode CML 2000.

**Tableau 27: Impact épuisement des ressources abiotiques à la Centrale Thermique de Mbalmayo**

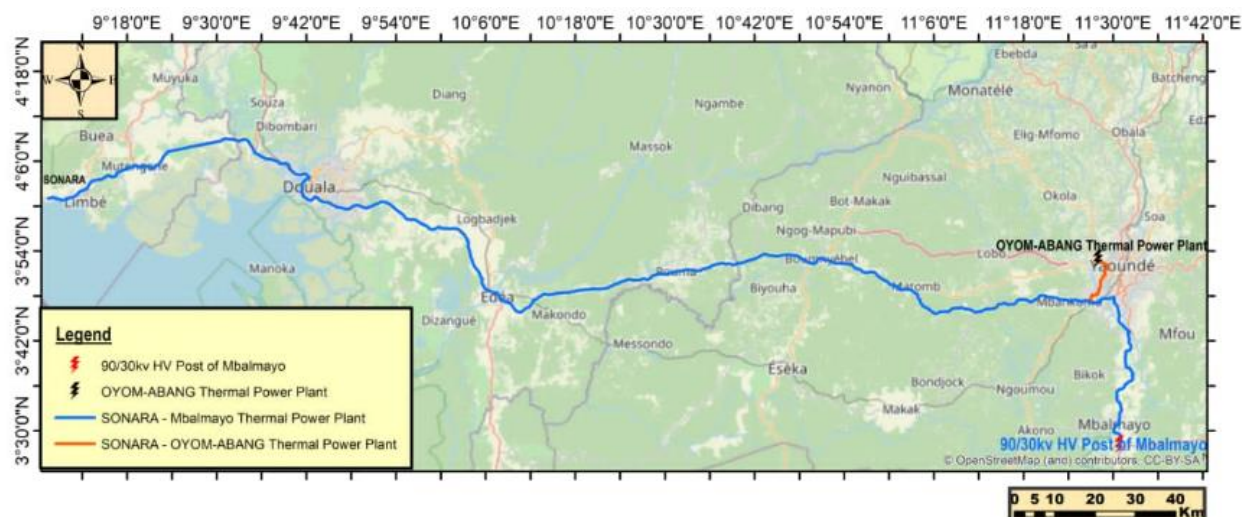
Total filière (kg éq.sb)	Contribution (%)				
	Production GN	Production consommable	Transport	Centrale	Construction
4,49	0,01	0,00	1,74	98,20	0,02

La quasi-totalité de l'impact épuisement de ressources est attribuée à la centrale de production d'électricité. Ceci est attribué à la consommation du gaz naturel (source non renouvelable) pour la production de l'électricité (soit 0,23 Nm<sup>3</sup>/ kWh).

### 3.5.2.4 Analyse de sensibilité : Influence des distances de transport sur les émissions de GES

Dans le cas de base du système de production d'électricité, on a considéré des distances pour le transport quittant de la SONARA (Société Nationale de la Raffinerie) de 313,7 km soit pour la centrale thermique d'Oyom-Abang et 350 km pour la centrale thermique de Mbalmayo (figure 75). Les résultats obtenus montrent que le processus transport n'a pas d'effet significatif sur les émissions des GES du système étudié. Pour tenir compte d'éventuelles modifications des circuits

d’approvisionnement du Gaz naturel, on propose de varier les distances de transport, lors d’une étude de sensibilité et de voir leurs effets sur les émissions des GES de la filière. Ces nouvelles configurations sont données par différents Scénarios regroupés dans le tableau 28.



**Figure 75 : Distance de la SONARA aux différents sites industriels de la région du centre-Cameroun (CTO et CTM)**

**Tableau 28: Différents scénario liés aux paramètres transport**

Centrales Thermiques		Scénario 1*	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
CTO	km	313,70	627,40	941,10	1254,80	1568,50
	kg.km	57,94	115,88	173,82	231,76	289,70
CTM	km	350,00	700,00	1050,00	1400,00	1750,00
	kg.km	64,65	129,29	193,94	258,58	323,23

\*Valeur du scénario de base

Les activités les plus importantes réalisées au sein des sites industriels pour la nécessité de la production de l’électricité sont les activités liées à la centrale et le transport du combustible. Nous pouvons donc dire qu’une grande partie du mix énergétique considéré ici pour la production de l’électricité dans la région du centre-Cameroun dépend à 80% des combustibles fossiles surtout en saison sèche qui dérivent de la charge environnementale négative.

Pour évaluer comment il pourrait être possible de réduire (ou non) le potentiel d’impact lié aux besoins de production d’électricité, cinq scénarios potentiels différents ont été proposés et comparés au scénario de base pour chaque centrale thermique. Ces scénarios ont été construits sur

la base du transport du combustible de la SONARA situé à Limbe jusqu'aux différents sites industriels (CTO et CTM). Les différents scénarios sont décrits ci- dessous :

### **Scénario 1**

Considérons que les centrales disposent des puits de pétrole sur place pour la production de l'électricité. Ce scénario a été proposé en tenant compte de l'approvisionnement du fioul provenant directement à Limbe. La distance de la SONARA à la centrale thermique d'Oyom-Abang (CTO) est de 313,7 Km soit 57, 94Kg.km et de la centrale thermique de Mbalmayo de 350 Km soit 64, 65Kg.km. À cet effet, 1,67% d'émission lié au transport sur le processus d'impact axé sur les émissions des gaz à effet de serre. Ces informations proviennent des données enregistrées et récoltées sur le terrain par utilisation de la méthode ef\_secondarydata@202202. La centrale représente 95% des émissions totales et 1,67% liées au transport et 1,87% de rapport de performance de ce scénario.

### **Scénario 2**

Dans ce scénario, une modification a été faite sur la distance en doublant la distance du scénario de base pour chaque centrale. Il en ressort qu'on a une contribution 4,21% d'émissions émises sur le processus d'impact axé sur les émissions des gaz à effet de serre.

### **Scénario 3**

Dans ce scénario, une modification a été faite sur la distance en additionnant la distance du scénario de base à la distance du scénario précédent (scénario 3 = scénario 1\*+ scénario 2) pour chaque centrale. On obtient une contribution 6,01% d'émissions émises sur le processus d'impact axé sur les émissions des gaz à effet de serre.

### **Scénario 4**

Dans ce scénario, une modification a été faite sur la distance en additionnant la distance du scénario de base à la distance du scénario précédent (scénario 4 = scénario 1\*+ scénario 3) pour chaque centrale. La contribution obtenue est de 6,3% d'émissions émise sur le processus d'impact axé sur les émissions des gaz à effet de serre.

### **Scénario 5**

Dans ce scénario, une modification a été faite sur la distance en additionnant la distance du scénario de base à la distance du scénario précédent (scénario 5 = scénario 1\*+ scénario 5) pour

chaque centrale. Le total de contribution est de 7,9% d'émissions émises sur le processus d'impact axé sur les émissions des gaz à effet de serre.

La figure 76 illustre l'effet des distances de transport sur les émissions des GES du système de production d'électricité. On peut remarquer que la contribution du processus transport demeure non significative même pour des grandes distances

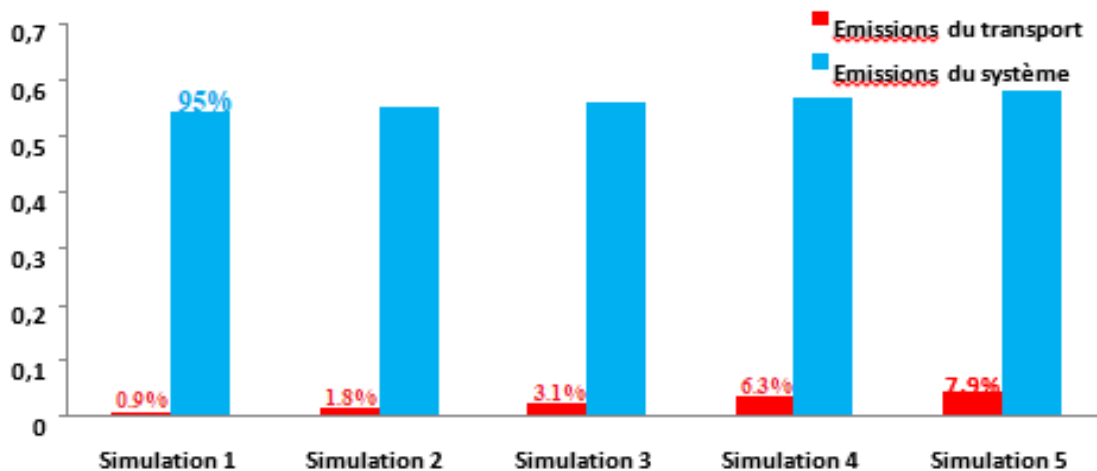


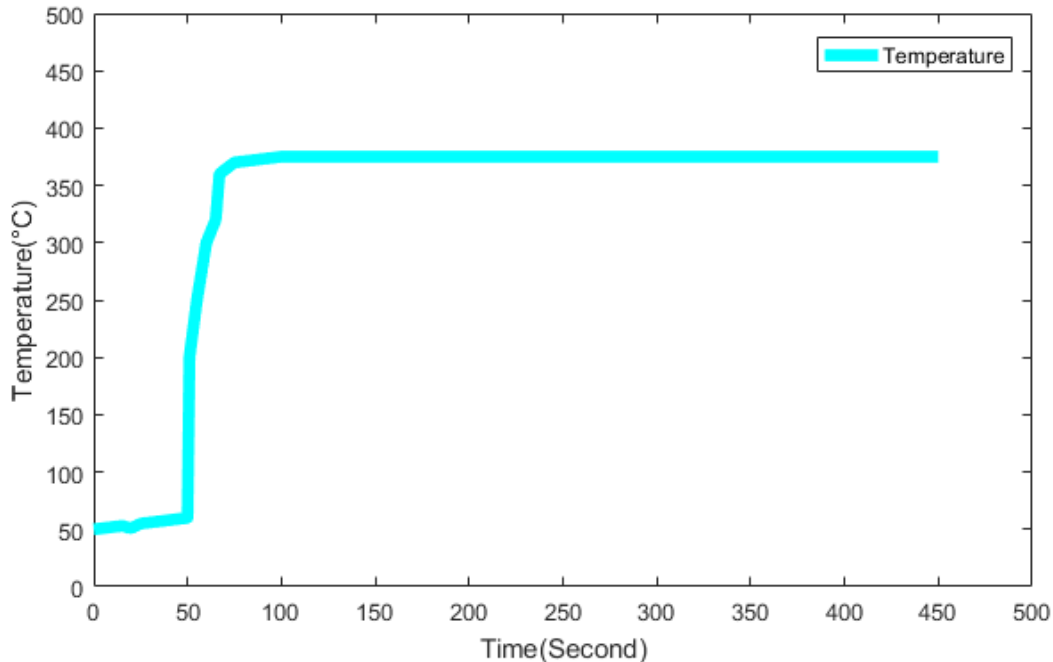
Figure 76 : Effet des distances de transport sur les émissions des GES

### 3.6- Mesures d'atténuations

L'estimation des émissions des gaz à effet de serre lors de la production de l'énergie électrique à partir du HFO et du LFO de 2016 à 2020 a été analysée avec précision. La contribution dans l'environnement de ses différents gaz devient un potentiel problème à analyser. Avec des modèles plus fiables ayant une très bonne précision sur la qualité du résultat obtenu de la concentration prédite, dans un domaine précis en se basant sur certains paramètres tels que la température des gaz à effet de serre, la hauteur de la cheminée, le diamètre de la cheminée, et la vitesse du rejet, le nouveau modèle couplage GA-Gaussian, évaluer et faire une prédiction sur la concentration du GES afin de donner les mesures d'atténuation.

- **Température des gaz à l'intérieur de la cheminée**

A noté que la cheminée de la centrale thermique de Mbalmayo à une hauteur de 32 m de haut. Lorsque les moteurs fonctionnent, les GES produit par combustion sont rejetés par la cheminée pour éviter une inhalation spontanée des agents de l'entreprise et des riverains. La figure 77 nous présente la variation de la température des GES à l'intérieur de la cheminée.

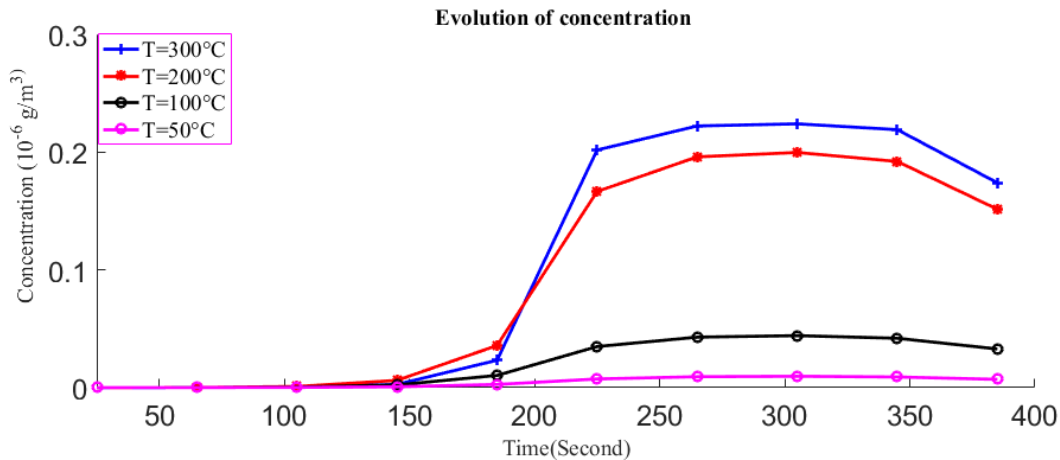


**Figure 77 : Température des gaz à effet de serre à l'intérieur de la cheminée**

La figure 77 nous montre que la température des GES dans la cheminée au démarrage des groupes électrogènes de marque Wartsilla Vasa 18V32LN dans la centrale thermique de Mbalmayo est de 49,1°C. Cette température correspond à un temps  $t=0$  seconde, qui est temps pour laquelle les agents de car (les exploitants) débutent le démarrage des groupes électrogènes. Entre 0 seconde et 50 secondes la température des GES dans la cheminée n'augmente pas considérablement, elle évolue très peu et atteint 61°C, cela justifie le temps de réponse du fonctionnement des moteurs du fait que le fuel n'as pas encore subit une bonne combustion pour que les GES s'échappent et que le rapport carburant-air est inférieur à 0.335. Entre 61 secondes et 75 secondes la température des GES dans la cheminée augmente exponentiellement jusqu'à atteindre une valeur de 370°C cela signifie que le rapport carburant-air atteint pratiquement 0.335 et entre la 75<sup>e</sup> seconde et la 95<sup>e</sup> seconde la température des GES varie très peu entre 370°C et 374°C. En fin, à partir de la 96<sup>e</sup>

seconde la température des GES dans la cheminée n'évalue plus, elle s'étend vers une valeur 375°C jusqu'à l'arrêt complet des moteurs par les exploitants. Cela signifierait donc que le rapport carburant-air est supérieur à 0.335.

Nous pouvons donc dire avec précision que la température moyenne des gaz à effet de serre à l'intérieur de la cheminée pour une bonne combustion est de 375°C. La figure 78 nous montre l'influence de la température des fumées sur l'évolution de la concentration des GES dans la cheminée dans le temps.



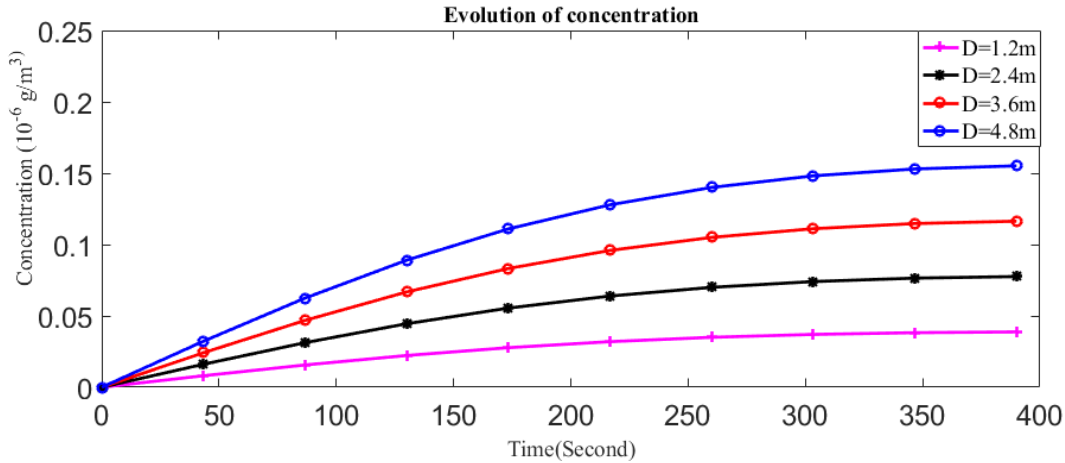
**Figure 78 : Influence de la température des fumées sur l'évolution de la concentration des GES dans la cheminée**

La figure 78 présente pour des niveaux de température différentes de l'évolution de la concentration des GES en fonction du temps dans la cheminée. Il est donc important d'observer que ses quatre valeurs de la température évaluent l'évolution rapide de la concentration des polluants dans la cheminée. Nous constatons à cet effet que plus la température du GES est élevée, plus le GES est rapidement rejeté dans l'atmosphère et plus la température est moins considérée, le polluant est lentement rejeté.

- **Influence du diamètre et de la hauteur de la cheminée sur l'évolution de la concentration des GES**

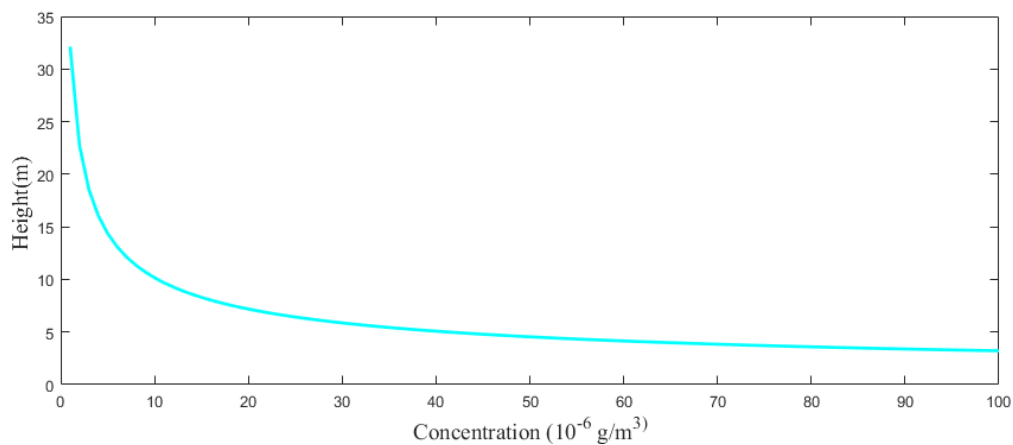
L'utilisation du couplage GA-Gaussian ici fait appel à une méthode d'évaluation des concentrations des polluants dans une étude locale afin de réduire l'impact sur la population environnante en proposant des mesures d'atténuations. Pour mieux préserver les populations locales, il serait tout important d'évaluer certains paramètres directs sur l'évolution de la concentration dans la cheminée. Les figures 79 et 80 présentent l'influence du diamètre et de la

hauteur de la cheminée sur l'évolution de la concentration des GES et la figure 79 présente la décroissance de la hauteur de la cheminée en fonction de la concentration du GES, en montrant l'intérêt de la hauteur de la cheminée sur le rejet des GES dans l'atmosphère.

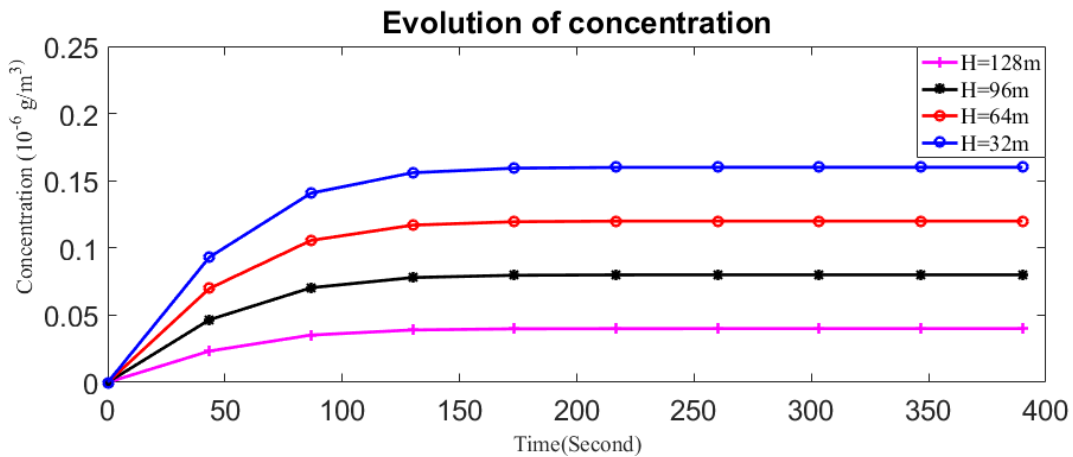


**Figure 79 : Influence du diamètre de la cheminée sur la concentration du GES**

Sur la figure 79, nous observons l'évolution de la concentration des GES pour quatre niveaux du diamètre de la cheminée à savoir : 1.2 m, 2.4 m, 3.6 m et 4.8 m. nous constatons plus le diamètre augmente, plus les GES sont rapidement rejetés dans l'atmosphère, donc l'augmentation du diamètre de la cheminée favorise le rejet rapide des GES dans l'atmosphère et réduction de la concentration du polluant. Tant dis que la diminution du diamètre de la cheminée défavorise le rejet des émissions dans l'atmosphère et une augmentation de la concentration.



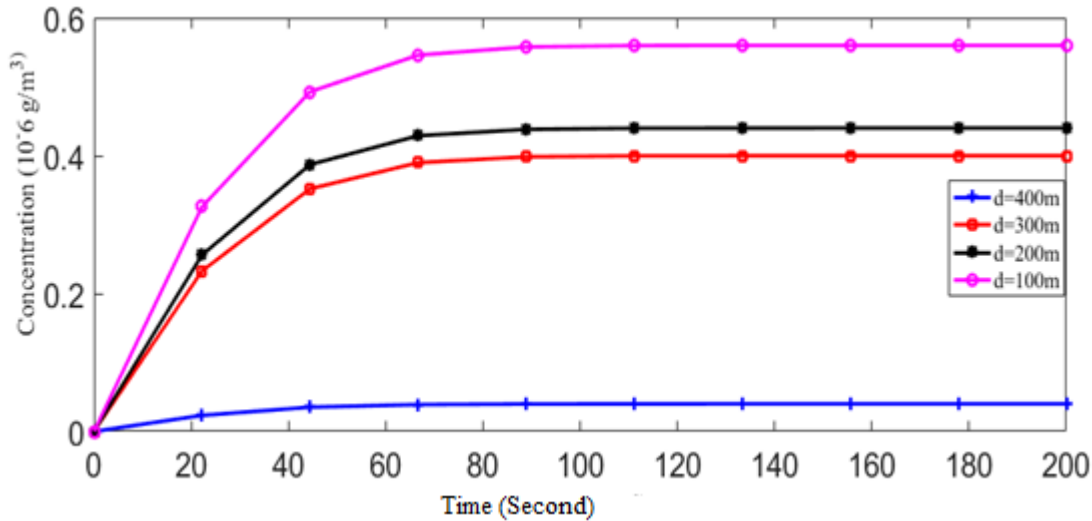
**Figure 80 : Décroissance de la hauteur de la cheminée en fonction de la concentration du GES**



**Figure 81 : Influence de la hauteur de la cheminée sur la concentration du GES**

Le paramètre hauteur évaluer ici permet de faire son optimisation. La figure 81 présente pour quatre hauteurs choisies différentes à savoir 32 m, 64 m, 96 m et 124 m, l'évolution de la concentration des GES est importante à analyser car nous observons pour un certain nombre de valeurs de la hauteur de la cheminée plus grande notamment 124 m, nous avons une réduction très considérable de l'impact local car l'augmentation de la hauteur favorise de diminution de la concentration du GES et à la sortie de la cheminée favorise la dispersion de ses GES. Tant disque la diminution de la hauteur de la cheminée augmente le niveau de concentration du polluant au niveau local qui laisse à croire la mise en danger des population environnantes. La figure 16 simulée à partir de l'équation (8) nous présente l'impact de la concentration sur la hauteur de la cheminée. Nous constatons que lorsque la hauteur de la cheminée diminue, la concentration du GES augmente. Nous pouvons dire de plus que la diminution de la hauteur de la cheminée lors de l'implantation d'une centrale thermique ne favorise pas l'atténuation des polluant issus de la centrale et qui serait important de rejeter au plus haut possible les GES pour éviter la pollution locale malgré qu'au niveau régional et continental le problème restera toujours. D'où la similarité de notre étude s'accorde avec les travaux de (Zair et al., 2016).

- **Influence de la distance de sécurité sur l'évolution de la concentration des polluants par rapport aux sites résiduels**



**Figure 82 : Influence de la distance de sécurité sur la concentration du GES**

La distance de sécurité a une grande influence sur l'atténuation des polluants et GES. Elle protège les populations contre toute inhalation directe des polluants et GES. La figure 82 nous donne l'influence de la distance de sécurité sur les risques d'inhalation des rejets. Nous pouvons constater que la zone maximale de sécurité est située à 400 m de la centrale. A cette distance nous constatons qu'il y a une très grande atténuation jusqu'à  $0,0014 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ .

## Conclusion

Parvenu au terme de cette troisième partie, les méthodes développées dans la deuxième partie de notre travail nous laissent croire efficacement qu'aux termes des différents résultats obtenus, la région du centre-Cameroun contribue aux différents phénomènes de changement climatique. À cet effet, la méthode inverse vient en tant que solution palliative pour s'imposer et savoir nettement l'origine de la pollution en mettant en exergue les techniques d'identification et de caractérisation des différentes sources ponctuelles et surfaciques. Il en ressort donc que les sources identifiées ont été caractérisées d'où l'impératif donnant du ton à une étude de performance environnementale dans les deux centrales thermiques (CTO et CTM) selon les instructions des normes ISO 14040 et ISO 14044.



## **Conclusion générale et perspectives**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail avait pour objectif d'élaborer une méthode d'inversion des émissions des GES polluants issues des centrales thermiques à fioul de la région du centre-Cameroun pour une meilleure évaluation de la performance environnementale. Car d'une part, les GES et polluants sont rejetés via les cheminées dans l'atmosphère et d'autre part, ils sont rejetés à partir des émissions surfaciques et accidentelles. La méthode d'inversion a été appliquée à partir des sources inconnues. Le couplage algorithme génétique-modèle gaussien a été utilisé pour estimer les meilleures émissions à posteriori. Cette estimation conduit à la simulation des champs de concentration des différents épisodes ou jours passés.

Bien qu'une multitude d'études ait été faites dans ce domaine et surtout à l'échelle globale ([Sarvesh Maithil., 2012](#) ; [Victor Winiarek et al., 2014](#)), en tenant compte de la météorologie et de la chimie de l'atmosphère à plusieurs échelles, les études sur la modélisation inverse sont actuellement très peu nombreuses. Il a donc été important pour nous d'évaluer la portée de cette nouvelle méthode applicable actuellement au Cameroun pour une avancée significative dans les défis environnementaux.

De plus, notre objectif, à travers ce travail de recherche, consiste à mettre l'accent sur l'intérêt de la mise en place des actions éco-innovantes et respectueuses de l'environnement pour la santé de l'humanité tout entière et en particulier la santé des entreprises produisant l'énergie. Nous cherchons donc à promouvoir les bonnes initiatives environnementales en démontrant leurs influences positives sur la performance environnementale. Afin que plus d'entreprises se mettent

au vert et consacre une place importante au respect de l'environnement et au développement durable au sein de leurs stratégies globales.

Ce travail a été fait sur la base d'une lecture bibliographique avec comme apport l'orientation spécifique des outils concluant aux différentes données nécessaires en se basant sur les descentes dans les différents sites industriels. La phase des stages a eu lieu pour se familiariser avec le terrain vers un avancé dans le monde professionnel. Pour quantifier les différents polluants et GES ainsi que la reconstruction des sources issus des différents sites selon la norme ISO du GIEC, le couplage Algorithme génétique modèle gaussien a été utilisé. La cartographie des différents sites à partir du logiciel OpenStreetMap et afin de faire une évaluation de la performance environnementale appliquée à chaque site par l'utilisation du logiciel OpenLCA à partir la méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Les travaux menés dans cette étude ont produit des résultats concluants sur une période d'échantillonnage de 5ans (2016-2020) dans les différentes centrales thermiques de la région du centre-Cameroun notamment la centrale thermique d'Oyom-Abang et la centrale thermique de Mbalmayo. À cet effet, les résultats des erreurs de la modélisation inverse (à l'échelle locale) de la propagation des Gaz à Effet de Serre (GES) à partir des sources conditionnelles de la centrale thermique d'Oyom-Abang en tenant compte des valeurs acceptées des paramètres de simulation présentent un bon accord avec les données de mesure fournies par la société Eneo. À partir de la méthode d'estimation des gaz à effet de serre (méthode empirique) et de la simulation de ces différents gaz, les résultats obtenus sont satisfaisants. Comme dans ([Wiiniarek et al., 2012](#)), l'estimation de l'erreur de la modélisation inverse pour le Ruthénium-106 2017 était de 16% . Pour nos différents gaz à effet de serre nous avons trouvé des erreurs liées à la modélisation inverse pour trois gaz à effet de serre soit un intervalle [15,70% ; 16,18%] pour le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) ; [16,18% ; 16,99%] pour le méthane ( $CH_4$ ) et 16,18% pour le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ). Cela nous pousse à confirmer que notre résultat corrobore avec celui de winiareck.

Ensuite, Le modèle Algorithme génétique modèle gaussien a été choisi pour donner une forme optimale de la solution car il s'inscrit dans un domaine local et des risques industriels. Comme ([Chaiwino et al., 2021](#)), l'identification des sources polluantes dans la centrale thermique d'Oyom-Abang a été faite et ses résultats sont probants pour cette étude. Pour y parvenir, nous avons montré les champs de vents et de température pour une dispersion plus favorable ; développer un second

ordre dans des schémas numériques à la fois spatiaux et temporels par application de la méthode des différences finies pour résoudre les équations de transport des polluants dans l'atmosphère des systèmes d'EDP. Le logiciel Fortran a été utilisé pour compiler l'équation d'advection-diffusion pour trouver les matrices concentrations et MATLAB2016a pour représenter les différentes solutions. Les principes de commandabilité et d'observabilité de KALMAN ont été appliqués pour le positionnement des capteurs afin d'identifier les polluants. Les polluants identifiés sont CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HAP et COV. En ce qui concerne les travaux futurs, nous allons mener une étude de la caractérisation et puis la reconstruction de ces sources polluantes.

Selon les normes NF EN ISO 14040 et NF EN ISO 14044, l'utilisation de l'ACV a permis de déterminer les impacts environnementaux significatifs sur toutes les catégories afin de mettre en place des actions d'amélioration durable. Avec toutes les exigences de transparence et de pertinence scientifique exigées par la méthodologie, Cinq scénarios ont été développés pour évaluer la performance environnementale sur le paramètre transport afin de montrer efficacement que le secteur transport contribue énormément à la pollution environnementale.

## PERSPECTIVES

### **Localisation de sources multiples**

Il serait intéressant d'évaluer encore les méthodes d'identification, de localisation et de caractérisation des sources de rejets multiples. La comparaison entre les méthodes paramétriques et non-paramétriques ainsi que la capacité des méthodes paramétriques proposées à retrouver le nombre exact de sources et leur localisation doivent être étudiées. Cette évaluation doit passer par des expériences synthétiques, aucune expérience de rejets simultanés issus de plusieurs points n'ayant été mise en œuvre.

### **Amélioration des modèles de dispersion**

Les résultats de la modélisation inverse sont sensibles aux performances du modèle de dispersion. Ainsi l'une des meilleures voies pour améliorer les méthodes de modélisation inverse consiste à améliorer les modèles en gardant le temps de calcul relativement faible et en introduisant d'autres facteurs météorologiques et sensibles. Cela nous permettra d'élargir notre champ de dispersion à l'échelle régionale et continentale en mettant en évidence la représentativité de la turbulence dans la couche limite atmosphérique et l'accent sur la modélisation des processus de perte.

### **Amélioration de l'étude de performance environnementale**

L'Analyse du cycle de vie étant un modèle de prédiction, les résultats trouvés en appliquant cette méthode pour évaluer les différents impacts lors du processus de la production de l'électricité dans les différentes centrales thermiques de la région du centre-Cameroun sont probables et acceptable. Mais pour plus de considération et d'approfondissement, nous allons faire une étude d'ACV sur toutes les centrales thermiques du Cameroun en mettant en exergue tous les processus c'est-à-dire de la construction jusqu'à la phase finale. Cette étude nous permettra de générer les impacts à chaque étape et niveau de la centrale. La deuxième étape consistera, pour une meilleure performance, de faire une étude comparative d'une ACV en évaluant le paramètre transport et en tenant compte d'un combustible local et d'autre part d'un combustible importé de la France.

## Références bibliographiques

- Arnesen, A. K. (1998). Sorption and desorption of fluoride in soil polluted from the aluminium smelter at Ardal in Western Norway. *Water. Air. Soil. Pollut*(103), 357 - 373.
- ASPA. (2008). Bilan des émissions directes et indirectes de gaz a effet de serre alsace. *ASPA*, 44.
- Azad, A. K. (1998). Characteristics of the air pollution in the city of Dhaka, Bangladesh. *Atmospheric Environment*(32), 1991–2005.
- Barakeh, Z. A. (2013). *Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs - méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution..* (Vol. 1). (O. S. HAL, Ed.)
- Barakeh, Z. A. (2018). *Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs - méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution..* (Vol. 1). (O. S. HAL, Ed.)
- Bocquet, M. P. (2010). Beyond Gaussian statistical modeling in geophysical data. *Mon. Wea. Rev*(138), 2997-3023.
- Bocquet, M. W. (2011). Bayesian design of control space for optimal assimilation. *Q.J.R. Meteorolog, Soc.*(137), 1340-1356.
- Cachier, H. A.-L. (2005). Aerosol studies during the ESCOMPTE experiment: an overview. *Atmospheric*(74), 547–563.
- Cahier, H., & Chronopoulos, J. (1993). Effects of Fluoride Emissions from Industry on the Fluoride Concentration of Soils and Vegetation. *Biochemical Systematics and Ecology*, 21(2), 195-208.
- Cervone, G. &. (2011). Non-Darwinian evolution for the detection of airborne sources. *Atmos. Environ.*(45), 4497–4506.
- Chaiwino, W., Manorot, P., & Pochinapan, K. &. (2021). Identifying the Locations of Atmospheric Pollution Point Source by Using a Hybrid Particle Swarm Optimization. *Symmetry*(13), 985.
- Chang, M., Hartley, D., Cardelino, D., & Chang, W. (1996). Inverse modeling of biogenic isoprene emissions. *Geophysical Research Letters*, 23((21)).
- Chang, M., Hartley, D., Cardelino, D., Haas-Laursen, D., & Chang, W. (1997). On using inverse methods for resolving emissions with large spatial inhomogeneities. *Journal of Geophysical Research*, 102((D13)), 16023–16036.
- Cui, J. L. (2019). Investigating the Impacts of Atmospheric Diffusion Conditions on Source Parameter Identification based on an Optimized Inverse Modelling Method. *Atmos. Environ.*(205), 19–29.
- Daley, R. (1996a ). *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press.

- Daley, R. (1996b). *Atmospheric Data Assimilation*. Cambridge University Press.
- Darío, R., & Watterson, J. (2006). Combustion stationnaire pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre: Royaume-Uni : . *Lignes directrices du GIEC*.
- Debananda, R. G. (n.d.). Identification of possible sources of atmospheric PM10 using particle size, SEM-EDS and XRD analysis, Jharia Coalfield Dhanbad, India. *Monit Assess Environ*(187), 680.
- Elbern, H., Hauke, S., & Adolf, E. (1997, JULY 20). Variational data assimilation for tropospheric chemistry modeling. *Journal of Geophysical Research*, 112(D13), 15967–15985.
- Elbern, H., Schmidt, H., Talagrand, O., & Ebel, A. (2000). 4D-variational data assimilation with an
- Eneo. (2017). Rapport annuel 2017, Vers une modernisation de la distribution électrique. 2, 52.
- Eneo. (2018). Rapport annuel 2018, vers une modernisation de la distribution électrique. (2), P.52.
- Eneo, & CTO. (2018). Service d'exploitation. Archive. Yaoundé .
- Enting, B. I. (2002). *Inverse problems in atmospheric constituent transport*. Cambridge University Press.
- Essombo, E. B., Deli, G., Seutche, F. T., Goune, a. C., Seutche, J. C., Nsouandele, J. L., & Ben-Bolie Germain, g. H. (2022b). Errors estimation in the modelisation inverse of accidental release of greenhouse gases into the atmosphere; application in the reconstruction of the resource terms. *Journal of Industrial Pollution Control*, 6(38), 1-12. doi:DOI: 10.4172/0970-2083.006
- Fontelle, J. P. (2006). *Méthodes de quantification des émissions dans l'air: PARIS 2006*. Centre Interprofessionnel Technique d'Études CITEPA, Technique de l'ingénieur, PARIS.
- GIEC. (2022). *Les inventaires nationaux des gaz à effet de serre Lignes directrices 2022 du GIEC*. Energie.
- Gilliland, A. B., Dennis, R. L., Roselle, S. J., & Pierce, T. E. (2003). Seasonal NH<sub>3</sub> emission estimates for the eastern United States based on ammonium wet concentrations and an inverse modeling method. *Journal of Geophysical Research*, 108((D15)).
- GUIBET, & Jean-Claude. (2006). *Combustible liquide, techniques de l'Ingénieur, Traité Génie énergétique* (Vol. 8). Louvain .
- Gwénaël, D. e. (1996). *planète et énergie en décembre 1996*.
- Hartley, D., & Prinn, R. (1993). On the feasibility of determining surface emissions of trace gases using an inverse method in a three-dimensional chemical transport model. *Journal of Geophysical Research*, 5183– 5198.
- Hele, P. (2005). *Normes environnementales et procédure d'inspection des installations industrielles et commerciales au Cameroun*. Yaoundé: MINEP.
- Institut, W. (2000). Mésure de la Consommation de fuel. . *Av. Prince de Liège 7 : Ministère de la Région Wallonne DGTRÉ - Service de l'Energie - 5100 Jambes, 2000*.
- Isabelle, P. (2005). *Modélisation inverse pour l'optimisation des sources primaires de pollution atmosphérique à l'échelle régionale*. paris, France.

- ISO1204. (1990). *Moteurs alternatifs à combustion interne - Désignation du sens de rotation et des cylindres et des soupapes dans les culasses et définition des moteurs.*
- ISO14044. (2015). Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices.
- ISO3744. (1994). Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. *Bruxelles :Gembloux, 75((1B))*.
- James, J. L. (2012). Deploying sensors for air pollution monitoring using public transportation system. In Proceedings of the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computing (ECC). *Brisbane, Australie, 1–7*.
- Kadri, A., Yaacoub, E., & Mushtaha, M. &.-D. (2013). Wireless sensor network for real-time air pollution monitoring. *International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*.
- Kalman, R. E. (1960). A new approche to linear filtering and prediction problems. *J.Banc Eng.*(82D), 35-45.
- Kasibhatla, P., Heimann, M., Rayner, P., Mahowald, N., Prinn, R. G., & Hartley, D. E. (2000). Inverse Methods in Global Biogeochemical Cycles. *AGU Press*.
- Kibong, T. M., & Tamba, J. G. (2020). Modeling the Dispersion and Atmospheric Mitigation of Pollutants in the Dibamba-Douala Thermal Power Plant. *Journal of Geoscience and Environment Protection*(8), 102-115.
- Krysta, M. B. (2008). Probing ETEX-II data set with inverse modelling. *Atmos. Chem. Phys.*(8), 3963–3971.
- Lambrozo, J., & Guillosoy, G. (2007). Pathologie professionnelle et de l'environnement. *Pollution atmosphérique, 2*(4), 1-15. doi:10.1016/S1155-1925(07)71842-6
- Li, H. K. (2009). Simultaneous estimation of covariance inflation and observation error within an ensemble Kalman filter. *Q.J.R. Meteorolog, Soc.*(135), 523-533.
- Li, H. Z. (2019). Computational Source Term Estimation of the Gaussian Puff Dispersion. *Soft Comput*(23), 59–75.
- ligne, E. (2002). *Circulation du 15 Avril 2002 relative aux modalités de contrôle par l'inspection des installations classées des bilans annuels des émissions de gaz à effet de serre.*
- Localité d'Afrique : [En ligne]. (mai 2012).
- Luis, R. S. (June 2002). Effect of small urban areas in central Spain on the enhancement of cloud-to-ground lightning activity. *Atmospheric Environment, 36*( 17), 2809-2816.
- Mahowald, N., Prinn, R., & Rasch, P. (1997). Deducing ccl3 f emissions using an inverse method and chemical transport models with assimilated winds. *Journal of Geophysical Research, 102*, 28153–28168.

- Mallet, V. &. (2004). 3-D chemistry-transport model Polair : numerical issues, validation and automatic-differentiation strategy. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*(4:1), 371–392.
- Ménard, R., S, E., S, H., G, P., Granier, C., & C, R. (2004). Emissions of atmospheric trace compounds, Chapitre Data Assimilation and Inverse Methods. *Kluwer Academic Publishers*.
- Menut, L. (2003). Adjoint modelling for atmospheric pollution processes sensitivity at regional scale during the ESQUIF IOP2. *Journal of Geophysical Research*(108).
- Meunier, F. (2020). Thermodynamique de l'ingénieur. *énergétique - environnement*.
- Michelot, N., Pesin, C., & Carrega, P. (2013). Atmospheric dispersion modeling of PM10 in a mediterranean valley, south-east of France. *Pollution Atmosphérique*(N° 220).
- Ministère de l'eau et de l'Énergie, *Plan de Développement à long terme du Secteur de l'Électricité Horizon 2030 (PDSE 2030)*. (juillet 2016). Yaounde.
- Moudi., I. P. (2011). Case Study of Pollutants Concentration Sensitivity to Meteorological Fields and Land Use Parameters over Douala (Cameroon) Using AERMOD Dispersion Model. *Atmosphere*(2), 715-741.
- Müller, J.-F., & Stavrou, T. (2005). Inversion of CO and NO<sub>x</sub> emissions using the adjoint of the IMAGES model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1157–1186.
- Noureddine, H., Zouhour, K., & Ammar, H. (2013). Life cycle assessment of electricity generation in Tunisia: center of electricity production of Rades. *Récents Progrès en Génie des Procédés*(104 ).
- Permuy, A., Donzier, E., & Rezgui, F. (2004, mai 10 ). Capteurs à semi-conducteurs. *Journal of engineering technology*. doi:doi.org/10.51257/a-v1-e3092
- Pison, I. (2005). *Modélisation inverse pour l'optimisation des sources primaires de pollution atmosphérique à l'échelle régionale* (Vol. 1). Paris, France: Université Paris XII Val de Marne.
- Reeves, C., Cunnold, D., R, D., E, D., S, E., C, G., . . . D, P. (2004). Emissions of atmospheric trace compounds, Chapitre Determination of Emissions from Observations of Atmospheric Compounds. *Kluwer Academic Publishers*.
- Sarvesh, K. S., Maithili, S., & Jean-Pierre, I. (2012, October 14 ). Inverse Modelling for Identification of Multiple-Point Releases from Atmospheric Concentration Measurements. *Boundary-Layer Meteorol*(146), 277–295. doi:10.1007/s10546-012-9765-y
- Seutche, J. C. (2015). Assessment of Atmospheric Emission Pollutants from the Thermal Power Plant : Case of OyomAbang Yaoundé-Cameroon. *Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online) ,* 2319-7064.
- Seutche, J. C., Nsouandélé, J. L., Njingti-Nfor, Tamba Jean, G., & Beguide, B. (2019). Geographical mapping and modelling of noise pollution from industrial motors: a case study of the Mbalmayo Thermal Power Plant in Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12), 1-16.

- Seutche, N. J. (2021). *Optimisation et atténuation de la pollution atmosphérique et des nuisances sonores dans les centrales thermiques du Cameroun par la méthode des algorithmes génétiques*. Yaounde, Mfoundi, Cameroun.
- SONARA. (2005). *Raffinerie de LIMBE. Certificat de qualité (Vol. I)*. Limbé.
- Stevens, E. D. (1998). Respiratory metabolism and swimming performance in growth hormone transgenic Atlantic salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*(55(9)), 2028–2035.
- STULL, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Talagrand, O. (1997). Assimilation of observations : an introduction. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 75((1B)), 191 – 209.
- Tchindjang, M., & Njilah, K. (2001). Risque d'inondation dans la vallée de nyos. *African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series*, 2(2), 50-62.
- Victor, W. B. (2014). Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations. *Atmospheric Environment* (82), 268-279.
- Vingarzan, R. (2004). A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*(38), 3431–3442.
- Vizuite, E., & Ramiro, A. (2006). *Organiser et programmer l'entretien des moteurs wärtsilä18V32LN pour la combustion interne des combustibles lourd*. Brazzaville: Lacunga Ecuador,.
- Wang, Y., & Bentley, S. (2002). Development of a spatially explicit inventory of methane emissions from Australia and its verification using atmospheric concentration data. *Atmospheric Environment*, 36, 4965–4975.
- Wartsilla. (2021). *Product guide Wartsilla . Engines*.
- William, F. N. (12 juillet 2000). *Modélisation de la dispersion des polluants dans l'atmosphère au voisinage d'une centrale thermique*. Thèse.
- World Health Organization, (. (2013). Expert committee on Biological Standardization (1971). Twenty-third report. <<http://www.who.int>>.
- Zhao, Y., Wang, S., Duan, L., Lei, Y., Cao, P., & Hao, J. (2008). Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction. 8442–8452, China : Atmospheric Environment. *Atmospheric Environment, Vol. 42, p. 11*. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.021.
- Zhu, L., Dabo, G., Wei, W., & Steven, J. D. (2015, August). Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 524(7565), 335-338. doi:10.1038/nature14677
- Ziomas, I. C. (1995). A contribution to the study of photochemical smog in the greater Athens area. *Beitraege zur Physik der Atmosphere*(68), 198–203.

## ANNEXES

### ANNEXE A : PRESENTATION DES DONNEES

**Tableau A1 : Facteurs d'émissions des GES directs et unités**

	PCI en Tj/Kt	Fraction de carbone oxydé	FE du N <sub>2</sub> O en Kg/Tj	FE du CH <sub>4</sub> en Kg/Tj	FE du C en tC/Tj	FE du CO <sub>2</sub> en Kg/Tj	Densité en tonnes/m <sup>3</sup>
Fioul 3500	<b>41,374</b>	<b>0,99</b>	<b>0,6</b>	<b>3</b>	<b>21,247</b>	<b>77905,67</b>	<b>0.9466</b>

**Tableau A2 : Facteurs d'émissions des principaux polluants**

Polluants	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	COV	CO	PM1 $\mu$ m, PM2,5 $\mu$ m	PM10 $\mu$ m	HAP
Facteurs d'émissions (g/GJ) ou (Kg/TJ)	<b>164,2</b>	<b>378,4</b>	<b>0,176</b>	<b>1,419</b>	<b>0,8116<sup>(a)</sup></b>	<b>3,8859<sup>(a)</sup></b>	<b>0,000841<sup>(b)</sup></b>

**a-Estimation des facteurs d'émission pour les particules [3]**

**b-Estimation de facteur d'émission pour les HAP [3]**

**Tableau A3 : valeurs limites des polluants et quelques GES et polluants Convertis en g/GJ comparés à celui émise par la centrale. Données de la MINEE**

Substance	Moyenne limite d'émissions en mg/Nm <sup>3</sup>	Moyenne limite d'émissions sur 5ans en g/Gj	Valeurs des émissions sur 5 ans en g/Gj
CO <sub>2</sub>	650	<b>2.2809*10<sup>-6</sup></b>	1.1313919*10 <sup>-6</sup>
NO <sub>x</sub>	300	<b>1,10816*10<sup>-8</sup></b>	3.424150*10 <sup>-5</sup>

<b>SO<sub>2</sub></b>	2000	<b>5,6*10<sup>-7</sup></b>	3.424150*10 <sup>-8</sup>
<b>Poussière</b>	50	<b>1,4*10<sup>-8</sup></b>	3.516359*10 <sup>-7</sup>
<b>PM10</b>	150 <sup>(a)</sup>	<b>2,37682*10<sup>-11</sup></b>	3.516359*10 <sup>-12</sup>
<b>NO<sub>2</sub></b>	150 <sup>(a)</sup>	<b>1,75712*10<sup>-11</sup></b>	3.254687.*10 <sup>-12</sup>

## Annexe B : Centrales thermiques isolées et exploitées par ENEO

CENTRE- SUD	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée( kW )	Puissance Disponible ( kW )
	MGO	L6A	200	160
AMBAM	CATERPILAR	3406 E	328	280
	MERCEDES	OM 404	196	145
	OLYMPIAN	GEH 175	128	100
DJOUM	MGO	L6A	200	150
	CATERPILAR	3406 E	256	200
YOKO	CUMMINS		132	120
	BAUDOUIIN	DK6	72	0
ENDOM	BERLIET	MID	56	45
	PERKINS	T 6364	95	65
BENGBIS	BERLIET	MIDR	80	65
	BERLIET	M 520	56	42
OLAMZE	RENAULT	TV	17	16
	OLYMPIAN	GEP 833	60	55
MEYOMESSALA	BAUDOUIIN	DV 12	504	480
	BAUDOUIIN	DV 12	504	480

CENTRE- SUD	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée( kW )	Puissance Disponible ( kW )
	MGO	L6A	200	160
AMBAM	CATERPILAR	3406 E	328	280
	MERCEDES	OM 404	196	145
	OLYMPIAN	GEH 175	128	100
DJOUM	MGO	L6A	200	150
	CATERPILAR	3406 E	256	200
YOKO	CUMMINS		132	120
	BAUDOUIN	DK6	72	0
ENDOM	BERLIET	MID	56	45
	PERKINS	T 6364	95	65
BENGBIS	BERLIET	MIDR	80	65
	BERLIET	M 520	56	42
OLAMZE	RENAULT	TV	17	16
	OLYMPIAN	GEP 833	60	55
MEYOMESSALA	BAUDOUIN	DV 12	504	480
	BAUDOUIN	DV 12	504	480

NORD	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée( kw )	Puissance Disponible ( kw )
	BAUDOUIN	DN P6	120	90
POLI	BAUDOUIN	DN P4	72	54
	BERLIET	MID	56	40
	BERLIET	M 520	56	40
TOUBORO	BERLIET	MID620	56	0
	VOLVO	Penta SG 300	220	0
	CATERPILLAR	3512 B	1200	0
	CATERPILLAR	3512 B	1200	0
KOUSSERI	CATERPILLAR	3412 TT	400	350
	CATER (rental)	3306	200	150
	CATER(rental)	3306	200	0
ADAMAOUA	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée( kw )	Puissance Disponible ( kw )
	Caterpillar	3306	200	170
TIBATI	Caterpillar	3406	280	230
	Caterpillar	3406	280	240
BANYO	Volvo	TWD	220	180
	Mercedes	OM 424	150	140
	MGO	V12	350	300
	Caterpillar	C 18	450	400
	Berliet	MID 620	56	40
TIGNERE	Berliet	MID 620	56	40
	Berliet	MID 620	56	0
NGAOUNDAL	M.G.O.	V 12 A	350	280
	Caterpillar	3406	364	330
	Baudouin	DK 4	40	38
MBAKAOU	Baudouin	DK 2	20	18
	Baudouin	DK 2	20	18

LITTORAL-SUD OUEST	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée( kw )	Puissance Disponible ( kw )
BAKEBE	Perkins	T 4236	24	20
BAMENDJIN	Diesclair	6. 72	40	36
	Diesclair	6. 72	40	36
CAMPO	Olympian	GEH 175	128	120
	Caterpillar	3304	80	70
EKOK	Olympian	50	40	40
	Caterpillar	3306	133	0
EKONDO-TITI	Caterpillar	3412	250	0
	Caterpillar	3408	230	140
	Mercedes	OM 404	196	145
	Caterpillar	3306	133	110
EYUMOJOCK	Genelec	IVECO	48	42
	Perkins	T 4236	40	40
MAPE	Caterpillar	3408	230	160
	Caterpillar	3408	230	140
MOUANCO	Berliet	MID	56	43
	Iveco		25	0
	Olympian	GEP 110	80	0
MUNDEMBA	Olympian	GEP 110	80	70
	Berliet	MID	56	50
NKONDJOCK	Berliet	MID	56	42
	Mercedes	OM 422	104	90

## ANNEXE C : Les Base de données

**Annexe C.1** : Données de production et consommation de la centrale thermique d'Oyom-Abang (2016-2020).

B. E. Essombo, J. C. Seutche\*, & J.L. NSouandele. (2022). Database of the thermal power plant of OYOMABANG-CAMEROON (2016-2017-2018) (Microsoft office Excel) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6916102>

**Annexe C.2** : Données de production et consommation de la centrale thermique de Mbalmayo (2016-2020).

A. C. Goune, J. C. Seutche\*, & B. E. Essombo & J. L. Nsouandele. (2022). Database of thermal power plant of MBALMAYO CAMEROUN (2017-2018-2019-2020-2021) (Microsoft office Excel) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6948521>

## ANNEXE D : Indice du fioul utilisé et proportion entre le combustible et le comburant

### Indice du fioul

$$\% C = \frac{m_c}{m_T} \times 100 = x \frac{M_C}{M_T} \times 100\% ;$$

$$\% H = \frac{m_H}{m_T} \times 100 = y \frac{M_H}{M_T} \times 100\% ;$$

$$\% S = \frac{m_S}{m_T} \times 100 = r \frac{M_S}{M_T} \times 100\% ;$$

$$\% N = \frac{m_N}{m_T} \times 100 = t \frac{M_N}{M_T} \times 100\% .$$

- Le calcul d'indice passe par les différents pourcentages massiques donnés par les formules précédentes. Ou m est la masse du fioul.

- Une masse  $m_c$  de carbone :  $m_c = \frac{87.6}{100} m$  ce qui correspond à X mol

$$X_{\text{mol}} = \frac{m}{M(C)} \times \frac{87.6}{100} \text{ de carbone.}$$

- Une masse  $m_H$  d'hydrogène  $m_H = \frac{12.02}{100} m$  ce qui correspond à Y mol

$$Y_{\text{mol}} = \frac{m}{M(H)} \times \frac{12.02}{100} \text{ d'hydrogène et donc à } \frac{Y}{2} \text{ mol de dihydrogène.}$$

- Une masse  $m_S$  de soufre  $m_S = \frac{0.378}{100} m$  ce qui correspond à Y mol

$$Z_{\text{mol}} = \frac{m}{M(S)} \times \frac{0.378}{100} \text{ de soufre.}$$

#### ✚ Proportion relative entre le combustible et le comburant

- **Le volume d'air**  $V_a$  nécessaire par Kg de combustible s'écrit alors :

$$V_a = (X + \frac{Y}{4} + Z) V_m \times \frac{100}{21} \text{ Sachant que } V_{O_2} = \frac{21}{100} V_a \text{ et } V_m = 22.4 \text{ dm}^3 .$$

$$\text{Il vient } V_a = \left( \left( \frac{m}{M(C)} \times \frac{87.6}{100} \right) + \left( \frac{m}{M(H_2)} \times \frac{1}{2} \times \frac{12.02}{100} \right) + \left( \frac{m}{M(S)} \times \frac{0.378}{100} \right) \right) \times V_m \times \frac{100}{21}$$

Application numérique :  $V_a = 10.9983 \text{ dm}^3 (\text{n}) / \text{Kg}$

- **Le volume de fumé sec**  $V_f$  par Kg de combustible s'écrira :

$$V_f = (X + \frac{Y}{2} + Z) V_m + \frac{79}{100} \times V_a$$

Application numérique :  $V_f = 11.67142 dm^3(n) / Kg$ .

## ANNEXE E : Table reactivité de concentration des GES et polluants observés

gid serial	id integer	noms [PK] caractere	latitude numeric	longitude numeric	the_geom geometry	o38 double precis	o31 double precis	pm10 double precis	pm25 double precis	co double precis	so2 double precis	no2 double precis	indiceair double precis	co2 double precis	lg d
110	46	Parc Zoo Mv	3.864180000	11.48880000	0101000020E	503.8374331	981.1653220	929.3022095	367.8664434	553.7685090	271.6178908	171.8166647	0.522955297	0	
111	33	Pharmacie d	3.867100000	11.51680000	0101000020E	69.16445540	439.6624201	818.3078435	695.0347102	120.5256395	900.6237857	821.8796136	3.854595148	0	
112	147	Polytech	3.90048	11.55786	0101000020E	0	0	0	0	41	0	0	0	11	1
113	30	Poste Centr	3.861360000	11.52050000	0101000020E	293.6044693	574.2050469	505.2330824	263.7302684	77.77451304	665.2743816	478.3769077	7.847882066	0	
114	78	Premier Ech	3.811390000	11.51090000	0101000020E	774.3860157	800.5761536	410.3117571	680.8832185	430.5093474	558.3752924	164.1912646	9.033393990	0	
115	34	Premier Min	3.866160000	11.51530000	0101000020E	284.7265698	93.95830426	810.4952378	610.2046449	465.2912016	294.4819685	930.0035778	9.836467290	0	
116	13	Prison kond	3.856960000	11.54290000	0101000020E	618.5072609	101.5607821	869.6605963	772.8005554	122.6430633	799.8191420	802.6122106	0.658665844	0	
117	127	Province (D	3.881020000	11.51680000	0101000020E	180.5979763	891.3847082	122.7473742	184.5604288	593.3279008	496.0349425	561.9070860	8.784323604	0	
118	131	Rail Hopita	3.908300000	11.53150000	0101000020E	578.7173169	359.5082070	665.9782002	583.8697799	381.8822195	896.3540112	503.7873769	2.241787742	0	
119	71	Rond Point	3.816100000	11.48910000	0101000020E	756.5491530	319.0613063	782.6627977	89.76742485	97.99010353	822.9409144	592.7791860	5.299922139	0	
120	66	Rond Point	3.836210000	11.48420000	0101000020E	18.77103047	220.5261937	161.0974776	807.0835098	254.5539685	30.49619030	708.1129928	9.417630620	0	
121	103	Rond Point	3.898950000	11.50520000	0101000020E	512.8591619	667.5102878	103.4581772	574.3053583	83.98940647	341.6983848	4.505979362	0.818120511	0	
122	117	Rond Point	3.869650000	11.48500000	0101000020E	138.4901879	280.1781315	895.0099498	10.01409720	490.5912484	541.9652666	155.5809881	7.586243441	0	
123	100	Rond Point	3.884140000	11.51920000	0101000020E	116.5903126	299.1278842	47.58548643	18.52943841	936.6019666	397.0491318	977.6874403	3.602700484	0	
124	137	Rond Point	3.910570000	11.50200000	0101000020E	696.2900329	619.8252942	403.1742541	611.8003684	502.2487598	994.5588465	564.6761935	0.812681890	0	
125	51	Scalom	3.845430000	11.49910000	0101000020E	69.14519751	334.2592241	41.82111239	721.1505118	469.9073494	560.7393765	751.1550285	7.510513477	0	
126	29	Sonel Centr	3.859590000	11.52020000	0101000020E	855.2654567	171.8317400	530.8666336	812.7056034	372.9773662	339.7375829	35.85229488	2.015891871	0	
127	106	Sous-Prefec	3.886900000	11.50170000	0101000020E	256.6657210	196.9477902	647.0233504	607.4134916	621.5978539	916.5878072	171.1004478	2.061110795	0	
128	65	TAM-TAM Wee	3.831760000	11.48900000	0101000020E	622.7042330	8.946909569	569.3031968	871.1175834	877.9072915	890.4306818	692.5436812	8.688383731	0	
129	146	Tchatibali	3.90169	11.525	0101000020E	0	0	0	0	421	0	0	12	1120	1
130	135	TEXACO Eman	3.917430000	11.52020000	0101000020E	452.8791247	493.5145452	165.5776062	562.0129266	899.7522899	735.2658510	859.2231329	4.143812027	0	

## PUBLICATIONS ISSUES DE CETTE THESE

- 1- Nkongo Essombo Samuel Maximin<sup>1</sup>, **Essombo Essombo Bathelemy**<sup>1,\*</sup>, Ekani Roger Yannick<sup>2</sup>, Njomo Donatien<sup>1</sup> and Seutche Jean Calvin<sup>1</sup>. Quantification of Greenhouse Gas Emissions in the Figuil-Cameroon Cement Plant between 2016 and 2020 Using the Genetic Algorithm–Gaussian Coupling. *Atmosphere* **2024**, *15* 1-20 (2024); <https://doi.org/10.3390/xxxxx>
- 2- **Essombo Essombo Bathelemy**<sup>a</sup>, Goune Achille Clovice<sup>a</sup>, Nkongo Essombo Samuel Maximin<sup>a</sup>, Seutche Jean Calvin<sup>a, b</sup>, Nsouandele Jean Luc<sup>c</sup>, Takembo Ntahkie Clovis<sup>c</sup> & Ben-Bolie Germain Hubert<sup>d\*</sup> Estimated greenhouse gas emissions in the Mbalmayo thermal power plant between 2016-2020 using the Genetic-Gaussian algorithm coupling. *Environmental Monitoring and Assessment* 196(563) 1-20 (2024) ; <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12621-2>
- 3- **Essombo Essombo Bathelemy**<sup>1</sup>, Jean Calvin Seutche<sup>1,2</sup> E Bickelle Ambassa Georges<sup>1,2</sup> · Achille Clovice Goune<sup>1</sup>, Jean Luc Nsouandele<sup>3</sup>, Germain Hubert Ben-Bolie<sup>4</sup>, Atangana Jacques<sup>1,2</sup>. Identification of pollutant sources in the central Cameroon region using the gaussian method: case of the oyom-abang thermal power plant-cameroon. *Jr. of Industrial Pollution Control* 38(6)1-10(2022); DOI: [10.4172/0970-2083.003](https://doi.org/10.4172/0970-2083.003).
- 4- **Essombo Essombo Bathelemy**<sup>1</sup>, Deli Goron<sup>1,3</sup>, Cyrille Talla Fotsing<sup>1,4</sup>, Jean Calvin Seutche<sup>1,2</sup>, Achille Clovice Goune<sup>1</sup>, Jean Luc Nsouandele<sup>3</sup>, Germain Hubert Ben-Bolie<sup>4</sup>. Errors estimation in the modelisation inverse of accidental release of greenhouse gases into the atmosphere; application in the reconstruction of the resource terms of carbondioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) by combustion in thermal power plants in the centre region of Cameroon: case study at Oyam-abang I. *Jr. of Industrial Pollution Control* 38(6)1-10(2022); DOI: [10.4172/0970-2083.006](https://doi.org/10.4172/0970-2083.006).
- 5- A. C. Goune<sup>1</sup>, J.C. Seutche<sup>2\*</sup>, R. Y. Ekani<sup>3</sup>, **B. E. Essombo**<sup>4</sup>, J. L. Nsouandele<sup>5</sup>, G. H. Ben-Bolie<sup>6</sup>. Comparative study between genetic algorithm and neural network coupling and monitoring tools on the dispersion of pollutants from the Yassa-Yibamba thermal power plant. *Jr. of Industrial Pollution Control* 39(2)1-10(2023).
- 6- A. C. Goune<sup>1</sup> · J.C. Seutche<sup>1</sup> · R.Y. Ekani<sup>2</sup> · **B.E. Essombo**<sup>1</sup> · J.L. Nsouandele<sup>3</sup>. G. H. Ben-bolie<sup>4</sup>. Assessment of the activity of the Mbalmayo thermal power plant on groundwater quality. *SN Applied Sciences* (2023) 5:172. DOI : <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05385-w>



# Estimated greenhouse gas emissions in the Mbalmayo thermal power plant between 2016–2020 using the genetic-Gaussian algorithm coupling

Essombo Essombo Bathelemy · Goune Achille Clovice · Nkongo Essombo Samuel Maximin · Seutche Jean Calvin · Nsouandele Jean Luc · Takembo Ntahkie Clovis · Ben-Bolie Germain Hubert

Received: 27 September 2023 / Accepted: 12 April 2024  
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2024

**Abstract** The greenhouse gas (GHG) emissions inventories in our context result from the production of electricity from fuel oil at the Mbalmayo thermal power plant between 2016 and 2020. Our study area is located in the Central Cameroon region. The empirical method of the second level of industrialisation was applied to estimate GHG emissions and the application of the genetic algorithm-Gaussian (GA-Gaussian) coupling method was used to optimise the estimation of GHG emissions. Our work is of an experimental nature and aims to estimate the quantities of GHG produced by the Mbalmayo thermal power plant during its operation. The search for the best objective function using genetic algorithms

is designed to bring us closer to the best concentration, and the Gaussian model is used to estimate the concentration level. The results obtained show that the average monthly emissions in kilograms (kg) of GHGs from the Mbalmayo thermal power plant are: 526 kg for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), 971.41 kg for methane (CH<sub>4</sub>) and 309.41 kg for nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), for an average monthly production of 6058.12 kWh of energy. Evaluation of the stack height shows that increasing the stack height helps to reduce local GHG concentrations. According to the Cameroonian standards published in 2021, the limit concentrations of GHGs remain below 30 mg/m<sup>3</sup> for CO<sub>2</sub> and 200 µg/m<sup>3</sup> for N<sub>2</sub>O, while for CH<sub>4</sub> we reach the limit value

E. E. Bathelemy · G. A. Clovice · N. E. S. Maximin · S. J. Calvin  
Energy, Electrical and Electronic System Laboratory (EETL), Research and Training Unit of Physics, University of Yaoundé I- Cameroon, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon  
e-mail: essoessobathez@gmail.com

G. A. Clovice  
e-mail: gouneclovice@gmail.com

N. E. S. Maximin  
e-mail: snkongo@yahoo.com

S. J. Calvin  
e-mail: sejal8002@gmail.com

S. J. Calvin  
Department of Physics, Higher Teachers' Training College, University of Yaounde I, Cameroon, P.O. Box 812, Yaounde, Cameroon

N. J. Luc  
National Advanced School of Engineering Maroua, University of Maroua – Cameroon, P.O. Box 46, Maroua, Cameroon  
e-mail: jlnsouandele@yahoo.fr

T. N. Clovis  
Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Technology, University of Buea, P.O. Box 63, Buea, Cameroon  
e-mail: takembo.ntahkie@ubuea.cm

B.-B. G. Hubert (✉)  
Laboratory of Atomic, Molecular and Nuclear Physics, Department of Physics, Faculty of Science, University of Yaounde I, P.O. Box 812, Yaounde, Cameroon  
e-mail: gbenbolie@yahoo.fr

of 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . These results will enable the authorities to take appropriate measures to reduce GHG concentrations.

**Keywords** Chimney · Gaussian model · Genetic algorithm · Greenhouse gas · Thermal plant

## Introduction

The latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) published by Beny et al. (2022) draws worldwide attention once again to the fact that climate change in recent years has reached a considerable peak. Also based on the Paris Agreement concluded between nearly 200 countries of the world, Junjie et al. (2021) state that it would be very wise to control and maintain the global average temperature at less than 2 °C during this century and at less than 1.5 °C above the pre-industrial level. The estimation of greenhouse gas (GHG) emissions requires consideration of important methods and tools for assessing and inventorying them in the event of an accident or a one-off release of pollutants into the atmosphere from an industrial site, as specified by Enting (2002) and Ivan et al. (2022). Cameroon is a Central African country with great energy potential (450 MW), 13% of which is provided by thermal power stations (Tchatat, 2020). According to Nouns and Tekeu (2001), Seutche et al. (2015) and Beny et al. (2022), Cameroon is a hotbed for the fight against global warming through its many conventions signed to preserve nature and guarantee a healthy environment for the next generation. Cameroon's energy potential has been evaluated, and Seutche et al. (2019) and Goune et al. (2023) show that the production of electricity within its territory from fossil fuels (HFO and LFO) in thermal power stations generates uncontrolled emissions of all kinds in our environment on the one hand, and on the other hand, causes noise pollution through the noise of the power station engines. This causes all kinds of pollution, seriously damaging the health of the local, regional and even continental population.

According to (BP, 2019), GHG emissions have not stopped increasing, by 2% in 2018, and will continue to reach more than 33.9 Gt per gas if mitigation measures are not applied immediately. The main greenhouse gases emitted by oil-fired power stations

in Cameroon are carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ). However, these very important anthropogenic products, which also rapidly promote the destruction of the ozone layer, are generally classified according to their global warming potential, and according to Tarek et al. (2016), 60% of their emissions come from human activities. Following the United Nations Climate Change Conference (UNCCC) in Stockholm in 1972, and despite the growing awareness of the issue, the whole world has not ceased to suffer the consequences of man-made activities (at the level of businesses and industrial parks and eco-industries) by releasing multiple greenhouse gases and pollutants into the atmosphere, which contribute to the destruction of the ozone layer. Later, Wiiniarek et al. (2012) worked on the estimation of errors in inverse modelling of accidental releases of atmospheric pollutants in the context of the Fukushima nuclear power plant in March 2011. They show that these different sources constitute a theatre of emissions of pollutants into the atmosphere. This is in line with the work of (IRSN, 2016). This shows that, despite the extensive studies carried out on this power plant and the proposed measures to mitigate emissions from its various sources of pollution, the area remains a high-risk zone. Another more serious case of fire causing the release of pollutants and GHGs into the atmosphere is that of the forests in the Chernobyl exclusion zone in April 2020, as studied by Ivan et al. (2022). These events caused enormous material and human losses and contributed effectively to the destruction of the environment. Before, during and after these various disasters, we observed massive emissions of greenhouse gases from their various sources into the atmosphere. It would therefore be vital to know, for a given species, the quantity of gases emitted into the atmosphere over a given period, in order to seek methods of prediction and mitigation to meet the principles of sustainable development objectives.

However, a prerequisite for the development of effective carbon reduction strategies is the accurate estimation of GHG emissions from thermal power plants from a life cycle perspective. To this end, Oró et al. (2012) have developed a comparative life cycle analysis of thermal energy storage systems for solar power plants. Their study shows that life cycle carbon emissions are 103% higher than direct emissions from the coal industry. Malodé et al. (2022) worked

on a review of the life cycle assessment approach to thermal power generation where the objective was to undertake a systematic review of LCA studies conducted on coal-fired power plant operations. In order to overcome the problems of estimating pollutants in industrial sites, renormalisation approaches were proposed by (Junjie et al., 2021; Ivan et al., 2022) using a bottom-up approach and neural networks to optimise emissions.

Coupling studies between two dispersion or prediction or prediction–dispersion models generally give results that are much closer to reality because coupling two models to form a single model increases performance in terms of the speed and accuracy of the result. It is important to mention a few studies based on the work of Haupt et al. (2007), who apply a coupling of genetic algorithms (GA) and a Gaussian dispersion model for the determination of source terms, showing from the results found the effectiveness of locating and quantifying a source with precision and speed in a numerical experiment. Goune et al. (2023) applied the coupling of genetic algorithms and neural networks to predict the evolution of pollutant concentration in an underground environment applied in the Mbalmayo thermal power plant. The results show speed and very good accuracy. However, studies to date show that even with coupled models, simulating pollutant dispersion is still a major problem, given the complexity of the atmosphere and current climate change. With this new Genetic Algorithm-Gaussian (GA-Gaussian) coupling model, we take into account the evaluation of certain parameters before the gases leave the stack.

In this study, the estimation of greenhouse gas emissions in the Mbalmayo thermal power plant between 2016 and 2020 using the Genetic-Gaussian Algorithm coupling model will be the subject of a fundamental description. It should be noted that the combustion of fuel oil at the Mbalmayo thermal power station produces several pollutants, namely: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), sulphur oxides (SO<sub>x</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), volatile organic compounds (VOC) and particulate matter (PM) (1 µm; 2.5 µm; 10 µm). However, we have specifically chosen three pollutants (carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) that are listed as greenhouse gases in the IPCC report 2022. To this end, an in-depth study of the basic parameters used

in the model will be carried out. These include: take into account Cameroon's level of industrialisation, the type of thermal power plant under study, the type of engine used, the height distribution of the main source of emissions and meteorological input data for the system process. To make our work more credible, in Sect. "1- Introduction" we have drawn up an inventory of the work that has had an impact on our theme, and then given an overall description of the objectives of our study. Our study continues with a systematic description of the study area and study data between 2016 and 2020 (Sect. "2- Description of the study area"). In Sect. "3- Materials, methods and description of data", an experimental study based on the determination of the energy produced in the thermal power plant will be carried out. Then, in the same section, the description of the Gaussian-Genetic Algorithm coupling model will allow us to obtain results that are more accurate and much closer to reality than the results obtained from the simple Gaussian model used in the previous work. In Sect. "4- Results and discussion", we will present the various experimental results from the model using Matlab software, and we will conclude in Sect. "5- Conclusion".

### Description of the study area

Mbalmayo is a town located in the Central Cameroon region, a town occupying the Mbalmayo Thermal Power Plant (MTPP) (Fig. 1). The site of this power plant has an area of 1.6 hectares and is located at (3° 28' 06" N and 11° 30' 51" E) (Seutche et al., 2019; Goune et al., 2023). For electricity production, it has three CATERPILAR3516B WARTSILA VASA 18V32LN brand generators (Eneo, 2018) with a capacity of 10 MW. The plant site is divided as follows: an administrative block occupied by the divisional manager, the head of Quality, Health and Environmental Safety (QHSE), and a secretariat; a machine room occupying the generators; a building where we find the central manager's office, the operators' room, several offices of working executives and a large store and finally a century-old subdivided into two blocks where we have a mechanics' room and a working electricians' room. As for the environment, the meteorological situation is detailed at the "meteorological data" level in Sect. 3.3.

## Materials, methods and description of data

The methodology based on the experimental determination of greenhouse gas (GHG) emissions in the Mbalmayo thermal power plant over five years (2016–2020) is made with real data collected and hosted in the zenodo database of Goune et al. (2022) and necessarily takes into account the level of industrialization of Cameroon (developing country, therefore country ranked at the second level of industrialization).

## Data processing methodology

According to the work of Lennart et al. (2000), GHG concentrations are estimated using basic data collected by taking into account seven basic parameters which can be found in the work of Seutche et al. (2015). For a greenhouse gas (GHG), Eq. (1) translates, based on the interval of operating time and geographical location as well as the level of industrialization, the highlighting of emissions from GES at an operating time  $t$ .

$$E_{s,t,z} = \sum_{a,i,f} \left[ A_{a,i,f,t,z} \times \sum_p [A_{s,a,i,f,p} \times A_{a,i,f,p}] \right] \quad (1)$$

And more precisely in the same vein, the emissions of an activity can be given in a general way from Eq. (2).

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a} \quad (2)$$

Where:

$E_{s,a,t}$ : Relative emission of the substance and the activity at time  $t$  and is expressed in CGE;

$A_{a,t}$ : Quantity of activity relative to activity  $a$  during time  $t$ , (in MWh);

$F_{s,a}$ : Emission factor for substance  $s$  and activity  $a$ . (in gce / MWh);

$s$ : Substances ( $CO_2$ ;  $CH_4$ ;  $N_2O$ );

$a$ : Activity carried out (production of electrical energy in the light fuel oil power plant);

$t$ : Calculation period (years; months; days...).

From the eight (08) fine combinations of activities developed in the work of Yu et al. (2008), we can develop terms  $A_{a,t}$  and  $F_{s,a}$  in equation (2).

Considering the activity model where emissions are reported as an activity parameter, we have Eq. (3). In Cameroon, the hours of maximum load during emissions in the study area are therefore taken into account. The method used is based on the principle of conservation of matter and can be applied to emissions according to the second level of the Cameroonian political context. In general, the equations for estimating GHG emissions have been developed and are generalised by Eq. (4):

$$E = Q_c \times T_{pe} (1 - R_p) \times \frac{M_{pf}}{M_{pe}} \quad (3)$$

$$E = A \times EF \times (1 - ER/100) \quad (4)$$

Where:

$E$ : Emission of the polluting substance  $p$  in the  $f$  form at the chimney outlet and it is expressed in (kg);

$A$ : Activity rate (production quantity of the industrial unit of electricity produced in kWh);

$EF$ : Emission factor;

$ER$ : Represents the total percentage reduction in emissions it is zero when the emission control systems are not used;

$Q_c$ : Mass flow rate of the fuel ( $kg.s^{-1}$ );

$T_{pe}$ : Content of substance  $P$  in the fuel entering the installation (in %);

$R_p$ : Retention of substance  $P$  in the installation (in %);

$M_{pf}$ : Molar mass of substance  $p$  in  $f$  form at the atmospheric outlet ( $kg.mol^{-1}$ );

$M_{pe}$ : Molar mass of substance  $p$  in the incoming fuel ( $kg.mol^{-1}$ );

$f$ : Index relating to the type of fuel;

$p$ : Index relating to the process.

The emission factor and release limit value are expressed as a function of the intensity of the gases produced according to the type of fuel used. Tables 1 and 2 summarise the emission factors for the HFO

**Table 1** Average emission factors of  $CO_2$ ,  $CH_4$  and  $N_2O$  in thermal power plants (Fontelle, 2010; Essombo et al., 2022)

FUEL type	Emission Factor $g.kWh^{-1}$		
	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$
Heavy Oil	1025±16	3000	600
Gaz Oil	1083±17	3070	634

**Table 2** General information on the limit value for the concentration of emissions of polluting substances (ANOR, 2021)

Pollutants	Limit values for discharges	Statistical definitions
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	30 mg/m <sup>3</sup>	Average per 24 h
Methane (CH <sub>4</sub> )	60 µg/m <sup>3</sup>	Hourly average
Nitrous oxide (N <sub>2</sub> O)	200 µg/m <sup>3</sup>	Hourly average
Total dust	[50; 100] µg/m <sup>3</sup>	Hourly average
Nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> )	500 mg/m <sup>3</sup>	Hourly average

and LFO used and as well as the discharge limit values according to Cameroon standard; (ANOR, 2021) in the Mbalmayo thermal power plant.

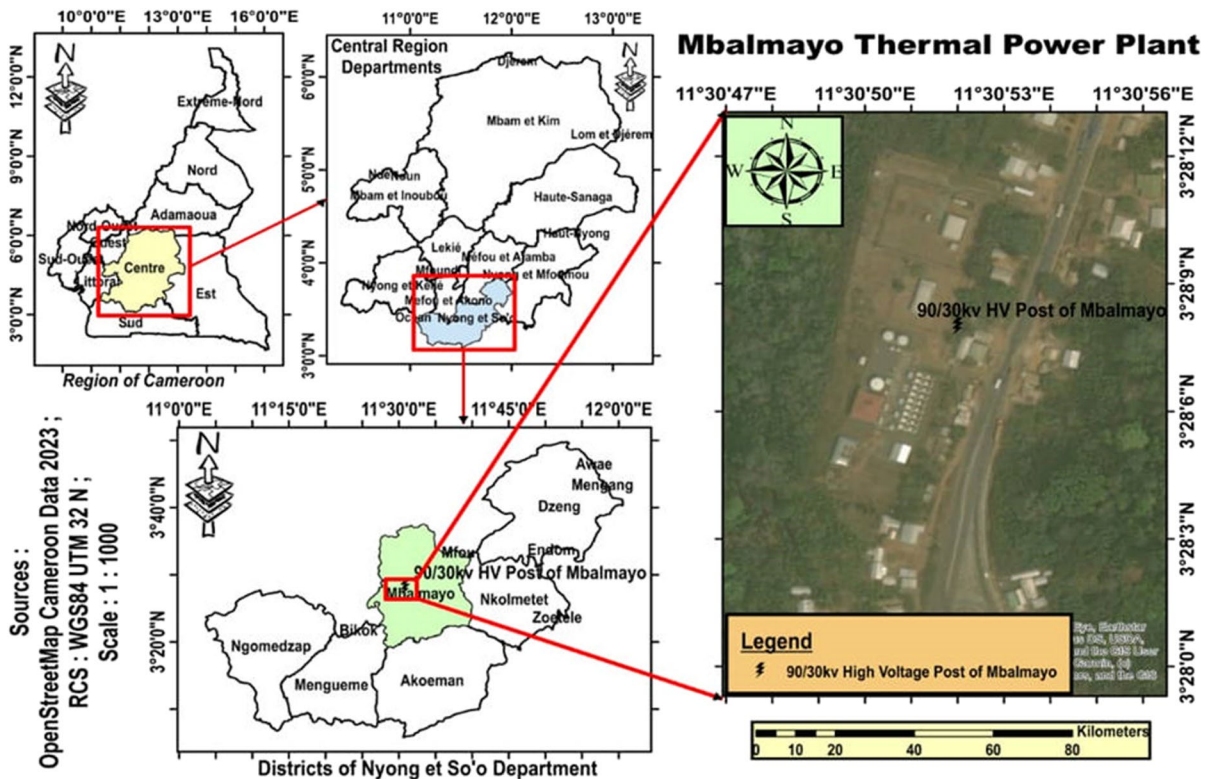
Presentation of the Genetic-Gaussian Algorithm (GA-Gaussian) Coupling

The estimate of greenhouse gas emissions is evaluated using the Genetic-Gaussian Algorithm (GA-Gaussian)

coupling, it is a novel model that makes it possible to exploit the concentration measurements obtained by the empirical method proposed and developed in Sect. 3.1 in order to predict the evolution of the concentration over time.

Presentation of the genetic algorithm

John Holland developed the Genetic Algorithms (GAs) in 1975. However, the success of this method is thanks to the contribution of Goldberg (Goldberg, 1988). The applicability of GAs has been implemented in solving complex optimisation problems with discrete and continuous variables. Indeed, GA is a stochastic optimisation method that uses natural selection techniques to search for the highest objective function and produces near-optimal solutions with moderate computational effort. Following references (Noaman & Barker, 1999; Bellatreche et al., 2006; Elhoussaine et al., 2008; Rongxiao et al., 2018), it is a process that relies on genetic techniques, namely crossover, mutation and selection. They take



**Fig. 1** Geolocalisation of the Mbalmayo thermal power plant in Central Cameroon. Source: Goune et al. (2023)

up too much computing time, but are very powerful for finding the global solution, according to Hanaa et al. (2013).

From an initial population of solutions (concentration), the performance of each solution is evaluated using an objective function known as the fitness function. By evaluating the previous population, this function is used to create a new potential population solution using simple evolutionary operators (crossing, mutation and selection) until a satisfactory concentration solution is found.

Optimisation is an essential process in atmospheric dispersion modelling. Here, it is used to develop the most reliable techniques for modelling our system and finding a solution that is much closer to reality. The solution obtained from the genetic algorithms will be referred to as the optimal solution and it is this solution that will be used to determine the evolution of the concentration of the GHG in the stack using the advection-diffusion equation. The flowchart of the genetic algorithms (Fig. 2) shows the process used to obtain the optimal solution.

*Presentation of the Gaussian model*

The Gaussian model is a dispersion model that solves most dispersion problems (Beychok, 2005; Terek et al., 2016). It is always based on the uniform normal distribution because it is easier to

produce results due to its simplifying assumptions (Daly & Zannetti, 2007). The Gaussian model is defined according to the assumption that a gas escapes in a pollution source. In this case, the concentration is given by Eq. (6).

$$C = (x, y, z, H, Q) = \frac{Q \cdot D}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_y^2}} \left[ e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \tag{6}$$

Where the concentration of a pollutant at a point (x, y, z) is calculated according to :

C: Concentration of gas emitted (g/m<sup>3</sup>);

Q: Emission rate in kg/h from source i in time t;

U: stands for the release speed in m/s in time t of the GHG in the stack;

$\sigma_y$  and  $\sigma_z$  are the standard deviations of the concentration distributions in the wind direction, these two parameters are selected according to the Guiford–Pasquill stability class detailed from the work of Pasquill & Smith (1983) and these dispersion standard deviations are determined from the Briggs table (Hanna et al., 1982; Tarek et al., 2016) and stability class B will be chosen for this calculation;

H: denotes the height of the chimney where the source is located in relation to the ground;

D: is the decomposition effect of the pollutant calculate from Eq. (7).

$$D = \begin{cases} e(1/(K_U^x)); & K > 0 \\ 1; & K = 0 \end{cases} \tag{7}$$

Where x is the distance in the direction of the wind, U is the speed of the greenhouse gas and K is the decomposition coefficient.

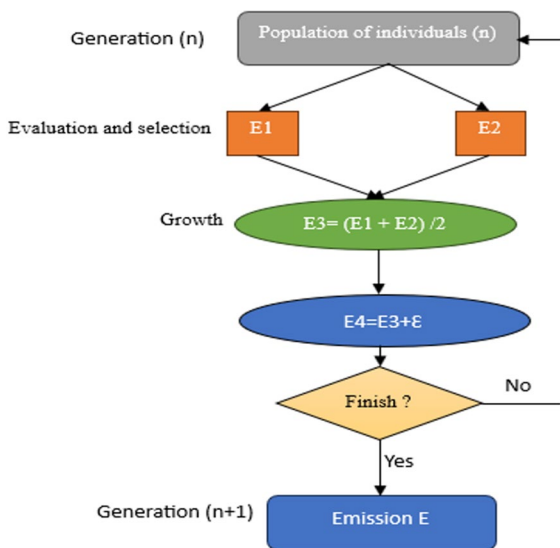
According to (Ouedraogo, 2006a; Ouedraogo, 2006b), the optimum value of the concentration C and the height H of the chimney are linked by the relationship given by Eq. (8):

$$C = \frac{0.23Q}{aUH^2} \tag{8}$$

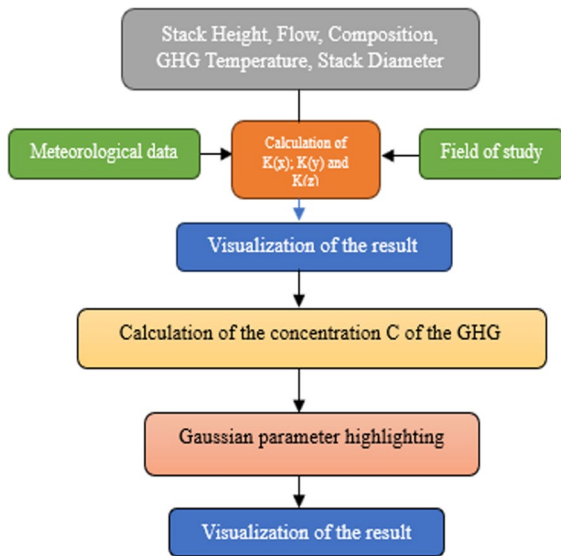
With  $a = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}$

The flowchart of the Gaussian dispersion model (Fig. 3) is given by:

The flowchart of the GA-Gaussian coupling (Fig. 4) is described by:



**Fig. 2** Genetic algorithms flowchart



**Fig. 3** Flow chart of the Gaussian model

Numerical method

*Governance of the transport equation*

The advection–diffusion Eq. (9) developed here is inspired by the work of (Ouedraogo, 2006a; Chen

et al., 2009; Essombo et al., 2022) in the integrated framework of modelling to describe our system.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S + \phi(T) - \Lambda^c \tag{9}$$

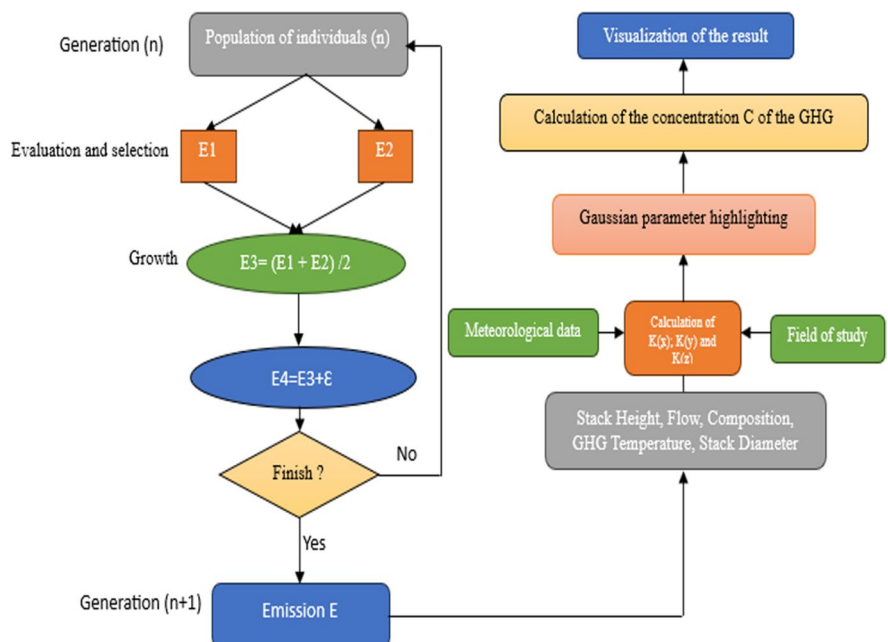
Where  $C(x, y, z)$  is the GHG concentration in kg.  $K_x$ ,  $K_y$  and  $K_z$  are the diffusion coefficients in (m<sup>2</sup>/s) in the x, y, z directions; u, v and w stand for wind speed at the chimney outlet;  $\Lambda^c$  is the term for dry and wet deposition of GHGs in the stack and S represents the source term. The term  $\phi(T)$  is the turbulent dependence of the ambient temperature in degrees Celsius (°C).

Assuming that in our chimney there is no advection phenomenon, Eq. (9) can be reduced to Eq. (10) by considering that the wind speed components are zero.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S + \phi(T) - \Lambda^c \tag{10}$$

The discretization of Eq. (10) is based on the use of the space-centered time progressive finite difference method for the treatment of the diffusion equation and

**Fig. 4** Flowchart of GA-Gaussian coupling



the model employed is the GA-Gaussian coupling under the assumption of the distribution of GHG concentrations in the stack.

#### *The main input data provided to the model*

Our new model, GA-Gaussian, manages various modules and configuration options that make it possible to take into account the effects influencing the estimation of greenhouse gases at the Mbalmayo thermal power plant. All the parameters have been taken into account to obtain more accurate and robust results with considerable calculation time during modelling. To make our work more visible, Table 2 illustrates some of the parameters influencing the model.

#### *Meteorological data*

The meteorological database of the Ministry of Transport of Cameroon (MinTransport, 2022) was analysed during the period 2016–2022. The study shows that the Mbalmayo area has a varying daily temperature (26–27.1 °C) and turbulent winds ranging from 2.1 to 19.5 km/h. Indication of the different cardinal points illustrated by the wind rosette (Fig. 5) allows us to orientate ourselves and find the right direction for the

dispersion of greenhouse gases at the chimney outlet, which is the WSW direction. Following this analysis, the cloud cover is 80%.

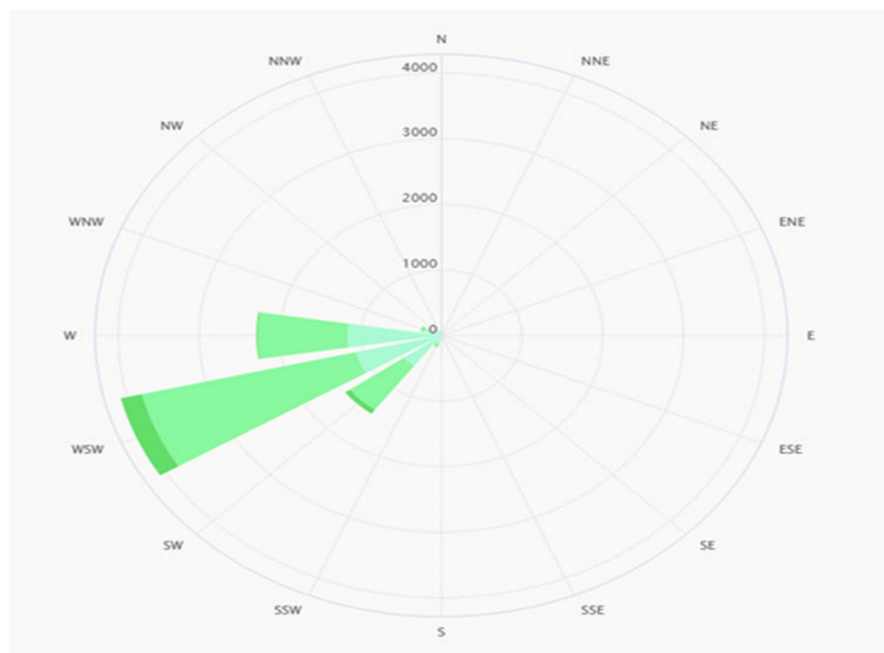
The study area is subject to a Guinean-type equatorial climate characterized by two dry seasons and two rainy seasons of unequal duration, with two well-marked minima and two maxima (Fig. 6) (MinTransport, 2022):

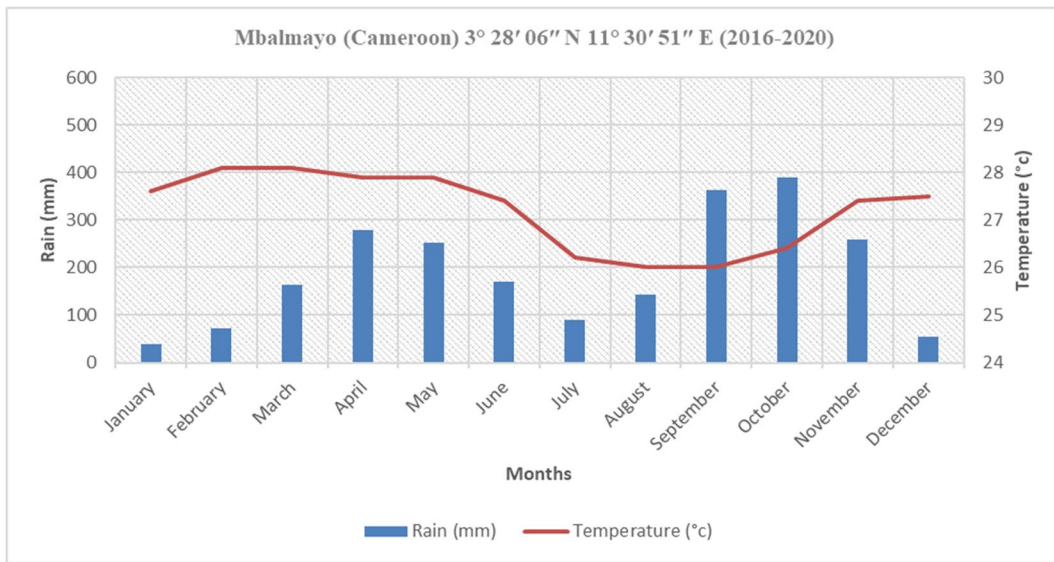
- The first maximum, the least marked, corresponds to the short rainy season, which extends from mid-March to mid-June;
- The second maximum corresponds to the long rainy season, from mid-August to mid-November;
- The longest dry season is from mid-November to mid-March;
- The smallest dry season is from mid-June to mid-August.

The area is characterized by abundant rainfall, low temperature variations and high air humidity all year round. Table 3 depicts the climatological data for the city of Mbalmayo.

The average annual rainfall in Mbalmayo is 2273.4 mm with minimum rainfall in January (38.8 mm) and maximum in October (389.6 mm), giving rise to overflows of rivers.

**Fig. 5** Wind rosette around the Mbalmayo thermal power plant





**Fig. 6** Ombro-thermal diagram of Mbalmayo (2016–2020)

**Table 3** Precipitation, temperature and relative humidity in the locality of Mbalmayo (2016–2020) (MinTransport, 2022)

Months	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Moy.
<b>Rain (mm)</b>	38.8	71.4	162.8	279.0	252.7	168.9	90.7	144.1	361.7	389.5	259.5	54.5	227.3
<b>Temp. (°c)</b>	27.6	28.1	28.1	27.9	27.9	27.4	26.2	26.0	26.0	26.4	27.4	27.5	27.1
<b>HR (%)</b>	89.0	89.0	89.0	92.0	92.0	92.0	93.0	93.0	93.0	93.0	92.0	90.0	91.3

The analysis of temperatures from 2016 to 2020 indicates that the monthly average temperature value is 27.15 °C in Mbalmayo. The highest temperature is recorded in February and March (28.1 °C) and the lowest in August and September (26 °C).

The thermal amplitudes are low. In this locality, the relative humidity varies slightly during the year. Its average value is 91.3%. The wettest months are August, September and October with 93%, and the least humid are January, February and March with 89%.

**Results and discussion**

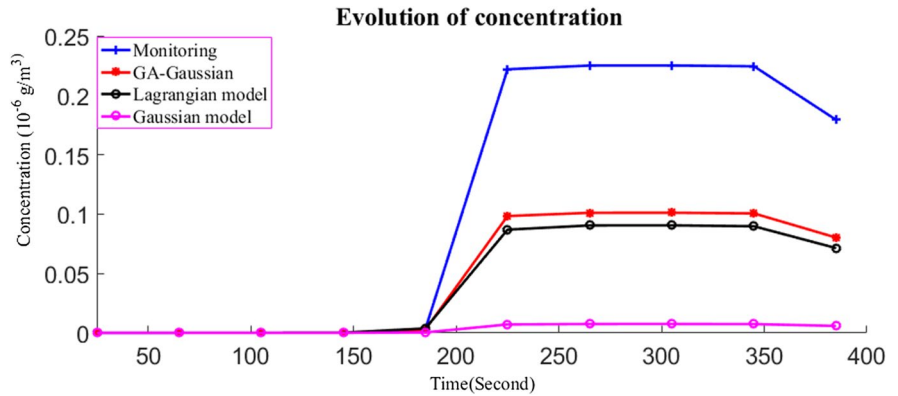
**GA-Gaussian coupling performance**

The predicted concentrations obtained from the GA-Gaussian coupling using the data obtained by Eneo-Cameroon Energy were compared with the test data

simulated with the Matlab software version 2016a. We assessed the performance of the GA-Gaussian based on a certain number of indicators, in particular the choice of certain other comparison models (Lauret et al., 2016; Tarek et al., 2016; Guangfei et al., 2017; Wang et al., 2018) such as the Lagrangian model and the Gaussian model. For our concentration estimation model to be more effective and accurate, it would be very important to validate it by comparing its performance with other models. Figure 7 shows this comparative study. We note that the Lagrangian model is also a very good model as it takes into account several hypotheses compared to the Gaussian model. This is because it underestimates many hypotheses, allowing the result faster. However, the GA-Gaussian coupling model is more reliable and more accurate. It achieves better results than the others because it is much closer to reality.

In this work, in order to validate the GA-Gaussian coupling, we evaluated the performance of the

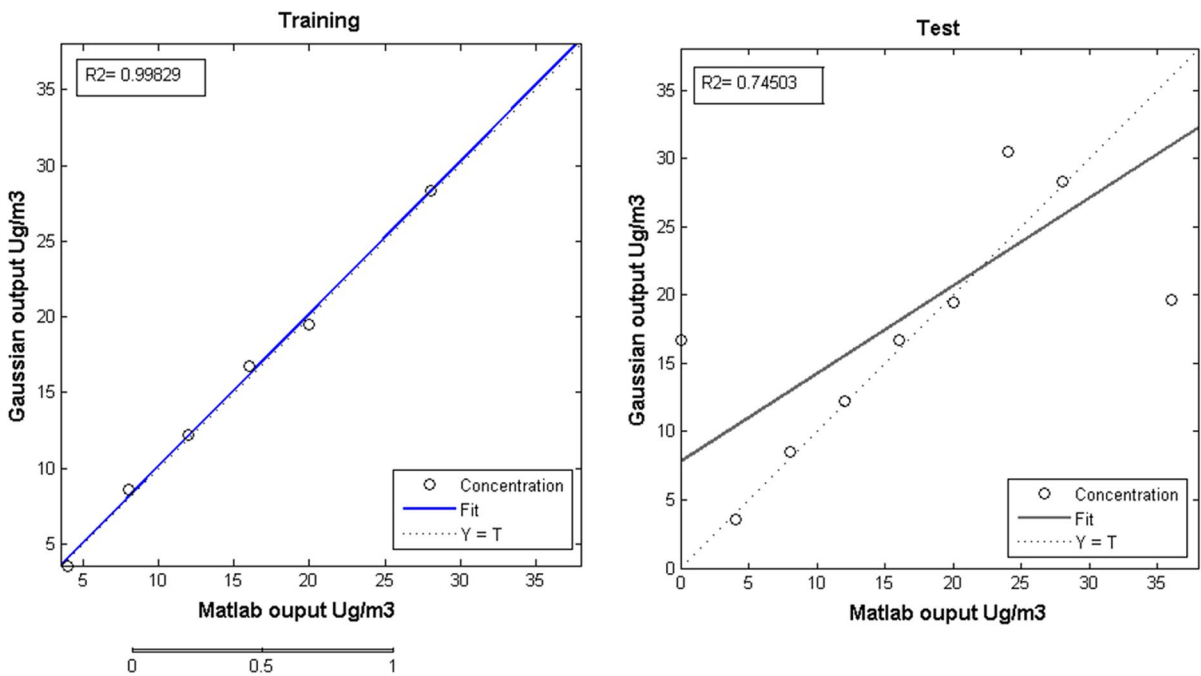
**Fig. 7** Comparison of GA-Gaussian with Lagrangian and Gaussian models



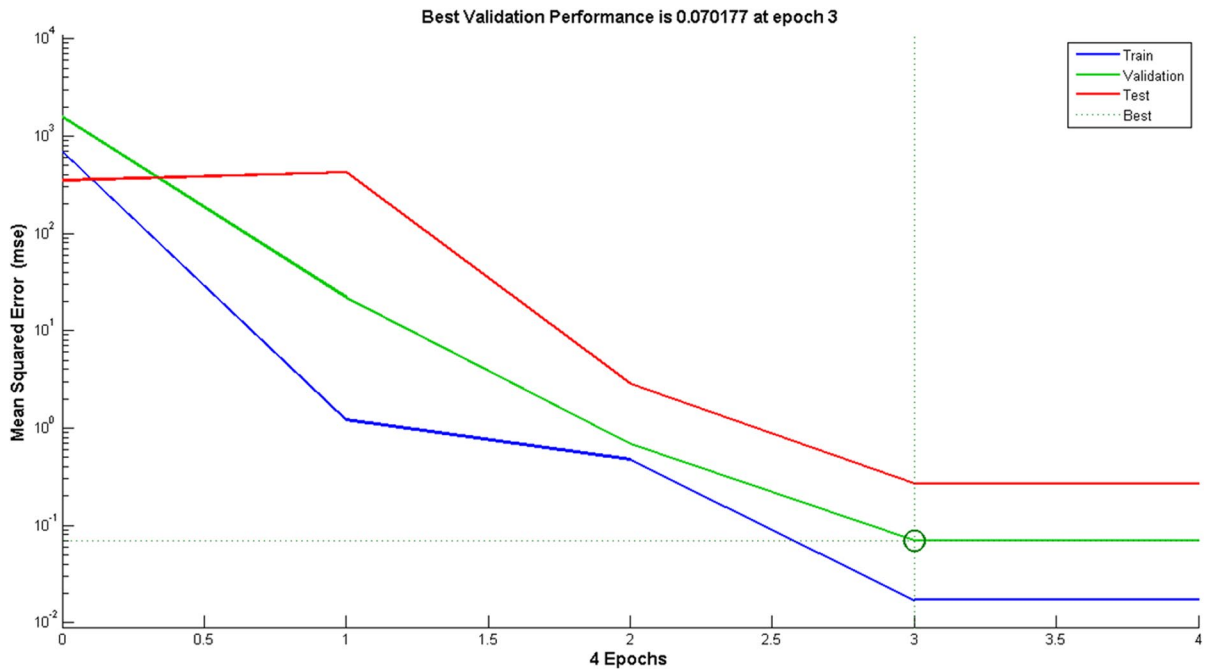
Gaussian model using two indicators: the squared correlation coefficient and the root mean square error. Figure 8 shows the regression curve for the Gaussian model. The figure shows that for the test case, the correlation coefficient  $R^2 = 0.74503$ . The curve (Fig. 9) shows the evolution of the root mean square error (RMSE) as a function of the number of iterations. We can see that the best value for the root mean square error is 0.070177. These two results show that the Gaussian model has good performance and accuracy.

*Electricity production in the Mbalmayo thermal power plant*

The power produced in the Mbalmayo thermal Power plant between 2016–2020 is energy balanced on the Southern Interconnected Network (SIN) to supply the populations of southern Cameroon and part of central Cameroon. This energy provides almost 20% in terms of electrification of this area (Eneo, 2018) and supplements the Songloulou hydroelectric power plant in southern



**Fig. 8** Gaussian prediction results on learning and testing



**Fig. 9** The mean square error (MSE) of the Gaussian model

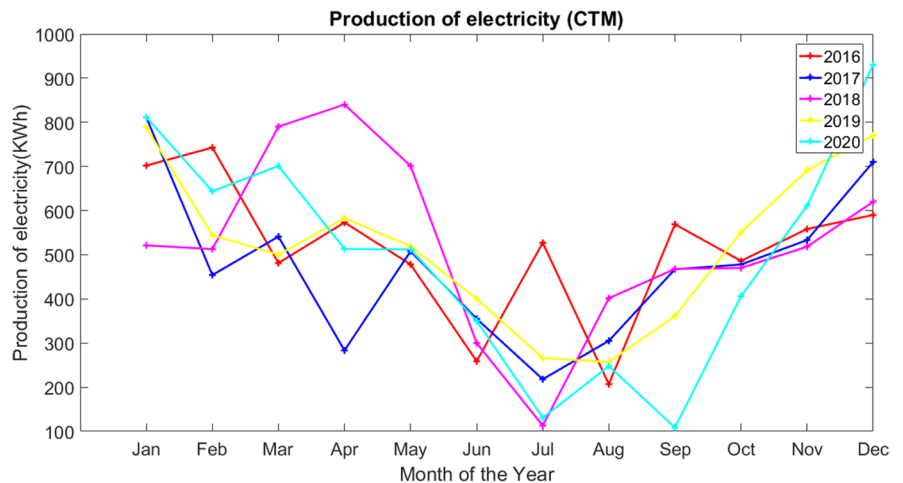
Cameroon as well as the Djoum solar power plant. The annual production of electricity over five years (2016–2020) and per month within the Mbalmayo thermal power plant has been clearly described (Fig. 10).

The Mbalmayo thermal power station had a production capacity of 10 MW (Eneo, 2018) when the power station was installed and this energy is produced most days between 5 p.m. and 11 p.m.;

therefore, 6 hours of operation on average per day. From Fig. 10 we can see the following.

- From September to March, we observed a considerable increase in energy production until reaching the following maximums for each year: 742.71 kWh in January 2016; 811.44 kWh for December 2017; 840.12 kWh in December 2018; 788.14 kWh in January 2019 and, in the end, a very con-

**Fig. 10** Electricity production for the years 2016–2020 in the Mbalmayo, Cameroon thermal power plant



siderable increase for a value of 930.14 kWh in December 2020. We can say with conviction that this increase is the main cause of the drop in water flow in the Songloulou River occupying the dam, which has a production capacity of 384 MW with a retention level of 528 m (Eneo, 2018).

- From the end of March to the end of August, we observed a considerable drop in energy production. In 2016, we recorded an exponential drop down to 206.84 kWh of production in August 2016; in 2017 a drop of 218.10 kWh in July; in 2018 a drop to 112.84 kWh in July; in 2019 a drop of 257.201 kWh in August and, at the end of 2020, we recorded a drop to 108.402 kWh in August. We can justify this drop by the fact that the water flow in the Songloulou River where the Songloulou dam is located increased considerably to balance the energy balance of the Southern Interconnected Network (SIN).

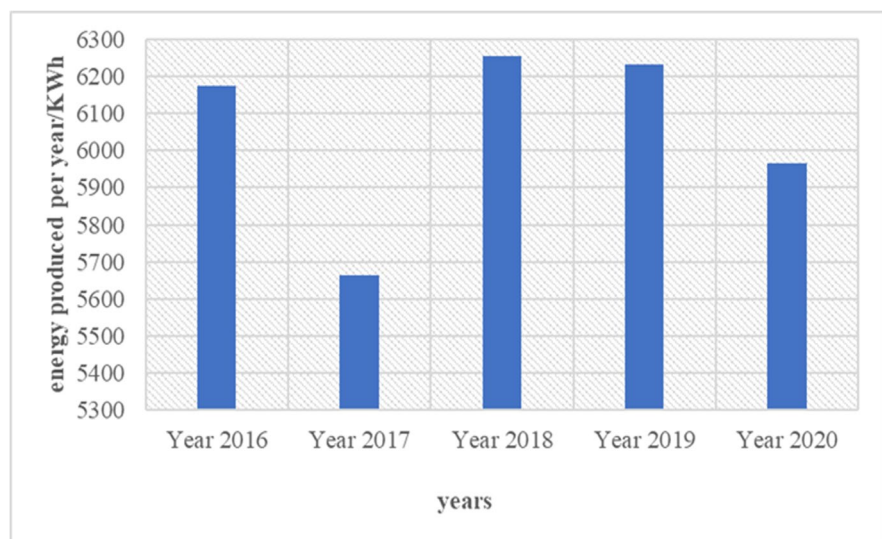
Electricity production over the period 2016–2020 at the Mbalmayo thermal power station helped to make up the energy deficit in Cameroon's two-border zones (Centre-South), notwithstanding its negative impact on the atmosphere through GHG emissions in the local, regional and even continental environment. Further processing of the data led to an assessment of electricity production per year during this period: 6173.453 kWh in 2016; 5664.271 kWh in 2017; 6255.271 kWh in 2018; 6231.731 kWh in 2019 and 5965.904 kWh in 2020 (Fig. 11). This energy was

used to supply the neighbouring populations controlled by the RIS. Through a progressive evaluation, in terms of comparison of energy production over the five years, we can say that the energy production from the Mbalmayo thermal power station has had a significant progressive increase for our study period due to the population growth in this area.

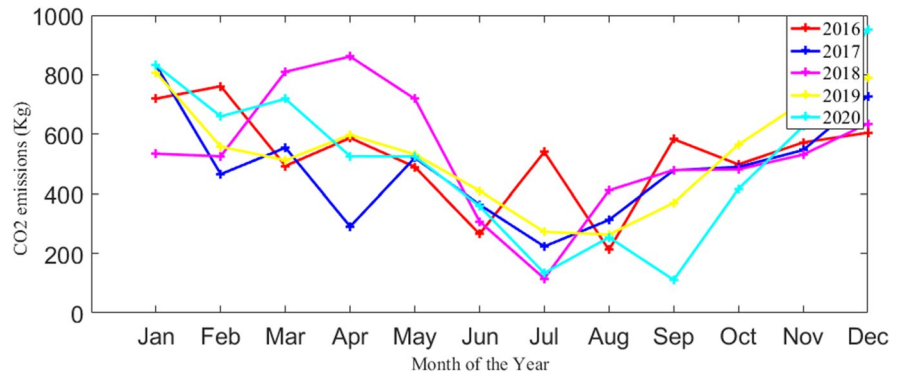
#### Results of greenhouse gas emissions from the Mbalmayo thermal power plant

Both an electrical energy production unit within the framework of supplying the local population and their surroundings, the Mbalmayo thermal power plant constitutes a pole for the emission of GHGs which contribute effectively to the destruction of the ozone layer. The results obtained for quantifying the various GHGs were the subject of research based on a large database by Goune et al. (2022), the type of fuel (LFO and HFO) used in the thermal power plant, mathematical equations describing the model, emission factors and with attention paid to the accuracy of the quantity to be evaluated for the emissions of each GES. The most recurrent GHG emissions from engine combustion are carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, methane (CH<sub>4</sub>) emissions and (N<sub>2</sub>O) emissions. From the empirical model, we quantified the emissions in kg of carbon dioxide (Fig. 12), methane (Fig. 13) and nitrous oxide (Fig. 14) taking into account emissions factors according to the IPCC standards published and cited in Spork et al. (2014).

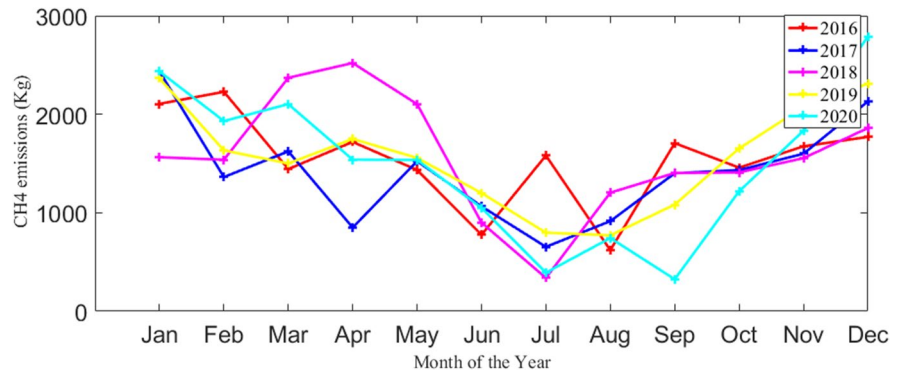
**Fig. 11** Cumulative electricity production during the years 2016–2020 in the Mbalmayo thermal power plant



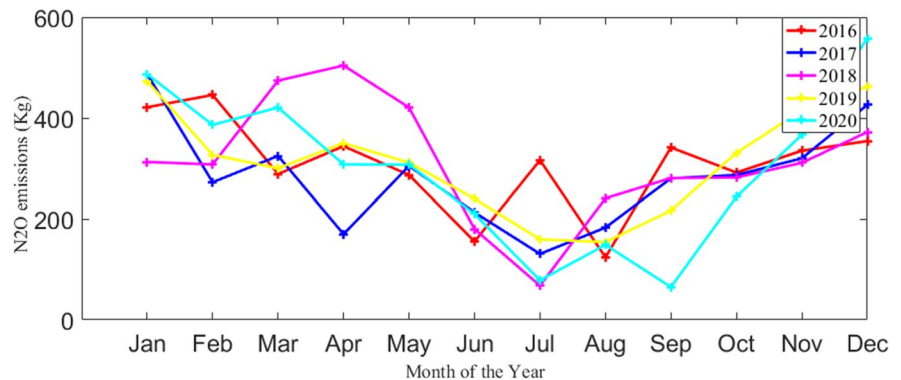
**Fig. 12** Estimated CO<sub>2</sub> emissions between 2016–2020 from the Mbalmayo thermal power plant



**Fig. 13** Estimated CH<sub>4</sub> emissions between 2016–2020 from the Mbalmayo thermal power plant



**Fig. 14** Estimated N<sub>2</sub>O emissions between 2016–2020 from the Mbalmayo thermal power plant



Figures 12, 13 and 14 show the emission values for the various GHGs, particularly CO<sub>2</sub> emissions, CH<sub>4</sub> emissions and N<sub>2</sub>O emissions from combustion in the Wartsila Vasa 18V32LN engines installed in the Mbalmayo thermal power plant between 2016 and 2020. We note that these different GHGs show fluctuations similar to those presented in the analysis of electricity generated between 2016–2020 per month, as illustrated in Fig. 8. To this end, we present the cumulative analysis of these different figures because they are consistent

with the work of (Yu et al., 2008; Dongmei, 2012; Seutche et al., 2015; Beny et al., 2018).

The maximum and minimum concentrations observed over these five years, combined with the consumption of the fuel used or energy production and all its components, lead us to assert that in 2016, 2017, 2018, 2019 and 2020 the atmosphere has not ceased to be affected by emissions that contribute to the destruction of the ozone layer. In 2019 and 2020, the atmosphere continued to suffer emissions

that contribute to the destruction of the ozone layer. We had 831.52 kg in January; 2105.916 kg in January and 421.18 kg in January during 2016; 831.73 kg in January; 2434.32 kg in January and 486.864 kg in December during 2017; 861.12 kg in March; 1860.39 kg in December and 378.078 kg in December during 2018; 807.84 kg in January; 2364.432 kg in December and 472.886 kg in December during 2019; 953.40 kg in January; 2790.441 kg in January and 558.088 kg in December during 2020 as maximum emissions respectively for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O). Minimum emissions are listed as follows: in 2016, 212.01 kg in August; 601.91 kg in January and 421.18 kg in January; in 2017, 223.55 kg in July; 620.541 kg in July and 124.108 kg in July; in 2018, 115.66 kg in July; 338.523 kg in July and 67.705 kg in July; in 2019, 263.63 kg in July; 771.603 kg in August and 159.601 kg in August; in 2020, 133.98 kg in June; 325.206 kg in September and 487.70 kg in September for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions, respectively.

In the same analytical context, the Mbalmayo thermal power station emits an average of 3711.54 kg of CO<sub>2</sub> into the atmosphere over five years, for a contribution of 742.31 kg per year, 61.86 kg per month and 2.06 kg per day. Whatever we do, and given the quantity of emissions, we can say that the Mbalmayo thermal power station is a unit of contribution to the destruction of the environment.

#### Evaluation of certain parameters during the evolution of the concentration

The estimate of greenhouse gas emissions during the production of electrical energy from HFO and LFO from 2016 to 2020 has been analysed with precision. The contribution of its various gases to the environment is a potential problem to be analysed. With more reliable models having very good precision on the quality of the result obtained from the predicted concentration, in a precise domain based on certain parameters such as the temperature of the greenhouse gases, the height of the chimney, the diameter of the chimney, and the speed of the release, the new GA-Gaussian coupling model, evaluates and makes a prediction on the concentration of the GHG to give the mitigation measures.

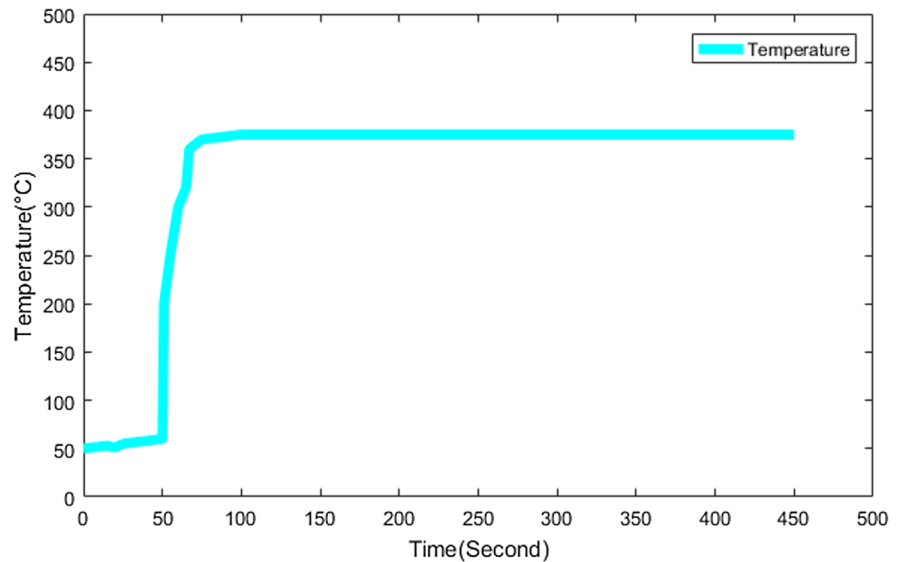
#### Gas temperature inside the chimney

The chimney at the Mbalmayo power station is 32 m high. When the engines are running, the GHGs produced by combustion are discharged up the chimney to prevent spontaneous inhalation by company employees and local residents. The flue gas temperature measurements were carried out during the actual operation of the generators when all the precautions had been taken into account. To make them effective, they were carried out in the machine room by placing a Testoterm (gas temperature measurement device) inside the exhaust pipes coming from the generator combustion chambers. The temperatures obtained for the first 450 seconds between the generator response time and the operating time range from 49.1 °C to 375.0 °C rounded off. The variation in the temperature of the GHGs (Fig. 15) inside the chimney is shown below.

Figure 15 shows that the temperature of the GHGs in the chimney at the start-up of the Wart-silla Vasa 18V32LN generating sets at the Mbalmayo thermal power station is 49.1 °C. This temperature corresponds to time  $t = 0$  seconds, which is the time for which the operators start the generators. Between 0 s and 50 s, the temperature of the GHGs in the chimney does not increase considerably; it changes very little and reaches 61.0 °C. This justifies the response time of the engines, since the fuel has not yet undergone sufficient combustion for the GHGs to escape and the fuel–air ratio is less than 0.335. Between 61 s and 75 s, the temperature of the greenhouse gases in the chimney increases exponentially until it reaches a value of 370.0 °C, which means that the fuel–air ratio is practically 0.335. Between 75 s and 95 s, the temperature of the greenhouse gases varies slightly between 370 °C and 374 °C. Finally, from the 96th second, the temperature of the GHGs in the chimney no longer changes, but rises to 375.0 °C until the operators stop the engines completely. This would mean that the fuel–air ratio is greater than 0.335.

We can therefore confirm that the average temperature of greenhouse gases inside the chimney for good combustion is 375.0 °C. The influence of flue gas temperature (Fig. 16) on changes in GHG concentration in the stack over time has been analysed, and the result obtained is satisfactory in the light of the literature.

**Fig. 15** Temperature of greenhouse gases inside the chimney



**Fig. 16** Influence of flue gas temperature on changes in GHG concentration in the stack

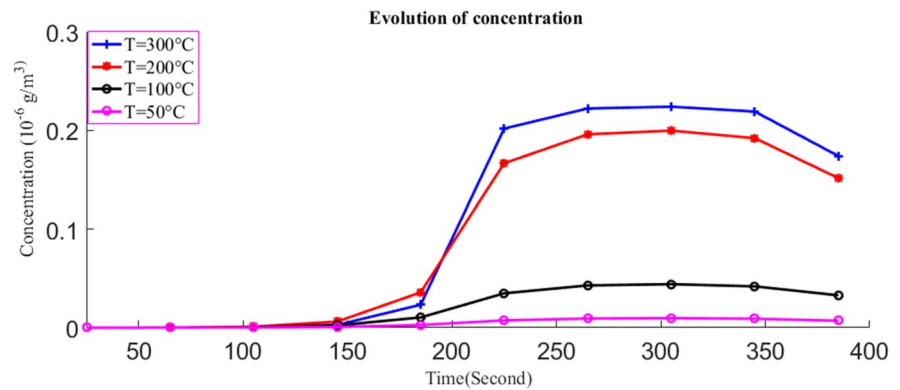


Figure 16 shows the evolution of the GHG concentration as a function of time in the stack for different temperature levels. It is therefore important to observe that these four temperature values evaluate the rapid evolution of the concentration of pollutants in the stack. We can see that the higher the temperature of the GHG, the faster the GHG is released into the atmosphere, and the lower the temperature, the slower the pollutant is released.

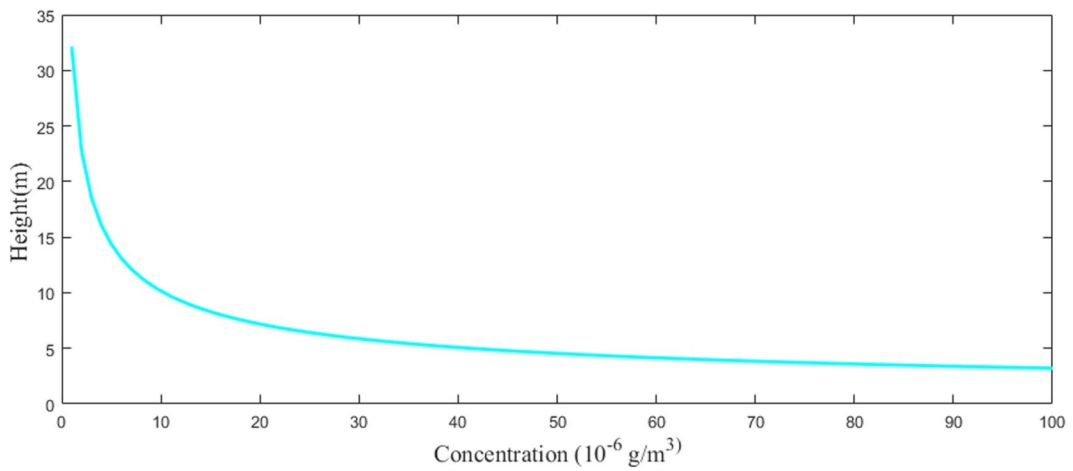
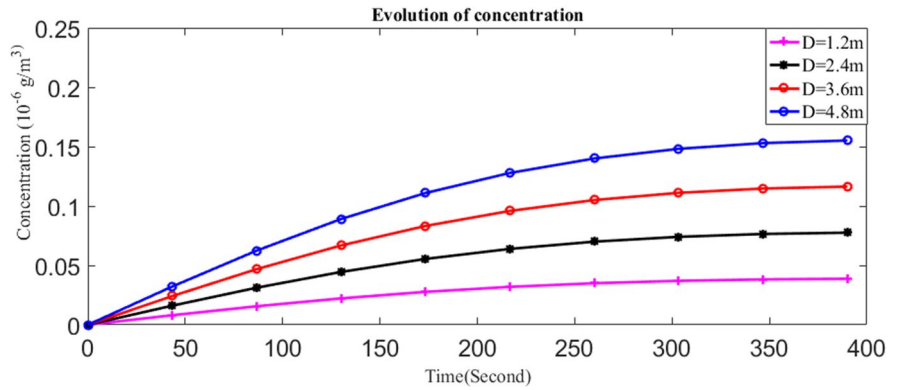
*Influence of chimney diameter and height on changes in GHG concentration*

The use of GA-Gaussian coupling here involves a method for assessing pollutant concentrations in a local study in order to reduce the impact on the surrounding population by proposing mitigation

measures. To better protect the local population, it would be very important to evaluate certain direct parameters on the evolution of the concentration in the stack. It was possible to analyse the influence of stack diameter (Fig. 17) and stack height (Fig. 19) on changes in GHG concentration, and another analysis of the decrease in stack height as a function of GHG concentration (Fig. 18) showed the importance of stack height in the release of GHGs into the atmosphere. Because of this increase in concentration, which is contrary to the desired situation, this parameter is not taken into account in detail, as it has no added value for this research work Fig. 19.

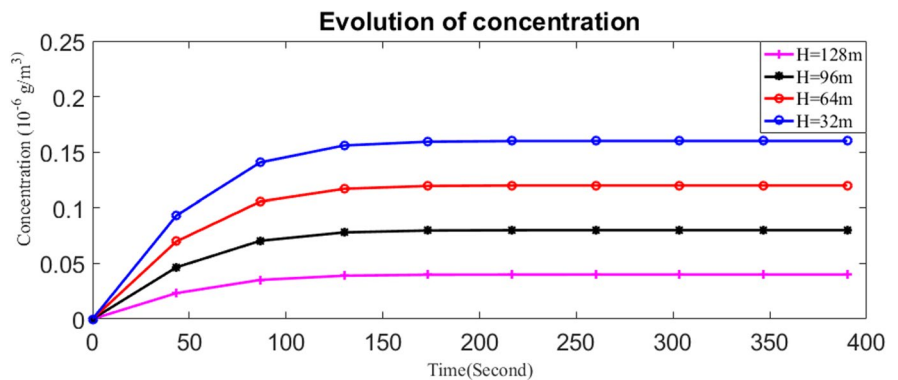
Figure 17 shows the changes in GHG concentration for four stack diameter levels: 1.2 m, 2.4 m, 3.6 m and 4.8 m. It could be seen that, as the diameter increases, the GHGs are released more rapidly

**Fig. 17** Influence of stack diameter on GHG concentration



**Fig. 18** Decline in stack height as a function of GHG concentration

**Fig. 19** Influence of stack height on GHG concentration



into the atmosphere. Increasing the diameter of the chimney therefore encourages the rapid release of the GHGs into the atmosphere. At the same time, decreasing the diameter of the chimney discourages

the release of emissions into the atmosphere and an increase in concentration.

The height parameter evaluated here makes it possible to optimise greenhouse gas emissions. Figure 17

shows the evolution of the concentration of GHGs inside the stack for four different heights: 32 m, 64 m, 96 m and 124 m. The importance of the analysis of this evolution of the concentration of GHG allows us to observe that, for a certain number of values of the height of the chimney higher, we have a very considerable reduction of the local impact. Increasing the height of the chimney favours a decrease in the concentration of GHGs and therefore facilitates the dispersion of GHGs at the chimney outlet. With each increase in height, the observed concentration of GHGs decreases, reaching a value of  $0.04 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ . For heights of 32 m, 64 m, 96 m and 128 m, we respectively observed concentration values of  $0.17 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ ,  $0.12 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ ,  $0.08 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$  and  $0.04 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ . At these different heights, the percentages of reduction were 32.00%, 50.40%, 32.00%, 60.00% and 84.00%, respectively, compared with the local level. Figure 16, simulated from Eq. (8), shows the impact of concentration on stack height. We can see that as stack height decreases, GHG concentration increases. Thus, reducing the height of the stack when a thermal power plant is installed does not favour the attenuation of pollutants from the plant. Hence the importance of releasing GHGs as high as possible into the atmosphere to avoid local pollution, despite the fact that the problem will always remain at regional and continental levels, which is in line with the work of Zair et al. (2016).

## Conclusion

This paper presents a new model for estimating greenhouse gas emissions by combining the optimization of genetic algorithms with the Gaussian model. The coupling of an algorithm and the Gaussian model were used to estimate GHG emissions during the combustion of diesel in the generators of the Mbalmayo thermal power plant and to observe the evolution of GHG emission concentrations estimated in the stack. Experimental work was carried out at the Mbalmayo thermal power station to record the volume of fuel oil consumed. This enabled us to obtain the quantity of energy produced by the thermal power station during the period 2016–2020. The energy produced, the emissions factors, the type of fuel used, the type of engine used, the characteristics of the fuel used and

the indices of the fuel oil used enabled us to numerically estimate the quantity of greenhouse gases resulting from the combustion of diesel in Warsila Vasa 18V32LN engines. The GA-Gaussian model was compared with the Lagrangian and Gaussian models for validation and was found to be more accurate and efficient than the Gaussian model because the Lagrangian model is a regional study model. Using the new model, the results obtained show that the average emissions per month emitted in kilograms (kg) of GHGs by the Mbalmayo thermal power plant are: 526 kg for carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ); 971.41 kg for methane ( $\text{CH}_4$ ) and 309.41 kg for nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ), for an average monthly energy production of 6058.12 kWh. The height and diameter of the chimney were evaluated. For stack heights of 32 m, 64 m, 96 m and 128 m, the respective percentages of reduction in GHG concentration are 32.00%, 50.40%, 32.00%, 60.00% and 84.00% relative to the local level. Therefore, increasing the height of the chimney favours the reduction of GHGs in the chimney. The reduction in the diameter of the chimney hinders the release of emissions into the atmosphere and an increase in concentration, so this parameter will not be taken into account too much, since it does not have a pure value in our research. At a time when the whole world is striving to combat atmospheric pollution, we are proposing, as measures to mitigate GHG emissions into the atmosphere, the pre-treatment of fuels before they are injected into engines and the replacement of certain plant accessories that no longer meet current environmental standards. As mitigation measures, we also recommend increasing the height of the chimney, maintaining a safety distance of 400 m from the plant for local residents, and switching to renewable energies. For the sake of future generations and to effectively combat climate change, these various measures could be applied in all plants emitting greenhouse gases into the atmosphere throughout Cameroon and around the world.

**Abbreviations** CH<sub>4</sub>: Methane; CO<sub>2</sub>: Carbon dioxide; Eneo: Energy of Cameroon; HFO: Heavy fuel oil; IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change; GHG: Greenhouse gases; LFO: Light fuel oil; MatLab: Matrix Laboratory; MTPP: Mbalmayo Thermal Power Plant;

## MinTransport: Ministry of Transport; N<sub>2</sub>O: Nitrous oxide; SIN: South Interconnected Network

**Acknowledgments** This work was supported by the University of Yaoundé I - Cameroon. The work carried out in the framework of this draft paper was also supported by the physics laboratory of the Ecole Normale Supérieure de Yaounde under the supervision of Professor BEGUIDE BONOMA (Head of the physics department of this school); by the energy and thermal engineering laboratory of the Ecole National Polytechnique of Maroua under the supervision of Professor NSOUANDELE Jean-Luc. The data was taken by the company in charge of electricity in Cameroon (Eneo) and permission was granted by its former director general Joël Nana Kontchou, in one of its production units (Mbalmayo thermal power plant) supervised by the director of the power plant at the time Guy Thomson. The work of analysis, interpretation, results and writing was done in the Energy, Electrical and Electronic System Laboratory, Research and Training Unit of Physics, University of Yaounde I-Cameroon, during a period of 6 months. The results published here use data generated by the research network: <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.6948521>

**Authors' contributions** **Essombo Essombo Bathelemy**: conceptualisation of the article, data collection, material search, methodology, experimental study, analysis of results, data curation, writing—reviewing and editing and visualisation. **Goune Achille Clovice**: conceptualisation of the article, data collection, material research, methodology, experimental study, analysis of results, data storage, editing and visualisation and project supervision. **Nkongo Essombo Samuel**: writing—reviewing and editing, and visualisation. **Seutche Jean Calvin**: conceptualisation of the article, data collection, material research, methodology, experimental study, analysis of results, data storage, writing—revision and editing and visualisation and project supervision. **Nsouandele Jean Luc**: conceptualisation of the article, data collection, material research, methodology, experimental study, analysis of results, data storage, writing—editing and editing and editing and visualisation and project supervision. **Takembo Ntahkie Clovis**: conceptualisation of the article, data collection, material research, methodology, experimental study, analysis of results, data storage, writing—revision and editing and editing and visualisation and project supervision. **Ben-Bolie Germain Hubert**: conceptualisation of the article, data collection, material research, methodology, experimental study, analysis of the results, data storage, writing—revision and editing and visualisation and project supervision.

**Funding** The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

**Data availability** Data will be made available on request. The results published here use data generated by the research network: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6948521>

### Declarations

**Ethics approval** All authors have read, understood and have complied as applicable with the statement on “Ethical responsibilities of Authors” as found in the Instructions for Authors.

**Ethics approval** Not applicable

**Consent to participate** Not applicable

**Consent for publication** Not applicable

**Competing interests** The authors declare that they have no known competing interests whatsoever or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## References

- ANOR. (2021). *Environnement - Exigences relatives aux rejets atmosphériques*. Agence des Normes et de la Qualité.
- Bellatreche, L., Boukhalfa, K., & Abdalla, H. I. (2006). Une combinaison de génétique et algorithmes de recuit simulés pour la conception d'entrepôts de données physiques. *23e National britannique Conférence sur les bases de données* (pp. 212–219). BNCOD'06.
- Beny, F., Canas, S., Chavanne, M., Deutsch, D., Tuel, L. P., & Alexandre. (2022). *Synthèse du rapport AR6 du GIEC*. The Shifters.
- Beychok, M. (2005). Fundamentals of stack gas dispersion. Récupéré sur <http://www.air-dispersion.com/interest>
- BP. (2019). *BP statistical review of world energy 2019/68th*. Edition, BP. <https://doi.org/10.2307/1907187.35>
- Chen, N., Wang, W., Huang, Y., & Shen, P. (2009). Community-based study on CKD subjects and the associated risk factors. *Nephrology Dialysis Transplantation*, *24*(7), 2117–2123. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfn767>
- Daly, A., & Zannetti, P. (2007). An introduction to air pollution—Definitions, classifications, and history. Ambient air pollution. P. Zannetti, D. Al-Ajmi and S. Al-Rashied. *The Arab School for Science and Technology*, 1–14. Récupéré sur <http://www.envirocomp.org/>
- Dongmei, L. (2012). Air pollutant emissions from coal-fired power plants. *Open Journal of Air Pollution*, *1*(2), 37–41. <https://doi.org/10.4236/ojap.2012.12005>
- Elhoussaine, Z., Aboutadjine, D., & Abderrahim, E. Q. (2008). Complete algorithm for fragmentation in data warehouse. *University of Cambridge*, 537–540.
- Enting, I. G. (2002). Inverse problems in atmospheric constituent transport. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CB099780511535741>
- Essombo, E. B., Deli, G., Seutche, J. C., Goune, A. C., Nsouandele, J. L., & Ben-Bolie, G. H. (2022). Errors estimation in the modelisation inverse of accidental release of greenhouse gases into the atmosphere; application in the reconstruction of the resource terms of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) by combustion in thermal pow. *Journal of Industrial Pollution Control*, *38*(6), 1–12. <https://doi.org/10.4172/0970-2083.006>
- Goldberg, D., & Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine Learning*, 95–99. <https://doi.org/10.1023/A:1022602019183>

- Goune, A. C., Seutche, J. C., & Nsouandele, J. L. (2022). Database of thermal power plant of MBALMAYO CAMEROON (2017–2018–2019–2020–2021) (Microsoft office Excel). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6948521>
- Guangfei, Y., Jian, H., & Xianneng, L. (n.d.). Mining sequential patterns of PM 2.5 Pollution in Three Zones in China. *Journal of Cleaner Production*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.162>
- Hanaa, H., Youssfi, E. k., & Mariam, E. (2013). Hybridization of metaheuristic algorithms in global optimization and their applications. *Rabat: Ecole Mohammadia d'ingenieurs*.
- Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker, J. R. (1982). Handbook on atmospheric diffusion. *Environment, Atmospheric*. <https://doi.org/10.2172/5591108>
- Haupt, S. E., & S, Y. S., & Allen, T. C. (2007). A Genetic Algorithm Method to Assimilate Sensor Data for a Toxic Contaminant Release. *Journal of Computers*, 2(6), 85–93.
- IRSN. (2016). *Suites de l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011: Point de situation en mars 2016*. Institut de la Radioprotection et de la Surêté Nucléaire. Récupéré sur [http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-accidentsnucleaires/accident-fukushima-2011/Pages/sommaire.aspx](http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidentsnucleaires/accident-fukushima-2011/Pages/sommaire.aspx)
- Ivan, K., Mykola, T., Roman, S., & Koval, S. (2022). Estimation of Cs-137 emissions during wildfires and dust storm in Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 using ensemble iterative source inversion method. *Atmospheric Environment*, 4(288), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119305>
- Junjie, L., Yajun, T., Yelin, D., Yueling, Z., & Kechang, X. (2021). Improving the estimation of greenhouse gas emissions from the Chinese coal-to-electricity chain by a bottom-up approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105237>
- Kibong, T. M., Tamba, J. G., & Monkam, L. (2020). Modeling the Dispersion and Atmospheric Mitigation of Pollutants in the Dibamba-Douala Thermal Power Plant. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(3), 102–115. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.83008>
- Lauret, P., Heymes, F., Aprin, L., & Johannet, A. (2016). Atmospheric dispersion modeling using Artificial Neural Network based cellular automata. *Environmental Modelling & Software*, 85, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.001>
- Malode, S., Mohanta, C. J., & Prakash, R. (2022). A review on life cycle assessment approach on thermal power generation. *Materials Today: Proceedings*, 56(2), 791–798. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.258>
- Mesmin, T., & Njilah, I. K. (2001). RISQUE D'INONDATION DANS LA VALLEE DE NYOS. *African Journal of Science and Technology*, 2(2), 50–62.
- MinTransport. (2022). Normales et records météorologiques. *Info Climat*. Récupéré sur <https://www.infoclimat.fr/climatologie>
- Nazari, S., Shalhoseini, O., Sohrabi-Kashani, A., Davari, S., Paydar, R., & Delavar-Moghadam, Z. (2010). Experimental determination and analysis of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*, 35(7), 2992–2998. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.035>
- Noaman, A. Y., & Barker, K. (1999). A Horizontal Fragmentation Algorithm for the Fact Relation in a Distributed Data Warehouse. *Proceedings of the 1999 ACM CIKM International Conference on Information and Knowledge Management, Kansas City, Missouri, USA, November 2–6, 1999*, (pp. 154–161). <https://doi.org/10.1145/319950.319972>
- Noumsi, S., & Tekeu, J. (2001). Dimension Industrielle du développement durable au Cameroun. *Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (ONU/DI)*.
- Oró, E., Gil, A., & Alvaro, d. G., Boer, D., & Cabeza, L. F. (2012). Analyse comparative du cycle de vie des systèmes de stockage d'énergie thermique pour les centrales solaires. *Renewable Energy*, 8, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.008>
- Ouadaogo, A., & Sodre, A. G. (2006). Evaluation en temps réel des rejets gazeux lors du fonctionnement continu d'une centrale thermique diesel. *Journal Africain des Sciences de l'Environnement*, 1, 10–20.
- Ouedraogo, A. (2006a). *Modèle de quantification et de mitigation des rejets atmosphériques d'une centrale thermique diesel*. Université de Ouagadougou.
- Pasquill, F., & Smith, F. (1983). *Atmospheric Diffusion*. Ellis Harwood.
- Penenko, V., Baklanov, A., & Tsvetova, E. (2002). Methods of sensitivity theory and inverse modeling for estimation of source parameters. *Future Generation Computer Systems*(18), 661–671. [https://doi.org/10.1016/S0167-739X\(02\)00031-6](https://doi.org/10.1016/S0167-739X(02)00031-6)
- Piotr, K., & Patrick. (2006). Single-Minded Unlimited Supply Pricing on Sparse Instances. *Atmospheric Environment*, 1093–1102.
- Robertson, L., & Langner, J. (1998). Source function estimate by means of variational data assimilation applied to the ETEX-I tracer experiment. *Atmospheric Environment*, 32(24), 4219–4225. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00176-9)
- Rongxiao, W., Bin, C., Sihang, Q. L., Zhengqiu, Z., & Yiping, W. X. (2018). Hazardous Source Estimation Using an Artificial Neural Network, Particle Swarm Optimization and a Simulated Annealing Algorithm. *Atmosphere*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/atmos9040119>
- Seutche, J. C., Beguide, B., & Jean, L. N. (2015). Assessment of Atmospheric Emission Pollutants from the Thermal Power Plant: Case of Oyom-Abang Yaoundé-Cameroon. *International Journal of Science and Research*, 6, 391, 2319–7064. <https://doi.org/10.21275/ART20171472>
- Seutche, J. C., Jean, L. N., Njingti-Nfor, & Tamba, J. G. (2019). Geographical mapping and modelling of noise pollution from industrial motors: a case study of the Mbalmayo Thermal Power Plant in Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7940-z>
- Sharan, Sapna, & Mbbs, & Dnb, M. (2009). June). Late-onset bleb infections: Prevalence and risk factors. *Canadian Journal of Ophthalmology*, 44, 279–283.
- Spork, C., Chavez, A., Gabarrell, D. X., Patel, M., & Mendez, V. (2014). Increasing Precision in Greenhouse Gas Accounting Using Real-Time Emission Factors. *Journal of Industrial Ecology*, 19(3), 380–390. <https://doi.org/10.1111/jiec.12193>

- Tarek, K., Safa, M., Nizar, B. H., Tarek, A., & Roger, G. (2016). Estimation of fugitive landfill methane emissions using surface emission monitoring and Genetic Algorithms optimization. *Waste Management*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.024>
- Tchatat, G. (2021). *Final Report Cameroon*. PNUD.
- Wang, R., Chen, B., Qiu, S., Ma, L., Zhu, Z., Wang, Y., & Qiu, X. (2018). Hazardous Source Estimation Using an Artificial Neural Network, Particle Swarm Optimization and a Simulated Annealing Algorithm. *Atmosphere*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/atmos9040119>
- Winiarek, V., Bocquet, M., Saunier, O., & Mathieu, A. (2012). Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant. *Journal of Geophysical Research*, 117. <https://doi.org/10.1029/2011JD016932>.
- Yu, Z., Shuxiao, W., Lei, D., Yu, L., Pengfei, C., & Jiming, H. (2008). Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction. *Atmospheric Environment*, 42, 8442–8452. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.021>
- Zair, F., Ouda, A., Ait, M. A., Majdoubi, H., & Mouquali, M. (2016). Simulation numérique de la dispersion des émissions polluantes des cheminées. *4 Congrès AMT'2016*, 1, pp. 1–6.

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.