

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDE I
YAOUNDE I

FACULTÉ DES SCIENCES

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

URFD : Physiques et Applications

E-mail: crfd_stg@uy1.uninet.cm
Site web: www.uy1researchstg.cm



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace – Work – fatherland

THE UNIVERSITY OF
YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

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

URFD : Physics and Applications

E-mail: crfd_stg@uy1.uninet.cm
Web Site: www.uy1researchstg.cm

LABORATOIRE D'ENERGIE, SYSTEMES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

Optimisation et atténuation de la pollution atmosphérique et des nuisances sonores dans les centrales thermiques du Cameroun par la méthode des algorithmes génétiques

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

Option : Energie Et environnement

Par :

SEUTCHE NDIZE Jean Calvin

Matricule : 09W1308

Master en Physique

Sous la Codirection de :

BEGUIDE BONOMA[†]

(Maître de Conférences)

Université de Yaoundé 1, Cameroun

BEN BOLIE Germain Hubert

(Professeur)

Université de Yaoundé 1, Cameroun

NSOUANDELE Jean Luc

(Maître de Conférences)

ENSP/Université de Maroua, Cameroun

Année : 2021





DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THÈSE DE
DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur NDOUGSA MBARGA Théophile et Professeur NDJAKA Jean-Marie B. Université de Yaoundé I, respectivement Examineur et Président du jury de la Thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur SEUTCHE NDIZE Jean Calvin, Matricule 09W1308, préparée sous la codirection du Professeur NOUAYOU Robert, intitulée : « *OPTIMISATION ET ATTENUATION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE ET DES NUISANCES SONORES DANS LES CENTRALES THERMIQUES DU CAMEROUN PAR LA METHODE DES ALGORITHMES GENETIQUES* », soutenue le **Mardi 11 mai 2021**, en vue de l'obtention du grade de Docteur/Ph.D en Physique, Spécialité **Physique de l'Environnement**, Option **Energie 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 **31 MAY 2021**

Examineur


Pr. NDOUGSA MBARGA Théophile

Le Président du jury


Ndjaka Jean-Marie
Bienvenu
Professeur

Le Chef de Département de Physique




Ndjaka Jean-Marie
Bienvenu
Professeur

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I Faculté des Sciences Division de la Programmation et du Suivi des Activités Académiques		THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I Faculty of Science Division of Programming and Follow-up of Academic Affairs
LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS		LIST OF PERMANENT TEACHING STAFF

ANNÉE ACADEMIQUE 2019/2020
 (Par Département et par Grade)
DATE D'ACTUALISATION 12 Juin 2020

ADMINISTRATION

DOYEN : TCHOUANKEU Jean- Claude, *Maitre de Conférences*
VICE-DOYEN / DPSAA : ATCHADE Alex de Théodore, *Maitre de Conférences*
VICE-DOYEN / DSSE : AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, *Professeur*
VICE-DOYEN / DRC : ABOSSOLO Monique, *Maitre de Conférences*
Chef Division Administrative et Financière : NDOYE FOE Marie C. F., *Maitre de Conférences*
Chef Division des Affaires Académiques, de la Scolarité et de la Recherche DAASR : MBAZE MEVA' A Luc Léonard, *Professeur*

1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (38)

N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
3	FOKOU Elie	Professeur	En poste
4	KANSCI Germain	Professeur	En poste
5	MBACHAM FON Wilfried	Professeur	En poste
6	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	Chef de Département
7	NINTCHOM PENLAP V. épouse BENG	Professeur	En poste
8	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste

9	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste
10	ATOGHO Barbara Mma	Maître de Conférences	En poste
11	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste
12	BELINGA née NDOYE FOE M. C. F.	Maître de Conférences	Chef DAF / FS
13	BOUDJEKO Thaddée	Maître de Conférences	En poste
14	DJUIDJE NGOUNOUE Marcelline	Maître de Conférences	En poste

15	EFFA NNOMO Pierre	Maître de Conférences	En poste
16	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
17	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
18	NGUEFACK Julienne	Maître de Conférences	En poste
19	NJAYOU Frédéric Nico	Maître de Conférences	En poste
20	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	Inspecteur de Service MINESUP
21	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste

22	AKINDEH MBUH NJI	Chargé de Cours	En poste
23	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
24	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
25	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Chargée de Cours	En poste
26	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
27	EWANE Cécile Anne	Chargée de Cours	En poste
28	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
29	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste
30	KOTUE KAPTUE Charles	Chargé de Cours	En poste
31	LUNGA Paul KEILAH	Chargé de Cours	En poste
32	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargée de Cours	En poste
33	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Chargée de Cours	En poste
34	PECHANGO NSANGO Sylvain	Chargé de Cours	En poste
35	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste

36	MBOUCHE FANMOE Marceline Joëlle	Assistante	En poste
37	OWONA AYISSI Vincent Brice	Assistant	En poste
38	WILFRIED ANGIE Abia	Assistante	En poste

2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (48)

1	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	<i>VICE-DOYEN / DSSE</i>
2	BILONG BILONG Charles-Félix	Professeur	Chef de Département
3	DIMO Théophile	Professeur	En Poste

4	DJIETO LORDON Champlain	Professeur	En Poste
5	ESSOMBA née NTSAMA MBALA	Professeur	<i>Vice Doyen/FMSB/UYI</i>
6	FOMENA Abraham	Professeur	En Poste
7	KAMTCHOUING Pierre	Professeur	En poste
8	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
9	NJIOKOU Flobert	Professeur	En Poste
10	NOLA Moïse	Professeur	En poste
11	TAN Paul VERNYUY	Professeur	En poste
12	TCHUEM TCHUENTE Louis Albert	Professeur	<i>Inspecteur de service Coord.Progr./MINSANTE</i>
13	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	<i>En poste</i>

14	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
15	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
16	DZEUFJET DJOMENI Paul Désiré	Maître de Conférences	En poste
17	JATSA BOUKENG Hermine épouse MEGAPTCHÉ	Maître de Conférences	En Poste
18	KEKEUNOU Sévilor	Maître de Conférences	En poste
19	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
20	MONY Ruth épouse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
21	NGUEGUIM TSOFAK Florence	Maître de Conférences	En poste
22	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste

23	ALENE Désirée Chantal	Chargée de Cours	En poste
26	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
27	BELLET EDIMO Oscar Roger	Chargé de Cours	En poste
28	DONFACK Mireille	Chargée de Cours	En poste
29	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
30	GOUNOUE KAMKUMO Raceline	Chargée de Cours	En poste
31	KANDEDA KAVAYE Antoine	Chargé de Cours	En poste

32	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Chargé de Cours	En poste
33	MAHOB Raymond Joseph	Chargé de Cours	En poste
34	MBENOUN MASSE Paul Serge	Chargé de Cours	En poste
35	MOUNGANG Luciane Marlyse	Chargée de Cours	En poste
36	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
37	NGOUATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste
38	NGUEMBOK	Chargé de Cours	En poste
39	NJUA Clarisse Yafi	Chargée de Cours	Chef Div. UBA
40	NOAH EWOTI Olive Vivien	Chargée de Cours	En poste
41	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
42	TAMSA ARFAO Antoine	Chargé de Cours	En poste
43	YEDE	Chargé de Cours	En poste

44	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Assistant	En poste
45	ESSAMA MBIDA Désirée Sandrine	Assistante	En poste
46	KOGA MANG DOBARA	Assistant	En poste
47	LEME BANOCK Lucie	Assistante	En poste
48	YOUNOUSSA LAME	Assistant	En poste

3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (33)

1	AMBANG Zachée	Professeur	Chef Division/UYII
2	BELL Joseph Martin	Professeur	En poste
3	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	En poste
4	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
5	YOUMBI Emmanuel	Professeur	Chef de Département
6	ZAPFACK Louis	Professeur	En poste

7	ANGONI Hyacinthe	Maître de Conférences	En poste
8	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
9	KENGNE NOUMSI Ives Magloire	Maître de Conférences	En poste
10	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste
11	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	CT/ MINESUP
12	MBOLO Marie	Maître de Conférences	En poste
13	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	CE / MINRESI
14	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Maître de Conférences	En poste

15	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	En poste
16	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste
17	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste

18	DJEUANI Astride Carole	Chargé de Cours	En poste
19	GOMANDJE Christelle	Chargée de Cours	En poste
20	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargé de Cours	En poste
21	MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel	Chargé de Cours	En poste
22	NGALLE Hermine BILLE	Chargée de Cours	En poste
23	NGOUO Lucas Vincent	Chargé de Cours	En poste
24	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargé de Cours	En poste
25	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargé de Cours	En poste
26	ONANA JEAN MICHEL	Chargé de Cours	En poste

27	GODSWILL NTSOMBAH NTSEFONG	Assistant	En poste
28	KABELONG BANAHO Louis-Paul-Roger	Assistant	En poste
29	KONO Léon Dieudonné	Assistant	En poste
30	LIBALAH Moses BAKONCK	Assistant	En poste
31	LIKENG-LI-NGUE Benoit C	Assistant	En poste
32	TAEDOUNG Evariste Hermann	Assistant	En poste
33	TEMEGNE NONO Carine	Assistant	En poste

4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (34)

1	AGWARA ONDOH Moïse	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2	ELIMBI Antoine	Professeur	En poste
3	Florence UFI CHINJE épouse MELO	Professeur	<i>Recteur Univ.Ngaoundere</i>
4	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Ministre Chargé de Miss.PR</i>
5	NANSEU Njiki Charles Péguy	Professeur	En poste
6	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
7	NGOMO Horace MANGA	Professeur	<i>Vice Chancellor/UB</i>
8	NDIKONTAR Maurice KOR	Professeur	<i>Vice-Doyen Univ. Bamenda</i>
9	NENWA Justin	Professeur	En poste
10	NGAMENI Emmanuel	Professeur	<i>DOYEN FS UDs</i>

11	BABALE née DJAM DOUDOU	Maître de Conférences	<i>Chargée Mission P.R.</i>
12	DJOUFAC WOUMFO Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
13	EMADACK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
14	KAMGANG YOUBI Georges	Maître de Conférences	En poste
15	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
16	KONG SAKEO	Maître de Conférences	En poste
17	NDI NSAMI Julius	Maître de Conférences	En poste
18	NJIOMOU C. épouse DJANGANG	Maître de Conférences	En poste
19	NJOYA Dayirou	Maître de Conférences	En poste

20	ACAYANKA Elie	Chargé de Cours	En poste
21	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Chargé de Cours	CS/ ENS Bertoua
22	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Chargé de Cours	En poste
23	KENNE DEDZO GUSTAVE	Chargé de Cours	En poste
24	KOUOTOU DAOUDA	Chargé de Cours	En poste
25	MAKON Thomas Beauregard	Chargé de Cours	En poste
26	MBEY Jean Aime	Chargé de Cours	En poste
27	NCHIMI NONO KATIA	Chargé de Cours	En poste
28	NEBA nee NDOSIRI Bridget NDOYE	Chargée de Cours	CT/ MINFEM
29	NYAMEN Linda Dyorisse	Chargée de Cours	En poste
30	PABOUDAM GBAMBIE A.	Chargée de Cours	En poste
31	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Chargé de Cours	En poste
32	NJANKWA NJABONG N. Eric	Assistant	En poste
33	PATOUOSSA ISSOFA	Assistant	En poste
34	SIEWE Jean Mermoz	Assistant	En Poste

5- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (35)			
1	DONGO Etienne	Professeur	Vice-Doyen
2	GHOGOMU TIH Robert Ralph	Professeur	Dir. IBAF/UDA
3	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	Chef de Département UDS
4	NKENGACK Augustin Ephrem	Professeur	Chef de Département
5	NYASSE Barthélemy	Professeur	En poste
6	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	<i>Directeur/ MINESUP</i>

7	WANDJI Jean	Professeur	En poste
8	Alex de Théodore ATCHADE	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DPSAA
9	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
10	FOLEFOC Gabriel NGOSONG	Maître de Conférences	En poste
11	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste
12	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
13	KEUMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
14	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
15	MBAZOA née DJAMA Céline	Maître de Conférences	En poste
16	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
17	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	Chef Service/MINESUP
18	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	Sous/Direct. MINERESI
19	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	En poste
20	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
21	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
22	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	<i>Doyen /FS/ UYI</i>
23	TIH née NGO BILONG E. Anastasie	Maître de Conférences	En poste
24	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste

25	AMBASSA Pantaléon	Chargé de Cours	En poste
26	KAMTO Eutrophe Le Doux	Chargé de Cours	En poste
27	MVOT AKAK CARINE	Chargé de Cours	En poste
28	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
29	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
30	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Chargée de Cours	En poste
31	SIELINOU TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste
32	TAGATSING FOTSING Maurice	Chargé de Cours	En poste
33	ZONDENDEGOUMBA Ernestine	Chargée de Cours	En poste

34	MESSI Angélique Nicolas	Assistant	En poste
35	TSEMEUGNE Joseph	Assistant	En poste

6- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (27)

1	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	<i>Chef Div. MINESUP</i>
2	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	<i>Chef Dpt ENS/Chef IGA. MINESUP</i>

3	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
---	---------------	-----------------------	----------

4	AMINOU Halidou	Chargé de Cours	<i>Chef de Département</i>
5	DJAM Xaviera YOUH - KIMBI	Chargé de Cours	En Poste
6	EBELE Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
7	KOUOKAM KOUOKAM E. A.	Chargé de Cours	En poste
8	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
9	MOTO MPONG Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
10	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste
11	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	En poste
12	MONTHÉ DJIADEU Valéry M.	Chargé de Cours	En poste
13	OLLE OLLE Daniel Claude Delort	Chargé de Cours	C/D Enset. Ebolowa
14	TINDO Gilbert	Chargé de Cours	En poste
15	TSOPZE Norbert	Chargé de Cours	En poste
16	WAKU KOUAMOU Jules	Chargé de Cours	En poste

17	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
18	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Assistant	En poste
19	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Assistant	En poste
20	HAMZA Adamou	Assistant	En poste
21	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Assistant	En poste
22	MAKEMBE. S. Oswald	Assistant	En poste
23	MESSI NGUELE Thomas	Assistant	En poste
24	MEYEMDOU Nadège Sylvianne	Assistante	En poste
25	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste

7- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (30)

1	EMVUDU WONO Yves S.	Professeur	<i>Inspecteur MINESUP</i>
---	---------------------	------------	-------------------------------

2	AYISSI Raoult Domingo	Professeur	Chef de Département
3	KIANPI Maurice	Maître de Conférences	En poste
4	MBANG Joseph	Maître de Conférences	En poste
5	MBELE BIDIMA Martin Ledoux	Maître de Conférences	En poste
6	NKUIMI JUGNIA Célestin	Maître de Conférences	En poste
7	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	<i>Chef service des programmes & Diplômes</i>
8	MBEHOU Mohamed	Maître de Conférences	En poste
9	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	Directeur/AIMS Rwanda
10	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste

11	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	Chef Cellule MINPLAMAT
12	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
13	DJIADEU NGAHA Michel	Chargé de Cours	En poste
14	DOUANLA YONTA Herman	Chargé de Cours	En poste
15	FOMEKONG Christophe	Chargé de Cours	En poste
16	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
17	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
18	MENGUE MENGUE David Joe	Chargé de Cours	En poste
19	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
20	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
21	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
22	TAKAM SOH Patrice	Chargé de Cours	En poste
23	TCHANGANG Roger Duclos	Chargé de Cours	En poste
24	TETSADJIO TCHILEPECK M. E.	Chargée de Cours	En poste
25	TIAYA TSAGUE N. Anne-Marie	Chargée de Cours	En poste
26	MBIAKOP Hilaire George	Assistant	En poste
27	BITYE MVONDO Esther Claudine	Assistante	En poste

28	MBATAKOU Salomon Joseph	Assistant	En poste
29	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
30	TCHEUTIA Daniel Duviol	Assistant	En poste

8- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (18)

1	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Département</i>
---	-------------------------	------------	----------------------------

2	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
3	NWAGA Dieudonné M.	Maître de Conférences	En poste
4	NYEGUE Maximilienne Ascension	Maître de Conférences	En poste
5	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
6	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste

7	ASSAM ASSAM Jean Paul	Chargé de Cours	En poste
8	BODA Maurice	Chargé de Cours	En poste
9	BOUGNOM Blaise Pascal	Chargé de Cours	En poste
10	ESSONO OBOUGOU Germain G.	Chargé de Cours	En poste
11	NJIKI BIKOÏ Jacky	Chargée de Cours	En poste
12	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	En poste

13	ESSONO Damien Marie	Assistant	En poste
14	LAMYE Glory MOH	Assistant	En poste
15	MEYIN A EBONG Solange	Assistante	En poste
16	NKOUDOU ZE Nardis	Assistant	En poste
17	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Assistante	En poste
18	TOBOLBAÏ Richard	Assistant	En poste

9. DEPARTEMENT DE PYSIQUE(PHY) (40)

1	BEN- BOLIE Germain Hubert	Professeur	En poste
2	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Professeur	Vice-Recteur UY1
3	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
4	KOFANE Timoléon Crépin	Professeur	En poste

5	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
6	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	Chef de Département
7	NOUAYOU Robert	Professeur	En poste
8	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	<i>Sous Directeur/ MINRESI</i>
9	PEMHA Elkana	Professeur	En poste
10	TABOD Charles TABOD	Professeur	Doyen Univ/Bda
11	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
12	WOAFO Paul	Professeur	En poste

13	BIYA MOTTO Frédéric	Maître de Conférences	DG/HYDRO Mekin
14	BODO Bertrand	Maître de Conférences	En poste
15	DJUIDJE KENMOE épouse ALOYEM	Maître de Conférences	En poste
16	EYEBE FOUDA Jean sire	Maître de Conférences	En poste
17	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
18	HONA Jacques	Maître de Conférences	En poste
19	MBANE BIOUELE César	Maître de Conférences	En poste
20	NANA NBENDJO Blaise	Maître de Conférences	En poste
21	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
22	SAIDOU	Maître de Conférences	MINERESI
23	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
24	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
25	VONDOU Derbetini Appolinaire	Maître de Conférences	En poste
26	WAKATA née BEYA Annie	Maître de Conférences	<i>Sous Directeur/ MINESUP</i>
27	ZEKENG Serge Sylvain	Maître de Conférences	En poste

28	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
29	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
30	ENYEGUE A NYAM épse BELINGA	Chargée de Cours	En poste
31	FOUEDJIO David	Chargé de Cours	Chef Cell. MINADER
32	MBINACK Clément	Chargé de Cours	En poste
33	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Chargé de Cours	En poste

34	MELI'I Joelle Larissa	Chargée de Cours	En poste
35	MVOGO ALAIN	Chargé de Cours	En poste
36	OBOUNOU Marcel	Chargé de Cours	DA/Univ Inter Etat/Sangmalima
37	WOULACHE Rosalie Laure	Chargée de Cours	En poste

38	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Assistant	En poste
39	CHAMANI Roméo	Assistant	En poste
40	TEYOU NGOUPOU Ariel	Assistant	En poste

10- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (43)
--

1	BITOM Dieudonné	Professeur	<i>Doyen / FASA / UDs</i>
2	FOUATEU Rose épouse YONGUE	Professeur	En poste
3	KAMGANG Pierre	Professeur	En poste
4	NDJIGUI Paul Désiré	Professeur	Chef de Département
5	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Professeur	En poste
6	NGOS III Simon	Professeur	DAAC/Uma
7	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
8	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste

9	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen / DRC</i>
10	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	CD/Uma
11	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	<i>CT/ MINIMDT</i>
12	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	CEA/MINRESI
13	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
14	ONANA Vincent Laurent	Maître de Conférences	<i>Chef service Maintenance & du Matériel</i>
15	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	<i>Directeur/Projet Barrage Memve'ele</i>
16	EKOMANE Emile	Maître de Conférences	En poste
17	GANNO Sylvestre	Maître de Conférences	En poste
18	NYECK Bruno	Maître de Conférences	En poste
19	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
20	TEMDJIM Robert	Maître de Conférences	En poste

21	YENE ATANGANA Joseph Q.	Maître de Conférences	<i>Chef Div. /MINTP</i>
22	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>DG/ART</i>
23	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
24	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	En poste
25	ELISE SABABA	Chargé de Cours	En poste
26	ESSONO Jean	Chargé de Cours	En poste
27	EYONG JOHN TAKEM	Chargé de Cours	En poste
28	FUH Calistus Gentry	Chargé de Cours	<i>Sec. D'Etat/MINMIDT</i>
29	LAMILEN BILLA Daniel	Chargé de Cours	En poste
30	MBESSE CECILE OLIVE	Chargée de Cours	En poste
31	MBIDA YEM	Chargé de Cours	En poste
32	METANG Victor	Chargé de Cours	En poste
33	MINYEM Dieudonné-Lucien	Chargé de Cours	<i>CD/Uma</i>
34	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
35	NGO BIDJECK Louise Marie	Chargée de Cours	En poste
36	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
37	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargé de Cours	En poste
38	TCHAKOUNTE J. épouse NOUMBEM	Chargée de Cours	<i>Chef.cell / MINRESI</i>
39	TCHAPTCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
40	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
41	TEMGA Jean Pierre	Chargé de Cours	En poste
42	FEUMBA Roger	Assistant	En poste
43	MBANGA NYOBE Jules	Assistant	En poste

Répartition chiffrée des Enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I

NOMBRE D'ENSEIGNANTS

DÉPARTEMENT	Professeurs	Maîtres de Conférences	Chargés de Cours	Assistants	Total
BCH	9 (1)	13 (09)	14 (06)	3 (2)	39 (18)
BPA	13 (1)	09 (06)	19 (05)	05 (2)	46 (14)
BPV	06 (0)	11 (02)	9 (06)	07 (01)	33 (9)
CI	10 (1)	9 (02)	12 (02)	03 (0)	34 (5)
CO	7 (0)	17 (04)	09 (03)	02 (0)	35(7)
IN	2 (0)	1 (0)	13 (01)	09 (01)	25 (2)
MAT	1 (0)	5 (0)	19 (01)	05 (02)	30 (3)
MIB	1 (0)	5 (02)	06 (01)	06 (02)	18 (5)
PHY	12 (0)	15 (02)	10 (03)	03 (0)	40 (5)
ST	8 (1)	14 (01)	19 (05)	02 (0)	43(7)
Total	69 (4)	99 (28)	130 (33)	45 (10)	343 (75)

Soit un total de **344 (75)** dont :

- Professeurs **68 (4)**
- Maîtres de Conférences **99 (28)**
- Chargés de Cours **130 (33)**
- Assistants **46 (10)**

() = Nombre de Femmes **75**

DEDICACE

Je dédie cette thèse à :

∞ mes parents, **M. NDIZE Jean Baptiste** et **Mme NDIZE Jacqueline**

∞ mon feu Directeur de thèse **Professeur BEGUIDE BONOMA**

REMERCIEMENTS

Rendu au point d'achèvement de ce manuscrit, comme le veut la tradition, de satisfaire au difficile exercice des remerciements, peut-être la tâche la plus ardue car la plus personnelle. Non pas qu'exprimer ma gratitude soit contre ma nature mais, la difficulté tient plutôt dans le fait de n'oublier personne. C'est pourquoi je remercie par avance ceux dont le nom n'apparaît pas dans cet exercice et qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre : ils se reconnaîtront. Toutesfois ce travail a été réalisé grâce aux personnes disposées à qui j'aimerais exprimer toutes ma reconnaissance.

Cette thèse n'aurait jamais vu le jour et n'aurait jamais abouti de son vivant sans un directeur de thèse aussi formidable et Grand homme de sciences que le **Professeur BEGUIDE BONOMA (Maître de Conférences)**, enseignant chercheur au Département de physique de l'Ecole Normale Supérieure de l'Université de Yaoundé 1. Cher Professeur, vous m'avez captiver par votre simplicité et votre analyse méticuleuse dans toutes problématiques, surtout celles liées aux énergies. Vous m'avez accueilli à bras ouvert respectivement au Laboratoire d'Energie, des Systèmes Electriques et Electroniques (LESEE/UY1) et au Laboratoire de Physique Appliqué (LAP/ENS) au moment où j'avais le plus besoin. Grace à vous j'ai repris goût au travail et confiance en moi. D'un point de vue scientifique vous m'avez redirigé pour que je trouve le chemin des experts énergéticiens tel que vous. La réussite de ce travail réside en votre disponibilité à échanger avec moi à tout moment, votre simplicité d'analyse et d'orientation et plus encore la confiance que vous avez accordée pour mener ce projet scientifique. je vous rend un vibrant hommage Professeur en signifiant ici ma profonde reconnaissance et les mots ne suffiront jamais pour vous exprimer ma profonde gratitude.

- Je porte une grande reconnaissance à l'endroit des **Professeurs BEN BOLIE Hubert Germain et NSOUANDELE Jean Luc (M.C)** enseignants respectivement au Département de Physique de l'Université de Yaoundé I et de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de l'Université de Maroua (E.N.S.P/Maroua), qui m'ont accueillis par Codirection suite au décès de mon Directeur. Ils m'ont toujours facilité la tâche face aux difficultés rencontrées pendant les procédures administratives au Centre de Recherche de Formation Doctorale (CRFD) de l'Université de Yaoundé I et surtout pour leurs multiples conseils scientifiques à l'achèvement de cette these.
- Je remercie le **Professeur OWONO OWONO Luc Calvin**, Vice-Recteur Chargé des Enseignements, de la professionnalisation et du développement des Technologies de l'information et de la communication de l'Université de Yaoundé I et par ailleurs

Remerciements

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.
- J'exprime ma gratitude aux enseignants et associés du Laboratoire d'Energie, des Systèmes Electriques et Electroniques (LESEE), notamment les **Professeurs NJOMO Donatien, NGANHOU Jean, TCHINDA René, KUITCHE Alexis, ESSIMBI ZOBO Bernard, BODO Bertrand, MBIYA MOTTO, OBOUNOU Marcel, SIMO Elie et AKANA** pour la qualité des enseignements reçus, leurs conseils et surtout pour leur disponibilité.
- J'exprime toute ma reconnaissance aux membres du jury pour tout le temps précieux qu'ils ont bien voulu sacrifier afin d'examiner ce présent travail.
- A la solide équipe de recherche formée par le **Professeur BEGUIDE BONOMA** constituée des Professeurs **MONKAM Louis (M.C), NSOUANDELE Jean Luc (M.C), TAMBA Jean Gaston (M.C)**, du **Dr SIMO Merlin**, Des Doctorants **MANA MBA, MAHAMAT KHER, CHAMGA, MAGOUA, MVUH, EDOUMA, DJOUMESSI, SOKOM, TCHINAVANG, KAMDEM, LATCHIBA WAKIANG, POMKAP, NOUMBISSI, ESSOMBO, GOUNE** et tous les cadets de l'équipe, qu'elle trouve ici ma profonde gratitude pour l'ambiance et la collaboration constante tout au long de l'élaboration de ce travail.
- Ma reconnaissance va aussi à l'endroit du Département de physique de l'ENS/UY1 sous la houlette de son Chef de département le **Professeur OWONO OWONO Luc Calvin**, les **Professeurs NDOUGSA MBARGA Théophile, KENFACK Aurélien (M.C), OWONA ANGUE Marie Louise (M.C), MUKAM FOTSING† (M.C), ATANGANA Jacques (M.C)** , les **Docteurs NJINGTI NFOR, POKAM, ETINDELE, GNOKAM, BILONG II, NGOUMOU** et les **Assistants FENDZI, BEKONO, BIKANDA, BIKELE, NGOH, DJOKO, OWONO olivier** qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude pour l'ambiance et la collaboration constante tout au long de l'élaboration de ce travail.
- Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de la Grande équipe des Classes Scientifiques Spéciales de l'Ecole Normale Supérieure qui m'a accueilli et a facilité mon insertion. Je pense particulièrement aux **Professeurs Nicolas Gabriel ANDIGA, OWONO**

Remerciements

OWONO Luc Calvin, OWONA ANGUE Marie Louise (M.C), Mme ATANGANA (M.C), aux Docteurs SADJA Judit, NJINGTI NFOR, NCHIA, MANGA, et Messieurs KEMEGNE Donat, BEKONO, AWONO, TCHONANG, DELI, SALI.

- Je remercie également les aînés des laboratoires connexes notamment les **Professeurs KOL Guy(M.C), MOUANGUE (M.C), MEYING Arsène (M.C), BODO Bertrand (M.C), et Le Docteur DELI GORON,** pour leurs multiples conseils et encouragements.
- J'exprime ma profonde gratitude à l'endroit de mes mamans tutrices, **Mme BEGUIDE Jeanne et Mme. HAWA MANA ,** qui m'ont encadré et soutenu durant tout mon cursus universitaire par des conseils et prières.
- Je remercie mes Pères tuteurs, **Mr NFANKWE Noel et Mr ZINGUI Alain** pour leurs soutiens multiforme et multiples conseils.
- J'exprime ma reconnaissance à l'endroit de tous **mes collègues de service.**
- Je remercie Messieurs les **Directeurs d'ENEO et D'EDC** et particulièrement les Directeurs des Centrales Thermique et les Chefs Services de quart d'Oyomabang, de Mbalmayo et de Dibamba pour plusieurs stage professionnelles de manutention, maintenance et de collectes de données sur différents sites.
- J'exprime ma reconnaissance à l'endroit de tous les Etudiants du LESEE/UY1 pour leur disponibilités et échanges que nous avons eu. je pense notamment à **ZEPANG, KENFACK, EKANI, GOPGIM, EBENGAI, BISSAI, TCHATCHOUANG, SIEWE, TEDONGMO, SEUKOU, NZOKO, FOTSO, TAYMETA et ABISSEGUE** pour leurs soutiens multiforme et ses multiples conseils ;
- Je ne saurai oublier de remercier tous **mes amis BEGUIDE Cathy, BEGUIDE Audrey, BITOUMOU Leticia, MEKOUME Lionelle, BELOMBE Flore, NONO Vanessa, CHEKIN France, NGA Orelie, RAIHANATOU Altine, BAYIDA, ELLA Sandra, KETCHEM, TSAMO, MEDOU, TSETSAGO, TAGNI, TSAGUE, TANGNING, AMBOMO, GABDOULBE, GUEMETA, YADJIMEN, YIGUI, NGHATCHEU, KENFACK, EBANGA, MENGUE, TABEU, TAGUOUENI, EBODE, MAME MOMO et WONDJE SOSSO Odette.**
- Pour finir, je souhaiterais donner le plus fort des remerciements à ma famille et belle famille. Je pense particulièrement à mes Parents **NDIZE Jean Baptiste et NDIZE Jacqueline, mes frères et sœurs HENDOU Joëlle, YANKEP Valery, KOUOSSEU Andrielle, POMKAP Mony-Gilles, WANDJI Christelle et mon fils SEUTCHE TCHAH Johan.** Vous m'avez toujours soutenu et aidé chaque fois que j'ai eu besoin et c'est grâce à vous que je suis à ce stade. « **L'Eternel est mon berger je ne manquerai de rien** ».

TABLES DES MATIERES

Table of Contents

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
TABLES DES MATIERES	VI
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX	XXI
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	XXIV
RESUME.....	XXIV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : CONTEXTE ET ETAT DE L’ART	5
I.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES CENTRALES THERMIQUES AU CAMEROUN.....	5
I.1.1 Localisation Géographique des Centrale thermique au Cameroun	5
I.1.2 Contexte Écologique et Socioéconomiques.....	7
I.2 SITUATION ENERGETIQUE ACTUEL DU CAMEROUN.....	8
I.2.1 Cadre Institutionnel du secteur de l’énergétique au Cameroun	9
I.2.2 Cadre réglementaire du secteur Énergétique au Cameroun.....	10
I.2.3 Potentiel énergétique camerounais	11
I.3. MECANISME THERMOCHIMIQUE ET PHENOMENE DE DISPERSION DES POLLUANTS DANS L’ATMOSPHERE	14
I.3.1 Aspects physico-chimique de la production d’énergie électrique dans les centrales à fioul	14
I.3.1.1 Fiouls lourds et légers	15
I.3.1.2 Processus de combustion.....	18
I.3.2 Moteurs WARTSILA Vasa et thermodynamique	22
I.3.2.1 Moteur WARTSILA Vasa	22
I.3.2.2. Thermodynamique dans les moteurs Wartsilla Vasa	27
I.3.3 Mécanisme de la dispersion atmosphérique des polluants	32
I.3.3.1 Typologie de dispersion atmosphérique de particules dans l’atmosphère	33
I.3.3.2 Mécanismes physiques phénomène de dispersion atmosphérique.....	35
I.3.3.3. Pollution atmosphérique et éléments chimiques polluants dans l’atmosphère	42
I.3.4 Dispersion atmosphérique : des processus à la modélisation numérique.....	49
I.3.4.1 Formalisme : Équation de chimie-transport	52

I.3.4.2 Les modèles eulériens à grande échelle et à méso-échelle.....	53
I.3.4.3 Les modèles gaussiens	53
I.3.4.2 Les modèles lagrangiens	55
I.3.4.4 Les modèles de mécanique des fluides à l'échelle locale/urbaine	56
I.3.4.5 Autres approches	57
I.4. TECHNIQUES ACTUELLES D'EVALUATION DU BRUIT INDUSTRIEL ET OPTIMISATION DES SITES	58
I.4.1. Techniques d'évaluation du bruit dans les sites industriels.....	58
I.4.1.1 Mesure du bruit	59
I.4.1.2 Instrument de mesure et indice d'estimation du bruit.....	62
I.4.1.3 Evaluation du Bruit	64
I.4.1.4 Évaluation et prévision du bruit industriel	65
I.4.2. Propagation Acoustique et nuisance sonore du milieu récepteur	66
I.4.2.1 Propagation acoustique	66
I.4.2.2 Nuisance sonore et conditions météorologiques du milieu récepteur.....	66
I.4.3 Optimisation des sites industriels	71
I.4.3.1 Généralité	73
I.4.3.2 Méthodes d'optimisation déterministes	76
I.4.3.3 Méthodes d'Optimisation stochastiques.....	77
CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES	85
2.1 MATERIELS ET METHODOLOGIES DE BASE DES INVENTAIRES D'EMISSIONS INDUSTRIELS	85
2.1.1 Inventaires d'émissions atmosphérique issue des sites industrielles	85
2.1.1.1 Méthodes d'évaluation de la consommation du fioul.....	85
2.1.1.2 Méthode d'estimation des émissions de GES hors fluorés.....	87
2.1.1.3 Méthode d'estimation des émissions des polluants.....	89
2.1.2 Inventaires d'émissions sonores issues des sites industriels	95
2.1.2.1 Méthode Empirique	95
2.1.2.2. Méthode Analytique	95
2.1.2.3. Méthodes d'évaluation à proximité des complexes industrielles	101
2.2. METHODOLOGIES DE DISPERSION DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES ET DE LA CARTOGRAPHIES NUISANCES SONORES AUTOURS DES SITES INDUSTRIELS.....	111
2.2.1. Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants	111

2.2.1.1	Formulation mathématique du phénomène de la dispersion atmosphérique	112
2.2.1.2	Hypothèses de validation et choix de la méthode de résolution du modèle mathématique de la dispersion	118
2.2.1.3	Résolution analytique du problème	122
2.2.2	Modélisation des cartes de nuisances sonores.....	130
2.2.2.1	Méthode d'élaboration d'une carte de bruit stratégique	130
2.2.2.2	Hypothèse de données et de modélisation.....	131
2.2.2.3	Protocole.....	131
2.3	METHODOLOGIES D'OPTIMISATION DES SITES INDUSTRIELS : CAS DES ALGORITHMES GENETIQUES	133
2.3.1	Performance acoustique au niveau système.....	133
2.3.2.1	Indice d'affaiblissement acoustique R et indice d'efficacité aux bruits aériens ΔR	133
2.3.2.2	Indice d'efficacité aux bruits de choc ΔL	134
2.3.2.3	Coefficient d'absorption acoustique α	135
2.3.2	Méthodologie des Algorithmes génétiques.....	136
2.3.2.1	Historique et définition	136
2.3.2.2	Structure de l'AG.....	137
2.3.2.3	Paramètres basic et operateurs génétiques d'algorithme	137
2.3.2.4	Éléments d'un algorithme génétique	138
2.3.2	Performance acoustique au niveau système.....	139
2.3.2.1	Indice d'affaiblissement acoustique R et indice d'efficacité aux bruits aériens ΔR	139
2.3.2.2	Indice d'efficacité aux bruits de choc ΔL	140
2.3.2.3	Coefficient d'absorption acoustique α	141
2.3.3	Méthodes d'optimisation des nuisances sonores	142
2.3.3.1	Indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi	144
2.3.3.2	Fréquence de coïncidence et fréquence critique.....	145
2.3.3.3	Isolement d'une paroi	146
2.3.3.2	Choix et implémentation de la fonction qualité.....	146
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS		149
3.1	INVENTAIRE DES EMISSIONS INDUSTRIELS	149
3.1.1	Temps de fonctionnement, production énergétique et consommation.....	149
3.1.1.1	Temps de fonctionnement et production Energétique	149

3.1.1.2 Consommation de fuel.....	155
3.1.2 Emissions atmosphériques issue des sites industriels.....	159
3.1.2.1 Emission comparées des polluants issus de différents moteurs Wartsilla C.T.O... 159	
3.1.2.2 Emission comparées des polluants issus de différents moteurs Wartsilla C.T-DIBAMBA.	164
3.1.3 Emissions sonores issue des sites industriels.....	166
3.1.3.1 Caractérisation des Sites industriels	166
3.1.3.2 Emissions Comparés des nuisances sonores dans les centrales	168
3.2 DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES POLLUANTS ET CARTOGRAPHIE SONORE.....	172
3.2.1 Dispersion atmosphérique des polluants industriels.....	172
3.2.1.1 Dispersion atmosphérique des polluants dans la centrale thermique de Mbalmayo	172
3.2.1.3 Dispersion atmosphérique des polluants dans les centrales thermiques de Dibamba et Oyomabang.....	183
3.2.1.3 Prototype de dispersion à différentes positions dans la direction du vent.....	190
3.2.2 Cartographie sonore des sites industriels.....	191
3.2.2.1 Cartographie sonore et traitement géographique de la CT-Mbalmayo	191
3.2.2.2 Cartographie sonore et traitement géographique de la CT-Dibamba et de la CT-OYO1	195
3.3 OPTIMISATIONS DES SITES INDUSTRIELS.....	199
3.3.1 Performance acoustique au niveau système.....	200
3.3.1.1 Caractéristiques d'absorption	201
3.3.1.2 Temps de réverbération, fréquence d'émission sonore des Planchers, murs composites et plafond	206
3.3.1.3 Indice d'affaiblissement acoustique et épaisseurs des isolants dans la CTO et CTD	211
3.3.2. Méthodes d'Optimisation par Absorption : Cas des algorithmes génétiques	220
3.3.2.1 Optimisation de l'indice d'affaiblissement sur isolant des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : Fréquence sonore = 2256,548 Hz	221
3.3.2.2 Optimisation de l'indice d'affaiblissement sur isolant des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : Fréquence sonore=1124,548 Hz	226
3.3.2.3 Optimisation de l'indice d'affaiblissement sur isolant des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO-CTD: Fréquence sonore= 625Hz.....	231
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	237

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	241
ANNEXES.....	250
LISTE DES PUBLICATIONS.....	277

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cartographie combinée des centrales thermiques au Cameroun (Source : (ENEO, 2018)) 6

Figure 2: Cadre institutionnel du secteur Électrique produit par des sources fossiles et renouvelable (Source : LESEE) 10

Figure 3: Schéma de Régulation de la Sanaga (EDC, LESEE) 12

Figure 4: Cénosphères au microscope électronique (INNOSPEC, Janvier 2012) 18

Figure 5: Disposition Fonctionnelle du moteur Wärtsilä Vasa (EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006)..... 22

Figure 6: Schéma synoptique du procès de production des Moteurs Wartsila et Caterpillar .. 23

Figure 7: Bloc Moteur de configuration V d'un groupe WARTSILA VASA (EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006)..... 24

Figure 8: Principe de fonctionnement d'un moteur diesel en forme de ligne à quatre temps (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011), (Clarke Clarke Detroit Diesel-Allison and Detroit Diesel engines, 2011) 26

Figure 9: Principe de fonctionnement d'un moteur diesel en forme de V à quatre temps (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011), (Clarke Clarke Detroit Diesel-Allison and Detroit Diesel engines, 2011)..... 26

Figure 10: Schéma représentant la distribution des avances et retards à l'ouverture et à la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement (Hussein IBRAHIM et al, Novembre 2006)..... 27

Figure 11:Diagramme de Clapeyron du cycle Diesel idéal (Mathieu Desbazeille, Juillet 2010.) 30

Figure 12: Diagramme pression-volume cycle Diesel réel (Olivier GRONDIN, Décembre 2004.)..... 31

Figure 13: Illustration des trois principales contributions du transport atmosphérique..... 33

Figure 14: Illustration d'une dispersion de panache de cheminées avec différentes hauteurs de cheminées (H. Schmit-Fadhil, 23 novembre. 2010)..... 34

Figure 15: Rose des directions des vents des sites Géo référenciés (0-5 et 5-10 m/s)..... 34

Figure 16: Rejet continu d'un produi (Tudor Florea et Sébastien Caillat, Avril 2008) 35

Figure 17: Profil vertical de température et principales couches de l'atmosphère (William FOTSEU NOUMOYE, 12 juillet 2000)..... 36

Liste des Figures

Figure 18: Profil de température typique aux altitudes moyennes (Grant W. Petty, 4 septembre 2001).....	37
Figure 19: CLA Instable (H. Schmit-Fadhil, 23 novembre. 2010), (N.K.MERZOUK, 02 Mai 2006).....	38
Figure 20: Effet de changement de rugosité sur le profil de vitesse (TURBELIN G., janvier 2000).....	41
Figure 21: Graphique simplifié des différentes échelles spatiales et temporelles qui composent les phénomènes atmosphériques (SOULHAC L., Méjean, P., Perkins, R.J., 2002).....	42
Figure 22: Pourcentage d'émission des principaux polluants par secteur en 2008 (VENDEL F. , avril 2011)	44
Figure 23: Le cycle de vie d'un polluant (Dehlmoun L., 2012).....	45
Figure 24: Analyseurs de fumées	49
Figure 25: Représentation schématique des liens entre réalité physique, développement théorique et simulations informatiques (Pierre LAURET, juin 2014).....	52
Figure 26: Schéma de fonctionnement du modèle de Vendel (VENDEL F. , avril 2011)	57
Figure 27: Analyseurs de niveau sonore génériques	63
Figure 28: Descripteurs de bruit.....	63
Figure 29: Types de sources de bruit.	65
Figure 30 : Constante d'atténuation pour la viscosité en atmosphère I et à 200 C (après l'équation 1.38).....	67
Figure 31: Effet du gradient de température (jour). (Bies D.A. and Hansen C.H., 2009)	68
Figure 32: Gradient de température inversé.....	68
Figure 33: Le gradient moyen de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au sol (A Review of the Influence of Meteorological Conditions on Sound Propagation , 1953)	69
Figure 34: Atténuation due à la végétation	71
Figure 35: Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation (Vincent GARDEUX, 2011).....	73
Figure 36: Optimum local et global(a), Différence entre un optimum global et des optimums locaux(b) (Vincent GARDEUX, 2011).....	74
Figure 37 : Modèle de la boîte noire	75
Figure 38: Méthodes d'optimisation déterministes.....	76
Figure 39: Méthodes d'Optimisation Stochastiques.....	77
Figure 40: Algorithmes génétiques standard.....	81
Figure 41: (a)-Les quatre niveaux d'organisation des AG (b)-Illustration du codage des variables d'optimisation	82

Liste des Figures

Figure 42: Principe de croisement ; (a) croisement en un point (b) croisement en deux points	83
Figure 43: Principe de mutation binaire	83
Figure 44: Installation du compteur en aval de la pompe (Institut Wallon a.s.b.l., 2000)	86
Figure 45: organigramme d'estimation des quantités d'activité non disponibles par niveau géographique (J.P. FONTELLE, 2006)	92
Figure 46: Bilan d'un procédé de combustion industriel dans les moteurs (J.P. FONTELLE, 2006).....	92
Figure 47 : Sonomètre intégrateur DB 300/2 (CTD) et analyseur AR814 (CTM)	95
Figure 48 : Sources secondaire de bruit des ventilateurs	97
Figure 49 : Compresseurs à piston lubrifié série ME/MT conçue par MAUGUERIE	99
Figure 50: Profil de la surface pour des atténuations niveau sol.....	104
Figure 51: Condition d'effet d'écran (ISO, 1996).....	105
Figure 52: Paramètre géométrique d'un écran	105
Figure 53: Effet d'écran par diffraction	106
Figure 54: Diffraction par simple et double écran	107
Figure 55: Surface de réflexion d'un obstacle	108
Figure 56: Distance de propagation d_f à travers la végétation	110
Figure 57: Atténuation en fonction de la distance du site industriel.....	110
Figure 58 : Orientation du vecteur densité d'un courant de diffusion	113
Figure 59 : Illustration de l'élément volumique de diffusion.....	114
Figure 60: Cahier des charges du modèle	119
Figure 61: Distribution Gaussienne dans les directions O_x et O_y	121
Figure 62: sélection du domaine d'étude	122
Figure 63: Illustration de la couche d'inversion (Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes, 2006)	124
Figure 64: Organigramme du programme lier aux polluants (LESEE,2019)	128
Figure 65: Représentation de la solution analytique	130
Figure 66: Software design flowchart for geographical mapping and modelling of noise pollution (LESEE,2019).....	132
Figure 67 : Principe des postes d'essais utilisés pour les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'un système.....	133
Figure 68 : Principe d'un poste d'essai utilisé pour les mesures du niveau de bruit de chocs L_n	134
Figure 69 : Schéma d'une salle réverbérante pour les essais d'absorption acoustique.....	135

Liste des Figures

Figure 70: Schéma de l'algorithme génétique.....	137
Figure 71: Principe de génération	139
Figure 72 : Principe des postes d'essais utilisés pour les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'un système.....	139
Figure 73 : Principe d'un poste d'essai utilisé pour les mesures du niveau de bruit de chocs L_n	140
Figure 74 : Schéma d'une salle réverbérante pour les essais d'absorption acoustique.....	141
Figure 75 : Classifications des actions de réduction du bruit en entreprise	143
Figure 76 : Angle d'émergence et intensité au frontière.....	145
Figure 77 : Principe général des algorithmes génétiques implémentés	147
Figure 78: Temps de fonctionnement groupé par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.....	150
Figure 79: Energie Produite par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.....	150
Figure 80 : Evolution de l'énergie produite et du temps de fonctionnement pour les moteurs M1 et M2	151
Figure 81: Evolution moyenne de la production et du temps de fonctionnement pour les moteurs M3	151
Figure 82: Temps de fonctionnement groupé par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.....	152
Figure 83: Energie produite des moteurs suivant les années 2009, 2010, 2011.	152
Figure 84: Temps de fonctionnement Dibamba groupé par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.....	153
Figure 85: Energie produite à Dibamba groupée par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.....	154
Figure 86: Consommation des moteurs de la CTO par niveau d'activités pour les 36 mois ..	156
Figure 87: Consommation des moteurs de la CTO par compteur volumétriques pour les 36 mois	156
Figure 88: Superposition de la Consommation de HFO des moteurs de la CTO par Niveau d'activités et par compteur volumétrique pour les 36 mois	158
Figure 89: Superposition de la Consommation de HFO des moteurs par Niveau d'activités et par compteur volumétrique de la CT-Dibamba.....	158
Figure 90 : Comparaison des Emission de polluants pour chaque moteur M1	160
Figure 91 : Comparaison des Emission de polluants pour chaque moteur M2.....	161
Figure 92: Comparaison des Emission de polluants pour chaque moteur M3.....	162

Liste des Figures

Figure 93 : Calculated values of acoustic power and pressure per motor (L_w and Le_{aq}) / dB	168
Figure 94 : Evaluation Level of sound power and sound pressure (L_w and Le_{aq}) between motor's / dB	168
Figure 95 : Zones d'exposition sur le site comparé par niveau de Pression sonore	171
Figure 96 : Niveau de Puissance et de Pression Sonores des Principaux équipements Dans les CT-Dibamba et Oyomabang	172
Figure 97: Rosace des vents autour de la CT-Mbalmayo.....	173
Figure 98 : Localisation géographique de la Centrale Thermique de Mbalmayo (CTM) et la réserve forestière de Mbalmayo	174
Figure 99 : Représentation de la solution analytique des dispersions de polluants issue de la source à une distance de 1000m.....	175
Figure 100 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0\text{m.s}^{-1}$ et $x = 0.0$	176
Figure 101 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0\text{m.s}^{-1}$ et $x = 0.0$	177
Figure 102 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0\text{m.s}^{-1}$ et $x = 1199.2$..	177
Figure 103 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u=3.0 \text{ m.s}^{-1}$ et $x = 1199.2$...	178
Figure 104 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0\text{m.s}^{-1}$ et $x = 3999.2$..	178
Figure 105 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0\text{m.s}^{-1}$ et $x = 3999.2$..	179
Figure 106: Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m. s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$	180
Figure 107: Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$	181
Figure 108: Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 14.0 \text{ m. s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$	182
Figure 109: Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$	183
Figure 110 : Rosace des vents autour de la CT-DIBAMBA	183
Figure 111 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD	184
Figure 112 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD	184
Figure 113 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD	185
Figure 114 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD	185

Liste des Figures

Figure 115 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 14.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD	186
Figure 116 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 14.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD	186
Figure 117 : Rosace des vents autours de la CT-OYOMABANG.....	187
Figure 118 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTO	187
Figure 119 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTO	188
Figure 120 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTO	188
Figure 121 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTO	189
Figure 122: Moyenne de la dispersion des polluants suivant l'axe Y en fonction des positions X différentes.....	190
Figure 123: Moyenne de la dispersion des polluants suivant l'axe Z en fonction des positions X différentes.....	190
Figure 124 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de pression acoustique pour des hautes fréquences.....	191
Figure 125 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de pression acoustique pour des basses fréquences.....	192
Figure 126 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de puissance acoustique pour des hautes fréquences	192
Figure 127 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de puissance acoustique pour des hautes fréquences	192
Figure 128: Rosace des vents autours de la CT-Dibamba et de la CT-Oyomabang	195
Figure 129: Cartographie des niveaux d'altitude de la CT-Dibamba et de la CT-Oyomabang	195
Figure 130 : Cartographie en 2D des niveaux de puissance sonore de la CT-Dibamba	196
Figure 131 : Cartographie en 2D des niveaux de puissance sonore de la CT-Oyomabang ...	196
Figure 132 : Cartographie en 2D des niveaux de Pression Acoustique de la CT-Dibamba ..	198
Figure 133: Cartographie en 2D des niveaux de Pression Acoustique de la CT-Oyomabang	198
Figure 134: Coefficients d'absorptions des Matériaux isolant /Ouvrage des sites de la CTO et CTD.....	201

Liste des Figures

Figure 135: Aire d'absorption acoustique équivalente des sites de la CTO-CTD -a.....	202
Figure 136: Aire d'absorption acoustique équivalente des sites de la CTO-CTD -b	203
Figure 137: Fréquence critique en fonction de l'épaisseur des matériaux inorganique : Système masse-ressort-masse	204
Figure 138: Fréquence critique en fonction de l'épaisseur des matériaux organique : Système masse-ressort-masse	205
Figure 139: Temps de Reverbération acoustique equivalent fonction des Fréquence d'émission sonore, appliqué sur différente surfaces organique et en aluminium CTO-CTD.....	206
Figure 140: Temps de Reverbération acoustique Equivalents Fonction des Fréquence d'émission sonore, appliqué sur différente surfaces inorganique CTO-CTD.....	206
Figure 141: Fréquence d'émission sonore des Equipements de la sale des machines CTO-CTD	208
Figure 142: Indice d'affaiblissement des parois en fonction de l'aipaisseur des d'isolant inorganique d'un systémé Masse-Ressort-Masse	209
Figure 143: Indice d'affaiblissement des parois en fonction de l'aipaisseur des d'isolant organique d'un systémé Masse-Ressort-Masse	210
Figure 144: Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Mouton pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores.....	211
Figure 145: Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Mouton pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores.....	212
Figure 146: Indices d'affaiblissements des parois en Métisse pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores	212
Figure 147: Indices d'affaiblissements des parois en Métisse pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores	212
Figure 148: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose sec pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores	213
Figure 149: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose sec pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores	213
Figure 150: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose Humide pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores	214
Figure 151: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose Humide pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores	214
Figure 152: Indices d'affaiblissements des parois en Aluminium pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores	215

Liste des Figures

Figure 153: Indices d'affaiblissements des parois en Aluminium pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores	215
Figure 154: Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Roche pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores.....	216
Figure 155 Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Roche pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores	216
Figure 156: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Cellulaire pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores.....	217
Figure 157: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Cellulaire pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores.....	217
Figure 158: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Bitume pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores	218
Figure 159: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Bitume pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores	218
Figure 160 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Mouton des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	221
Figure 161 : Indice d'affaiblissement sur Metisse des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	221
Figure 162 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose sec des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	222
Figure 163 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose Humide des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	222
Figure 164 : Indice d'affaiblissement sur Aluminium des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	223
Figure 165 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Roche des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	223
Figure 166 : Indice d'affaiblissement sur Beton cellulaire des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	223
Figure 167 : Indice d'affaiblissement sur Beton Bitume des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz	224
Figure 168 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Mouton des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	226
Figure 169 : Indice d'affaiblissement sur Metisse des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	226

Liste des Figures

Figure 170 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose sec des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	227
Figure 171 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de Cellulose humide des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	227
Figure 172 : Indice d'affaiblissement sur Aluminium des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	228
Figure 173 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Roches des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	228
Figure 174 : Indice d'affaiblissement sur Beton Cellulaire des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	228
Figure 175 : Indice d'affaiblissement sur Beton Bitume des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz	229
Figure 176 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Mouton des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz	231
Figure 177 : Indice d'affaiblissement sur Metisse des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz.....	231
Figure 178 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose sec des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz	232
Figure 179 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de Cellulose Humide des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz	232
Figure 180 : Indice d'affaiblissement sur Aluminium des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz.....	233
Figure 181 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Roche des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz.....	233
Figure 182 : Indice d'affaiblissement sur Beton Cellulaire des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz.....	233
Figure 183 : Indice d'affaiblissement sur Beton Bitume des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz.....	234

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Centrales thermiques (LFO) du RIS 2010 (source : EDC, LESEE).....	13
Tableau II: Centrales thermiques (HFO) du RIS 2010 (source : EDC, LESEE).....	13
Tableau III : Centrales thermiques (LFO) du RIN 2010 (source : EDC, LESEE).....	13
Tableau IV : Centrales thermiques (LFO) du RIE 2010 (source : EDC, LESEE).....	13
Tableau V: Caractéristique générales des différents types de carburants (Source: (John Whitaker and SARL WATER KITS SUPPLY, 2008), LESEE)	15
Tableau VI : Valeurs moyennes et plage usuelles des paramètres constituant les fiouls lourds (source : (Jean-Claude GUIBET, septembre 2008))	16
Tableau VII: Méthodes standard de test des caractéristiques (Source : (ASTM International, Resonance Spectroscopy))	17
Tableau VIII: Éléments chimique contenu dans les combustibles industriel.....	19
Tableau IX: Pourcentage massique des éléments composants le fioul provenant d'un dépotage de la SONARA (Raffinerie de LIMBE , SONARA, 2005)	19
Tableau X: Conditions de référence Caractéristiques des moteurs Wartsila Vasa (EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006).....	23
Tableau XI : Récapitulatif des Performances d'un cas de Moteur étudié à la CTO.....	32
Tableau 12: Table 1: Classe de stabilité de Pasquill-Gifford, version simplifiée (Jacques NICOLAS – Flavien CRAFFE , Juillet 2003), (F. Pasquill and F.B. Smith, 1983.)	39
Tableau 13: Classes de rugosité et classification des terrains d'après Davenport (1960), adaptée par Wieringa (1980) en terme de longueur de rugosité Z_0 et révisée par Davenport et al 2000 (The revised Davenport roughness classification for cities and sheltered country, Aug. 2000)	41
Tableau 14: Limite de pollutions pour quelques gaz (HELE P. Ministre, 2005).....	47
Tableau 15: Ambient Air Quality in Thermal Power Plants (in micrograms per cubic meter).....	47
Tableau 16: Les différentes approches de modélisation et leurs échelles associées.	51
Tableau 17: Pouvoir de réchauffement global des GES direct (hors fluorés) (GIEC-a, 2006).....	88
Tableau 18: Valeurs des indices suivant une méthode précise (Bechtel Power Corporation , 2010), (EPA Base Case v.5.13 , 2006) (James E. Staudt et M.J. Bradley , Marc 2011), (Luna Salaver et al , April 2007), (MJ Bradley & Associates, February 2005)	94
Tableau 19: Spécification des fiouls résiduels marins (classe F) (S. WALKER KITS, 2005).....	94
Tableau 20: avantages et inconvénients du modèle gaussien	120
Tableau 21: Valeurs de Briggs	128

Tableau 22: Récapitulatifs des émissions de polluants pour chaque moteur pendant trois ans	162
Tableau 23 : Valeur moyenne annuelle des émissions pour chaque moteur	164
Tableau 24: Characteristics of motors at the Mbalmayo Thermal Plant (CTM)	166
Tableau 25: Caractéristiques des moteurs et auxiliaires dans la salle des Machines (CTO et CTM).....	167
Tableau 26 : Niveaux Annuel de pression sonore equivalent par bande d'octave sur chaque année dansles centrales thermique de Dibamba et d'Oyomabang.....	170
Tableau 27 : Coefficients de diffusion fonction des caractéristiques vents et distance à la source	173
Tableau 28: Surface In Situ pour les Matériaux isolant CTO et CTD	200
Tableau 29: Masse surfacique, Masse volumique et Epaisseur des Isolant dans le bâtiment Sale des Machines CTD-CTO.....	201
Tableau 30: Coefficients d'absorptions des Matériaux isolant /Ouvrage des sites de la CTO et CTD.....	201

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

I- Liste des acronymes

ADEME : L'agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ;

ADN : Acide Désoxyribonucléique ;

AER : Agence d'Électrification Rurale

AES-SONEL ; Société Nationale d'Electricité du Cameroun

AFNOR : Association Française de Normalisation ;

ANAFOR : Agence Nationale d'Appui au développement Forestier

ARSEL : Agence de Régulation du Secteur de l'Électricité

ASTM: American Standard Test Method Atmosphériques ;

BEAC : Banque des États de l'Afrique Centrale

BTS : Basse teneur en soufre ;

BUCREP : Bureau central des Recensements et des Études de la Population

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

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer ;

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique

CLA : Couche Limite Atmosphérique

COV : composés organiques volatils;

COVNM : Composés Volatils Non Méthaniques ;

CRoS : Centre de Recherche Scientifique de Total ;

CSPH : Caisse de Stabilisation des Prix des Hydrocarbures

CSTC : Comité scientifique et Technique des Industries climatiques ;

CT : centrale thermique ;

CTO : Centrale Thermique d'Oyom-Abang

CTM : Centrale Thermique MBALMAYO

CTD : Centrale Thermique DIBAMBA

DEFORPA : Dépérissement des Forêts attribué à la Pollution Atmosphérique ;

DIN: Deutsches Institut für Normung

DSCE : Document de Stratégie pour la Croissance et l'Emploi

DSRP : Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté

EDC: Electricity Development Corporation;

EEA: European Environment Agency;

EED: ETUDES ENGINEERING DEVELOPPEMENT

ENELCAM : Entreprise Nationale d'Electricité du Cameroun ;

EPI : Equipement de protection individuel ;

Équiv.-CO₂: Equivalent-CO₂

FE : Facteur d'Émission.

FET : Facteur d'Equivalence Toxique ;

FIO : Fioul industrielle

FIT : Fioul thermique

FOD ; fioul domestique ;

GES : Gaz à Effet de Serre

GESAC : La German solar Academy Cameroon

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GNL : Gaz Naturel Liquéfié ;

GPL : Gaz de pétrole liquéfié

GPL-C : Gaz de pétrole liquéfié-carburant

GPS: Global Positioning System;

Gt : Gigatonnes

hab : Habitant

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ;

HFO: Fioul Lourd HFO; Heavy Fuel Oil ;

HTS : Haute teneur en soufre ;

INERIS : Institut Nationale de l'Environnement Industriel et des Risques;

IPCC: Guidelines for National GHG Inventories

ISO : International Standardization Organisation

JET : Jet A1

Kero : Kérosène ;

ktep : Kilotonne équivalente pétrole ;

KWh : Kilo Watt heure ;

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

LESSE: Laboratoire d'Énergie, des Système Électrique et Électronique ;

LFO: Fioul léger;

LRE : Laboratoire de Recherche Énergétique ;

MCO : Moindres Carrés Ordinaires

MINEE : Ministère de l'Énergie et de l'Eau

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

MINIMIDT : Ministère de l'Industrie, des Mines et du Développement Technologique

MJ : Méga Joule ;

MT : Moyenne Tension.

NO.SA : NOUMSI Savon

OMD Objectifs du Millénaire pour le Développement

OMINEA : Organisation et Méthodes des Inventaires Nationaux des Émissions

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

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 ;

PIB : Produit Intérieur Brut ;

PM : Matière Particulaire ;

PMB : Poids Mort Bas ;

PME : Petite et Moyenne Entreprise

PMH : Poids Mort Haut ;

PMI : Petite et Moyenne Industrie

POP : Population

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PRP : Potentiel de Réchauffement Planétaire PTV : Parc total des véhicules

RFA : Retard à la Fermeture d'Admission ;

RFE : Retard à la Fermeture d'Echappement ;

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

RIN : Rapport d'Inventaire National

RIN : Réseau Interconnecté Nord.

RIS : Réseau Interconnecté Sud ;

SCDP : Société Camerounaise des Dépôts Pétroliers

SGBC : Société générale des banques du Cameroun

sko: Siège kilomètre offert

SNH: Société Nationale des Hydrocarbures

SO.FA.VIN ; Société de Fabrication du Vin ;

SONARA : Société Nationale de Raffinerie

SRES : Special Report on Emission Scenarios

SUP : Super

TBTS : Très basse teneur en soufre ;

TEP : Tonne Equivalent Pétrole ;

TEQ : Quantité en Equivalence Toxique

TM : Tonne métrique

TPCC : Taux Pondéré de Consommation de Carburant

TS: Trend Stationary

UE : Union Européenne

VG : Véhicule gasoil

VKP : Véhicules-Kilomètre Parcours

VS : Véhicule super

II- Lettres et Symboles Grec

g/GJ:grams per gigajoule;

lb/10 Btu : pounds per 100,000 British thermal units;

Mg/Nm: megagrams per normal cubic meter;

$\mu\text{g}/\text{m}^3$: micrograms per cubic meter

Ppm: parts per million ;

Tj : Térajoule

Ppmv : partie par million ;

Ppbv : partie par billion ;

tep : Tonne équivalente pétrole

LW : Niveau de puissance acoustique ;

Lp : Niveau de pression acoustique ;

LAeq,T : Niveau de pression acoustique continue équivalent pondéré ;

N: nombres d'aubes ou de pales ;

D: débit d'air du ventilateur;

dSS: distance source-source ;

dSR: distance source-récepteur;

dSO: distance source-obstacle;

dRO: distance récepteur-obstacle ;

a : composante de la distance parallèle à l'écran entre la source et le récepteur ;

df : distance de propagation à travers la végétation ;

KJ : terme correctif en fonction de la source ;

β : Angle de déviation de onde incidente ;

λ : Longueur d'onde ;

T : La période qui commence à t1 et se termine à t2 ;

Adiv : atténuation par divergence géométrique ;

Aatm : atténuation par absorption atmosphérique ;

Asol : atténuation par effet de sol ;
AS : atténuation par effet de sol dur ;
Ar : atténuation par effet de sol poreux ;
Am : atténuation par effet de sol mixte ;
DZ : atténuation par effet de diffraction ;
Cmétéo : Correction météorologique ;
Aécran : atténuation par effet d'écran
PS : Pression statique ;
G: Facteur de sol ;
I : Flux total sur l'ensemble de la surface
P: pression acoustique
C : célérité du son (m/s)
CV: Cheval Vapeur;
dB : decibel
E: module de Young (N/m²)
fc : la fréquence critique du matériaux (Hz)
h : épaisseur de la parois (m)
K : compressibilité du matériau (N/m)
KV: Kilo Volt (10³ volts)
L_P : Niveau de pression acoustique (dB)
L_w : Niveau de puissance acoustique (dB)
m: masse (kg)
MW: méga watts (10⁶ watts)
n: facteur de perte du matériaux
P : pression acoustique (Pa) P_i : Puissance indiquée (w)
Q : facteur de directivité d'une source
Q1:Quantitéde chaleur que fait apparaître la combustion (j)
q : La masse volumique des matériaux (Kg/m³)
fc : la fréquence critique du matériaux (Hz)
h : épaisseur de la parois (m) E: module de Young (N/m²) C : célérité du son (m/s)
n : facteur de perte du matériaux
λ : longueur d'onde (m)

P_{mi} : Puissance moyenne indiquée (w) n_{th} : Rendement théorique

n_m : Rendement mécanique n_i : Rendement indiqué

n_g : Rendement global

C_h : Consommation horaire (g/h)

C_s : Consommation spécifique ((g/kw.h)

Φ : Phase (rad)

ω : pulsation (rad/s)

I: Intensité acoustique D_b : Isolation brute (dB)

D_n : Isolation standardisée pondérée (dB)

a : Valeur des transmissions latérales des ondes acoustiques

S : surface de la paroi (m²)

N : vitesse de rotation (trs/min) P_s : Pression statique (Pa)

ΔL : atténuation par effet d'écran (dB)

RESUME

La pollution atmosphérique et les nuisances sonores dû aux infrastructures des sites industrielles fait partie des premières préoccupations environnementales de ce début de 21^{ème} siècle. Un moyen utilisé pour évaluer, contrôler et réduire cette pollution atmosphérique simultanément aux nuisances sonores ; est la recherche bidirectionnelle de deux optimums. Les concentrations des polluants dans l'atmosphères et les niveaux de pression acoustique équivalent dans le milieu récepteur.

Le but de ce travail est dans un premier temps la proposition des niveaux seuil de polluants rejetés autour des sites industriels, ceux afin d'établir une carte pouvant offrir une vue sur la dispersion et le niveau des concentrations de polluant. Dans un second temps il est question qu'après avoir cartographier le niveau de pression acoustique au alentours des sites, de proposer des protections acoustiques innovantes utilisant des matériaux naturels et d'en étudier la performance acoustique. La méthode préconisée pour les optimisations énergétique reste les méthodes stochastiques les plus appropriés. Parmi elles, celles qui parviens simultanément à mieux croisée les multiples paramètres liés au problème à résoudre sont les Algorithmes Génétiques développé par John Holland en 1975.

Les méthodes choisies ont été utilisées dans ce travail pour évaluer la concentration des polluants dans l'atmosphère, le niveau de puissance sonore et de pressions acoustique et la performance acoustique de ces écrans innovants au travers de leurs indices d'affaiblissements. Pour le contrôle aérien, les principaux polluants à pourcentage élevés rejetés dans l'atmosphère sont par ordre décroissant ; les Oxydes d'azotes NO_x, les Oxydes de soufre SO_x, les matières particulaires PM de 10µm de diamètre, les composés Organiques (CO), les matières particulaires PM de 2,5µm et 1µm de diamètre. De plus suivant les rosaces de direction de vents on a obtenu respectivement pour la CTM, CTD et la CTO des orientations de dispersion suivant les directions majeurs W, SW et W et des directions mineurs WSW, SSW et SSW, des concentrations en sortie de cheminée respectifs de 0,012kg.m⁻³, 0,025 kg.m⁻³ et 0,016 kg.m⁻³. Celles-ci ont été couplés à des vitesses choisis in situ afin de pouvoir représenter une dispersion de plume dans un tunnel bien choisi, donnant ainsi la représentation local de la dispersion de polluant. Quant au niveau de puissance et de pression sonore, nous avons étudiés ces émissions sonores en un point récepteur situé à une distance (S-R) de 117,6m pour la CTO, 117,6 m pour la CTD et 105m pour la CTM. On à pu évaluer ces niveaux dans une plage de 90-150 dB pour les puissances sonores et 45-110 dB pour les pressions acoustique. Les niveaux de pression acoustique au niveau du récepteur est très élevé par rapport au niveau préconisé suivant les

OMD et l'OMS. L'orientation des propagations des iso contours ont pu donner une orientation générale de la direction de nuisance sonore aux alentours des sites industrielles respectivement des directions majeures NE-SO de la CTM, NE-SW majeur et NNE-SSW mineur de la CT-D et d'orientation majeur SSE-NNW de la CTO. Dans le cadre de la protection acoustique innovante liées aux huit isolants testés, il en ressort suivants un algorithme génétique bien détaillées pour différents sites étudiés, un test a été effectuer à différentes fréquences sonore (50-4000 Hz). Pour la CTD, l'individue optimal ou indice d'affaiblissement de de qualité est de 38,1308 dB à une fréquence d'émission sonores d'équipements et auxiliaires de 2256,54 Hz, correspondant à la ouate de cellulose Humide pour des mur double. Pour le plafond c'est aluminium avec un indice de 15,305 dB, pour les murs constituant les bacs de rétention la laine de roches a été choisi avec un indice d'affaiblissement de l'ordre de 49,1877 dB et pour le socle comme matériaux isolants le béton cellulaire et bitume respectivement de 76,2352 dB et 93,1352 dB d'isolation acoustique. Pour la CTO, l'individue optimal à une fréquence de 1124,548 Hz, la ouate de cellulose sec avec 18,7569 dB, celui du plafond en aluminium avec un indice de 31,5917 dB. Pour les murs constituant les bacs de rétention, la laine de roches a été choisi avec un ordre de 15,1231 dB et le socle comme matériaux isolants le béton cellulaire et bitume respectivement de 57,0692 dB et 74,7235 dB. Les résultats des calculs ont montré l'intérêt de tels dispositifs d'évaluation, de contrôle et de recherche d'optimums dans le but d'atténuer les pollutions atmosphériques et les nuisances sonores utilisant des moyens naturels. Nous préconisons la mise sur pied d'un Plan de Gestion Environnemental (PGE) qui tiendra compte des valeurs limites et des optimums que nous avons établis afin de pronostiquer à court, moyen et long terme un diagnostic du personnel et des équipements sur site dans un premiers temps, des riverains, de la faune et de la flore pour leurs bien être dans un deuxième temps.

Mots clés : Algorithme génétique, cartographie, dispersion, nuisance sonore, pollution atmosphérique, pression, propagation, puissance, optimisation.

ABSTRACT

Air and noise pollution due to the infrastructure of industrial sites is one of the main environmental concerns at the beginning of the 21st century. One way to assess, control and reduce this air pollution simultaneously with noise pollution is the bidirectional search for two optimums. The concentrations of pollutants in the atmosphere and the equivalent sound pressure levels in the receiving environment.

The aim of this work is firstly to propose threshold levels of pollutants discharged around industrial sites, in order to establish a map that can provide a view of the dispersion and level of pollutant concentrations. In a second step, after having mapped the sound pressure level around the sites, to propose innovative acoustic protections using natural materials and to study their acoustic performance using numerical and experimental approaches such as genetic algorithms. The numerical approach can be further coupled with an optimization tool, developed in this thesis, to search for improved forms of such innovative noise protection devices.

After a presentation of the main phenomena involved in the combustion of heavy fuel oil, turbulent atmospheric dispersion and the propagation of acoustic waves in complex outdoor environments, a state of the art of pollutant sources, the receiving environment and the main acoustic screens dedicated to industrial sites such as thermal power plants was established, allowing the choice of the study framework, boundary conditions, innovative noise protection insulation to study the limit concentrations of pollutants and the optimization of acoustic performance. An analysis of the main methods of numerical simulation, measurement and optimization of noise protection has enabled us to choose the methods adapted to our problem using natural means. The chosen methods were used in this work to evaluate the concentration of pollutants in the atmosphere, the sound power and sound pressure levels and the acoustic performance of these innovative screens through their attenuation indices. For air traffic control the main pollutants with high percentage released into the atmosphere are in decreasing order; Nitrogen Oxides NO_x, Sulphur Oxides SO_x, Particulate Matter PM of 10µm diameter, Organic Compounds (CO), Particulate Matter PM of 2,5µm and 1µm diameter. In addition, following the wind direction rosettes, dispersion orientations were obtained respectively for the MTC, CTD and CTO in the major directions W, SW and W and in the minor directions WSW, SSW and SSW. Stack exit concentrations of 0.012kg.m⁻³, 0.025 kg.m⁻³ and 0.016 kg.m⁻³, respectively, were coupled at selected in situ velocities in order to be able to represent a plume dispersion in a well-chosen tunnel, thus giving the local representation of the pollutant dispersion.

As for the level of power and sound pressure, we studied these sound emissions at a receiving point located at a distance (S-R) of 117.6m for the CTO, 117.6m for the CTD and 105m for the CTM. We were able to evaluate these levels in a range of 90-150 dB for sound power and 45-110 dB for sound pressure. The sound pressure levels at the receiver are very high compared to the level recommended by the WCO and WHO. The direction of propagation of the iso contours was able to give a general orientation of the direction of noise nuisance around industrial sites respectively of the major NE-SW direction of the MTC, major NE-SW and minor NNE-SSW direction of the CT-D and major SSE-NNW direction of the CTO. Within the framework of the innovative acoustic protection related to the eight insulators tested, the following results were obtained a genetic algorithm well detailed for each site studied, a test was carried out at different sound frequencies (50-4000 Hz), for the CTD, the optimal individual or quality attenuation index is 38.1308 dB at a sound emission frequency of equipment and auxiliaries of 2256.54 Hz, corresponding to wet cellulose wadding for double walls. For the ceiling it is aluminum with an index of 15,305 dB, for the walls constituting the retention tanks the rock wool has been chosen with an index of attenuation of about 49,1877 dB and for the base as insulating materials the cellular concrete and bitumen respectively 76,2352 dB and 93,1352 dB of sound insulation. For the CTO, the optimal individual at a frequency of 1124.548 Hz, the dry cellulose wadding with 18.7569 dB, that of the aluminum ceiling with an index of 31.5917 dB, for the walls constituting the retention tanks, rock wool was chosen with an order of 15.1231 dB and the base as insulating materials cellular concrete and bitumen respectively of 57.0692 dB and 74.7235 dB. The results of the calculations have shown the interest of such devices for evaluation, control and search for optimums in order to mitigate air and noise pollution using natural means.

We recommend the establishment of an Environmental Management Plan (EMP) that will take into account the limit values and optimums that we have established in order to prognosticate in the short, medium and long term a diagnosis of the personnel and equipment on site in the first instance, and of the local residents, fauna and flora for their well-being in the second instance.

Key words: Air pollution, Dispersion, genetic algorithm, mapping, noise pollution, optimization, pressure, propagation, power.

INTRODUCTION GENERALE

Notre planète et son cosmos subissent un ensemble de phénomènes qui se substituent dans le temps. Entre 1901 et 2012 la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0.89°C, une valeur à priori insignifiante et pourtant ayant des portées conséquentes sur le dérèglement climatique mondiale (GIEC., 2014). Cette situation est imputable à une multitude d'activités anthropiques sur la croûte du globe terrestre.

Dans la mythologie grecque, « Prométhée a volé le feu sacré de l'Olympe et l'a rendu aux humains pour les aider à échapper au froid et à l'obscurité en dépit d'une lourde condamnation de Zeus ». Cette histoire est imaginaire, mais le rôle du feu était réellement important et il a marqué le début de la consommation énergétique de l'homme, pour améliorer sa qualité de vie. Les outils ont été inventés, d'abord dans le but de nous aider à chercher de la nourriture, cultiver les plantes et se protéger face aux animaux dangereux sans utilisation énergétique. Plus tard la compréhension des outils a atteint un niveau avancé et a entraîné de plus en plus le besoin de consommation énergétique. Au XVI^e siècle, le bois et le charbon de bois étaient la source d'énergie principale pour accompagner les progrès de l'industrie métallurgique. Plus tard, au XIX^e siècle, l'utilisation de la machine à vapeur dans l'industrie a impliqué que les sources traditionnelles n'étaient plus suffisantes, et puis, le charbon de bois a cédé la place au charbon. Au XX^e siècle, pour être encore plus efficace et plus compact, le pétrole a remplacé le charbon dans de nombreuses applications. De nos jours, le pétrole est concurrencé par le gaz naturel. L'énergie électrique a aussi donné lieu à l'exploitation des sources hydrauliques, nucléaires, minerais pour batteries et plus récemment, les sources d'énergie renouvelables. (M. Marwan et al, 2007).

En cette phase d'essor des industries dans les pays en développement, l'heure est propice aux bilans surtout en ce premier siècle du 3^{ème} millénaire qualifié de technologique, voire matérialiste. Des termes surgissent couramment dans la littérature tant profane que spécialisée, notamment :

- Le développement durable et sa disparité mondiale
- Les ressources énergétiques et leur pérennité
- L'environnement et son devenir

Il n'est pas étonnant de regrouper ces mots car le développement durable, les ressources énergétiques et l'environnement sont inextricablement liés. En effet le développement durable entraîne des exigences grandissantes de la société dans sa course vers l'amélioration de son

bien-être. En parallèle, une sensibilisation sur la gestion et l'épuisement des ressources énergétiques se développe dans cette même société. Le développement industriel dans notre contexte, avec une utilisation intensive et souvent mal gérée des énergies, met en péril notre biotope et plus en profondeur notre écosystème. La conférence de Kyoto, par exemple, a tiré la sonnette d'alarme sur les gaz à effet de serre (GES) et un protocole a été signé pour la réduction des GES. Le contrôle et l'évaluation des produits issue de l'activité anthropique est aujourd'hui considérée comme un processus clef dans les stratégies d'optimisation de la pollution locale : plutôt que de comprendre a posteriori un phénomène qui vient de se manifester (défaillance...), il est opportun d'en "anticiper" l'apparition afin de recourir à des actions protectrices en conséquence. Pour ce fait, l'implication sur l'utilisation rationnelle de l'énergie sur toute ces formes, renforcera la maîtrise des produits issus de ces industries, déjà entamé suite aux crises pétrolières, mais cette fois avec une forte composante environnementale.

Deuxième pays en Afrique détenteur du potentiel hydroélectrique derrière la République démocratique du Congo, le Cameroun regorge par ailleurs un potentiel électrique d'une puissance installée de 1360,75 MW en 2018 (Ministère de l'Énergie et de l'Eau, 2016) (ENEO, The Energy of Cameroon, 2018), donc 783,3 MW d'origine hydroélectrique et 576,7 MW d'origine thermique. Soit un potentiel énergétique répartie ainsi qu'il suit : 57% de source hydraulique, 21% de source thermique au gaz, 10% de source thermique au fuel léger et 13% de source thermique au fuel lourd. Ce dernier est reparti sur 39 centrales thermiques. Celles ci sont soit attelées aux multiples réseaux interconnectés EST, SUD et NORD (RIN, RIE, RIS) soit isolés dans le but d'approvisionner les populations des zones de campagne. De ce piédestal énergétique, le Cameroun, avec un contexte énergétique favorable, est en phase d'industrialisation. Pour subvenir aux demandes énergétiques de plus en plus élevés du secteur industriel et résidentiel, un approvisionnement accru par les centrales thermiques interconnectées et isolées se fait ressentir dans plusieurs zones. L'écosystème dans lequel est plongée le Cameroun, peut encore accepter un certain nombre de modifications voire de perturbations tout en respectant les normes de rejets ou de limites standard : il est donc, a priori, possible d'implanter des ouvrages industriels mais à condition d'en limiter et d'en contrôler les impacts sur l'environnement afin de ne pas provoquer d'impacts irréversibles sur le milieu récepteur.

Le plus grand problème lié à l'environnement dans les pays industrialisés est le confort de l'homme et de son biotope. Ceci en relation direct avec la pollution atmosphérique et zones sonore. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que près de 800.000 personnes meurent prématurément chaque année des suites de la pollution atmosphérique urbaine. La plupart de ces décès prématurés se produisent dans les pays en développement. Les émissions

atmosphériques et sonores des usines et industries énergivores contribuent à une mauvaise qualité de l'air et d'une sonorisation non contrôlée en zone urbaine. Ces émissions s'accompagnent des hydrocarbures imbrûlés, des monoxydes de carbone (CO), des composés organiques volatils (HC ou COV), des oxydes d'azote (NOx), des particules en suspension (PM) et des pressions acoustiques. Elles dépendent essentiellement de l'état vétuste des moteurs, des combustibles utilisés, et surtout du procès de production industrielle. La création d'institutions nationales chargées de réglementer et de surveiller en toute indépendance ce secteur environnemental est encore précaire dans les pays sous-développés et/ ou en développement, du fait des méthodes et mesures, de contrôles et de minimisation à l'échelle locale encore précaire.

Cependant, les concentrations de polluants, les niveaux de pressions et de puissance sonore émissent dans le milieu récepteur issue des gros moteurs et des machines auxiliaires reste toujours mal connu. Il a été possible démettre d'hypothèses selon les travaux menés antérieurement, qu'on peut, suivant des données satellitaires suivre une pollution atmosphérique à l'échelle continentales, mais n'établissant pas une précision plus locale. De plus, ne présentant pas d'aspect sur les cartographies acoustique. Les résultats issus de l'investigation des données potentielles dans ces industrielles pourront constituer des hypothèses avérées qui pourront constituer des réponses à la connaissance des cartes atmosphérique et sonore dans ces zones du Cameroun, afin de prévoir un seuil minimal de pollution.

Ainsi, dans le souci de non seulement contribuer à la protection de l'environnement, mai aussi d'optimiser un certain nombre de défaillance environnementale liée à la production électrique issue des centrales thermique au Cameroun, nous nous sommes définis comme objectif principal, de maintenir en condition opérationnelle les systèmes industriels dans une cohésion des activités de l'homme et du milieu récepteur. Il s'agira concrètement d'optimiser les dégagements multiformes, par cartographie sonore, atmosphérique et par insonorisation multicouche issue des centrales thermique du Cameroun. Il s'agira notamment :

- ✓ De procéder à une analyse qualitative des données des combustibles et des matériaux de construction ;
- ✓ D'estimer les rejets atmosphériques de GES et des (07) sept principaux Polluants dans les centrales étudiés ;
- ✓ D'estimer les niveaux de puissances sonore et de pressions acoustique des gros moteurs et auxiliaires dans lesdites centrales ;

- ✓ De réaliser des cartographie atmosphériques et sonore issue des modèles de optimisation atmosphérique et de propagation sonore ;
 - ✓ D'optimiser les indices d'affaiblissement acoustique des matériaux isolant via la méthode des algorithmes génétique ;
 - ✓ De localisée et d'identifier les structures organique et inorganique à fortes isolation acoustique ;
 - ✓ D'établir des corrélations atmosphérique et sonores entre différentes centrales étudiées.
- Ce travail s'articule autour de trois chapitres qui sont structurés de manière suivante :

Le premier chapitre passe en revue la représentation géographique et énergétique des unités énergétiques du Cameroun. Il présente la situation environnementale suivant le cadre institutionnelle et réglementaire. D'autre part, les mécanismes thermochimiques de dispersion atmosphérique, d'évaluation du bruit et d'optimisation des sites industriels sont méthodiquement présentés. Tout ceci dans une logique croissante des travaux antérieurs.

Le deuxième chapitre quant à lui aborde les différents matériels et méthodes de mesure utilisés dans le cadre de cette thèse. Une méthode "update" d'inventaire de polluants et de nuisances sonores couplées à des méthodes empiriques a été présenté, suite à quoi des modèles de dispersion atmosphérique et de cartographie sonore à travers des hypothèses de validation ont été aussi développé. Nous avons également présenté des méthodes d'optimisation des sites industrielles ceux à travers les algorithmes génétiques.

Le troisième chapitre est consacré non seulement sur la présentation des résultats obtenu in situ sur les différentes centrales thermiques, mais aussi sur l'implémentation desdits résultats dans les méthodes présentés ayant pour aboutissant les maillages des dispersions atmosphérique et des cartographie sonore. Nous terminerons ce chapitre par la présentation des résultats lier au diagnostique d'optimisation et du choix du meilleur isolant acoustique dans les différentes centrales.

Une conclusion générale termine cette présentation. Dans laquelle, Nous rappelons la problématique de cette étude et les résultats essentiels auxquels nous sommes parvenus. Nous y mentionnons également des pistes nouvelles de recherche que notre étude à mis en évidence.

CHAPITRE I : CONTEXTE ET ETAT DE L'ART

Après l'invention de la machine à vapeur en 1690 par le physicien français Denis PAPIN qui a inauguré l'ère de la haute technologie (Philip Valenti , 1707), beaucoup d'autres moteurs tels que les moteurs V8 ont été construits en 1933 dans le but d'augmenter l'efficacité de leur puissance. Cette croissance technologique impacte sur la destruction accrue de l'atmosphère c'est ainsi que l'équilibre environnemental a commencé à chanceler suite à la pollution de l'air. Ce déséquilibre a atteint le point culminant au XXème et XXIème siècles où l'humanité a déploré les méfaits de la bombe atomique d'Hiroshima et Nagasaki (août 1945), l'explosion accidentelle du Centre Nucléaire de Tchernobyl en 1986, la catastrophe du Lac Nyos au Cameroun en 1986, sans oublier les déchets toxiques d'Abidjan. De ce fait, cet événement en majorité causée par des produits dérivés du pétrole nous canalise pour ce qui est de notre pays, à faire une revue bibliographique des centrales thermique au Cameroun. Ensuite, nous présenterons et décrirons les différentes formes de pollution issue de celle-ci. Enfin, elle s'achèvera par une présentation de l'intérêt des travaux antérieurs.

I.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES CENTRALES THERMIQUES AU CAMEROUN

L'étude de la pollution générée par les centrales thermiques ne peut être faite sans toutefois connaître la localisation et les proportions occupées par les centrales. Ceci dans le but de connaître l'environnement de réception des impacts, la caractérisation des centrales et le pourcentage de production dans la cartographie énergétique du Cameroun.

I.1.1 Localisation Géographique des Centrale thermique 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 km². 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 2015 a été estimée à 22 179 707 d'habitants, soit une densité de population d'environ 46,35 habitants/km² (BUCREP, Bureau Central des Recensements et des Etudes de Population, 2015). 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 vide à l'est et au Centre-Nord du pays. Deuxième pays en Afrique détenteur du potentiel hydroélectrique derrière la République

démocratique du Congo, le Cameroun regorge par ailleurs un potentiel thermique < fioul¹ > d'une puissance installée de 1270,75 MW en 2016 (Ministère de l'Énergie et de l'Eau, 2016) réparties sur 39 centrales thermiques. Celles qui sont soit reliées aux multiples réseaux interconnectés EST, SUD et NORD soit isolées dans le but d'approvisionner les populations des zones de campagne. Ces centrales sont réparties comme l'indique la figure 1.

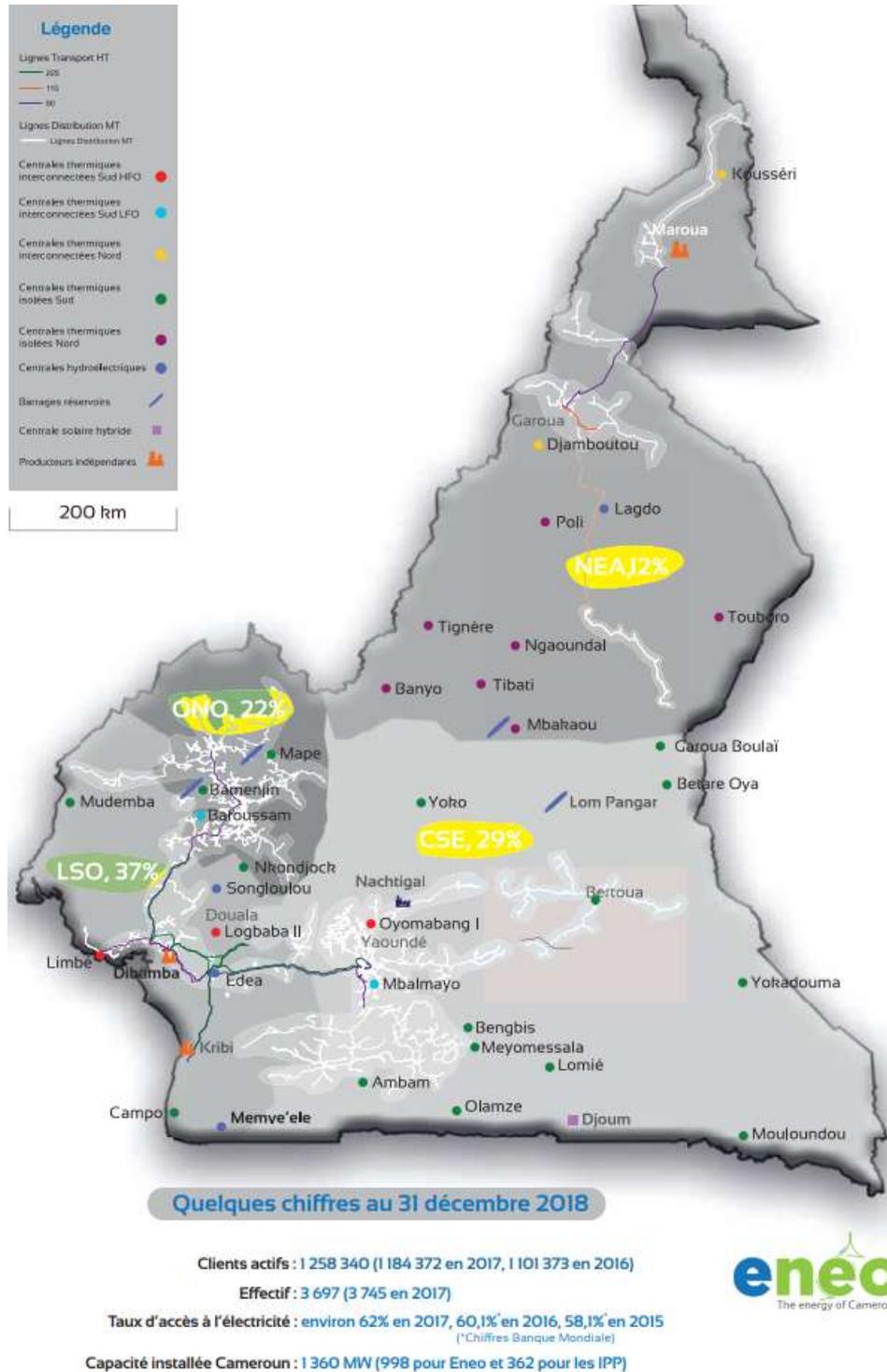


Figure 1: Cartographie combinée des centrales thermiques au Cameroun (Source : (ENE0, 2018))

¹ Combustible fossile utilisé dans les centrales thermique en vue de produire l'énergie électrique.

I.1.2 Contexte Écologique et Socioéconomiques

Malgré la mise en œuvre du DSRP, l'économie camerounaise n'a pas connu de changement structurel notable, elle continue de faire face à un certain nombre de défis qui pourraient empêcher l'atteinte des résultats escomptés. C'est ainsi que l'élaboration du DSCE horizon 2010-2020 traduit un ensemble de stratégie de gouvernance dans plusieurs domaines. Le Gouvernement Camerounais accorde une importance primordiale au secteur de l'énergie, moteur principal du développement économique et du progrès social.

Les centrales thermiques au Cameroun sont de plus en plus facteurs de croissance économique d'une part, de la pollution atmosphérique, des nuisances sonores, d'appauvrissement des sous-sols de notre pays d'autre part. Dans l'hypothèse où les tendances actuelles de consommation de l'électricité au Cameroun se poursuivraient, il en résulterait une situation de déséquilibre grandissante entre la production et la consommation, entre l'offre et la demande, ce qui ne pourrait être compensée que de façon partielle par la planification des investissements dans de nouvelles capacités de production, à condition encore que celles-ci puissent être réalisées dans les délais prévus et que les ressources financières considérables correspondantes puissent être mobilisées.

Le rapport national sur le suivi des OMD, élaboré en 2008, montre qu'il est très improbable que le pays puisse atteindre les cibles fixées. Le 7^{ème} OMD donc la cible est d'assurer un environnement durable démontre que malgré l'augmentation des aires protégées pour préserver l'environnement (13% en 2000 contre 18,8% en 2008) (YANG PHILEMON, LE PREMIER MINISTRE, CHEF DU GOUVERNEMENT, , 2010) , l'objectif que la proportion de la population utilisant les combustibles solides atteigne environ 42,2% ne serait vraisemblablement pas atteint. En effet, il s'est stabilisé autour de 82%. (YANG PHILEMON, LE PREMIER MINISTRE, CHEF DU GOUVERNEMENT, , 2010).

À travers la réalisation des programmes d'entretien, de réhabilitation et de développement de la capacité énergétique du pays, le Cameroun compte successivement résorber définitivement le déficit structurel, accompagner les besoins énergétiques pour l'atteinte des objectifs de croissance escomptés, devenir un exportateur d'électricité et contribuer ainsi à l'équilibre de la balance. C'est ainsi qu'à travers nos études, nous contribuerions aux programmes d'entretien, de réhabilitation et d'optimisation.

Ainsi, il est essentiel de mettre en œuvre et dans les plus brefs délais, une politique vigoureuse d'efficacité énergétique dans le domaine électrique permettant de réduire à relativement court terme la pression sur la demande qui s'avère donc être essentielle. Au-delà de l'impact escompté en matière d'étalement des investissements à consacrer pour doter le pays de capacités de production électrique supplémentaires avec atténuation, la conception et le

développement d'une telle politique d'efficacité énergétique doivent être perçus comme un des fondements de toute politique énergétique ultérieure, de façon à éviter, sinon limiter la perpétuelle fuite en avant dans de nouvelles capacités de production qui, même lorsqu'ils sont basés sur l'utilisation d'énergies alternatives aux combustibles fossiles, n'en requièrent pas moins une politique environnementales, de lourds investissements et d'importants financements.

La pérennité de la politique d'efficacité énergétique qui sera mise en place doit donc être un critère de base lors de son élaboration conceptuelle dans l'optique de palier au problème d'insuffisance d'approvisionnement de l'énergie auxquels les experts se sont intéressés et l'ont estimée de réduire la croissance du PIB par 2% (INTERNATIONAL DEVELOPMENT ASSOCIATION, Mai 2009)

Le Gouvernement s'engage à procéder aux réformes requises pour rendre l'environnement de ces secteurs plus attractif, puis de mettre en place un dispositif opérationnel d'incitation et d'accompagnement de l'investissement privé, afin que celui-ci puisse effectivement jouer son rôle moteur dans la croissance économique. Il s'agira notamment de combler le déficit en infrastructures, de réduire les difficultés d'accès aux financements, de déployer sur de long terme un programme général de développement des filières de production, sur de moyen terme et en liaison avec certains partenaires au développement des programmes spéciaux d'impulsion de la compétitivité dans certaines filières ayant un fort potentiel de croissance et de mise à niveau des entreprises, notamment des PME et PMI.

I.2 SITUATION ENERGETIQUE ACTUEL DU CAMEROUN

La mise en place d'une politique énergétique nationale implique un diagnostic du potentiel énergétique, des infrastructures et de la structure de production par sources et par secteurs, l'analyse du modèle de consommation ainsi que l'accès aux services énergétiques.

Selon les chiffres du Ministère de l'Énergie et de l'Eau (MINEE) et le 4^{ème} rapport du PDSE sur les ressources énergétiques, 5% des ressources du Cameroun sont actuellement mises en valeur de nos jours grâce aux multiples projets des scénarios dits des « Grandes Ambitions » (Ministère de l'Eau et de l'ENERGIE-PDSE 2030, JUILLET 2006). Le système énergétique camerounais est un ensemble de circonscriptions des ressources et des processus regroupant en leur sein les gisements d'énergie primaire, les transformations en énergie finale, les réseaux de distribution des énergies finales ainsi que leurs modes de consommation dont l'organisation et l'évolution sont régies par des facteurs politiques, technologiques, socio-économiques et environnementaux (Njomo D and Nkué V, 2009).

I.2.1 Cadre Institutionnel du secteur de l'énergie au Cameroun

Au Cameroun le secteur de l'Énergie est partitionné en trois grandes branches : les hydrocarbures, l'électricité et les énergies renouvelables. De nombreux régimes dirigent ce secteur. Parmi lesquelles l'administration publique, les sociétés publiques ou parapubliques et les sociétés privées. Chacune entre -elle joue un rôle spécifique dans le secteur de l'énergie. Les structures administratives ou l'administration publique interviennent dans la politique et la géostratégie énergétique du pays.

Dans l'ordre décroissant de l'administration publique, la Présidence de la République ordonne et dirige la politique générale du secteur de l'énergie. Le Premier ministre coordonne l'action de l'ensemble du gouvernement et donc des ministères intervenant dans les différents sous-secteurs de l'énergie. Le Ministère en charge des finances assure la tutelle financière du secteur. Le Ministère de l'énergie et l'eau (MINEE) assure la tutelle technique dudit secteur et à ce titre est chargé de la conception, de la mise en œuvre et du suivi de la politique gouvernementale dans le secteur de l'énergie. Plusieurs autres ministères interviennent également dans le secteur de l'énergie. La présentation des sociétés publiques ou parapubliques et privées est couplée et se fait suivant les sous-secteurs du secteur de l'énergie. (TAMBA J.G., 2013).

Partant de la base de production vers les terminaisons de consommateur des produits pétroliers sur plusieurs formes nous pouvons citer :

- La Société Nationale de Raffinerie (SONARA) raffine le pétrole brut et est contrôlée à 72,29% par l'État camerounais. Elle possède une capacité de traitement de 2.100.000 Tonne métrique (TM) de pétrole brut par an ;
- La Société Camerounaise des Dépôts Pétroliers (SCDP) où sont stockés les produits pétroliers est contrôlée à 51% par l'État du Cameroun et comporte 13 dépôts d'une capacité totale de stockage de 265.988 m³ depuis l'année 2006 ;
- La Caisse de Stabilisation des Prix des Hydrocarbures (CSPH) qui s'occupe de la régularisation des prix des hydrocarbures appartient à 100% à l'État camerounais ;
- TRADEX et HYDRAC appartiennent respectivement à 56% et 51% à l'État camerounais ;
- Les sociétés privées quant à elles sont réparties en deux secteurs: le secteur amont qui assure l'exploitation et la production du pétrole brut (les deux grands producteurs Pecten et Perenco); et le secteur aval qui s'occupe du le transport et de la distribution des produits pétroliers par les marketers (Total SA, Oilybia, Texaco, Tradex, SCTM, Camrail, Camship...).

D'autres multinationales interviennent dans la recherche d'un équilibre entre l'offre et la demande, la production et la consommation la régulation des prix et la protection de la nature tel que :

- La société Electricity Development corporation (EDC) est une société a capital Public avec l'État comme actionnaire Unique
- La société nationale d'électricité du Cameroun (AES-Sonel) qui assure la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique ;
- La société Kribi Power Development corporation (KPDC) filiale d'AES-Sonel ;
- La vulgarisation de l'électrification rurale qui est assurée par l'Agence d'Électrification Rurale (AER) ;
- La régularisation du secteur est assurée par l'Agence de Régulation du Secteur de l'Électricité (ARSEL).

Retrouvons sur l'organigramme suivant la répartition institutionnelle du secteur Électrique lié aux sources fossiles et renouvelable.

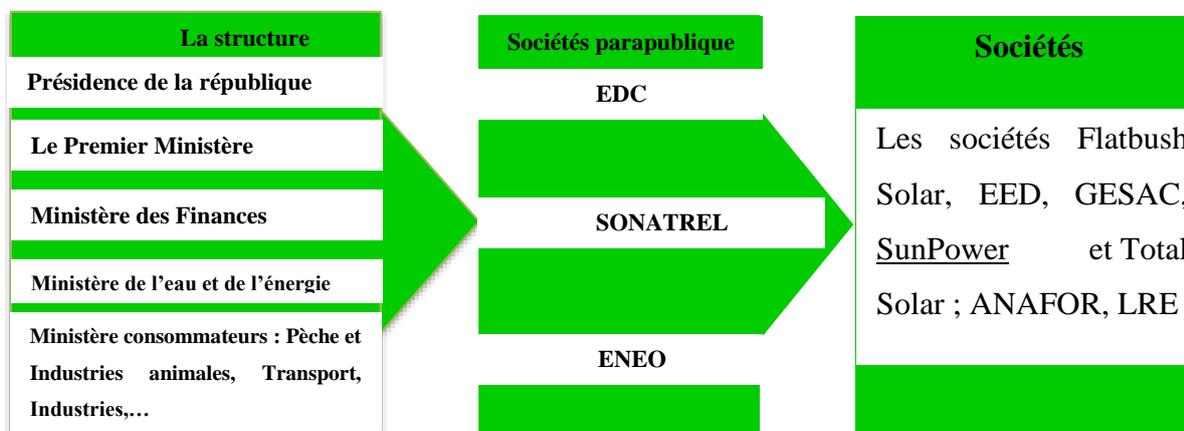


Figure 2: Cadre institutionnel du secteur Électrique produit par des sources fossiles et renouvelable (Source : LESEE)

Cet ensemble de multinationale ne représente pas la totalité de celles qui intervienne dans les secteurs de l'énergie. Retrouvons en **Annexe 1** cet ensemble.

I.2.2 Cadre réglementaire du secteur Énergétique au Cameroun

Comme tout État de droit, le Cameroun à travers un ensemble de lois et de décrets réglemente le secteur de l'énergie et particulièrement le secteur de production de l'énergie électrique à travers un ensemble de loi :

- Loi n° 98/022 du 24 Décembre 1998 régissant le secteur de l'électricité ;
- Loi n° 99/016 du 22 décembre 1999 Portant statut général des établissements publics et des entreprises du secteur public et parapublic ;
- Le décret n°2005/087 du 29 mars 2005 portant organisation du Ministère de l'Énergie et de l'Eau ;
- Loi n° 2011/022 du 14 décembre 2011 régissant le secteur de l'électricité au Cameroun.
- Le décret n° 99/125 du 15 juin 1999 portant organisation et fonctionnement de l'Agence de Régulation du Secteur de l'Électricité ;

- Le décret n° 99/193 du 8 septembre 1999 portant organisation et fonctionnement de l'Agence d'Électrification Rurale ;

I.2.3 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 accéléré 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 élevé dans le nord du Cameroun et de la région du littoral. Les régions du nord ont des vents donc 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'insolation moyenne est estimée à 5,8 kWh/m²/jour tandis que le reste du pays voit communément 4.9kWh/m²/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 certain établissement public (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 contrôlé 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 la régénération de seulement 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 couvert 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 inconnue 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 est encore à être correctement exploité.

Notons que à ces principale installation s'ajoute 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 MONDIAL, 2013). La figure ci-dessous montre le schéma de régulation du réseau principale de la Sanaga.

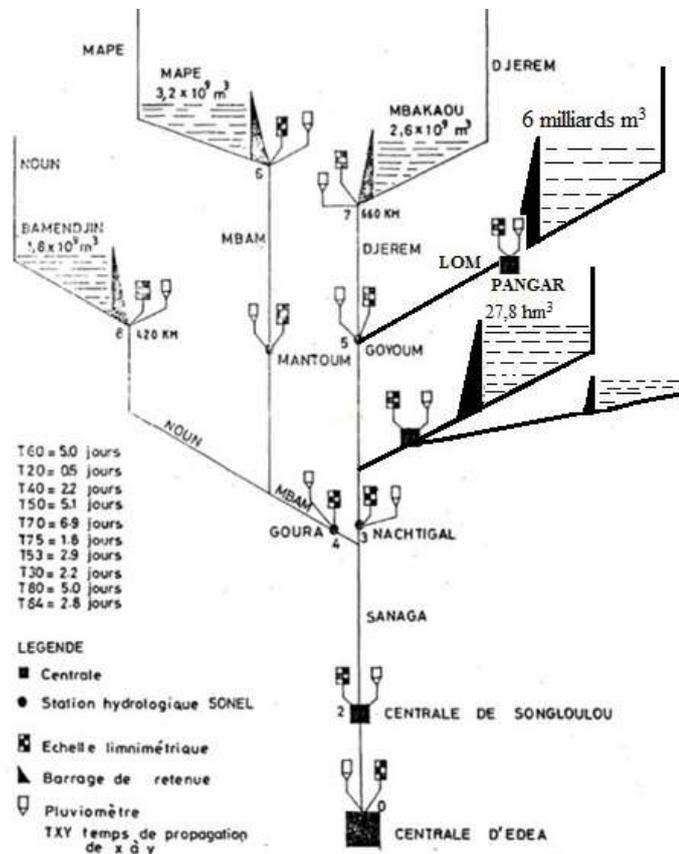


Figure 3: Schéma de Régulation de la Sanaga (EDC, LESEE)

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 composée de deux type de centrale thermique, celle au Fioul lourd (HFO) et l'autre au fioul léger (LFO) (voir tableau 1&2)

Tableau I: Centrales thermiques (LFO) du RIS 2010 (source : EDC, LESEE)

Centrales Thermiques (LFO)	Oyomabang2	Bassa 2 Bassa 3	Logbaba 1	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 II: Centrales thermiques (HFO) du RIS 2010 (source : EDC, LESEE)

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 3). 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 III : Centrales thermiques (LFO) du RIN 2010 (source : EDC, LESEE)

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
	MIRRELESS	K8 MAJOR	2400	1800
Total			13,7MW	12MW

En ce qui concerne le troisième réseau interconnectée de l'Est, la principale centrale est d'une puissance installée de 9,6 MW à Bertoua. Elle alimente les principales localités Urbaine raccordées au réseau. Nous dénombrons cinq autres centrales thermiques en zone rurale alimentant les centres isolés de Garoua Boulai (0,3 MW), Bétaré Oya (0,1 MW) et Yokadouma (0,1 MW) (voir Tableau 4).

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 IV : Centrales thermiques (LFO) du RIE 2010 (source : EDC, LESEE)

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

Au Cameroun nous avons constatés des zones qui ne sont pas interconnectés 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 2**.

I.3. MECANISME THERMOCHIMIQUE ET PHENOMENE DE DISPERSION DES POLLUANTS DANS L'ATMOSPHERE

Les centrales thermiques à fioul lourd et léger fonctionnent en respectant un certains nombres de principes mécanique et thermodynamique. Suite à celles-ci ils produisent en fin de procès des énergies dissipée sous forme de chaleur, de travail et d'électricité. Une grande partie est perdue dans les rejets des liquides, des gaz, des particules, des vibrations mécaniques et sonores. Concernant ces rejets nous nous limiterons dans cette partie d'étude physique à ceux émissent sous forme de gaz de particules et de vibration acoustique.

I.3.1 Aspects physico-chimique de la production d'énergie électrique dans les centrales à fioul

Le mécanisme physique régissant la production d'énergie électrique à base de plusieurs types de carburants dans les centrales thermiques, repose sur plusieurs aspects. Ceux-ci contribuent en ce qui leurs concernent à optimiser la production de l'énergie électrique. Parmi ces aspects nous notons l'aspect physique du procédé tous au long de la chaine de production et surtout l'aspect chimique.

Le procédé chimique repose sur deux élément indispensable: Les carburants et les combustibles. Les carburants se répartissent en classes bien distinctes selon les types de moteurs qu'ils alimentent. Leurs caractéristiques ne sont pas rigoureusement constantes d'un échantillon à l'autre, mais restent à l'intérieur d'un domaine borné par des spécifications officielles (Jean-Claude GUIBET, septembre 2008). Celles-ci sont établies afin d'obtenir à la fois des performances satisfaisantes des moteurs et des faibles émissions de polluants.

On définira trois grandes classes de carburants :

- Les essences alimentant les moteurs d'automobiles dits « à explosion » ou à allumage commandé par étincelle. À cette catégorie se rattachent le gaz de pétrole liquéfié utilisé comme carburant (GPL-C) et des produits à usages spéciaux (motocycles, avions à moteurs à pistons, voitures de compétition...);
- Le gazole constituant la source d'énergie des véhicules diesel routiers (voitures particulières, camionnettes, camions). On peut associer au gazole d'autres produits également utilisés dans des moteurs diesel. Ce sont les fiouls domestique (FOD) et les fiouls lourds qui équivalent selon leurs usages à des combustibles d'engin lourds et les différents types de moteurs marin ;
- Le carburéacteur alimentant les avions à réaction pour tous les transports aériens domestiques et internationaux. Il existe, à côté du carburéacteur classique (Jet A1), plusieurs sortes de carburants spéciaux réservés, le plus souvent, à des usages militaires (Jean-Claude GUIBET, septembre 2008).

Les différentes caractéristiques permettant de différencier ces différents carburants sont récapitulées dans le tableau 5

Tableau V: Caractéristiques générales des différents types de carburants (Source: (John Whitaker and SARL WATER KITS SUPPLY, 2008), LESEE)

Produit	Masse volumique à 15°C (kg/m ³)	Intervalle de distillation		Nombres d'atomes de carbone des constituants hydrocarbonés	Autres constituants organiques possibles
		Point initial (°C)	Point Final (°C)		
GPL-C	510-580	< 0	≈ 0	3 et 4	Alcools et Éthers
Essences	725-780	30-35	170-215	4-10	
Carburéacteur	775-840	140-150	250-280	9-13	
Gasoil et FOD	820-860	160-180	340-380	10-20	Dérivés d'huile Végétales
Fiouls lourds	950-1050	180-200	450	>13	

I.3.1.1 Fiouls lourds et légers

Ce sont des combustibles liquides résultant de la distillation du pétrole brut. De couleur noir ou brun noir, ils peuvent contenir une forte proportion d'hydrocarbures aromatiques parmi lesquels des hydrocarbures polycycliques ayant 4 à 6 noyaux.

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 désasphaltage on obtient des fiouls

lourds avec une teneur élevée en soufre HTS (**voir annexe 3**). Par contre en utilisant une hydrodésulfuration convertissant des résidus d'une distillation sous vide on obtient des fiouls lourds désulfuré (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) connue sous le nom de fioul 1500 pouvant contenir jusqu'à 4 % (masse) de soufre ;
- le Fioul lourd BTS (basse teneur en soufre) renfermant moins de 2 % de soufre ;
- le Fioul lourd TBTS (très basse teneur en soufre) connue sous le nom de fioul 3500 renfermant moins de 1 % de soufre ;
- Le fioul lourd TTBT (Très Basse Teneur en Soufre) renfermant un pourcentage inférieur ou égal à 0.5 % de soufre.

Ces différents teneurs en soufre sont certifier par la norme NF EN ISO 14596 / NF EN ISO 8754 NF EN 24260 (S. BICOCCHI et A. TENZA, janvier 2008).

Inexploitable à froid, le fioul lourd devient trop visqueux en dessous d'une température de 40°C. Lors de son transport, de son stockage et de sa manipulation, il doit être maintenu à l'état liquide, à une température de 70°C pour être utilisable.

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 6 et 7 montre les valeurs moyennes et les plages usuelles de variation de ces paramètres.

Tableau VI : Valeurs moyennes et plage usuelles des paramètres constituant les fiouls lourds (source : (Jean-Claude GUIBET, septembre 2008))

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 ³)	1020	980-1050	1000 (1)	980-1025	985	940-1010	NF T 60-101
Viscosité à 100 °C (mm ² /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.

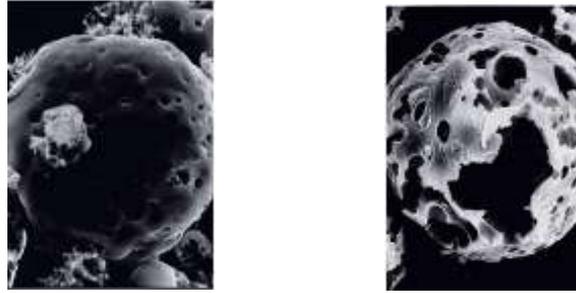
Les caractéristiques de fioul lourd utilisées lors des prospections dans les différentes centrales au Cameroun ont été recensées dans le tableau 7.

Tableau VII: Méthodes standard de test des caractéristiques (Source : (ASTM International, Resonance Spectroscopy))

Méthodes	Caractéristique	Unités	Résultats	Limites
ASTM D4294	Composition du Soufre	% masse	0,378	0,7 max
ASTM D 93	Volatilité en point éclair	°C	91.0	66.0 min
ASTM D1298	masse volumique à 15°C	Kg/L	0.9466	0.9950 max
ASTM D 445	Fluidité sur la viscosité à 50°C	cSt	364 .4	380.0 max
ASTM D 97	Fluidité sur le point d'écoulement	°C	36	45 max
ASTM D 95	Contaminants pour la teneur en eau	% Vol	0.05	1,0 max
ASTM D 482	Teneur en cendre	% masse	0.01	0.12 max
ASTM D 473	Teneur en sédiments	% masse	0.01	0.25
ASTM D189	Résidu Conradson	% masse	5.4	15.0 max
Florescence X	Teneur en Vanadium	Ppm	10.7	25.0 max
ASTM D3605	Teneur en Sodium	Ppm		
ASTM D3228	Teneur en Azote	% masse		

Par identification des caractéristiques du fioul lourd suivant le certificat de la SONARA et des caractéristiques générales des différents fiouls nous avons constaté que les plus utilisées dans les centrales du Cameroun sont les fiouls lourds N°2 TBTS (Très basse teneur en soufre inférieur à 1%). Nous étudierons dans la suite la combustion de ce type particulier de combustible afin de rechercher plus tard les impacts sur l'environnement. L'Annexe 4 donne un aperçu générale des caractéristiques des fiouls lourds utiliser dans les principaux moteurs des centrales thermique au fioul lourd.

Sous un microscope électronique les molécules entrant dans la composition chimique du fioul mais ici il a deux formes selon le traitement additif (voir Figure 4). Les fiouls lourds additifs avec Octapower 2200 ont été testés sur une chaudière d'essai au laboratoire du centre de recherche de TOTAL (CReS) (INNOSPEC, Janvier 2012). 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 μm)

b: Fioul traité (2-10 μm)

Figure 4: Cénosphères au microscope électronique (INNOSPEC, Janvier 2012)

I.3.1.2 Processus de combustion

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 (Alexis KUITCHE, 2007-2008). Le processus de combustion comprend deux phénomènes essentiels : l'auto-inflammation et la propagation. Ce dernier phénomène est une des conséquences du premier il est en plus un facteur primordial et responsable des un phénomène lié à la pollution environnementale que nous étudierons dans une de nos parties.

► L'auto-inflammation

Considérons les paramètres concentration en combustible ou plus généralement la composition des réactifs, la température et la pression du milieu réactionnel. Le phénomène d'auto-inflammation entre en jeu au moment où les paramètres sus cités atteignent ou dépassent un certain seuil critique correspondant à une oxydation exothermique qui s'accélère jusqu'à l'emballement. Plusieurs paramètres influencent l'auto inflammation, parlant des carburants diesel, l'indice d'octane est une caractéristique qui influence particulièrement l'auto-inflammation. L'exigence principale que le fioul (combustible des moteurs Diesel) doit satisfaire est la facilité d'auto-inflammation par contact avec l'air comprimé. La durée de temps du moment d'injection de combustible jusqu'à son auto-inflammation est nommé délai d'allumage. Le délai dépend de plusieurs facteurs, en particuliers, de la nature de combustible ou de son indice de cétane.

L'indice de cétane est le pourcentage en volume de cétane dans un combustible de référence qui a le même délai d'allumage que le gazole à éprouver.

Le combustible de référence est un mélange de cétane ($C_{16}H_{34}$) très inflammable (IC=100) et de α -méthyl-naphtalène ($C_{10}H_7CH_3$) très peu inflammable (IC=0). L'indice de cétane (IC) pour les moteurs diesels doit être supérieure à 50 ($IC \geq 50$).

➤ 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 appelé «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.

Ces phénomènes

C-Facteurs réactifs

* Le Combustible

En fonction du procédé industrielle on distingue plusieurs types de combustibles, solide liquide ou gazeux. 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 suivantes.

Tableau VIII: Éléments chimique contenu dans les combustibles industriel

Élément Chimique	Carbone (C)	Oxygène (O)	Hydrogène (H)	Azote (N)	Soufre (S)
Masse molaire (g/mol)	12	16	1	14	32

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 ci-dessous. Notons que celui du carbone étant peu variable chez les fiouls lourds TBTS variant d'une plage de 85-88% en masse

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

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

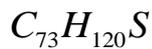
Le pourcentage massique de l'oxygène et de l'azote étant inexistant car ils ont un pourcentage massique nul dans le fioul lourd TBTS mais quasi-existant chez les HTS et BTS.

En utilisant une méthode de calcul particulière (voir **annexe 5**) et en considérant une masse de 1kg de fioul pour une masse molaire total M_T , appliquons aux données du tableau 9. Les résultats suivant sont obtenus. (F. Monge Nantes, 2012)

$$\text{Avec} \quad M_T = 12x + y + 32r \quad (1.1)$$

Eléments chimique	Carbone	Hydrogène	Soufre
Masses pondérales (Kg)	0,876	0,1202	0,0378
Indice des éléments	X mol	Y mol	Z mol
Valeur des indices	73	120	1

Nous obtenons une formule brute de combustible HFO donc l'expression est :



** Le comburant

D'une manière générale, un comburant de type industriel est constitué d'oxygène proprement dit) plus ou moins dilué d'azote.

$$\text{Il répond à la formule générale :} \quad O_2 + xN_2 \quad (1.2)$$

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

d- Proportions relatives entre 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 (Jean-Pierre SAWERYSYN, 2012).

$$\varphi = \frac{\left(\frac{\text{Combustible}}{\text{comburant}}\right)_{\text{réel}}}{\left(\frac{\text{combustible}}{\text{comburant}}\right)_{\text{stœch}}} \quad (1.3)$$

- 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 CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 sans imbrûlés 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 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 CO_2 , H_2O , et SO_2 .

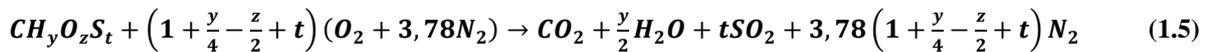
On établit les expressions de

$$\begin{cases} e(\%) = 100 \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right) \text{ avec } \varphi < 1 \\ d(\%) = 100 \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right) \text{ avec } \varphi > 1 \end{cases} \quad (1.4)$$

Où d et e sont des paramètres sans dimension

Ainsi, l'analyse élémentaire quantitative du combustible fournit une formule globale $(\text{CH}_y\text{O}_z\text{S}_t)_n$ où le coefficient n, lié à la masse 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 $(\text{O}_2 + 3,78\text{N}_2)$ (Jean-Claude GUIBET, septembre 2008).



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 la des rapports stœchiométriques suivant :



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 apporté par le combustible lui-même de sorte que l'on est 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 5** que le Volume d'air $V_a = 10.9983 \text{ dm}^3(\text{n})/\text{Kg}$ et le Volume de fumé sec : $V_f = 11.67142 \text{ dm}^3(\text{n})/\text{Kg}$. Ces différentes valeurs nous permettrons d'évaluer le rapport stœchiométrique φ on aura pour :

$$\text{La fraction} \left(\frac{\text{Combustible}}{\text{Comburant}} \right)_{\text{stoech}} = \frac{1}{10,9983} ; \quad (1.7)$$

$$\text{La fraction } \left(\frac{\text{Combustible}}{\text{Comburant}} \right)_{\text{reel}} = \frac{1}{30} \quad (1.8)$$

Fraction définissant la valeur propre pour le model 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 liées à plusieurs problèmes on peut rencontrer les composés organiques volatiles (COV), les monoxydes de carbones (CO), les oxydes d'azotes (NOx), les fines particules.

I.3.2 Moteurs WARTSILA Vasa et thermodynamique

I.3.2.1 Moteur WARTSILA Vasa

Basé sur le principe de fonctionnement des groupes électrogènes, c'est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes électrogènes sont constitués d'un moteur thermique qui actionne un alternateur. Ces moteurs à combustion interne ont une géométrie particulière (Radoslav Plamenov Georgiev, juin 2011) plus rentable en termes de production d'énergie qui est la forme en V.

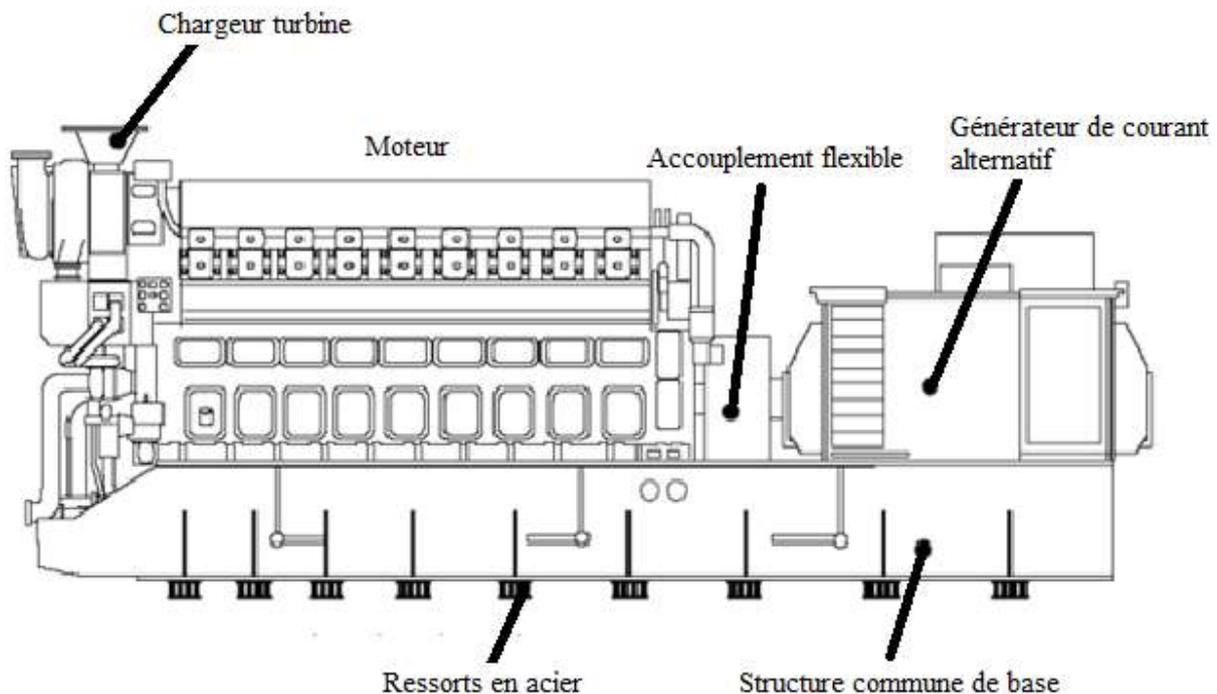


Figure 5: Disposition Fonctionnelle du moteur Wärtsilä Vasa (EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006)

Le générateur est constitué d'un moteur diesel Wärtsilä Vasa auto ventilé et un Générateur triphasé à CA (courant alternatif) rigidement structuré monté sur une base commune, la structure de base commune est installée en acier à ressort boulonné à la fondation, réalisant ainsi une bonne réduction des vibrations. L'accouplement flexible en sorte que le générateur et le moteur ne sont pas affectés mouvements mutuellement en raison de petits écarts

dans l'alignement, par la température ou libre, des force dynamiques. Tous les systèmes externes des tubes sont connectés au moteur par l'intermédiaire d'un raccord flexible. (WARTSILA DIESEL, mars 1996)

Le régime du générateur fonctionne comme tous moteur à quatre temps. L'injection directe Chargeur turbo et intercooler. Configuration V, le nombre de cylindres 18.

Le tableau résume pour chaque centrale les différentes caractéristiques liées aux moteurs.

Tableau X: Conditions de référence Caractéristiques des moteurs Wartsila Vasa (EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006)

Désignations	Caractéristiques	
	DIBAMBA	OYOMABANG I
Types	18V38E	18V32 LN
Alésage (mm)	380	320
Course (mm)	475	350
Nombres de cylindre	18	18
Sens de rotation	Sens d'horloge	Sens d'horloge
Vitesse de rotation (tr/min)	600	720
Puissance mécanique (KW)	11099	6582
Température ambiante °C	30	25
Refroidisseur d'air de charger	40	25

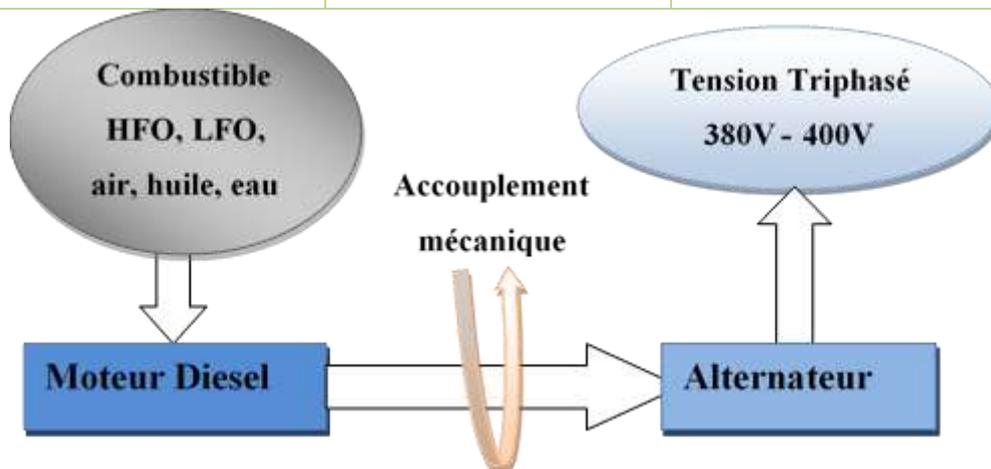


Figure 6: Schéma synoptique du processus de production des Moteurs Wartsila et Caterpillar

L'accouplement entre le moteur et l'alternateur est directement fait sur l'axe moteur ou vilebrequin par opposition à l'alternateur d'une automobile qui est entraîné par une courroie. D'une manière générale on dénombre quatre modèle de moteur selon l'arrangement des piston en forme de ligne, en forme radiale, en forme horizontale opposé et en forme de V (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011).

La représentation suivant la configuration en V des moteurs est bien particulier dans la mesure où le rendement énergétique est plus important que la simple configuration de part ces caractéristiques. (EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006), (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011).

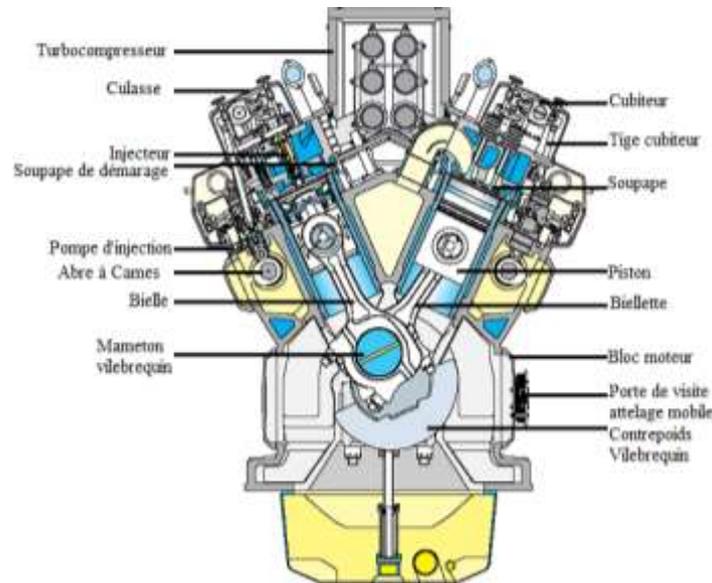


Figure 7: Bloc Moteur de configuration V d'un groupe WARTSILA VASA
(EDGAR RAMIRO ALCOSER et VIZUETE, 2006)

La description mécanique de son fonctionnement est basé sur le principe des moteurs diesel à quatre temps donc le brevet a été attribué en 1892 à Rudolf Diesel (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011).

D'un point de vue mécanique nous nous attarderons sur deux points essentiels celui de son cycle et de son diagramme de distribution. Ces différents points sont très importants dans le processus de combustion ou mieux encore dans les types de polluants que nous pouvons retrouver à la sortie de chambre de combustion. En outre le point de vue thermodynamique sera évoqué dans une autre partie pour mieux comprendre les échanges de température et des variables thermodynamiques.

- **Cycle à quatre temps**

Le cycle de fonctionnement du moteur diesel se décompose en quatre temps: Admission, compression, détente et échappement (voir Figure 9). Ce cycle correspond à deux allers retours du piston et deux tours de rotation du vilebrequin soit 720° en angle vilebrequin ($^\circ$ AV). Il se déroule de manière identique et déphasée dans chacun des cylindres. Les transformations subies par le fluide au cours du cycle théorique défini par Rudolph Diesel sont les suivantes. (Clarke Clarke Detroit Diesel-Allison and Detroit Diesel engines, 2011)

- Admission

Le premier temps correspond à l'admission d'air frais. La soupape d'admission est ouverte. Le piston descend du point mort haut (PMH), position haute extrême, au point mort

bas (PMB), position basse extrême. La dépression créée par la descente du piston permet l'aspiration d'air frais dans le cylindre. Cette phase d'admission est primordiale. La quantité d'air frais introduite dans le cylindre détermine la quantité de combustible pouvant être brûlée en phase de combustion et ainsi la puissance du moteur. Le moteur de GES est équipé d'un système de suralimentation permettant d'augmenter le taux de remplissage en air frais.

➤ Compression

Le deuxième temps correspond à la compression de l'air frais. Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées. Le cylindre est donc hermétiquement clos. Le piston monte du PMB au PMH et comprime l'air précédemment admis. Le taux de compression volumétrique du moteur diesel est élevé. La pression de l'air atteint de 10 à 25 fois sa valeur initiale. La température augmente également considérablement et dépasse le point d'inflammation du carburant. Un peu avant que le piston atteigne le PMH, le combustible est pulvérisé sous très haute pression dans la chambre de combustion par le biais de l'injecteur. Le combustible se mélange à l'air chaud, se vaporise puis s'enflamme spontanément.

➤ Détente

Le troisième temps correspond à la détente des gaz. L'injection se poursuit sur une dizaine de degrés après le PMH et pilote le déroulement de la combustion. La combustion libère l'énergie du carburant. Il en résulte une augmentation importante de la pression dans la chambre de combustion qui repousse le piston vers le PMB. C'est au cours de la phase de détente que le moteur produit un travail mécanique. Ce travail est converti en mouvement de rotation du vilebrequin par l'intermédiaire du système bielle-manivelle.

➤ Échappement

Le dernier temps correspond à l'échappement des gaz brûlés. La soupape d'échappement est ouverte. Le piston remonte du PMB au PMH et refoule les gaz brûlés. Le cycle moteur est alors bouclé. Les figures ci-dessous représentent les différents temps. Pour deux types de moteur en V et en forme de ligne.

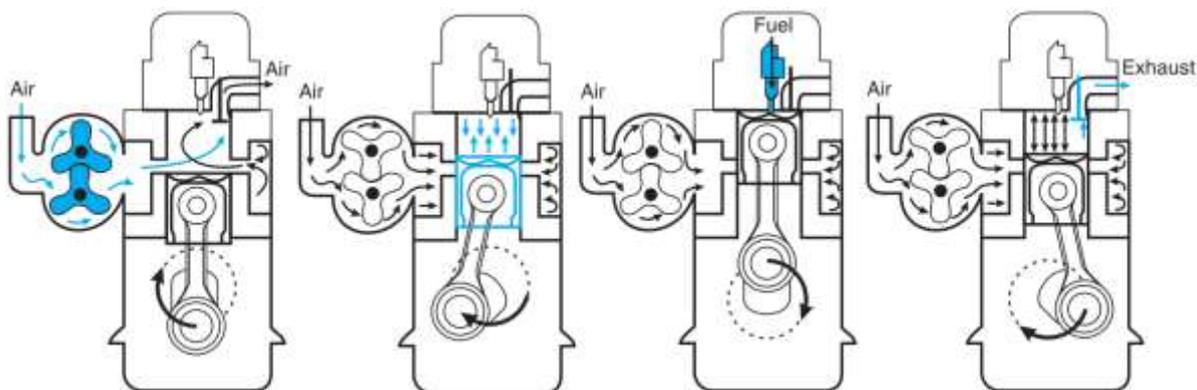


Figure 8: Principe de fonctionnement d'un moteur diesel en forme de ligne à quatre temps (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011), (Clarke Clarke Detroit Diesel-Allison and Detroit Diesel engines, 2011)

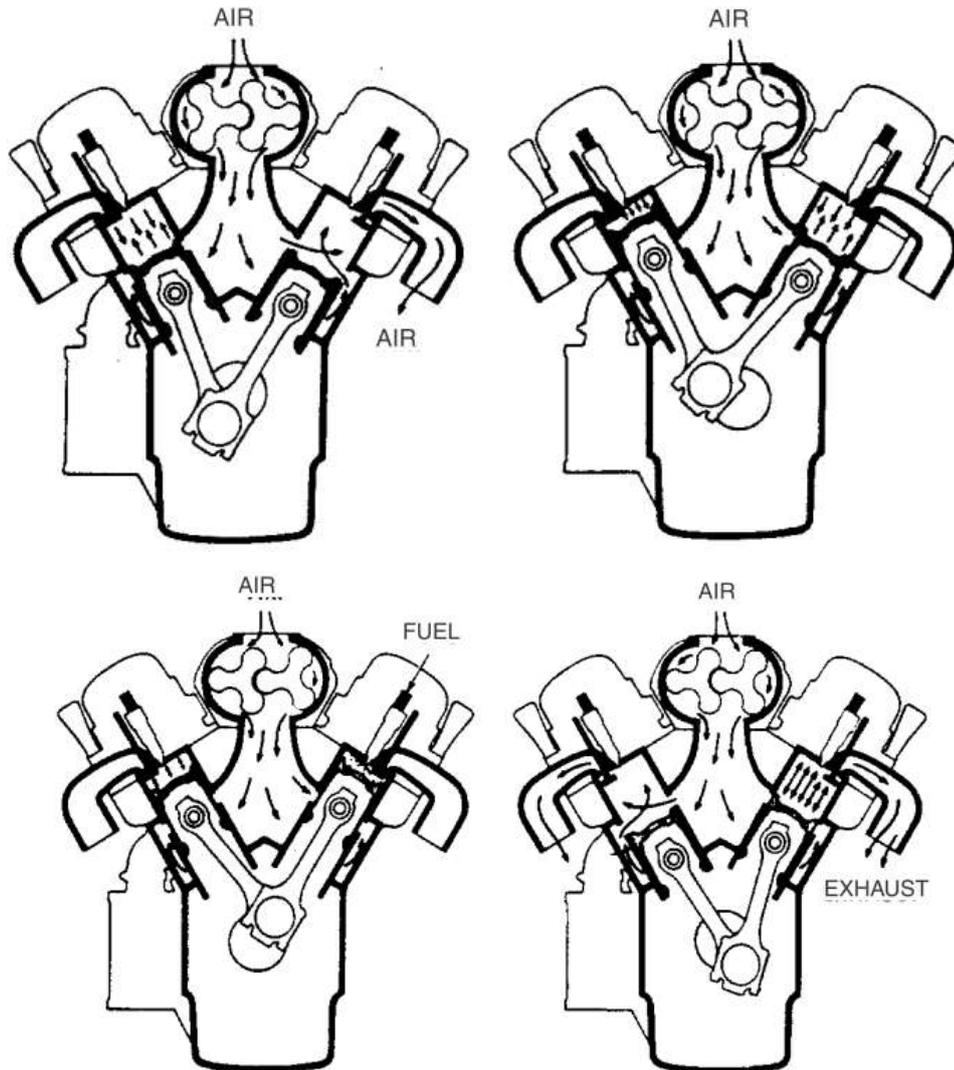


Figure 9: Principe de fonctionnement d'un moteur diesel en forme de V à quatre temps (Pedro Villanueva et Radoslav Plamenov, juin 2011), (Clarke Clarke Detroit Diesel-Allison and Detroit Diesel engines, 2011)

- **Le diagramme de distribution**

Le rendement d'un moteur thermique étant lié d'une part à la quantité de chaque remplissage des cylindres et d'autre part à la particularité que l'air ou le mélange carburé possède une certaine inertie, il en découle que lors de l'ouverture théorique de la soupape d'admission au point mort haut (P.M.H) l'air arrive avec un certain retard dans le cylindre et ceci d'autant plus tard que la vitesse de rotation est élevée, pour pallier cet inconvénient on donne une certaine avance à l'ouverture de la soupape d'admission avant le P.M.H, avance à l'ouverture d'admission (A.O.A).

Toujours à cause ou grâce à ce phénomène d'inertie, les gaz continuent de remplir le cylindre au point mort bas (P.M.B) on profite donc de l'occasion pour augmenter le remplissage en donnant du retard à la fermeture de la soupape d'admission après le P.M.B, c'est le retard à la fermeture d'admission (R.F.A).

En ce qui concerne la soupape d'échappement, le mécanisme est plus ou moins similaire en effet, toujours en raison de cette inertie des gaz, les constructeurs donnent une certaine avance à l'ouverture de la soupape d'échappement pour faire plus rapidement chuter la pression résiduelle et ainsi faciliter l'expulsion des gaz brûlés et le remplissage d'une nouvelle charge de gaz frais, c'est l'avance à l'ouverture d'échappement (A.O.E).

Idem pour ce qui concerne la fermeture de la soupape d'échappement qui s'effectue avec un certain retard après le point mort haut pour laisser évacuer ces mêmes gaz brûlés en profitant de leur lancée, c'est le retard à la fermeture d'échappement (R.F.E).

Ces avances et retards par rapport au P.M.H et P.M.B se mesurent en degrés qui peuvent occupés sur un volant moteur les positions représentés sur le diagramme ci-dessous.

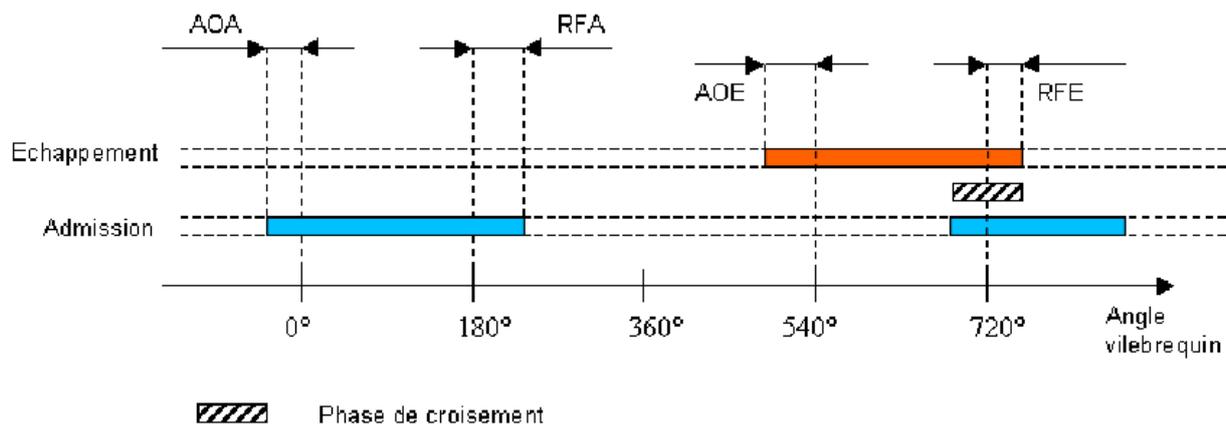


Figure 10: Schéma représentant la distribution des avances et retards à l'ouverture et à la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement (Hussein IBRAHIM et al, Novembre 2006)

I.3.2.2. Thermodynamique dans les moteurs Wartsilla Vasa

Dans les moteurs à combustion interne discontinue, la transformation de l'énergie chimique du combustible en travail mécanique résulte de la réalisation périodique dans le cylindre du moteur d'une série d'évolutions dont l'ensemble, qui se répète périodiquement dans le cylindre du moteur, porte le nom du cycle de fonctionnement du moteur. Lors de la présentation du moteur utilisé, son cycle de fonctionnement était le cycle diesel. De manière générale les moteurs diesel ont pour rôle de convertir l'énergie calorifique libérée par la combustion du carburant en énergie mécanique utile à l'alternateur pour sa production d'énergie électrique. Il s'agit d'une combustion chimique étudiée précédemment. Ce processus tient une place importante dans le suivi et le contrôle du moteur de plus il conditionne les performances

du moteur à la fois en termes de rendement, de pollution et des émissions sonores. De nombreux systèmes (système de combustible, air de refroidissement, lubrification, alimentation et échappement en air du moteur ...) **annexe 6** et sous-système auxiliaire sont impliqués dans le processus de la combustion et par conséquent de nombreux défaillances sont susceptibles d'en affecter le bon déroulement. L'étude thermodynamique du moteur peut être faite suite à la compréhension des transformations qui s'opère la chambre de combustion et pouvant être représenté par des diagrammes liés à des variables thermodynamique tels que, la pression, le volume et la température. Ceux-ci permettent de construire des diagrammes à deux variables permettant de présenter le cycle théorique, le cycle idéal et le cycle réel.

a- Diagramme théorique

En générale un phénomène est connu lorsqu'il peut être complètement résolu mathématiquement suivant qu'il soit dans une circonstance d'apparition, de croissance et de disparition. Dans le cas des cycles de moteurs à combustion interne, une résolution mathématique fine est encore impossible, compte tenu en particulier de la combustion qui reste encore un domaine susceptible de recherches, des échanges de chaleur aux parois, des transvasements, etc. On se contente donc d'une résolution grossière associée à des hypothèses simplificatrices qui tiennent compte de la méconnaissance de ces phénomènes (P. ARQUÈS, 1987).

La connaissance des cycles théoriques de moteurs alternatifs à combustion interne permet d'étudier l'influence des paramètres de la machine les plus importants, accessibles aux calculs. Elle reste une méthode d'étude des cycles réels intéressante pour les raisons suivantes (P. ARQUÈS, 1987).

- ❖ Facilité et simplicité des calculs moyennant des hypothèses simplificatrices convenablement choisies ;
- ❖ Possibilité de se rapprocher du cycle réel, en affinant les hypothèses, les calculs et les conditions aux limites pour une fraction du cycle ;
- ❖ Préparation aux développements informatiques permettant de calculer un cycle du moteur dans sa totalité.

Lors de l'analyse des cycles thermodynamiques (théoriques) on prend en considération les hypothèses suivantes :

- ✓ Le fluide moteur est un gaz parfait, idéal (l'inertie du fluide est supposée nulle donc pas de pertes de charge) qui ne change pas de nature (sa composition chimique) et de quantité au cours de son évolution dans le cycle ;

- ✓ Les évolutions sont considérées comme réversibles, c'est-à-dire que le gaz subit une succession de transformations très lentes, les caractéristiques du gaz restant à chaque instant en équilibre ;
- ✓ Un équilibre des pressions instantané existe entre l'atmosphère et le cylindre ;
- ✓ La combustion ainsi que l'échange gazeux, s'effectuant dans un cycle réel, sont remplacés par des processus d'apport et d'évacuation de chaleur dans un cycle thermodynamique. Ce qui conduit à considérer que la combustion du mélange gazeux est instantanée,
- ✓ L'échange de chaleur (par apport ou extraction) avec le fluide au cours de son évolution, est considéré en dehors de toute condition de réalisation. Donc, les deux temps de compression et détente sont considérés adiabatiques c'est-à-dire ils se déroulent sans échange de chaleur entre gaz et parois du cylindre ;
- ✓ Les caractéristiques du système gazeux isolé (fluide moteur) sont prises égales à celles de l'air, indépendantes de la température et de la pression (les capacités calorifiques à pression constante c_p et à volume constant c_v ainsi que leur rapport $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ont des valeurs fixes).

b- Cycle diesel idéal

Les transformations subies par le fluide au cours du cycle moteur sont généralement représentées sous formes de diagramme dit diagramme de CLAPEYRON qui représente l'évolution de l'état du fluide en fonction de sa pression P et de son volume V . Dans cette nouvelle partie l'étude de ce diagramme nous permettra notamment d'établir à l'aide du rendement thermodynamique théorique du moteur et des caractéristiques de conversion de l'énergie chimique les pertes en énergie et par conséquent des pollutions créées par le dysfonctionnement. Pour simplifier l'analyse, les hypothèses suivantes sont admises :

1. le système est fermé (pas d'échange de matière),
2. le cycle est fermé (les variations d'énergie sur un cycle sont nulles),
3. le fluide est un gaz parfait (les chaleurs massiques à volume constant C_v et à pression constante C_p ont des valeurs fixes),
4. les transformations du cycle thermodynamique sont réversibles (les transformations subies par le fluide sont composées d'une succession d'état d'équilibres).

Les transformations subies par le fluide au cours du cycle théorique défini par Rudolph Diesel sont les suivantes (Clarke Clarke Detroit Diesel-Allison and Detroit Diesel engines, 2011):

$O \rightarrow A$: admission à pression constante,

A → B : compression isentropique (sans perte de chaleur), où r_c est le rapport de compression volumétrique

B → C : combustion à pression constante, apport d'une quantité de chaleur, Q_{BC} à pression constante par combustion dans le cylindre et augmentation du volume d'un rapport

$$\tau = \frac{V_C}{V_B}$$

C → D : détente isentropique, des gaz jusqu'au volume initial

D → A : échappement des gaz à volume constant.

Le rendement thermodynamique du cycle diesel idéal, défini comme le rapport entre le travail fourni et la quantité de chaleur apportée au système en phase de combustion, est alors égal à :

$$r = 1 + \frac{1}{\gamma} \tau^{1-\gamma} \frac{1-c^\gamma}{c-1} \text{ avec } \tau = \frac{V_C}{V_B}, \text{ et } C = \frac{V_A}{V_B} \quad (1.9)$$

La chaleur de combustion,

$$Q_{BC} = \Delta H_{BC} = mc_p(T_C - T_B) = mc_p \tau^{1-\gamma} (c-1) \quad (1.10)$$

γ : le coefficient poly tropique du fluide ; τ : le taux d'injection ; c : le taux de compression volumétrique. Plus la combustion est rapide et plus le taux de compression est élevé, meilleur est le rendement. Ce dernier est typiquement de l'ordre de 50 %. Les détails de calcul de ce rendement sont donnés en **annexe 7**. La Figure 12 ci-dessous représente Les transformations subies par le fluide au cours du cycle théorique défini par Rudolph Diesel

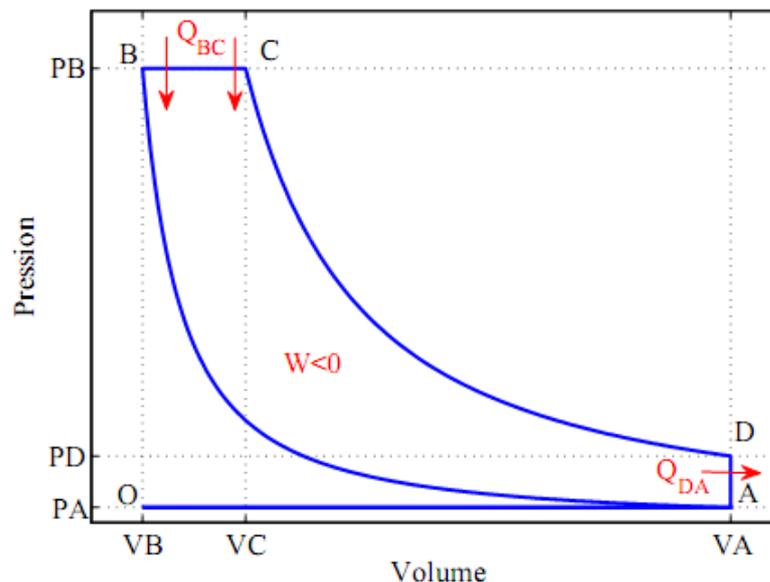


Figure 11:Diagramme de Clapeyron du cycle Diesel idéal (Mathieu Desbazeille, Juillet 2010.)

c- Cycle diesel réel

Les expressions du rendement du cycle théorique ne sont valables que si les hypothèses simplificatrices sont respectées. Concrètement ce n'est pas le cas, et le diagramme réel du moteur Diesel s'écarte distinctement du diagramme théorique, principalement en raison des transformations subies par le fluide de travail qui ne sont jamais réversibles. Le diagramme pression-volume du cycle réel (Figure 13) est globalement toujours inscrit à l'intérieur du cycle théorique en raison des pertes citées précédemment. La comparaison du cycle réel avec son cycle de référence permet de localiser facilement les parties du diagramme où les pertes affectent le rendement du moteur. Cet outil facilite donc l'analyse du motoriste qui peut par la suite mettre en place des corrections adaptées.

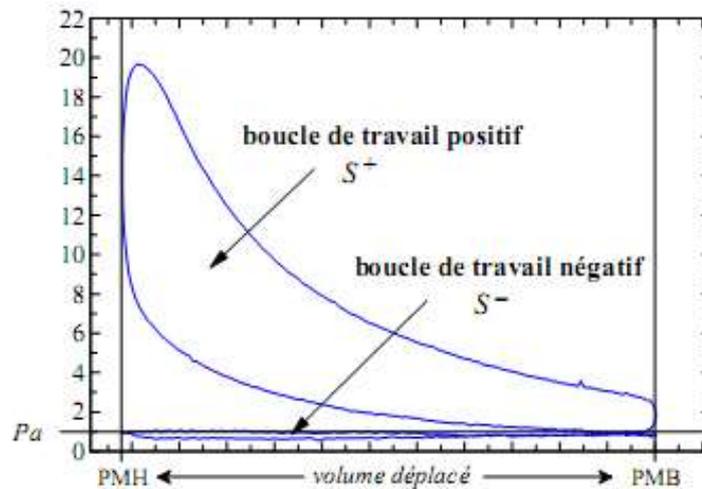


Figure 12: Diagramme pression-volume cycle Diesel réel (Olivier GRONDIN, Décembre 2004.)

d- Analyse du rendement de la CTO

Lors de la combustion du fioul lourd une quantité d'énergie Q_{BC} est fournie au système celui-ci convertit une partie en énergie mécanique E_m transmis à un alternateur à l'aide d'un volant moteur qui à son tour le convertira à la sortie d'une génératrice en énergie E_{elc} . Ce phénomène classique s'accompagne d'une combustion comme vue précédemment avec éjection des gaz chauds cela au cours de la dernière transformation du cycle. Ces gaz chauds transportent une énergie chimique vers l'atmosphère Q_{DA} cela se traduit par un rendement thermique (voir **annexe 7**):

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}} = \frac{E_m}{Q_{BC}} \quad (1.11)$$

L'énergie mécanique est transmise à la génératrice avec un rendement électrique

$$r_{alt} = \frac{E_{elc}}{E_m} \quad (1.12)$$

Si m_f est la masse de combustible injectée pendant une heure pour les cycles

PCI* (KJ/Kg)	D_v *	r_{alt} *	φ_{HFO} *	E_{etc} #	E_m #	Q_{BC} #	η_{th} #
	(L/h)		(Kg/L)	(MW)	(MW)	(MW)	
41640	1500	0,98	0,9551	6	6,1224	16,573	0,3694

correspondant et PCI le pouvoir calorifique du combustible, alors la quantité de chaleur apportée par le combustible, $Q_{com} = Q_{BC}$ est donnée par la relation :

$$Q_{com} = Q_{BC} = m_f PCI \quad \text{ou} \quad m_f = D_v \varphi_{HFO} \quad (1.13)$$

Pour une heure de fonctionnement en charge maximal on a pu relever et calculer les rendements suivant :

Valeurs calculées ; *Valeurs relevées à la CTO, CTM, DPDC

Tableau XI : Récapitulatif des Performances d'un cas de Moteur étudié à la CTO

Ce rendement nous permet de comprendre que nous nous éloignons très loin du cycle idéal qui est d'une valeur de 50% pour les moteurs diesel. De plus il nous donne un bref aperçu de la perte en termes d'énergie contenue dans les produits de combustion et plus encore en termes de perte au niveau du procès de production.

I.3.3 Mécanisme de la dispersion atmosphérique des polluants

La pollution atmosphérique est un phénomène qui exploite des modèles physiques. L'exploitation de son mode de transport et de dispersion nous permettrons d'évaluer les impacts environnementaux auxquels ils sont liés. Elle est généralement mesurée en termes de masse ou volume de l'espèce polluante présentent dans l'air en fonction de son échelle de dispersion on parlera des dispersions microscopique, locale, mésoscopique et macroscopiques. La répartition des centrales thermiques sur le territoire nationale permet de comprendre que cette dispersion est locale amis par effet cumulatif régionale elle prend une ampleur plus consistante. Elle est l'une des causes principales des maladies respiratoires comme, l'asthme, la bronchite et le cancer de poumon etc. Ces polluants existent sous plusieurs formes, les principaux sont entre autre le monoxyde de carbone (CO), le, ainsi que les oxydes d'azote (NO_x) et oxyde de soufre (SO_x), les poussières (PM) et composé volatils (COV). Ils sont généralement produits dans des secteurs urbains (la plupart du temps du trafic véhiculaire) et dans des régions industrielles. Les produits issus des moteurs sont transportés dans l'atmosphère par le déplacement de l'air. En général, leur mouvement est régi par toute une série de facteurs comprenant des conditions météorologiques, la topographie de la région locale et la nature des polluants elles-mêmes. La dispersion atmosphérique se rapporte au comportement de ces particules de polluant dans les écoulements turbulents dans l'atmosphère.

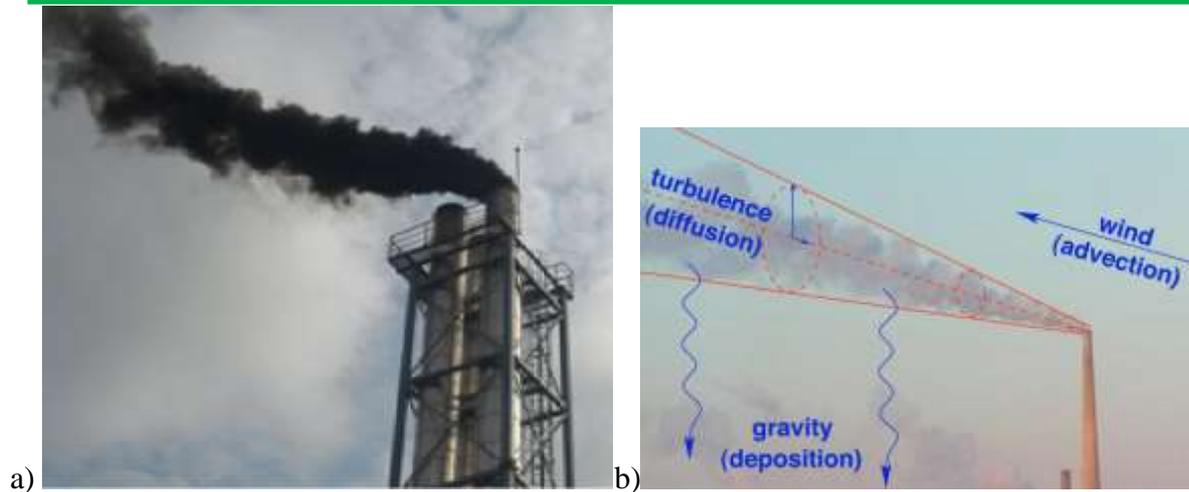


Figure 13: Illustration des trois principales contributions du transport atmosphérique

a) Cheminés des moteurs de la CTO I b) Illustration des modes de transport atmosphérique

Elle dépend aussi des conditions d'émission (hauteur de rejet ou position de la source dans l'espace considéré) et des phénomènes climatiques tels que la pluie dans le cas d'émission d'aérosols ou de vapeurs. Il est important de noter que les différents phénomènes de dispersion sont fondamentalement de trois types que sont :

1. Dispersion dans les basses couches
2. Dispersion de panaches
3. Dispersion avec turbulence

I.3.3.1 Typologie de dispersion atmosphérique de particules dans l'atmosphère

a- Dispersion dans les basses couches

Deux facteurs sont généralement mis en évidence dans la dispersion en basses couches ; Il s'agit des facteurs directs et indirects. Parmi les facteurs directs, on peut citer :

- ✓ Les conditions météorologiques (vitesse du vent, stabilité thermique de l'atmosphère, turbulence)
- ✓ La structure du paysage (nature du sol, rugosités, couverts végétaux, surfaces humides), obstacles, reliefs, etc.

A ces facteurs directs s'ajoutent aussi des facteurs dits indirects affectant la dispersion dont :

- ✓ Le type de particules (lourde, légère, réactive...).
- ✓ Les caractéristiques géométriques de la source (hauteur, taille), l'intensité (vitesse d'éjection, quantité), la position, la température et la composition du rejet.

b- Dispersion de panaches

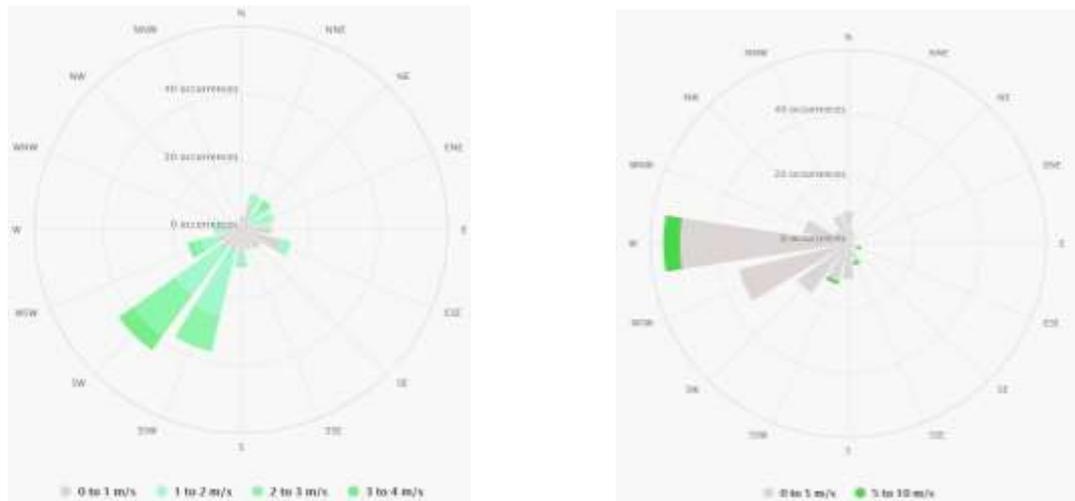
Le panache est une enveloppe conique créée par la diffusion d'un polluant émis en un point d'un écoulement turbulent.



Figure 14: Illustration d'une dispersion de panache de cheminées avec différentes hauteurs de cheminées (H. Schmit-Fadhit, 23 novembre. 2010)

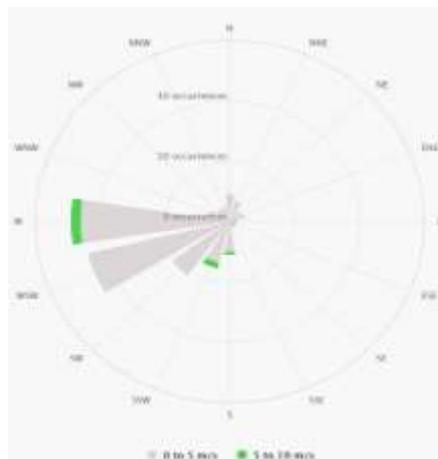
Dans cette configuration, les bouffées sont affectées par un cisaillement du vent. En fonction de l'intensité et de la rose du vent, les bouffées sont cisailées et ont tendance à s'orienter vers cette rose. Ainsi, on dit que les écoulements sont stratifiés et cisailés.

Comme l'indique les roses de vents dans chaque zones avec une précision d'observation d'un angle de 22.5° (NNE) et des rafales de vents à 10 m.



a- CT-Dibamba

b- CT-Mbalmayo



c- CT-Oyomabang

Figure 15: Rose des directions des vents des sites Géo référenciés (0-5 et 5-10 m/s)

c- Dispersion avec turbulence

Elle présente trois aspects essentiels :

- ✓ Les petits tourbillons

Cette turbulence est matérialisée par un accroissement régulier de la section du panache.

- ✓ Des tourbillons de différentes tailles

Ici la taille de la bouffée augmente avec des tailles de plus en plus irrégulières ;

- ✓ Des grands tourbillons

L'intensité des tourbillons dans cette configuration est très élevée et les oscillations vont dans tous les sens.

I.3.3.2 Mécanismes physiques phénomène de dispersion atmosphérique

a- conditions de rejet

Il s'agit essentiellement du mode d'émission et de la nature des espèces rejetées. Parmi les types de rejet dans l'atmosphère, on distingue les rejets instantanés et les rejets continus.

▪ Rejet instantané

Ils représentent le relâchement immédiat de la totalité d'un polluant. Les rejets de type instantané sont principalement caractérisés par la quantité émise à l'atmosphère et la pression de la capacité au moment de la rupture (éclatement). Cette dernière peut être différente de la pression de stockage dans certains cas (J.C Couillet et al, Décembre 2002).

▪ Rejet continu

Le rejet continu décrit un relâchement de polluants lié au procédé de l'installation (rejets de routine) ou émission par une cheminée d'extraction.

Pour un rejet à partir d'un réservoir, le débit varie généralement dans le temps puisque durant la vidange du réservoir, la quantité de produit stocké diminuant, la pression de fuite s'atténue dans le temps. Ainsi selon la durée des rejets (quelques heures ou annuels), le rejet peut être traité comme une succession de bouffées unitaires ou un véritable panache continu. Le panache est dans la plupart de cas de forme allongée. (J.C Couillet et al, Décembre 2002)



Figure 16: Rejet continu d'un produit (Tudor Florea et Sébastien Caillat, Avril 2008)

b- conditions météorologiques liées au phénomène de dispersion atmosphérique

La dispersion d'un polluant par voie atmosphérique est très dépendante des conditions météorologiques. Les phénomènes météorologiques à prendre en compte dépendent de la dimension du domaine étudié. Dans la majorité des cas traités dans le domaine du risque accidentel, l'échelle spatiale ne dépasse pas quelques kilomètres (au plus une dizaine) et celle de temps quelques minutes, à quelques heures. Le suivi du nuage de polluant se fera alors dans la couche limite atmosphérique (CLA). Cette couche est caractérisée par :

- une hauteur comprise entre 0-100 m ;
- un champ de vent moyen ;
- un champ de température

▪ Structure de l'atmosphère

Le profil vertical de l'atmosphère liant les différentes températures aux altitudes nous permet de constater qu'elle est divisée en quatre grande partie illustré par la figure 17.

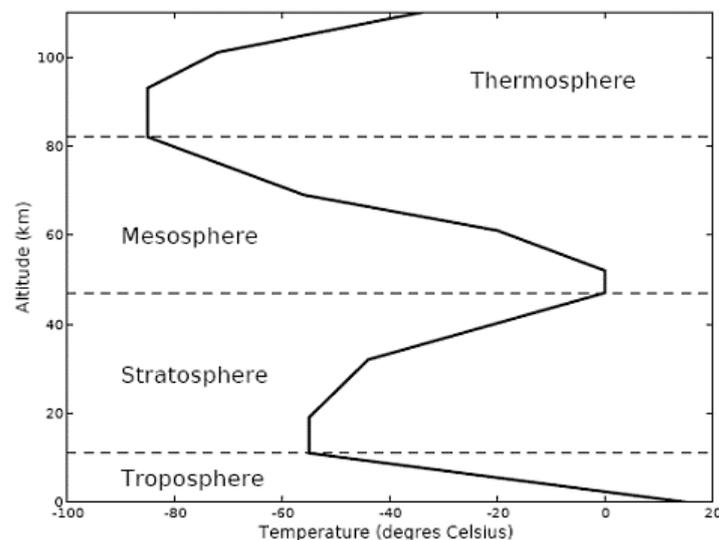


Figure 17: Profil vertical de température et principales couches de l'atmosphère (William FOTSEU NOUMOYE, 12 juillet 2000)

▪ Dynamique de l'atmosphère

Un polluant rejeté dans l'atmosphère est soumis aux différents mécanismes qui régissent les écoulements de l'atmosphère. Il importe donc de connaître, en particulier, la structure de l'écoulement du vent et du champ des températures. Cette dernière va être caractérisée par deux paramètres fondamentaux tels que le gradient vertical de vitesse et le gradient vertical de température. Ceux-ci sont régis par des phénomènes mécaniques lié au relief et des phénomènes thermiques lier aux couches limite et les zones de turbulences (Grant W. Petty, 4 septembre 2001)

Le mécanisme sous-jacent à la turbulence d'origine thermique est tel qu'un volume d'air élémentaire déplacé dans des conditions adiabatique vers le haut se détend du fait de la baisse de pression et par conséquent se refroidit. L'air sec se refroidit de $0,98^{\circ}\text{C}$ pour une élévation de

100 m (gradient de l'adiabatique sèche). L'air saturé en eau se refroidit de 0,55°C pour une élévation de 100 (gradient de l'adiabatique saturée).

L'évolution de la température de l'atmosphère avec la pression et l'altitude peut s'écarter de ces conditions mais en respectant une logique inverse.

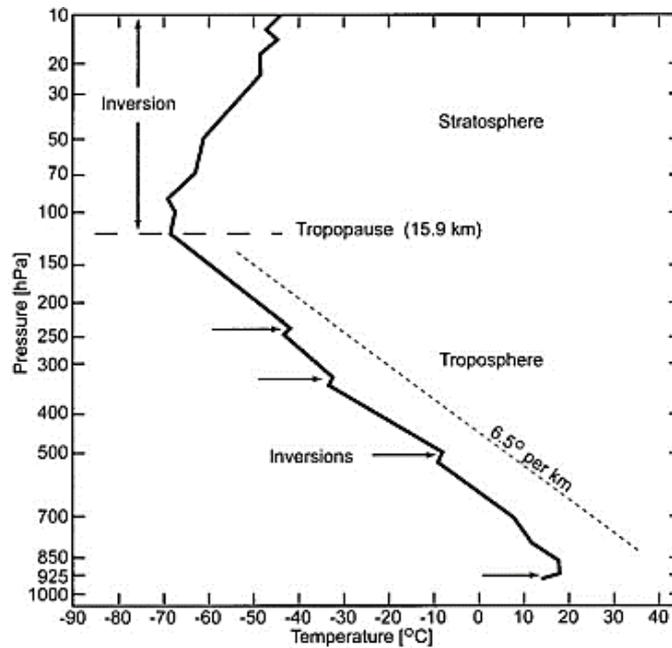


Figure 18: Profil de température typique aux altitudes moyennes (Grant W. Petty, 4 septembre 2001)

Les multiples rapports entre effets mécaniques et thermiques s'opérant dans la couche limite atmosphérique peuvent être décrits suivant trois états liés à la stabilité atmosphérique. L'atmosphère est dite instable, neutre ou stable selon que le mouvement d'une particule d'air soumise à une impulsion sur la verticale se voit amplifié ou amorti.

▪ **Degré de Stabilité de l'atmosphère**

Etudier la stabilité revient à étudier le signe de la force de flottabilité pour des déplacements donnés. En effet, en considérant le déplacement adiabatique vertical d'une parcelle d'air de volume unité (on entend par parcelle d'air un ensemble homogène de particules d'air se déplaçant de manière adiabatique, ayant une température différente de celle de son environnement et dont les pressions s'équilibrent à leur interface). Soient (T_p, ρ_p) et (T, ρ) les états respectifs de la parcelle d'air et l'air. La parcelle subit une force de flottabilité, résultante de son poids et de la poussée d'Archimède.

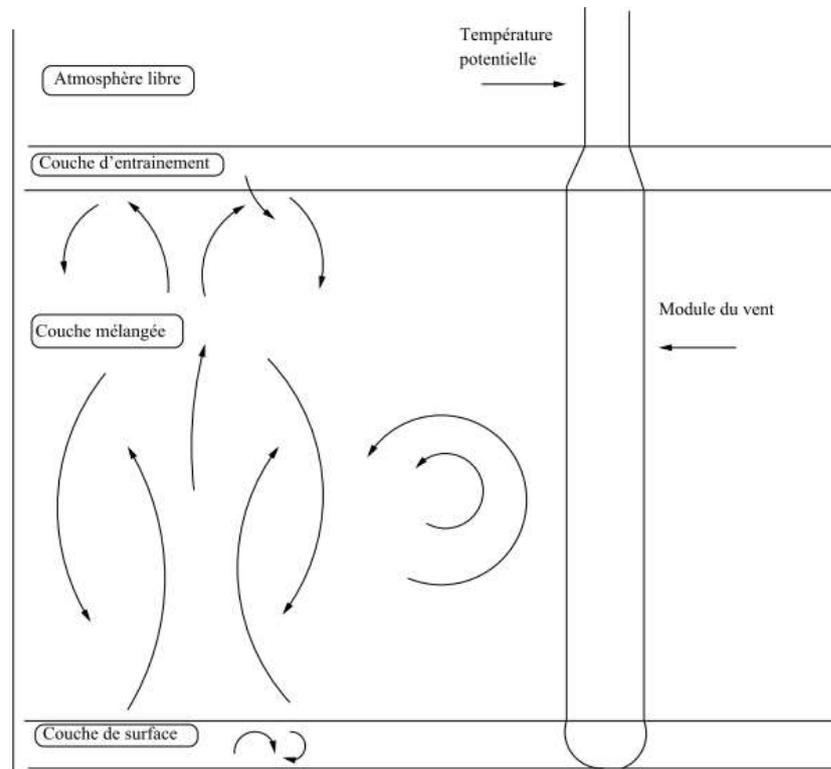
$$\vec{F} = (\rho - \rho_p) \vec{g} \tag{1.18}$$

Car on a un volume unité, L'accélération de la parcelle vérifie l'équation $\rho_p \vec{a} = \vec{F}$; soit :

$$\vec{a} = \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \vec{g} \tag{1.19}$$

En assimilant la parcelle et l'air à des gaz parfaits, l'égalité de pression à l'interface sera :

$$\rho T = \rho P T_p \text{ il vient que : } \vec{a} = \left(\frac{\rho}{\rho P} - 1 \right) \vec{g} = \left(\frac{T_p}{T} - 1 \right) \vec{g} \quad (1.20)$$



**Figure 19: CLA Instable (H. Schmit-Fadhit, 23 novembre. 2010),
(N.K.MERZOUK, 02 Mai 2006).**

La température potentielle est décroissante au voisinage du sol. On observe une production thermique qui n'a d'un échange turbulent de chaleur du sol vers l'air. Dans la couche de mélange (ou convective), une très forte turbulence règne contribue à homogénéiser les grandeurs (profils verticaux de température potentielle et de vent quasiment constants). Suivant la limite supérieure une couche d'entraînement ou d'inversion stabilise la CLA en présentant une inversion de température. (Bruno Sportisse, 2003)

En outre la classification de la stabilité atmosphérique peut dépendre de plusieurs facteurs différents, et dans l'esprit de l'élaboration d'un modèle de dispersion, il conviendra de synthétiser cette information en un ou deux paramètres, de manière à minimiser l'information à introduire dans la simulation.

Parmi les différentes possibilités, la plus populaire est sans conteste la classification de la stabilité selon un tableau type proposé au départ par Pasquill-Gifford (F. Pasquill and F.B. Smith, 1983.).

De manière simplifiée et plus empirique que les paramètres issus de la mécanique des fluides, Pasquill a mis au point un système de classification de la stabilité que Gifford a modifié plus tard. Ce système suppose que la stabilité dans les couches près du sol dépend de la radiation

nette, image de la convection verticale, et de la vitesse du vent, image des tourbillons mécaniques. Durant la journée, l'apport solaire est mesuré par la radiation (en W/m^2), qui est ensuite catégorisée en 4 classes (forte, moyenne, modérée et faible). Celle-ci dépend de la hauteur du soleil sur l'horizon, et donc de la date et de l'heure, ainsi que de la couverture nuageuse. Pasquill a également imaginé une situation particulière correspondant à un ciel totalement couvert, c'est-à-dire lorsque la proportion N de surface de ciel couverte par les nuages vaut 1, ainsi que deux situations de nuit, mesurée uniquement par la couverture nuageuse N. La vitesse du vent, elle, est catégorisée en 7 intervalles. A chaque couple de valeur insolation (ou couverture nuageuse) /vitesse du vent correspond une des 6 classes de stabilité notée par A, B, C, D, E ou F, allant de l'instabilité à la stabilité, selon la nomenclature suivante :

- A. Extrêmement instable
- B. Instable
- C. Légèrement instable
- D. Neutre
- E. Légèrement stable
- F. Stable à extrêmement stable effectuée au travers des classes

Tableau 12: Table 1: Classe de stabilité de Pasquill-Gifford, version simplifiée (Jacques NICOLAS – Flavien CRAFFE , Juillet 2003), (F. Pasquill and F.B. Smith, 1983.)

Vitesse du, vent à 10m de hauteur (m/s)	Jour			Nuit	
	Radiation Globale Ou Rayonnement solaire incident			Couverture Nuageuse (N) Ou Nébulosité	
	Forte $S > 60^\circ$	Moyenne $35^\circ < S < 60^\circ$	Modérée $S < 35^\circ$	Très Nuageux $4/8 < N < 7/8$	Très Nuageux $N \leq 4/8$
$U < 2$	A	A-B	B	F	F
$2 < U < 3$	A-B	B	C	E	F
$3 < U < 5$	B	B-C	C	D	E
$5 < U < 6$	C	C-D	D	D	D
$U > 6$	C	D	D	D	D

NB : Le nombre N correspond à la fraction du ciel couverte par les nuages (entre 0 et 1)

Dans ce tableau, la radiation forte correspond à la période de midi, lors d'une journée d'été ensoleillée et la radiation faible correspond à une situation similaire au milieu de l'hiver. Comme dans le tableau de Pasquill, indépendamment de la vitesse du vent, la catégorie neutre D sera affectée à une situation de jour ou de nuit où le ciel est totalement couvert, mais également à n'importe quelle condition de ciel durant l'heure qui précède ou l'heure qui suit la nuit.

C- Conditions environnementales liées au phénomène de dispersion atmosphérique

Cette partie de la basse couche limite, en proximité directe du sol, dit canopée, sont étudiés les écoulements entre les bâtiments industriels, lotissement, les vallées, falaises, collines et buttes, présent en raison de l'hétérogénéité de la topographie. Leurs structures sont particulièrement complexes, composées de couches de cisaillement, recirculations, sillages. (Dehlmoun L., 2012)

L'environnement influence également la dispersion de polluants dans l'atmosphère. On distingue d'une part des perturbations mécaniques liées à la nature des sols et la présence d'obstacles isolés et d'autre part des perturbations liées à de fortes discontinuités du sol conduisant à des effets thermiques tel que des brises en région côtière et les brises en région montagnaise. (BIA METEO N°8, 2015)

❖ **Perturbations mécaniques**

Elle Influence la nature des sols plus particulièrement la notion liée à la rugosité aérodynamique. La longueur de rugosité, exprimée en mètre, caractérise l'influence globale de la sous-couche rugueuse (couche de surface) sur le profil de vent. On parle également de taille caractéristique des tourbillons au niveau du sol. Cette rugosité est corrélée à la hauteur des obstacles au sol. (TURBELIN G., janvier 2000). On distingue en outre des perturbations mécaniques liées à la présence d'obstacles ou la topographie.

✓ **La rugosité**

La longueur de rugosité, exprimée en mètre, caractérise l'influence globale de la sous-couche rugueuse (couche de surface) sur le profil de vent. On parle également de taille caractéristique des tourbillons au niveau du sol. Cette rugosité est corrélée à la hauteur des obstacles au sol. Lorsque les irrégularités au sol sont de faible taille par rapport à celle du nuage, les perturbations qu'elles engendrent, n'affectent de façon globale la dispersion du nuage. L'hypothèse d'un terrain idéalement plat et de rugosité uniforme est généralement bien adaptée à cette problématique. Elle dépend, pour chaque direction, de l'homogénéité du terrain, du type d'obstacles et de la distance sur laquelle ces deux conditions s'appliquent. Il peut y avoir des variations significatives de la longueur de rugosité selon les saisons, dues par exemple aux feuilles ou à une couverture neigeuse. Une des caractéristiques d'un site de mesure du vent est donc sa longueur de rugosité dans chaque direction. Le calcul exact de la longueur de rugosité étant difficile, le tableau II fournit une classification qui peut être utilisée.

En supposant (Roughness-Dependent Geographical Interpolation of Surface Wind Speed Averages, 1986) que le vent mesuré à 60 m est représentatif du vent à méso-échelle et en utilisant le profil logarithmique du vent, il est possible de construire un abaque (équation 1.25) permettant de passer d'un vent mesuré à une hauteur z au-dessus d'un terrain de rugosité quelconque à un vent potentiel qui correspondrait à une mesure effectuée à dix mètres au-dessus

d'un terrain de rugosité 0,03 m (vent potentiel correspondant aux recommandations de l'OMM).

$$U_p = 0,76 \times U_s \times \ln\left(\frac{60}{Z_0}\right) \times \left(\ln\left(\frac{Z_s}{Z_0}\right)\right)^{-1} \quad (1.25)$$

Tableau 13: Classes de rugosité et classification des terrains d'après Davenport (1960), adaptée par Wieringa (1980) en terme de longueur de rugosité Z_0 et révisée par Davenport et al 2000 (**The revised Davenport roughness classification for cities and sheltered country, Aug. 2000**)

Classe	Description du terrain	Z_0 en mètres
1	Mer ouverte, « fetch » d'au moins 5 km	0,0002
2	Terrains bourbeux plats, neige ; pas de végétation, pas d'obstacles	0,005
3	Terrain plat ouvert ; herbe, rares obstacles isolés	0,03
4	Cultures basses ; larges obstacles occasionnels : $x/H > 20$	0,10
5	Cultures élevées ; obstacles dispersés : $15 < x/H < 20$	0,25
6	Terres clôturées, buissons ; obstacles nombreux : $x/H \simeq 10$	0,5
7	Couverture régulière par de larges obstacles (faubourgs, forêts)	(1,0)
8	Centre d'une ville avec des bâtiments de différentes hauteurs	fluctuant

Note : x représente la distance au vent de l'obstacle et H est la hauteur des principaux obstacles correspondants

Cette rugosité est corrélée à la hauteur des obstacles au sol comme l'indique la figure ci-dessous.

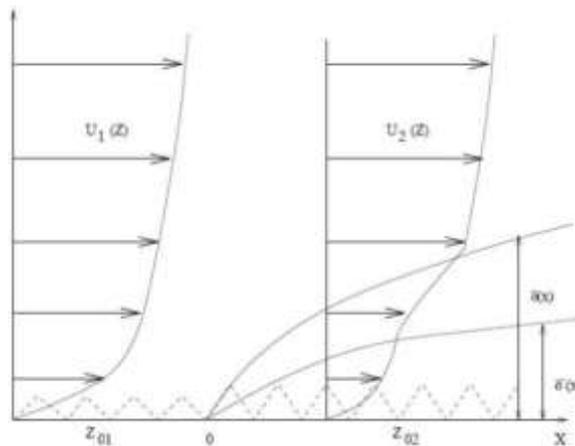


Figure 20: Effet de changement de rugosité sur le profil de vitesse (TURBELIN G., janvier 2000)

Cette figure présente l'effet d'un changement de rugosité sur le champ de vent où $\delta(x)$ représente la couche limite interne affectée par la discontinuité et $\delta'(x)$ la sous couche limite interne, l'écoulement est en équilibre vis-à-vis des nouvelles conditions de sol.

I.3.3.3. Pollution atmosphérique et éléments chimiques polluants dans l'atmosphère

La pollution atmosphérique n'est pas un problème nouveau. Depuis son apparition, l'homme a pollué par ses différentes activités : la production agricole, les déchets domestique, et artisanat puis les transports et à grande échelles les industries. On peut diviser la pollution atmosphérique en trois catégories, associant des échelles de temps et d'espace qui leur sont propres. (VENDEL F. , avril 2011)

- La pollution planétaire ;
- La pollution régionale ;
- La pollution de proximité.

Ces échelles sont en fonction du transport des polluants et donc de leur durée de vie qui dépend de la stabilité des substances chimiques. (Dehlmoun L., 2012)

Lors des études de phénomènes atmosphériques de l'ordre de l'heure (écoulements à l'échelle locale et dans la CLA), les échelles météorologiques évoluent sur des temps beaucoup plus grands : on peut donc les considérer comme constants. Ceci nous amène à présenter la figure donnant la relation entre les échelles temporelles et spatiales des phénomènes atmosphériques et spécifiquement recenser dans le tableaux 1 de l'annexe 8. (SADEK R. , mai 2013)

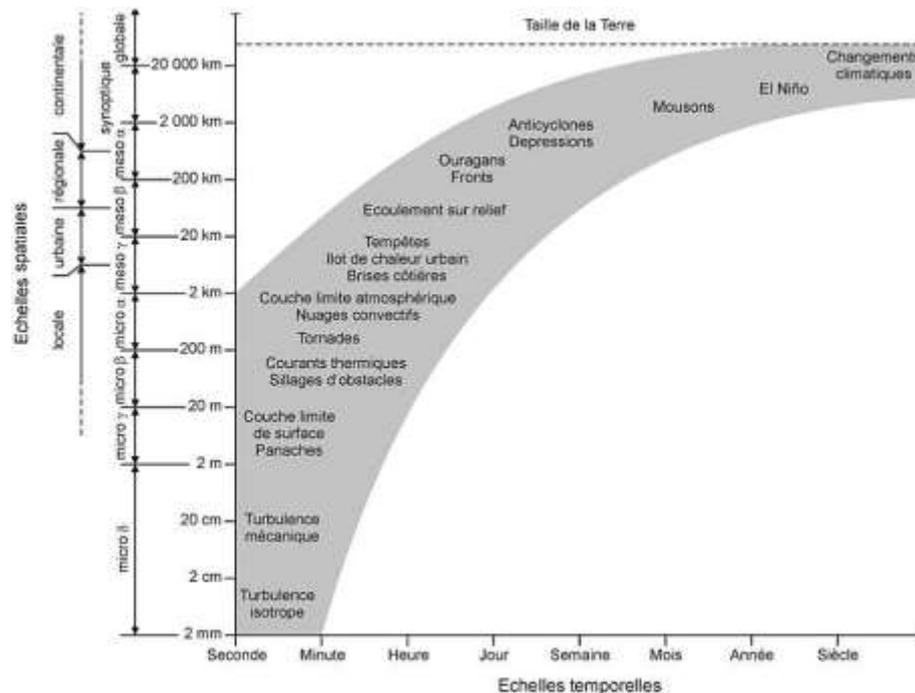


Figure 21: Graphique simplifié des différentes échelles spatiales et temporelles qui composent les phénomènes atmosphériques (SOULHAC L., Méjean, P., Perkins, R.J., 2002)

a- Les principaux polluants

Un polluant est un corps d'origine anthropique ou non, à l'état solide, liquide ou gazeux, contenu dans l'atmosphère et qui ne fait pas partie de la composition normale de l'air ou qui y est présent en quantité anormale. Les principaux polluants atmosphériques se classent dans deux grandes familles bien distinctes :

✓ Les polluants primaires ;

Les polluants primaires sont directement issus des sources de pollution, qu'elles soient d'origine industrielle ou automobile. Ces polluants sont transportés dans l'atmosphère par les vents locaux et dominants, ce transport pouvant amener au dépôt du polluant sur le sol, les bâtiments, la végétation, à l'accumulation dans certaines zones ou bien au transport hors de la ville. On y trouve des gaz tels que (Dehlmoun L., 2012):

- Des oxydes de carbone (CO) ;
- Des oxydes de soufre (SO₂) ;
- Des oxydes d'azote (NO_x) ;
- Des hydrocarbures légers ;
- Des composés organiques volatils (COV) ;
- Des particules contenant ou non des composés métalliques (plomb, mercure, cadmium.) ou organiques (PM10 et PM2.5).

Ces polluants primaires peuvent se transformer dans la basse atmosphère par photolyse, sous l'action des rayons solaires et de la chaleur, en polluants dits secondaires tels que l'ozone et autres polluants photochimiques (les PAN ou nitrates de peroxyacétyle, aldéhydes, cétones, etc...). Ces composés constituent le smog photochimique, donnant naissance à ce nuage brunâtre qui stagne parfois au-dessus des grandes villes comme Paris. Par exemple, l'ozone (O₃) résulte de la transformation chimique de l'oxygène au contact d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures, en présence de rayonnement ultra-violet solaire et d'une température élevée. (Bruno Sportisse, 2003)

✓ Les polluants secondaires.

La formation de polluants secondaires nécessite un certain temps durant lequel les masses d'air se déplacent (échelle régional voir même globale). Ce qui explique pourquoi les pointes de polluants secondaires concernent des territoires souvent plus étendus que les pointes de polluants primaires. En hiver (base température atmosphérique), la pollution atmosphérique est essentiellement due aux polluants primaires. En été (atmosphère dégager, mouvement des masses d'air propice), elle est beaucoup plus intense avec un mélange de polluants, différent de celui d'hiver. Les polluants secondaires dits photo-oxydants se forment par action du

rayonnement solaire sur les polluants précurseurs que sont principalement le dioxyde d'azote NO₂ et les composés organiques volatils COV.

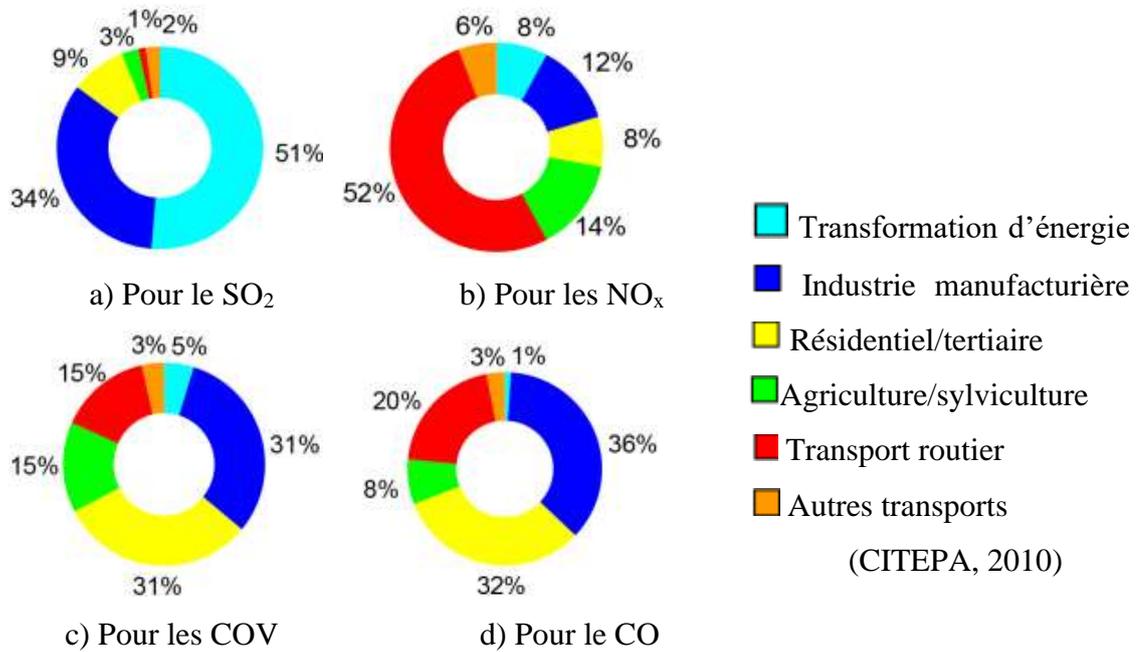


Figure 22: Pourcentage d'émission des principaux polluants par secteur en 2008
(VENDEL F., avril 2011)

b- Cycle de vie d'un polluant

La pollution de l'air est régie par un processus en quatre étapes (Dehlmoun L., 2012):

✓ L'émission

Une émission atmosphérique désigne un rejet dans l'air d'une source de substances gazeuses ou particulaires (industrie, chauffage, incinération, automobile...).

✓ Le transport

Les polluants subissent différentes influences extérieures qui les conduisent à se déplacer: hauteur du rejet, topographie du site, climatologie régionale, grands courants de vents, météorologie à grande échelle.

✓ La transformation

Le temps de séjour des polluants dans l'atmosphère dépend de leur capacité à se déposer sous forme sèche (sol, végétaux) ou humide (dissolution ou lessivage) ou à se transformer chimiquement. Cette transformation peut être provoquée par leur mélange dans l'atmosphère ou par une exposition à des conditions météorologiques particulières.

Ainsi, la combinaison d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils en présence des rayonnements ultraviolets conduit à la formation de la photo oxydante puissante telle que l'ozone.

✓ La déposition (immission) :

La déposition est le résultat des trois étapes décrites ci-dessus et désigne les taux de pollution mesurés dans l'air ambiant. Les polluants dits " primaires " sont directement émis et se retrouvent de ce fait en grande quantité près des sources d'émissions. Il s'agit d'une pollution dite de proximité. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne des sources, ces polluants primaires diminuent en concentration par effet de transport et de transformation pour laisser place aux polluants "secondaires", créés suite à ces transformations. Parmi ces quatre étapes, deux font l'objet d'une réglementation stricte: les émissions et les dépositions.

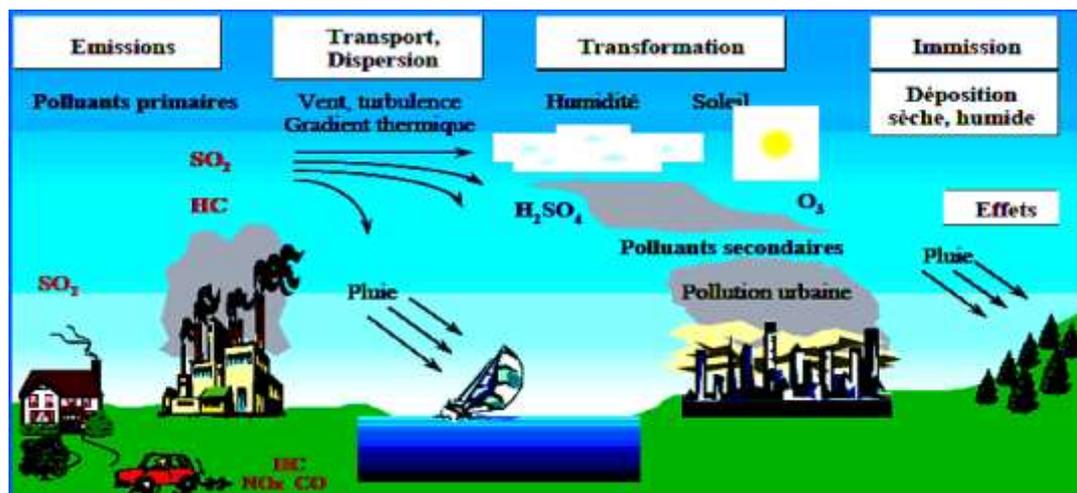


Figure 23: Le cycle de vie d'un polluant (Dehlmoun L., 2012)

Parmi ces quatre étapes, deux font l'objet d'une réglementation stricte : les émissions et les dépositions.

c- Cadre réglementaire du contrôle des rejets de polluant dans l'air au Cameroun

La loi cadre n°96/12 du 5 août 1996 régit la gestion de l'environnement au Cameroun. Cette gestion est soumise au respect des différentes conventions et traités auxquels le Cameroun adhère. Les principes qui soutiennent cette loi visent d'une part la prise des précautions pour la prévention des risques de dommages graves et irréversibles à l'environnement, par utilisation des meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable. D'autre part, ils concourent à responsabiliser tout pollueur et à faire contribuer tout citoyen à la protection de l'environnement.

La loi 96/12 du 5 août 1996 portant loi cadre relative à la gestion de l'environnement dispose en son article 17 que « le promoteur ou le maître d'ouvrage de toute installation qui risque, en raison de sa dimension, de sa nature ou des incidences des activités qui y sont exercées sur le milieu naturel, de porter atteinte à l'environnement est tenu de réaliser, selon les prescriptions du cahier des charges, une étude d'impact permettant d'évaluer les incidences directes ou indirectes dudit projet sur l'équilibre écologique de la zone d'implantation ».

Par ailleurs, l'article 6 stipulé que :

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

L'article 7 quant à lui prescrit que : Toute personne a le droit d'être informée sur les effets préjudiciables pour la santé, l'homme et l'environnement des activités nocives, ainsi que sur les mesures prises pour prévenir ou compenser ces effets.

En application au décret n° 2005/0577/PM du 23 février 2005 fixant les modalités de réalisation des Etudes d'Impact Environnemental, la CTO réalise à travers nous cette étude d'impact qui lui permettra de contribuer à la protection des composantes environnementales telles que: L'atmosphère, les ressources en eaux, la biodiversité. La protection de la composante atmosphérique passe par :

- La réduction des émissions et des substances polluantes (fumées, poussières, gaz toxiques, corrosifs ou radioactifs, odeurs) dommageables pour l'atmosphère et l'homme,
- La participation à la création des zones sensibles dans le but de limiter ou de prévenir un accroissement de la pollution atmosphérique suite au développement industriel,
- La prise des mesures tendant à l'application des normes existantes notamment le Protocole de Montréal et ses amendements, au développement et à l'utilisation des énergies renouvelables nettes à la préservation de la fonction régulatrice des forêts sur l'atmosphère.

La protection de la biodiversité par la loi cadre passe par la prise en compte des Articles 31' (1) et 36' (1) qui interdisent les déversements, les écoulements, immersions et incinérations dans les eaux et sur les sols de la juridiction camerounaise.

Les textes d'application récemment publiés en matière d'Etude d'Impact environnemental sont:

- Le décret n°2005/0577/PM du 23 février 2005 fixant les modalités de réalisation des études d'Impact Environnemental;
- L'arrêté n°0070 / MINEP du 22 Avril 2005 fixant les différentes catégories d'opérations dont la réalisation est soumise à une Etude d'Impact Environnemental.
- L'Arrêté n° 00004 / MINEP du 03 Juillet 2007 fixant les conditions d'agrément des bureaux d'études à la réalisation des Etudes d'Impact et d'Audits Environnementaux.

Pour ce qui est des polluants atmosphériques le ministre HELE Pierre du MINEP a bien précisé certaines limites de pollutions pour les quelques gaz récapituler dans le tableau 4 ci-après. Selon la Banque Mondial pour les qualités ambiante d'air dans les centrales thermiques voir tableau 5. Ces différentes limites et valeurs sur la qualité d'air nous permettrons de faire une bonne interprétation et discussions des résultats.

Tableau 14: Limite de pollutions pour quelques gaz (HELE P. Ministre, 2005)

Substance	Fioul lourd	diesel
CO	650 mg/Nm ³	450 mg/Nm ³
NO _x	300 mg/Nm ³	165 mg/Nm ³
SO ₂	2000 g/Nm ³	-----
Poussière (PM)	50 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³

Tableau 15: Ambient Air Quality in Thermal Power Plants (in micrograms per cubic meter)

<i>Pollutant</i>	<i>24-hour average</i>	<i>Annual average</i>
PM ₁₀	150	50
TSP ^a	230	80
Nitrogen dioxide	150	100
Sulfur dioxide	150	80

a: Measurement of PM10 is preferable to measurement of TSP. (WORLD BANK, July 1998)

d- Politique environnementale de gestion de la pollution industriels :

L'aspect législatif est une solution permettant d'imposer aux industriels une diminution de leurs émissions. Mais cette réduction des rejets de polluants d'origine anthropique passe aussi par la mise en œuvre de solutions technologiques alternatives. Les améliorations d'un procédé peuvent porter sur :

- **Les produits utilisés :** on remplace un produit polluant par un produit moins polluant. Par exemple, le plomb présent dans l'essence a été remplacé par des composés (**MTBD**) qui remplissent la même fonction ;
- **La consommation d'énergie :** il est possible de diminuer la consommation d'énergie d'un procédé et par conséquent la pollution générée par la production de cette dernière, en optimisant le rendement d'un procédé ;
- **Les traitements des effluents:** au jour d'aujourd'hui, il existe des techniques, utilisant des procédés de filtrage ou de dépoussiérage des fumées par exemple, qui permettent le retraitement de certains rejets que l'on ne peut pas complètement éliminer.

e- Quelques techniques de mesures de la pollution atmosphérique

Pour quantifier ces différents polluants au niveau des émissions ou des immissions/dépôt plusieurs techniques sont misent sur pieds. Celle-ci dépendent du/des type(s) de gaz recherché(s) (NICOLAS J., CRAFFE F. , Juillet 2003).

✓ **La chromatographie**

C'est une technique incontournable de la mesure des gaz. La séparation chromatographique est réalisée avec des mélanges contenant de nombreux constituants. Le mélange en très faible quantité est dissout dans un solvant et puis introduit dans une phase fixe, au sommet d'une colonne dont les conditions, notamment, doivent être adaptées au mélange.

✓ **La spectrométrie de masse**

Dans son principe, le spectromètre de masse est un appareil qui fait correspondre à chacune des masses, des éléments d'un corps (atomes, molécules, fraction ou association de molécules, radicaux). Ces mesures sont qualitatives car le spectre constitue une empreinte digitale plus ou moins caractéristique selon l'échantillon, des structures moléculaires et des conditions d'ionisation ; elles sont également quantitatives puisque l'amplitude du signal pour un fragment quelconque est directement proportionnelle à la masse de produits déposés dans l'appareil. Cette méthode s'applique à presque tous les gaz.

✓ **La spectroscopie**

Elle est basée sur l'analyse des rayonnements électromagnétiques se traduisant par un spectre d'absorption du gaz dans les longueurs d'ondes spécifiques. Cette méthode utilise l'absorption dans le visible, l'ultra-violet et l'infrarouge mesuré grâce au spectromètre. A cela s'ajoute la chimiluminescence et la photométrie pour la détection des composés tels que les oxydes d'azote NO_x , le monoxyde de carbone, l'ozone O_3 ainsi que certains composés soufrés et phosphorés.

✓ **La détection fondée sur la densité d'un gaz**

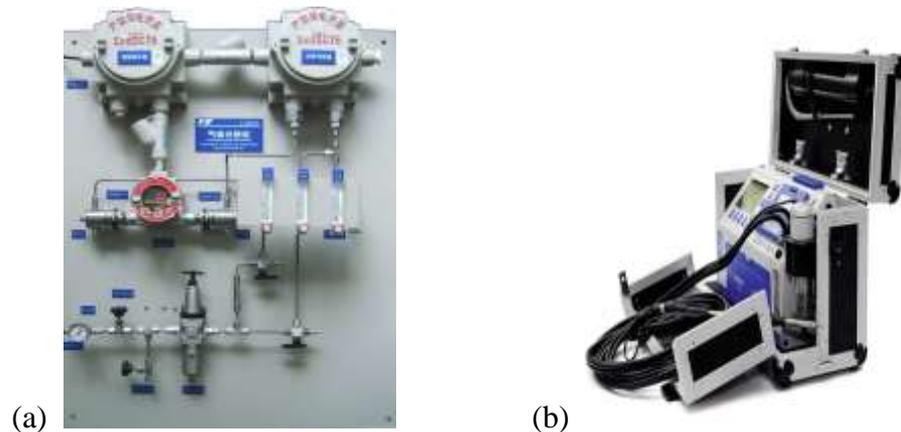
Son principe est basé sur la détermination de la densité ou balance à gaz qui elle-même dépend de la vitesse d'effusion, caractéristique de l'indice de réfraction du gaz à travers l'orifice. Elle est utilisée pour les composés organiques volatiles (COV).

✓ **Méthodes dite analytique**

Bien souvent, l'émission de polluant au cours d'un procédé dépend de l'activité réalisée. Pour les centrales thermique l'émission dépendra de son régime de fonctionnement : en période d'activité réduite comme en été, elle émettra moins que lorsqu'elle fonctionne à plein régime. Il est plus simple et plus contrôlable de définir un facteur d'émission à fonction réduite et un facteur d'émission en pleine charge. Du point de vue de chaque procédé, il est également plus logique de considérer que les émissions sont relatives à des régimes de fonctionnement regroupés sous la dénomination activité. De plus, cela permet de prendre en compte des variations d'activités au cours du temps, ce qui est important notamment pour l'étude de scénario d'émission. (LACOUR S., 2002) :

✓ **Méthode dite empirique**

Les estimations des GES et des polluants restent plus certaines par utilisation des analyseurs de fumée telle que l'ACM 32 (voir figure 34 b) 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 fixée tout au long des conduits (voir Figure 34 a). Notons que certaines centrales thermiques du RIS, RIE et RIN utilisent les capteurs portatifs (voir figure 34 b) du fait d'un manque sur la chaîne des installations des capteurs et analyseurs de fumées.



a) Analyseur de fumées fixable au système d'échappement b) Analyseur de fumées portatif

Figure 24: Analyseurs de fumées

I.3.4 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 or plume dispersion around single surface obstacles, 2003). 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 précalculés 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 précalculés 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 16. 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 de 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 16: Les différentes approches de modélisation et leurs échelles associées.

Type de modèle	Domaine de simulation	Applications
CFD (online ou offline)		
DNS	échelle très locale ~ 1km	Recherche (turbulence)
LES	échelle très locale ~ 1km	Recherche (turbulence)
RANS	échelle locale ~ 1 – 10km	Environnement complexe, urbain
Modèles offline		
Modèles gaussiens	échelle locale ~ 1 – 10km	Impact local, risque industriel
Modèles lagrangiens	échelle locale ~ 10km échelle régionale ~ 100km échelle continentale ~ 1000km	Risque industriel, biologique
Modèles eulériens de chimie-transport	échelle régionale ~ 100km échelle continentale ~ 1000km	Prévision (photochimie) Impact à grande échelle
Modèles globaux	échelle globale ~ 10000km	Transport intercontinentale
Modèles online à grande échelle		
CTM couplé	échelle continentale	Recherche (photochimie)
GCM (Global Climate Model)	échelle globale	Impact climatique

A 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,
- A Les modèles informatisés qui sont les programmes opérationnels qui implémentent les modèles conceptuels.

Le développement, la vérification et la validation d'un modèle est progressive, 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 ci-après :

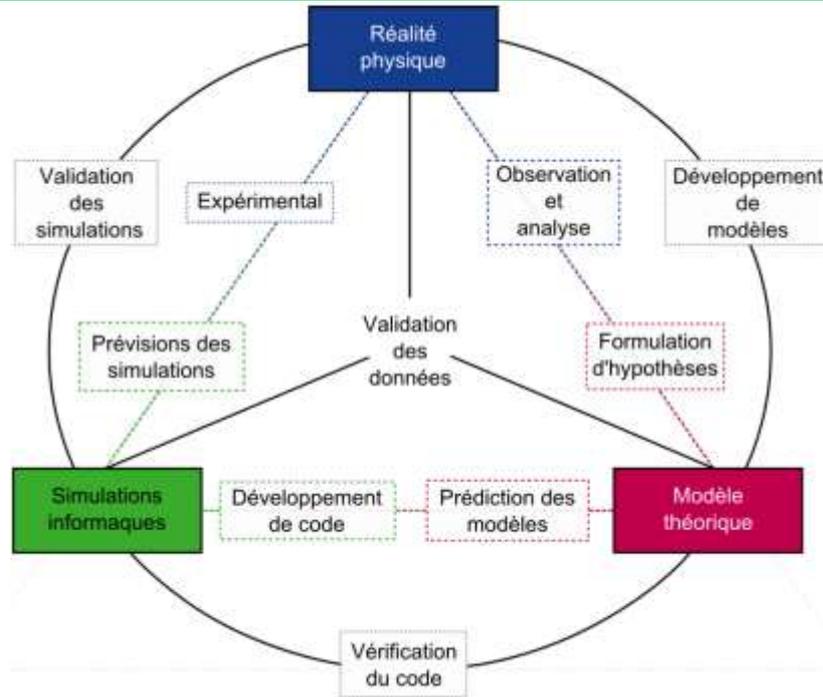


Figure 25: Représentation schématique des liens entre réalité physique, développement théorique et simulations informatiques (Pierre LAURET, juin 2014)

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.

I.3.4.1 Formalisme : Équation de chimie-transport

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 celui de la dispersion de polluant : transport, diffusion, filiation radioactive, dépôt sec et lessivage.

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 (modélisation offline). L'évolution de la concentration c_i est donnée par l'équation d'advection-diffusion-chimie, qui découle du principe de conservation de la masse (Pierre LAURET, juin 2014) :

$$\underbrace{\frac{\partial c_i}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{div(uc_i)}_{(2)} = \underbrace{div(D_{mi} \nabla c_i)}_{(3)} + \underbrace{x_i(c)}_{(4)} + \underbrace{\sigma_i}_{(5)} + \underbrace{P_i(c_i)}_{(6)} \quad 1.26$$

Avec :

- (1) le terme instationnaire ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$),
- (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 ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$),
- (3) le terme diffusif ou de diffusion moléculaire ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$), 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 $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$,
- (4) le terme de production ou de destruction de X_i par filiation radioactive éventuelle ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$). 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) σ_i représente les émissions (positives) ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$),
- (6) $P_i(c_i)$ représente les pertes par dépôt ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$).

I.3.4.2 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 c_i est représentative de la concentration moyenne dans la maille contenant c_i (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'équations 1.27.

$$\frac{\partial c_i(x,t)}{\partial t} = -\text{div}(u(x,t)c_i(x,t)) + \text{div}\left(\rho(x,t)K(x,t)\nabla\frac{c_i(x,t)}{\rho(x,t)}\right) + x_i(c(x,t), x,t) + P_i(x,t) + \sigma_i(x,t) \quad 1.27$$

Dans cette équation, $c_i(x, t)$ représente la concentration moyenne de l'espèce X_i en x et à l'instant t et $u(x, t)$ le champ de vent moyen. K est la matrice de diffusion turbulente ρ 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.

I.3.4.3 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 suivante (Korsakissok I., 2009):

$$c(x, y, z) = \frac{Q_s}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad 1.31$$

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 σ_y et σ_z sont estimés par des formules empiriques reposant sur la stabilité de l'atmosphère telles les formules de Briggs, (The estimation of the dispersion of windborne material., 1961), (Doury, A, 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 (Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident : A local-scal simulation and sensitivity study, 2013):

$$c(x, y, z) = \frac{Q_s}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{(y-y_c)^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-z_c)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_c)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad 1.32$$

Q est la quantité totale émise pour constituer la bouffée. (x_c, y_c, z_c) sont les coordonnées du centre de la bouffée. Les formules de dispersion pour σ_y et σ_z sont en général les mêmes que

dans le cas du panache gaussien. Pour les paramétrisations qui ne donnent pas de formulation spécifique pour σ_x (dans la direction du vent), celle de σ_y est utilisée.

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

$$Q = \Delta t_{puff} \sum_{i=0}^{N_{puff}} Q_s^i \quad 1.33$$

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 bouffée issues de la sources.

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).

I.3.4.2 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 1.28 (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):

$$X_k(t + \Delta t) = X_k(t) + V_k(X_k(t)) \Delta t \quad 1.28$$

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 :

$$m_k(t + \Delta t) = m_k(t) e^{-\tau \cdot \Delta t} \quad 1.29$$

Le coefficient τ 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 tels que :

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

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 suivante :

$$c(x, t) = \frac{1}{|\Delta V(X)|} \sum_{k=1}^N \delta_k(X, t) \cdot m_k(t) \quad 1.30$$

$\delta_k(x, t)$ 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 2.34 montre que la concentration, dans un modèle lagrangien, est une fonction discrète de l'espace et du temps.

I.3.4.4 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 R., 1988), (Garrat J., 1992), adaptées à l'échelle considérée.

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad 1.34$$

L'équation 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 :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{(2)} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{(3)} + \underbrace{g_i}_{(4)} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{(5)} \quad 1.35$$

Où

- (1) est le terme d'inertie ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$),
- (2) est le terme d'advection ($\text{kmol.m}^{-3}\text{s}^{-1}$),
- (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 de conservation de l'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + S_\theta \quad 1.36$$

Où θ est la température potentielle de l'air, C_p sa capacité calorifique, λ la conductibilité thermique moléculaire et S_θ un terme source ou puits.

Enfin, l'équation de transport de la concentration c de polluant, considéré passif chimiquement :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} + P + \sigma \quad 1.37$$

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

I.3.4.5 Autres approches

A côté de ces modèles classiques cohabitent des modèles alternatifs dans leur approche. Souvent, ces modèles sont issus de projets ayant pour but d'améliorer des caractéristiques des modèles classiques (par exemple la vitesse de calcul) ou bien d'adapter ceux-ci à des configurations précises. (Vendel F, 2011). a développé ce code de calcul à destination d'un site industriel pétrochimique, pour étudier la dispersion d'une substance rejetée, pour le suivi temps réel et en champ proche de la pollution atmosphérique. Elle intègre un grand nombre de conditions atmosphériques et de profils de vent de la couche limite de surface. Ce champ de vent autour des bâtiments composant le site industriel est sauvegardé dans une base de données. Lors de l'utilisation du modèle, la base de données de champ de vent est interpolée à partir des conditions météorologiques du moment. Cela permet d'obtenir très rapidement un écoulement représentatif de la réalité. Un modèle lagrangien SLAM (Safety Lagrangian Atmospheric Model) est appliqué à partir de la détermination du terme source de dispersion. Le schéma ci-après illustre la préparation amont et le fonctionnement en direct du modèle :

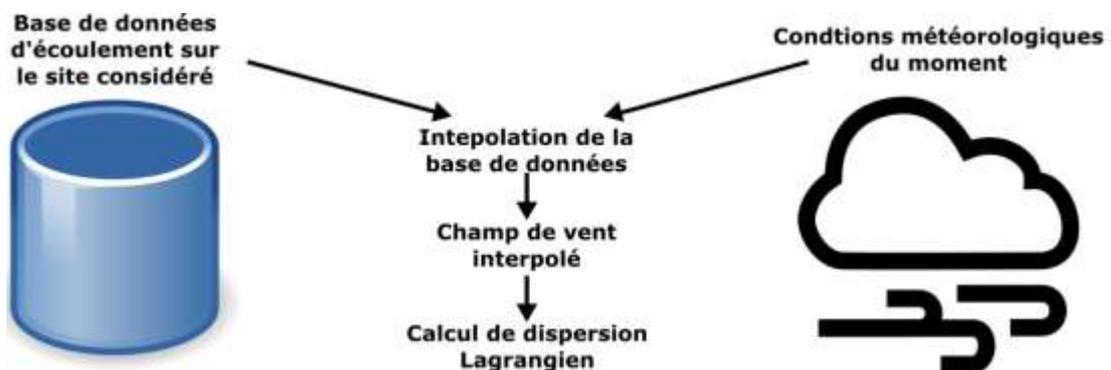


Figure 26: Schéma de fonctionnement du modèle de Vendel (VENDEL F. , avril 2011)

I.4. Techniques actuelles d'évaluation du bruit industriel et optimisation des sites

I.4.1. Techniques d'évaluation du bruit dans les sites industriels

Le développement de théories concernant la génération, la propagation et l'atténuation des ondes acoustiques résulte des techniques de mesure de l'énergie sonore. Dans cette partie nous traiterons les méthodes d'estimation du bruit actuellement utilisées. Les opérations génératrices de bruit dans un site industriel sont nombreuses et ne suivent pas une relation simple en ce qui concerne leur heure d'occurrence et les variations dans la génération de bruit. Deux sites industriels présentant les mêmes caractéristiques acoustiques seront rares. Par conséquent, il a toujours été d'un grand intérêt de rechercher une méthode adéquate d'évaluation du niveau de bruit industriel pour toutes les combinaisons possibles de sources de bruit et de paramètres d'influence. Les normes britanniques 5228: Partie 1: 1984 exposaient les principales méthodes d'évaluation du bruit des sites industriels (ISO 3744, 1994) (IEC 60050-151, 2001) .

Les perturbations acoustiques résultant de l'utilisation de machines industrielles sont analysées à l'aide des principes de l'acoustique des vagues, de l'acoustique des rayons ou de l'acoustique des énergies. L'approche acoustique des ondes décrit la propagation des ondes à l'aide du modèle particulaire. Dans l'acoustique des rayons, la propagation des ondes sur de grandes distances, comme celle dans l'atmosphère, est décrite en tenant dûment compte des effets du gradient de température et de la vitesse du vent. L'énergie acoustique utilise des techniques d'analyse statistique de l'énergie (ASE) pour décrire la propagation des ondes sonores sous forme de transfert d'énergie de différents paramètres. L'analyse statistique de l'énergie est une procédure de modélisation pour l'estimation théorique des caractéristiques dynamiques, des niveaux de réponse aux vibrations et du rayonnement de bruit dans des structures complexes, résonnantes et construites, utilisant des relations de flux d'énergie. Il a été accepté comme modèle de prévision du bruit et des vibrations des machines industrielles ainsi que pour l'optimisation de leur contrôle, en particulier dans les régions à haute fréquence où une analyse déterministe de tous les modes de vibration résonants n'est pas pratique. Lyon (1975), Woodhouse (1981), Stimpson et al (1986) et Norton (1989) ont abordé divers aspects de cette méthode de prévision de la puissance acoustique de sources (Predicting Sound Power Radiation from Built-up Structures Using Statistical Energy Analysis, 1986) (NORTON, M. P, 1989). La méthode ASE est devenue plus populaire pour l'analyse des problèmes de bruit et de vibrations industriels en usine. Cependant, cette technique nécessite des études expérimentales rigoureuses pour déterminer divers facteurs de perte. L'utilisation de cette technique ne sera ni

simple ni rentable pour l'évaluation du bruit dans l'environnement lors de l'exploitation des centrales à ciel ouvert. Les méthodes d'acoustique des vagues sont les plus fondamentales. La méthode d'acoustique des rayons est plus pertinente pour la propagation du bruit sur de longues distances.

L'objectif dans cette partie du travail est de développer une méthode d'estimation du niveau de bruit à l'intérieur et aux alentours des centrales. La plupart des méthodes actuelles sont basées sur des mesures de bruit. Nous allons passer en revue les méthodes existantes d'évaluation du bruit industriel et mettre en évidence les procédures de modélisation existantes.

I.4.1.1 Mesure du bruit

Un Bruit est une onde acoustique résultant de la vibration de l'air due à une suite de pressions et de dépressions. On y ajoute une conception plus objective qui décrit le bruit comme un son ayant généralement un caractère aléatoire et aucune composante définie. Celui-ci est produit par un ébranlement d'un milieu élastique qui se transmet au milieu ambiant et qui arrive sur le récepteur. Cet ébranlement se transmet sous forme de vibrations longitudinales allant de la source vers le récepteur. Physiquement, c'est un flux d'énergie par unité de temps et à travers l'unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation de la vibration sonore et physiologiquement dépend du jugement de l'auditeur, la sensation sonore varie comme le logarithme de l'excitation.

D'une manière simplifier on définit le niveau de bruit ou encore le niveau de puissance acoustique (L_w) analogue au niveau de pression acoustique (L_p) comme étant (CSTC, 2004):

$$L_w = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right), \text{ ou } L_w = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad 1.38$$

L'unité utilisée est le dB.

On définit I comme le flux d'énergie par unité de temps et à travers l'unité de surface : $I = \frac{P}{S}$

P étant énergie par unité de temps et S la surface perpendiculaire à la direction de propagation

Pour une source pondérée le niveau de pression acoustique pondérée en un point A de l'onde, fluctue un certain nombre de fois par seconde autour de la pression atmosphérique. La pression acoustique en ce point est la différence entre la pression atmosphérique et la pression de l'air en présence d'ondes acoustiques et le niveau de pression difficilement accessible varie avec le carré de la pression sera donné par l'expression (Khanindra PATHAK, 1996), (CSTC, 2004) (CSTC, 2006);

$$L_{PA} = 20 \log\left(\frac{P_A}{P_0}\right) = L_p = 10 \log\left(\frac{P_A^2}{P_0^2}\right) \quad 1.40$$

P_A = pression acoustique en Pa,

P_0 = pression acoustique de référence égale à $20\mu\text{Pa}$ ($2 \times 10^{-5}\text{Pa}$)

Ici le rapport $\frac{P_A^2}{P_0^2}$ remplace dans le niveau de puissance acoustique $\frac{I}{I_0}$. Comme

notation des indices nous définirons le niveau de pression acoustique pondéré en fréquence et en temps en dB tels que la pondération en fréquence indiquée A ou C et la pondération en temps indiquée F (125ms) ou S(1000 ms). D'autre part en cas d'évènements isolés (1,2, i...n) pour un évènement i (évènement pour la i^{ème} mesure), pour la j^{ème} source fonction du type de bruit pendant un intervalle de temps T(période allant de t_1 à t_2) où on ne peut pas distinguer les évènements isolés

Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, en dB est la valeur du niveau de pression acoustique pondéré A d'un son continu stable qui, au cours d'une période spécifiée T, à la même pression acoustique quadratique moyenne qu'un son considéré dont le niveau varie en fonction du temps (Khanindra PATHAK, 1996) (CSTC, 2006).

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right] \quad 1.41$$

Avec, T, période qui commence à t_1 et se termine à t_2 .

P_A = pression acoustique en Pa,

P_0 = pression acoustique de référence égale à $20\mu\text{Pa}$ ($2 \times 10^{-5}\text{Pa}$)

$L_{Aeq,T} = L_{A,T}$. L'unité utilisée en dB.

Les conditions météorologiques ici sont celles conformes à l'ISO 1996-2:1987,

Etant données que cette équation n'est pas totalement satisfaisante, des évènements individuel et propre aux sources ont besoin d'être caractérisées sachant que leurs effets peuvent se combiner au problème initial. C'est ainsi que nous définirons à cet effet :

- **Niveau de pression acoustique, L_p**

Le niveau de pression acoustique est défini en décibels à 20 fois le logarithme (à la base 10) du rapport entre la pression acoustique moyenne par rapport aux racines et la pression acoustique de référence de $20 \mu\text{Pa}$. Ce doit être indiqué avec la largeur de bande de fréquence.

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad 1.42$$

P_{rms} Valeur moyenne carrée de la racine, P_{ref} Valeur de référence

Le niveau de pression acoustique instantané maximal, pendant une période donnée ou un évènement, est appelé niveau de pression acoustique de pointe, L_{peak} .

- **Le niveau de pression Jour-Nuit**

Celui-ci décrit le caractère désagréable du son dans les zones résidentielles et mathématiquement donné par :

$$L_{JN} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left(15 \times 10^{\frac{L_{eqJ}}{10}} + 9 \times 10^{\frac{L_{eqN}+10}{10}} \right) \right] \quad 1.43$$

Où, L_{eqJ} : niveau sonore équivalent pour la période de 15 heures de 7h00 à 22h00.

L_{eqN} : niveau sonore équivalent pour la période de 9 heures à partir de 22h00 à 7h00

- **Niveau équivalent de bruit dans la communauté, CNEL**

Cet indice de bruit est utilisé dans la prévision du bruit des avions. L'équivalent bruit de la communauté niveau est basé sur le niveau d'exposition au bruit pour un événement unique, qui

est approximé comme suit :

$$S_{ENL} = L_{\max} + 10 \log \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) \quad 1.44$$

où,

S_{ENL} : niveau d'exposition au bruit d'un événement (dBA).

L_{\max} : niveau sonore maximal pondéré A lors d'un survol

Le niveau d'équivalent bruit communautaire est défini comme le niveau sonore le plus élevé mesuré sur sonomètre, pendant un intervalle de temps désigné ou un événement, en utilisant une moyenne temporelle rapide et pondération A. Le terme $t_2 - t_1$ représente la durée effective de l'événement(s) donnée par l'intervalle entre les points bas 10-dBA. Le niveau équivalent de bruit dans la communauté (C_{NEL}) est donné par :

$$C_{NEL} = S_{ENL_{mean}} + 10 \log(N_d + 3N_e + 10N_n) - 49.4 \quad 1.45$$

Où, $S_{ENL_{mean}}$ = moyenne énergétique (dBA), c'est-à-dire S_{ENL} pour un survol typique

N_d : Nombre de survol entre 7h00 et 19h00

N_e : nombre de survol entre 19h00 et 22 heures

N_n : nombre de survol entre 22h00 et 7h

Il est nécessaire de convertir les prévisions en C_{NEL} en L_{JN} . L'approximative relation est :

$$L_{JN} = C_{NEL} \pm 3 \quad 1.46$$

- **Niveau d'exposition au bruit, L_{Ax}**

Le niveau de l'intégrale dans le temps du niveau de pression acoustique au carré pondéré A sur un intervalle de temps indiqué ou événement par rapport à la pression acoustique de référence au carré (20. tPa) et une durée de référence de 1 seconde est appelée niveau d'exposition au bruit. Si le son l'énergie associée à un seul événement est connue, il est facile de calculer L_{Ax}

pour l'événement et donc L_{eq} pour un nombre quelconque d'événements. Les valeurs L_{AX} pour les sources de bruit contributives peuvent être considérées comme des blocs de construction individuels utilisés dans la construction d'une valeur calculée de L_{eq} pour le bruit total.

La valeur de L_{eq} due à l'effet combiné de n événements ayant chacun son propre événement Le niveau d'exposition au bruit L_{AXi} est calculé comme suit :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{\tau_{ef}}{T} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{AXi}}{10}} \right] \quad 1.47$$

Où T est la durée totale en secondes et τ_{ef} est 1 seconde.

I.4.1.2 Instrument de mesure et indice d'estimation du bruit

Les instruments de mesure du niveau sonore utilisent différentes pondérations ou réseaux de filtres pour prendre en compte les variations de niveau sonore des niveaux de pression acoustique. Aux fins de la mesure du bruit, le réseau de pondération A a été accepté industriellement et l'unité de mesure du bruit est souvent écrite en dBA. Le niveau de bruit en un point éloigné du champ éloigné d'une source de bruit dépend principalement du niveau de puissance acoustique de la source et de l'influence de facteurs externes. La prévision du niveau de bruit implique donc la mesure de la puissance acoustique de la source.

a. instrument de mesure

Le développement de l'instrumentation au cours des trois dernières décennies a permis de détecter avec précision les variations de notre environnement acoustique. Les mesures de bruit sont effectuées sous forme de mesures de niveau de pression acoustique ou d'intensité sonore à l'aide de dosimètres et sonomètres. Des instruments sont disponibles pour l'analyse fréquentielle en temps réel des ondes acoustiques.

Les mesures de bruit peuvent être effectuées en tant que mesures de précision, mesures techniques ou mesures d'arpentage, comme spécifié dans la norme britannique BS 4196. Yang et Elusion (1985) ont classé les procédures de mesure dans ces normes selon la méthode de mesure, les environnements de test, les caractéristiques des mesures niveau de bruit et de puissance acoustique pouvant être obtenu. Le schéma directeur de ceux-ci est résumé comme présente la figure 38.

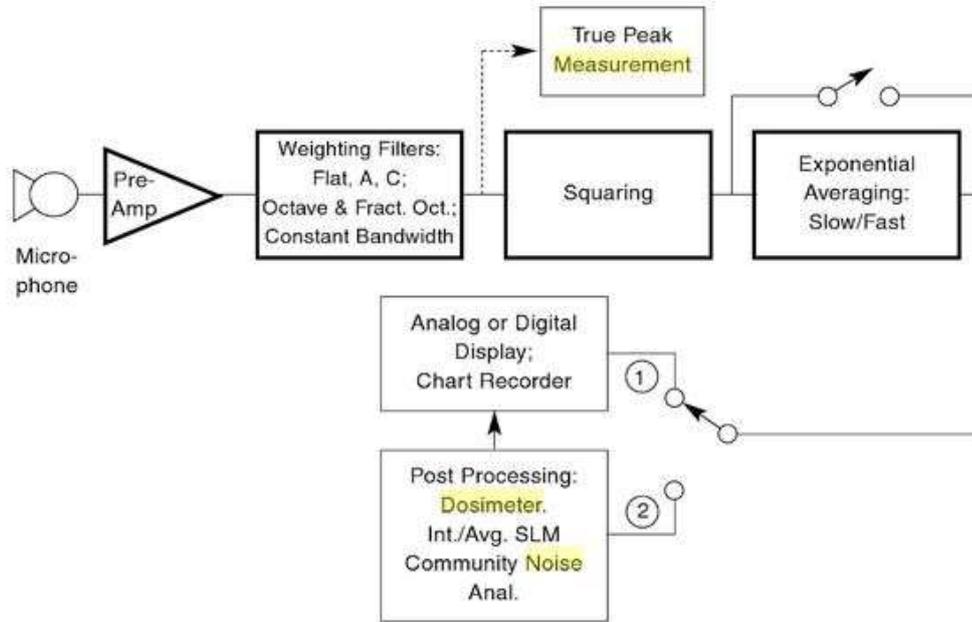


Figure 27: Analyseurs de niveau sonore génériques

b. Indice d'estimation du bruit

Le bruit est décrit de manière objective en termes de niveau de pression acoustique ou d'intensité acoustique au niveau des récepteurs et en tant que niveau de puissance acoustique à la source. La sonie, la gêne, les interférences de sommeil et le masquage sont quelques descriptions subjectives du bruit. Cependant, ces mesures ne donnent pas une impression globale de l'exposition totale au bruit d'un auditeur.

Il était donc nécessaire de mettre au point une méthode permettant de représenter de manière exhaustive l'historique de l'exposition au son. Les descripteurs de bruit couramment utilisés peuvent être représentés de manière générale par la Figure 36.

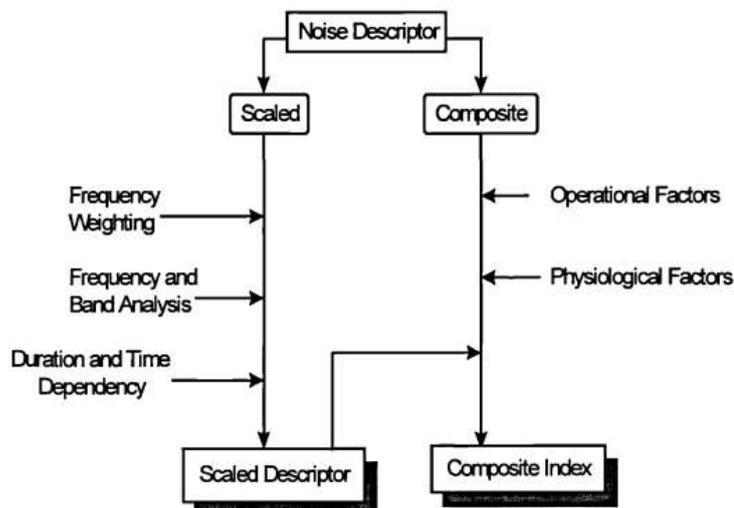


Figure 28: Descripteurs de bruit

Le tableau 1.A9 de l'annexe 9 présente les différents descripteurs de bruit utilisés pour la mesure et la représentation des niveaux de bruit. Il existe différentes méthodes pour convertir les informations de niveau de bruit en fonction du temps en indices simplifiés.

I.4.1.3 Evaluation du Bruit

Un certain nombre de chercheurs ont mis au point des modèles d'évaluation des niveaux de pression acoustique et de l'atténuation autour des complexes industriels (Tonin, 1993). Une équation généralisée de ces modèles prend la forme suivante :

$$L_P = \sum_{sources}^{\log} \left[L_W - \sum_i (A_i) \right] \quad 1.48$$

Ou,

L_p : niveau de pression acoustique résultant en un point du champ de bruit

L_w : niveau de puissance acoustique de la source

A_i ($i = 1, 2, 3 \dots$) : atténuation applicable dans le site considéré

Ainsi, tous les modèles d'estimation du bruit reposent sur la détermination du niveau de puissance acoustique des sources de bruit et l'évaluation de l'atténuation de l'énergie acoustique lors de la propagation de la source au récepteur. Le tableaux 2.A9 de Annexe 9 présente divers modèles d'estimation du bruit.

Ces modèles ne sont pas directement applicables à une mine à ciel ouvert ou à une carrière pour les raisons suivantes :

- ✓ Le niveau de puissance acoustique des sources réparties dans la mine ne peut pas être représenté de manière unique,
- ✓ L'emplacement des sources continue de changer avec le temps. Ainsi, les sources de la directive affectent le niveau de bruit aux points de réception différemment,
- ✓ Les sources de bruit sont situées à une profondeur et la profondeur varie avec le temps,
- ✓ Les sources statiques et en mouvement sont présentes simultanément,
- ✓ En raison des conditions de géo-extraction, il n'existe pas deux mines offrant le même niveau d'atténuation,
- ✓ Les profils de vitesse du vent à différents endroits autour de la fosse changent en fonction des variations topographiques de la mine et de la surface qui l'entoure.

Par conséquent, la prévision des niveaux de bruit dans le champ lointain d'une centrale thermique ou des site industriel nécessite des études spécifiques au site.

I.4.1.4 Évaluation et prévision du bruit industriel

L'évaluation du bruit industriel dépend en grande partie d'une évaluation appropriée des sources de bruit. Les sources de bruit industrielles sont une composition aléatoire de diverses sources. Ils se comportent différemment selon leur mobilité, leur périodicité et leurs caractéristiques. En conséquence, il existe différents types de sources, comme le montre la figure 38

Par conséquent, une approche prudente et systématique est nécessaire pour une évaluation et une prévision fiable du bruit de l'environnement dû à de telles sources. Les procédures appliquées et les facteurs d'influence sont abordés dans cette section. Les étapes essentielles de l'évaluation du bruit sont les suivantes :

- Quantification du bruit émis par les sources en fonction des niveaux de puissance acoustique dans les bandes de fréquences (généralement octaves ou tiers d'octaves) et des facteurs de directivité,
- Calcul des niveaux de pression acoustique aux récepteurs de chaque bande en fonction de chaque source, en tenant compte de la diversité des facteurs affectant la propagation,
- Conversion des niveaux de pression acoustique dans la bande de fréquences au niveau du récepteur pour chaque source en valeurs pondérées A et ajout de ces valeurs de manière logarithmique au temps de fonctionnement de chacune des sources pour donner à L_{eq}

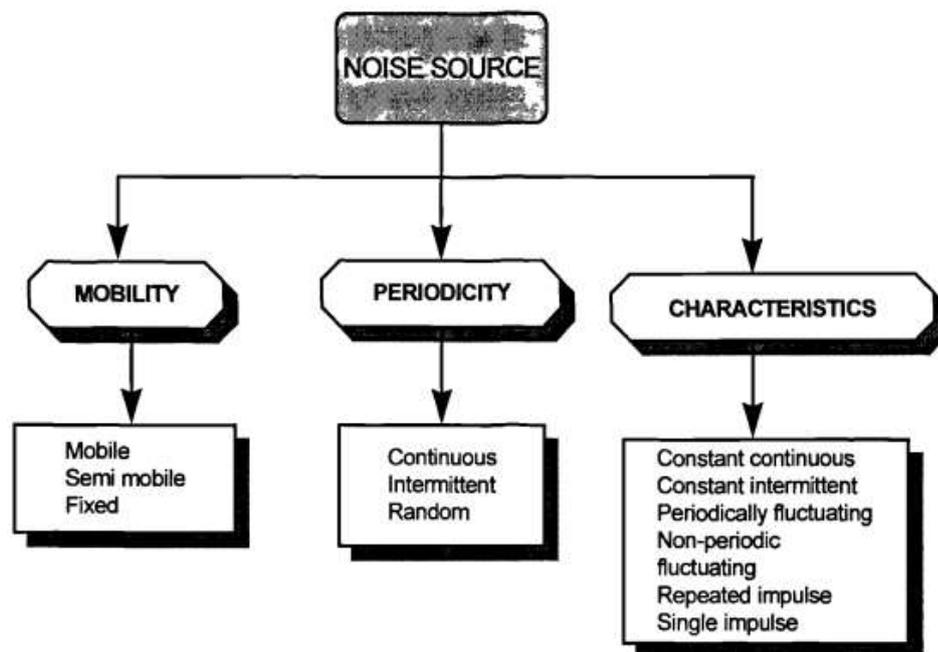


Figure 29: Types de sources de bruit.

Les facteurs suivants doivent être évalués pour évaluer le bruit industriel :

- Sortie sonore des processus et des installations
- Atténuation des niveaux de bruit

- c. Conditions météorologiques
- e. Interférence avec d'autres sons

I.4.2. Propagation Acoustique et nuisance sonore du milieu récepteur

I.4.2.1 Propagation acoustique

La propagation du son est la transmission de l'énergie acoustique à travers un support via une onde sonore. Le son est une séquence d'ondes de pression qui se propage dans des milieux compressibles tels que l'air, l'eau ou les solides. Au cours de leur propagation, les ondes peuvent être réfléchies, réfractées ou atténuées par le milieu.

Dans l'air, le son est transmis par les variations de pression de sa source à l'environnement. Le niveau sonore diminue car il s'éloigne de plus en plus de sa source. Bien que l'absorption par l'air soit l'un des facteurs imputables à l'affaiblissement du son pendant la transmission, la distance joue un rôle plus important dans la réduction du bruit pendant la transmission. La réduction d'un son s'appelle Atténuation. L'effet de l'atténuation de la distance dépend du type de sources sonores. La plupart des sons ou des bruits rencontrés dans notre vie quotidienne proviennent de sources pouvant être qualifiées de sources ponctuelles ou linéaires. (Olu Ola O. and al, APRIL 2007)

La différence d'énergie sonore à la source et au récepteur donne l'atténuation totale de l'énergie sonore pendant la propagation. Il existe de nombreux facteurs d'atténuation du bruit. Les modèles de propagation du son tentent de déterminer l'atténuation causée par ces facteurs. Les facteurs d'atténuation prédominants sont (Activity accounting technique for environmental noise assessment in mechanized surface mining. , 1999):

- Distance géométrique ou distance source-récepteur
- Influence de la surface du sol sous-jacente
- absorption de l'énergie acoustique dans l'air
- Réduction du son par des barrières sur le chemin source-récepteur

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} + A_{écran} + A_{divers} \quad 1.49$$

I.4.2.2 Nuisance sonore et conditions météorologiques du milieu récepteur

Les conditions météorologiques de l'atmosphère influencent la propagation du son. Les études scientifiques sur les effets des conditions météorologiques sur la propagation du son ont commencé vers la fin du XVIIIe siècle. Ingard (1953) s'est référé aux travaux de Derham d'Angleterre, qui a enquêté en 1704, en collaboration avec Joseph Averiani, d'Italie, pour prouver que "Le son semblait être beaucoup mieux entendu en Italie qu'en Angleterre" n'était pas correct.. Toutes ces études révèlent que, aux fins de la prévision du bruit dans l'environnement, les conditions météorologiques suivantes influant sur la propagation du son

doivent être prises en compte : Viscosité ; Humidité ; Pluie et brouillard ; Température ; Vent et Turbulence

❖ **Viscosité**

Des expériences menées en laboratoire au cours de la première moitié de ce siècle ont révélé que l'atténuation due à la viscosité augmente avec le carré de la fréquence. Cependant, l'atténuation est très faible, même à 5 kHz, elle est inférieure à 0,5 dB à 100 m. Une telle faible atténuation peut être négligée dans tous les cas pratiques. White et Walker (1982) ont exprimé l'atténuation constante (en dBm⁻¹) due à la viscosité (α_v) à la fréquence f Hz dans l'air à 1 atmosphère et à 20 °C :

$$\alpha_v = 8.5 \times 10^{-8} f^2 \tag{1.50}$$

Les effets de la viscosité sont insignifiants aux basses fréquences. Cela peut être vu de la Figure 38

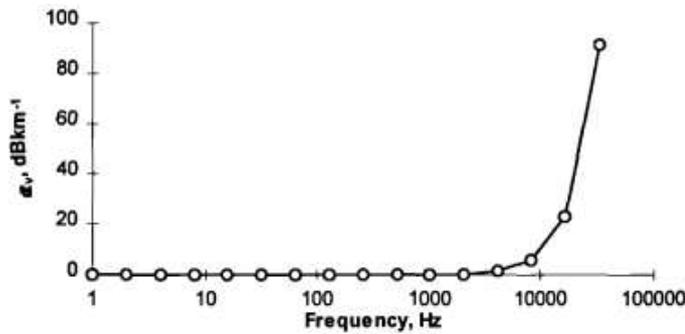


Figure 30 : Constante d'atténuation pour la viscosité en atmosphère I et à 200 C (après l'équation 1.38).

❖ **Humidité**

Des études ont montré que l'effet de l'humidité est également négligeable, sauf à des fréquences élevées et certaines valeurs inhabituelles relativement faibles d'humidité relative.

❖ **Pluie et brouillard**

Ingard (1953) donne une vaste revue des études sur les effets de la pluie et du brouillard sur la propagation du son. Des études expérimentales menées au XVIIIe siècle affirmaient que la pluie et le brouillard n'interféraient pas de façon notable avec la propagation du son.

$$SP_r = 52 + 10 \log\left(\frac{RR}{2,54}\right) + S + W \tag{1.51}$$

Où, SP_r: niveau de pression acoustique dû aux précipitations, dBA

RR : taux de précipitations à cms⁻¹

S : facteur de correction de la surface du sol ; S = 0 pour les pelouses et les sols poreux
S = 12 pour la végétation à grandes feuilles.

W : correction du vent W 0 à 6 dBA selon la vitesse du vent et le type de feuillage.

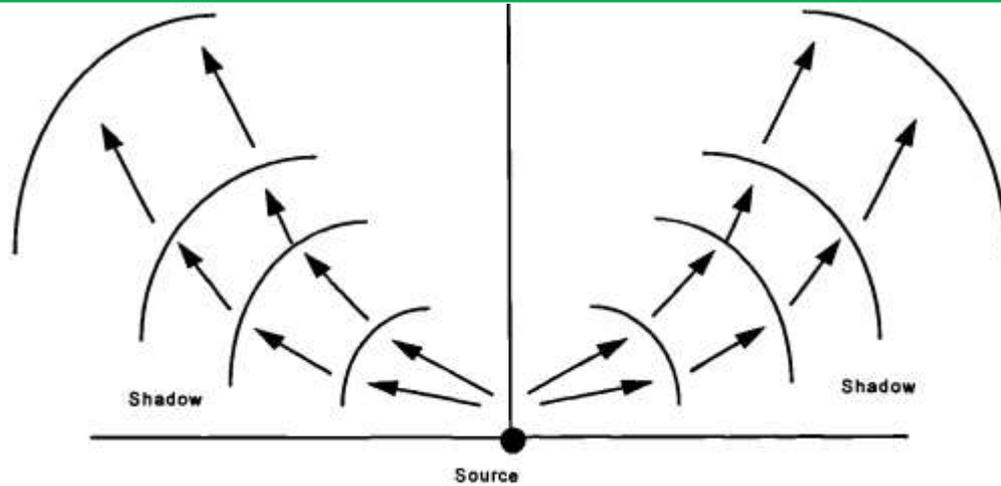


Figure 31: Effet du gradient de température (jour). (Bies D.A. and Hansen C.H., 2009)

❖ Température

La température de l'air varie avec l'altitude. Cette variation induit une zone d'ombre acoustique. La vitesse acoustique est proportionnelle à la racine carrée de la température. La température diminue avec l'altitude et par conséquent la vitesse du son diminue également. Ce phénomène entraîne la formation d'une zone d'ombre comme le montre la figure 43. Si le gradient de température est de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour 100 m , le rayon de courbure est de 56 km (Bies D.A. and Hansen C.H., 2009).

La nuit, l'inversion du gradient de température provoque une réduction des rayons sonores, comme illustré à la figure 44. Larsson (1992b) a étudié le rayon de courbure du son dans différentes conditions météorologiques (Atmospheric Absorption Conditions for Horizontal Sound Propagation , 1997).

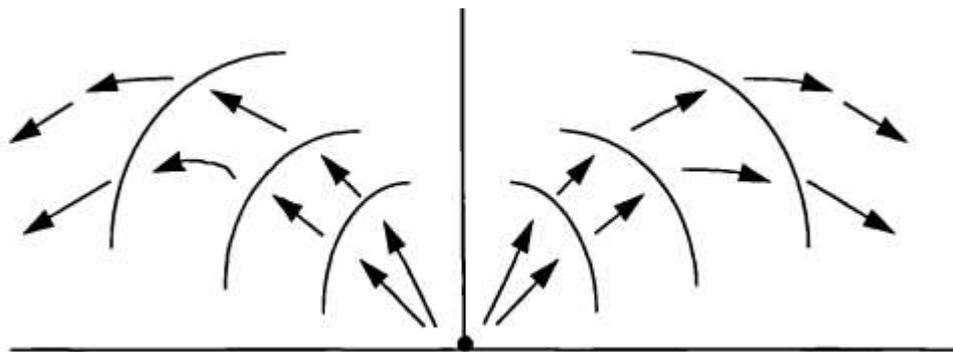


Figure 32: Gradient de température inversé

L'atténuation atmosphérique à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative de 50% est calculé comme:

$$A_{\alpha} = 0,148 f^2 r \times 10^{-8} \quad 1.52$$

où, f : fréquence de bande d'octave, Hz

r : distance de la source au récepteur, m.

Pour une température de 20 ± 10 ° C, la valeur de A_a est la suivante : conditions météorologiques américaines.

$$\text{Gradient de température inversé. } A_a = \frac{0,148 f^2 r \times 10^{-8}}{1 + \beta \Delta t f} \quad 1.53$$

$$\beta = 4 \times 10^{-6} \quad \text{Pour } t \text{ en } ^\circ \text{C,}$$

L'impédance caractéristique de l'air varie avec la température. Cependant, l'effet général est que l'onde sonore est déviée vers le bas.

❖ Vent

La vitesse acoustique est une vitesse relative à la vitesse de l'air. En présence de vent, la vitesse du vent doit être ajoutée à la vitesse acoustique pour obtenir cette dernière par rapport au sol. En règle générale, la vitesse du vent est beaucoup plus faible que la vitesse de l'onde acoustique. Dans le champ lointain, leurs influences sont importantes. Normalement, la vitesse du vent augmente avec l'altitude au sol en fonction de la saison. Les rayons sonores qui se déplacent dans l'air se penchent vers le bas et dans le sens contraire du vent. La courbure des rayons est inversement proportionnelle au gradient de vitesse du vent. La figure 45 montre le gradient de vitesse du vent en fonction de la hauteur au sol.

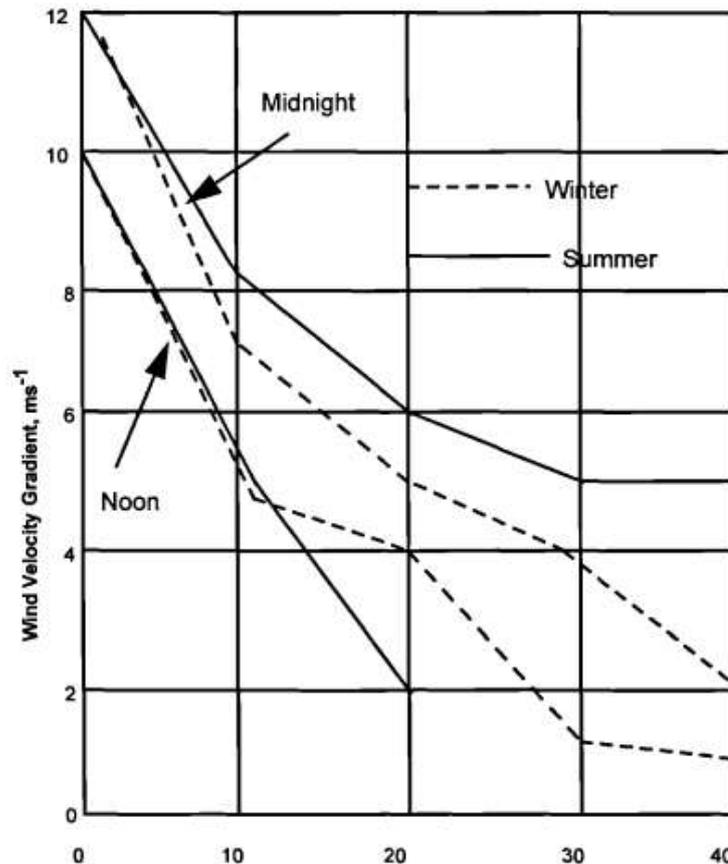


Figure 33: Le gradient moyen de la vitesse du vent en fonction de la hauteur au sol (A Review of the Influence of Meteorological Conditions on Sound Propagation , 1953)

Dans un champ combiné de température et de vent, l'annulation de l'influence de chaque facteur a lieu. Cela se produit lorsque le gradient de vent est égal à 0,6 fois le gradient de température et en supposant un rayon sonore horizontal dans la direction du vent.. Pour les rayons compris entre 0 et 90 degrés, la composante dans la direction du rayon n'a pour effet que d'induire une courbure sur le trajet du rayon.

. Dans un champ combiné de gradients de vent et de température, l'angle du secteur de formation de l'ombre est donné par la formule (A Review of the Influence of Meteorological Conditions on Sound Propagation , 1953).

$$\cos \phi_m = \left(\frac{c_0}{T_0} \right) \left(\frac{W_g}{T_g \sin i_0} \right) \quad 1.55$$

Où, W_g est le gradient de vent ; T_0 gradient de température ; i_0 angle d'élévation du rayon sonore

Dans la direction opposée à la direction du vent, les gradients de vent et de température se produisent tous deux dans la même direction et la zone d'ombre, relativement proche du sol. L'intensité du champ sonore en dehors d'une zone d'ombre est à peu près la même que celle obtenue sans vent ni gradient de température. Ainsi, le vent rend la propagation du son anisotrope. La vitesse du son dépend de la direction de propagation par rapport à la direction du vent. Raspet et al (1985), Lee et al (1986), Franke et al (1988), Franke et Swenson (1989) et West et all (1991) ont étudié le problème de la propagation du son sous l'influence du vent. Li et al (1991) ont utilisé le profil de vitesse du son effectif comme suit :

$$c(z) = 331,5 \sqrt{\frac{T + 273,15}{273,15}} + w \cos(\theta_D - \theta_W) \quad 1.56$$

Ou,

T : température en O ; θ_D : angle d'azimut du détecteur, θ_W : angle d'azimut du vent, aligné avec la direction du flux d'air ; W : vitesse du vent, ms^{-1}

❖ Turbulence

Les niveaux sonores aux positions du récepteur fluctuent avec les rafales, c'est-à-dire que la vitesse du vent augmente. Les rafales peuvent causer une atténuation moyenne de 4 à 6 dB par 100 m. Cela peut même atteindre 20 dB. Cependant, on ne sait pas encore comment le champ de bruit total varie avec le changement de vent et il n'y a pas assez d'études concluantes pour estimer le niveau de bruit que la rafale peut induire dans un champ de bruit. (Bies D.A. and Hansen C.H., 2009)

Alster (1982) a décrit une méthode de centres acoustiques équivalents pour représenter l'effet combiné d'un certain nombre de sources de bruit distribuées. Le concept de

centre acoustique équivalent (EAC) utilisé pour évaluer les effets combinés de diverses sources de bruit est traité plus en détail dans la partie méthodologie de notre travail.

❖ Autre forme d'atténuations

La propagation de l'énergie sonore est atténuée par la végétation et les zones bâties. La prévision du bruit provenant des activités minières doit prendre en compte cette atténuation dans les endroits où la végétation est suffisante. Le niveau de bruit dans les zones résidentielles est influencé par l'atténuation due aux zones bâties. La figure 3.9 illustre un cas possible pouvant exister à proximité d'une zone minière. Le bruit est émis par la source située à la fosse. Le récepteur est situé au-delà de l'écran des arbres. L'atténuation due à la végétation A est calculée selon l'équation suivante :

$$A_{\alpha} = \alpha_v \cdot S_D \quad 1.57$$

Où S_D est le trajet des rayons à travers la végétation, comme illustré à la figure 43. Le facteur α_v dépend de la fréquence et de la hauteur de la source et est déterminé comme suit :

$$\alpha_v = 0,006 \left(\frac{f}{H_s} \right)^{1/3} \quad 1.58$$

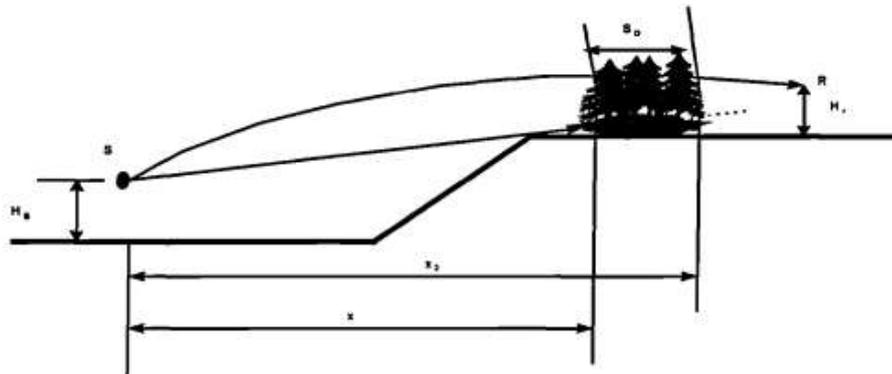


Figure 34: Atténuation due à la végétation

Le modèle de prévision du bruit (Tonin, 1993) détermine l'atténuation due à la végétation selon deux schémas différents. Pour les forêts, l'atténuation est donnée en dB par 10 m de croissance par l'équation suivante :

$$A_{\alpha} = 1,8 \log(f) - 31 \quad 1.59$$

I.4.3 Optimisation des sites industriels

L'optimisation se définit comme la sélection du meilleur élément (appelé optimum) parmi un semble d'éléments autorisés (appelé espace de recherche), en fonction d'un critère de comparaison. C'est un domaine issu des mathématiques et aujourd'hui largement utilisé en informatique et plus particulièrement en recherche opérationnelle.

Dans les cas les plus courants, l'optimisation d'un problème sans contraintes revient à minimiser ou maximiser la valeur d'une fonction mathématique (appelé fonction objectif) dans un espace de recherche (noté S). Si l'on pose $f : S^n \rightarrow Q$ la fonction objective à maximiser (respectivement à minimiser) à valeurs dans Q , le problème revient alors à trouver l'optimum $x^* \in S^n$ tel que $f(x^*)$ soit maximal (respectivement minimal).

Historiquement, les premières méthodes d'optimisation remontent à des temps aussi anciens que les mathématiques. Pour mémoire, les premières techniques de résolution sont attachées à des noms comme Newton, Lagrange, Cauchy, Fermat ou Hamilton. Cependant, les premières méthodes dites de "programmation linéaire" ont été introduites par Kantorovich peu de temps avant qu'elles ne soient redécouvertes et améliorées par Dantzig (L.V. Kantorovich and A.M. Vershik, June 2007). Ces méthodes étaient originellement dédiées à la planification de programmes militaires pendant la seconde guerre mondiale. D'où le terme "programmation", qui ne fait pas référence au départ à une programmation informatique, mais plutôt aux termes planification et ordonnancement. Ces méthodes ont ensuite été étendues à tout type d'optimisation linéaire.

Les méthodes d'optimisation sont très nombreuses. On peut toutefois les classer en deux grandes familles : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

Les premières méthodes dites déterministes, comme leur nom l'indique, ne laissent aucune place au hasard et conduiront pour un contexte initial donné à une même solution finale. Pour ces méthodes, l'exploration de l'espace des solutions se fait grâce à la connaissance d'une direction de recherche qui peut être donnée par le gradient. Ce sont en général des méthodes efficaces, peu coûteuses, mais qui nécessitent en contrepartie une première solution connue proche de la solution optimale.

A l'opposé des méthodes déterministes, les méthodes stochastiques explorent l'espace des solutions grâce en partie à des mécanismes de transitions aléatoires. Ainsi, plusieurs exécutions successives de ces méthodes, pourront conduire à des résultats différents (pour une même solution initiale).

Pour ces problèmes d'optimisation difficile, seuls des algorithmes à complexité exponentielle ont été trouvés. Ainsi, en pratique, les temps de calcul des machines ne permettent pas de les résoudre voir quasiment jamais. Par exemple, le problème du voyageur de commerce consiste à chercher le plus court chemin hamiltonien (circuit qui relie tous les sommets une seule fois) dans un graphe. On peut néanmoins diminuer la combinatoire à l'aide de méthodes arborescentes ou de la programmation dynamique mais, dans la plupart des cas, il faudra utiliser des méthodes approchées : les heuristiques. La figure montre comment les différentes méthodes d'optimisation peuvent être classées en fonction du problème posé.

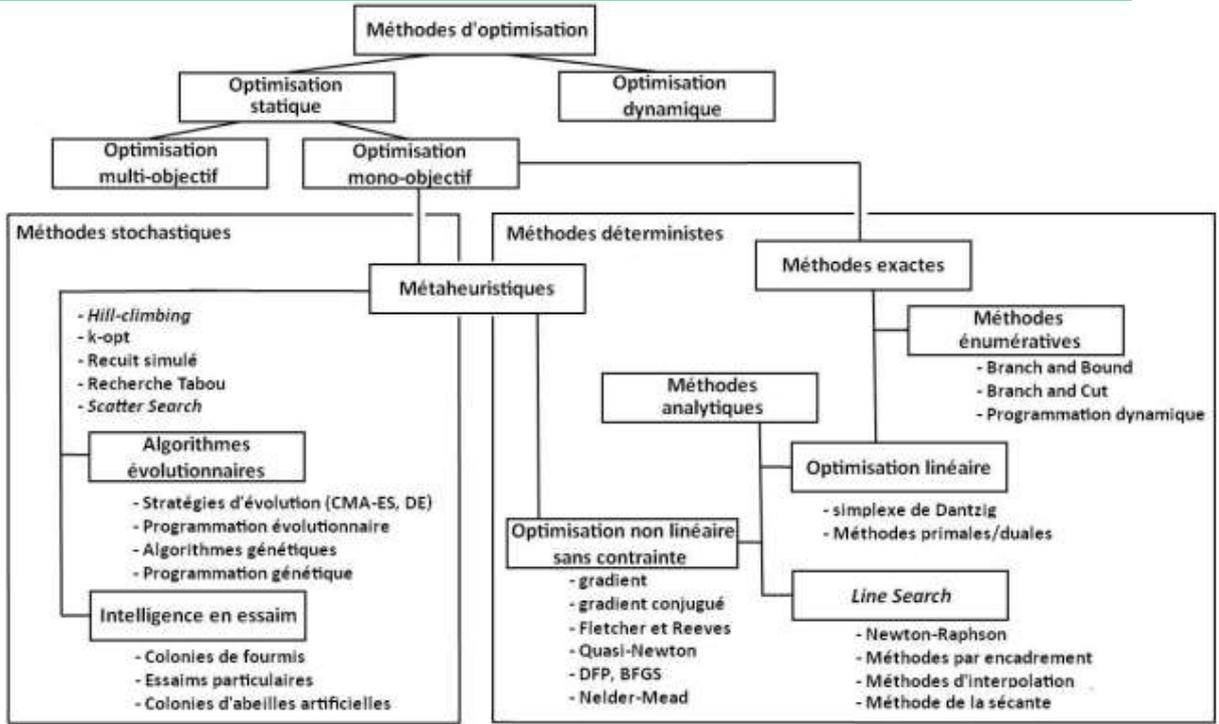


Figure 35: Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation (Vincent GARDEUX, 2011)

I.4.3.1 Généralité

a. Formalisme mathématique d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation peut être écrit sous la forme :

$$(P) \begin{cases} \min f(x) \in R \\ g_i(x) \leq 0 & i = 1, \dots, m \\ h_j(x) = 0 & j = 1, \dots, l \\ x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max} & k = 1, \dots, n \end{cases}$$

(1.60)

x est un vecteur de n composantes x_k qui sont les inconnues de notre problème. En électrotechnique x , peut aussi bien représenter des grandeurs physiques (courant, induction, ...) que des paramètres de conception (dimensions géométriques, nombre de spires de bobinage).

J est le critère à minimiser appelé aussi objectif et les fonctions (g_i) et (h_j) représentent les contraintes d'inégalités et d'égalités. Les contraintes x_k^{\min} et x_k^{\max} : qui bornent les variations des inconnues x_k s'appellent des contraintes de domaine et sont en général formulées sous forme de contraintes d'inégalités : $x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max}$.

Dans la pratique, on classe les différents problèmes d'optimisation suivant la nature mathématique de la fonction objective et de l'espace des contraintes. Les fonctions f , (g_i) , (h_j)

peuvent être continues ou discontinues, linéaires ou non linéaires, convexes ou non convexes, différentiables ou non différentiables... Dans la suite -sauf mention contraire- on ne considérera, pour simplifier les écritures, que les contraintes d'inégalités. En effet la contrainte d'égalité $h_j(x)=0$ est équivalente à : $h_j(x) \leq 0$ et $-h_j(x) \leq 0$.

On notera l'ensemble $C = \{x \in \mathbb{R}^n / g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m\}$.

b. Optimum global et optima locaux

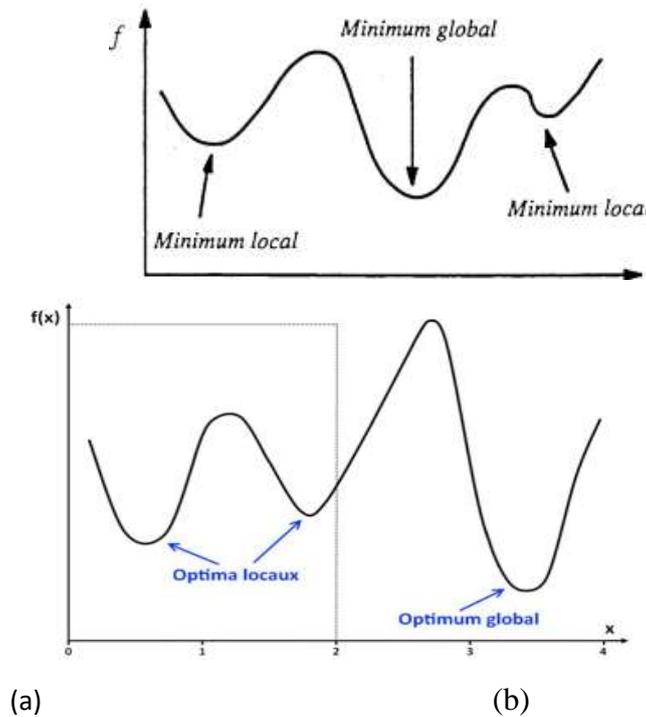


Figure 36: Optimum local et global(a), Différence entre un optimum global et des optimums locaux(b) (Vincent GARDEUX, 2011).

Ces concepts se définissent sous la base :

- Un point $x^* \in C$ est un minimum local s'il existe un voisinage de x^* noté $V(x^*)$ tel que $\forall x \in V(x^*), f(x^*) \leq f(x)$.
- Un point $x^* \in C$ est un minimum global si $\forall x \in C, f(x^*) \leq f(x)$.

Comme nous le verrons, dans le cas des méthodes d'optimisation déterministes, il est souvent aisé de caractériser les optima locaux par des conditions nécessaires et suffisantes. Par contre, il est en général impossible de caractériser l'optimum global d'un problème d'optimisation sauf dans le cas très particulier des problèmes convexes dit stochastiques. Les méthodes déterministes que nous allons présenter, ne nous assurerons donc a priori que de l'existence d'optima locaux.

c. Autres caractéristiques

- Sensibilité et robustesse d'une méthode d'optimisation

La méthode d'optimisation est conditionnée par des paramètres de contrôle et des conditions initiales (valeurs initiales des variables de conception, valeurs initiales des paramètres de contrôle...). Elle peut être caractérisée selon le modèle de la boîte noire illustré par l'organigramme suivant :

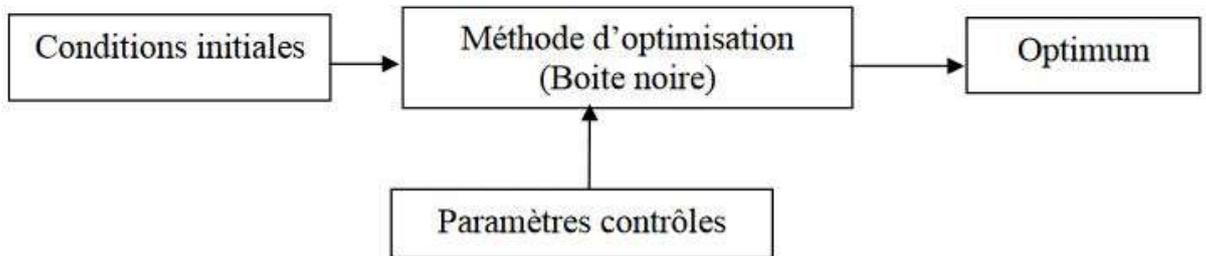


Figure 37 : Modèle de la boîte noire

L'efficacité d'une méthode d'optimisation est liée à la sensibilité et à la robustesse par rapport aux paramètres de contrôle et aux conditions initiales.

Une méthode parfaite devrait être totalement insensible aux conditions initiales et aux variables de conception et converger vers l'optimum quelles que soient la fonction objective et les contraintes.

- **Opérateurs de recherche fondamentaux**

La recherche de l'optimum d'une fonction est généralement réalisée à l'aide de deux opérateurs fondamentaux : l'exploration et l'exploitation. L'exploration permet une localisation imprécise de l'optimum global alors que l'exploitation affine cette solution en augmentant la précision de l'optimum. Le succès et l'efficacité d'une technique de résolution dépendent la plupart du temps d'un compromis entre l'exploration et l'exploitation. Une recherche purement aléatoire est bonne pour l'exploration mais pas pour l'exploitation alors que la recherche dans le voisinage est une bonne méthode d'exploitation mais pas d'exploration.

- **Mode de recherche de l'optimum**

Lorsque l'évolution de la méthode de résolution est prévisible et ne laisse aucune place au hasard, celle-ci est qualifiée de déterministe. En revanche les méthodes dites stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabiliste qui peuvent conduire à des résultats différents pour des conditions initiales et des paramètres de contrôle identiques. Les méthodes déterministes sont qualifiées de méthodes locales, c'est-à-dire qu'elles convergent vers un optimum dépendant uniquement du point de départ, qu'il soit local ou global. A l'opposé, les techniques stochastiques sont reconnues comme des méthodes globales qui permettent de localiser l'optimum global.

- **Ordre d'une méthode de résolution**

Les méthodes de résolution peuvent être classées à partir de leur ordre selon qu'elles nécessitent ou non le calcul des dérivées de la fonction objectif et des fonctions contraintes par rapport aux paramètres.

I.4.3.2 Méthodes d'optimisation déterministes

Les méthodes déterministes peuvent être séparées en deux grandes classes. La première regroupe toutes les méthodes dites d'ordre 0 c'est-à-dire qui ne nécessitent pas la connaissance de la dérivée première (et a fortiori des dérivées d'ordre supérieur à 1). Ces méthodes sont en général peu précises et convergent très lentement vers l'optimum local (Methods for Unconstrained optimization problems Modern analytic and computational methods in Science and Mathematics,, 1968). D'une manière générale, de telles méthodes sont employées en début d'exécution pour repérer la région de l'optimum local. L'autre classe, par laquelle nous commencerons la présentation, suppose que toutes les fonctions f, g_i, h_j sont continûment différentiables. Cette propriété permet d'exploiter au mieux une information très importante sur la direction de recherche : **le gradient**.

Ces méthodes peuvent être subdivisées en plusieurs sous classes, les méthodes heuristiques, les méthodes statistiques, les méthodes Branch&Bound, les méthodes mathématiques, et les méthodes d'apprentissage automatique (voir figure 49)

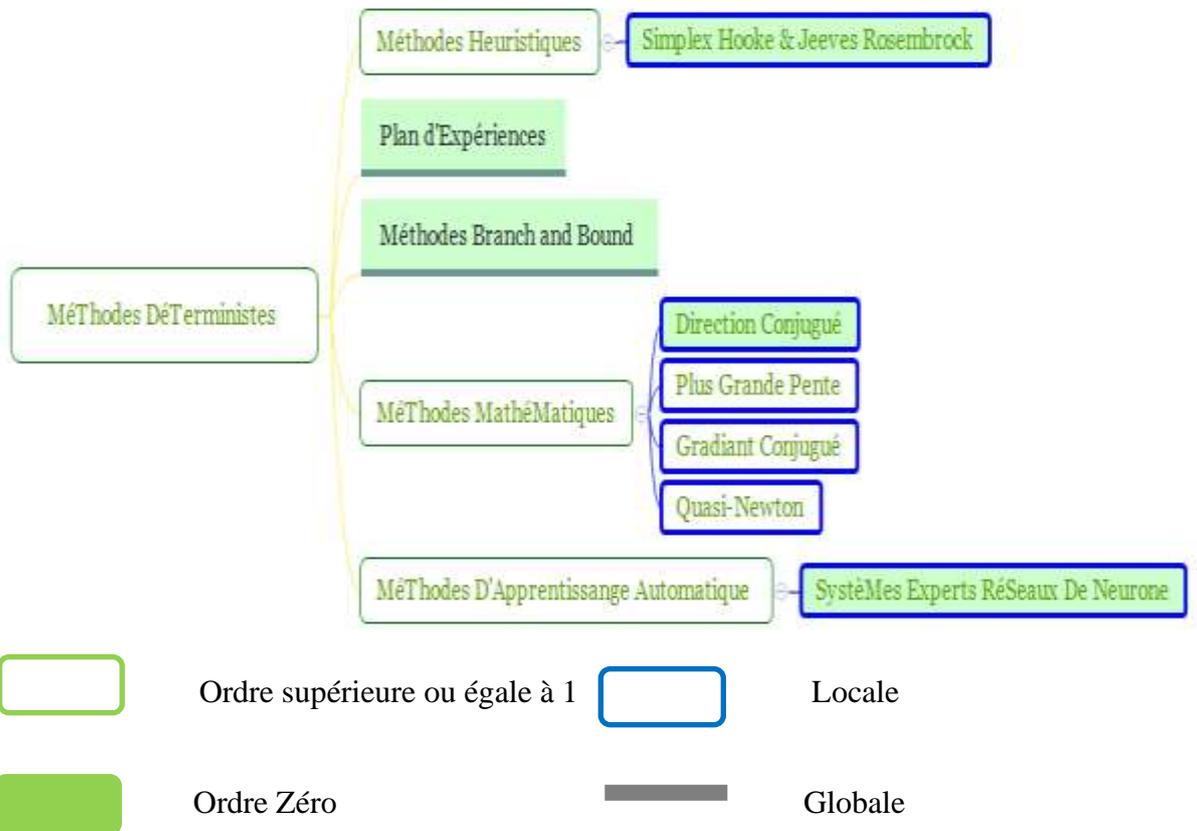


Figure 38: Méthodes d'optimisation déterministes

I.4.3.3 Méthodes d'Optimisation stochastiques

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Ces méthodes ont une grande capacité à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Elles sont d'ordre zéro. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif. La figure 47 présente les méthodes stochastiques les plus utilisées.

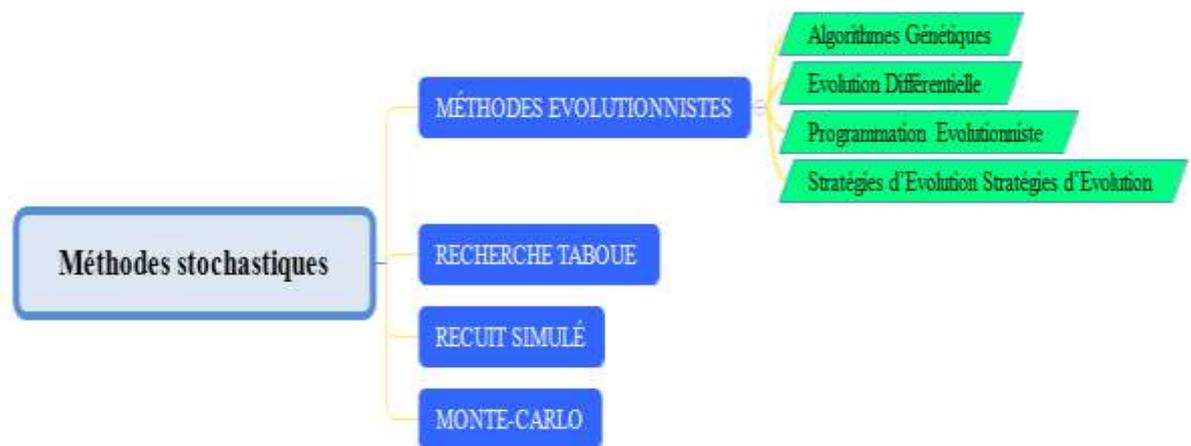


Figure 39: Méthodes d'Optimisation Stochastiques

Présentons quelques-unes de ces méthodes stochastiques, les méthodes Monté Carlo et les méthodes évolutionnistes seront présentés brièvement.

❖ Monté Carlo

C'est la plus simple des méthodes stochastiques (Monte Carlo structural optimisation in discrete variables with annealing algorithm, 1988) (Monte Carlo, concepts, Algorithms and Applications, 1997). Elle consiste à tirer une solution au hasard à chaque itération. La fonction objective est évaluée en ce point. Si elle est meilleure que l'optimum courant, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante et le processus continue jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient vérifiées. Il s'agit donc d'un processus d'exploration. Les méthodes Monte-Carlo peuvent être utilisées, en première approche, pour avoir des renseignements utiles sur la forme de la fonction. Elles permettent par exemple de choisir de façon plus appropriée le point de départ d'un algorithme de recherche locale. Toutefois, cette association ne garantit pas la localisation de l'optimum global

❖ Méthodes évolutionnistes

Les méthodes évolutionnistes font partie de la dernière grande classe de méthodes stochastiques. Elles reposent sur une analogie avec la théorie de l'évolution naturelle des espèces de Darwin selon laquelle, les individus les mieux adaptés à leur environnement survivent et peuvent se reproduire pour donner des enfants encore mieux adaptés de génération en génération (Ch. Darwin, , 1859).

Les algorithmes évolutionnistes remontent à l'introduction des algorithmes génétiques (AG) par Holland en 1975 (J. H. Holland, 1975). Reshenberg et Schwefel ont mis au point trois méthodes assez similaires : les stratégies d'évolution (Evolution Strategy In Zarada Computational Intelligence, 1994), la programmation évolutionnistes (Evolutionary Programming in Perspective: The top-Dawn View Computational Intelligence, 1994) et la programmation génétique (Genetic Programming, 1992). L'évolution différentielle est apparue plus récemment (Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by Differential Evolution ,, 1996.) (Adaptive Coupling of Differential Evolution and Multiquadrics Approximation for the tuning of the optimization process, 2000). Les différences entre ces méthodes sont liées à la représentation des individus et aux modes d'évolution de la population. Les AG utilisent un codage des paramètres de la fonction à optimiser alors que les autres techniques se servent directement de la valeur des paramètres. Chacune des méthodes est caractérisée par un opérateur d'évolution particulier. Les AG et l'évolution différentielle ont un mécanisme de croisement qui permet la génération de nouvelles configurations par recombinaison de solutions existantes. C'est donc un opérateur d'exploration. L'exploitation est faite par le processus de sélection. Les stratégies d'évolution et la programmation évolutionniste sont, pour leur part, basées principalement sur un procédé de mutation de la population par perturbation successive de chaque solution (Ch. Darwin, , 1859). Les méthodes évolutionnistes s'affirment peu à peu comme les techniques d'optimisation les plus robustes. Elles peuvent être appliquées à des problèmes très divers car elles sont indépendantes du processus à optimiser et n'utilisent pas les dérivées. Parmi les algorithmes évolutionnistes cités précédemment, les algorithmes génétiques occupent une place particulière car ils réunissent les trois opérateurs de sélection, croisement et mutation.

a- Choix des méthodes d'optimisation

Dans la plupart des problèmes de conception en énergétique, la fonction à optimiser à plusieurs minima. Dans ce cas, les méthodes déterministes locales ne peuvent conduire à la solution, sauf si le point de départ est voisin de la solution globale, ce qui est peu probable. Les méthodes stochastiques sont l'alternative pour résoudre ces problèmes à plusieurs minima.

Elles sont capables de trouver le minimum global d'une fonction même dans des cas très difficiles, alors que la fonction considérée présente un grand nombre de minima relatifs. Cependant, il y a un prix à payer, en temps de calcul, qui peut être élevé.

Dans le cadre des méthodes de simulation numérique utilisées dans l'analyse de dispositifs électromagnétiques, la méthode des éléments finis (MEF) se présente aujourd'hui comme une des méthodes les plus robustes et les plus généralistes que nous ayons. La simulation par éléments finis permet d'obtenir des résultats assez fiables, même en situation où le dispositif analysé présente une configuration complexe. La difficulté d'évaluer le gradient de la fonction objectif directement à partir d'une simulation par éléments finis peut limiter l'utilisation des méthodes d'optimisation déterministes les plus performantes. En conclusion, les méthodes stochastiques sont certainement bien adaptées à la résolution des problèmes d'optimisation dans le domaine Energétique. Les algorithmes génétiques (AG), le recuit simulé (RS) et la recherche taboue (RT) sont les plus développés et exploitables dans les méthodes d'optimisations stochastiques.

b- Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques reposent sur l'analogie entre la théorie de l'évolution naturelle de Darwin et l'optimisation. Selon la théorie de Darwin, les individus d'une population les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande probabilité de survivre et de se reproduire, en donnant des descendants encore mieux adaptés. Comme dans les mécanismes naturels de la reproduction, les principaux opérateurs qui affectent la constitution d'un chromosome, qui code les caractéristiques des individus, sont le croisement et la mutation. Les AG ont été proposés par Holland (J. H. Holland, 1975), puis développés par d'autres chercheurs tels que De Jong (K.A. De Jong, 1975), Goldberg (Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, 1989) et Michalewicz (Evolutionary Algorithms for Constrained Engineering Problems, 1996). C'est actuellement une des méthodes les plus diffusées et les plus utilisées dans la résolution de problèmes d'optimisation dans de nombreux domaines d'application. Les particularités des algorithmes génétiques sont (Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, 1989):

- Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes.
- Ils travaillent sur une population de points au lieu d'un point unique.
- Ils n'utilisent que la valeur de la fonction étudiée et non sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire.
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

J. Holland et D. Goldberg ont proposé les trois principes fondamentaux des algorithmes génétiques :

- ✓ Le codage des paramètres sous forme de gène.
- ✓ L'opérateur de sélection des individus les mieux adaptés ou les plus performants
- ✓ Les opérateurs de reproduction : croisement et mutation qui agissent sur les gènes sachant que au niveau de codage binaire, le croisement favorise plus l'exploration ou diversification tandis que la mutation favorise plus l'exploitation ou l'intensification du domaine de conception. Par contre, au niveau de codage réel, le croisement favorise l'exploitation ou l'intensification et la mutation favorise la diversification.

a. Principe

Les AG sont des algorithmes d'optimisation qui s'appuient sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes de sélection naturelle. Pour transposer les processus génétiques observés dans l'évolution des espèces au domaine de l'optimisation, Holland a introduit deux points fondamentaux (J. H. Holland, 1975), (Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 1994), (Intelligence Artificielle & Informatique Théorique, 1994):

Les AG débutent par l'initialisation aléatoire d'une population P de N individus. La population évolue sur plusieurs générations. A chaque génération g , les individus de la population $P(g)$ sont évalués et les plus adaptés sont autorisés par l'opérateur sélection à avoir un grand nombre de descendants. Une mise en œuvre de cet opérateur consiste à donner pour chaque individu une probabilité d'avoir un descendant dans la génération suivante, proportionnelle à sa performance. Les mécanismes de mise en œuvre les plus employés sont la roue de loterie, le tournoi ou la décimation et ils seront détaillés plus loin. Ils ont tous en commun de générer une population $P'(g)$ de même nombre N d'individus formés des copies des individus appelés à se produire. Pour former la nouvelle génération, les opérateurs de croisement et de mutation sont alors appliqués sur des individus sélectionnés aléatoirement dans $P'(g)$.

La performance d'un individu est mesurée par une fonction de performance ou d'adaptation (fitness en anglais) qui se déduit de la fonction objectif, car les AG sont naturellement formulés en terme de maximisation. La figure suivante illustre le processus d'optimisation développé par les AG.

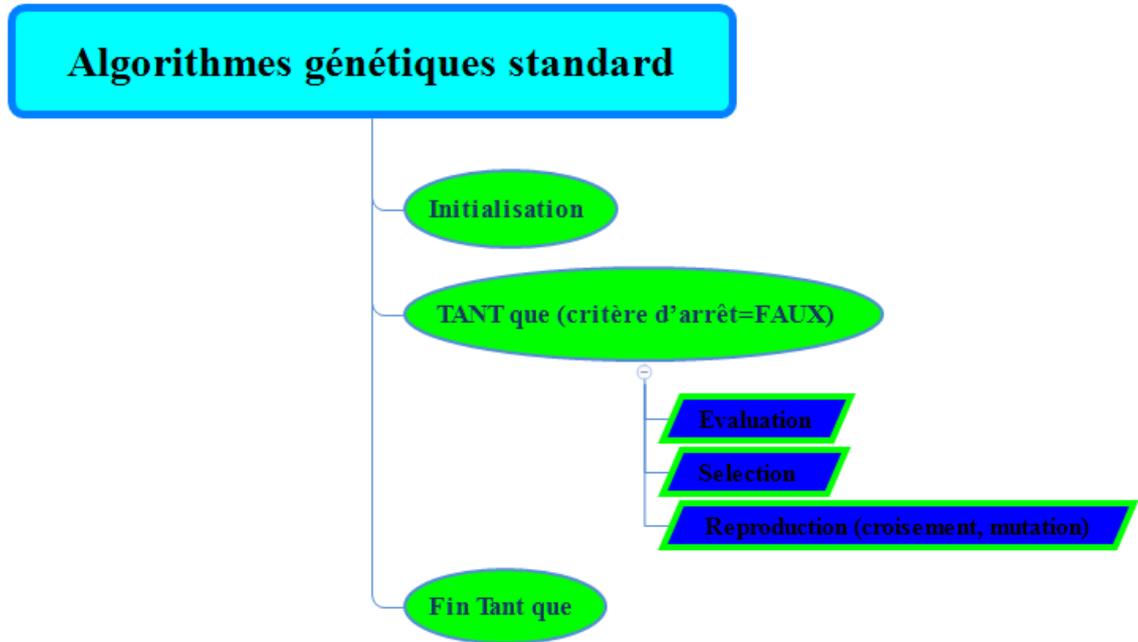


Figure 40: Algorithmes génétiques standard

Les algorithmes génétiques travaillent par générations successives jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié. Le codage des paramètres et les opérateurs de sélection, de croisement

ii. Codage

Pour utiliser les AG, la première chose à se demander est : "Comment décrire un individu ?". C'est à dire, comment les paramètres peuvent se coder ? La réponse à cette question a une influence forte sur l'implémentation des mécanismes de croisement et de mutation. Un gène correspond de fait à un paramètre et un seul x_i . Un chromosome est constitué par un ensemble de gènes et décrit complètement un individu. L'ensemble des individus est appelé population. On aboutit ainsi à une structure présentant quatre niveaux d'organisation (fig.52). Un chromosome est une concaténation des gènes et de mutation sont présentés en détails.

Il y a plusieurs types de codage : binaire, réel, codage de Gray et codage dynamique des paramètres.

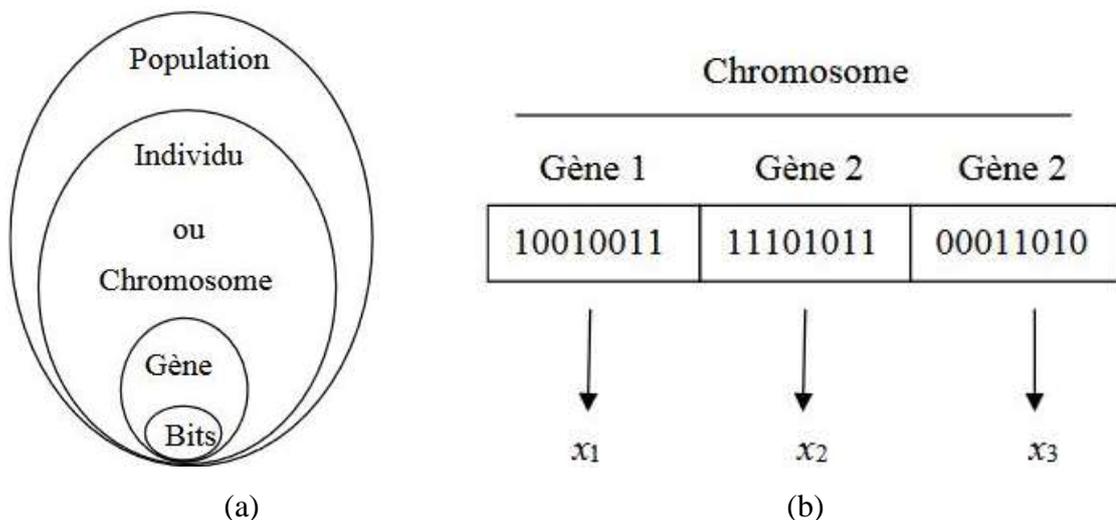


Figure 41: (a)-Les quatre niveaux d'organisation des AG (b)-Illustration du codage des variables d'optimisation

iii. Population initiale

La première étape de l'algorithme est la genèse de la population initiale. Elle peut être obtenue en générant aléatoirement les individus dans l'espace de recherche suivant une loi de probabilité uniforme. Pour privilégier une direction de recherche ou lorsque le problème est fortement contraint, les individus peuvent être également initialisés de façon heuristique ou directement introduits par l'utilisateur. Mais cette méthode peut faire converger trop rapidement la recherche vers un optimum local.

iv. Fonction d'adaptation

La construction d'une fonction d'adaptation appropriée à partir de la fonction objective est très importante pour obtenir un bon fonctionnement des AG. Ils travaillent sur la maximisation d'une fonction positive. Or dans beaucoup de problèmes, l'objectif est de minimiser une fonction coût $f(X)$. Dans le cas d'une minimisation, la fonction objective peut être transformée par (Electromagnetic Optimisation by Genetic Algorithms, 1999):

$$f_a(X) = f_{\max} - f(X) \quad (1.62)$$

Avec $f_{\max} = \max(f(X))$ dans la génération courante.

Dans le cas où la fonction objective à maximiser prendrait des valeurs négatives, elle peut être transformée de la façon suivante :

$$f_a(X) = f(X) - f_{\min} \quad (1.63)$$

où f_{\min} est la valeur minimale de $f(X)$. La fonction d'adaptation comporte des caractéristiques intrinsèques qu'il est nécessaire d'exploiter au mieux, notamment en ce qui concerne ses ordres de grandeur sur le domaine de recherche. Il est nécessaire de prévoir des réajustements possibles de cette fonction.

v. Méthodes de sélection

Par analogie au processus de sélection naturelle, un caractère aléatoire est conféré à la sélection des individus tout en exploitant les valeurs de la fonction d'adaptation. Plusieurs procédures existent (Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 1994) (Electromagnetic Optimisation by Genetic Algorithms, 1999) tels que la roue de loterie, le tournoi, la décimation, la sélection proportionnelle à un reste stochastique et la sélection stochastique universelle.

vi. Modèles de reproduction

Pendant la phase de reproduction, les individus sont sélectionnés et les structures de leurs chromosomes sont modifiées pour construire les nouveaux individus de la génération suivante. Pour cela il y a différents opérateurs génétiques et différentes stratégies avec des objectifs propres. Les parents sélectionnés sont introduits dans le bassin de reproduction où ils sont choisis aléatoirement deux à deux pour subir des transformations par les opérateurs génétiques. Les deux principaux opérateurs sont le croisement et la mutation. Le croisement réalise une opération qui nécessite deux parents. La mutation est une opération unaire, utilisée pour introduire une faible variation dans la solution ou changer la direction de recherche. Les opérateurs génétiques se distinguent suivant le type de codage, binaire ou réel.

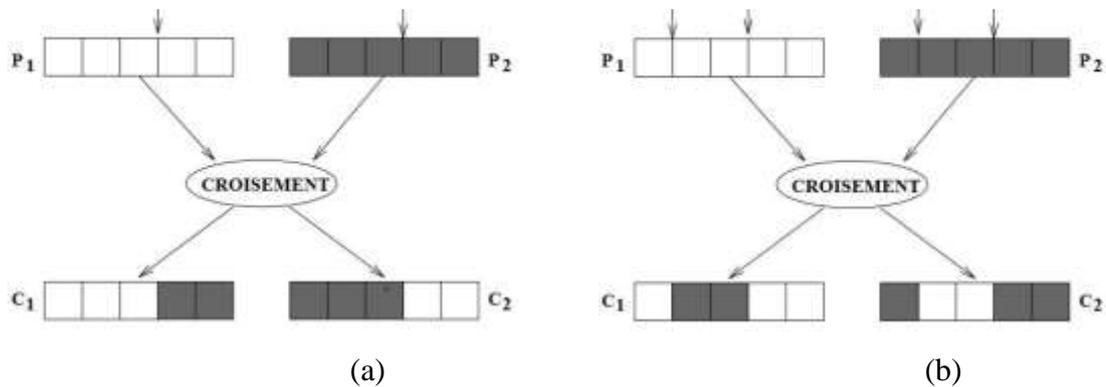


Figure 42: Principe de croisement ; (a) croisement en un point (b) croisement en deux points

La mutation revient à modifier aléatoirement la valeur d'un paramètre. Elle constitue un opérateur de recherche secondaire qui favorise l'apparition de nouveaux génotypes. En effet, il arrive parfois que les informations importantes contenues dans les gènes disparaissent au cours des opérations de croisement. Le rôle essentiel de la mutation est de remédier à ce type de dégénérescence. Une implémentation possible est la complémentation d'un bit dans un chromosome. Soit p_m la probabilité d'une mutation, un paramètre des AG. Pour chaque bit, une valeur aléatoire P est attribuée dans l'intervalle $]0,1[$. Si $P < p_m$ alors le bit est complétement.

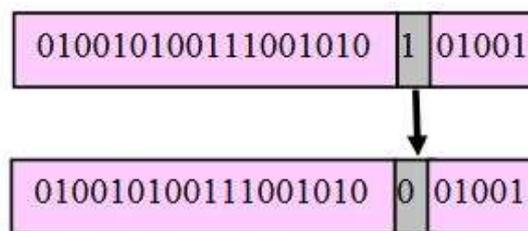


Figure 43: Principe de mutation binaire

vii. Critères d'arrêt

Le critère d'arrêt est une caractéristique essentielle des AG. Un critère peu performant peut en effet conduire à de nombreuses évaluations inutiles de la fonction d'adaptation. Les critères proposés dans la littérature sont :

1. nombre maximal de générations (itération)
2. temps écoulé
3. le meilleur individu de la dernière génération atteint un seuil critique (meilleur).
4. performances en ligne et hors ligne (PERL) et (PERHL)
5. convergence des bits (CB) Les deux derniers critères méritent quelques explications et définitions

Malgré le nombre important d'évaluations, les algorithmes stochastiques présentent le grand avantage par rapport aux méthodes déterministes, d'avoir la capacité de trouver l'optimum global. Les méthodes stochastiques les plus prometteuses sont les algorithmes génétiques, le recuit simulé et la recherche taboue bien que nous ne nous sommes pas attardés sur la présentation des différents principes de ces deux dernières méthodes évolutionnistes. Une étude a porté sur les aspects fondamentaux des algorithmes génétiques standard et des améliorations ont été proposées pour les rendre plus performants. Les différents critères d'arrêt trouvés dans la littérature ont été analysés en soulignant leurs avantages et inconvénients.

Conclusion

En premier lieu, un état de l'art des centrales thermique au Cameroun a été présenté, d'abord sur un plan de localisation géographique, dans le contexte environnemental dans lequel ils se trouvent, sur la situation énergétique actuel. Ensuite nous nous sommes attardés sur les mécanismes thermo-chimiques liés au processus de transformation utilisé et le phénomène de dispersion des polluants issus de la combustion rejetés dans l'atmosphère. Il nous a été d'un grand apport, la maîtrise des installations des différents types de centrales exploitées, ceci dans le sens où nous avons pu dresser un ensemble de techniques d'évaluation et de contrôle du bruit industrielle. Nous permettant de nous pencher sur les différentes méthodes d'optimisation liées au fonctionnement des moteurs, par atténuation de la pollution atmosphérique et des nuisances sonore. Des méthodes d'optimisation mathématiques ont été revues. Celles-ci peuvent être réunies en deux différents groupes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans le chapitre précédant nous avons vu des rudiments et modèles fondés sur une compréhension et une connaissance profonde des phénomènes observés au sein des systèmes à modéliser et des systèmes sur lequel ils impactent. Le comportement des différents éléments de ces systèmes est décrit en se basant sur les lois et modèles physiques connues (J.B. Heywood, 1988), entre autres, les lois thermodynamiques, les lois liées aux réactions chimiques, de dispersion et de diffusion, de la conservation de la masse et de l'énergie et surtout celles liées aux problèmes d'optimisation. Celle-ci bien qu'incontournable s'appuierons sur des observations expérimentales et hypothèses bien claires, justifiées et permettant le choix parmi tant d'autres d'une méthode spécifique à chacun des objectifs à atteindre. Ces modèles sont aussi caractérisés par une grande fiabilité et une excellente précision, mais en même temps ils sont lourds, complexes et très difficiles à mettre en œuvre dans un problème d'optimisation.

Dans ce chapitre, nous élaborons des modèles physiques décrivant les différents contours d'évaluation, de maillage et cartographie et surtout la recherche d'optimum global dans le cadre de la pollution générée par ces centrales.

2.1 Matériels et Méthodologies de base des inventaires d'émissions industriels

2.1.1 Inventaires d'émissions atmosphérique issue des sites industrielles

2.1.1.1 Méthodes d'évaluation de la consommation du fioul

Parmi les différentes centrales thermiques étudiés, plusieurs types de méthodes d'évaluation de la consommation ont pu être répertoriés et exploités suivants des facteurs intrinsèques. Celles-ci sont fonction du temps de fonctionnement, l'espace et le secteur liées aux types de raccordement que connaissent les centrales isolés et interconnectées. Ses méthodes tiennent compte d'une non linéarité dans le flux de consommation ainsi donc, l'énergie produite en fonction du temps implique une déperdition dans le temps, pendant le procès 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 manières différentes. Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la consommation du fioul :

1- La règle graduée

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

2- Le comptage 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 (Fig9). A cet endroit le compteur ne comptabilise que le volume de fuel effectivement consommé. Notons que ces compteurs à fioul ont une marge d'erreur de moins de 1%.

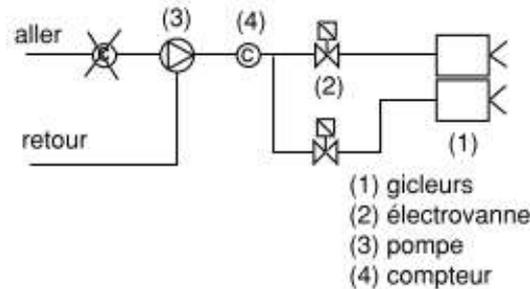


Figure 44: Installation du compteur en aval de la pompe (Institut Wallon a.s.b.l., 2000)

3- La mesure de la consommation en litres

En considérant le temps de fonctionnement du bruleur au moyen d'un compteur horaire suivant la formule empirique donné par équations.

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

C : Consommation en tonnes de fioul durant une période déterminée

D : débit du gicleur en gal/h précisé sur la fiche d'entretien du bruleur,

P : Pression de la pompe d'alimentation en bars, précisée sur la fiche d'entretien du bruleur,

H : Nombres d'heures de fonctionnement du bruleur sur la période choisie.

En plus du compteur horaire, un compteur de déclenchement du moteur ou de déclenchement permet de déceler des dysfonctionnements (Institut Wallon a.s.b.l., 2000).

4- 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 chaine. C'est ainsi que l'expression de l'activité suivant l'équation (9) est ramenée aux unités de tonnage tout en sachant que dans nos centrale la consommation est exprimé en unités de volume après dépotage. (Yu Zhao et al , 2008) ((CCE) COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 1977).

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

A = est la consommation de fioul en tonnes du jour j ;

P = la taille de l'unité (MW) ;

T =le temps en (h) de consommation pour le jour les heures i du jour j , C_s la consommation spécifique de fioul lourd par unité d'énergie électrique produite du jour j (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 direct tel que le CO_2 , le CH_4 , et le N_2O . (GIEC-a, 2006)

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

- ✓ Utiliser en priorité (pour l'industrie), des facteurs d'émission spécifiques relatifs à des installations individuelles dès lors qu'ils peuvent être justifiés,
- ✓ Utiliser des facteurs d'émission spécifiques nationaux : pour le Cameroun, nous disposons de ceux appliqué au CITEPA pour l'élaboration des inventaires officiels vue les ratifications faites liées à la pollution environnementale,
- ✓ Dans les cas où ces facteurs d'émission ne sont pas adaptés, utiliser les facteurs d'émission des instances internationales (GIEC) (GIEC-b, 2006).

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

A-Emissions de CO_2

L'évaluation par calcul des émissions de CO_2 produits par la combustion peut se faire à trois niveaux, tel que défini dans les lignes directrices 2006 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 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 1. Les estimations des émissions nationales seront alors fondées sur les quantités de combustibles consommées et sur la teneur en carbone des combustibles.

Pour 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, nécessaires à ce calcul, peuvent être mesurés avec précision par l'exploitant ou obtenus auprès de son fournisseur. Le calcul des émissions de dioxyde de carbone liées 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 PCI du combustible (voir tableau 1 A10 en annexe) ;
- calcul des émissions potentielles de carbone à partir de la consommation énergétique et du facteur d'émissions de carbone (voir tableau 1 A10 en annexe) ;
- calcul du carbone réellement oxydé à partir des facteurs d'oxydation (voir tableau 1 A8 en annexe) ;
- conversion du carbone oxydé en émissions de CO₂.

B- Emissions de Méthane CH₄ et protoxydes d'azotes N₂O

Pour une estimation des émissions de Niveau 1, les données suivantes sont nécessaires pour chaque catégorie de source et chaque combustible :

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

L'équation suivante est utilisée (Darío R. Gómez et John D. Watterson, 2006) :

$$\text{Emissions}_{\text{GES}} = \text{Donnée d'activité} \cdot \text{Facteur d'émission}_{\text{GES}} \quad (2.4)$$

Émissions_{GES}. Sont les émissions des gaz à effet de serre donné par type de combustible (Kg GES) ;

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

Facteur d'émission_{GES} est le Facteur d'émission par défaut d'un GES donné par type de combustible (kg gaz/TJ) (Voir tableau 2 A8 en annexe).

Les facteurs d'émissions permettent de convertir une donnée d'activité en quantité de gaz émise. 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 tCO₂e.

$$Emission(teqCO_2) = \sum_{\text{gaz}} \left[Emission_{\text{gaz}} \times PRG_{\text{gaz}} \right] \quad (2.5)$$

Dans beaucoup de cas, les facteurs d'émissions intègrent déjà les PRG et convertissent directement la donnée d'activité en tCO₂e. 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 ci-dessous.

Tableau 17: Pouvoir de réchauffement global des GES direct (hors fluorés) (GIEC-a, 2006)

GES (hors fluorés)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
PRG (à 100 ans)	1	25	298
Durée de vie (ans)	50-200	12	120

2.1.1.3 Méthode d'estimation des émissions des polluants

L'études des Centrales thermiques ont 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_x, les oxydes d'azotes NO_x les monoxydes de carbones (CO) et les composés organiques volatiles (COV). L'estimation de ces émissions s'est faite au moyen d'une base de données dans laquelle toutes informations reliant les émissions ont été compilé 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
- Et la technologie de commande des émissions de PM, SO_x, NO_x, 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 (surfaiques, grandes sources ponctuelles et éventuellement linéaires), les émissions sont estimées pour chacune des activités émettrices élémentaires retenues pour l'inventaire.

Une description plus détaillé d'une substance, un intervalle de temps de fonctionnement et une entité géographique s'illustre par la formule(2) (J.P. FONTELLE, 1995):

$$E_{s,t,z} = \sum_{a,i,f} \left[A_{a,i,f,t,z} \times \sum_p \left[F_{s,a,i,f,p} \times P_{a,i,f,p} \right] \right] \quad (2.6)$$

Dans laquelle,

A est la quantité d'activité (unité pertinente définie par l'expert)² ;

F. est le facteur d'émission (quantité de polluant/quantité d'activité) ;

P. est la fraction de secteur, d'activité, de combustible et de procédé ;

a. Indice relatif au type de source ;

f. indice relatif au type de combustible,

² Notons ici que cette unité est rapportée au système d'unité de puissance par conversion

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) (J.P. FONTELLE, 2006):

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a} \quad (2.7)$$

Dans laquelle,

E est l'émission relative à la substance s et à activité a pendant le temps t, et s'exprime en gce.

A est la 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 (2.7) sont déterminé 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 (2.6) en considérant des modèles spécifiques comme celle de l'activité ou l'émissions 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 précis³, 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 appliqué aux émissions de certaines substances telles que le dioxyde de soufre (SO₂), le trioxyde de soufre (SO₃), le dioxyde d'azote(NO₂), le monoxyde de carbone (CO), par le bilan matière. Cette expression empirique se décrit par la relation (3) (J.P. FONTELLE, 1995):

$$E = Q_c \times T_{pe} (1 - R_p) \times \frac{M_{pf}}{M_{pe}} \quad (2.8)$$

Dans cette expression,

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

Q_c . Le débit-masse du combustible (en Kg.s⁻¹) ;

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

³ AES-SONEL CTD, CTO, CTM ici les centrales tourne entre 18h-22 h du soir ou période de charge maximale

R_p . rétention de la substance p dans l'installation (%);

M_{pf} Masse molaire de la substance p sous la forme f au débouché à l'atmosphère (Kg/mol);

M_{pe} masse molaire de la substance p (Kg/mol).

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 diagramme fig. 56). Ces émissions de PM, SO_x, NO_x et les CO issues des centrales ont été estimées à base des équations (2.6), (2.7) et (2.8) nous permettant d'obtenir des expressions (2.9)-(2.12) plus adaptés et plus précises aux zones d'étude (Yu Zhao et al, 2008) (Zhu Liu et al, 2015).

$$E_{SO_x,i} = \sum_j \sum_k \sum_l A_{i,j,l} \times Scont_j \times (1 - Sr_k) \times (1 - \eta_j) \quad (2.9)$$

$$E_{CO_y,i} = \sum_j \sum_l \sum_k \sum_m A_{j,i,l} \times Ccont_m \times (1 - Cr_k) \times \frac{M_{CO,m}}{M_{C,m}} \quad (2.10)$$

$$E_{NO_x,i} = \sum_k \sum_m \sum_n A_{i,k,m,n} \times EF_{NO_x,k,m,n} \quad (2.11)$$

$$E_{PM_y,i} = \sum_k \sum_n \sum_l \sum_m A_{i,k,l} \times AC_m \times (1 - ar_k) \times f_{k,y} \times C_{k,n} \times (1 - \eta_{n,y}) \quad (2.12)$$

(2.12)

Où les indices i, j, k, m, n et y sont respectivement pour chacune de ces équations et adapter à la forme empirique de l'équation (2.10); la répartition géographique; le type de technologie; le type de combustible utilisé; la technologie de commande d'émission ou technologies de procédées d'émission; taille de la particule voir tableau 18. Les termes A, Scont, Sr, Ccont, Cr, EF, AC, ar, f, C, et η , (Zhu Liu et al, 2015) sont respectivement.

A : la consommation spécifique fonction du temps de fonctionnement;

Scont : pourcentage en soufre dans le combustible;

Sr : quantités de soufre retenue dans les cendres;

Ccont : teneur en Carbone du combustible entrant dans le moteur;

Cr : 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 inférieure des cendres;

f : fraction de masse de la particule selon leur taille;

C : taux d'application du procès de commande des émissions;

η : la suppression efficace de la technologie de commande d'émission (COMMISSION EUROPÉENNE, Juillet 2006).

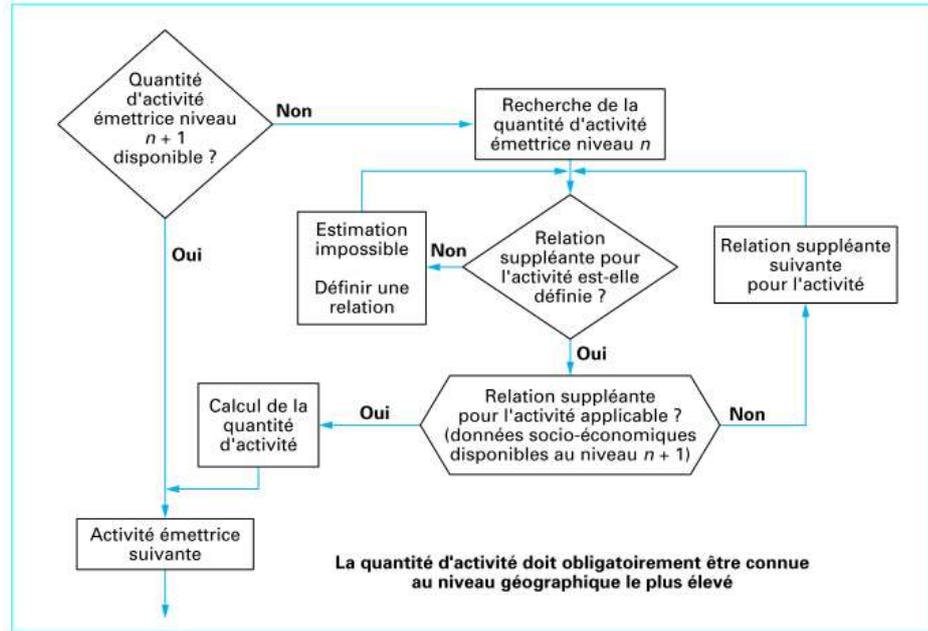


Figure 45: organigramme d'estimation des quantités d'activité non disponibles par niveau géographique (J.P. FONTELLE, 2006)

Cette répartition des indices s'applique sur le schéma de la fig.57.

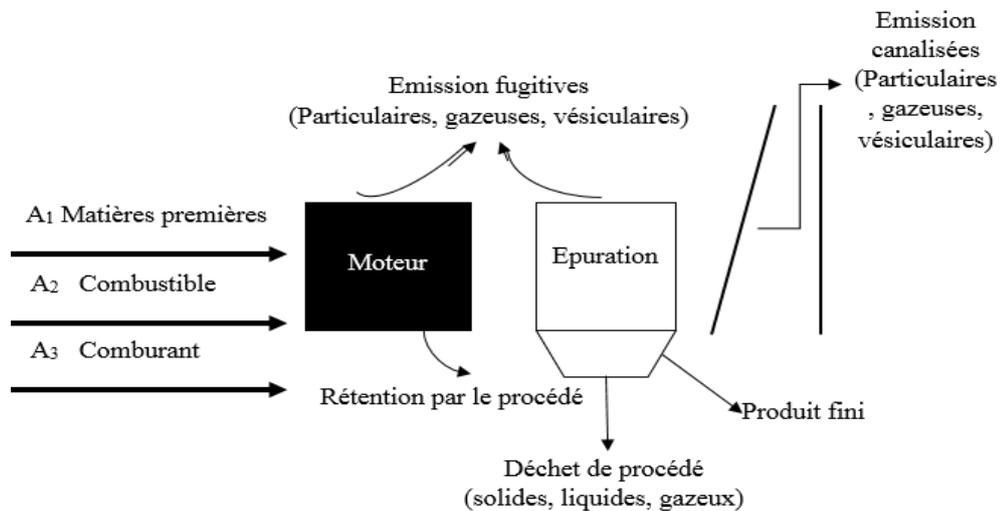


Figure 46: Bilan d'un procédé de combustion industriel dans les moteurs (J.P. FONTELLE, 2006)

Les caractéristiques du fioul résiduel marin sont répertoriées dans le tableau 19, ces caractéristiques permettent de mieux présenter les informations graphiques.

Power Thermal Plant			Source	
Geographical distribution			OYOM-ABANG 1, DIBAMBA, MBALMAYO CAMEROUN	
Type of technology			Moteur Wartsila Vasa 18V32LN	
Type of fuel			Fioul Léger Fioul Lourd SONARA	
Emission Control Technologies	SO ₂ :Sulfur Dioxide Emission Control Technologies	Flue Gas Desulfurization	A post-combustion flue gas desulfurization (FGD) system uses an alkaline reagent to absorb SO ₂ in the flue gas and produce a sodium and calcium sulfate compound.	EPA Base
		Cleaner Fuel Substitution	SO ₂ reductions can be realized simply by using distillate oil rather than residual oil. Based on published emission factors, SO ₂ emissions would be 73% less if distillate oil were burned.	Case.4.10 And Commission for
	NO _x : Nitrogen Oxides Emission Control Technology	Low-NOx Burner (LNB)	An LNB is a specially designed burner that is capable of controlling flame temperatures in such a manner as to minimize NO _x emissions.	Environmenta l Cooperation (CEC)
		Selective Non-catalytic Reduction	A selective non-catalytic reduction (SNCR) system is an exhaust after-treatment device that utilizes the abilities of certain compounds, most commonly urea or ammonia, to react with NO _x emissions to form benign chemical compositions.	
		Selective Catalytic Reduction	A selective catalytic reduction (SCR) system works in much the same way as an SNCR system. The difference between the two is that SCR systems also contain a mesh of precious-metal catalysts within the exhaust stack that facilitate a more efficient reaction at a wider temperature range.	
PM : Particule Emission Control Technology	ESP (Electrostatic precipitators)	The precipitators consist of electrically charged plates or tubes installed inside an exhaust stack. PM, high capture efficiency, Reagent – None, Co-benefits	NESCAUM Andover Technology Partners Commission	
	Baghouse Pulse-Jet Fabric Filter (FF)	A baghouse consists of several layers of cloth-like material that the polluted exhaust gases are forced to flow through. Filtration of PM, highest capture efficiency Reagent – None, Typical Fuel Types , Gaseous fuels, Co-benefits		

	Méthode de test	RME25	RMF25	RMG35	RMH35
Densité à 15°C, kg/m³	ISO 3675/ ISO 12185	991	991	991	991
viscosité à 100°C, mm ² /s	ISO 3104	25	25	35	35
cinématique à 50°C, mm ² /s	ISO 3104	225	225	390	390
Point d'éclair, °C	ISO 2719	60	60	60	60
Carbone résiduel, % (m/m)	ISO 10370	15	20	18	22
Cendres, % (m/m)	ISO 6245	0,1	0,15	0,15	0,2
Soufre, % (m/m)	ISO 8754	5,0	5,0	5,0	5,0
Eau, % (V/V)	ISO 3733	1,0	1,0	1,0	1,0
Total des sédiments, potentiel, % (m/m)	ISO 10307-2	0,1	0,1	0,1	0,1

ation. for
s, and Environmenta
1 Cooperation
ulates (CEC)
ause a

Practices

steep increase in NOx emissions.

CO: Emission Control
Options Technology

Oxidation Catalyst

Oxidation catalyst modules and pre-engineered packages are the cost-effective way to eliminate or reduce carbon monoxide and have a side benefit of also reducing unburned hydrocarbon emissions.

CO Spray Catalyst

Theoretically, the oxidation of CO to CO₂ could be achieved by adding the catalyst to the mist of a wet scrubber, if applied at the high temperature point in the exhaust stack.

Tableau 18: Valeurs des indices suivant une méthode précise (Bechtel Power Corporation , 2010), (EPA Base Case v.5.13 , 2006) (James E. Staudt et M.J. Bradley , Marc 2011), (Luna Salaver et al , April 2007), (MJ Bradley & Associates, February 2005)

Tableau 19: Spécification des fiouls résiduels marins (classe F) (S. WALKER KITS, 2005)

2.1.2 Inventaires d'émissions sonores issues des sites industriels

L'étude des bruits générés par les moteurs est faite dans l'optique de garantir une protection optimale du milieu environnant en terme de qualité sonore. Le caractère subjectif du son émis conditionne leur estimation quantitative et qualitative, cela le rend possible qu'aux travers des indicateurs psycho acoustiques associés au niveau sonore, à la hauteur et de manière globale au timbre des sons. Pour ce fait deux méthodes ont été utilisées tout au long de ce travail.

2.1.2.1 Méthode Empirique

Elle a été possible grâce au Sonomètre AR814 (CTM) et DB300/2 (CTD). C'est un appareil comportant un micro à larges bandes calibré capable d'analyser la fréquence et l'intensité d'un bruit. Il le décompose en plusieurs bandes de fréquence, par bande d'octave voire de tiers d'octave sur des plages plus ou moins large de fréquences. Certains procèdent même à une analyse par bandes fines (FFT, Transformé de Fourier rapide) (Asymptotic wave let and gabor analysis: Extract of instantaneous frequency, 1992) le nombre de bandes détermine alors la finesse de l'analyse. Ceci respectant les normes IEC 651 TYPE 2.



A -Sonomètre intégrateur DB 300/2 (CTD); B- Digital Sound Level Meter AR814(CTM)

Figure 47 : Sonomètre intégrateur DB 300/2 (CTD) et analyseur AR814 (CTM)

Sur le quadrant on lit les valeurs de :

$L_{w(A)} \text{ HF}$: Niveau de puissance sonore à Haute fréquence

$L_{w(C)} \text{ BF}$: Niveau de puissance sonore à Base fréquence

$L_{\text{aeq}(A)} \text{ HF}$: Niveau de Pression sonore à Haute fréquence

$L_{\text{aeq}(C)} \text{ BF}$: Niveau de Pression sonore à Haute fréquence.

2.1.2.2. Méthode Analytique

D'une manière simplifier on définit le niveau de bruit ou encore le niveau de puissance acoustique (L_w) émis par source analogue au niveau de pression acoustique (L_p) reçue par le milieu récepteur individu comme étant ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction., 2001):

$$L_w = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right), \text{ ou } L_w = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (2.13)$$

L_w en dB

Les sources de bruit sont extrêmement nombreuses et varient au sein de la salle de machine. Ceux-là qui interviennent le plus pendant la combustion du fioul lourd ; les moteurs diesel, les génératrices et les ventilateurs de refroidissement de la salle.

✓ Moteur et Génératrices

Plusieurs sources de bruit sont susceptibles : les phénomènes électriques, mécaniques et aérodynamiques (sources dominantes).

En général les bruits sont à large spectre et les fréquences pures liées aux circuits d'air et au ventilateur variant entre (500-4000Hz).

On définit le niveau de puissance acoustique pour ce type d'équipement en fonction de la vitesse et de la taille du moteur ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2006), (ISO 3744:1994,) .

$$L_w = 20 \log P + 15 \log N + 13 \quad (2.14)$$

L'unité utilisée est le dB.

Avec P : Puissance nominale exprimée en CV

N : la vitesse de rotation en tours par minutes (trs/min), comparativement aux autres modèles, le moteur électrique est relativement silencieux (souvent < 90 dB(A)) mais la vitesse de rotation élevée exige un réducteur qui devient ici une source de bruit secondaire environnant les 110-115 dB ceci due aux engrenages.

✓ Les Ventilateurs

C'est l'une des sources les plus bruyantes en industrie. Principale source de bruit on distingue les groupes moto-ventilateurs : bruits aériens et solidiens. Ils produisent deux types de bruits aérodynamiques : Un bruit discontinu dû aux pales ou aux aubes et un bruit continu dû à la turbulence de l'air. Le bruit discontinu est parfois appelé fondamental du ventilateur à une fréquence de ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2006):

$$f = \frac{N.R}{60} \quad (2.15)$$

Avec : f : fréquence fondamentale d'émission, en Hertz (Hz)

N : Nombre d'aubes de la roue ou de pales pour une hélice,

R : Vitesse de rotation en tours par minute.

D'autre part le bruit aérodynamique correspond aux fréquences fondamentales harmoniques et le bruit non aérodynamique des vibrations de l'ensemble moteur et ventilateur. Les fabricants fournissent des tableaux spécifiques pour avoir les valeurs par bandes d'octave des niveaux de puissance acoustique en décibels des ventilateurs. Dans ce cas on considère L_w comme le bruit à l'aspiration (idem au refoulement). Ces valeurs de niveau de puissance sont un départ pour un calcul acoustique de réseau donc l'étude complète vise le calcul de L_p donné

dans un local ou dans les environs du site étudié. Les sources secondaire bruit de carcasse comme l'indique la figure 26 ci-après sont difficilement modélisable. Nous généralisons donc le niveau de puissance acoustique des ventilateurs suivant une bande de fréquence précise (500 Hz - 4000 Hz) selon l'équation suivante ((CSTC), Centre scientifiqueet technique de la construction, 2006) :

$$L_w = 10 \log D + 20 \log P_s + K \quad (2.16)$$

L'unité utilisée est le dB.

Avec : D : débit du ventilateur en m³/h,

P_s: pression statique en cm de colonne d'air,

K : constante fonction du type de ventilateur. Voir (Tableau 1 A.11)

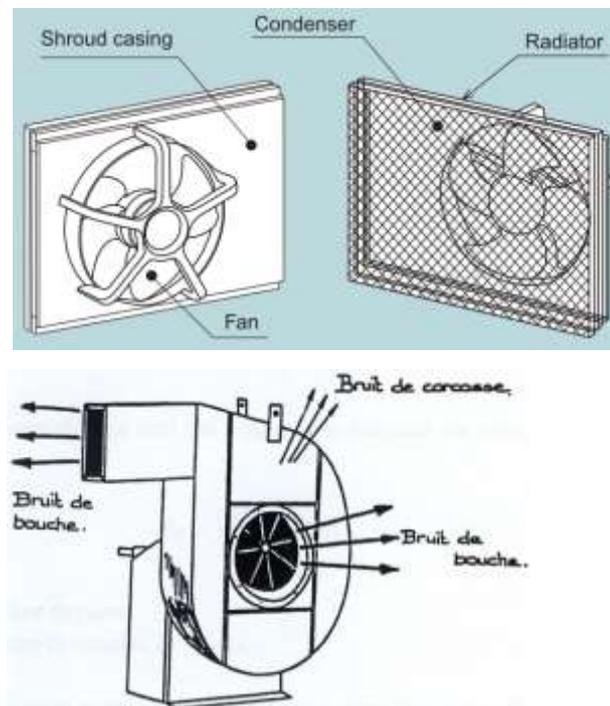


Figure 48 : Sources secondaire de bruit des ventilateurs

Le bruit d'un ventilateur peut augmenter s'il est mal dimensionné, si les conduits d'admission et d'échappement n'assurent pas un écoulement linéaire uniforme par exemple les ventilateurs à grands débits et/ou pertes de charge élevées provenant d'émission d'un spectre de base ou d'émission de raies (proches des sons purs) c'est un phénomène de bruit de sirène idem à un passage périodique des pales devant les pièces fixes s'opposant à l'écoulement du fluide. Ici on retrouve les bruits due à l'écoulement de fluides. Le bruit peut être généré en de nombreux endroits d'un système de canalisation et transmis efficacement par l'intermédiaire du fluide véhiculé ou des conduites. Ce type de bruit est essentiellement fonction du régime d'écoulement du fluide, caractérisé par le nombre de Reynolds ((CSTC), Centre scientifiqueet technique de la construction, 2006)

✓ Pompes

Ce sont généralement les sources hydrauliques et mécaniques (cavitation, fluctuations de pression dans le fluide, impacts des parties mécaniques, résonances, défauts d'alignement, défauts d'équilibrage...). En général, les sources hydrauliques ont un niveau de bruit plus important pour les pompes ; Si elles ne fonctionnent pas à vitesse et pression d'évacuation nominales, si le taux de compression est élevé, si la pression à l'admission est inférieure à la pression atmosphérique, si la température est trop élevée (> 50°C). Le bruit produit correspond à un large spectre avec raies tonales dont le fondamental est ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2006):

$$f = \frac{N.n_c}{60} \quad (2.17)$$

La fréquence en Hertz (Hz).

Avec N : la vitesse de rotation en tours/min.

n_c : le nombre de cycles de pression de la chambre par révolution.

Le spectre émis au-delà de 3000 Hz influence la cavitation et l'écoulement du fluide. La puissance acoustique totale pour une fréquence comprise entre (500 Hz – 4000 Hz) est donnée par ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2006):

$$L_w = 10 \log P + K_p \quad (2.18)$$

L'unité utilisée est le dB. Avec P : la puissance en CV,

K_p : constante fonction du type de pompe. Voir (Tableau 2 A.11)

Pour des vitesses nominales inférieures à 1600 tours/min, on peut soustraire 5 dB à la valeur de L_w calculée.

✓ Compresseurs d'air

Source principale de bruit d'échappement est la composante la plus importante du bruit. Les sources secondaires d'admission, de ventilateurs de refroidissement, du système de commande et de transmission mécaniques et hydrauliques. Le compresseur d'air voir figure ci-dessous est une source secondaire la plus courante par addition du bruit du moteur et du ventilateur de refroidissement. C'est un bruit typiquement riche en BF. La puissance acoustique totale des compresseurs (de 500 Hz à 4000 Hz) peut être estimée par l'équation ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2006) :

$$L_w = 10 \log P + 86 \quad (2.19)$$

L'unité utilisée est le dB. Avec P : puissance en CV



Figure 49 : Compresseurs à piston lubrifié série ME/MT conçue par MAUGUERIE

De ces deux grandeurs de l'une à l'autre plusieurs facteurs entre en jeux tels que l'atténuation, le temps de réverbération, la correction et plusieurs autres facteurs fonction de la propagation acoustique et du type de milieu récepteur.

Un certain nombre de chercheurs ont mis au point des modèles d'évaluation des niveaux de pression acoustique et de l'atténuation autour des complexes industriels (Tonin, 1993). Une équation généralisée de ces modèles prend la forme suivante :

$$L_p = \sum_{sources}^{\log} \left[L_w - \sum_i (A_i) \right] \quad (2.20)$$

Ou,

L_p : niveau de pression acoustique résultant en un point du champ de bruit

L_w : niveau de puissance acoustique de la source

A_i ($i = 1, 2, 3 \dots$) : atténuation applicable dans le site considéré

Ainsi, tous les modèles d'estimation du bruit reposent sur la détermination du niveau de puissance acoustique des sources de bruit et l'évaluation de l'atténuation de l'énergie acoustique lors de la propagation de la source au récepteur. Le tableaux 2. A9 présente divers modèles d'estimation du bruit

L'équation de base liant le niveau de pression acoustique équivalent par bande d'octave par vent portant, au niveau d'un récepteur, calculé par bandes d'octaves de 63 Hz à 8 kHz e, pour chaque source ponctuelle fonction du niveau de puissance sonore à la source s'écrit ((CSTC), Construction Centre Scientifique et Technique de, 2004):

$$L_{A_{eq},T} = L_w + K - A \quad (2.21)$$

Avec : L_w : niveau de puissance de la source ponctuelle exprimé en dB

K : Correction de directivité considérée comme nul pour une source omnidirectionnelle en espace libre.

A : atténuation par bande d'octave de la source ponctuelle au récepteur L'unité utilisée est le dB

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} + A_{écran} + A_{divers} \quad (2.22)$$

D'une manière simplifier les niveaux de pression acoustique continu équivalent pondéré A , par vent portant est la somme des différentes contributions pour les différentes sources, pour les différentes bandes d'octave ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2004), (ISO8297, 1994)

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^m T_k 10^{0,1 \cdot [L_{Aeq,j} + K_j]} \right\} \quad (2.23)$$

i \equiv événement isolé pour la i^{eme} mesure,

j \equiv j^{eme} source fonction du type de bruit,

k \equiv le k^{ieme} intervalle de temps T_k ; Pendant lequel on ne peut pas distinguer les évènements isolés d'une période spécifique T celle de notre étude considérera une valeur du temps moyen de fonctionnements en soirée T_k par année.

A long terme L_T , le niveau moyen de pression acoustique pondéré A ((CSTC), Construction Centre Scientifique et Technique de la construction, 2004) :

$$L_{Aeq,T} (L_T) = L_{Aeq,T} - C_{météo} \quad (2.24)$$

Ou $C_{météo}$: Correction météorologique

Pour des cas particuliers si nous considérons de manière composite par alternances de jours et nuits, on peut évaluer les niveaux sonore journaliers composite (jour-nuit), y compris le terme correctif par l'équation suivantes ((CSTC), Centre scientifique et technique de la construction, 2004) :

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left\{ \frac{d}{24} 10^{0,1 \cdot [L_{Aeq,d} + K_d]} \right\} \quad (2.25)$$

Avec d = nombre d'heures en journée

D'un point de vue général les différentes atténuations se présentent comme suit :

2.1.2.3. Méthodes d'évaluation à proximité des complexes industrielles

De manière générale les facteurs qui interviennent lors de la propagation du son dans un milieu sont influencés par plusieurs forme d'obstacle créant ainsi une atténuation typique au modèle de l'obstacle rencontré. Parmi lesquelles :

- la Forme géométrique de la source : elle peut être cohérente ou incohérente ;
- les conditions météorologiques : turbulence atmosphérique et divergence ;
- le type de terrain et contour : absorption du sol, réflexion, divergence ;
- l'absorption atmosphérique du son ;
- les obstacles : maisons, barrières, végétation ;

2.2.2.3.1 Divergence géométrique

C'est le premier phénomène intervenant dans la propagation acoustique et il est dû à la dispersion géométrique des ondes acoustiques dans l'espace. Encore appelée atténuation sonore due à la divergence géométrique, il s'agit de la décroissance du niveau sonore avec la distance de propagation. Elle est définie en décibels par l'équation (ISO, 1996)

$$A_{div} = \left[20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] \quad (2.26)$$

Avec :

d= distance entre la source et le récepteur en mètres (m)

d₀ = distance de référence (=1m)

La constante 11 est issu de la relation entre le niveau de puissance acoustique et le niveau de pression acoustique pour une distance de référence de 1m et pour une source omnidirectionnelle. Pour une source ponctuelle la décroissance du niveau de puissance acoustique en espace libre est de 6dB par doublement de la distance.

2.2.2.3.2 Absorption atmosphérique ou atténuation atmosphérique

En plus de l'atténuation du niveau sonore due à la distance du point d'observation à la source, qualifiée parfois d'atténuation géométrique, vient s'ajouter une atténuation atmosphérique liée aux échanges énergétiques qui s'établissent entre l'onde et son milieu de propagation. Les conditions météorologiques et plus particulièrement le vent et la température peuvent jouer un rôle essentiel lorsque la distance entre la source et l'observateur est supérieure à 50 m. En première approximation, l'absorption atmosphérique est proportionnelle à la distance parcourue et à un coefficient dépendant de la fréquence des sons considérés, de la température et de l'humidité relative de l'air. L'atténuation due à l'absorption atmosphérique

A_{atm} en décibels au cours de la propagation pour une distance parcourue d en mètres est définie par (ISO, 1996) :

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (2.27)$$

α est le coefficient d'atténuation atmosphérique en décibels par kilomètre (dB/Km) par bande d'octave et pour une fréquence moyenne de la bande.

Le coefficient d'atténuation α dépend de la fréquence du son, de la température ambiante et de l'humidité relative de l'air.

Dans les conditions normales de température et de pression le coefficient α (en dB/1000m) peut se calculer en fonction de la fréquence f (Hz) de l'onde, de la température ($^{\circ}K$) et de la concentration molaire de l'eau vapeur h (%) par (Lamancusa J.S., 2009) :

$$\alpha = 869 * f^2 \left\{ 1,84 * 10^{-11} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \left[0,01275 \frac{e^{-2239,1/T}}{F_{r,O} + f^2 / F_{r,O}} + 0,1068 \frac{e^{-3352/T}}{F_{r,O} + f^2 / F_{r,N}} \right] \right\} \quad (2.28)$$

Pour le calcul des niveaux sonore dans l'environnement, la détermination du coefficient d'atténuation atmosphérique doit se faire sur la base de la moyenne des températures du milieu obtenu à partir des relevés du lieu considéré.

Avec $F_{r,O}$ = Fréquence de relaxation de l'oxygène en Hz

$$F_{r,O} = 24 + 4,04 * 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \quad (2.29)$$

Et $F_{r,N}$ =Fréquence de relaxation de l'azote en Hz

$$F_{r,N} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \left(9 + 280 h e^{\left\{ -4,17 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\}} \right) \quad (2.30)$$

Ou $T_0 = 293,15^{\circ}K$

Le tableau 3 A.11 donne quelques valeurs du coefficient d'atténuation atmosphérique par bande d'octave du bruit en fonction des conditions expérimentales.

2.2.2.3.3 L'effet du sol

L'atténuation du son due à l'effet de sol résulte de l'interférence entre le son réfléchi sur la surface du sol et le son qui se propage directement de la source au récepteur. La nature

du sol, selon les caractéristiques de sa composition, à une grande influence sur les ondes sonores. En effet le sol permet d'atténuer l'onde sonore le long du champ de propagation selon deux principaux paramètres : l'angle d'incidence entre l'onde sonore et le sol ainsi que la fréquence de cette onde. Si l'onde est d'une manière générale sensiblement parallèle au sol et que la fréquence est haute (son aigu), alors l'atténuation sera importante. Les propriétés acoustiques de chaque sol sont définies par le facteur de sol G. Sur la base de ce facteur, on distingue trois catégories de surface réfléchissante définie comme suit :

-sol dur : revêtement de chaussée, eau, glace, béton... toute surface à faible porosité :
G=0

-sol poreux : sol recouvert d'herbes, d'arbres, de végétation et toute surface de convenant à la croissance de la végétation (sol de culture) : G=1

-sol mixte : surface constituée à la fois de sol dur et de sol poreux et G prend les valeurs comprises entre 0 et 1.

Dans la pratique le calcul de A_s pour une bande d'octave spécifique, se fait à partir de la relation (ISO, 1996):

$$A_{sol} = A_s + A_r + A_m \quad (2.31)$$

Avec A_{sol} = atténuation due au sol en dB

Les différentes composantes se calculent en se servant du tableau 4 A11.

L'effet de sol peut se calculer par une méthode plus simplifiée dans les conditions suivantes (ISO, 1996) :

-seul L_p à l'emplacement du récepteur est intéressant

-le son n'est pas pur

-l'atténuation due au sol peut être calculée à partir de la relation :

$$A_{sol} = 4,8 - \left(\frac{2h_m}{d} \right) \left[17 + \left(\frac{300}{d} \right) \right] \geq 0 \quad (2.32)$$

Avec : $h_m = \frac{F}{d}$ en m

où F est l'aire de la partie hachurée (m^2) et d=distance source-récepteur (m)

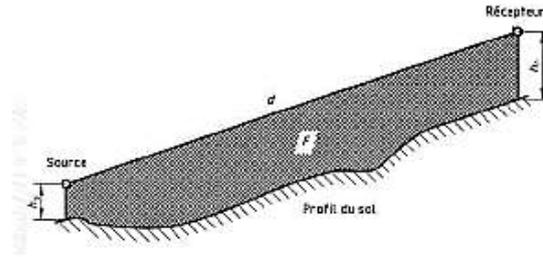


Figure 50: Profil de la surface pour des atténuations niveau sol

On considère les sources concentrées dans la salle de machines et à des différentes hauteurs h_s ; celle du récepteur est prise comme nulle car le niveau de référence pour les hauteurs est pris au sol. Les valeurs négatives de A_{sol} sont remplacées par zéro. Lorsqu'on calcule A_{sol} en utilisant la relation (2.32), la correction de directivité K de l'équation (2.21) devra inclure un facteur supplémentaire K_ω en décibels qui rend compte de l'augmentation apparente du niveau de puissance sonore due aux réflexions sur le sol à proximité de la source, et qui est défini par :

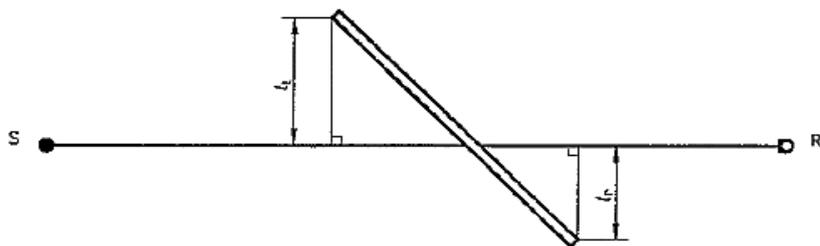
$$K_\omega = 10 \log \left\{ 1 + \frac{d^2 + (h_s - h_r)^2}{d^2 + (h_s + h_r)^2} \right\} dB \quad (2.33)$$

Avec : h_s hauteur de la source (m) ; h_r celle du récepteur (m) ; d = distance source-récepteur

2.2.2.3.4 Atténuation due aux obstacles $A_{écran}$

Un objet est considéré comme écran s'il remplit les conditions suivantes (ISO, 1996) :

- masse surfacique supérieure à 10Kg/m^2 , salle de machine aux murs en aluminium, celle étudiée est de 540Kg/m^2
- surface fermée (pas de trous, fissures...)
- dimension horizontale de l'objet perpendiculaire à la ligne S-R, à la longueur d'onde et à la fréquence centrale nominale pour la bande d'octave considérée. On a les figures suivantes :



$$(l_s + l_r) > \lambda \quad (2.34)$$

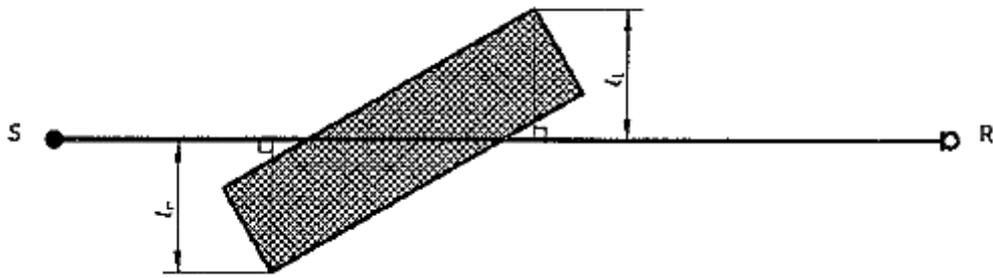


Figure 51: Condition d'effet d'écran (ISO, 1996)

Lorsque la source et le récepteur sont séparés par un obstacle rigide, un mur non-poreux, une habitation, une quantité importante du bruit est réduite. Ce principe est largement exploité sur les autoroutes car la présence de talus, palissades, immeubles, etc... a également une influence non négligeable sur la propagation du son en jouant le rôle d'écrans acoustiques.

L'atténuation apportée par ces écrans dépend essentiellement de la géométrie du lieu et de la fréquence de la source de bruit. Le paramètre déterminant ici est le nombre de FRESNEL. Pour un milieu rigide, un mur non poreux ou un immeuble schématisé par comme suit :

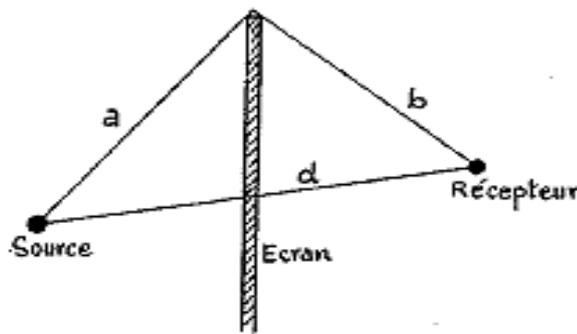


Figure 52: Paramètre géométrique d'un écran

L'atténuation de l'écran dans ce cas est définie par (LAMANSUCA J.S., 2009) :

$$A_{\text{écran}} = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \quad \text{en (dB)} \quad (2.35)$$

Pour $N \geq -0,2$

Avec $N = \pm \frac{2}{\lambda} \delta$, N est appelé nombre de FRESNEL. Le signe négatif de N

signifie le récepteur peut voir la source, tandis le signe positif traduit le fait que le récepteur est dans une zone d'ombre. λ , est la longueur d'onde émise par la source en mètres (m).

$$\delta = (a + b - d) \quad (2.36)$$

δ =Allongement de parcours en mètres (m)

La détermination de $A_{\text{écran}}$ tient compte d'autres effets tels que :

2.2.2.3.5 Effet d'écran par diffraction

L'effet de diffraction n'est pas négligeable, il doit se calculer par :

$$\text{En haut de l'écran : } A_{\text{écran}} = D_z - A_{\text{sol}} > 0 \quad (2.37)$$

$$\text{Sur les bords de l'écran : } A_{\text{écran}} = D_z > 0 \quad (2.38)$$

D_z = atténuation de l'écran par bande d'octave et définie par (2.39)

A_{sol} = atténuation due au sol en l'absence de l'écran (en absence d'écran)

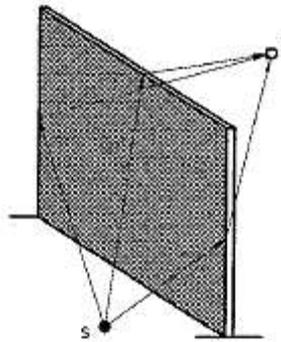


Figure 53: Effet d'écran par diffraction

L'atténuation due à l'écran en décibels (dans le cas d'un seul trajet sonore significatif) est donné par (Seutche J.C., 2013) :

$$D_z = 10 \log \left[3 + (C_2 / \lambda) C_3 z K_{\text{météo}} \right] \quad (2.39)$$

Avec $C_2 = 20$ et prend en compte les effets de réflexion du sol. Dans des cas spécifiques où les effets de sol sont pris en compte séparément (sources image) $C_2 = 40$

$C_3 = 1$ Pour une diffraction simple. Pour une diffraction double :

$$C_3 = \left[1 + (5\lambda / e)^2 \right] / \left[(1/3) + (5\lambda / e)^2 \right] \quad (2.40)$$

λ = longueur d'onde du son à la fréquence moyenne de la bande d'octave (m)

Z = différence entre les longueurs de trajet du son diffracté et du son direct

$K_{\text{météo}}$ = facteur de correction qui tient compte des effets météorologiques

e = distance entre les deux arêtes de diffraction dans le cas d'une diffraction double.

La différence Z entre les longueurs de trajet du son diffracté et son direct, se calcule à partir des relations (ISO, 1996) :

Diffraction simple

Diffraction double

$$z = \left[(d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2 \right]^{1/2} - d \quad z = \left[(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2 \right]^{1/2} - d \quad (2.41)$$

a = composante de la distance parallèle à l'écran, entre la source et le récepteur (m)

d_{ss} = distance entre la source et le premier point de diffraction (m)

d_{sr} = distance entre le second point de diffraction et la source

On a les figures suivantes (ISO, 1996) :

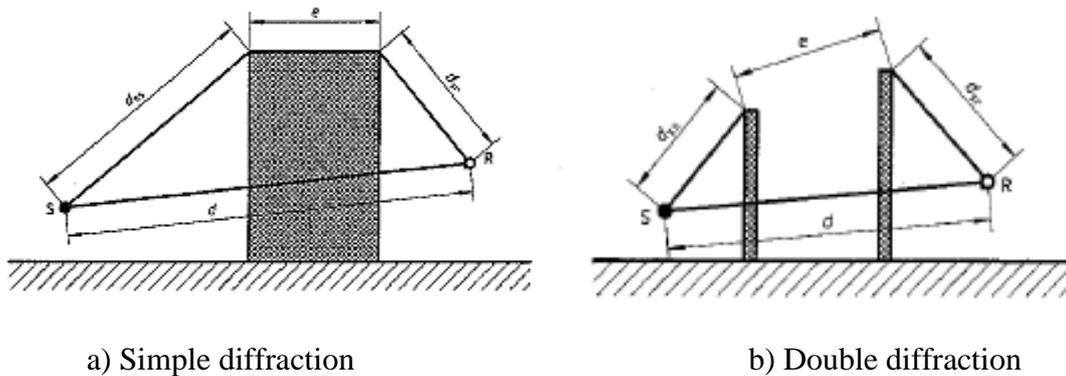


Figure 54: Diffraction par simple et double écran

Le facteur de correction $K_{météo}$ qui tient compte des conditions météorologiques dans l'équation (2.42) s'exprime par la relation :

Pour $Z > 0$

$$K_{météo} = \exp \left[-(\sqrt{2000}) \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}} \right]$$

$$\text{Pour } Z < 0 \quad K_{météo} = 1 \quad (2.42)$$

Obtient aussi la même dans les cas suivants :

- une diffraction latérale autour d'obstacles,
- une distance S-R < 100m

Lorsqu'il existe plusieurs écrans, on fait les calculs avec les deux plus efficaces en négligeant les autres. L'atténuation ne doit pas excéder 20dB dans le cas de simple diffraction et 25 dB dans le cas de double diffraction.

2.2.2.3.6 Atténuation par réflexions

Ce type d'atténuation est défini pour les réflexions remplissant les conditions :

- Une réflexion spéculaire peut-être construite comme sur la figure 66.
- L'amplitude du coefficient de réflexion du son pour la surface de l'obstacle est supérieure à 0,2

- La surface est suffisamment grande pour que la longueur d'onde centrale nominale en mètres, pour la bande d'octave considérée satisfasse la relation (ISO, 1996) :

$$\frac{1}{\lambda} > \left[\frac{2}{(l_{\min} \cos \beta)^2} \right] \left[\frac{d_{s,o} d_{o,r}}{d_{s,o} + d_{o,r}} \right] \quad (2.43)$$

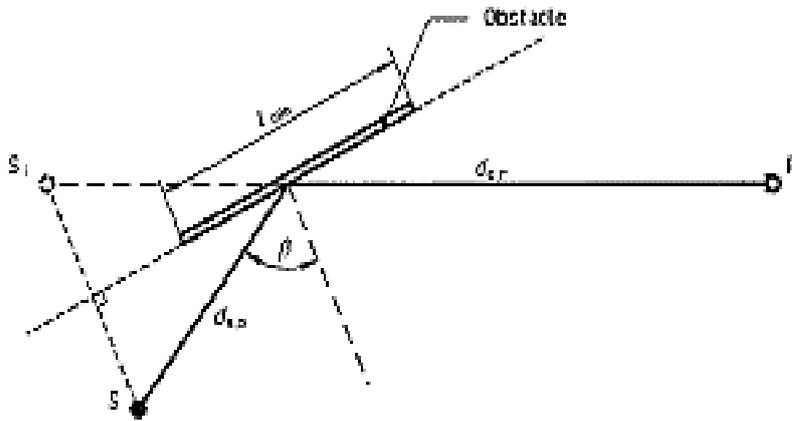


Figure 55: Surface de réflexion d'un obstacle

λ = longueur d'onde

$d_{s,o}$ = distance entre la source et le point de réflexion sur l'obstacle

$d_{o,r}$ = distance entre le point de réflexion sur l'obstacle et le récepteur

β = angle d'incidence (en radians)

l_{\min} = dimension minimale (longueur ou hauteur) de la surface de réflexion

Si des réflexions efficaces sont détectées, on en tient compte en assimilant la source image à une source ponctuelle que l'on intègre dans le calcul global.

La puissance de la source image est définie par (ISO, 1996) :

$$L_{w,image} = L_w + 10 \lg(\rho) + D_{ir} \quad (2.44)$$

Avec ρ : coefficient de réflexion du son sur la surface de l'obstacle ($>0,2$). Les valeurs de ce coefficient sont présentées dans le tableau 5 A11.

D_{ir} = Indice de directivité de la source en direction de l'image récepteur

2.2.2.3.7 Correction météorologique

Elle sera faite en s'appuyant sur la base de deux considérations ci-dessus élaborées à savoir :

$$\text{-considération par vent portant : } L_{f,T}(DW) = L_w + D_c - A \quad (2.45)$$

$$\text{-considération sur une année : } L_{A,T}(LT) = L_{A,T}(DW) - C_{\text{météo}} \quad (2.47)$$

L'expression de $C_{\text{météo}}$ ci-dessus est fonction de la source et de celle du récepteur et on a :

$$\text{Si } d_p \leq 10(h_s + h_r), \text{ alors } C_{\text{météo}} = C_0 \left[1 - 10 \frac{(h_s + h_r)}{d_p} \right] \quad (2.48)$$

$$\text{Si } d_p > 10(h_s + h_r), \text{ alors } d_p = d_1 + d_2 \quad (2.49)$$

Avec : h_s = hauteur de la source en mètres (m)

h_r = hauteur du récepteur en mètres (m)

d_p = distance entre la source et le récepteur projeté sur le plan horizontal du sol (m)

C_0 = facteur dépendant des conditions météorologiques statistiques locales. (La vitesse du vent, la direction, les gradients de température) en dB. Par ailleurs : $0 < C_0 < 5\text{dB}$. Par défaut $C_0 = 5\text{dB}$. Dans notre étude, on considère que l'ensemble des sources sont concentrées en un point central à une hauteur nulle ainsi que le récepteur. On en déduit donc : $C_{\text{météo}} = 3\text{dB}$

2.2.5.8 Autres types d'atténuations A_{divers}

Le calcul de ce terme prend en compte les contributions de tous autres effets ne pouvant être obtenus de manière classique tels que : la végétation (forêt, flore, phytoplancton.), l'environnement (site industriel, les maisons, les immeubles les Routes les aéroports les voies ferrées).

a) Atténuation due à la végétation

La végétation a deux types d'effet sur la propagation du son en forêt : les effets directs comprenant la diffusion et l'absorption, les effets indirects sur la météo. L'atténuation des sons dans l'air est fonction de : la fréquence des sons considérés, du taux d'humidité relative et de la température. Le feuillage des arbres et leurs troncs atténuent faiblement les ondes sonores en général, à l'exception des cas rares où ceux bloquent complètement le trajet des ondes sonores de telle sorte qu'il soit impossible de voir à courte distance dans la végétation. L'atténuation augmente avec la distance d_f à travers la végétation

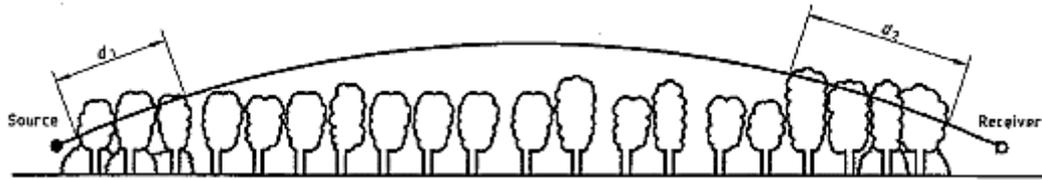


Figure 56: Distance de propagation d_f à travers la végétation

La distance de propagation d_f en mètres à travers la végétation est donnée par :

$$d_f = d_1 + d_2 \quad (2.50)$$

Pour déterminer d_1 et d_2 on considère un trajet courbé dont le rayon est supposé égal à 5Km. Le tableau 6. A11 donne les atténuations du bruit (dB/m) et par bande d'octave lors de sa propagation dans la végétation.

b) Atténuation en site industriel

Dans les sites industriels, l'atténuation est due aux installations ou à d'autres objets ; celle-ci est notée A_{site} . Puisque cette atténuation est fortement dépendante de la nature du site, il est le plus souvent recommandé de procéder à des mesures in situ pour estimer sa valeur. Le tableau 7.11 donne l'atténuation en fonction de la distance du site.

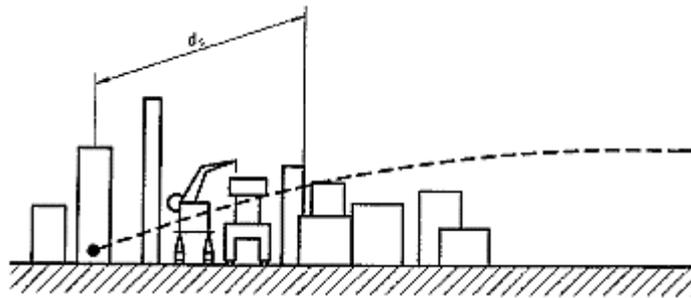


Figure 57: Atténuation en fonction de la distance du site industriel

c) Atténuations par les habitations en site urbain

L'atténuation par les habitations fait intervenir plusieurs phénomènes tels que : la réflexion et propagation sur les murs. Ces phénomènes n'étant facilement accessible, on se contente juste de donner une estimation de leur action sur l'atténuation du bruit. Généralement on les regroupe sous l'appellation d'effet d'écran. Ainsi pour estimer l'influence l'on procède soit par (Seuthe J.C., 2013) :

- calcul cumulatif par les effets décrits précédemment en faisant attention à la précision,
- mesures sur le terrain,
- modélisation de $A_{habitation}$ (valeur que l'on limite à 10 dB) est définie par :

$$A_{habitation} = 0,1Bd_b - 10 \log \left(1 - \frac{P}{100} \right) \quad \text{en dB} \quad (2.51)$$

Avec B= densité des habitations le long de ce trajet

d_b =longueur du trajet acoustique à travers la région édifiée de maisons.

$$trajet = \frac{S_{maison}}{S_{totale}} \quad (2.52)$$

P est un terme qui n'intervient que si l'on est dans le cas des rangées bien définies de constructions près d'une route ou d'un chemin de fer, ou un couloir similaire, P est le pourcentage de la longueur des façades rapportées à la longueur totale de route ou du chemin de fer au voisinage (<90%). L'atténuation est nulle dans le cas où la source est petite et qu'elle est vu directement par le récepteur. En zone urbaine, cette atténuation prédomine sur l'atténuation de l'effet de sol. Dans les résultats qui vont suivre nous ne tiendrons pas compte du terme P car les rangées de constructions ne sont pas bien définies, de plus la surface des maisons autour du site est 1/4 de celle totale de notre étude et la distance $d_b = d_1 + d_2$

Le niveau global d'une pression ou d'une puissance acoustique, est obtenu en faisant l'« addition » des différents niveaux de chaque octave ou tiers d'octave.

2.2. Méthodologies de dispersion des polluants atmosphériques et de la cartographies nuisances sonores autours des sites industriels

2.2.1. Modélisation de la dispersion atmosphérique des polluants

L'environnement atmosphérique du site industriel a été décrit dans les paragraphes 1.3.3 et 1.3.4 du premier chapitre ceci afin de présenter les caractéristiques importantes à prendre en compte dans ce travail de modélisation de la dispersion. A partir d'une description générale de l'atmosphère, le focus sera mis sur la couche immédiatement à proximité du sol dite couche troposphérique. Cette couche correspond à la couche la plus basse. A l'intérieur de celle-ci se produisent des phénomènes météorologiques ainsi que les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux. Elle englobe la partie allant du sol à 8 à 15 km de hauteur. Son profil de température vertical montre une évolution décroissante en fonction de l'altitude.

2.2.1.1 Formulation mathématique du phénomène de la dispersion atmosphérique

i. Caractérisation de la dispersion des particules gazeuses dans l'atmosphère

Un polluant rejeté dans l'atmosphère est soumis aux différents mécanismes qui régissent les écoulements de l'atmosphère suivant les modèles présentés en paragraphe 1.3.4. Les trois processus principaux sont (Dehlmoun L., 2012) :

- Le transport par le vent dans l'atmosphère dû à la rose du vent qui subviennent des brises de terres et de mères
- La diffusion due à la libération naturelle active des particules mises en suspension par écoulement passif.
- Le dépôt au sol et dans l'hydrosphère ou Immission : sec ou humide.

ii. Concentration locale d'une source

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

$$C(M_i, t) = \frac{\text{masse} - \text{subs tan ce}}{\text{volume} - \text{fluide}} = \frac{M}{v} \quad (2.53)$$

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

$$C(M_i, t) = Q(t).T(M_i, t) \quad (2.54)$$

Où $Q(t)$ est la quantité émise par unité de temps correspondante à la source ;

$T(M_i, t)$ est le transport dans l'atmosphère.

Il est également important de noter que bon nombre d'unités sont utilisées pour exprimer la concentration dans un phénomène de dispersion, nous pouvons énumérés entre autre $Particules/m^3$; mol/m^3 ; $\mu g/m^3$; fraction massique m_{esp}/m_{air} ; partie par million ppm ; partie par billion ppb ; partie par trillion ppt .

iii. Equations de base du transfert de matière

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

$$\vec{j}(M_i, t) = -D_i \overrightarrow{\text{grad}} C(M_i, t) \quad (2.55)$$

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

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

(2.56)

iv. 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 de courants d'air, nous aurions senti le parfum plus rapidement : on dit qu'il ya 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.

v. 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}_D dont le flux à travers une surface (S) est égal à l'intensité i_D , i.e. au nombre algébrique de particules diffusantes qui traversent une surface (S) par unité de temps.

Pendant dt , le nombre de molécules dN_D qui diffusent (S) est :

$$dN_D = i_D dt \quad (2.57)$$

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

$$i_D = \frac{dN_D}{dt} = \iint \vec{j}_D \cdot \vec{ds} \quad \text{Avec} \quad \vec{dn} = ds \vec{n} \quad (2.58)$$

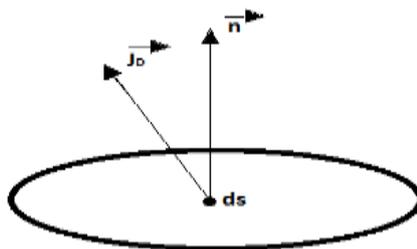


Figure 58 : Orientation du vecteur densité d'un courant de diffusion

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

$$\vec{j}_D = K \vec{E}_D \quad (2.59)$$

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

b. Première loi de Fick

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

$$\vec{E}_D = -\vec{\text{grad}}C \quad (2.60)$$

En exploitant (2.59) et (2.60) on obtient

$$\vec{E}_D = \frac{\vec{j}_D}{K} = -\vec{\text{grad}}C \quad \text{d'où} \quad \vec{j}_D = -K \vec{\text{grad}}C \quad (2.61)$$

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.

c. Equation tridimensionnelle de diffusion de la matière : deuxième Loi de Fick

Considérons un tube vertical, 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

$$\vec{j}_D = -K \frac{dC_D}{dz} \vec{e}_z \quad (2.62)$$

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

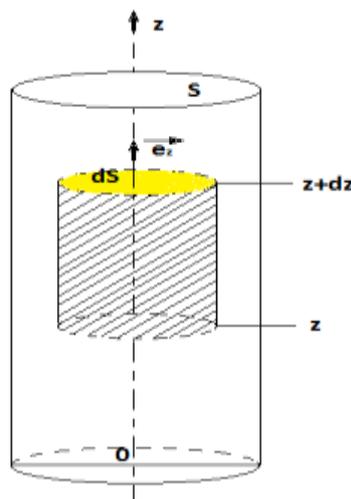


Figure 59 : Illustration de l'élément volumique de diffusion

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

$$C_D(z, t + dt).S.dz - C_D(z, t).S.dz = \frac{\partial C_D}{\partial t} S.dz.dt \quad (2.63)$$

Une telle variation provient des molécules qui sont :

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

$$\iint \vec{j}_D(z, t).d\vec{S}dt = \iint \vec{j}_D(z, t).n dSdt = j_{D,s}(z, t).S.dt \quad (2.64)$$

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

$$\iint \vec{j}_D(z + dz, t).d\vec{S}dt = \iint \vec{j}_D(z + dz, t).n dSdt = j_{D,s}(z + dz, t).S.dt \quad (2.65)$$

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

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

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

D'où :

$$\frac{\partial C_D(z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial J_{D,z}}{\partial z} \quad (2.66)$$

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 :

$$\frac{\partial C_D(z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial^2 C_D}{\partial z^2} \quad (2.67)$$

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

$$\iiint \frac{\partial C_D(z, t)}{\partial t} dV(M).dt = \iiint C_D(M, t + dt).dV(M) - \iiint C_D(M, t).dV(M) \quad (2.68)$$

Cette variation, comme pour le modèle à 1 dimension examiné précédemment, provient des particules qui, pendant dt sont :

- Entrées dans le volume (V) par diffusion à travers sa surface (S). Cela concerne tous les points de (S) où le vecteur densité de courant de diffusion \vec{J}_D a un sens opposé au vecteur normal \vec{n} (orienté vers l'extérieur car (S) est une surface fermée). Ces points donnent donc une contribution négative à l'intensité de diffusion : $i_D = \oint\!\!\!\oint \vec{J}_D \cdot \vec{dS}$, ainsi qu'au nombre algébrique total $dN_D = i_D dt$ 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 \vec{J}_D est orienté dans le même sens que le vecteur normal ? Ces points donnent donc une contribution positive à l'intensité $i_D = \oint\!\!\!\oint \vec{J}_D \cdot \vec{dS}$ et au nombre algébrique total $dN_D = i_D dt$ de particules qui diffusent durant dt :

Par conséquent,
$$\iiint \frac{\partial C_D}{\partial t} dV \cdot dt = -i_D dt = -\oint\!\!\!\oint \vec{J}_D \cdot \vec{dS} \cdot dt \quad (2.69)$$

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 :

$$\oint\!\!\!\oint \vec{J}_D \cdot \vec{dS} = \iiint \text{div}(\vec{J}_D) dV ; \frac{\partial C_D}{\partial t} = -\text{div}(\vec{J}_D) = -\vec{\nabla} \cdot (-K \vec{\nabla} C) \quad (2.70)$$

On obtient donc :
$$\frac{\partial C_D}{\partial t} = K \cdot \Delta C_D \quad (2.71)$$

L'équation (2.71) représente l'expression tridimensionnelle de la deuxième loi de Fick relative à la diffusion de la matière.

vi. Phénomène d'advection-convection de la matière

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

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 Δz de particules ne varie pas en fonction du temps. Cette Loi s'écrit en unidimensionnelle par l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\frac{\partial(m_t)}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial z} \quad (2.72)$$

Où $m_l = A.C$ désigne la masse linéique de la particule en convection et $G = Q.C$ est le débit massique de particules. En dérivant partiellement par rapport à l'altitude z et au temps (II.19), on a l'égalité :

$$A \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial C}{\partial t} = Q \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.73)$$

$$\Rightarrow (A \frac{\partial C}{\partial t} - Q \frac{\partial C}{\partial z}) + C (\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z}) = 0 \quad (2.74)$$

b. Loi de conservation du volume de particules

La convection des particules dans l'atmosphère obéit à la loi de conservation du volume occupé par celles-ci, ainsi en faisant une identification dans (2.73) et reportant le résultat dans (2.74), l'égalité $A = Q$ nous conduit à : $C = \text{constante}$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (2.75)$$

c. Loi de convection d'une particule dans l'atmosphère

Elle est traduite par la nullité de l'un et l'autre des termes de l'équation (2.74) et est la caractéristique de la variation de potentiel qui existe entre la source et le point de l'espace atteint par la vitesse de convection, qui est en générale donnée par la rose du vent.

$$A \frac{\partial C}{\partial t} - Q \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2.76)$$

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

Nous définissons cette grandeur comme étant la vitesse du vent dans la direction de convection(oz). Ainsi on parvient à l'implication de (2.75) que l'on appelle équation unidirectionnelle de convection :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (2.77)$$

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{ou encore} \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} C = 0 \quad (2.78)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U} \cdot \overrightarrow{\text{grad}C} = 0 \quad (2.79).$$

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} .

vii. Equation 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 (2.71) ; 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 (2.79). 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 (2.70) et (2.78) : C'est-à-dire par la relation de Navier Stokes :

$$\frac{\partial C(M, t)}{\partial t} + \vec{U}(M, t) \cdot \vec{\nabla} C(M, t) = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{K}(M, t) \cdot \vec{\nabla} C(M, t)) + S(M, t) = 0 \quad (2.80)$$

$$\text{soit :} \quad \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - \left(\mathbf{K}_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \mathbf{K}_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \mathbf{K}_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S = 0$$

(2.81)

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

a) 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 rends leur utilisation localisable.

Ce constat permet de construire un cahier des charges du modèle adapté à la problématique de la dispersion atmosphérique accidentelle sur un site industriel, dans un cadre

opérationnel. Ce modèle doit permettre un calcul rapide et fiable, de manière à se rapprocher du temps de calcul propre aux modèles gaussiens. Il ne doit pas être spécifique à un site en particulier mais doit au contraire pouvoir être adapté à n'importe quelle configuration industrielle géographiquement implanté dans la zone locale.

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 restant (Ox) et (Oy). La figure ci-après représente le cahier des charges du modèle développé dans ce travail :

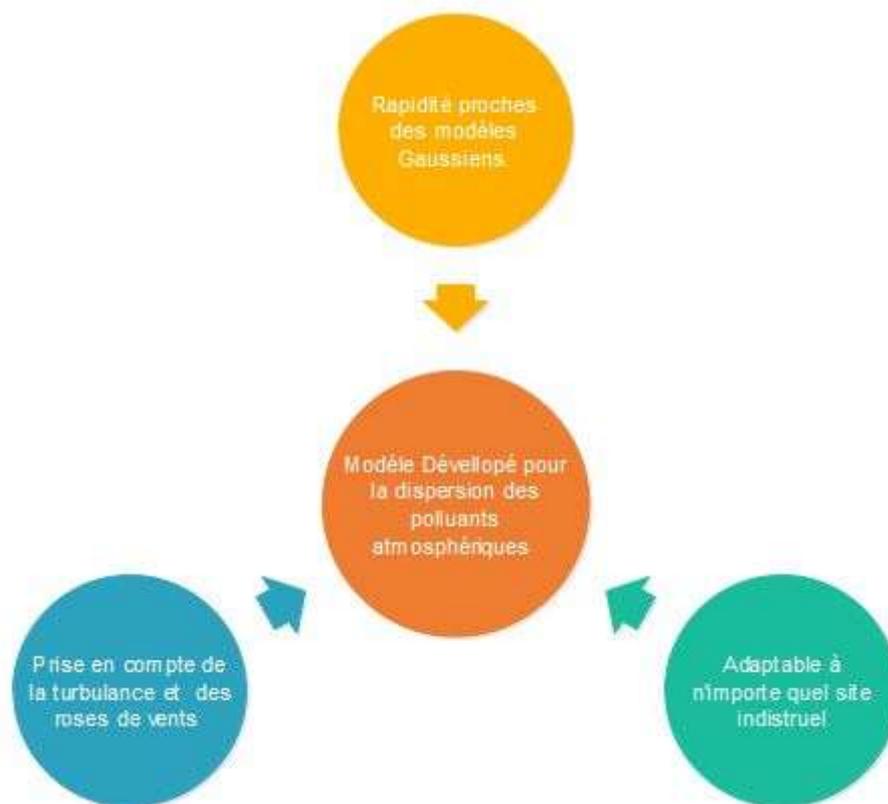


Figure 60: Cahier des charges du modèle

Plusieurs stratégies, démontrant une prise en compte graduelle des difficultés sont établies à partir des contraintes du cahier des charges et des opportunités fournies par les réseaux de neurones et les automates cellulaires. Chaque stratégie est implémentée de manière à respecter les étapes du développement d'un modèle et de son évaluation énoncée par (Blocken B. and Gualtieri C, 2012.):

b) But de la modélisation de la dispersion des polluants

Puisque nous ne pouvons pas mesurer la pollution dans chaque endroit où elle se produit, des modèles sont employés pour simuler la dispersion des polluants loin des sources d'émission et pour estimer les concentrations de polluants au niveau du sol. La simulation d'un tel phénomène correspond à l'illustration de l'évolution de ces particules (concentration) à

partir d'un modèle à priori choisi et faisant usage d'un langage de programmation computationnelle. La modélisation de la dispersion atmosphérique est couramment utilisée pour montrer la persistance de la pollution dans un environnement soumis à une étude.

c) Le principe du modèle gaussien

Ils sont basés 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 de 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 de mécanique 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 compliqué (reliefs, obstacles multiples) ou lorsqu'il est nécessaire de traiter des processus physico-chimiques complexes.

d) Avantage et inconvénients du modèle

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	
Température abondante pour les paramétrisations	La Qualité des résultats dépend des paramétrisations

Tableau 20: avantages et inconvénients du modèle gaussien

e) Formule de panache gaussien

Comme présenté dans le paragraphe 1.3.4.3 du premier chapitre, Pour une source émettrice, ponctuelle et continue de débit Q supposé constant, on suggère comme hypothèse que la concentration en un point ne varie pas au cours du temps ; en pratique, il s'agit donc de considérer des concentrations moyennées sur un temps suffisamment long (correspondant souvent au temps d'intégration d'un instrument de mesure), c'est à dire que le débit Q de polluant est constant dans le temps et notre terme source f peut s'écrire sous la forme suivante :

$$f(M, t) = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-H) \quad (2.82)$$

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 / m

- 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 :

$$\frac{\partial C(M, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.83)$$

- L'effet de la diffusion turbulence dans la direction x du vent soit négligeable soit négligeable en comparaison de l'advection (approximation de la panache étroit).

D'où :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} \gg K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.84)$$

Une situation météorologique constante et homogène est considéré, avec un vent moyen U . Donc le polluant est transporté à la vitesse u dans la direction de x et diffusé uniquement dans les plans perpendiculaires à l'axe x . L'axe du panache est horizontal à partir d'une certaine distance.

Pour simplifier, nous considérons pour le moment que la turbulence K est constante et homogène (diffusion isotropique), donc $K = K_x = K_y = K_z$. Si l'on fait l'hypothèse que le panache est représenté par une distribution gaussienne dans les deux directions y et z , centrée sur les coordonnées de la source. En tenant compte de toutes ces hypothèses simplificatrices, on a la représentation suivante :

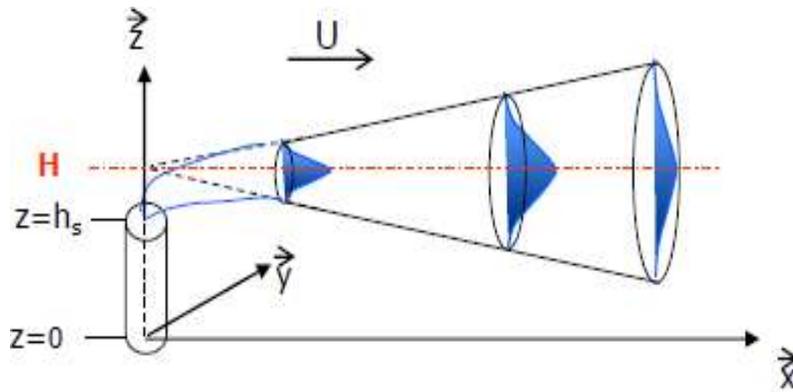


Figure 61: Distribution Gaussienne dans les directions Ox et Oy

On peut donc écrire les équations stationnaires dans ce cas de dispersion des polluants par :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-H) \quad (2.85)$$

f) Développement global du modèle de dispersion des polluants dans l'environnement

Les équations mathématiques du paragraphe 2.2.1.1 précédent, illustre dans une forme tridimensionnelle complète le modèle physique de dispersion d'un polluant. C'est-à-dire :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} - (K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}) + S = 0 \quad (2.86)$$

Posons suivant le modèle de panache Gaussien $f = S$

Nous travaillerons ici uniquement avec l'équation d'advection-diffusion dans l'atmosphère en se basant sur les conditions initiales.

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

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + Q_s \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.87)$$

Cette équation décrit la distribution des gaz et des particules émises 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) et l'axe (oy) , K le coefficient de diffusion turbulente et Q_s le débit de fumées émises à la source.

2.2.1.3 Résolution analytique du problème

a) Condition initiale

Nous savons que, 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 :

$$C(0, y, z) = \frac{Q_s}{u} \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.88)$$

b) Domaine d'étude du problème

Etant donné qu'il n'est pas exact de supposer qu'un panache s'étend dans tout l'espace, notre domaine d'étude sera posé comme suit (voir fig. 73) :

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

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

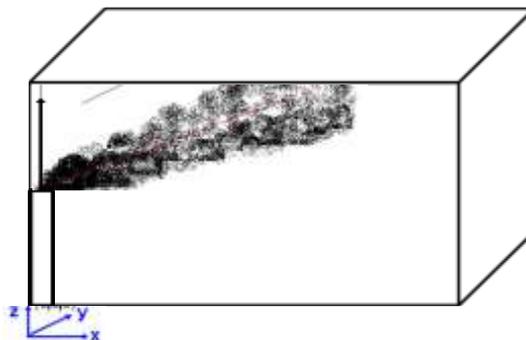


Figure 62: sélection du domaine d'étude

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 :

$$\begin{cases} C(L, y, z) = 0 \\ C(x, \pm L, z) = 0 \\ C(x, y, L) = 0 \end{cases} \quad (2.89)$$

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 :

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2.90)$$

d) Résolution analytique

Dans le cadre de la modélisation par une distribution gaussienne d'un panache issu d'une source ponctuelle de coordonnée (x_s, y_s, z_s) , 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, après en plaçant l'axe x dans la direction du vent, la concentration de polluant est donnée par la formule analytique suivante (Korsakissok I., 2009):

$$c(x, y, z) = \frac{Q_s}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.91)$$

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 (réflexion complète du panache au sol). Les écart-types σ_y et σ_z sont estimés par des formules empiriques reposant sur la stabilité de l'atmosphère telles les formules de Briggs, (The estimation of the dispersion of windborne material., 1961), (Doury, A, 1976).

Si on se place à présent dans le cas d'une seule source ponctuelle, de coordonnées $(0, y_s, H)$ ayant un débit massique constant Q_s , et sans processus de pertes, pour un milieu non isotrope, le principe de travail étant le même que précédemment, l'expression analytique de la concentration émise par cette source ponctuelle en tout point de panache en supposant des dépôts au sols (sans réflexion complète) est donnée par :

$$c(y, z) = \frac{Q_s}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2.92)$$

En réalité, il n'est pas exact de supposer qu'un panache s'étend dans tout l'espace. Il existe en effet des conditions aux limites au sol ($z = 0$), et éventuellement à la hauteur d'inversion ($z = z_i$). La hauteur d'inversion est la hauteur à laquelle la température de l'atmosphère augmente avec l'altitude au lieu de diminuer, empêchant ainsi l'air chargé de polluants de s'élever davantage.



Figure 63: Illustration de la couche d'inversion (Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes, 2006)

e) Discrétisation du problème

Pour y parvenir, nous allons faire usage à la méthode numérique classique dite des différences finies. Cette méthode utilise une grille de calcul régulière ce qui a pour avantages la facilité d'implémentation et la rapidité de 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 :

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + Q_s \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.93)$$

Cette équation sera discrétisée à partir du schéma de discrétisation centré en espace Δx Sera assimilé au temporel, Δy et Δz quant à eux seront pris comme pas en espace.

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

$$\begin{cases} x_k = k\Delta x; k = 1, \dots, N_x \\ y_i = i\Delta y; i = 1, \dots, N_y \\ z_j = j\Delta z; j = 1, \dots, N_z \end{cases} \quad (2.94)$$

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.

$$\frac{C_{i,j}^{k+1} - C_{i,j}^k}{\Delta x} = \frac{K_y}{u} \left(\frac{C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{K_z}{u} \left(\frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) + \frac{Q_s}{u} f_{i,j}^k \quad (2.95)$$

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

$$C_{i,j}^{k+1} = \frac{\Delta x k_y}{u(\Delta y)^2} (C_{i+1,j}^k + C_{i-1,j}^k) + \frac{\Delta x k_z}{u(\Delta z)^2} (C_{i,j+1}^k + C_{i,j-1}^k) + 1 - \frac{2\Delta x}{u} \left(\frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) C_{i,j}^k + \frac{\Delta x Q_s}{u} \quad (2.96)$$

Avec :

$$f_{i,j}^k = \delta(x) \delta(y - y_s) \delta(z - H) \quad (2.97)$$

Posons

$$R = \frac{\Delta x}{u} \left(\frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) \quad (2.98)$$

$$R_{xy} = \frac{\Delta x k_y}{u \Delta y^2} \quad (2.99)$$

$$R_{xz} = \frac{\Delta x k_z}{u \Delta z^2}$$

(2.100)

D'où :

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

(2.101)

Condition de stabilité

$$\frac{C_{i,j}^{k+1} + C_{i,j}^k}{\Delta x} = \frac{k_y}{u} \left(\frac{C_{i+1,j}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i-1,j}^k}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{k_z}{u} \left(\frac{C_{i,j+1}^k - 2C_{i,j}^k + C_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) \quad (2.102)$$

Supposons que la valeur de $C_{i,j}^k$ subit une perturbation $\xi_{i,j}^k$. La nouvelle solution numérique devient alors $C_{i,j}^{k+1} = C_{i,j}^k + \xi_{i,j}^k$, en écrivant que $C_{i,j}^{k+1}$ vérifie le schéma discret, on obtient :

$$\frac{\xi_{i,j}^{k+1} + \xi_{i,j}^k}{\Delta x} = \frac{k_y}{u} \left(\frac{\xi_{i+1,j}^k - 2\xi_{i,j}^k + \xi_{i-1,j}^k}{(\Delta y)^2} \right) + \frac{k_z}{u} \left(\frac{\xi_{i,j+1}^k - 2\xi_{i,j}^k + \xi_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right) \quad (2.103)$$

$$\text{Supposons que : } \xi_{i,j}^k = \sin(ip\Delta y) \sin(jq\Delta z) e^{-rk\Delta x} \quad (2.104)$$

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

$$\xi_{i-1,j}^k = \sin((i-1)p\Delta y) \sin(jq\Delta z) e^{-rk\Delta x} \quad (2.105)$$

En remplaçant ces trois expressions dans (2.103), on obtient :

$$\frac{e^{-rk\Delta x} - 1}{\Delta x} = \frac{-4k_y}{u\Delta y^2} \sin^2\left(\frac{p\Delta y}{2}\right) - \frac{4k_z}{u\Delta z^2} \sin^2\left(\frac{q\Delta z}{2}\right) \quad (2.106)$$

$$\left| e^{-rk\Delta x} \right| < 1 \Rightarrow \left| 1 - \frac{-4\Delta x}{u} \left(\frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) \right| < 1 \quad (2.106)$$

$$\text{D'où : } \frac{\Delta x}{u} \left(\frac{k_y}{\Delta y^2} + \frac{k_z}{\Delta z^2} \right) \in \left] 0; \frac{1}{2} \right[\quad (2.107)$$

Donc le schéma de discrétisation (2.101) ne peut être utilisé que si et seulement s'il remplit la condition de stabilité (2.107)

Discrétisation des conditions initiale et aux limites

- Condition initiale

$$C(0, y, z) = \frac{Q_s}{u} \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2.108)$$

$$C_{i,j}^1 = \frac{Q_s}{u} \delta(i) \delta(j) \text{ Pour } k=1 \text{ et pour tout } i = \dots N_x \text{ et } j = \dots N_z \quad (2.109)$$

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

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

L'équation à discrétiser est la suivante :

$$\left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=0,L} = 0 \quad (2.110)$$

$$\left. \frac{C_{i+1,j}^k - C_{i-1,j}^k}{2\Delta y} \right|_{y=0,L} = 0 \quad (2.111)$$

$y = 0$ Correspond à $i = 1$ et $y = L$ à N_y

$$\frac{C_{2,j}^k - C_{0,j}^k}{2\Delta y} = 0 \quad \text{D'où} \quad C_{2,j}^k = C_{0,j}^k \quad (2.112)$$

Déterminons l'approximation $C_{1,j}^{k+1}$ et de $C_{N_y}^{k+1}$ en nous servant de l'équation (2.101) et

(2.112)

$$C_{1,j}^{k+1} = [1 - 2R] C_{1,j}^k + 2R_{xy} C_{2,j}^k + R_{xz} [C_{1,j+1}^k + C_{1,j-1}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(1) \delta(j) \quad (2.113)$$

En se servant de l'équation (2.112) et pour la valeur limite L correspondante à N_y on a :

$$C_{N_y+1}^{k+1} = C_{N_y-1}^k \quad (2.134)$$

$$C_{N_y+1}^{k+1} = [1 - 2R] C_{N_y,j}^k + 2R_{xy} C_{N_y-1,j}^k + R_{xz} [C_{N_y,j+1}^k + C_{N_y,j-1}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(N_y) \delta(j) \quad (2.135)$$

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

$$\text{La condition sur le flux en } z \text{ est donnée par} \quad : \quad \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0,L} = 0 \quad (2.136)$$

$$\text{Sa forme discrétisée est la suivante :} \quad \left. \frac{C_{i,j+1}^k - C_{i,j-1}^k}{2\Delta z} \right|_{z=0,L} = 0 \quad (2.137)$$

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

$$C_{i,1}^{k+1} = C_{i,N_z}^{k+1} \quad (2.138)$$

$$C_{i,1}^{k+1} = [1-2R]C_{i,1}^k + 2R_{xy}C_{i,2}^k + R_{xz} [C_{i+1,1}^k + C_{i-1,1}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(i) \delta(1) \quad (2.139)$$

$$C_{i,N_z}^{k+1} = [1-2R]C_{i,N_z}^k + 2R_{xy}C_{i,N_z-1}^k + R_{xz} [C_{i+1,N_z}^k + C_{i-1,N_z}^k] + \frac{Q_s}{u} \delta(k) \delta(i) \delta(N_z) \quad (2.140)$$

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.

f) Organigramme du modèle de dispersion

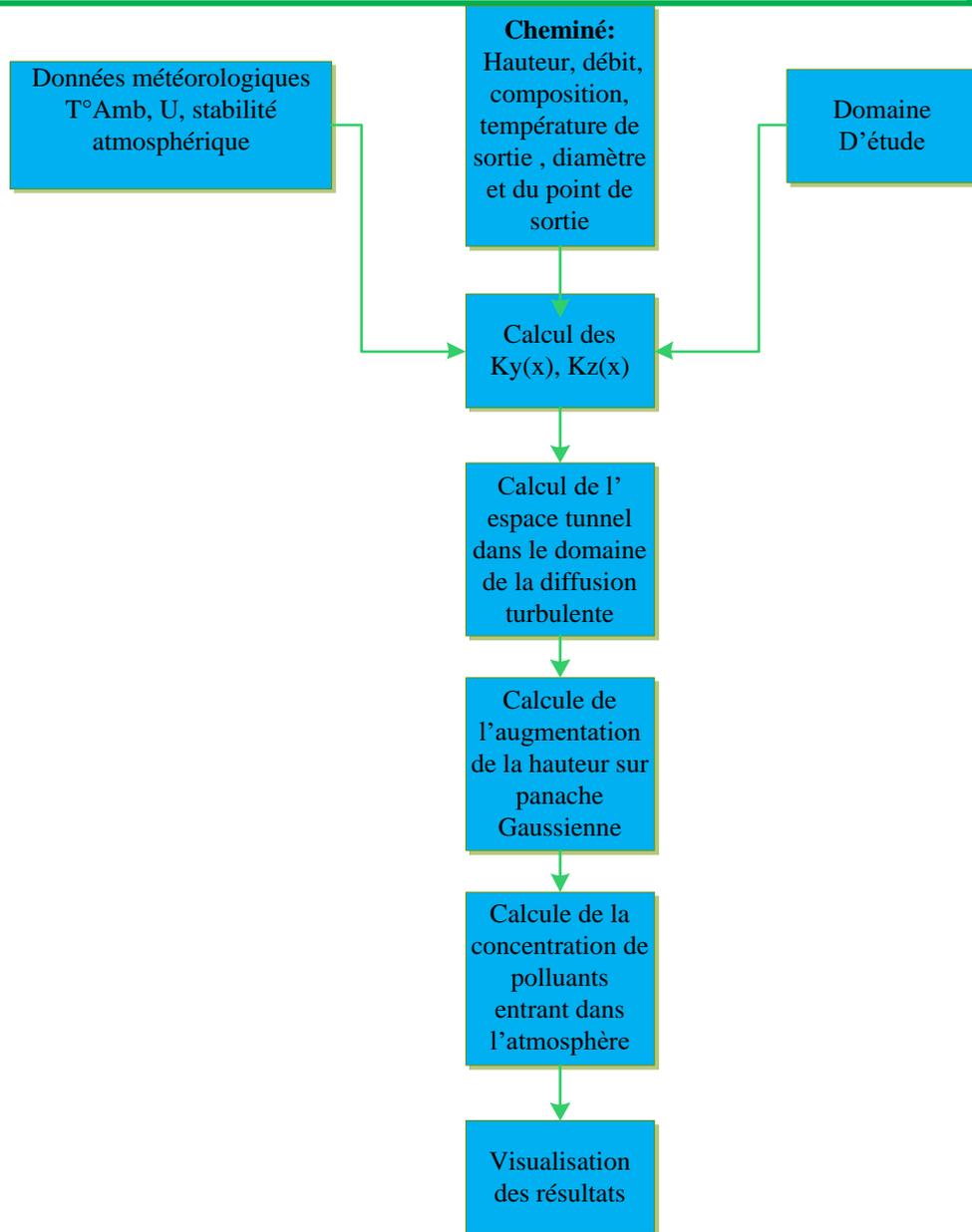


Figure 64: Organigramme du programme lié aux polluants (LESEE,2019)

g) Approximation de la concentration moyenne des polluants

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

$$\langle C \rangle_z = \frac{1}{N_z} \int_0^z C(x, y, z) dz \quad (2.141)$$

Et

$$\langle C \rangle_y = \frac{1}{N_y} \int_0^y C(x, y, z) dy \quad (2.142)$$

h) Approximation des coefficients de dispersion k_y et k_z

Cette approximation se fera à l'aide du tableau de Briggs suivant :

Tableau 21: Valeurs de Briggs

Classe de Pasquill	δ_y (m)	δ_z (m)
A-B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.001x)^{1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

En considérant une vitesse de vent moyenné de $u = 3 \text{ m/s}$ i.e. Correspondante à la classe de Pasquill de type D qui traduit une turbulence faible (voir tableau), les expressions de δ_y et de δ_z correspondantes sont (nous ferons pareil pour les différentes centrales pour leurs zones locales) :

$$\delta_y = 0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$$

$$\delta_z = 0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$$

Où x est la distance à la source dans la direction du vent correspondant à 400 m par supposition.

Relation entre les écarts types et le coefficient de diffusion K (Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident : A local-scale simulation and sensitivity study, 2013)

$$\delta_{xz}^2(x) = \frac{2xK_{y,z}}{u} \quad (2.143)$$

$$K_{y,z} = \frac{u\delta_{xz}^2}{2x} \quad (2.144)$$

Avec $u = 3 \text{ ms}^{-1}$,

On obtient alors :

$$K_y = 13.24 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$K_z = 10.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

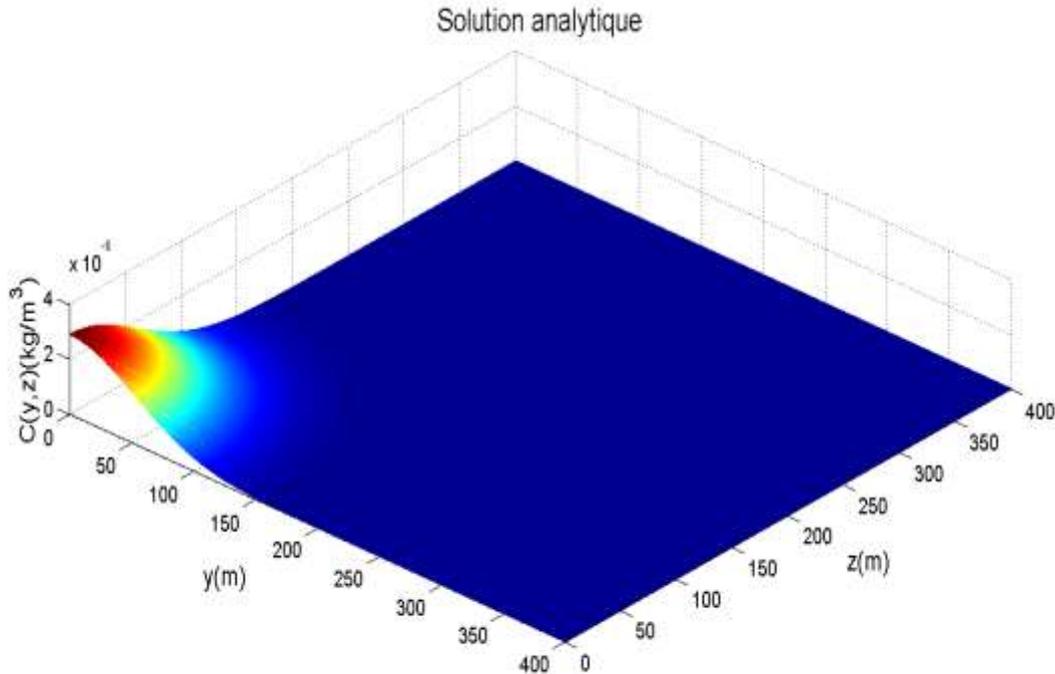


Figure 65: Représentation de la solution analytique

2.2.2 Modélisation des cartes de nuisances sonores

2.2.2.1 Méthode d'élaboration d'une carte de bruit stratégique

Ce que l'on appelle la modélisation acoustique signifie un ensemble de calculs assistés par programmation informatique, qui est produit dans des données principalement numériques et par la suite le niveau de bruit perçu en tous les points géographiques du modèle appelé immission. La cartographie du bruit, quant à elle, est une visualisation des résultats de la modélisation. La précision de la carte dépend de la disponibilité et de la précision des données introduites dans le modèle. Les différentes modélisations utilisées pour l'élaboration de la carte sonore suivent les recommandations de la Directive Européenne 2002/49/CE, relative à l'évaluation et à la gestion du bruit ambiant (Philippe VIGNES, JANVIER 2016), (A study on the determination of the natural park's sustainable tourism potential, 2018).

La cartographie du bruit dans les centrale thermique a été rendue possible en utilisant un programme informatique sur des calculs acoustiques tels que : MATLAB R2013 (VS.8.1.0.604) pour le niveau de puissance et de pression acoustique des machines présentes sur le site et le programme informatique SURFER (VS.12.0.626) pour le maillage et le contrôle géographique du bruit autour des machines et des zones d'exploitation tel qu'enregistré par le matériel acoustique (Digital Sound Indicateur de niveau « sonomètre AR814 »).

La cartographie est réalisée sur la base d'un réseau maillé de 10 m par 10 m d'intervalle pour la zone d'exploitation. Cela indique le niveau de bruit mesuré au point de réception autrement appelé immission et à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol. En d'autres termes, le

programme informatique de modélisation calcule pour chaque grille (surface) le niveau de bruit reçu en son centre. L'espacement de la grille peut être adapté en fonction du milieu de propagation, comme le relief des montagnes, des plaines, etc. Dans de telles situations de relief variable, la diffusion du son n'est pas constante et une grille plus étroite est nécessaire.

2.2.2.2 Hypothèse de données et de modélisation

La cartographie de la propagation du bruit est réalisée à partir des informations géographiques de la banque de données relatives à la topographie, au climat et à la zone d'implantation de la centrale thermique.

Il est à noter que les différents types de bruit émis dans un support récepteur se présentent sous la forme d'une onde sonore qui se propage de point en point. En revanche, dans l'intervalle de fréquence sonore, l'oreille humaine ne perçoit pas de son à basse fréquence inférieure à 20 Hz (infrasons) et de son aigu de haute fréquence supérieure à 20 kHz (ultrasons).

D'autres paramètres responsables de l'atténuation du bruit pendant la propagation tels que les effets atmosphériques, de sols, d'écran, de divergence, de végétation et bien d'autres ont été pris en considération.

Les niveaux de pression acoustique équivalents ont été ramenés à 24 heures à l'exception du niveau de puissance acoustique, qui a été calculé en fonction du taux de fonctionnement moyen de 5 heures des centrales thermique.

2.2.2.3 Protocole

Avant d'entreprendre la collecte des données, les conditions initiales liées au site et à l'appareil de collecte des données ont été fixées. Les valeurs de vitesse du vent dans la zone d'étude étaient celles enregistrées dans la base de données de la station METAR / SYNOP, qui étaient considérées par défaut à 6 m/s à 18h00 et à 9 m/s à 23h00 pour la longitude 11,52 ° E, latitude 3,83 ° N et à une altitude de 751 m. Pour ce modèle, la marge d'erreur est évaluée à ± 2 dB et le sonomètre est calibré à environ 0,5 dB avec une erreur maximale de ± 1 dB.

Les sites industriels sont considérés comme source fixe exploitée pendant 6 heures. Cette période de fonctionnement des centrales thermique est avantageuse pour notre étude car pendant les heures nocturnes, les niveaux de bruit de fond (interférence créer par d'autres sources) qui pourraient affecter les données sont les plus faibles possible.

En répétant le processus ci-dessus en utilisant ces différentes méthodes, nous obtenons l'ensemble de données de distribution du bruit spatial et temporel des points géoréférencés observés dans la zone d'étude. Toutes ces différentes méthodes combinées à travers un organigramme logiciel bien stratifié (Fig.77) conduisent à la réalisation d'un modèle qui est utilisé pour effectuer les calculs analytiques des niveaux de puissance et de pression acoustique, en suivant les points géolocalisés sur la carte du bruit.

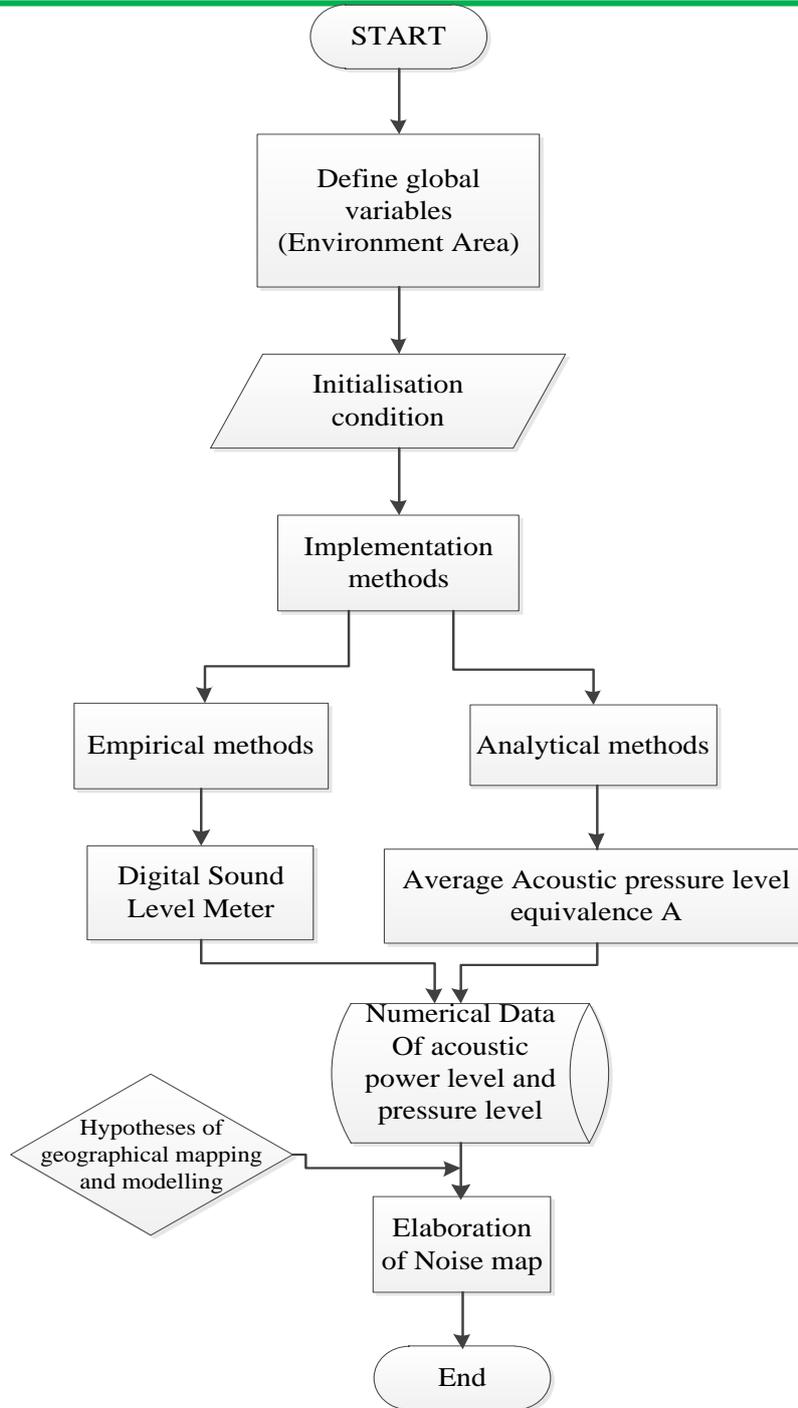


Figure 66: Software design flowchart for geographical mapping and modelling of noise pollution (LESEE,2019)

2.3 Méthodologies d'optimisation des sites industriels : cas des algorithmes génétiques

2.3.1 Performance acoustique au niveau système

Plusieurs types de performance acoustique peuvent être évalués ; ils sont rappelés brièvement dans cette section.

2.3.2.1 Indice d'affaiblissement acoustique R et indice d'efficacité aux bruits aériens ΔR

Le comportement acoustique d'un système (paroi, plancher, etc.) se caractérise d'un point de vue de l'isolation acoustique par une mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique R qui est évalué en laboratoire selon la norme NF EN ISO 10140-2 (Thibaut BLINET and al -a, 2018)

Le poste d'essai utilisé est composé par un couple de salles d'émission et de réception, conçues sur le principe de la « boîte dans la boîte », entre lesquelles est mis en œuvre le système à caractériser, conformément à la norme NF EN ISO 10140-5 (Thibaut BLINET and al -b, 2018).

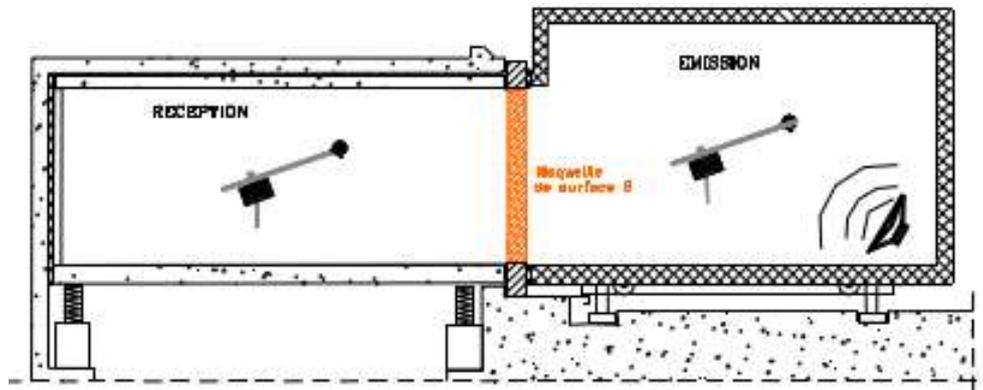


Figure 67 : Principe des postes d'essais utilisés pour les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'un système

L'indice d'affaiblissement acoustique R, mesuré par tiers d'octave entre 50 et 5000 Hz, est donné par la relation suivante :

$$R = L_E - L_R + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (2.145)$$

Avec L_E , le niveau sonore dans le local d'émission en dB, L_R , le niveau sonore dans le local de réception, corrigé du bruit de fond en dB, S, la surface de la maquette à tester en m^2 , A, l'aire équivalente d'absorption dans le local de réception en m^2 tel que $A = (0,16 \times V)T$, où V est le volume du local de réception en m^3 et T est la durée de réverbération du même local en s. Plus R est grand, plus l'élément testé est performant.

- ✓ l'isolement vis-à-vis de bruits aériens intérieurs : $R_A = R_W + C$ en dB
- ✓ l'isolement vis-à-vis du bruit d'infrastructure de transport terrestre : $R_{A, tr} = R_W + C_{tr}$ en dB

L'amélioration de l'isolation au bruit aérien ΔR en dB pour chaque tiers d'octave se calcule alors comme:

$$\Delta R = R - R_0$$

avec R l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi support lourd avec l'élément rajouté (doublage, plafond, etc..) et R_0 , l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi support lourd sans l'élément rajouté. Les indices globaux associés sont décrits dans la norme NF EN ISO 10140-1 (Thibaut BLINET and al, 2016)

2.3.2.2 Indice d'efficacité aux bruits de choc ΔL

La réduction de la transmission des bruits de choc par un système sur un plancher lourd normalisé excité par une machine à choc normalisée est déterminée par la norme NF EN ISO 10140-3 (Thibaut BLINET and al -c, 2018)

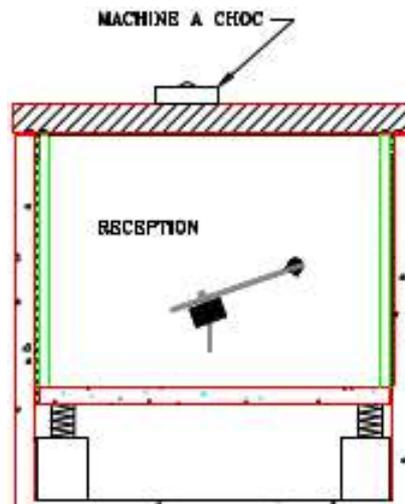


Figure 68 : Principe d'un poste d'essai utilisé pour les mesures du niveau de bruit de chocs

$$L_n$$

Les mesures suivantes sont réalisées par bande de tiers d'octave entre 50 et 5000 Hz :

- Niveau de bruit de choc L_i dans la salle de réception,
- Niveau de bruit de fond,
- Durée de réverbération du local de réception T .

Le niveau de bruit de choc L_n , en dB, est alors obtenu, pour chaque tiers d'octave comme :

$$L_n = L_i + 10 \log(A / A_0) \quad (2.146)$$

Avec L_i , le niveau de bruit de choc mesuré dans la salle de réception et éventuellement corrigé du bruit de fond, A_0 , l'aire de référence égale à 10 m² en laboratoire et A , l'aire équivalente d'absorption dans le local de réception en m² calculé comme suit :

$$A = (0,16 \times V) / T \quad (2.147)$$

où V est le volume du local de réception en m³ et T est la durée de réverbération du même local en s. L'amélioration de l'isolation au bruit de choc ΔL en dB pour chaque tiers d'octave se calcule alors comme :

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad (2.148)$$

avec L_{n0} , le niveau de bruit de choc normalisé du plancher lourd normalisé sans le revêtement de sol et L_n , le niveau de bruit de choc normalisé du plancher lourd normalisé avec le

revêtement de sol. La norme NF EN ISO 717-2 (Thibaut BLINET and al-b, 2018) explique la méthode de calcul permettant d'obtenir des indices globaux de performance $L_{n,w}(C_1;C_{I,50-2500})$ ainsi que DL_w , DL_{lin} , $DL_{lin,50-2500}$.

2.3.2.3 Coefficient d'absorption acoustique α

La norme NF EN ISO 354 est la méthode de mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante de matériaux utilisés pour le traitement des murs, des sols, des plafonds ou d'objets distincts. Un schéma de principe de la salle réverbérante utilisée est montré à la Figure ci dessous. La méthode du bruit interrompu est adoptée pour déterminer les courbes de décroissance du bruit dans une salle réverbérante ($\geq 250 \text{ m}^3$), équipée de diffuseurs.

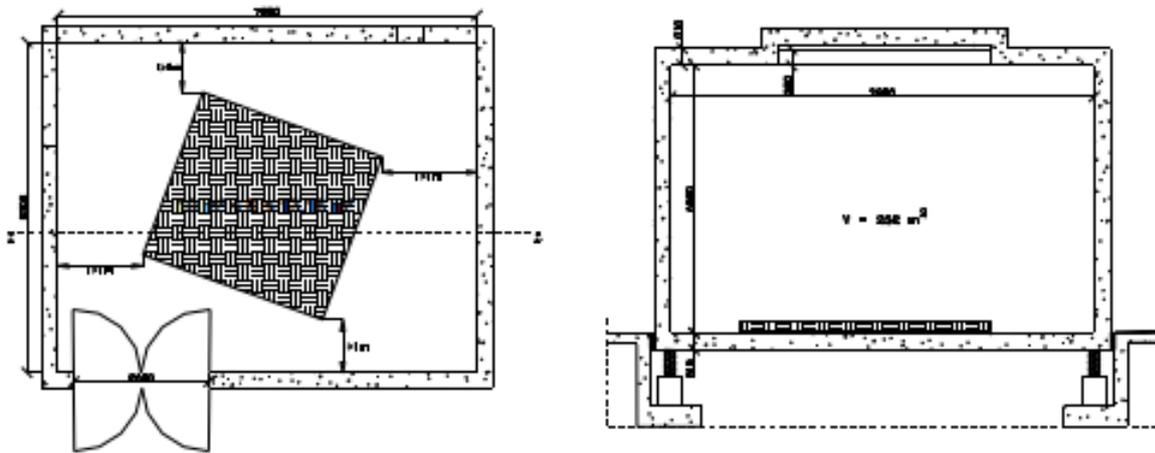


Figure 69 : Schéma d'une salle réverbérante pour les essais d'absorption acoustique

Les coefficients d'absorption acoustique αS sont mesurés par tiers d'octave entre 50 et 5000Hz de la manière suivante :

- de la durée de réverbération de la salle vide T_1 et de la température t_1 au moment de la mesure,
- Mesure de la durée de réverbération de la salle avec l'échantillon T_2 et de la température t_2 au moment de la mesure.

Une aire d'absorption équivalente A_T en m^2 est alors calculer pour chaque tiers d'octave comme:

$$A_T = 55.3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V (m_2 - m_1) \quad (2.149)$$

avec V , le volume de la salle en m^3 , c_i , la célérité du son dans l'air en m/s ($c_i = 331 + 0,6 t_i$) avec t_i la température en degré Celsius et $15^\circ\text{C} < t < 30^\circ\text{C}$), m_i , le coefficient d'atténuation de puissance en m^{-1} calculé selon la norme ISO 9613-1 (Thibaut BLINET and al, 1993) tel que :

$$m_i = \frac{\alpha}{10 \log(e)} \quad (2.150)$$

Le coefficient d'absorption (adimensionnel) dans le cas de produits plans pour chaque tiers d'octave est alors déterminer comme : $\alpha_s = A_T / S$

avec S , la surface de l'échantillon en m^2 .

Afin d'obtenir l'indice unique α_w , selon la norme NF EN ISO 11654 (Thibaut BLINET and al, 1997), les valeurs de αS sont prises en compte par octave entre 250 et 4000 Hz avec une précision au 0,05. Une courbe de référence est déplacée verticalement par saut de 0,05 jusqu'à ce que la somme des écarts défavorables soit la plus grande tout en restant inférieure ou égale à 0,1. α_w est la valeur donnée alors par la courbe de référence à 500 Hz. Il n'y a pas d'indice global pour l'aire d'absorption équivalente, au sens de la norme NF EN ISO 11654, celle-ci est donnée en tiers d'octave. Cependant la réglementation française est basée sur une valeur globale qui est calculée comme suit : $A = S \times \alpha_w$

2.3.2 Méthodologie des Algorithmes génétiques

Comme présenté dans le chapitre 1 au paragraphe 1.4.3.3 la méthode préconisée pour les optimisations énergétique reste les méthodes stochastiques les plus appropriés. Parmi elles, celles qui parviens simultanément à mieux croisée les multiples paramètres liés au problème à résoudre est celui des Algorithmes Génétiques.

2.3.2.1 Historique et définition

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection etc... C'est en 1860 que Charles Darwin publie son livre intitulé « L'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature ». En 1866, Mendel publie un article retraçant dix années d'expériences d'hybridation chez les végétaux « recombinaison des gènes » et l'adresse aux sociétés scientifiques dans le monde. Les réactions sont mitigées, voire inexistantes. C'est à partir du 20ème siècle que la mutation génétique a été mise en évidence. John Holland étudie les systèmes évolutifs et, en 1975, il introduit le premier Modèle formel des algorithmes génétiques (the canonical genetic algorithm AGC) dans son livre « Adaptation in Natural and Artificial Systems ». (J. H. Holland, 1975).

Il expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échangeant le matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique).

Reshenberg et Schwefel ont mis au point trois méthodes assez similaires : les stratégies d'évolution (Evolution Strategy In Zarada Computational Intelligence, 1994), la programmation évolutionnistes (Evolutionary Programming in Perspective: The top-Dawn View Computational Intelligence, 1994) et la programmation génétique (Genetic

Programming, 1992). L'évolution différentielle est apparue plus récemment (Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by Differential Evolution, 1996.)

2.3.2.2 Structure de l'AG

L'approche principale utilisée dans le processus évolutif est reconnue en tant qu'algorithme génétique. Les algorithmes génétiques sont inventés par Goldberg qui a été influencé par la théorie de Darwin concernant l'évolution. La théorie de l'évolution de Darwin déclare que l'existence de la créature est influencée par la prescription l'espèce la plus forte qui survit. Il a également révélé que la poursuite de la vie de l'être vivant peut être retenue par le processus de reproduction, de croisement et de mutation. L'algorithme génétique travaille à partir d'une population composée de N individus sur qui des opérations mathématiques élémentaires de croisement et de mutation sont appliquées. Sa structure est donc donnée par le schéma ci-dessous :

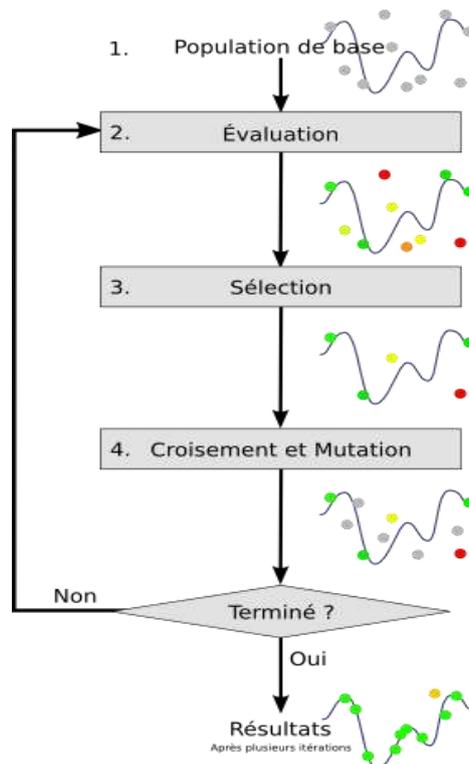


Figure 70: Schéma de l'algorithme génétique

2.3.2.3 Paramètres basic et opérateurs génétiques d'algorithme

Algorithmes Stochastiques itératifs qui opèrent sur des individus codés, à partir d'une population initiale. Cette population évolue de la génération k à la génération $k+1$ à l'aide de trois opérateurs :

- Opérateur de Sélection

- Opérateur de Croisement
- Opérateur de Mutation

Chaque individu est reproduit en fonction de son adaptation au problème (fitness). On code les individus de manière à les faire “évoluer” grâce aux opérateurs. On effectue :

- Des croisements sur les individus destinés à être reproduits
- Des mutations aléatoires

Finalement la génération de nouveaux individus. Le corps principal d’une itération d’un algorithme génétique est le suivant :

- Évaluer la qualité (fitness) des individus et leurs chances de survie
- Sélectionner les individus pour la reproduction
- Effectuer la reproduction
- Remplacer l’ancienne population par la nouvelle (Fallet-Kahn Francois)

2.3.2.4 Éléments d’un algorithme génétique

Individu : Les individus correspondent aux « solutions » du problème à optimiser. Ces solutions doivent être « codées » pour que le traitement puisse être effectué par l’algorithme génétique. Cette représentation codée d’une solution est appelée chromosome, et est composée de gènes. Chaque gène peut représenter une variable, un élément de la solution, ou encore une partie plus abstraite.

Population : C’est l’ensemble des individus, ou encore l’ensemble des chromosomes d’une même génération. Habituellement, la taille de la population reste constante tout au long de l’algorithme génétique.

Qualité ou fitness d’un individu : Le calcul de la qualité d’un individu est essentiel aux algorithmes génétiques. Cette fonction donne, en valeur numérique (habituellement réelle), la qualité d’un individu. C’est selon cette valeur numérique que sont calculées les chances de sélection de cet individu.

Sélection : Selon la qualité des individus, chacun se voit attribuer un pourcentage de chances d’être choisi pour la reproduction, qui correspond à l’importance relative de la qualité de l’individu par rapport à la qualité totale de la population.

Sélection : Selon la qualité des individus, chacun se voit attribuer un pourcentage de chances d’être choisi pour la reproduction, qui correspond à l’importance relative de la qualité de l’individu par rapport à la qualité totale de la population.

Reproduction : La reproduction s’effectue généralement en croisant deux individus, ce qui produit deux nouveaux individus à placer dans la nouvelle population. On peut résumer le processus par le graphique suivant :

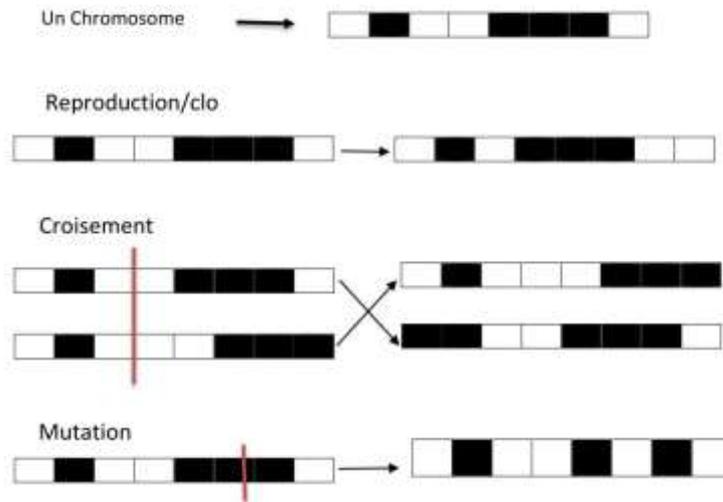


Figure 71: Principe de génération

2.3.2 Performance acoustique au niveau système

Plusieurs types de performance acoustique peuvent être évalués ; ils sont rappelés brièvement dans cette section.

2.3.2.1 Indice d'affaiblissement acoustique R et indice d'efficacité aux bruits aériens ΔR

Le comportement acoustique d'un système (paroi, plancher, etc.) se caractérise d'un point de vue de l'isolation acoustique par une mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique R qui est évalué en laboratoire selon la norme NF EN ISO 10140-2 (Thibaut BLINET and al -a, 2018)

Le poste d'essai utilisé est composé par un couple de salles d'émission et de réception, conçues sur le principe de la « boîte dans la boîte », entre lesquelles est mis en œuvre le système à caractériser, conformément à la norme NF EN ISO 10140-5 (Thibaut BLINET and al -b, 2018).

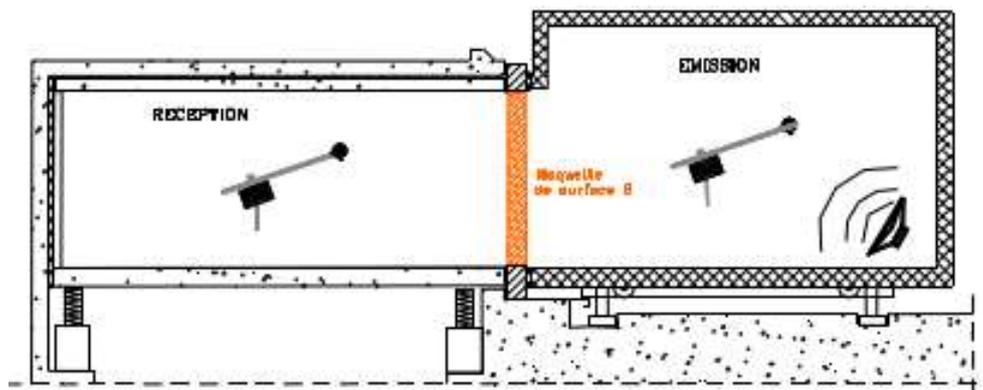


Figure 72 : Principe des postes d'essais utilisés pour les mesures de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'un système

L'indice d'affaiblissement acoustique R, mesuré par tiers d'octave entre 50 et 5000 Hz, est donné par la relation suivante :

$$R = L_E - L_R + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (2.145)$$

Avec L_E , le niveau sonore dans le local d'émission en dB, L_R , le niveau sonore dans le local de réception, corrigé du bruit de fond en dB, S , la surface de la maquette à tester en m^2 , A , l'aire équivalente d'absorption dans le local de réception en m^2 tel que $A = (0,16 \times V)T$, où V est le volume du local de réception en m^3 et T est la durée de réverbération du même local en s. Plus R est grand, plus l'élément testé est performant.

✓ l'isolement vis-à-vis de bruits aériens intérieurs : $R_A = R_W + C$ en dB

✓ l'isolement vis-à-vis du bruit d'infrastructure de transport terrestre : $R_{A, tr} = R_W + C_{tr}$ en dB

L'amélioration de l'isolation au bruit aérien ΔR en dB pour chaque tiers d'octave se calcule alors comme:

$$\Delta R = R - R_0$$

avec R l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi support lourd avec l'élément rajouté (doublage, plafond, etc..) et R_0 , l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi support lourd sans l'élément rajouté. Les indices globaux associés sont décrits dans la norme NF EN ISO 10140-1 (Thibaut BLINET and al, 2016)

2.3.2.2 Indice d'efficacité aux bruits de choc ΔL

La réduction de la transmission des bruits de choc par un système sur un plancher lourd normalisé excité par une machine à choc normalisée est déterminée par la norme NF EN ISO 10140-3 (Thibaut BLINET and al -c, 2018)

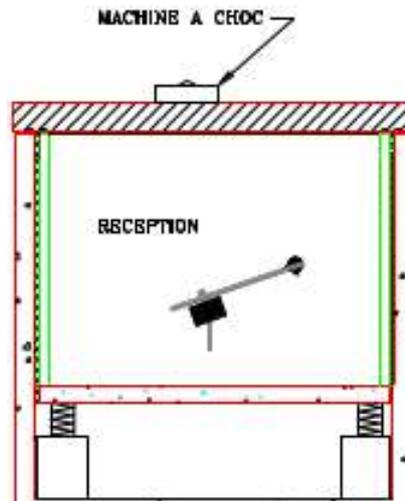


Figure 73 : Principe d'un poste d'essai utilisé pour les mesures du niveau de bruit de chocs

L_n

Les mesures suivantes sont réalisées par bande de tiers d'octave entre 50 et 5000 Hz :

- Niveau de bruit de choc L_i dans la salle de réception,
- Niveau de bruit de fond,
- Durée de réverbération du local de réception T .

Le niveau de bruit de choc L_n , en dB, est alors obtenu, pour chaque tiers d'octave comme :

$$L_n = L_i + 10 \log(A / A_0) \quad (2.146)$$

Avec L_i , le niveau de bruit de choc mesuré dans la salle de réception et éventuellement corrigé du bruit de fond, A_0 , l'aire de référence égale à $10 m^2$ en laboratoire et A , l'aire équivalente d'absorption dans le local de réception en m^2 calculé comme suit :

$$A = (0,16 \times V) / T \quad (2.147)$$

où V est le volume du local de réception en m^3 et T est la durée de réverbération du même local en s. L'amélioration de l'isolation au bruit de choc ΔL en dB pour chaque tiers d'octave se calcule alors comme :

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \quad (2.148)$$

avec L_{n0} , le niveau de bruit de choc normalisé du plancher lourd normalisé sans le revêtement de sol et L_n , le niveau de bruit de choc normalisé du plancher lourd normalisé avec le revêtement de sol. La norme NF EN ISO 717-2 (Thibaut BLINET and al-b, 2018) explique la méthode de calcul permettant d'obtenir des indices globaux de performance $L_{n,w}(C_1;C_{I,50-2500})$ ainsi que DL_w , DL_{lin} , $DL_{lin,50-2500}$.

2.3.2.3 Coefficient d'absorption acoustique α

La norme NF EN ISO 354 est la méthode de mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante de matériaux utilisés pour le traitement des murs, des sols, des plafonds ou d'objets distincts. Un schéma de principe de la salle réverbérante utilisée est montré à la Figure ci dessous. La méthode du bruit interrompu est adoptée pour déterminer les courbes de décroissance du bruit dans une salle réverbérante ($\geq 250 m^3$), équipée de diffuseurs.

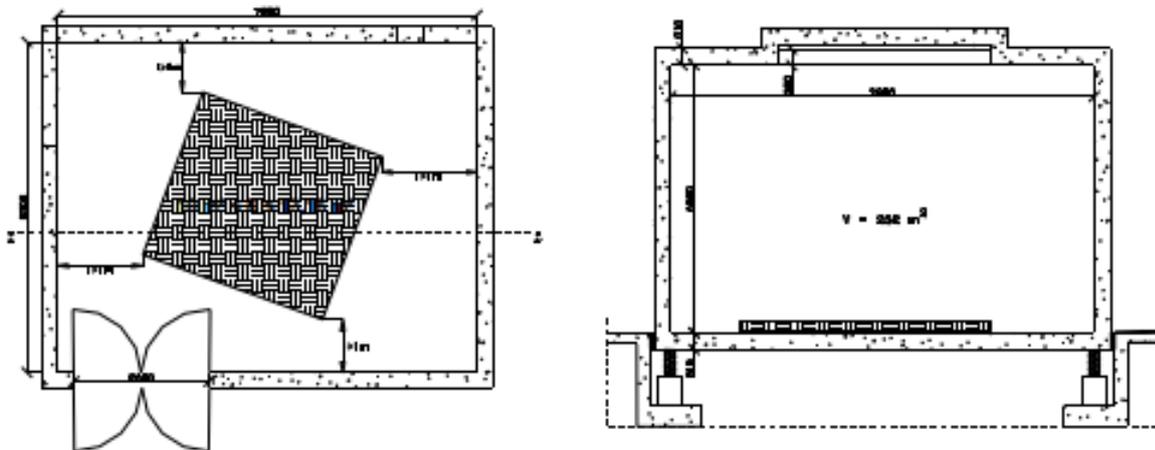


Figure 74 : Schéma d'une salle réverbérante pour les essais d'absorption acoustique

Les coefficients d'absorption acoustique αS sont mesurés par tiers d'octave entre 50 et 5000Hz de la manière suivante :

- de la durée de réverbération de la salle vide T_1 et de la température t_1 au moment de la mesure,
- Mesure de la durée de réverbération de la salle avec l'échantillon T_2 et de la température t_2 au moment de la mesure.

Une aire d'absorption équivalente A_T en m^2 est alors calculer pour chaque tiers d'octave comme:

$$A_T = 55.3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V (m_2 - m_1) \quad (2.149)$$

avec V , le volume de la salle en m^3 , c_i , la célérité du son dans l'air en m/s ($c_i = 331 + 0,6 t_i$) avec t_i la température en degré Celsius et $15^\circ C < t < 30^\circ C$, m_i , le coefficient d'atténuation de puissance en m^{-1} calculé selon la norme ISO 9613-1 (Thibaut BLINET and al, 1993) tel que :

$$m_i = \frac{\alpha}{10 \log(e)} \quad (2.150)$$

Le coefficient d'absorption (adimensionnel) dans le cas de produits plans pour chaque tiers d'octave est alors déterminé comme : $\alpha_s = A_T / S$

avec S , la surface de l'échantillon en m^2 .

Afin d'obtenir l'indice unique α_w , selon la norme NF EN ISO 11654 (Thibaut BLINET and al, 1997), les valeurs de αS sont prises en compte par octave entre 250 et 4000 Hz avec une précision au 0,05. Une courbe de référence est déplacée verticalement par saut de 0,05 jusqu'à ce que la somme des écarts défavorables soit la plus grande tout en restant inférieure ou égale à 0,1. α_w est la valeur donnée alors par la courbe de référence à 500 Hz. Il n'y a pas d'indice global pour l'aire d'absorption équivalente, au sens de la norme NF EN ISO 11654, celle-ci est donnée en tiers d'octave. Cependant la réglementation française est basée sur une valeur globale qui est calculée comme suit : $A = S \times \alpha_w$

2.3.3 Méthodes d'optimisation des nuisances sonores

L'optimisation par insonorisation des sources sonores passe par la classification de celles-ci par domaines d'activités génératrices de bruit. Le mode de classification utilisé est celui des codes risques utilisées en prévention. D'autre part, il existe une nécessité de contrôle du type d'action. Cette dernière est peut recommander. En effet le choix des solutions de réduction du bruit répond à une logique qui s'appuie sur des considérations physiques d'acoustique ou sur des contraintes industrielles pratiques que l'on ne peut pas différencier par secteur d'activité. Cette classification des types d'actions est basée sur le « Guide de bruit » (Canetto P. et Jeanjean G., 2007) présenté à la figure 80.

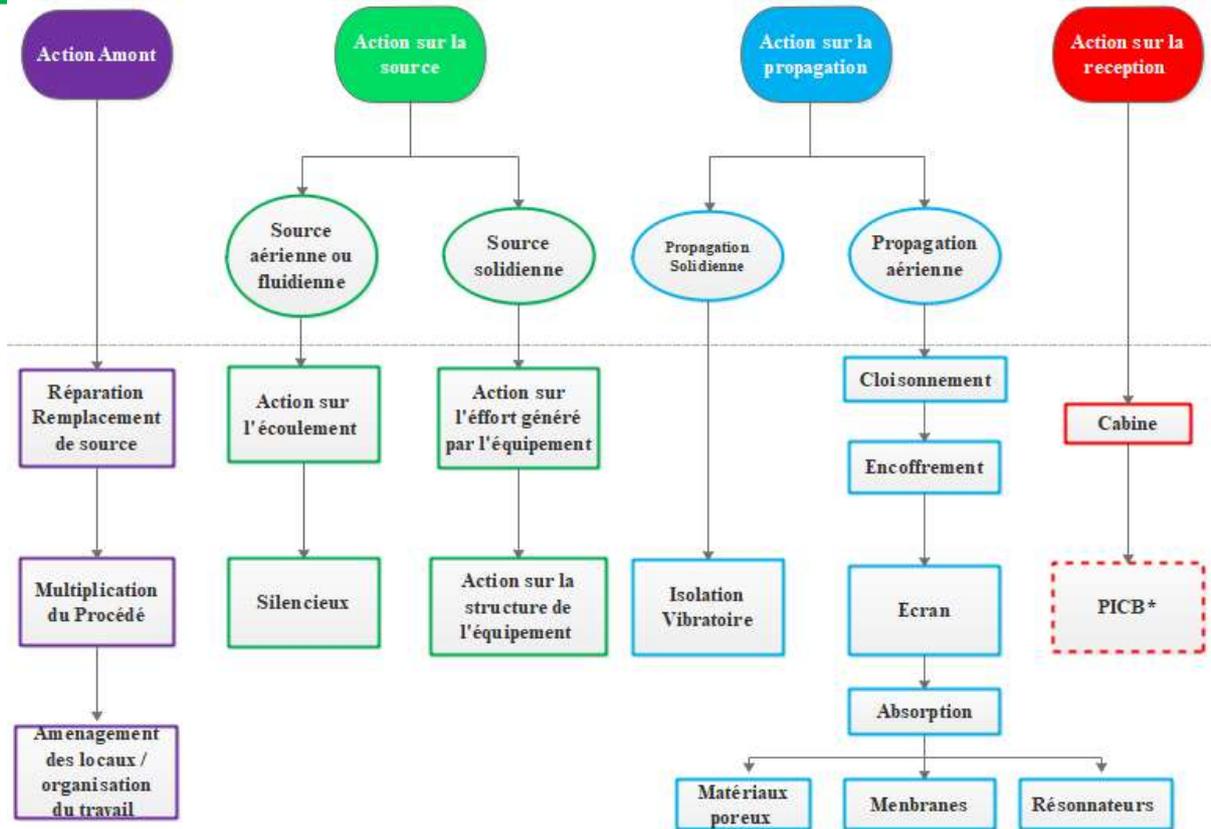


Figure 75 : Classifications des actions de réduction du bruit en entreprise

Plusieurs paramètres entre en jeu dans l'insonorisation industriels comme présente la classification précédente. Du point de vue technique et contextuelle l'inaccessibilité d'un certains nombres d'actions ne pourra pas être examiner. Parmi lesquelles nous pouvons énumérés les actions en amont, sur la source et aussi bien sur le récepteur. Car ces actions sont intrinsèquement liées aux conditions limite inaccessible dans notre cas. C'est ainsi que nous nous pencherons sur l'aspect principale de réduction du bruit lier a la propagation solidienne et aérienne.

Ces deux types de propagation cause de multiples effets sur l'environnement. Des actions visant à leurs réductions pour une insonorisation industriels sont mises sur pieds in situ. D'abord isolation vibratoire qui est lié aux contrainte mécanique donc nous n'étudierons pas et isolation acoustique qui traite du local dans lequel est implanté la source, des cloisons de raccordement intérieur et extérieur a la source, des encoffrements des équipements et les effets d'écran causée par des obstacle lors de la propagation.

Recourir à l'isolation acoustique en termes de méthodes ou moyens d'action, demande une grande attention dans la conception et des soins méticuleux dans l'exécution. Pour cela, on veillera à examiner les différentes voies possibles de transmission acoustique pour évaluer l'isolement acoustique final, mais aussi pour apprécier au mieux les actions susceptibles d'apporter une amélioration de l'isolation acoustique « après-coup » et de juger de l'efficacité des moyens.

Deux grandes pistes s'offrent à celui qui veut envisager les moyens d'obtenir une isolation acoustique aux bruits aériens : on parlera de la loi de masse (et de fréquence) ou de système masse-ressort-masse, ce qui revient à différencier les moyens en évoquant le type de paroi ainsi constituée soit une paroi simple ou une paroi double (voire multiple) dont les constituants sont séparés par un milieu élastique jouant le rôle de ressort et limitant les transmissions, augmentant par-là l'isolement acoustique.

L'isolement acoustique apporté variera en fonction de la fréquence considérée (elle pourrait donc présenter des « défauts localisés ») et cette réponse en fréquence va dépendre principalement pour un matériau donné des épaisseurs et des surfaces en jeu ; il sera donc toujours nécessaire de tenir compte de la nature spectrale de la source vis-à-vis de laquelle on veut se protéger.

Théoriquement les transmissions des ondes dans un solides (paroi) sont régies par les EDP de déformations des plaques sollicités par une ondes de pression. Il sera question de rechercher l'indice d'affaiblissement d'une paroi et surtout le facteur d'isolement acoustique des parois celles-ci représenterons les indices de performances pour la caractérisation insonorisant des entreprises.

2.3.3.1 Indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi

Cet indice caractérise la qualité acoustique d'une paroi de construction (mur, cloison, plancher, plafond, fenêtre, porte.). Il est mesuré uniquement en laboratoire et ne prend en compte que la transmission directe d'un bruit aérien. On aura $R(\theta)$ [dB] avec une correction C ou Ctr selon la destination de la paroi testée. $R(\theta)$ est obtenu par la différence des niveaux sonores [dB] mesurés entre le local d'émission et le local de réception. Plus $R(\theta)$ est grand, plus l'élément a un isolement acoustique élevé.

$$R(\theta) = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_t} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (2.153)$$

Avec $\tau(\theta) = \left(\frac{I_i}{I_t} \right)$ ce coefficient dépend de l'indice (θ) , ainsi que des propriétés mécaniques du matériau constituant la paroi voir fig.81.

Cette grandeur caractérise l'amortissement en termes de niveau de pression d'une onde à la traversée d'une paroi. Le pouvoir d'isolation d'une paroi est d'autant plus important que son indice d'affaiblissement est élevé

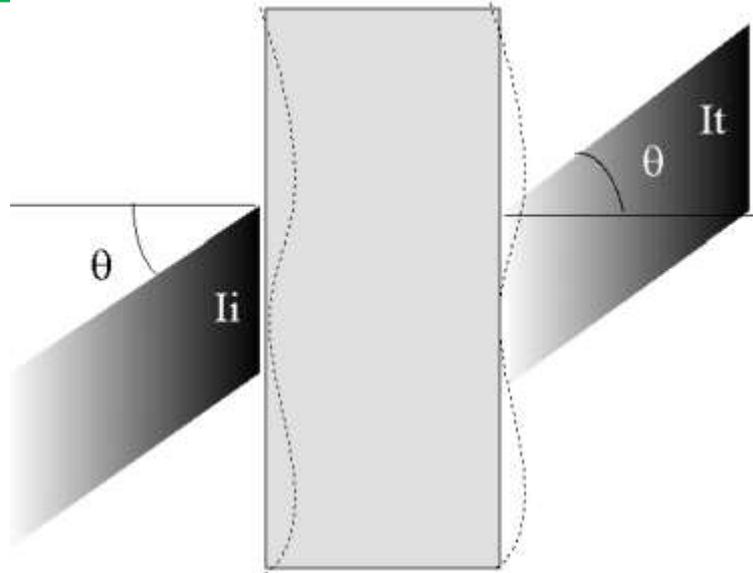


Figure 76 : Angle d'émergence et intensité au frontière

2.3.3.2 Fréquence de coïncidence et fréquence critique

La déformation locale de la paroi au point d'impact de l'onde se propage au sein de la paroi et donne naissance à des ondes dites de flexion de vitesse C_f tel que (Krauss Gérard et Yezou Réne, 2009-2010):

$$C_f = (1,8hf)^{\frac{1}{2}} \sqrt[4]{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.154)$$

Avec :

- h épaisseur de la paroi (m)
- E module de Young (N/m²)
- ρ Masse volumique (kg/m³)
- ν Coefficient de Poisson ($\nu \neq 0.3$ pour les matériaux de construction)

On dit qu'il y a phénomène de coïncidence lorsque la vitesse de la trace de l'onde aérienne sur la paroi (soit : $\frac{c}{\sin \theta}$) est égale à la vitesse C_f des ondes de flexion le long de la paroi, il vient pour θ donner une fréquence :

$$\frac{c}{\sin \theta} = (1,8hf)^{\frac{1}{2}} \sqrt[4]{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.155)$$

$$f_{\theta} = \frac{c^2}{1,8h \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{\rho}{E}(1-\nu^2)} \quad (2.156)$$

La plus basse fréquence de coïncidence dite fréquence critique f_c de la paroi est obtenu pour $\theta = 90^\circ$ tel que : $f_{\theta} = \frac{f_c}{\sin^2 \theta}$

Nous aboutissons à une expression théorique de l'indice d'affaiblissement d'une onde plane :

$$f < f_c \text{ On a } R(\theta) = 10 \log \left[1 + \left(\frac{m_s \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c} \right)^2 \right] \quad (2.157)$$

$$f > f_c \text{ On a } R(\theta) = 10 \log \left[1 + \left(\frac{m_s \omega \cos \theta}{2 \rho_0 c} \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \sin^4 \theta \right] \right)^2 \right] \quad (2.158)$$

m_s : masse surfacique de la paroi en (kg/m²)

ω : pulsation de l'onde aérienne

2.3.3.3 Isolement d'une paroi

On entend par isolement normalisé, l'isolement obtenu soit pour un local récepteur dont l'aire d'absorption est de 10m², soit pour un local dont la durée de réverbération es de 0.5s. dans ces conditions l'isolement normalisée s'écrit (Krauss Gérard et Yezou Réne , 2009-2010) :

$$D_n = R + 10 \log \frac{0.161V}{0.5S} \quad (2.159)$$

$$D_n = R + 10 \log 0.32z$$

V : volume du local récepteur

S : surface de la paroi

Z : profondeur du local récepteur

2.3.3.2 Choix et implémentation de la fonction qualité.

Nous avons analysé dans le chapitre 1 les principaux algorithmes d'optimisation et nous avons montré leurs principaux avantages et inconvénients. Concernant l'optimisation mono-objectif, il est nécessaire pour notre problématique des protections acoustiques que la méthode d'optimisation soit directe. En effet, cette méthode ne fait appel qu'à des évaluations de la fonction coût elle-même et non à ses dérivées ou son gradient qui sont difficilement explicites, comme dans notre cas où la fonction coût est le résultat de l'isolement acoustique provenant de l'affaiblissement des parois. La méthode doit, en outre, rendre possible une recherche globale qui permet de bien explorer l'espace de recherche. L'algorithme d'optimisation mono-objectif retenu dans ce travail est donc l'algorithme génétique. Il est bien adapté lorsque la solution analytique de la fonction coût n'est pas facilement accessible. En addition, il est performant dans le cas où le nombre de paramètres à optimiser est important.

Cinq éléments sont nécessaires dans un algorithme génétique :

- Un principe de codage de l'élément de population. Une structure de données est associée à chacun des points de l'espace d'état. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement employés, notamment pour l'optimisation de problèmes à variables continues.

- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

- Une fonction à optimiser. Elle est appelée fonction d'évaluation de l'individu ou "fitness". L'utilisation de cette fonction permet la sélection et la reproduction des meilleurs individus de la population.

- Des opérateurs permettant la diversification de la population au cours des générations et l'exploration de l'espace d'état. L'opérateur de croisement combine les génotypes de deux individus existant dans la population pour en obtenir deux nouveaux, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.

- Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation, nombre total de générations ou critère d'arrêt.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté en figure

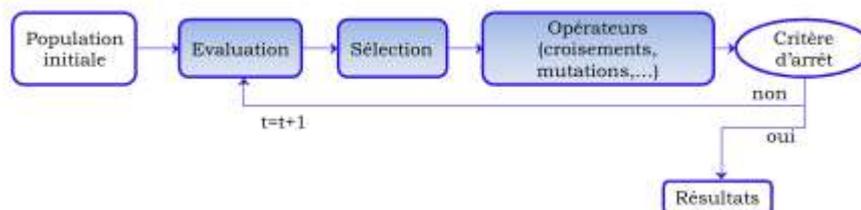


Figure 77 : Principe général des algorithmes génétiques implémentés

Conclusion

Ce chapitre a initialement permis de fixer les bases théoriques sur les méthodes d'évaluation de consommation de fioul, d'inventaires d'émission atmosphérique et d'émissions sonore, puis a établi suivant des modèles mathématiques en 2 et 3 dimensions, des méthodes de résolution des dispersions atmosphériques et d'interpolation de données pour des cartographies sonores. Dans un second temps cette deuxième partie présente suivant un protocole lié au type de centrales des modèles numériques et des algorithmes de résolutions liés aux équations de Navier Stokes, d'interpolation, et surtout des algorithmes génétiques. Ces méthodes dites analytiques, numériques, d'interpolation et d'optimisation sont utilisées ici en vue de résoudre les différents objectifs spécifiques liés à notre étude.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Après avoir élucidé les méthodes à utiliser, ce chapitre présente, analyse et interprète les résultats suivant chaque polluants atmosphérique et nuisances sonore, une répartition géographique par maillage de point géolocalisées. Pour ce faire, une analyse descriptive des données statistiques est établie. Cette analyse permet d'observer et de comprendre le comportement des séries chronologiques avant de faire allusion aux mécanismes qui aboutissent à l'évaluation, la cartographie puis l'optimisation par l'atténuation. Après avoir estimé les polluants atmosphériques et les nuisances sonores, le modèle proprement dit du maillage sur la dispersion dans l'environnement sera formulé suivant chaque type de Centrale. Ces secteurs sont regroupés en deux grandes catégories à savoir : les centrales à fioul lourds et les centrales à fioul légers. Par contre, la répartition de ces données par secteur d'utilisation provient d'une collaboration entre le ENEO et le LESEE.

3.1 Inventaire des Emissions Industriels

3.1.1 Temps de fonctionnement, production énergétique et consommation

3.1.1.1 Temps de fonctionnement et production Energétique

D'une manière générale les Centrale thermique d'approvisionnement du Cameroun, fonctionnent en plein régime dans la plage de 6h PM à 00h AM, périodes pendant laquelle la consommation et la pollution sont maximale. Suivant les différents moteurs, les heures totales de fonctionnement de la centrale thermique, OYOM-ABANG I se trouve tout au long de ces dernières décennies plus précisément suivant les années 2009, 2010 et 2011 :

- Le temps de fonctionnement du moteur M1 est de 2066,8 h, 1405,24 h et 1587,06 h pour une production énergétique respective de 11702757,05 MWh, 7630106.6 MWh et 8765910 MWh (fig.3 et fig.84).
- Le moteur M2 dont le temps de fonctionnement est de 2092,048 h, 2092,048 h et 1341,66 h pour une production énergétique respective de 11964112,1 MWh, 80456669,5 MWh et 7342710,3 MWh (fig.3 et fig.84).
- Pour le moteur M3 dont le temps de fonctionnement est de 2131,15 h, 2131,15 h et 1358,1 h pour une production énergétique respective de 12269747,1 MWh, 8097817,1 MWh et 7587088 MWh (fig.83 et fig.84).

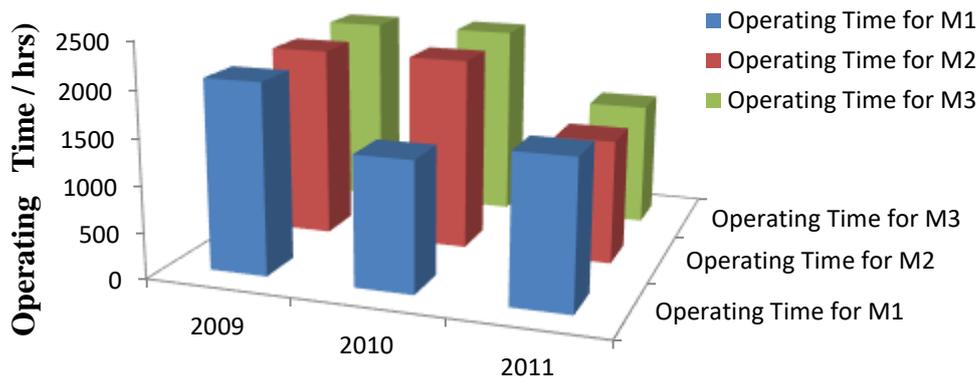


Figure 78: Temps de fonctionnement groupé par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.

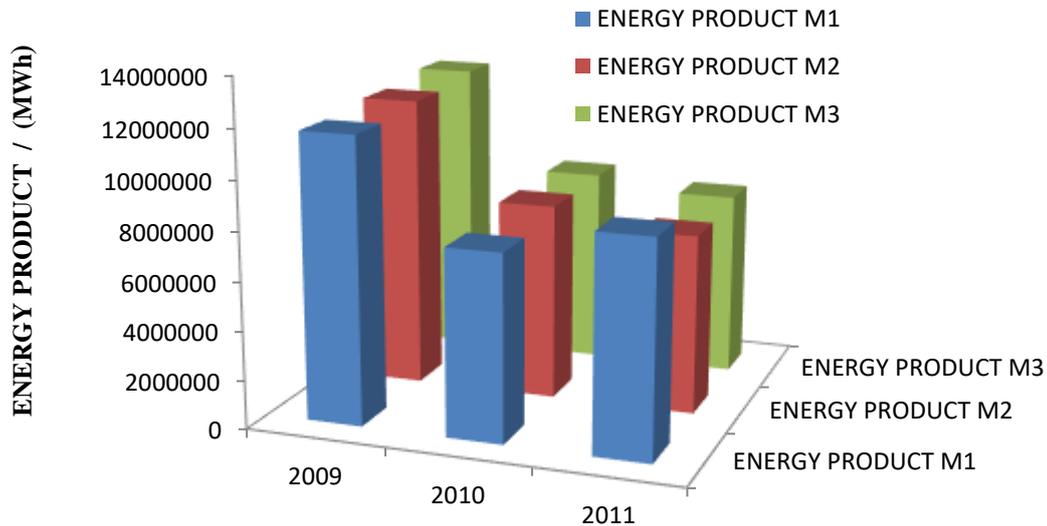


Figure 79: Energie Produite par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.

L'énergie produite par chaque moteur est fonction du temps d'utilisation. Par contre en comparant l'énergie produite et le temps de fonctionnement sur un graphe ayant deux axes en ordonnés (Fig. 85-a), il est indéniable qu'en 2009 et 2010 le deuxième moteur a des temps légèrement espacés fonctionnant dans un même régime moteur, produisent des quantités énergétiques distinctes bien qu'ayant les mêmes caractéristiques à la sortie de l'usine de fabrication.

L'énergie des premiers moteur M1 décrois progressivement entre les années 2009 et 2010 ensuite augmente jusqu'à dépasser les 8 MW de production. Cette variation proportionnelle de l'énergie en fonction du temps reste dans la logique du fabricant sur l'efficacité énergétique liée au moteur et le temps.

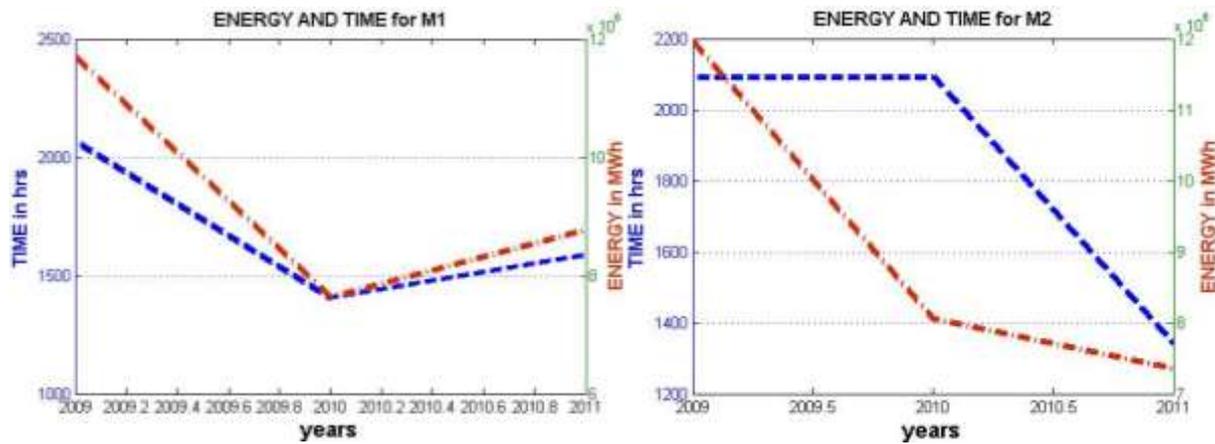


Figure 80 : Evolution de l'énergie produite et du temps de fonctionnement pour les moteurs M1 et M2

Le second moteur M2 l'énergie produite décroît rapidement de 12 MW en 2009 à 8 MW en 2010 par la suite une grande décroissance d'énergie se fait ressentir entre 2010 et 2011 et atteindra 7,5 MW en 2011. Par contre le temps de fonctionnement reste constant entre 2009 et 2010 pour une valeur de 2100 heures. Et par la suite on observe un brusque abaissement du temps de fonctionnement d'une valeur de 1300 heures. Cette figure nous montre qu'effectivement les seconds moteurs qui fonctionnent dans les plans ENEO en 2009-2010-2011-2112... Avec une puissance de 12 MW perd progressivement ces capacités. Il produira pour des temps de fonctionnement assez grand, de petites valeurs 8 MW en 2010 et 7,5 en 2011 fonction de la demande (Fig.85-b).

Pour le Troisième moteur M3 l'énergie produite décroît lentement en de 12,5 MW en 2009 jusqu'à 7.5 MW en 2010. Puis elle reste constante entre 2010 et 2011. Par contre, comme dans le second moteur le temps de fonctionnement reste constant entre 2009 et 2010 pour une valeur de 2100 heures. Et par la suite on observe un brusque abaissement du temps de fonctionnement d'une valeur de 1400 hrs (Fig.86)

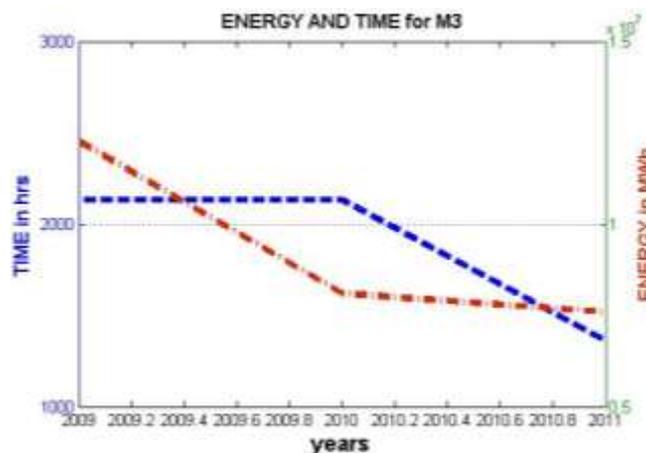


Figure 81: Evolution moyenne de la production et du temps de fonctionnement pour les moteurs M3

En outre, la présentation du temps de fonctionnement et de l'énergie produite pour la centrale Thermique de Dibamba présente suivant les différents moteurs tout au long des années respectives 2009, 2010 et 2011 la figures fig.87 et la fig.88.

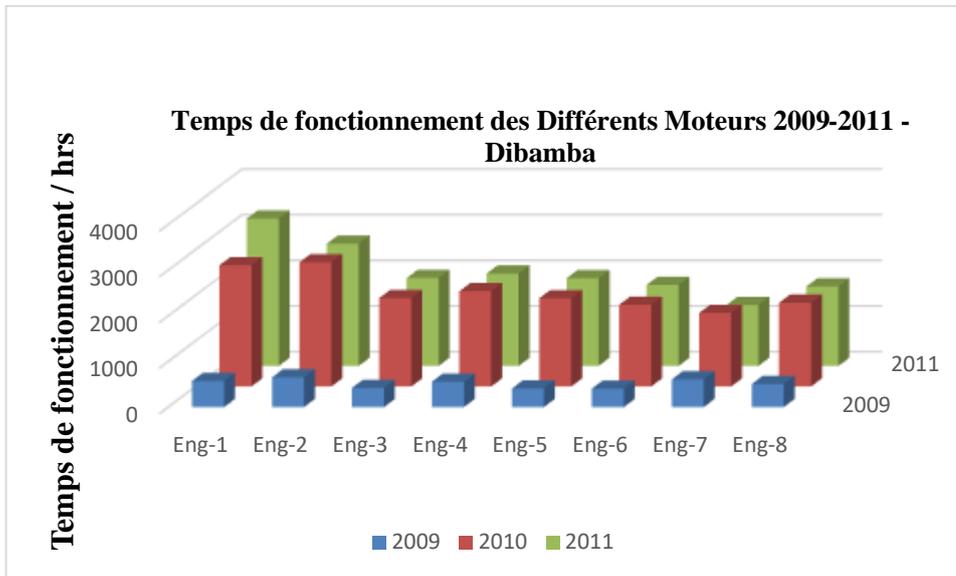


Figure 82: Temps de fonctionnement groupé par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.

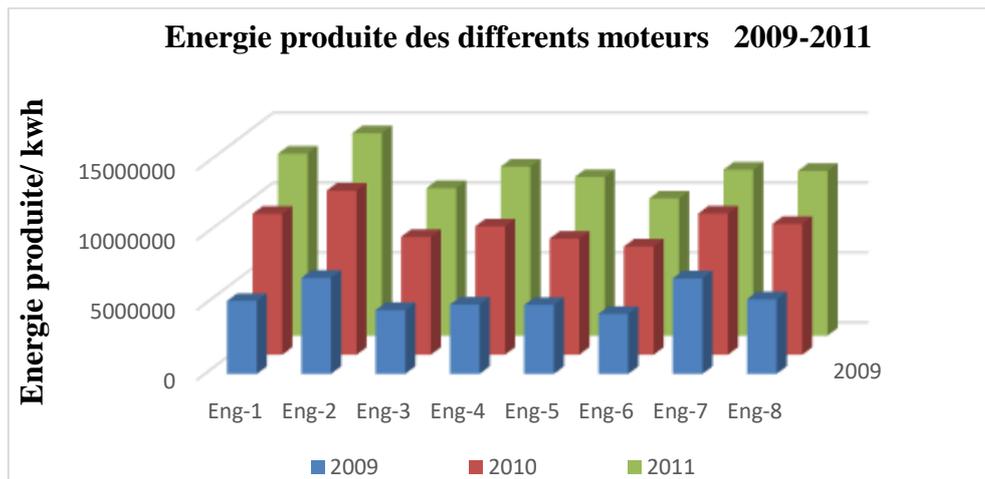


Figure 83: Energie produite des moteurs suivant les années 2009, 2010, 2011.

De ces résultats, nous observons une similitude avec ceux de la centrale thermique d'Oyoma-bang de manière générale. Lors de la présentation des temps de fonctionnement pour chaque machine il en ressort un temps de fonctionnement croissant allant des années 2009 vers les années 2011 tels qu'en moyenne nous avons 515,37 ; 2 073,77 et 2080,69 heures pour chaque moteur. D'une manière similaires cette évolution est proportionnelle à la production d'énergie par moteurs tel qu'une évolution moyennée croissante par année ce fait ressentir respectivement de 5377020,38 ; 9364608,25 et 11864786,25 Kwh chaque année. Concernant particulièrement l'année 2009, celle qui est la plus proche de la mise en service de la centrale et correspondant au temps d'accommodation du système de production et de la mise en disponibilité des combustibles.

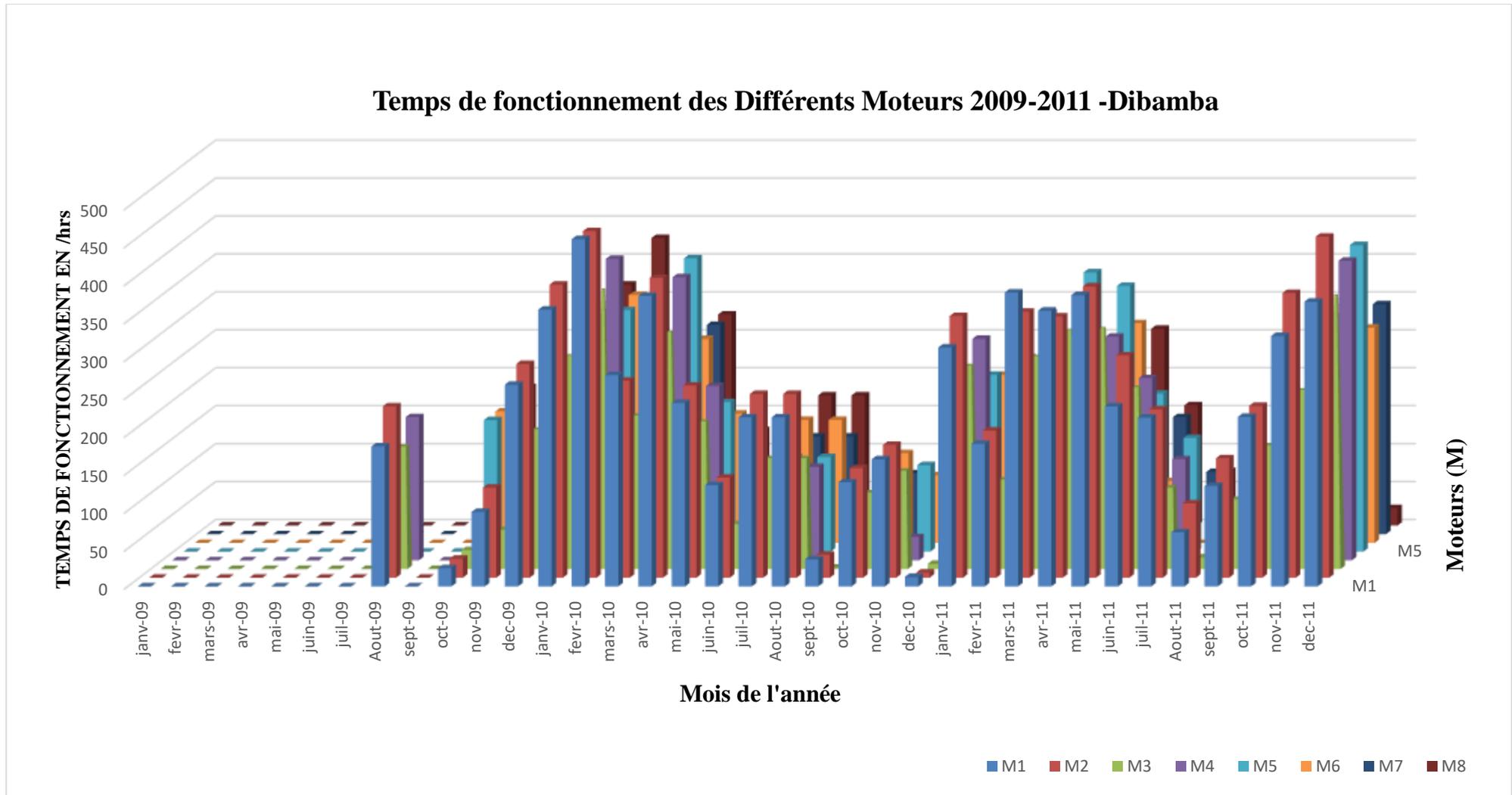


Figure 84: Temps de fonctionnement Dibamba groupé par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.

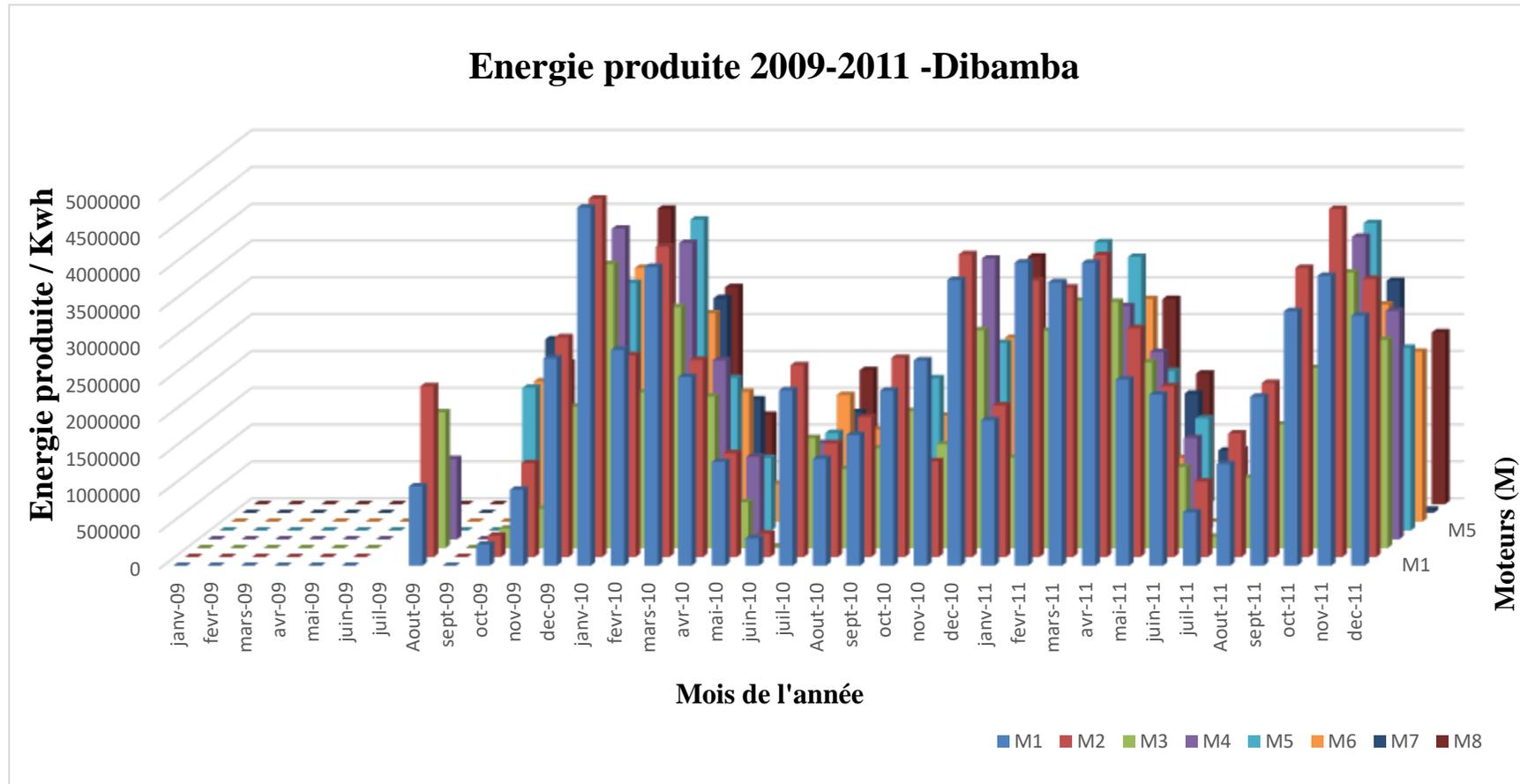


Figure 85: Energie produite à Dibamba groupée par chaque moteur suivant les années 2009, 2010, 2011.

La présentation des fig.89 et 90 expliquent plus implicitement la progression sur trois ans du temps de fonctionnement et de d'énergie produite durant celle-ci tout au long des année 2009, 2010 et 2011. Cette similitude entre ces deux caractéristiques physiques montre un lien étroit explicitement entre les deux. Les 7 premiers mois montrent bien un début de démarrage lent ou des données sont indisponibles et progressivement on observe une production systématique et progressive dans le temps. Particulièrement pour les mois de janvier et février on observe une production énergétique très accentuer dans toutes les centrales thermiques pour ces différents mois. Cette période correspond aux saisons d'étiage avec une production d'énergie hydroélectrique très faible. D'où un appel croissant des centrales d'approvisionnements par le Grid Dispatch.

3.1.1.2 Consommation de fuel

Comparons les consommations obtenues par les méthodes d'évaluation 3 et 4. Ces consommations font ressortir pour chaque moteur une quantité de fuel consommé sur trois ans (36 mois). En fonction de la méthode d'évaluation par niveau d'activité ou par du compteur volumétrique nous pouvons comparer suivant chaque moteur la consommation de fuel.

✓ Centrale Thermique d'Oyomabang

La consommation de fuel lourd par niveau d'activités dans les CT d'Oyomabang tous au long des 36 mois présente plusieurs fluctuations (Fig.91). Tous les troisièmes mois de chaque année nous constatons que les valeurs de consommation sont maximales et atteignent les 1090kg. Cette période de l'année correspond bien au période d'étiage, pendant laquelle le potentiel hydroélectrique est bas, on fait appel aux centrales thermiques pour approvisionner le réseau électrique local. Par contre tous les 7 mois de chaque année on constate une faible consommation des différents moteurs (<200Kg). Cette période correspond à une saison pluvieuse dans notre écosystème, ou les crues se font ressentir de même que l'augmentation du potentiel hydroélectrique. Ici il y a une faible demande d'approvisionnement par les Centrale Thermiques.

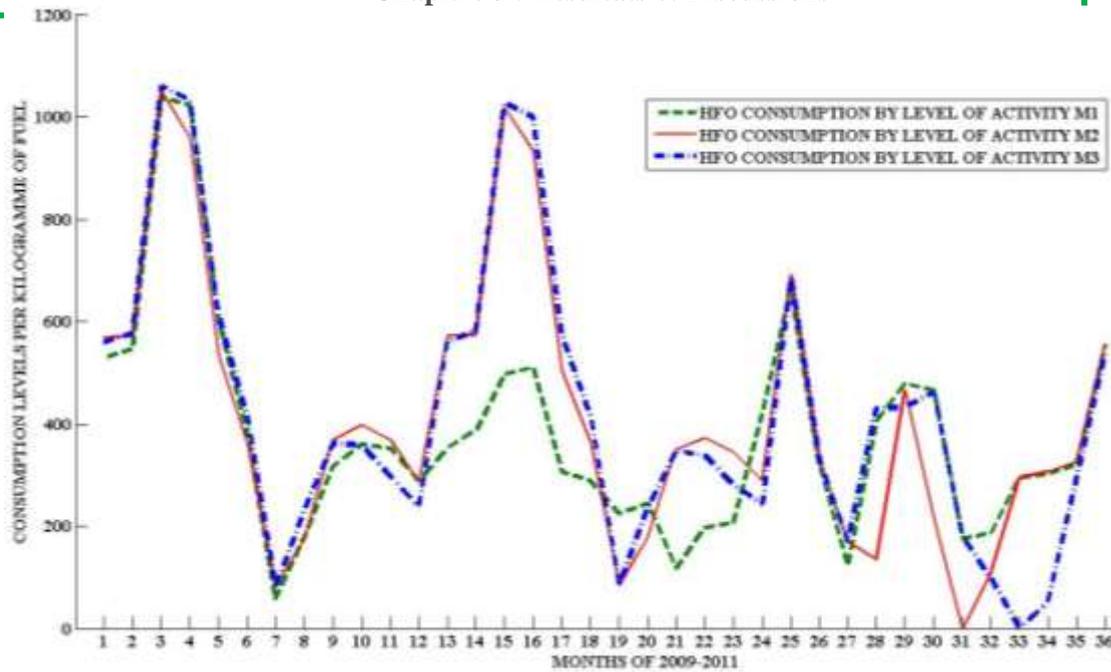


Figure 86: Consommation des moteurs de la CTO par niveau d’activités pour les 36 mois

En tenant compte de la consommation par compteur volumétrique, nous obtenons la Fig.92. Elle présente des fluctuations similaires à ceux de niveaux d’activités, mais ayant des valeurs de consommation plus élevées (61.11%). Au 21^{ème} mois la valeur de consommation du premier moteur est base de 200Kg tandis que ceux des moteur 2 et 3 atteigne une valeur de 630Kg, Ces valeurs explique clairement un disfonctionnement de moteur 1 pendant ce mois. Ce phénomène ce répète pour le moteur 2et 3 au cours des mois 31et 33 respectivement.

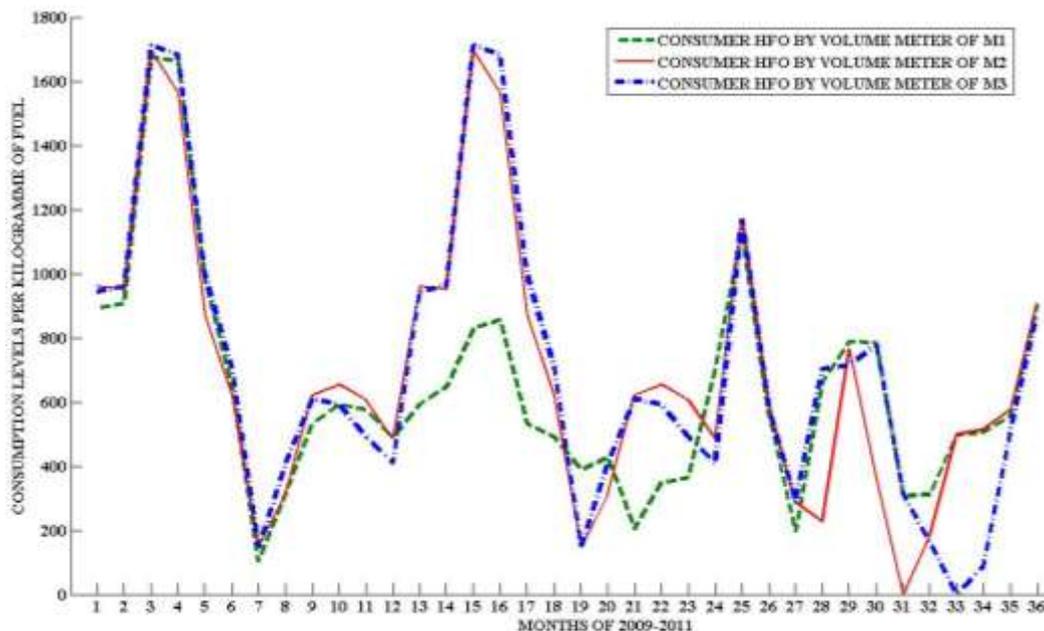


Figure 87: Consommation des moteurs de la CTO par compteur volumétriques pour les 36 mois

La figure 91 et 92 présente les consommations annuelles pour 36 mois de fonctionnement (3 ans). L'ordonnée représente les consommations en Kg. En superposant ces deux courbes nous pouvons comprendre la différence qui existe pour les différentes méthodes d'évaluation de la consommation.

La consommation par niveau d'activité de fuel présenté en figure 91 et comparer avec la consommation volumétrique présenté en Figure 92 sont superposée en Figure 93 et présente un écart considérable sur trois ans, de 256,36 kg pour le premier moteur M₁, de 281,47 kg pour le second moteur M₂, et de 286.194 kg pour le troisième moteur M₃. La méthode d'évaluation de la consommation devient primordiale pour le calcul des émissions. Pour une quantification des émissions utilisant la méthode de niveau d'activités ou la méthode par compteur volumétrique un grand écart se fera ressentir.

La considération des consommations pour des quantifications plus fiable et empirique des émissions de polluant se feront dans les deux cas mais tous en sachant que celle liée au compteur volumétrique est plus exacte et permet d'avoir une excellente représentation des émissions de polluants. D'une technologie de combustion à l'autre, le procès n'est pas toujours similaire. Il est donc avantageux de reconsidérer cet aspect mettant en cause la quantité de fuel injecté à l'entrée du moteur et celle réellement enflammé dans la chambre de combustion des moteurs thermiques. Il serait donc intéressant pour les experts de considérer le niveau de consommation par compteur volumétrique mettant en cause la quantité de fuel réellement transformé en énergie électrique.

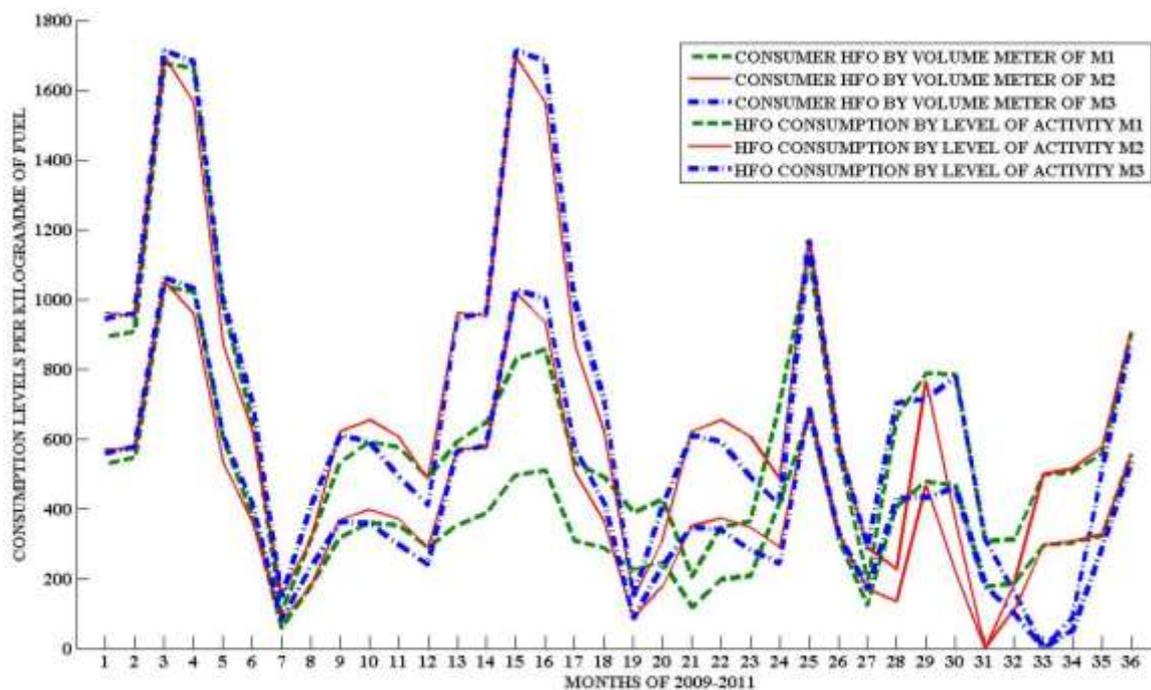


Figure 88: Superposition de la Consommation de HFO des moteurs de la CTO par Niveau d'activités et par compteur volumétrique pour les 36 mois

Les intervalles de temps correspondant à l'entrée du fioul dans le moteur et celui correspondant à l'éjection des gaz brûlés et imbrulés montre que pour certaines technologies le parcours de fioul n'est pas le même et pour des technologies vieillissantes, la perte de fioul par fuites de tuyauterie est très probantes causant ainsi des déversements accidentels d'hydrocarbure et autres produits chimiques dans l'environnement.

✓ **Centrale thermique de Dibamba**

La consommation de fuel lourd par niveau d'activités et par compteur volumétrique dans la CT de Dibamba tous au long des 38 mois présente plusieurs fluctuations (Fig.94). Une similitude se fait constater de manière générale aux vues du temps de consommation de l'énergie produite et de la consommation du fioul. Il en découle pour les mois de crue élevé une faible consommation par niveau d'activité aussi bien par compteur volumétrique. Contrairement au période d'étiage ou les valeurs de consommation de fioul dans les deux cas d'espèce est élevé, on comprend que la fluctuation générale des consommations est plus liée au climat et à la méthode de calcul. Ceci montre une fois de plus que l'étude des consommations et des émissions des gaz doit être faite très méticuleusement, et en considérant la méthode des niveaux d'activités liée à l'unité.

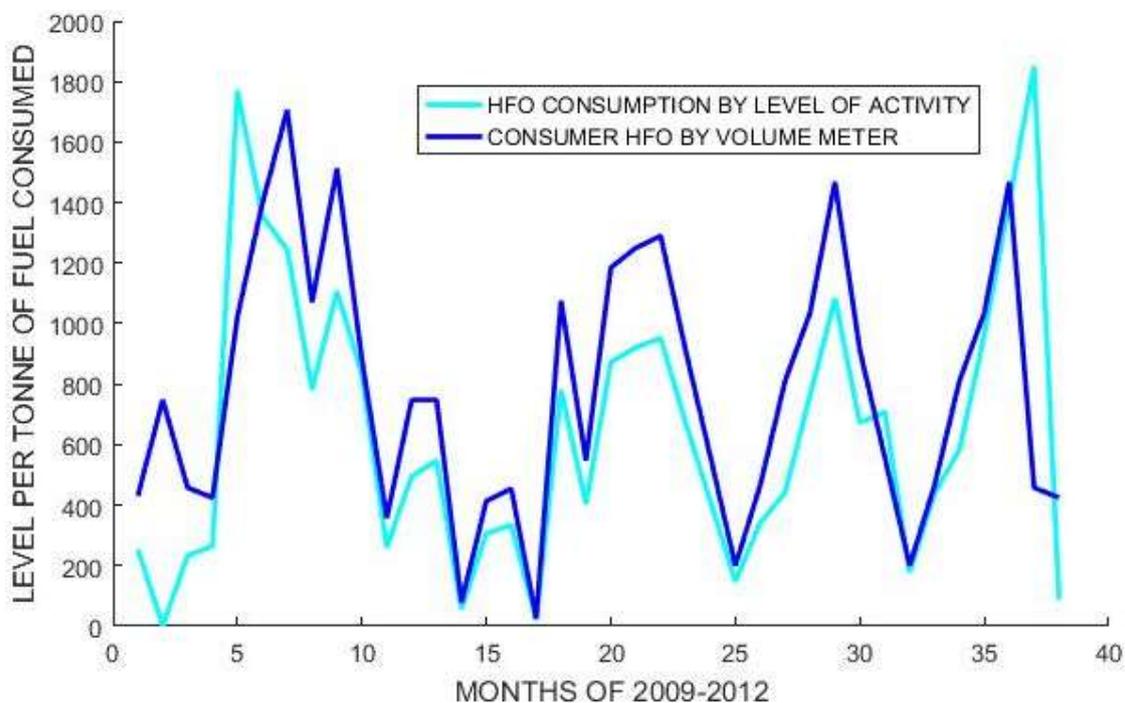


Figure 89: Superposition de la Consommation de HFO des moteurs par Niveau d'activités et par compteur volumétrique de la CT-Dibamba

Le constat se fait ressentir très rapidement lorsque nous observons quelque mois ou la consommation de fioul diffère totalement après usage des deux méthodes. Et plus encore une différence très visible s'observe entre ces deux méthodes d'une moyenne d'environ 133,396242 tonne de fioul par mois entre le calcul par niveau d'activité et le compteur volumétrique.

3.1.2 Emissions atmosphériques issue des sites industriels

3.1.2.1 Emission comparées des polluants issus de différents moteurs Wartsilla C.T.O.

Ces études ont été possibles grâce aux valeurs empiriques relevées à la centrale thermique. Ainsi la détermination de la consommation volumétrique de fuel lourd pour chaque moteur s'est faite analytiquement et a permis une quantification des émissions de polluants suivant un code numérique implémenter dans MATLAB vs R2012a (7.14.0.739) 32-bit(Win32).

Les émissions de polluants ce présente suivant chaque moteur (M1, M2, M3) pendant trois ans (36 ans). Les émissions de SO_x, NO_x, CO et des particules de centrale thermiques ont été représentées (Fig.10) en fonction des équations mathématique intégrant des niveaux de consommation volumétrique, des facteurs d'émissions et surtout des indices donnant une précision sur la quantité à évaluer.

Les émissions de polluant pour le premier moteur présent sur le 36 mois les NO_x comme polluant majoritaire des émissions (Fig.95). Tout au long de ces mois, les périodes d'étiage se présentent comme période pendant lesquelles les polluants sont déversés dans l'atmosphère à grande quantité. Elle correspond au troisième mois de chaque année. Pour ce moteur les émissions de particules de 2,5 μ m de diamètre sont les plus petits tout au long de notre étude par contre ceux de 10 μ m de diamètre sont les deuxièmes les plus émis.

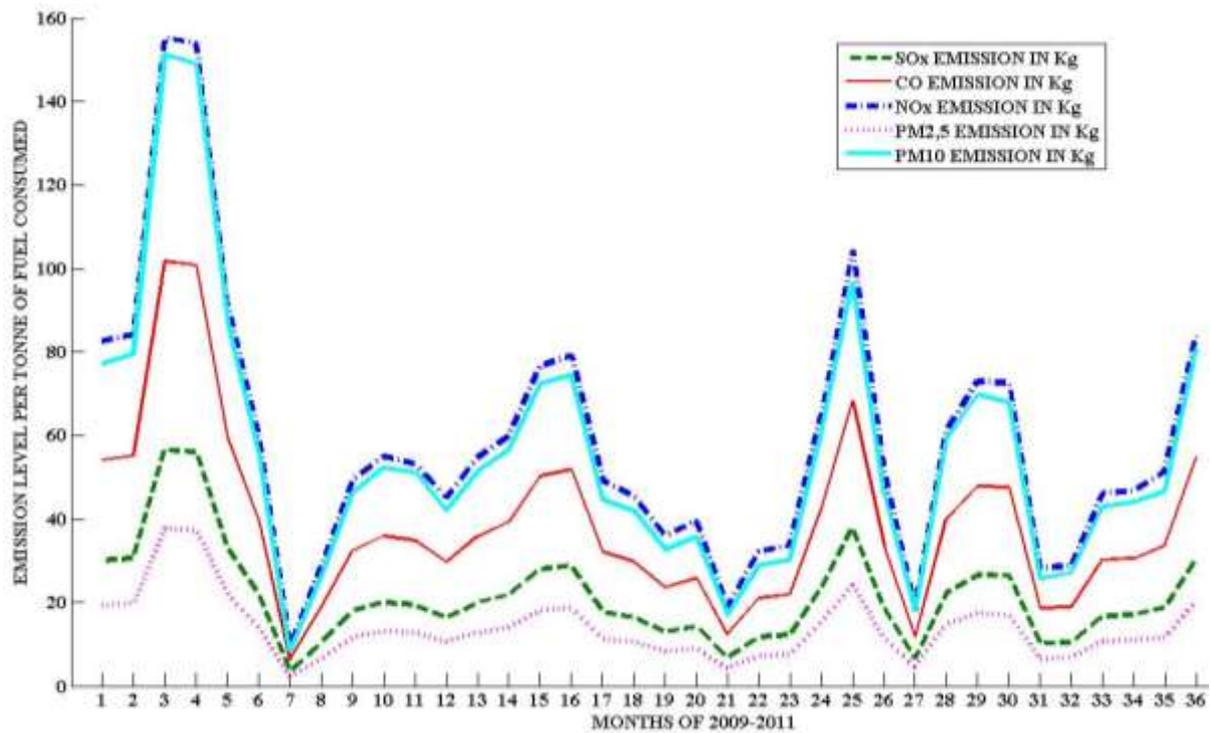


Figure 90 : Comparaison des Emission de polluants pour chaque moteur M1

Ces informations de par le moteur, renseignent sur le type de combustion qui s'effectue dans les cylindres. En tenant compte du type de polluant émis la caractérisation des propriétés de fuel reste vérifiée. Les différents polluants issus de la combustion présentent des fluctuations similaires à ceux observée au niveau des consommations de fuel.

Le deuxième moteur, quant 'a lui, présente comme polluant majeur sur 36 mois celui des matières particulaires de de $10\mu\text{m}$ de diamètre (Fig.96). Ayant un pic supérieur de 100 kg au second pic qui est celui des NO_x . La valeur minimale d'émission ici est celle des SO_x , toujours inférieur à 60 Kg.

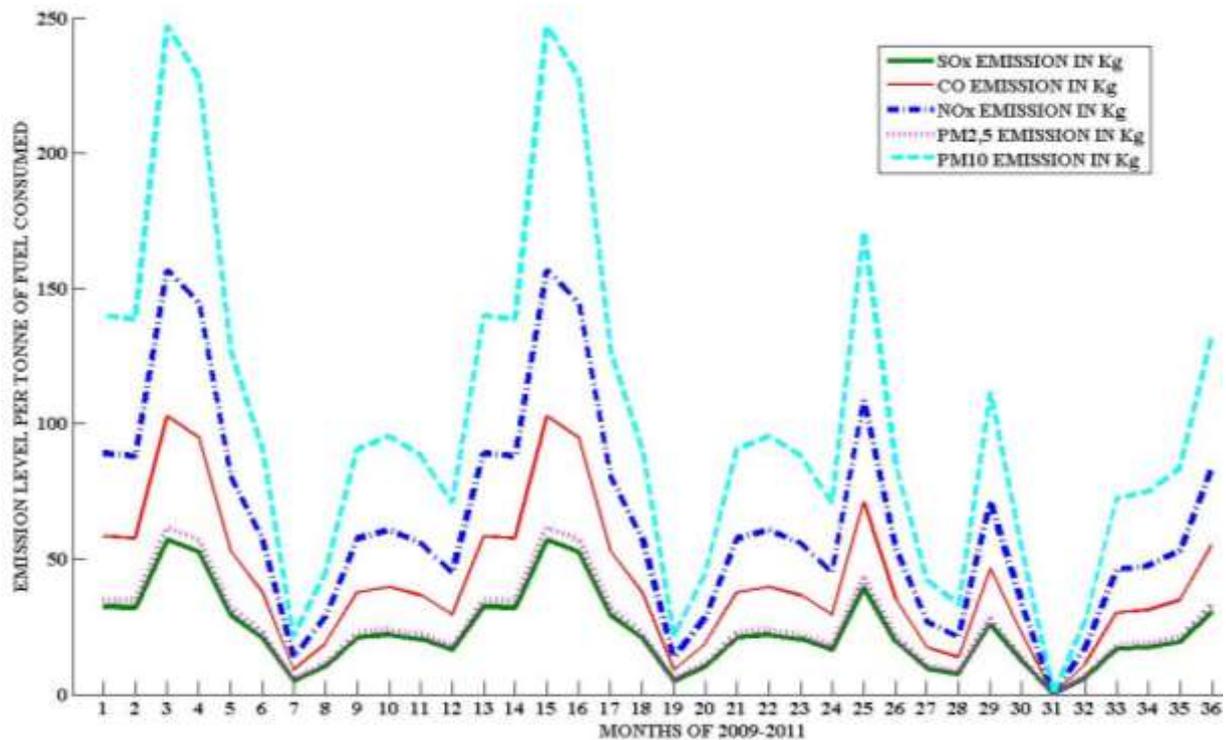


Figure 91 : Comparaison des Emission de polluants pour chaque moteur M2

De tous ce qui précède le troisième moteur n'échappe pas aux différentes variations saisonnières que subissent les moteurs. Le niveau d'émission de composés organique sur ce moteur rejoint les deux autres et attient une valeur maximale de 100Kg tous les 7ième mois de l'année. Cette valeur prépondérante sur la qualité de combustion, traduit le fait que, sur le troisième moteur voire Fig.97 comme sur les deux autres la combustion est incomplète. Il est important de noter que cette quantité de composés organiques dépend des procédés de traitement du fuel avant l'entrée dans les chambres à combustion des moteurs. La position occupée par les PM de 10 μ m de diamètre dans les deux derniers cas par rapport à celui des NO_x nous renseigne sur la défaillance du premier moteur quant aux systèmes d'alimentation d'air et d'éjection de gaz. Par contre les deux derniers moteurs permettent de se pencher sur le système d'éjection des gaz et des retentions des résidus de combustion dans les bacs de précombustion.

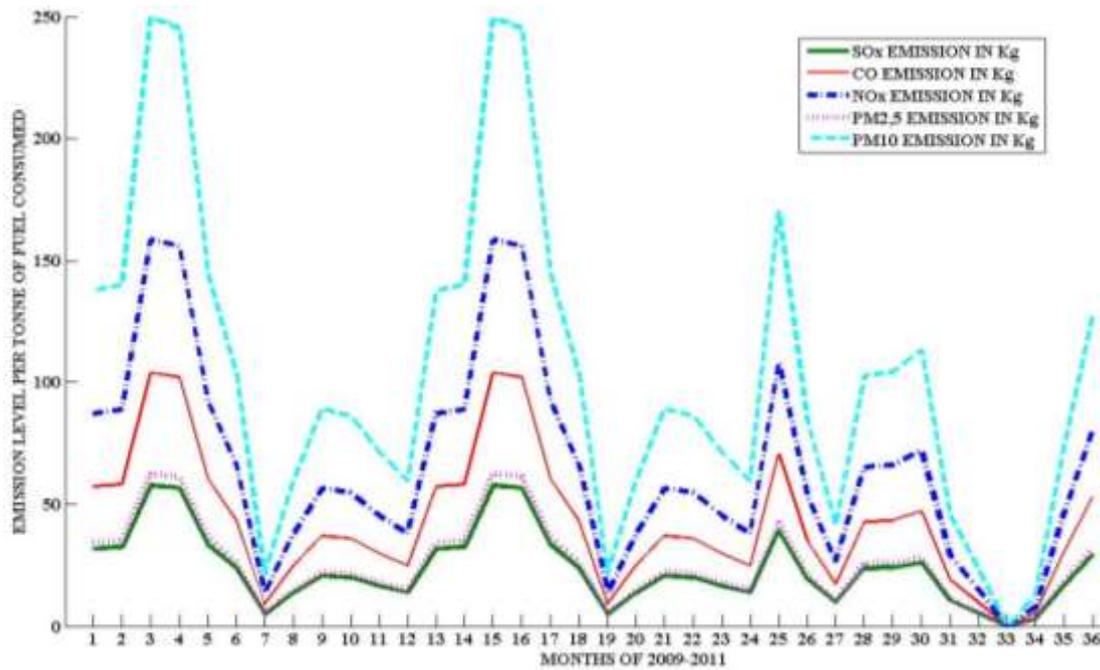


Figure 92: Comparaison des Emission de polluants pour chaque moteur M3.

Tableau 22: Récapitulatifs des émissions de polluants pour chaque moteur pendant trois ans

MOTEUR 1					
	Emis Sox Kg	Emis CO Kg	Emis Nox Kg	Emis PM 1µm; 2,5µm (Kg)	Emis PM 10µm (Kg)
2009	315,7089286	568,0871932	866,8457642	206,3244065	825,2976259
2010	214,653965	386,2487166	589,3779474	136,5592201	546,2368805
2011	242,4274299	436,2243375	665,6358808	156,0887229	624,3548916
MOTEUR 2					
	Emis Sox Kg	Emis CO Kg	Emis Nox Kg	Emis PM 1µm; 2,5µm (Kg)	Emis PM 10µm (Kg)
2009	225,826285	406,3522086	620,0539195	145,1099528	580,4398112
2010	210,5036787	378,7806843	577,9824571	134,1397267	536,5589067
2011	445,9930887	802,5207368	1224,568534	290,0463366	1160,185346
MOTEUR 3					
	Emis Sox Kg	Emis CO Kg	Emis Nox Kg	Emis PM1µm 2,5µm (Kg)	Emis PM 10µm (Kg)
2009	214,6554925	386,2514652	589,3821415	137,114722	548,4588879
2010	229,0401982	412,1353296	628,8783993	147,003283	588,0131322
2011	1047,821253	1885,451379	2877,015291	675,9186087	2703,674435

De nombreux facteurs peuvent affecter le processus de combustion dans les moteurs diesel, au nombre desquels la charge du moteur, son ajustage et l'aptitude à l'inflammation du fuel, autant de facteurs qui influent aussi sur les tendances d'un fuel donné à former des dépôts solides, liquides et gazeux.

D'une manière générale les figures 14, 15, 16 présentent les variations des principaux polluants, qui évoluent simultanément avec la consommation en fuel. Les valeurs des émissions annuelles sont répertoriées dans le tableau 3. Concernant le premier moteur la valeur maximale de polluant est celle des Oxydes d'azotes NO_x (866,85 Kg) pendant l'année 2009, et la peut polluante est celle des matières particulaires PM de $2,5\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$ de diamètre (206,32 Kg). Par contre pour le second et le troisième moteur les valeurs maximales de polluants sont celles des matières particulaires PM de $10\mu\text{m}$ de diamètre (2703,67 Kg) et d'Oxydes d'azotes NO_x (2877,02Kg) pendant l'année 2011 et de manière similaire aux valeurs polluantes du premiers moteur celles des deuxième et troisième moteur peut polluantes sont les matières particulaires PM de $2,5\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$ de diamètre (137,12 Kg) et les Oxydes de soufre SO_x (214,66 Kg).

En bref ces résultats en corrélation avec l'évolution de l'énergie produite permettent de comprendre que pour un moteur remplissant les conditions de production énergie maximal et de pollution minimal prévue par le concepteur, la valeur d'émission de polluant est majoritaire pour les Oxydes d'azotes NO_x pour un système d'alimentation d'air en parfaite état et minoritaire pour les matières particulaires comme présenter sur les résultats du premier moteur. Cela implique une grande pollution des moteur 2 et 3 en matières particulaires preuve d'une mauvaise combustion et de de la défaillance du système d'éjection et de rétention des résidus

En tenant compte de l'année 2009 comme référence on se rend compte d'une diminution considérable de 31,97% en consommation de fuel et de polluants mais n'excluant pas le fait que le la centrale thermique a eu à faire un grand effort dans la diminution des polluants à travers des prétraitements de fuel et l'utilisation de fuel léger pour le démarrage. Qu'à cela ne tienne, la mécanisation vieillissante conduit à des moteurs ne fonctionnant plus à grande consommation et à des durées de fonctionnement élevées.

Toutes fois il est à noter que cette diminution n'impacte pas sur la variation de polluants pour une même année. Les moteurs 2 et 3 ne respectent pas cet ordre quantitatif, car présente déjà des signes de défaillance. Il sera donc judicieux de tenir compte des effets cumulatifs pouvant naître sous formes des polluants secondaires comme les pluies acides, l'ozone, qui ont un impact très important sur l'environnement.

De tels résultats concordent a ceux de (Yu Zhao et al, 2008.), (Dongmei Li et al, 2012)et (Zhu Liu et al, 2015) et permettent de dire que l'amélioration sur les méthodes mathématique a radical empirique fonctionnent aussi sur les composés Organiques (CO). De plus les quantités moyennes par ans de chaque polluant (Tableau 23) nous montrent en ce qui concerne les polluants SO_x et NO_x , que les quantités émises sont inférieures aux valeurs

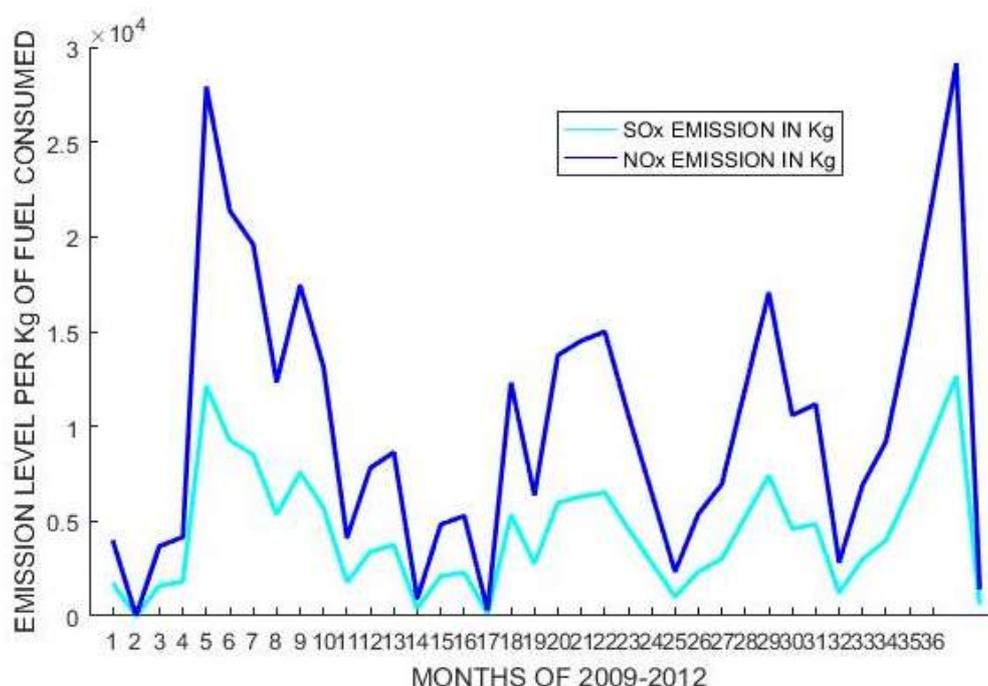
limites préconisées par le MINEP-Cameroun (WORLD BANK GROUP, July 1998.) (HELE Pierre, 2005 et 2011). Par contre les quantités émises de types PM et CO sont supérieures aux valeurs limites préconisées.

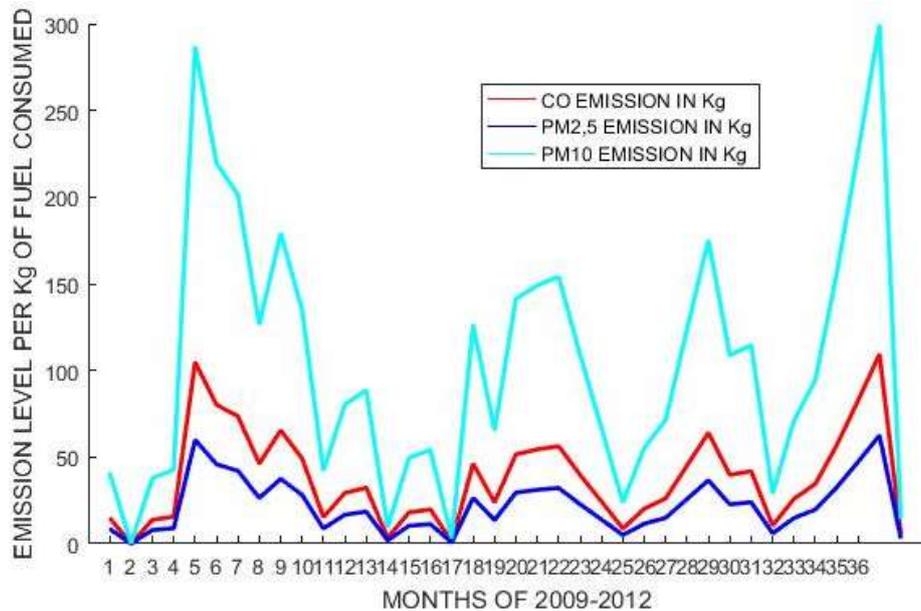
Ces différentes valeurs nous permettent de dire que les rejets des polluants atmosphériques concernant la C.T.O. sont de quatre types majeurs : matières particulaires PM de 2,5 μ m, 1 μ m et 10 μ m de diamètre et les composés organiques. Quant aux autres, tels que les SO_x, NO_x, ils sont aux seuils des valeurs limites préconisées. On peut se poser un certain nombre de questions sur toutes les centrales thermiques du réseau inter connecté du Cameroun quant à la quantité de polluants émis. Est-elle quantifiable ? Peut-on définir un scénario sur 20 ans permettant de maîtriser et de contrôler cette pollution ? Si oui quelle sont les mesures à prendre pour réduire ou atténuer partiellement ses impacts sur l'environnement.

Tableau 23 : Valeur moyenne annuelle des émissions pour chaque moteur

Emission	Emis Sox Kg	Emis CO Kg	Emis Nox Kg	Emis PM 1 μ m; 2,5 μ m (Kg)	Emis PM 10 μ m (Kg)
Moyenne M1 /ans	21,46639787	38,62667354	58,94054423	13,86034304	55,44137217
Moyenne M2 /ans	23,446478	42,18963315	64,37727381	25,34291855	101,3716742
Moyenne M1 /ans	23,85065271	42,91690582	65,48702112	25,77978445	103,1191378

3.1.2.2 Emission comparées des polluants issus de différents moteurs Wartsilla C.T-DIBAMBA.





8,5	CO2	SO2	NOX	CH4	CO	COV	p
Max-Emis	15657667,3	37134,916	106142,1999	661585,0535	80915,56023	8548,818402	9520,777084
Min-Emis	9441,84562	22,393	64,005592	398,94729	48,79348967	5,155086132	5,741194116
Moy-emis	7833554,573	18578,6545	53103,10275	330992,0004	40482,17686	4276,986744	4763,259139
Totaux des émissions	40965432,1	97156,738	277701,7163	1730916,685	211700,8124	22366,4249	24909,3776
2010	CO2	SO2	NOX	CH4	CO	COV	p
Max-Emis	19228366,81	45526,796	130128,591	19511484	99201,14546	10480,7107	11672,31605
Min-Emis	804653,339	1905,169	5445,5134	816501	4151,29031	438,5884112	488,4537602
Moy-emis	10016510,07	23715,9825	67787,0522	10163992,5	51676,21788	5459,649555	6080,384905
Totaux des émissions	116142667,2	274989,736	785999,234	117852744	599192,1066	63305,30856	70502,81134
2011	CO2	SO2	NOX	CH4	CO	COV	p
Max-Emis	16480245,97	39020,1	83601	696341,556	85023,30399	8982,806072	10004,10702
Min-Emis	2210259,292	5233,207	34833,1077	93390,3169	11402,9577	1204,735088	1341,707553
Moy-emis	9345252,632	22126,6535	59217,05385	394865,9365	48213,13084	5093,77058	5672,907287
Totaux des émissions	119165302,1	282146,396	806455,013	5035103,97	614786,1947	64952,84121	72337,66037
2012	CO2	SO2	NOX	CH4	CO	COV	p
Max-Emis	23464839,29	55557,446	158799,054	991462,308	121057,5478	12789,86377	14244,00849
Min-Emis	2403035,862	5689,642	16262,6224	101535,726	12397,51209	1309,810859	1458,729923
Moy-emis	12933937,58	30623,544	87530,8382	546499,017	66727,52993	7049,837315	7851,369206
Totaux des émissions	104481693,6	247380,175	707083,2202	4414675,923	539031,9302	56949,3194	63424,17743
Unités	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg

3.1.3 Emissions sonores issue des sites industriels

3.1.3.1 Caractérisation des Sites industriels

Les résultats présentés dans ce travail prennent en compte les paramètres intrinsèquement liés et répartis comme il suit :

- ✓ Sept (7) générateurs de moteurs de marque Caterpillar utilisés à la CTM. Avec une puissance électrique apparente de 10 MW, il fonctionne à pleine puissance ;
- ✓ Huit (08) groupes générateurs produisant chacun 11MW, de marque Finlandaise WARTSILA VASA 18V38E, constituant la centrale thermique de Yassa-Dibamba d'une capacité de 88MW ;
- ✓ Trois (03) groupes générateurs produisant chacun 6.5 MW de marque WARTSILA VASA 18V32LN OYO I d'une capacité de 18MW

Les caractéristiques explicites de ces moteurs et auxiliaires dans la centrales thermiques sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 24: Characteristics of motors at the Mbalmayo Thermal Plant (CTM)

	Density /kg · m ⁻³	power /HP	ang. freq. /t · min ⁻¹	frequency /Hz	Voltage /V	Mark	Elec. power /kW
M1	850	1178	1500	50	400	Caterpillar	1600
M2	850	1030	1500	50	400	Caterpillar	1400
M3	850	1104	1500	50	400	Caterpillar	1500
M4	850	1030	1500	50	400	Caterpillar	1400
M5	850	1030	1500	50	400	Caterpillar	1400
M6	850	1030	1500	50	400	Caterpillar	1400
M7	850	1030	1500	50	400	Caterpillar	1400

Tableau 25: Caractéristiques des moteurs et auxiliaires dans la salle des Machines (CTO et CTM)

CT-DIBAMBA	Moteur V	Ventilateur Face B	Ventilateur Face A	Pompe station depotage	Pompe d'unité de fuel	Pompe d'unité de surpresseur fuel	Pompe d'unité de separation d'huile	Pompe d'unité de separation de fuel	Pompe d'unité nourrice de fuel	Pompe d'unité nourrice de fuel
Puissance unitaire en (CV)	14955,85	10197,73	10197,73	16995,28	5438,49	10197,73	10197,73	5438,49	14955,853	10197,73
Nombres unités	8	8	8	2	3	3	2	2	2	2
Nombres de pales	/	6	6	/	/	/	/	/	/	/
Débit volumétrique en (m3/h)	4,5	100000	100000	16	151200	0,54	114,84	9,72	63,6	63,6
Vitesse de rotation (trs/min)	750	1500	1500	1450	1450	1450	1500	450	1450	1450
Fréquence nominale (Hz)	60	50	50	50	50	50	50-60	50-60	50	50
Pression en cm de colonne d'air	7647,8	35,91	35,91	6,8	49,35	5,92	23,62	6,91	/	/
Fréquence d'émission sonore (Hz)	625	1250	1250	1208,33	1208,33	1208,33	1250	375	1208,33	1208,33

CT-OYOMABANG I

	Moteur V	Ventilateur Face B	Ventilateur Face A	PBD4/D5	PM D1 A1	PMD2R	Cp 30b	Cp 7b	TCmpD1/2
Puissance unitaire en (CV)	4416	20,38	14,95	10,19	10,19	10,19	20,38	2	10,19
Nombres unités	3	3	3	2	3	3	2	1	2
Nombres de pales	/	6	6	/	/	/	/	/	/
Débit volumétrique en (m3/h)	1,5	100000	100000	16	151200	0,54	114,84	9,72	63,6
Vitesse de rotation (trs/min)	750	1500	1500	1450	1450	1450	1500	450	1450
Fréquence nominale (Hz)	50-60	50	50	50	50	50	50-60	50-60	50
Pression en cm de colonne d'air	23,62	/	/	49,35	5,92	5,92	23,62	6,91	/
Fréquence d'émission sonore (Hz)	625	150	150	1208,33333	1208,33333	1208,33333	1250	375	1208,33333

3.1.3.2 Emissions Comparés des nuisances sonores dans les centrales

Compte tenu des différences dans les caractéristiques de puissance mécanique et électrique des moteurs d’une part, des méthodes empiriques de mesures et de collectes des données à l’aide de sonomètre Digital Sound Level Meter AR814 d’autre part, des méthodes diagrammatiques et surtout les calculs intrinsèques basés sur les méthodes analytique, il nous a été permis de concevoir des diagrammes de la puissance acoustique et des niveaux de pression sonores. Ces digrammes découlent d’une modélisation basée sur les niveaux équivalents sonores de plusieurs sources implémentés dans un langage Matlab Vs 2016 voir Annexe 12. A l’aide de ces figures, une comparaison du niveau de puissance acoustique de chaque moteur et auxiliaires a été réalisée. Ceci a également été utilisé pour vérifier la proximité de cette méthode avec la méthode analytique, qui repose sur les caractéristiques intrinsèques des différents moteurs.

➤ Centrale Thermique de Mbalmayo

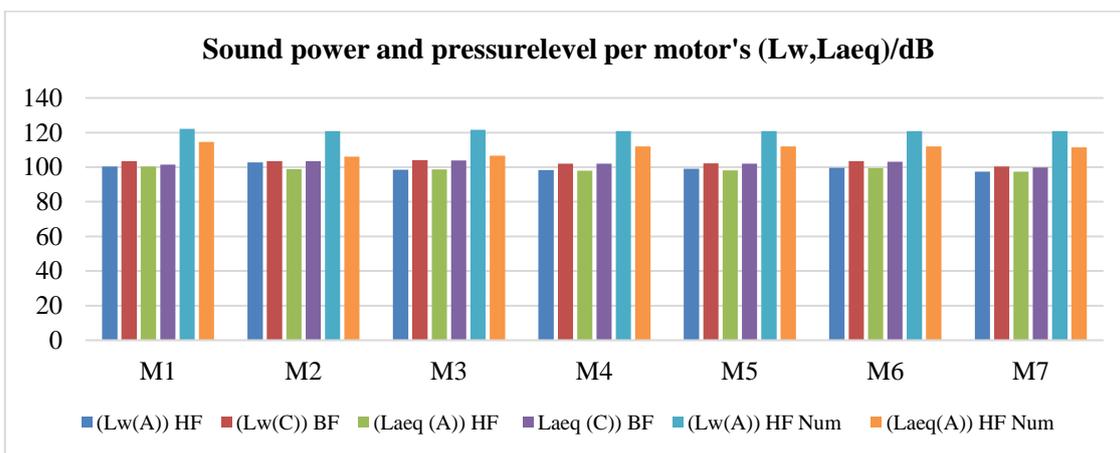


Figure 93 : Calculated values of acoustic power and pressure per motor (Lw and Laeq)/ dB

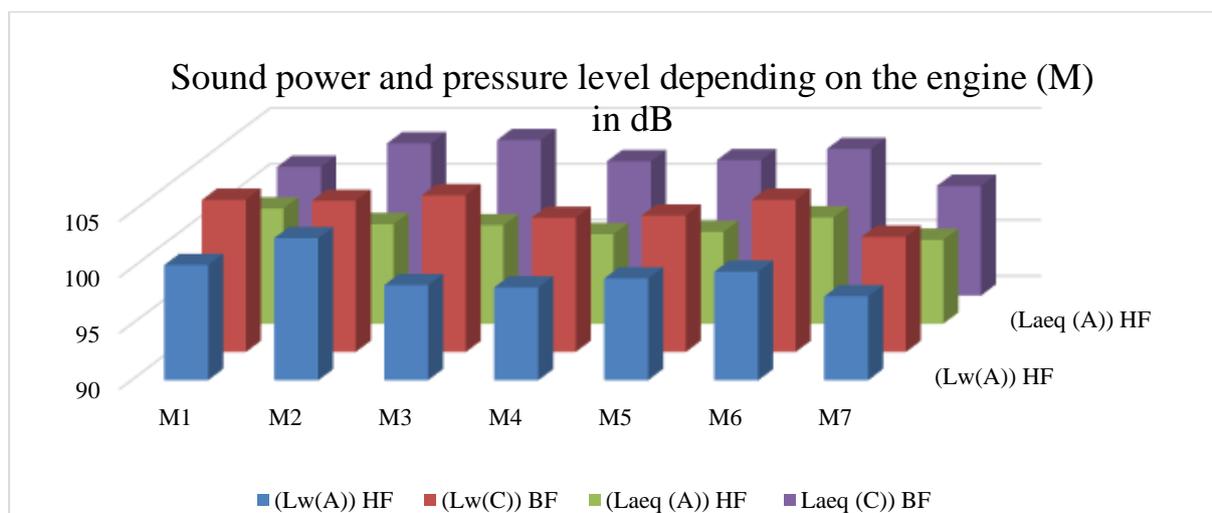


Figure 94 : Evaluation Level of sound power and sound pressure (Lw and Laeq) between motor's / dB

Les figures 99 et 100 comparent, pour chaque moteur, les niveaux de puissance acoustique (L_w) et de pression sonore (L_{aeq}) au même point d'observation. Il fournit des éclaircissements sur la forte fluctuation de diffusion des ondes sonores à basse fréquence (LF) et à haute fréquence (HF) pour le même type de niveau sonore, conformément à (Ziyu Tao et al, 2019). Il ressort de cette présentation diagrammatique que, pour le même temps d'activité et en fonction des caractéristiques des moteurs, le niveau de pression acoustique des moteurs numérotés M_1, M_2, M_3 et M_6 ont un très fort impact sonore à basse fréquence. Au contraire, seul le deuxième moteur (M_2) présente un niveau de puissance acoustique très élevé à haute fréquence (R. H. C. Wenmaekers, 2014). Cette différence perçue entre la puissance et la pression acoustique est causée par l'aspect vétuste des moteurs présentés avec haute pression acoustique. D'autre part il en ressort des calculs faits numériquement pour l'évaluation des niveaux de puissances et pression sonores, que les valeurs obtenues sont de l'ordre des dizaines de fois supérieures à celles des puissances et pressions sonores mesurées empiriquement. Cette différence est centrée sur la méthodologie d'évaluation de plusieurs sources de bruit équivalent par bande d'octaves, qui présente une accumulation sonores d'un point à un autre.

Ces résultats analytiques sont obtenus pour des niveaux de puissance et de pression acoustique lorsque les moteurs sont considérés indépendamment, ceci en tenant compte des différentes formes d'atténuations acceptées de manière conventionnelle telles que présentées par (JS Lamancusa, 2009) en vertu de la loi no. ISO 9613-1: 1996 et ISO 9613-2: 1996.

En comparant les résultats obtenus par mesure avec ceux obtenus en calculant l'équivalence numérique des niveaux de puissance acoustique respectifs, on constate que, pour les différents moteurs, les valeurs mesurées sont toujours inférieures aux valeurs calculées selon (Samuel Barsanelli Costa et Roberto Wagner Lourenço, 2011).

Tous les calculs ont été effectués dans des conditions de hautes et basses fréquences, en tenant compte des sept formes d'atténuation mentionnées dans les méthodes d'évaluation. Il s'avère que pour une collecte plus précise des données sur la puissance acoustique et les niveaux de pression, il est nécessaire d'introduire un facteur de perturbation de propagation. En effet, aux hautes et basses fréquences, le niveau de pression acoustique à la source augmente (R.H.C. Wenmaekers et al, 2008).

➤ Centrale thermique d'Oyomabang et de Dibamba

Dans le cadre des centrales au fioul lourd, l'obtention de nos résultats c'est faites comme précédemment, sur la base d'un code numérique dans un langage MATLAB Vs 2016. En prenant comme niveau de référence l'année 2010 du tableau récapitulatif des émissions sonores, on observe des niveaux de puissance acoustique L_w au niveau des sources une plage de 90-

150 dB pour les dix (10) principales sources et les niveaux de pression acoustique L_{eq} une plage de 45-110 dB pour les mêmes sources. Cette différence est due à plusieurs paramètres dont les plus importantes sont les atténuations (de distance, de diffusion, de divergence géométrique, d'habitation, de météorologie ...). Pour mieux apprécier ces différents paramètres nous avons étudiés ces émissions en un point récepteur situé à une distance (S-R) de 54,82m pour la CTO et 105 m pour la CTD. Suivant le récapitulatif par année et par nombres d'heures moyen de fonctionnement journalier nous avons obtenue des valeurs équivalentes de niveau de pression sonores fonction du temps de fonctionnement et des sources étudiés. Ces valeurs sont peut fluctuantes par rapport au niveau pris comme référence. Seule la valeur de 2012 qui augmente légèrement de 1,68 dB de celle de 2011 dans la CTO, traduisant d'une part un état vétusté des équipements d'autre part l'augmentation constatée au niveau des heures de fonctionnement pendant l'année 2011 et 2012 ce qui justifie une pollution sonore croissante.

Tableau 26 : Niveaux Annuel de pression sonore équivalent par bande d'octave sur chaque année dans les centrales thermique de Dibamba et d'Oyomabang

L_{eq} (dB)	2010	2011	2012
CT-Dibamba	107.1624	106.4674	106.3206
CT-OYO I	95.1820	95.1687	96.8465

Comme présenté dans le chapitre premier la convention internationale sur les limites de pollution sonore prévoyait de jours 70 et 55 dB en zones industrielles et zones résidentiels respectivement et de nuit 70 et 45 dB. Les valeurs équivalentes observés pour les trois années sont loin de ces valeurs limites même en tenant compte du contraste nuit et jours comme présenter dans les généralités. Ces calculs sont très proche des valeurs empirique dresser sur la cartographie sonore avec la méthode de niveau 1. Ces valeurs ont été présentées en fonction des zones exposées comme l'indique la figure ci-dessous.

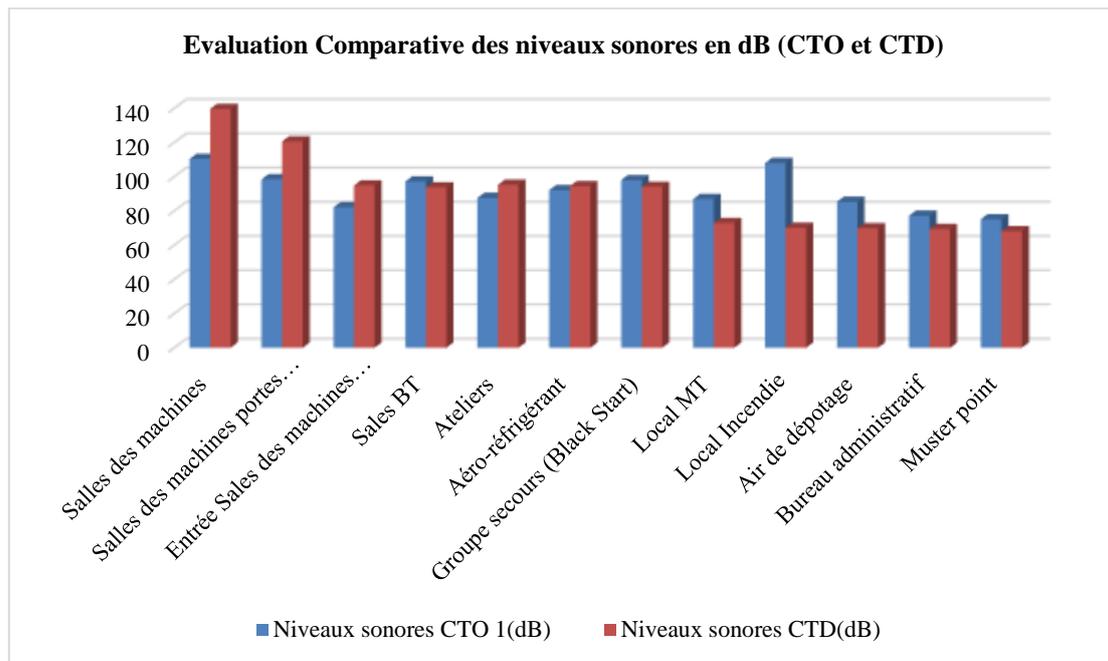


Figure 95 : Zones d'exposition sur le site comparé par niveau de Pression sonore

Le niveau de pression sonore cumulé équivalent des salles de machines et des ateliers est supérieur d'une centrale à l'autre. Ceci corrobore avec le type de source sonore qu'on retrouve dans ces zones. La puissance des équipements dans la centrale de Dibamba étant considérablement supérieure à celle des équipements d'Oyomabang, nous conduits à conclure que si les équipements ne sont pas vétustes et si on considéré les mêmes matériaux d'insonorisation, le niveau de pression sonore reste élevé dans la zones ou les puissances acoustique sont moindre. Par contre il est à noter que plus les équipements sont vétustes plus ils polluent. Il en découle d'une manière générale conformément aux normes acoustiques que les bocks administratifs des deux centrales sont exposés à de fort risque de surdité par nuisance sonore cumulée.

En approfondissant les recherches par mesures empirique et par évaluation analytiques des niveaux équivalents de puissance et de pression sonore on observe suivant chaque équipement le même phénomène.

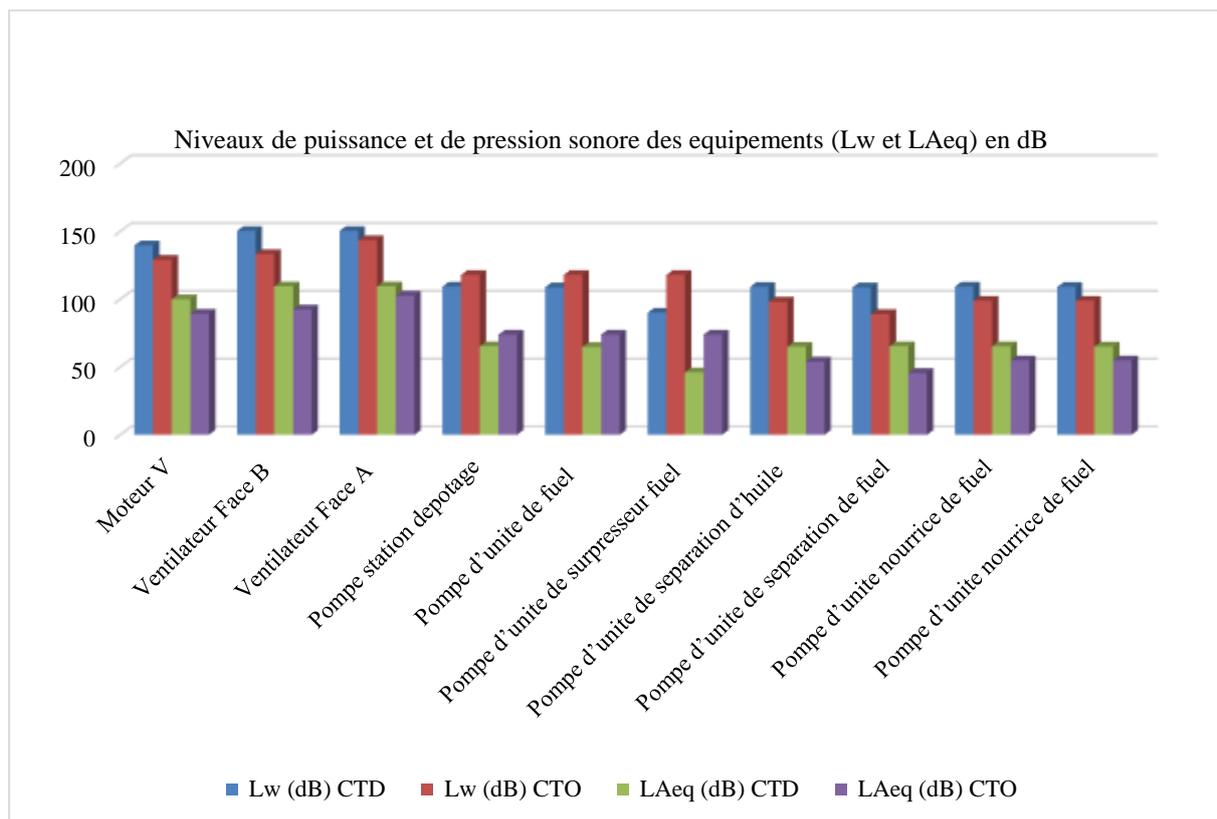


Figure 96 : Niveau de Puissance et de Pression Sonores des Principaux équipements Dans les CT-Dibamba et Oyomabang

De manière indépendante les équipements gros générateurs de bruit industriel sont ceux-là qui sont en majorités dans la salle des machines avec une puissance et pression acoustique de l'ordre de 100-115 dB. D'une centrale à l'autre on observe une meilleur prise en charge de l'insonorisation acoustique au niveau des parois ce qui rend compte de la diminution par atténuation de la pollution dans le site. Celle de Dibamba se présente comme celle étant la mieux insonorisé que celle d'Oyomabang. D'autre part on doit tenir compte de la période d'exploitation dans les centrale, ceci fonction de la demande dans la zone étudiée.

3.2 Dispersion atmosphérique des polluants et cartographie sonore

3.2.1 Dispersion atmosphérique des polluants industriels

3.2.1.1 Dispersion atmosphérique des polluants dans la centrale thermique de Mbalmayo

La vitesse de vent dans la ville de Mbalmayo varie entre $3m.s^{-1}$, $8m.s^{-1}$ et $14m.s^{-1}$ d'après les données des archives de Blue météo de la ville de Mbalmayo (voir figure ci-dessous). Ceci correspond à la classe de Pasquill de type D, qui sollicite les valeurs de l'écart type ou encore valeurs de Briggs représenté par le tableau ci-dessous :

$$\sigma_y = 0.16x(1+0.0004x)^{-1/2} \quad \sigma_z = 0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$$

Tableau 27 : Coefficients de diffusion fonction des caractéristiques vents et distance à la source

U (m/s)	3	3	3	8	8	8	14	14	14
X(m)	400	1200	4000	400	1200	4000	400	1200	4000
Valeurs de Briggs (Y/m)	59,42	157,82	396,91	59,423	157,82	396,91	59,42	157,82	396,91
Valeurs de Briggs (Z/m)	52,92	144,06	377,55	52,915	144,06	377,55	52,92	144,06	377,55
Coef Diff (Kx)/m ² /s	13,24	31,135	59,077	35,31	83,027	157,54	61,79	145,3	275,69
Coef Diff (Ky) /m ² /s	10,5	25,941	53,455	28	69,176	142,55	49	121,06	249,45

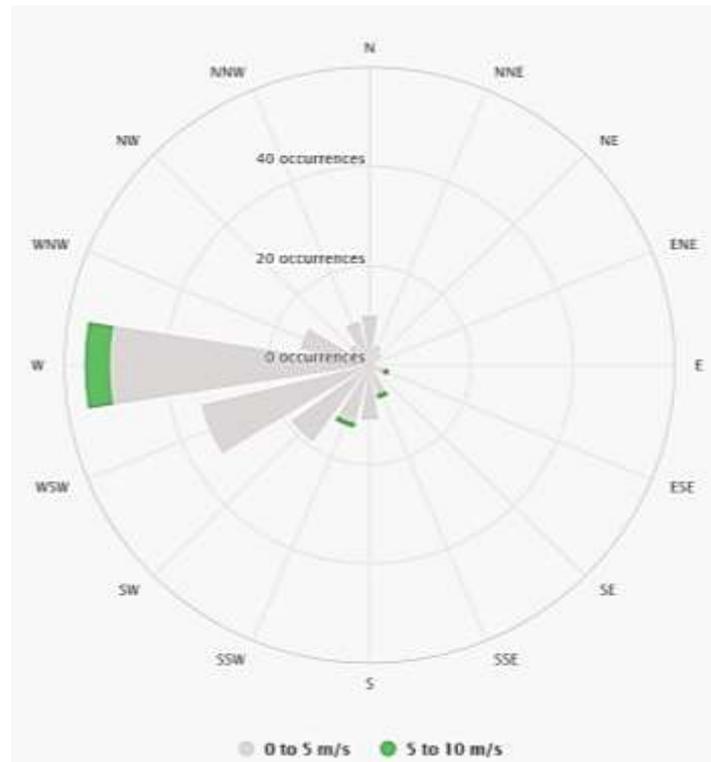


Figure 97: Rosace des vents autour de la CT-Mbalmayo

Lieu de la zone d'étude

Les espaces verts contribuent à la valorisation écologique urbaine et à la viabilisation des sites de loisirs. En particulier, les espaces verts urbains ont fait l'objet de nombreuses recherches, il a été prouvé que les parcs urbains amélioreraient la qualité de la vie grâce à la diversité de leurs installations de loisirs et surtout à l'atténuation des différentes sources de pollution environnante (Cetin M. b, 2015) (Cengiz B., 2012). 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, est devenue l'un des quartiers les plus importants. En raison de sa proximité avec la ville cosmopolite de Yaoundé, il 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 $3^{\circ} 28'06'' \text{N}$ $11^{\circ} 30'51'' \text{E}$ et occupe une superficie d'environ 1,6 hectare.

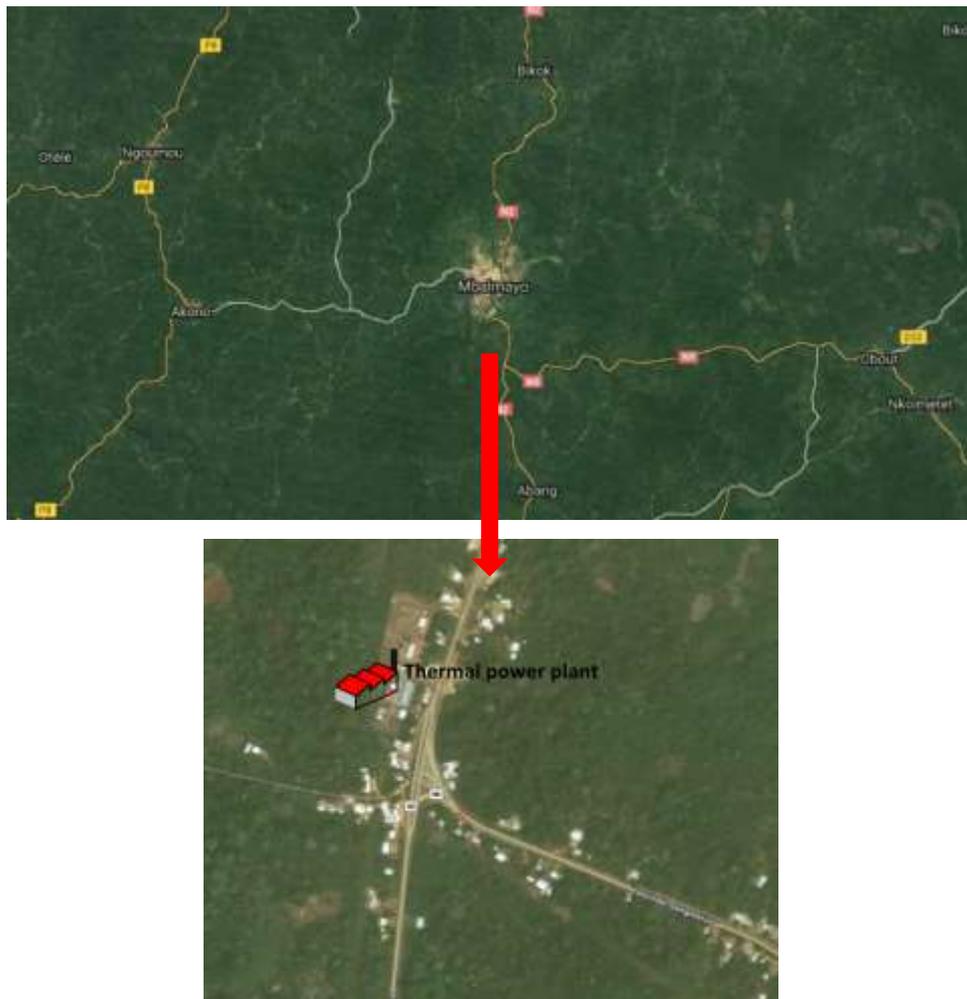


Figure 98 : Localisation géographique de la Centrale Thermique de Mbalmayo (CTM) et la réserve forestière de Mbalmayo

C'est alors qu'en estimant la distance à la source à 4000 m on a $\sigma_y = 397\text{m}$ et $\sigma_z = 377.6\text{m}$ Pour le débit massique de fumées $Q_s = 0.17\text{kgs}^{-1}$ correspondant à la plus petite valeur. L'analyse de la dispersion rend bien compte de l'extension des polluants par les vents et la diffusion (figure 105). Cette représentation de la solution analytique nous montre l'allure exacte de la distribution des polluants dans l'atmosphère à la source. On constate que les fumées de polluants sont complètement diluées à 1000m suivant les deux directions.

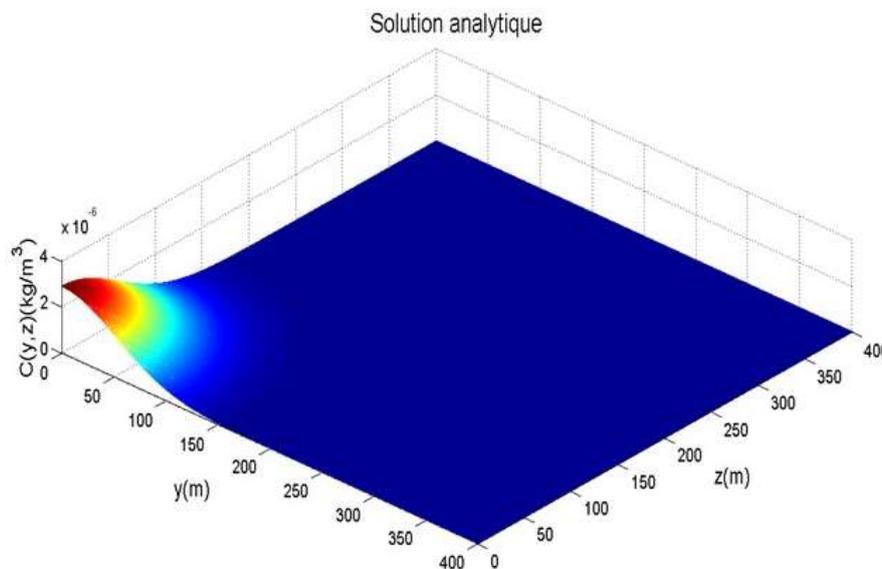


Figure 99 : Représentation de la solution analytique des dispersions de polluants issue de la source à une distance de 1000m

Cette figure représente une solution analytique de la dispersion des polluants sur le plan horizontal avec un vent de $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et un débit de $0.17\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$. On observe une grande pollution de concentration entre $2 \cdot 10^{-5}$ et $4 \cdot 10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à 500 m de la source. Cette dernière signale la présence des monoxydes carbonés, des dioxydes de carbonés, des particules et matières particulaires. Une pollution moyenne est observée entre 500m et 800m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Au-delà de 800m on observe très peu des polluants dans l'atmosphère.

Le modèle de panache, ou gaussien stationnaire été choisi pour modéliser 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).

Les détails de calcul pour la simulation ont été réalisés sur un PC Laptop HP, (4CPUs) 2 GHz, 4Go de RAM. Dans cette configuration, le temps de calcul est d'environ 1h et 45 min pour chaque cas simulés.

Les résultats obtenus à l'issue cette modélisation et de la programmation sur Silverfrost FTN95 et maillé dans MATLAB VS 2016 seront présentés et commentés, notamment des analyses tout en illustrant l'influence des paramètres de dispersion des polluants dans l'atmosphère. Les paramètres utilisés sont les suivants :

- ✓ La vitesse du vent et le coefficient de diffusion

Pour $u = 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ le coefficient de dispersion suivant (σ_y) et (σ_z) respectivement est :

$$K_y = 59\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1} \text{ et } K_z = 53.5\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$$

Pour $u = 8m.s^{-1}$ le coefficient de dispersion suivant (σ_y) et (σ_z) respectivement est : $K_y = 157.6m^2.s^{-1}$ et $K_z = 142.6m^2.s^{-1}$

Pour $u = 14m.s^{-1}$ le coefficient de dispersion suivant (σ_y) et (σ_z) respectivement est : $K_y = 275.8m^2.s^{-1}$ et $K_z = 249.5m^2.s^{-1}$

- ✓ Le débit d'échappement du polluant : $Q_s = 0.17kg.s^{-1}$
- Distribution des polluants dans l'atmosphère à $u = 3m.s^{-1}$

Pour une distance à la source maximale de 4000 m comme présentée dans le tableau 4, on a les coefficients $\sigma_y = 396,91 m$ et $\sigma_z = 377.51 m$ celle de Briggs caractérisant le type de classe de Pasquill utilisé, avec un débit massique de fumées $Q_s = 0.17kg.s^{-1}$ correspondant au débit massique à la source. L'analyse de la dispersion rend également compte de l'extension des polluants par les vents et la diffusion. Cette représentation de la solution numérique montre l'allure exacte de la distribution des polluants dans l'atmosphère à la source. On constate que les fumées de polluants sont complètement diluées à 1000 m suivant les deux directions. Le polluant étant transporté uniquement suivant la direction x et diffusé suivant le plan perpendiculaire à l'axe x, la variation de la vitesse du vent n'aura pas une grande influence sur le déplacement des polluants dans le plan perpendiculaire à l'axe x.

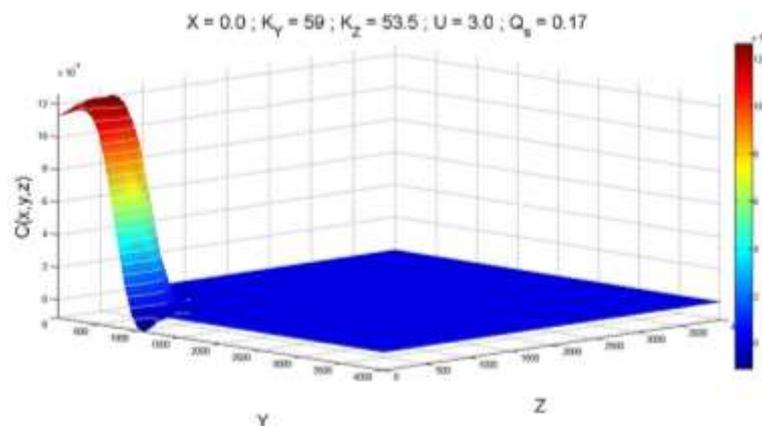


Figure 100 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0m.s^{-1}$ et $x = 0.0$

D'une manière similaire aux résultats analytiques nous observons une dispersion conique qui confirme déperdition du taux de concentration à la source. Conformément à la rosace dans la zone après un nombre d'heure de dispersion de l'ordre de 20-40h et pour des vents de l'ordre de 0-5 m/s on observe une direction majeurs Ouest (W) caractéristique des turbulences atmosphérique. Cette déperdition ce matérialise suivant un maillage de dispersion présenté par la distribution des polluants en 3 dimension pour $u = 3.0m.s^{-1}$ et un débit de $0.17kg.m^{-3}$. On observe une couleur rouge traduisant la concentration des fumées polluantes à la sortie de la cheminé qui est de $0.012kg.m^3$ et s'étant à 500 m de la source. C'est à cette distance qu'on retrouve le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, de l'oxyde d'azote et des matières particulaires. La couleur jaune et verte est une pollution moyenne qui s'observe entre

500m et 1000 m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Et au-delà de 1000m on observe presque plus de polluant.

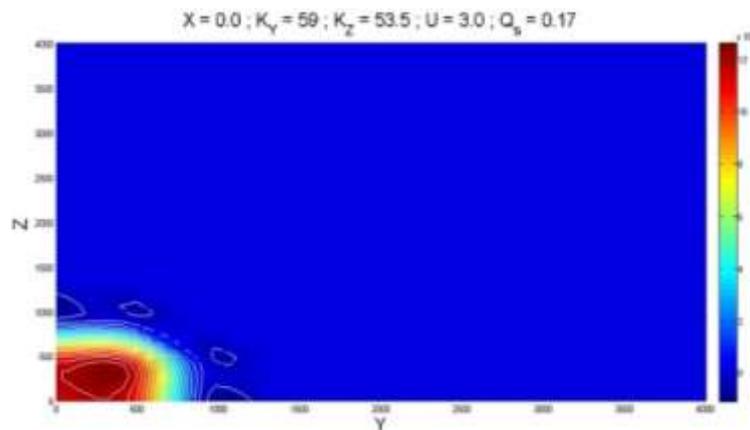


Figure 101 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0m.s^{-1}$ et $x = 0.0$. Les iso contours présentés par la concentration des polluants à l'origine (instant initial) correspondent à $x = 0$, pour la valeur de la vitesse $u = 3.0m.s^{-1}$. Pour cette valeur de la vitesse u en $x = 0$, on observe une couleur rouge, traduisant une bouffée de fumée polluante concentrée à la sortie de la cheminée, qui s'étend à 500m de la source.

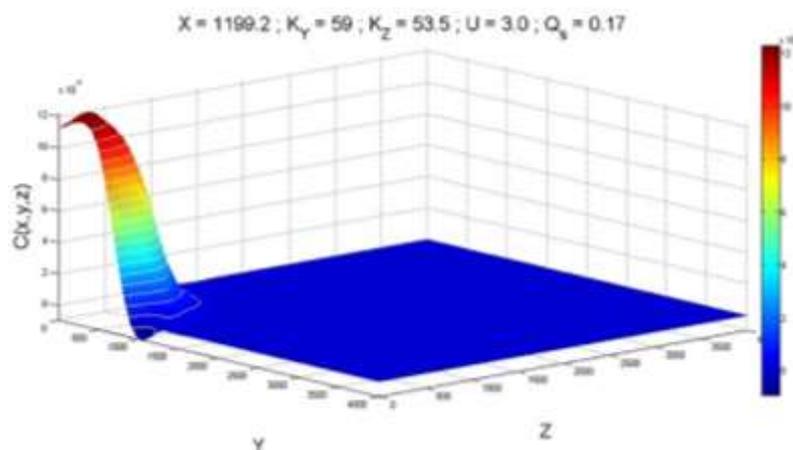


Figure 102 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0m.s^{-1}$ et $x = 1199.2$

La distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0m.s^{-1}$ et un débit de $0.17kg.m^{-3}$ présente une direction majeure W et des directions mineures WSW, celles-ci orientent la dispersion atmosphérique pour des vents moyens. En outre, on observe une couleur rouge traduisant la concentration des fumées polluantes à la sortie de la cheminée qui est de $0.012kg.m^{-3}$ et s'étend à 500 m de la source. C'est à cette distance qu'on retrouve le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, l'oxyde d'azote et des matières particulaires. La couleur jaune et verte est une pollution moyenne qui s'observe entre 500 et 1000m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Et au-delà de 1000m on observe presque plus de polluant.

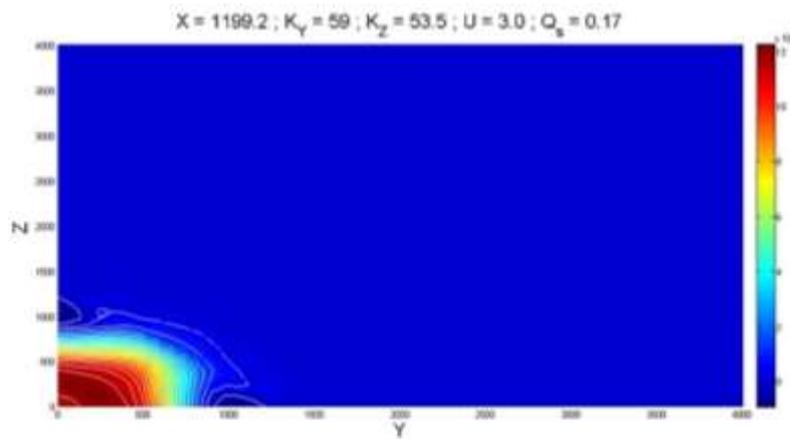


Figure 103 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u=3.0 \text{ m.s}^{-1}$ et $x = 1199.2$

Dans le plan nous observons des iso contours ; qui représente de la concentration des polluants en $x = 1199.2$, pour la valeur de la vitesse $u = 3 \text{ m.s}^{-1}$. Pour cette valeur de la vitesse u en $x = 1199.2$, on observe une propagation et une dilution de la bouffée de fumée concentré, représenté par la baisse de couleur rouge et une couleur jaune-vert qui devient progressivement de plus en plus visibles. Dans ce cas une prédominance d'un nouveau cas de polluants se fait ressentir comme précédemment présenté.

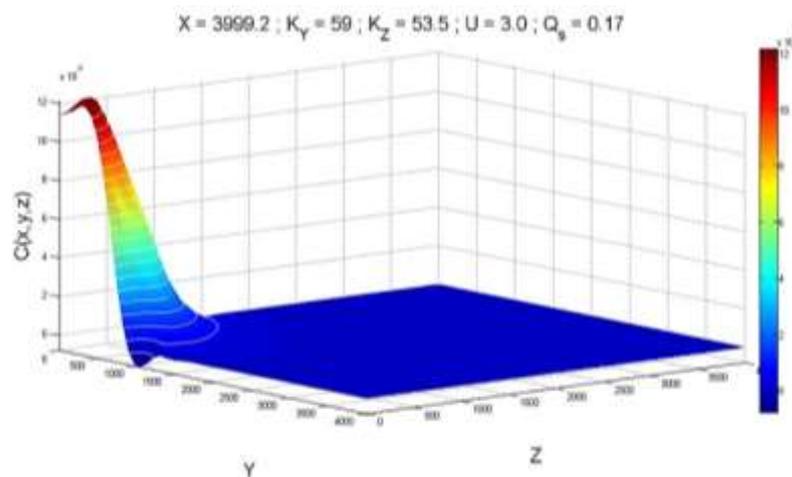


Figure 104 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ et $x = 3999.2$

Concernant ce cas de distribution des polluants en 3 dimension pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ et un débit de 0.17 kg.m^{-3} . Cette représentation conique donne une représentation succincte de la dispersion atmosphérique suivant le panache du modèle Gaussien. On observe une couleur rouge traduisant la concentration des fumées polluantes à la sortie de la cheminé qui est de 0.012 kg.m^{-3} et s'étant à 500 m de la source. C'est à cette distance qu'on retrouve le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, de l'oxyde d'azote et des matières particulaires. La couleur jaune et verte est une pollution moyenne qui s'observe entre 500 et 1000m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Et au-delà des 1000m on observe.

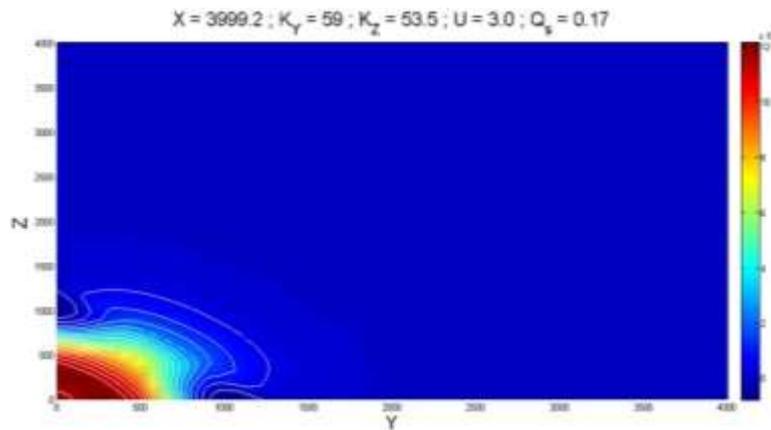


Figure 105 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0\text{m.s}^{-1}$ et $x = 3999.2$

Dans ce cas de distribution nous observons la concentration des polluants pour une valeur de la vitesse u en $x = 3999.2$, on observe la déperdition de la concentration des polluants jusqu'à une distance limite de 1750 m, correspondant à la distance maximale de dispersion des polluants. Au-delà de cette distance il y a plus de polluant, ceci est représenté par la couleur bleue.

- **Distribution des polluants dans l'atmosphère à $u = 8\text{m.s}^{-1}$**

Dans le le cas d'espèce d'une vitesse de vent supérieure à la moyenne, avec une distance à la source de 4000m on a $\sigma_y = 397\text{m}$ et $\sigma_z = 377.6\text{m}$ pour un débit massique de fumées $Q_s = 0.17\text{kg.s}^{-1}$ correspondant à la sortie de la cheminée. L'analyse de la dispersion rend également compte de l'extension des polluants par les vents et la diffusion. Cette représentation de la solution numérique montre l'allure exacte de la distribution des polluants dans l'atmosphère à la source. On constate que la bouffée des fumées de polluants est complètement diluée à 1000m suivant les deux directions. Le polluant étant transporté uniquement suivant la direction x et diffusé suivant le plan perpendiculaire à l'axe x , la variation de la vitesse du vent n'aura pas une grande influence sur le déplacement des polluants dans le plan perpendiculaire à l'axe x . comme l'indique les figures ci-dessous.

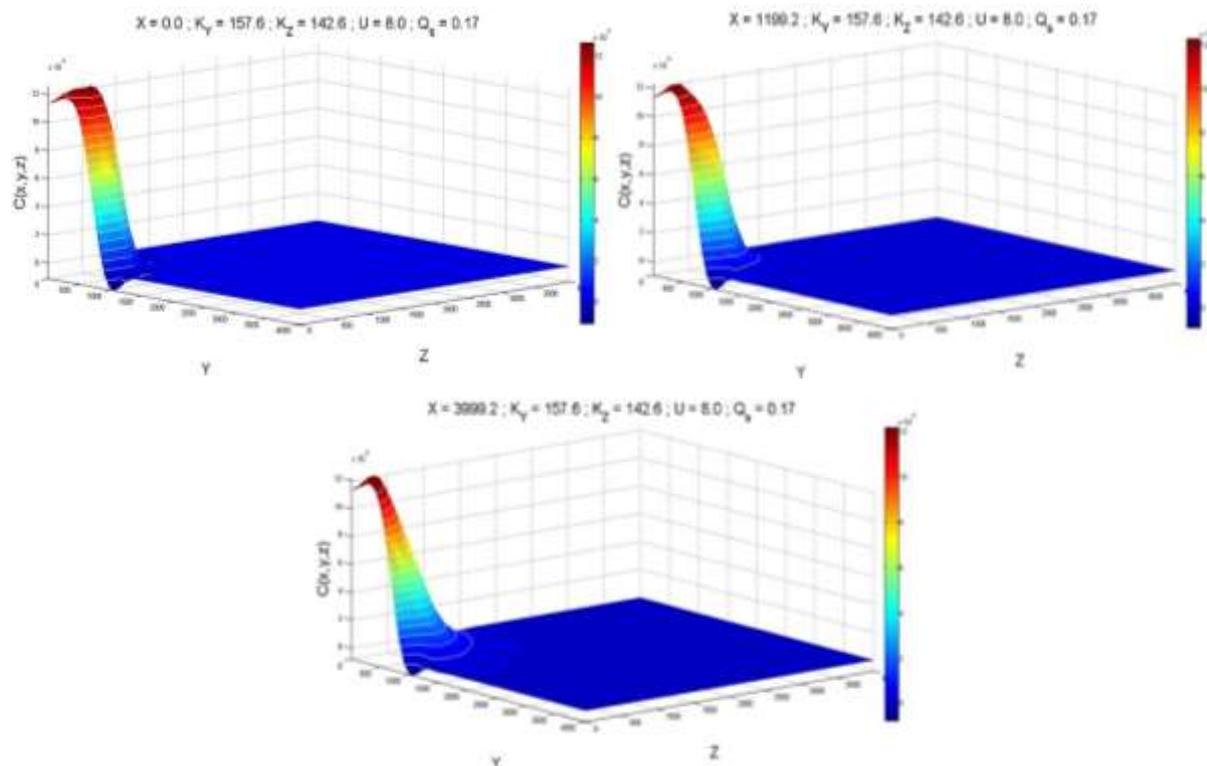
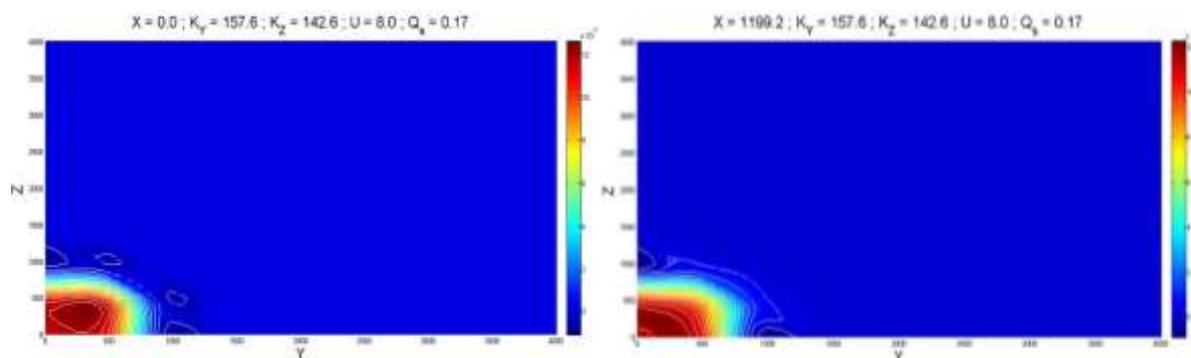


Figure 106: Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m. s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$

Pour de telles vitesses, une observation considérable ce fait ressentir quant aux excentricités à la base du cône formé perpendiculairement au plan vertical. Dans la longueur de l'excentricité plus la distance à la source est grande plus l'effet de la turbulence et de la dispersion se fait ressentir dans sur les iso contours en 2D. Cette représentation suis les formes précédentes en trois dimensions d'une distribution de polluants à des vitesses atteignant des valeurs $u = 8.0\text{m.s}^{-1}$ ayant des directions majeurs Ouest (W), d'un débit de 0.17kg.m^{-3} . On observe une couleur rouge traduisant la concentration des fumées polluantes à la sortie de la cheminé qui est de 0.012kg.m^{-3} et s'étant à 500 m de la source. C'est à cette distance qu'on retrouve le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, de l'oxyde d'azote et des matières particulaires. La couleur jaune et verte est une pollution moyenne qui s'observe entre 500 et 1000m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Et au-delà de 1000m on observe presque plus de polluant.



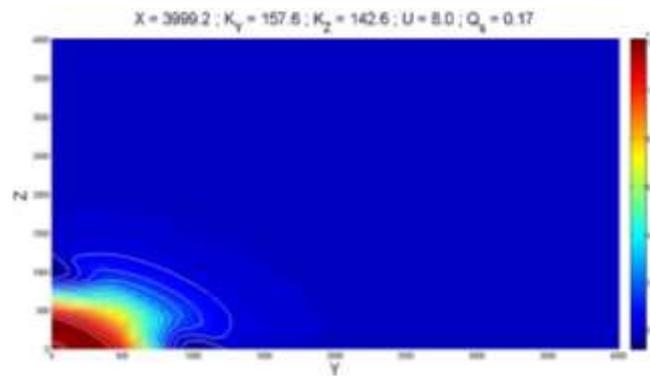


Figure 107: Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 0.0$
b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$

Dans le plan représenté la dispersion à des différentes positions x de la source on observe des iso contours de forme différentes. Celle-ci sont plus perturbés à la sortie de la source et créer des foyers secondaires, par conséquent si le vecteur de dispersion reste constant les iso contours prennent progressivement qu'on s'éloigne de la source une forme régulière de forme circulaire. Et pouvant couvrir une plus grande surface polluante. Cette répartition de concentration des polluants à l'origine (cas (a) instant initial) correspondant à $x = 0$ on observe une couleur rouge majoritaire dans un espace couvrant une superficie de 2,5 hectare, preuve d'une abondance d'oxyde de carbone dans la basse atmosphère. Preuve de la dispersion à faible distance de fumée polluante concentré à la sortie de la cheminée. Pour cette valeur de la vitesse u en $x = 1199.2$ cas (b), on observe une propagation turbulente avec une naissance de ligne concentrique et une dilution de la bouffée de fumée, représenté par une atténuation progressive du rouge et une couleur jaune-vert qui augmente progressivement de plus en plus visibles, caractéristique d'un type de polluant présenté précédemment. En $x = 3999.2$ cas (c), on observe une plus grande déperdition de concentration des polluants jusqu'à une distance limite de 1750m, correspondant la distance maximale de dispersion des polluants et de turbulence moyenne. Au-delà de cette distance, les concentrations de polluants sont quasi inexistantes, ceci représenté par la couleur bleu ciel.

- **Distribution des polluants dans l'atmosphère à $u = 14\text{m.s}^{-1}$**

C'est alors qu'en estimant la distance à la source à 4000m on a $\sigma_y = 397\text{m}$ et $\sigma_z = 377.6\text{m}$ Pour le débit massique de fumées $Q_s = 0.17\text{kg.s}^{-1}$ correspondant à la plus petite valeur. L'analyse de la dispersion rend également compte de l'extension des polluants par les vents et la diffusion. Cette représentation de la solution numérique montre l'allure exacte de la distribution des polluants dans l'atmosphère à la source. On constate que les fumées de polluants sont complètement diluées à 1000m suivant les deux directions. Le polluant étant transporté uniquement suivant la direction x et diffusé suivant le plan perpendiculaire à l'axe x , la variation

de la vitesse du vent n'aura pas une grande influence sur le déplacement des polluants dans le plan perpendiculaire à l'axe x

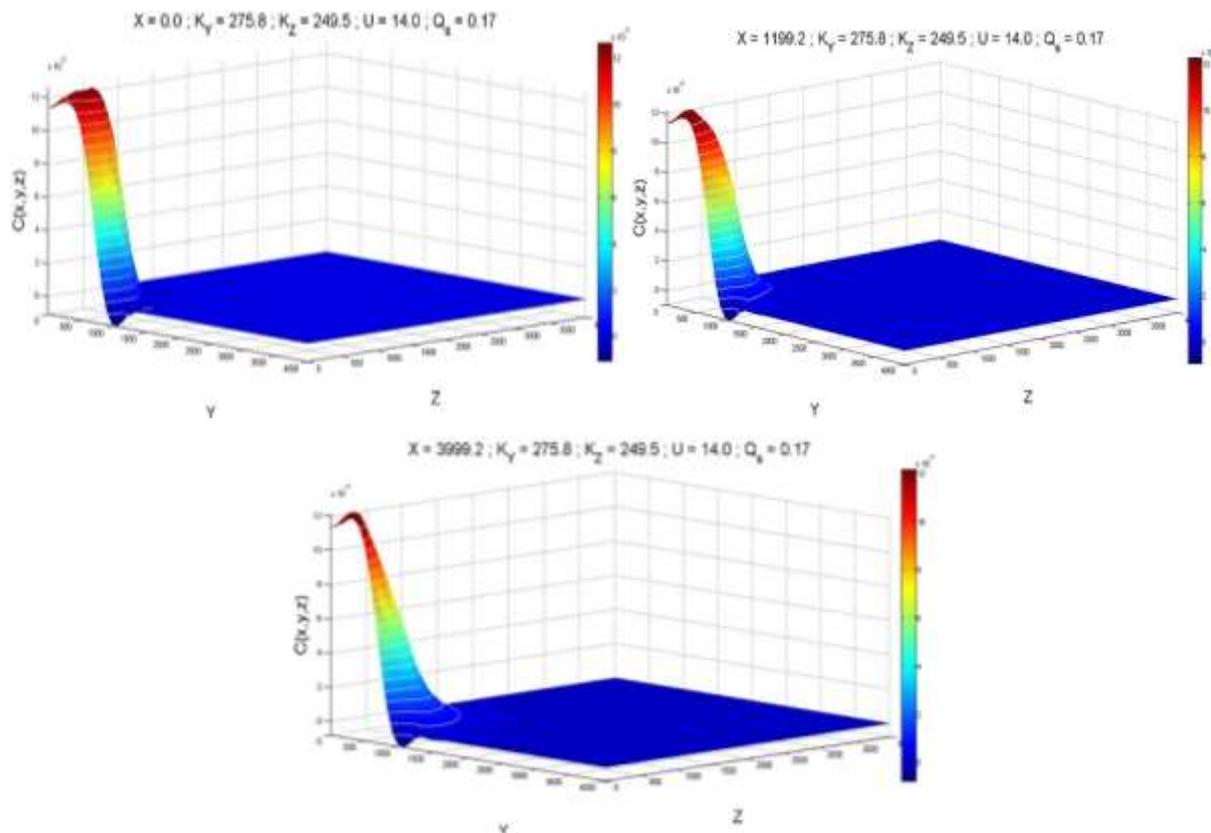


Figure 108: Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 14.0 \text{ m. s}^{-1}$ a) $x = 0.0$
b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$

Ce troisième cas de figure pour de très grandes vitesses au même débit de 0.17kg/s , corrèle d'une manière générale aux cas précédent. Pour les mêmes distances à la source un léger différent ce fait ressentir dans le cadre des dispersions et des turbulences. Ici les concentrations de polluants sont plus dispersés dans le tunnel de propagation.

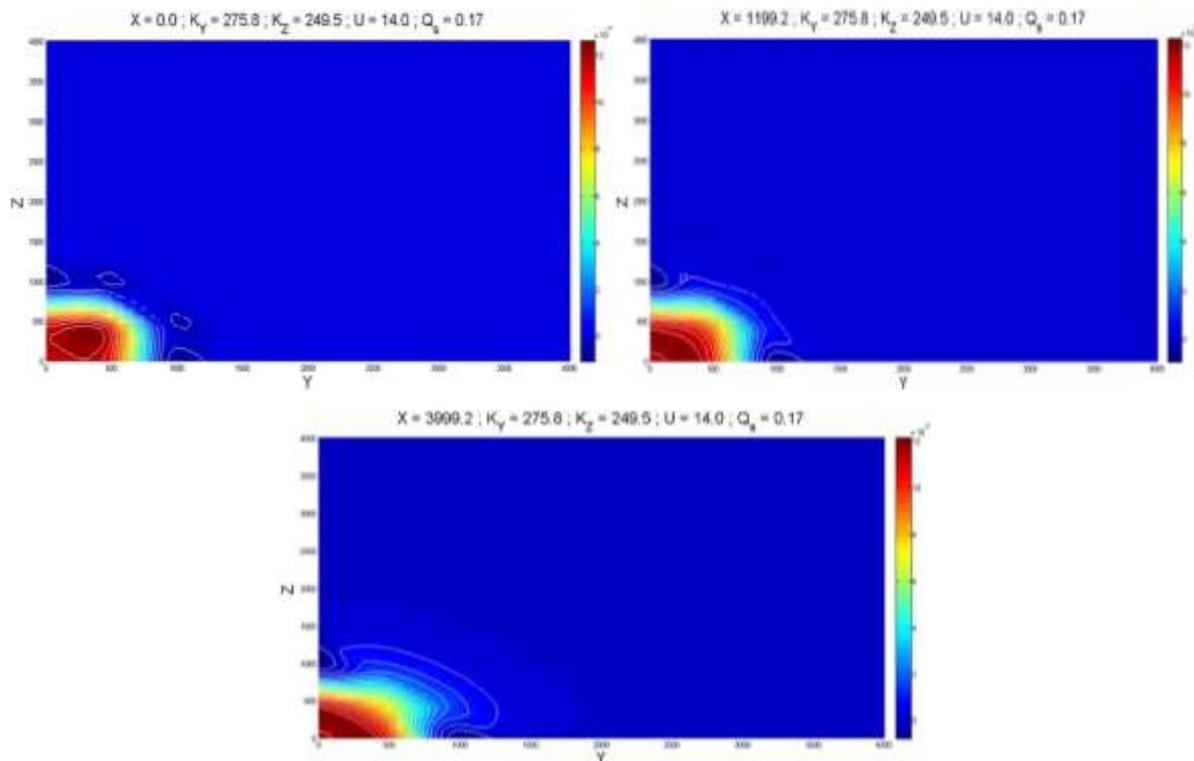


Figure 109: Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 0.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$

Les iso contours présentés dans ce cas 2D occupent les mêmes superficies de dispersion que précédemment. Si on considère le tunnel dans lequel règne les turbulences et de manière constante il est indéniable que l’augmentation du taux des vitesses n’aura pas un grand effet sur la répartition géographique et spatiale. La répartition des polluants dans cette espace suivra de manière concentrique l’évolution des iso contours

3.2.1.3 Dispersion atmosphérique des polluants dans les centrales thermiques de Dibamba et Oyomabang

- Distribution des polluants dans l’atmosphère à $u = 3\text{m.s}^{-1}$

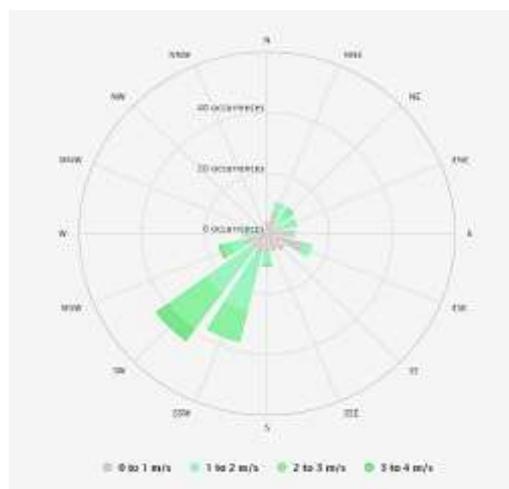


Figure 110 : Rosace des vents autour de la CT-DIBAMBA

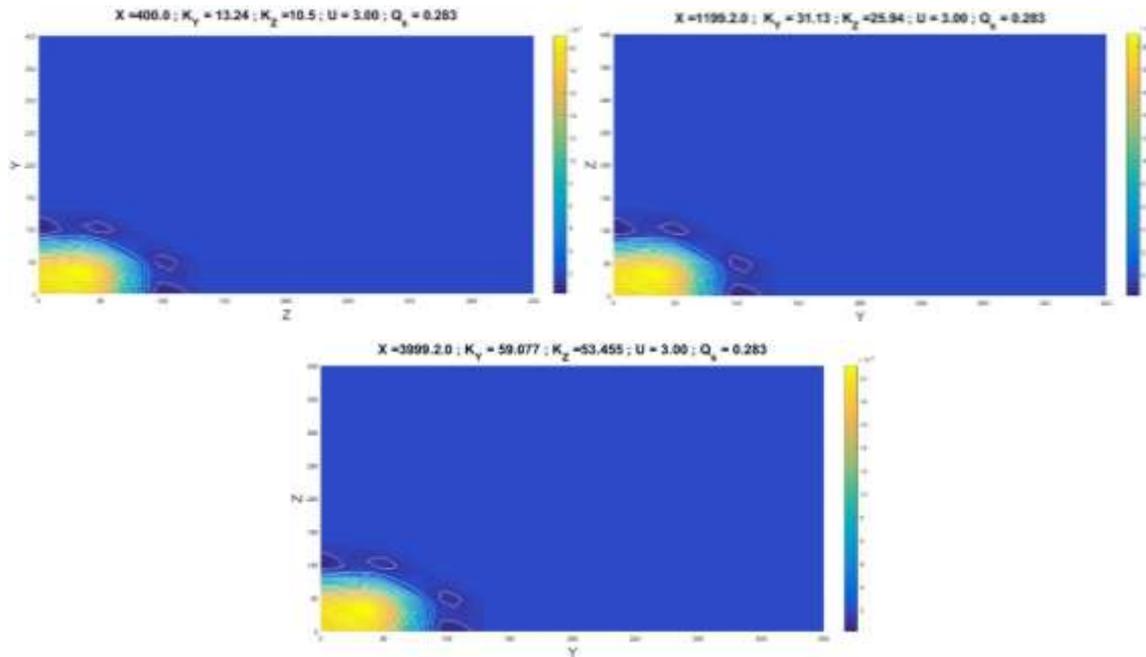


Figure 111 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 0.0$
 b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD

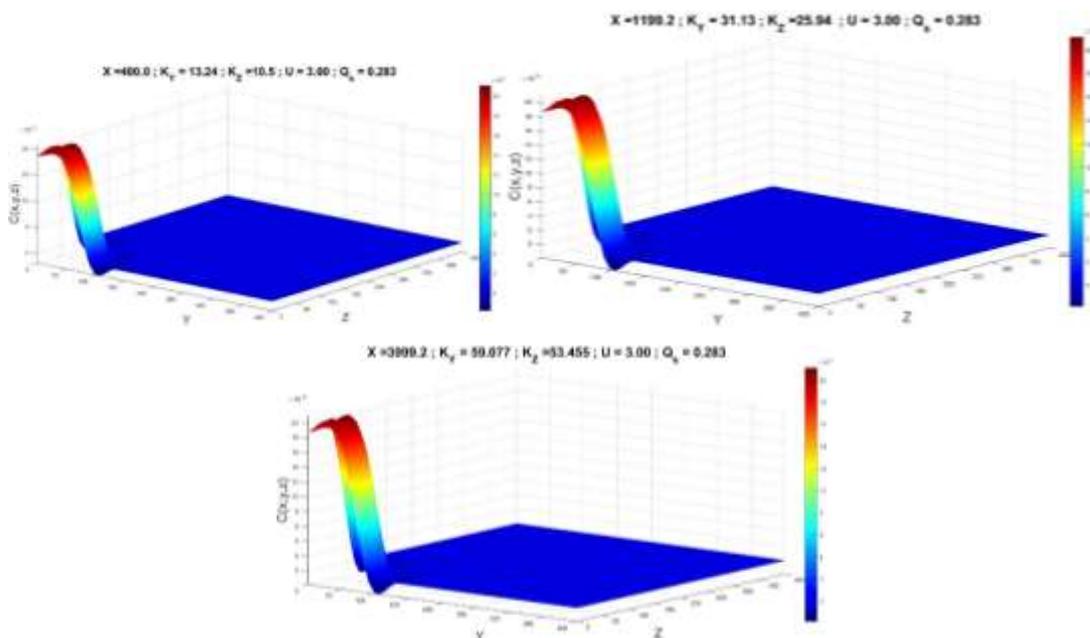


Figure 112 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD

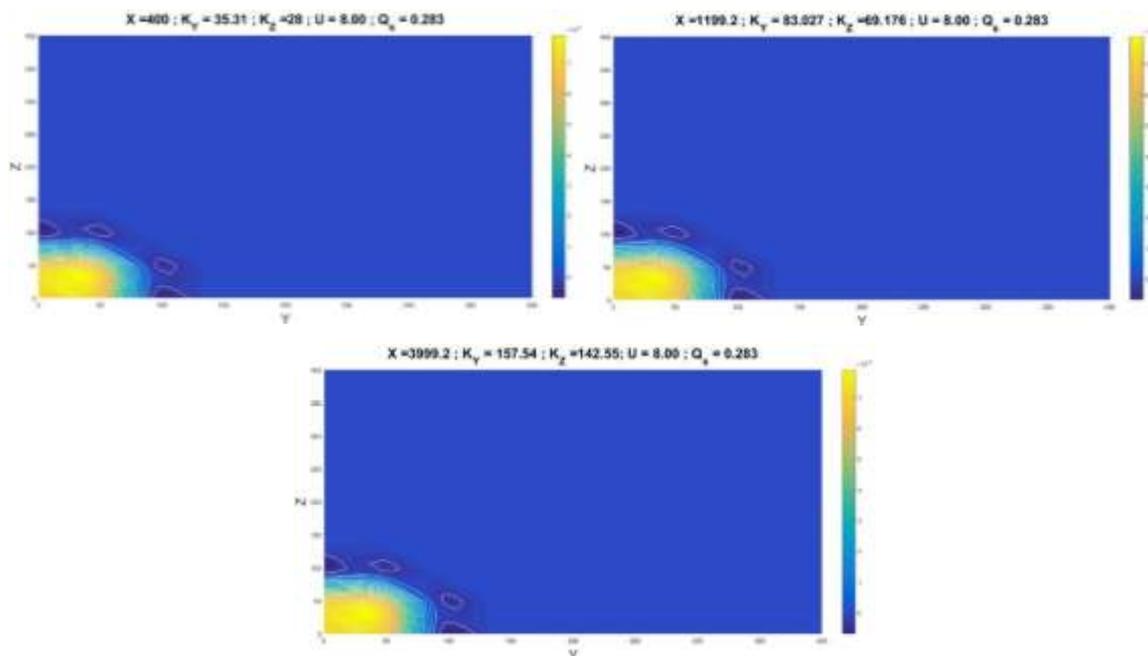


Figure 113 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD

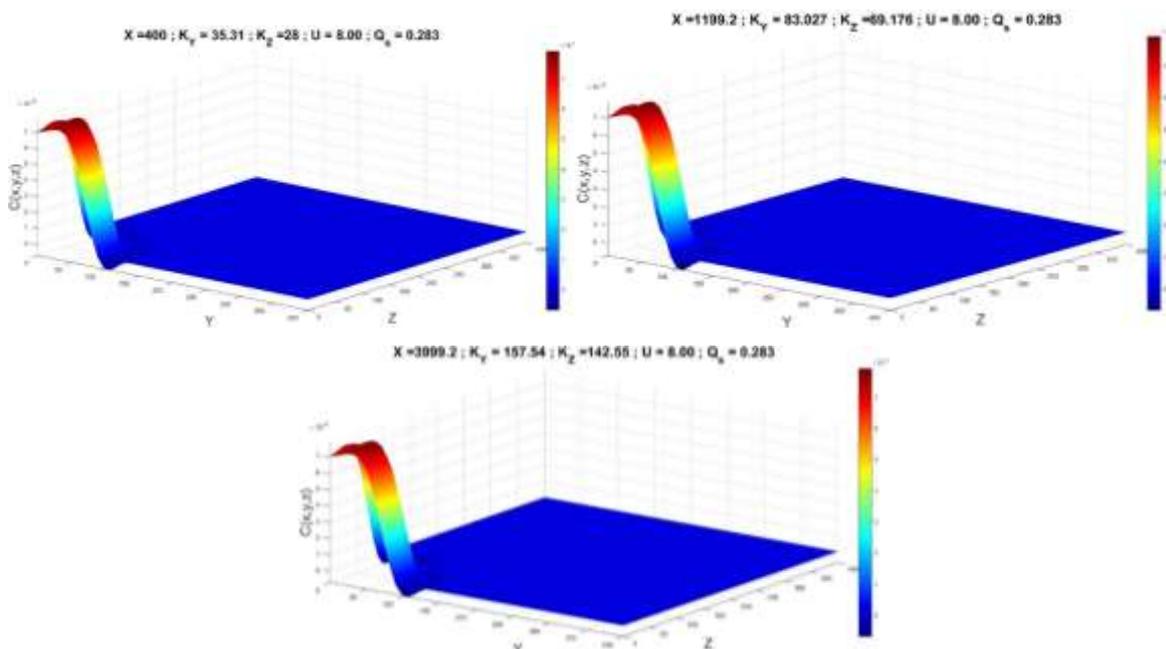
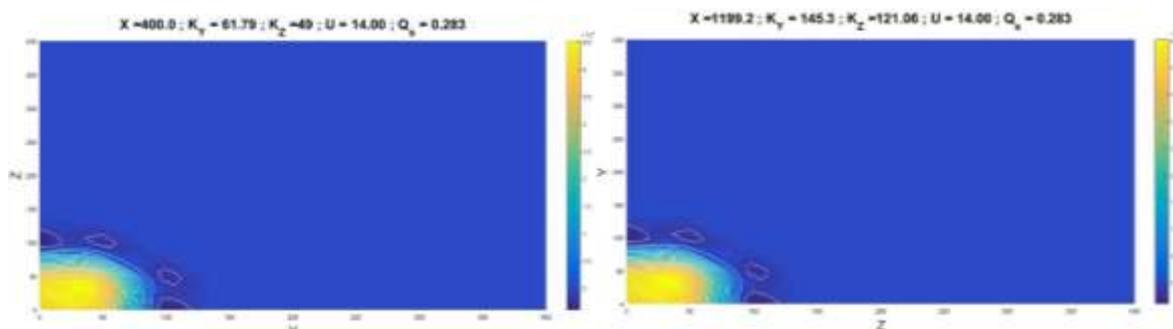


Figure 114 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD



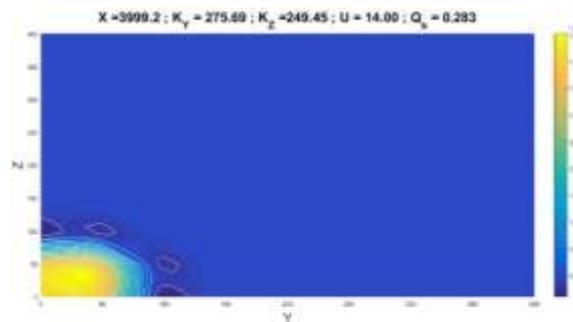


Figure 115 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 14.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD

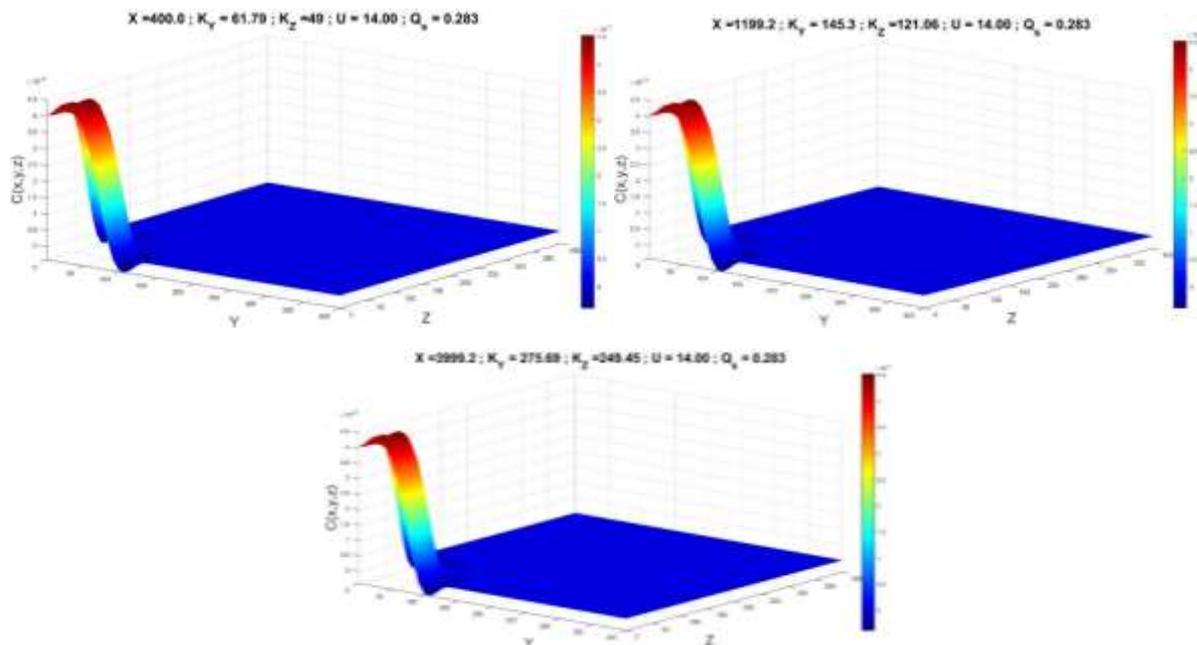


Figure 116 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 14.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2$ m c) $x = 3999,2\text{m}$ CTD

Le modèle de dispersion mathématique appliqué à la distribution des polluants en 2 et 3 dimension pour différents vitesses u suivant le débit de 0.283 kg.s^{-1} présente une direction majeurs SW et des directions mineurs SSW avec des vitesses des vents atteignant les 3-4 m/s, celles-ci oriente la dispersion atmosphérique pour des vents moyens. En Outre on observe une couleur rouge traduisant la concentration des fumées polluantes à la sortie de la cheminé qui est de 0.025 kg.m^{-3} et s'étant à 500 m de la source. C'est à cette distance qu'on retrouve le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, de l'oxyde d'azote et des matières particulaires. La couleur jaune et verte est une pollution moyenne qui s'observe entre 500 et 1000m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Et au-delà de 1000m on observe presque plus de polluant.

✓ **Centrale thermiques d'Oyomabang (CTO)**



Figure 117 : Rosace des vents autour de la CT-OYOMABANG

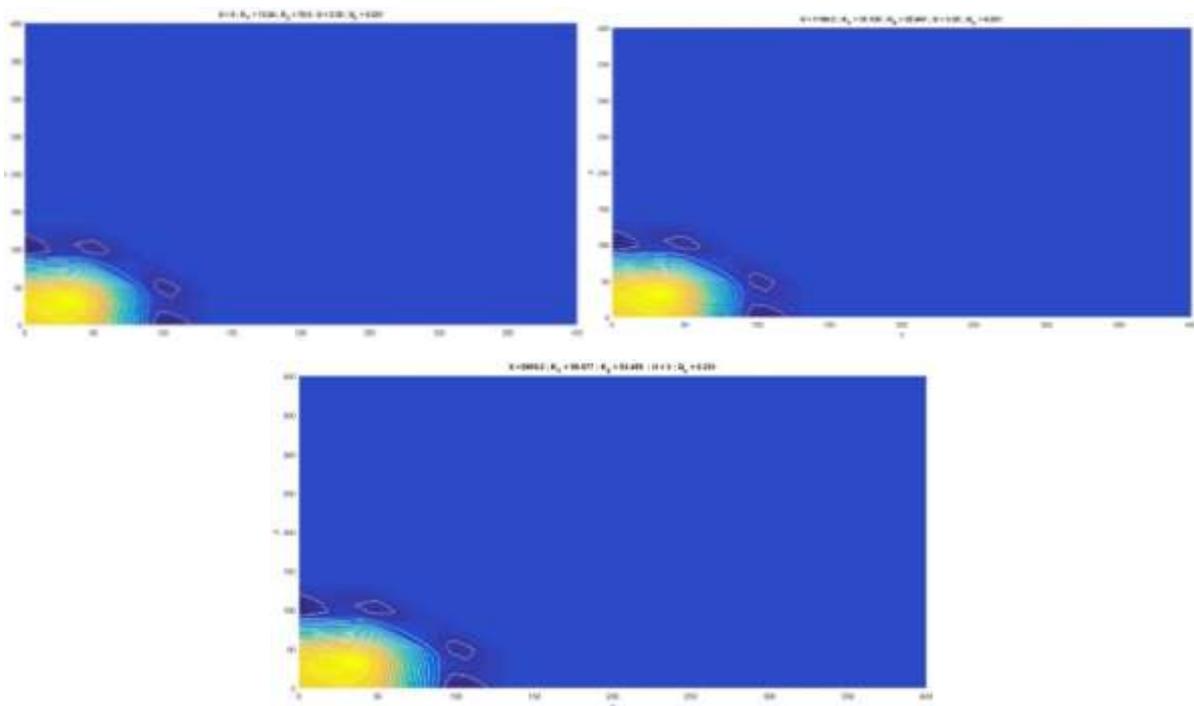


Figure 118 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m}$ CTO

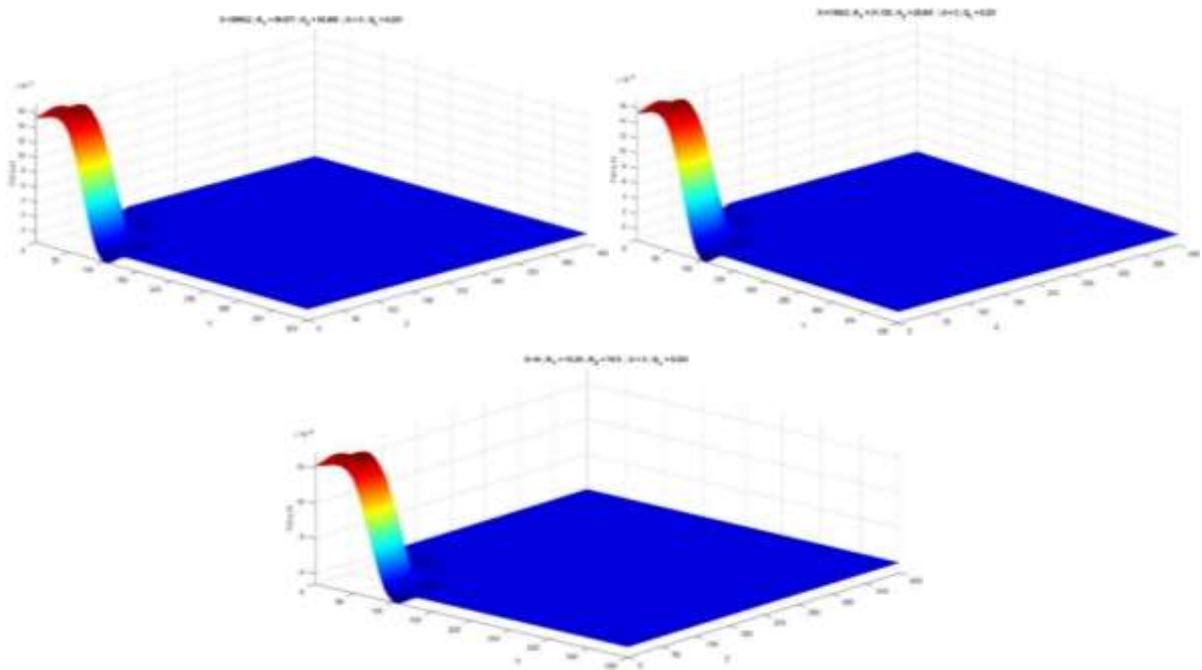


Figure 119 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 3.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m CTO}$

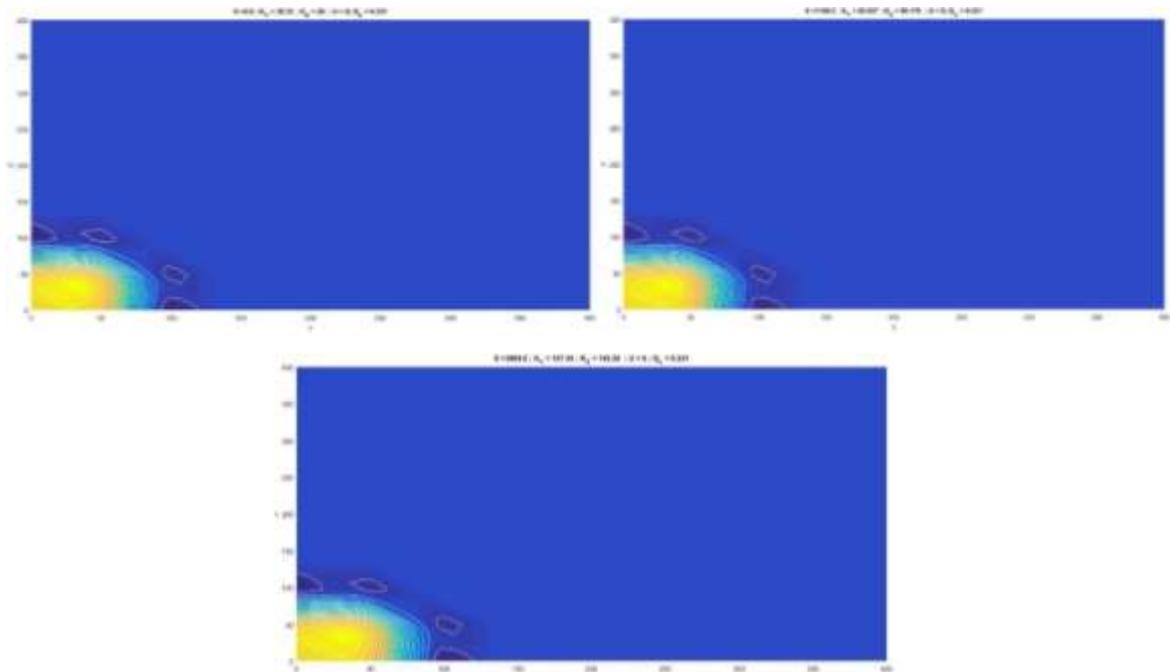


Figure 120 : Distribution des polluants en 2 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$ b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999,2\text{m CTO}$

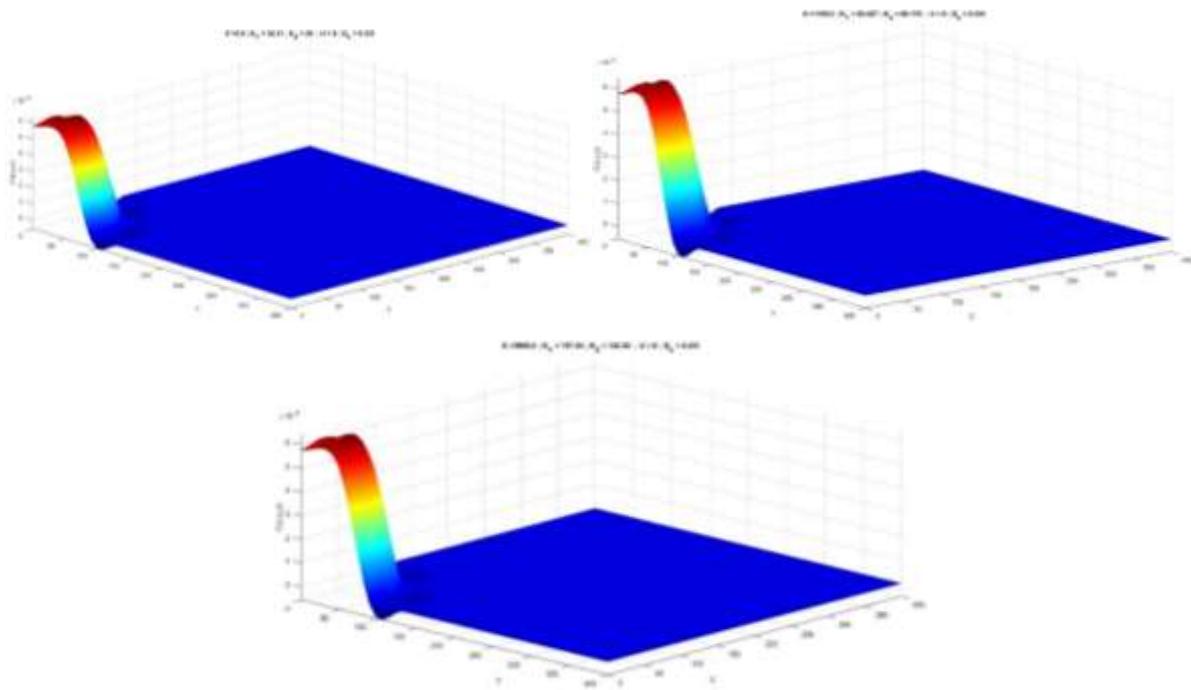


Figure 121 : Distribution des polluants en 3 dimensions pour $u = 8.0 \text{ m.s}^{-1}$ a) $x = 400.0$
b) $x = 1199.2 \text{ m}$ c) $x = 3999.2 \text{ m CTO}$

Le modèle de dispersion mathématique appliqué à la distribution des polluants en 2 et 3 dimension pour différents vitesses u suivant le débit de 0.231 kg.s^{-1} présente une direction majeurs W et des directions mineurs SSW avec des vitesses des vents atteignant les 5-10 m/s, celles-ci oriente la dispersion atmosphérique pour des vents moyens. En Outre on observe une couleur rouge traduisant la concentration des fumées polluantes à la sortie de la cheminé qui est de 0.016 kg.m^{-3} et s'étant à 500 m de la source. C'est à cette distance qu'on retrouve le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, de l'oxyde d'azote et des matières particulaires. La couleur jaune et verte est une pollution moyenne qui s'observe entre 500 et 1000m traduisant la présence du monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone et un taux faible de particule. Et au-delà de 1000m on observe presque plus de polluant.

3.2.1.3 Prototype de dispersion à différentes positions dans la direction du vent

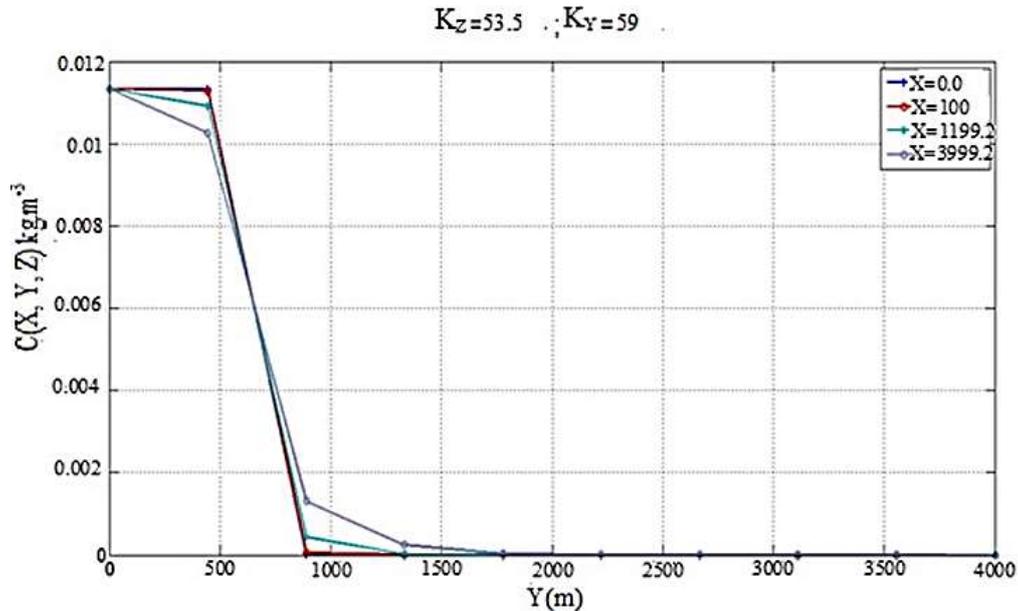


Figure 122: Moyenne de la dispersion des polluants suivant l’axe Y en fonction des positions X différentes.

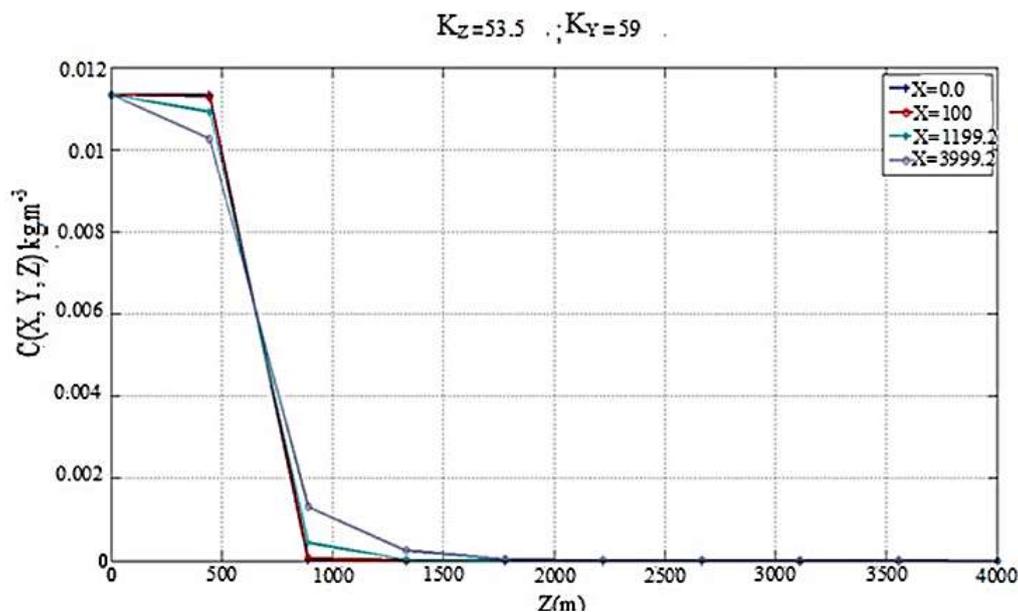


Figure 123: Moyenne de la dispersion des polluants suivant l’axe Z en fonction des positions X différentes.

Un constat inéluctable sur la concentration des polluants dans l’atmosphère se fait ressentir. A la source, des pic atteignant des valeurs de $0.012 kg.m^{-3}$ décroissent progressivement suivant une tangente de la parabole vers une valeur très minimale d’un ordre de $0.0001 kg.m^{-3}$ jusqu’à s’annuler complètement à une distance source-récepteur de 1750 m. Nous pouvons ainsi voir que la décroissance de l’amplitude de la concentration ne se fait pas brutalement, mais progressivement amortie entre des valeurs minimales jusqu’à s’annuler. Ce constat corrobore avec les différents constats analysés en 2 et 3 dimensions dans différentes positions.

récepteur-sources à différentes vitesses atmosphériques. Les populations les plus exposées sont celles comprises entre 0 et 500 m, car à ces différentes positions nous observons encore une forte concentration des polluants les plus dangereux, mais celles comprises entre 1000 et 4000 m ne sont pas en reste il sont exposée à des polluants plus volatiles les que les PM $10\mu\text{m}$, $2,5\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$ et plus loin de la source dans les 1800-300 une dilution complète des polluants tout au long de ces parcours.

3.2.2 Cartographie sonore des sites industriels

3.2.2.1 Cartographie sonore et traitement géographique de la CT-Mbalmayo

Une analyse indépendante des paramètres acoustiques s'est faite plus haut et à permis dans cette partie d'établir pour les différents moteurs de cartographier la propagation sonore autour de la centrale thermique, qui a ensuite été utilisée pour élaborer des cartes d'iso contours acoustiques.

La géolocalisation des points s'est faite par le billet de données collectés in situ. Celles-ci sont intrinsèque dans le calcul des différents niveaux de puissance acoustique et de pression. Pour ce faire, il était nécessaire de quadriller les points sonores faibles et élevés géo localisés de la zone d'étude.

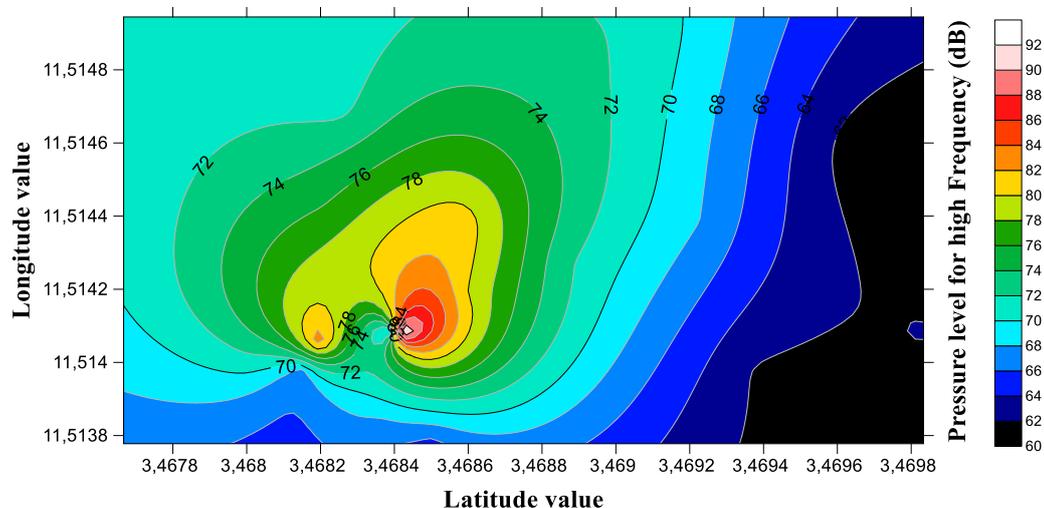


Figure 124 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de pression acoustique pour des hautes fréquences

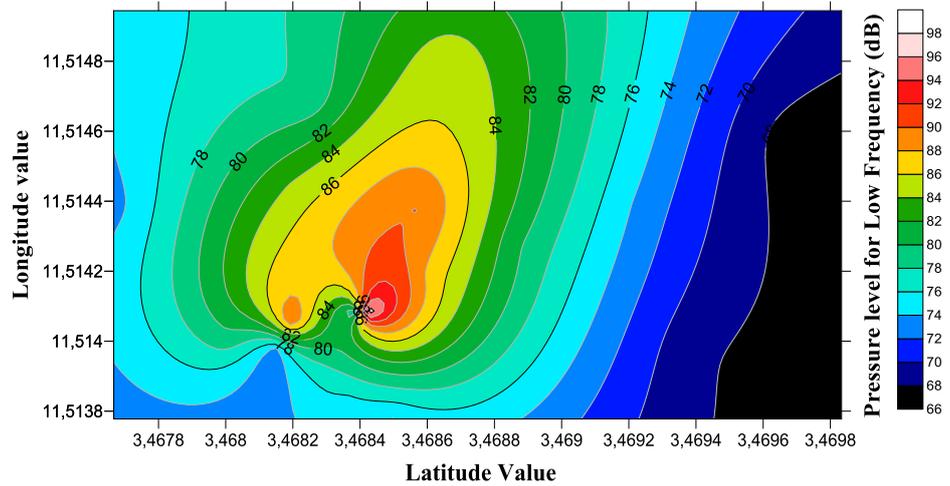


Figure 125 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de pression acoustique pour des basses fréquences

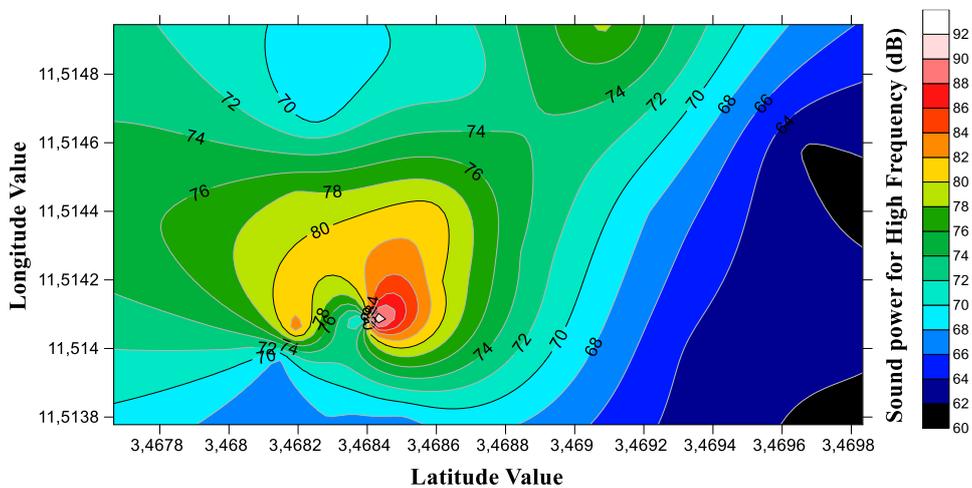


Figure 126 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de puissance acoustique pour des hautes fréquences

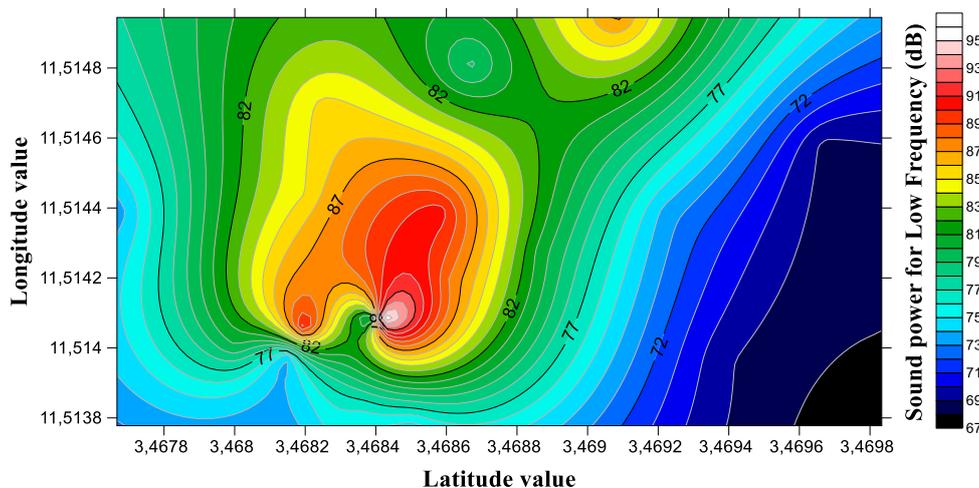


Figure 127 : Cartographie et iso contours 2D des niveaux de puissance acoustique pour des hautes fréquences

L'interprétation des différences existantes prend en compte les variables de position et de pression susmentionnées. En prenant la position de la centrale thermique comme origine

pour les coordonnées angulaires, nous avons construit des courbes de niveau permettant de suivre l'évolution dans l'espace du son pour la source étudiée. La figure 101 présente les données collectées pour la zone telle que traitée par le programme informatique Surfer 13 (Golden Software, 2015), telles que les étapes d'interpolation et de validation croisée suivantes.

Les valeurs de LAeq ont ensuite été interpolées en utilisant différentes techniques. Outre l'interpolation géostatistique (appelée «krigeage»), des modèles de distance inverse et de courbure minimale ont été réalisés. Ces résultats ont été testés par validation croisée pour obtenir la meilleure représentation spatiale des valeurs mesurées.

La technique de validation croisée compare les valeurs estimées par une méthode d'interpolation et les valeurs réelles du jeu de données échantillonné. Par le biais d'une simulation logicielle, la valeur échantillonnée à un emplacement particulier est temporairement ignorée de l'ensemble de données, puis une nouvelle valeur est estimée à l'aide des échantillons restants. Cette procédure est répétée successivement pour tous les échantillons disponibles et les nouvelles valeurs estimées sont comparées aux valeurs réelles (Isaaks E.H. et Srivastava R. M., 1989).

Les figures 120 à 123 représentent des cartes de contour de niveau sonore géolocalisées. Ces cartes ont été utilisées pour effectuer une analyse quantitative et qualitative de la nature acoustique de chacun des profils sonores de la zone d'étude. Les résultats d'une enquête acoustique telle que celle réalisée dans ce travail dépendent de la méthodologie de collecte de données adoptée ainsi que des techniques de traitement et d'analyse des données utilisées. La fiabilité des conclusions tirées de ces résultats dépend également de ces techniques. Le programme informatique Surfer13 (Golden Software, 2015) utilisé nous a permis de présenter les données dans des modèles bidimensionnels (2D) tous en notant qu'il est aussi possible de les obtenir en 3D. La présentation 2D donne des cartes de contour acoustique, qui sont facilement appréciées et interprétées (Samuel Barsanelli Costa et Roberto Wagner Lourenço, 2011).

Les données recueillies à chacun des emplacements géolocalisés autour de l'usine ont permis de constater que le niveau de pression acoustique se situait dans la plage allant de 60 dB à 98 dB, tandis que le niveau de puissance acoustique était en revanche compris entre 60 dB et 95 dB. Cette première observation prend en compte l'effet sommatif de la pression acoustique dans l'enquête. En revanche, la surface couverte par la pression acoustique reste élevée à basse pression et faible à haute pression (IEC1260, 1995). D'après les résultats obtenus, il existe une ressemblance dans la propagation des niveaux de pression et de puissance acoustiques pour les différents types de fréquence. D'autre part, la dispersion des niveaux de puissance acoustique est ressentie à différents points considérés ici comme des sources secondaires. Les sources

principales de niveaux de puissance acoustique se situent très près des sources de niveau de pression acoustique, situées aux positions géo-localisées des moteurs Caterpillar. Cependant, à très hautes fréquences, le bruit est ressenti à des distances plus courtes alors que ceux des basses fréquences présentent une puissance acoustique élevée et des niveaux de pression élevés à de longues distances (G. Andéol et al., Avril 2010).

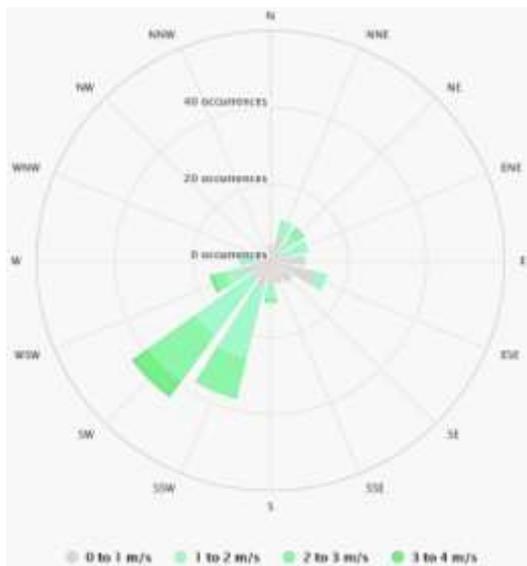
Ces travaux ont principalement porté sur la quantification et la cartographie des zones de pression acoustique et des niveaux de puissance. Les résultats de cette études dans la zones circonscrites montrent le développement de nouvelles sources (foyers secondaires) en raison d'effets cumulatifs à des distances régulières. Dans le même temps, il a été constaté que les valeurs de puissance acoustique et de pression étaient supérieures aux valeurs de seuil de l'audition humaine. Il est donc nécessaire de mener une enquête plus approfondie sur la corrélation existante entre niveau de son et fréquence, due à des sources stationnaires, dans un milieu à fort impact sonore (William J. et al, 2013).

Traitement géographique

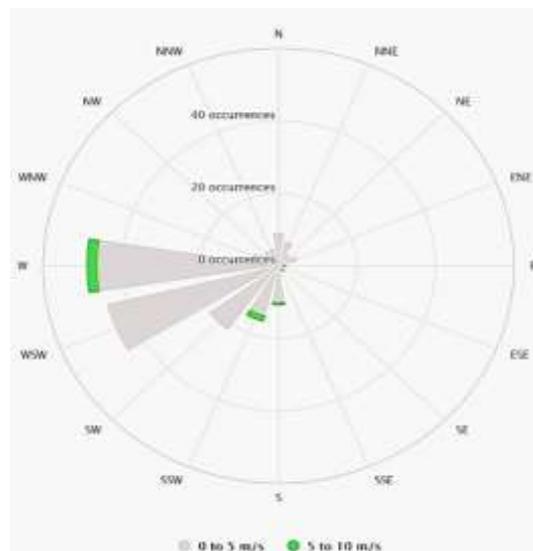
D'après les résultats de (Samuel Barsanelli Costa et Roberto Wagner Lourenço, 2011), la figure 120 présente les iso contours régulièrement espacé les uns des autres mais semblent converger sur la ligne d'iso-contour 78 dB, qui géographiquement nous donne une orientation majeure NNE-SSW. La Figure 121 présente par contre les mêmes caractéristiques avec la seule différence que l'orientation majeur est plutôt N-S avec des pics trouvés au SO de la zone. Sur les figures 122 et 123, les iso-contours ont une orientation générale NE-SO ; les pics ayant des lobes avec des directions variées, qui vont d'Ouest à Sud-Ouest pour la figure 122 et de NW-SE à NE-SO pour la figure 123.

D'un point de vue général, la distribution observée des iso-contours et leurs orientations est une indication de la répartition de la propagation des ondes sonores dans la zone d'étude. Cependant, certains des points de pic observés ne suivent pas l'orientation générale qui, d'après les cartes, est globalement NE-SO.

3.2.2.2 Cartographie sonore et traitement géographique de la CT-Dibamba et de la CT-OYO1



b- CT-Dibamba



b- CT-OYomabang

Figure 128: Rosace des vents autour de la CT-Dibamba et de la CT-Oyomabang

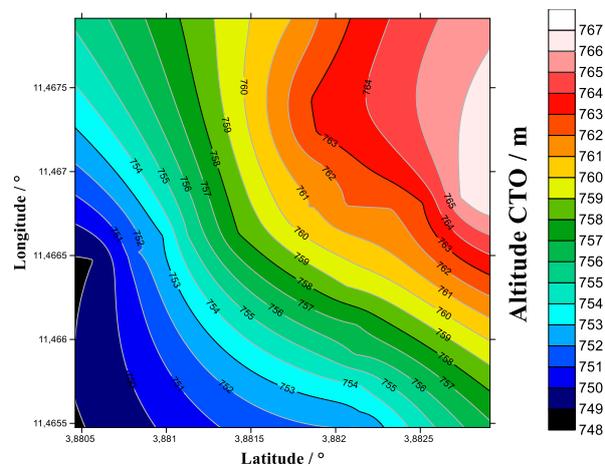
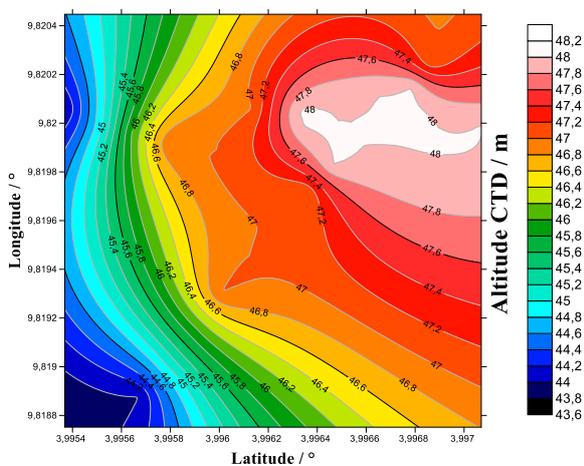


Figure 129: Cartographie des niveaux d'altitude de la CT-Dibamba et de la CT-Oyomabang

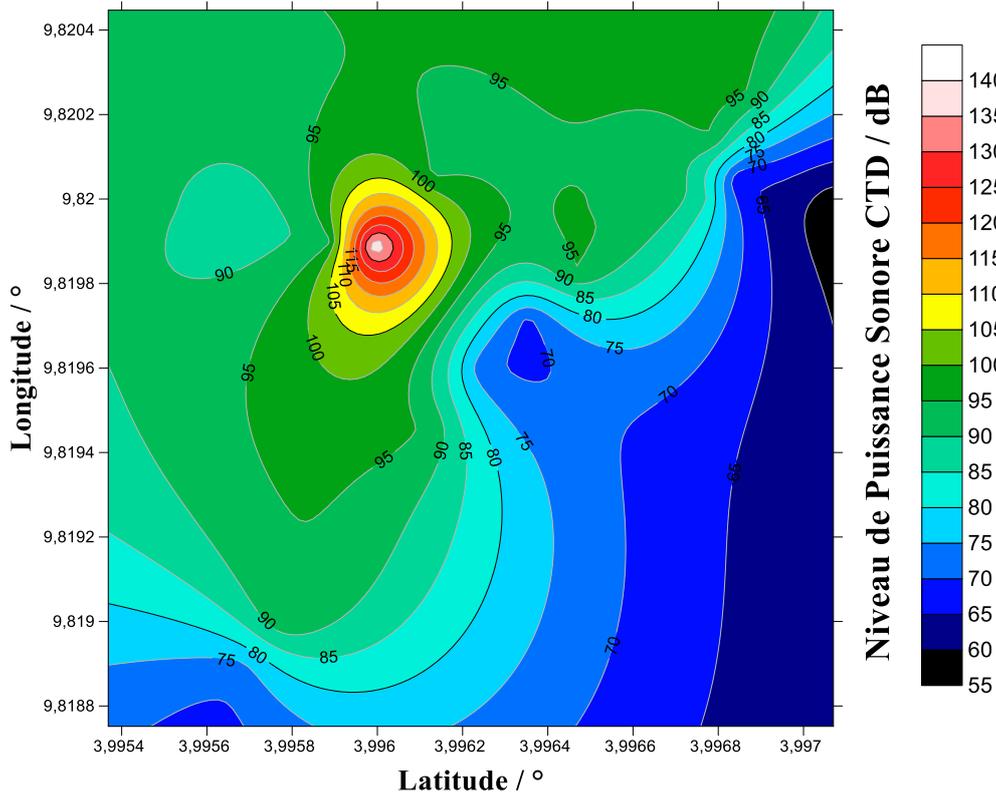


Figure 130 : Cartographie en 2D des niveaux de puissance sonore de la CT-Dibamba

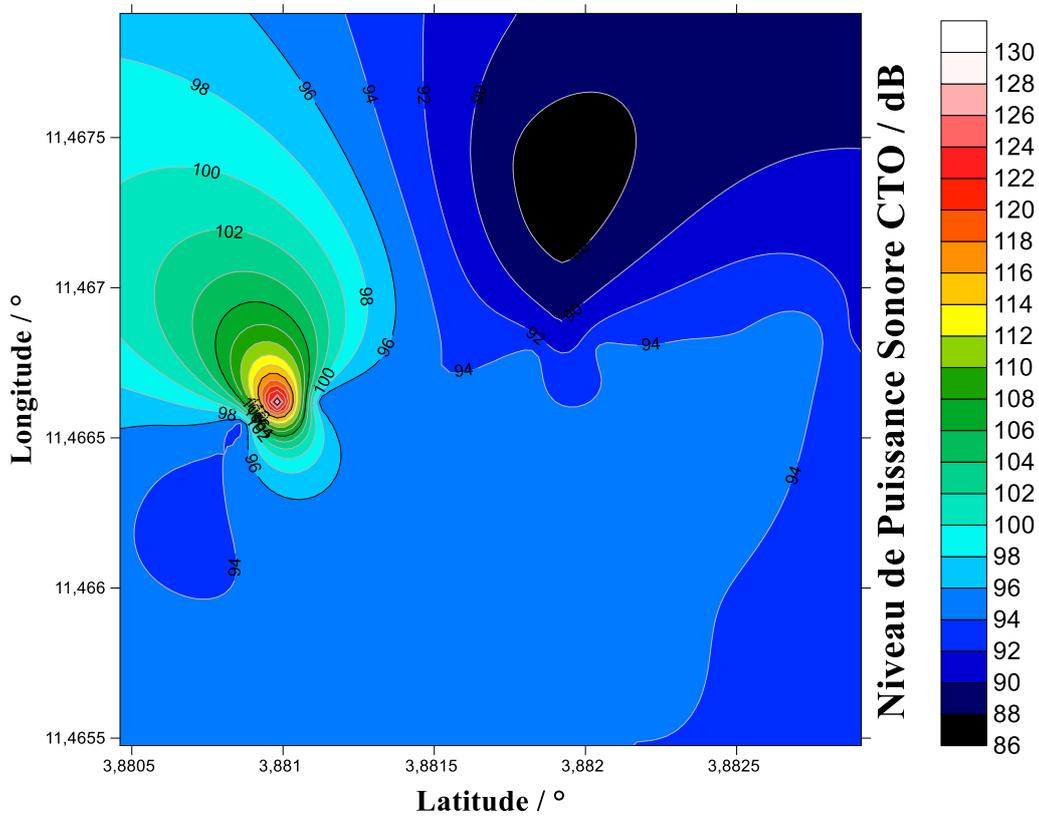


Figure 131 : Cartographie en 2D des niveaux de puissance sonore de la CT-Oyomabang

Les figures 122,123,124 et 125 corrélient les uns aux autres sur plusieurs plan. Tout d'abord, les valeurs de L_w ont été interpolées en utilisant différentes techniques. Outre l'interpolation géostatistique (appelée « krigage »), des modèles de distance inverse et de courbure minimale ont été réalisés. Ces résultats ont été testés par validation croisée pour obtenir la meilleure représentation spatiale des valeurs mesurées. Il en ressort de ces résultats, une meilleure corrélation entre les directions des vents et l'orientation majeurs des différents iso contours.

Suivant la rosace des vents, les grands vents dans le Wouri plus précisément dans la zone de Dibamba ont des vitesses comprises entre les 3-4 m/s ayant des directions majeures NE-SW et NNE-SSW, ce qui en est de même pour l'orientations des iso contours repérer sur la cartographie des puissances sonores de la CT-Dibamba. La majorité de ces iso contours suivent des directions majeures suscités on pourrait bien comprendre que le son en milieu urbain est influencé par les conditions météorologiques, ce qui entraîne la réfraction et la diffusion des ondes sonores. Une étude expérimentale sur l'effet de la météorologie sur la propagation du son en milieu urbain n'a pas encore été abordée à long terme et à grande échelle. En outre les valeurs des niveaux de puissance sonore sur la cartographie indiquent une grande couverture du vert éclairci, preuve d'une vaste zone à fort impact sonore pour des puissance comprises entre 100-130 dB. Celle-ci dénote la forte présence sur le site de multiples points isolées, qui explique la présence de nouveaux foyers secondaires autours du site principale. Géographiquement, celle-ci correspond aux l'usines situées aux alentours, en occurrence celle de la savonnerie Azur situé à proximité de la Centrale thermique.

Dans le cas d'Oyomabang les vents les plus élevés sont compris entre 5-10m/s avec une orientation majeurs W tandis que les vents à faibles vitesses de 0-5m/s ont une orientation mineure WSW. L'analyse des iso contours présentés par la cartographie des iso contours de puissances sonore se présente ici comme une atténuation progressive du gradient sonore au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source. Ainsi donc, l'orientation des iso contours atours du foyer principale prends les direction majeurs W pour des vents élevées et WSW pour de faibles vents. Nous pouvons ici comprendre une implication majeure de plusieurs éléments lier au déplacement ondulatoire sur la zone cartographie. Les effets de réfraction du au gradient de vitesse du vent, dû à l'atténuation d'habitation, du relief et surtout de l'altitude varie très rapidement avec l'augmentation de la distance. Le relief du site de campagne expérimentale étant accidenté, les champs sonores observées sont alors très sensibles aux variations suscitées. Pour les géométries source-récepteurs une impédance lier au sol à une nettes influences sur les niveaux sonores observées pour différentes fréquences **Source spécifiée non valide..** On pourra faire une meilleure observation au-dessus d'une certaine limite d'altitude.

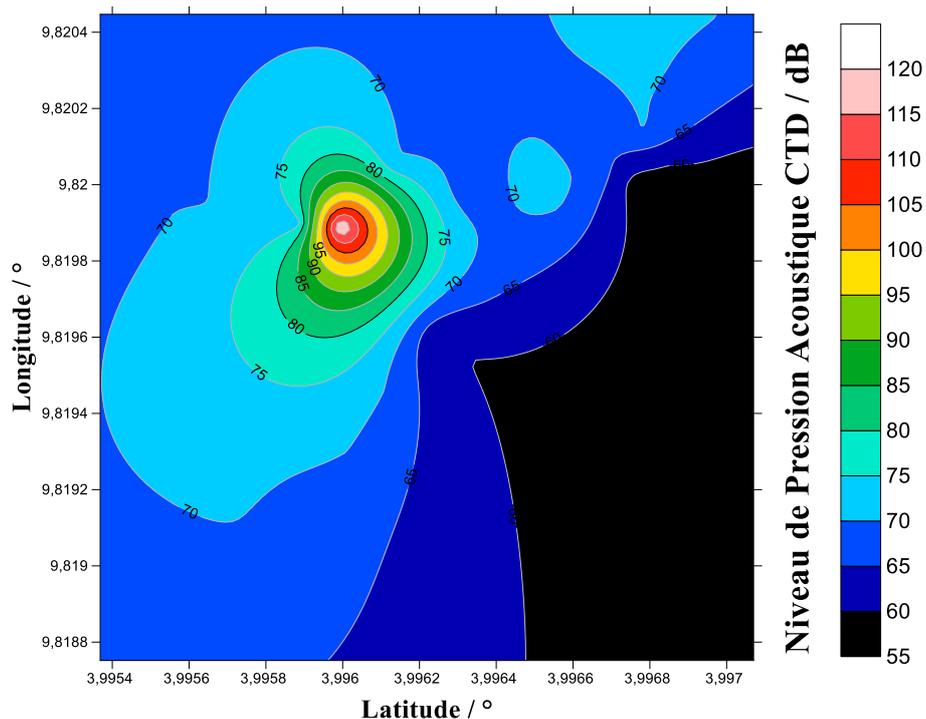


Figure 132 : Cartographie en 2D des niveaux de Pression Acoustique de la CT-Dibamba

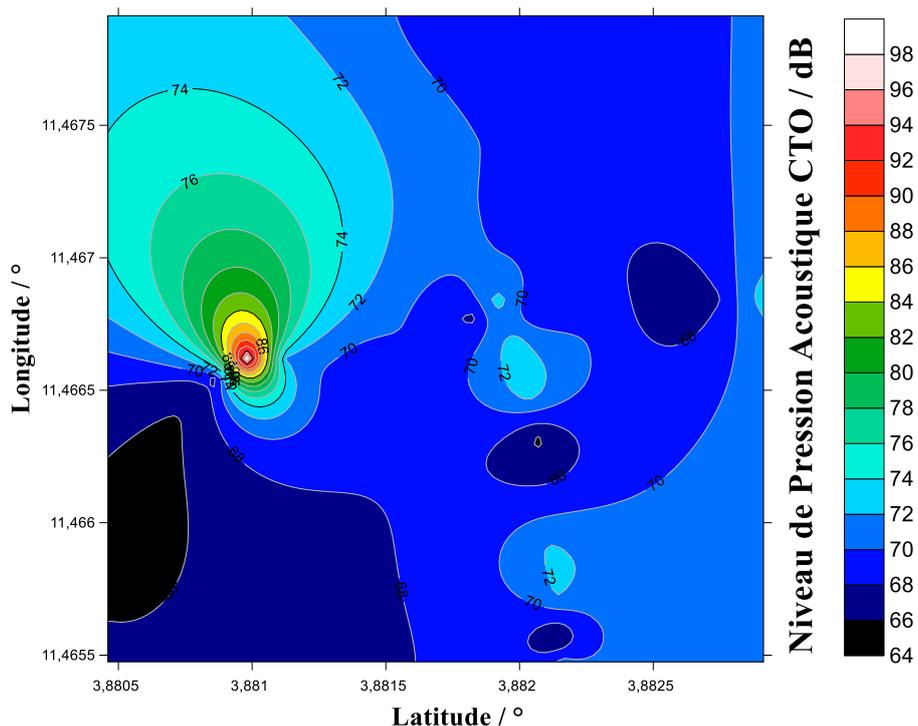


Figure 133: Cartographie en 2D des niveaux de Pression Acoustique de la CT-Oyomabang

Les figures 126 et 127 de niveau de pression sonore à la CT-O et CT-D, apparaissent ici comme des cartographies plus explicatives que celle représentant les niveaux de puissance sonore. Elles expliquent d’une part, la représentation géographique les impacts (par atténuation) que causent les différents obstacles autours des sources primaires, d’autres part leurs contributions dans l’augmentation du niveau de pression acoustique suivant des sources secondaires ou encore foyers secondaires. Les niveaux de pressions acoustique de la CT-D étant

contenue dans la plage des 90-140 dB dans les 2/3 de la surface et les 1/3 de surfaces couverte par une bandes sonore minoritaire atteignant les 55 dB. Quant aux orientations des iso contours, on constate une similitude entre les orientations NE-SW majeur et NNE-SSW mineur de la CT-D des niveaux de pression et de puissance acoustiques. Celle-ci donne une interprétation plus concrète sur le type d'obstacle aux alentours, ici représentés par un ensemble de structures industrielles qui créer par superposition sur différents points des foyers secondaire. Augmentant ainsi les niveaux de pollution atmosphérique (Samuel Barsanelli Costa et Roberto Wagner Lourenço, 2011). Quant aux niveaux de pression acoustique émis autour de la CT-O ont observent un plus grand nombre de foyers secondaires qui se créent autour des sources primaires, ne suivant pas une orientation propre à l'orientation majeur SSE-NNW. Ceux-ci rendent comptent de la position géographique de la CT-O dominés autours d'elle par des habitations urbaines et des PME de faible impulsions sonores (Collèges, résidences privées, foyers ménagers, Marché de district). Ces niveaux de pressions acoustique atteignant les 100dB avec une faible fluctuation autours de la source primaire : preuve ici de grands édifices ayant un taux élevé d'affaiblissement sonores. Mai vue le caractère divergeant et surtout diffusif présenté dans la revue de littérature, nous comprenons là, la naissance de plusieurs foyers secondaires dans la répartition géographique des pressions acoustique.

A cet ensemble d'éléments nous pouvons faire une comparaison directement liée aux deux sites. Tous d'abord la CT-D se situe à une faible altitude atteignant les 47,9 m au-dessus de la mer. Cette altitude favorise une grande dispersion sonore dans la mesure où il existe peu d'obstacles autour de la centrale. Par contre dans le cas de la CT-O on observe un relief très varié avec une altitude atteignant les 756,5m au-dessus de la mer. A ce type de relief montagneux, on ajoute un ensemble d'éléments d'atténuation très varié causée par des édifices à fort résistance sonore. On comprend dans ces deux cas les différences lier à l'altitude et au milieu de propagation (aérienne et solidienne).

3.3 Optimisations des sites industriels

Ces résultats, proposent à travers une méthodologie minutieusement choisie, l'optimisation sonore du point de vue de la performance énergétique des enveloppes des salles des machines. Ainsi des critères permettant d'évaluer la performance énergétique sont définis, comme l'affaiblissement, la compressibilité de la cavité des murs et surtout le confort acoustique du personnel et des habitants. L'optimisation a été rendu possible grâce à l'exécution préliminaire d'un tris plat et croisée suite à quoi plusieurs algorithmes génétiques effectués sur un système d'exploitation Windows 8 64-bits installé sur AMD A6-5200 APU @ 2 GHz 4core

processor and 4GB of RAM. Cette méthode est appliquée aux parois des salles de machine dans le cas de la CT-O et de la CT-D, de sorte à trouver un système optimal pour chacune des enveloppes à absorption acoustique, en minimisant les gênes que sont les masses des parois, l'épaisseur de la cavité fonction d'isolation acoustique. Ces résultats généralisés tiendront préalablement compte des performances acoustiques intrinsèque aux isolants et ou aux obstacles autours des sources de bruit.

3.3.1 Performance acoustique au niveau système

Le choix d'un ensemble de dispositifs constructifs de correction ou d'isolation acoustique dépend de la nature du bruit et du confort requis dans un milieu déterminé. Leurs mises en œuvre s'avèrent délicate et mérite d'être soigneusement préparée et réalisée pour éviter les points faibles car il sera toujours plus aisé de prévenir. Il faudra toujours avoir à l'esprit que le bruit passe ou l'air passe et que les vibrations transmises ponctuellement peuvent se propager à tous les étages et locaux de la structure. Au-delà du confort recherché, l'attention pour l'acoustique constitue une opportunité pour créer un paysage sonore par les dispositions spatiales (distribution, éloignement et proximité), la géométrie des lieux, la nature des matériaux et les textures.

La cartographie faite dans le paragraphe précédent nous a permis in situ d'avoir un vu spatial des niveaux de pressions et de puissances sonores autours des équipements sonorisant. Pour une étude plus approfondit il est important de maitriser les aires d'absorption, les coefficients d'absorption, les temps de réverbération et les indices d'affaiblissements. Les parois des obstacles rencontrés (murs, toitures, mobiliers et personnes) absorbent une partie de l'énergie acoustique émise, ce qui constitue la raison majeure de l'affaiblissement des ondes sonores.

Pour procéder à des appréciations sommaires des sites étudiés (CTO-CTD), il suffit de connaître d'abord la capacité d'absorption du son (surface d'absorption équivalente) ensuite les valeurs moyennes des coefficients d'absorption de certains groupes de matériaux acoustiques (voir annexe 13 ; Tableau 1A3).

Tableau 28: Surface In Situ pour les Matériaux isolant CTO et CTD

Matériaux / Ouvrage (Sale machine)	Surface/m ² de la CTO	Surface/m ² de la CTD
Plafond en aluminium	1400	3080
Murs Composite en tôle-laine M-tôle)	1500	2340
Murs Composite en tôle-Ouate-tôle)	1500	2340
Murs crépis-Laine de Roche	220	450
Socle/ Sol -Béton Cellulaire	1400	3080
Socle/ Sol - Béton Bitume	1400	3080
Le volume du local (Sale machine) V /m3	14000	30800

Tableau 29: Masse surfacique, Masse volumique et Epaisseur des Isolant dans le bâtiment Sale des Machines CTD-CTO

	Epaisseur / cm In-situ	Masse Volumique Kg/m ³	Masse surfacique (Kg/m ²)
Laine de Mouton	10-14	13-35	5,1
Métisse	11-14	18-75	5,8125
Laine de Verre	10-14	10-50	3,6
Laine de Roche	17-23	15-200	10,75
Ouate de cellulose à sec	12-16	25-35	4,2
Ouate de cellulose humide	12-16	40-65	7,35
Béton cellulaire	12-20	350-825	94
Béton	12-20	2350-2500	388
Tôles aluminium	0,1-0,2	2700-2800	41,25

Les caractéristiques présent dans les différents sites des isolant corrobore avec ceux de la littérature. Cela nous permettra d’implémenter ces variables dans les différentes méthodes de calcul et d’évaluation des caractéristiques d’absorption, temps de réverbération, fréquence critique et l’indice d’affaiblissement (Walter Lips, 2006), ceux à des fins d’optimisé suivant un algorithme génétique l’impact sonore sur site et dans ces alentours.

3.3.1.1 Caractéristiques d’absorption

A- Coefficients d’absorption de surfaces couvertes par différents éléments

Tableau 30: Coefficients d'absorptions des Matériaux isolant /Ouvrage des sites de la CTO et CTD

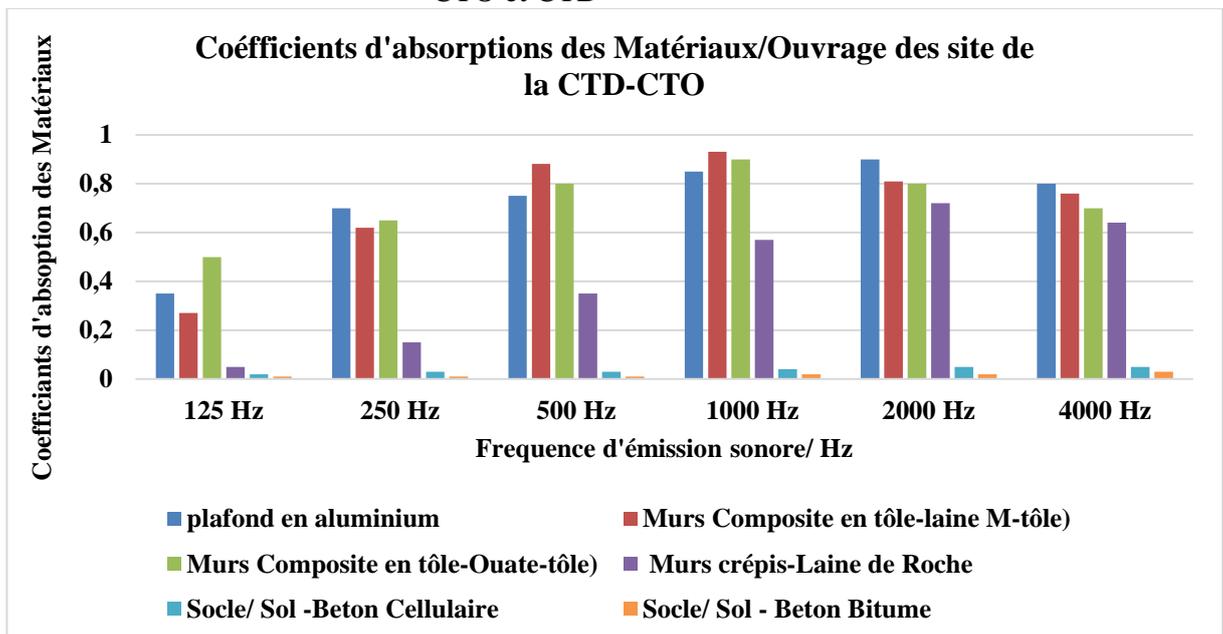


Figure 134: Coefficients d'absorptions des Matériaux isolant /Ouvrage des sites de la CTO et CTD

Si nous tenons en comptes les différentes épaisseurs d’isolants précédemment présentés couplés à une gamme de fréquences bien précises, ont peut comprendre l’importance du matériau isolant quand il s’agit d’énergie acoustique. Les isolants à faible densité, comme les matériaux en laine, en Ouate ont un faible coefficient d’absorption a basse fréquence, ce qui est le contraire pour les matériaux à densité élevée tel que le béton cellulaire ou bitume, les laines de verre et ceux de roche, qui par contre à haute fréquence ont un faible potentiel d’absorption.

Ce résultat peut être attribué au facteur suivant : lorsque l'épaisseur de l'isolant n'est pas trop importante, plus la fréquence de l'onde acoustique incidente est élevée, plus est le degré d'activation des fibres. La vibration de l'air entre les fibres accélère l'interaction entre le bord des pores et l'air. Ainsi, une grande force visqueuse se forme. Par conséquent, une grande quantité de l'énergie sonore s'atténue et se transforme en chaleur. Par la suite, la chaleur se conduit rapidement entre les pores des fibres. Par conséquent, les propriétés d'absorption acoustique du panneau en haute les fréquences sont meilleures que les basses fréquences. (EFFECT OF THICKNESS, DENSITY AND CAVITY DEPTH ON THE SOUND ABSORPTION PROPERTIES OF WOOL BOARDS, 2018). On peut comprendre ici que cette observation s'applique dans la majorité des cas aux bruit aérien. Ce qui n'est pas toujours le cas lorsqu'il s'agit des bruit solidien dit bruit de choc.

B- Aires d'absorption équivalente de divers matériaux, en m²

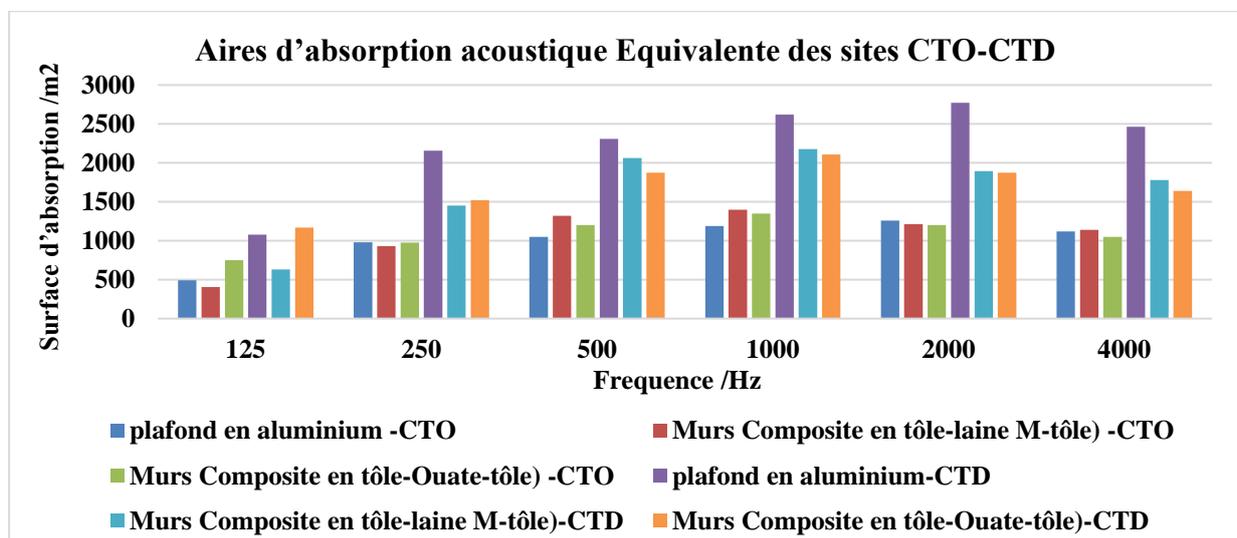


Figure 135: Aire d'absorption acoustique équivalente des sites de la CTO-CTD -a

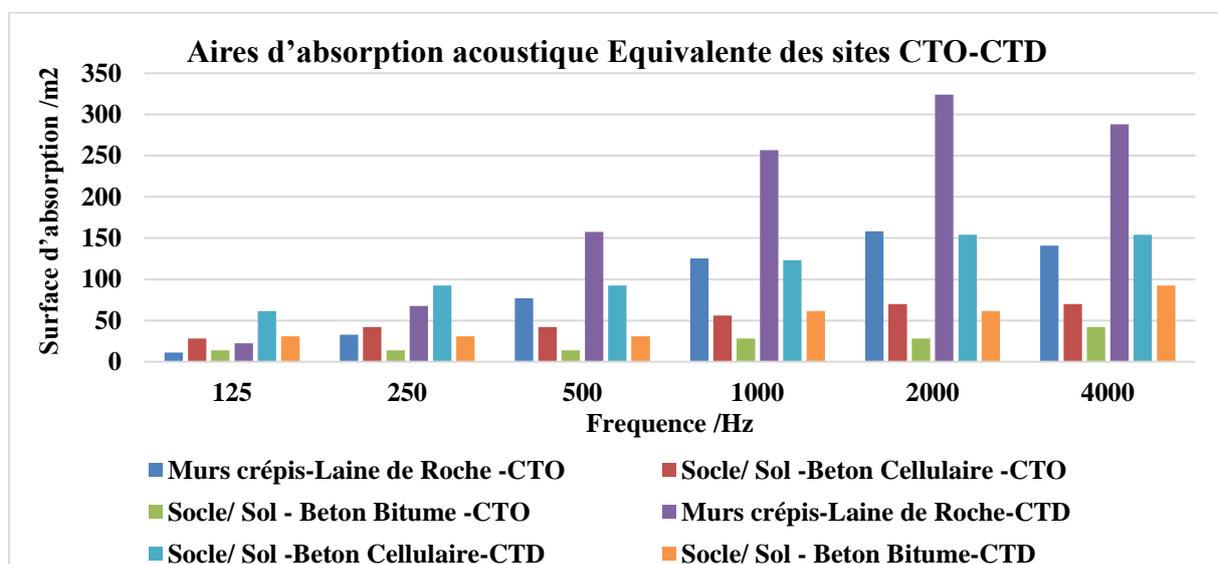


Figure 136: Aire d'absorption acoustique équivalente des sites de la CTO-CTD -b

La valeur de la surface fictive d'une surface parfaitement absorbante représente ce que nous appelons l'aire d'absorption acoustique équivalente. Dans ce cas de figure a et b ont peut bien observée une comparaison de ces aires d'absorption pour plusieurs types de matériaux provenant de plusieurs surfaces élémentaires. Un rapprochement global entre l'aire d'absorption et les coefficients d'absorption desdits isolants se fait ressentir. Suivant chaque site on peut constater un rapprochement des surfaces d'absorption quant aux types d'isolant : les isolants d'origine animal et végétal présentent une grande surface fictive dites absorbantes qu'avec des hautes fréquences. Par contre ceux d'origine de minerai présente une surface fictive élevée à basse fréquence, ceci corrobore avec les résultats sur les coefficients acoustique lier aux différents isolants dans les différentes centrales.

En outre si nous mettons en comparaisons les aires d'absorption lier aux différentes centrales, il est indéniable que celles de la CTD restent toujours supérieurs à celles de la CTO, on comprend bien que ce résultat tient comptes des natures diverses des surfaces dans les locaux. Plus les surfaces du local « sale des machines » est élevé plus l'aire absorption acoustique équivalent l'est aussi.

C- Impacts de l'épaisseur sur la fréquence critique du matériau

Il y a un point faible dans l'évolution du spectre en fréquence. Cette zone est déterminée par les propriétés physiques du matériau constitutif de la paroi : épaisseur, module d'élasticité, masse volumique. La fréquence à laquelle ce phénomène se manifeste est appelée fréquence critique dans un sens et fréquence de résonance dans un sens inverse de la rigidité du matériaux. La figure ci-dessous nous montre dans le cas d'étude que : la réduction de la rigidité d'un panneau abaisse sa fréquence de résonance et augmente sa fréquence critique, ce qui a pour effet d'augmenter la région à laquelle s'applique la loi de la masse. L'augmentation de la masse du panneau abaisse également les fréquences de résonance et augmente la fréquence critique. La diminution de l'épaisseur du panneau augmente la fréquence critique mais réduit généralement la masse du panneau. Ces résultats corrobore avec ceux de (Sound absorption performance of natural fibers and their composites , 2012). Augmenter la quantité d'amortissement appliquée au panneau ne modifiera pas les fréquences de résonance et de coïncidence mais agira pour réduire leur effet. Une bonne isolation est donc une combinaison de faible rigidité, de masse élevée et d'amortissement important (compte tenu des contraintes de coût).

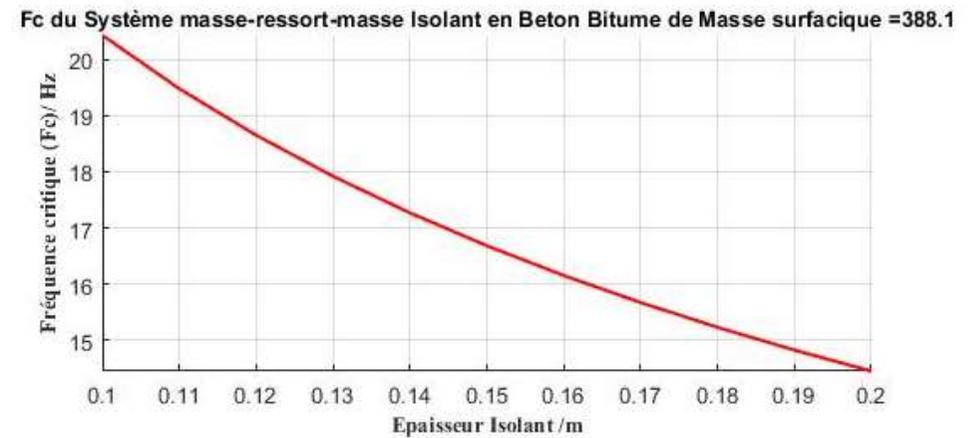
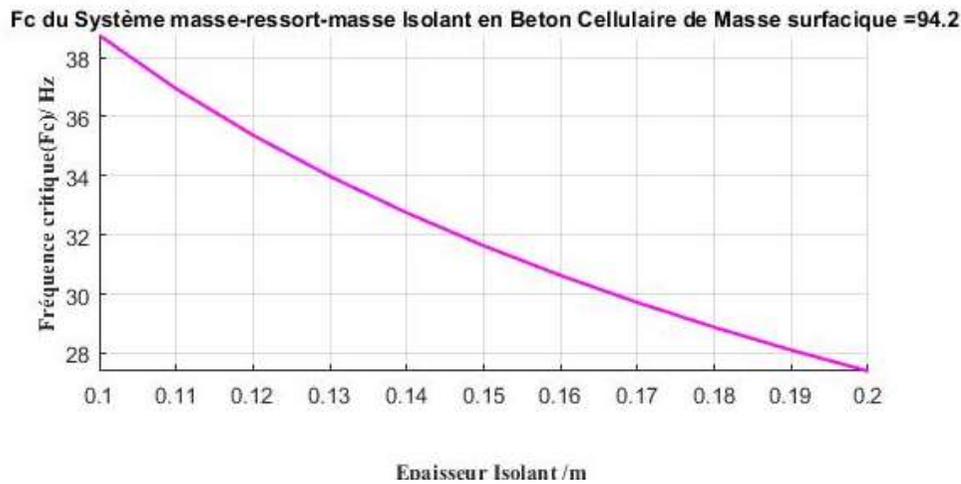
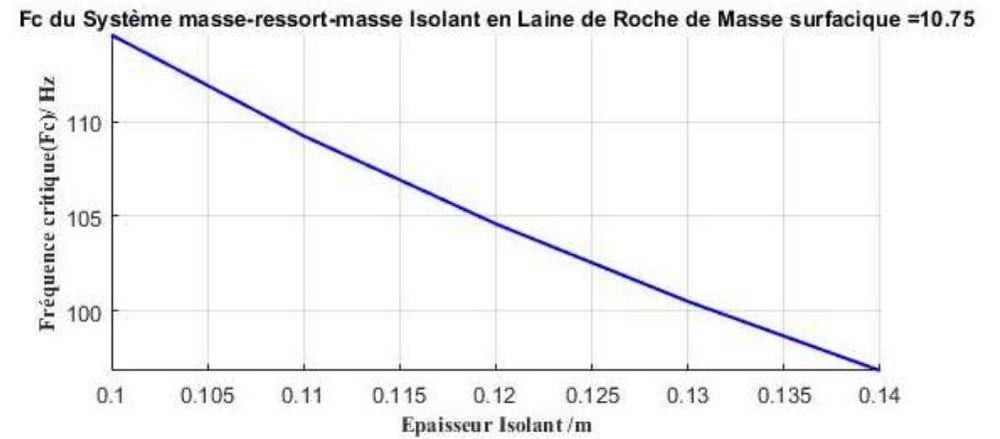
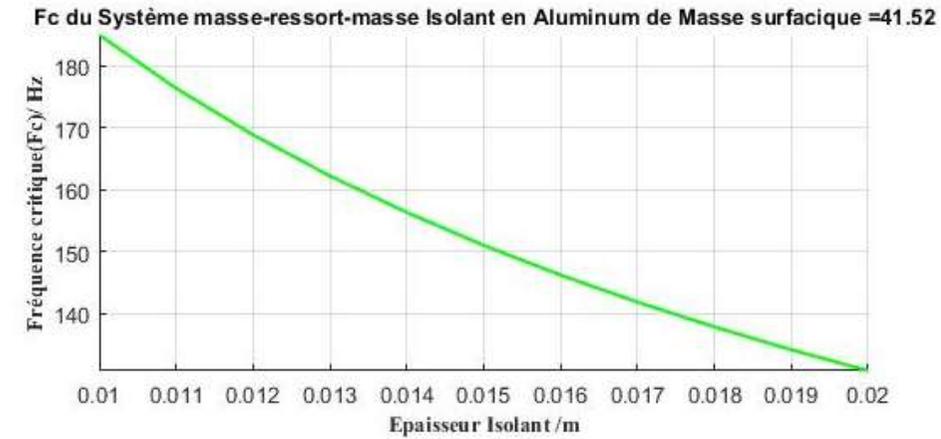


Figure 137: Fréquence critique en fonction de l'épaisseur des matériaux inorganique : Système masse-ressort-masse

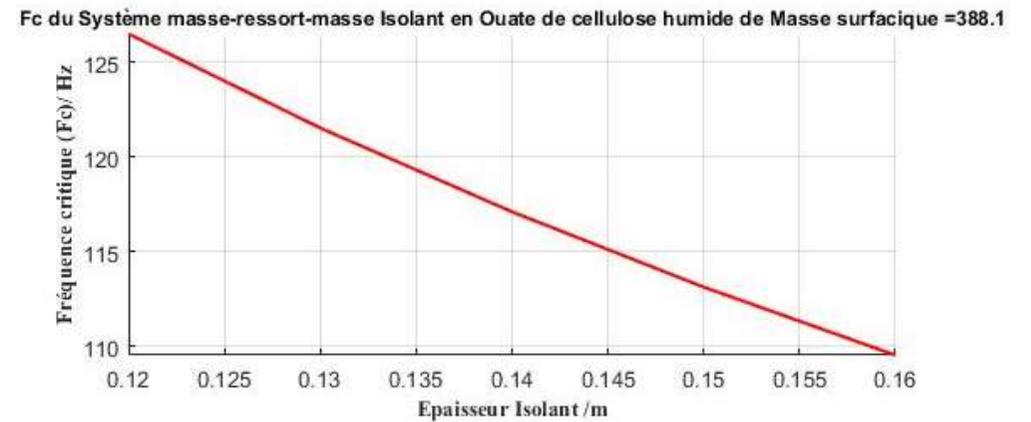
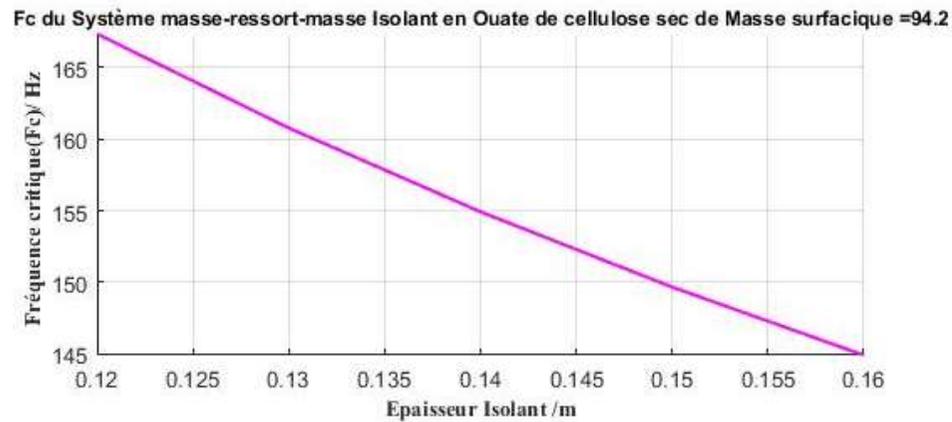
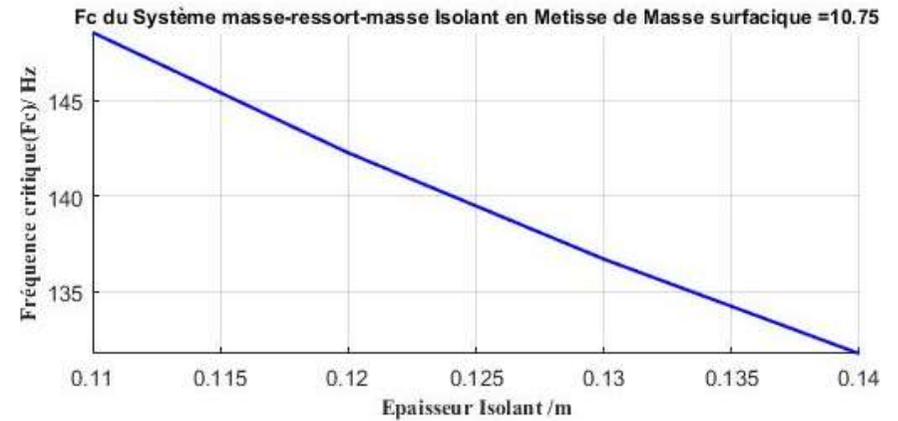
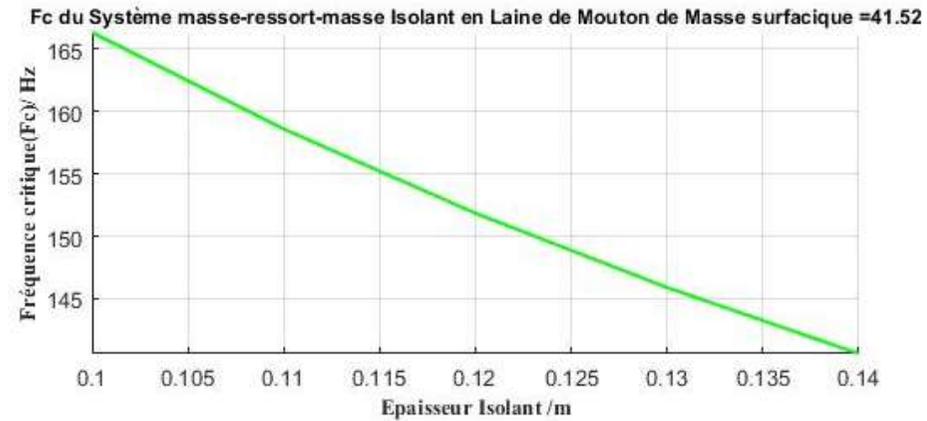


Figure 138: Fréquence critique en fonction de l'épaisseur des matériaux organique : Système masse-ressort-masse

3.3.1.2 Temps de réverbération, fréquence d'émission sonore des Planchers, murs composites et plafond

a- Temps de réverbération modifiés sur la base de mesures in-situ

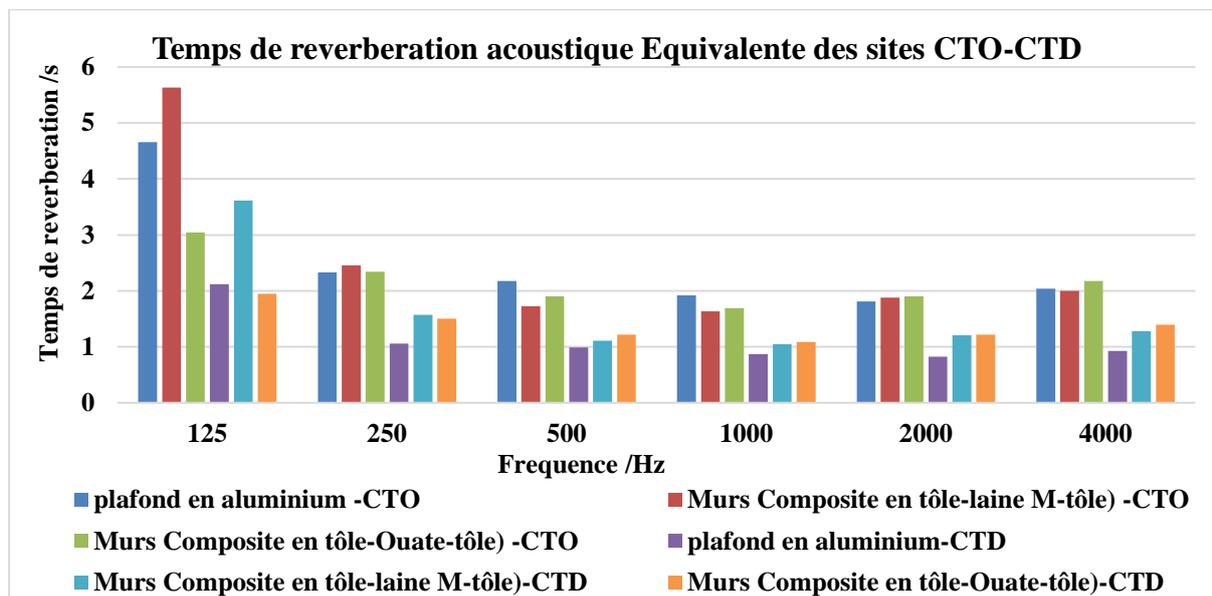


Figure 139: Temps de Reverbération acoustique equivalent fonction des Fréquence d'émission sonore, appliqué sur différente surfaces organique et en aluminium CTO-CTD

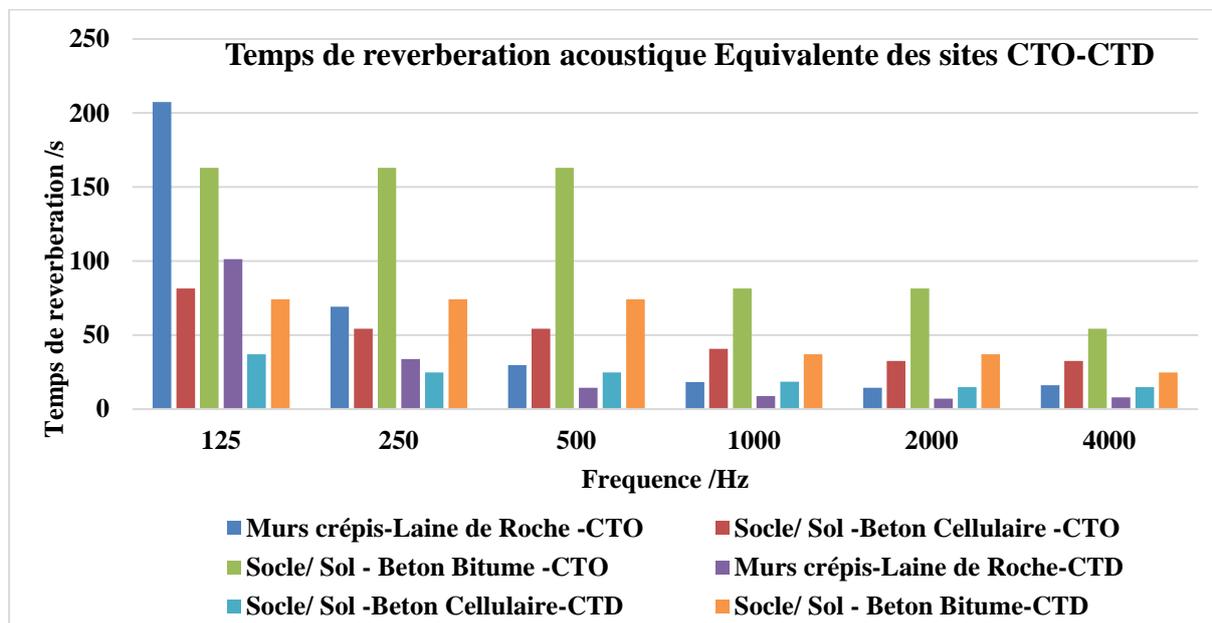


Figure 140: Temps de Reverbération acoustique Equivalents Fonction des Fréquence d'émission sonore, appliqué sur différente surfaces inorganique CTO-CTD

Les résultats des calculs ont été obtenus pour six (06) distributions de différents matériaux absorbants sur les murs de la pièce, dans les conditions d'absorption totale de la pièce constante (Figure 137 et 138). Un historique de temps de réverbération obtenue pour certaines fréquences sonores montre une interaction des modes dans la production d'une courbe de décroissance à

partir de laquelle le temps de réverbération est évalué. Elle est le résultat de différentes valeurs de coefficients d'absorption évaluées plus haut pour des système masse ressort masse ayant des fréquences propres comparables. Pour chaque configuration de matériau absorbant, la dépendance prédite du temps de réverbération par rapport à une fréquence de la source sonore est différente. C'est un effet de la grande sensibilité du coefficient d'amortissement à la distribution du matériau absorbant pour les pièces de forme irrégulière.

D'une centrale à une autre et d'un matériau un autre on peut observer de très grand temps de réverbération pour les matériaux inorganique et ceux surtout dans la centrale CTO tandis que ceux de la CTD sont relativement faible. Ceci est dû déjà à la vétusté des murs et revêtements absorbant répertorié sur les figures ci-dessus en tenant compte de leurs temps de réverbération moyen.

Les plus petits changements dans le temps de réverbération sont observés dans le cas des matériaux placé sur un plancher en laine de roche de l'ordre de 28,15s CTD, sur un plafond en aluminium de 2,1s CTD des murs composites en isolant organique d'une plage de 1,13-1,31 seconde CTO-CTD. En revanche, la plus grande les variations du temps de réverbération sont notées lorsque le matériel est situé sur les murs de plancher et latéraux de la pièce, ceux-ci sont composé de matière inorganique. Ils sont dû aux différences entre les coefficients d'amortissement ou encore d'absorption des surface reverbantes.

Les résultats des calculs, effectués pour les six (06) isolants de matériaux absorbants sur les murs de la salle des machines, ont montrés comment divers emplacements du matériau suivant la position de réception d'onde acoustique à des fréquences d'émissions bien précises peuvent affecter une dépendance du temps de réverbération à une fréquence de source sonore. (Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape, 2008)

b- Frequence d'émission sonore, Indice d'affaiblissement des parois et frequence critique des systèmes Masse-ressort-Masse

En considérant les puissances et les caractéristiques des équipements desdits centrales, on comprend la supériorité du niveau de fréquence sonores des 6 premiers équipements dans la CTD sur la CTO. D'autre part, le phénomène inverse ce produit sur les trois derniers équipements, qui s'explique par une considération de deux aéro réfrigérants pour un moteur.

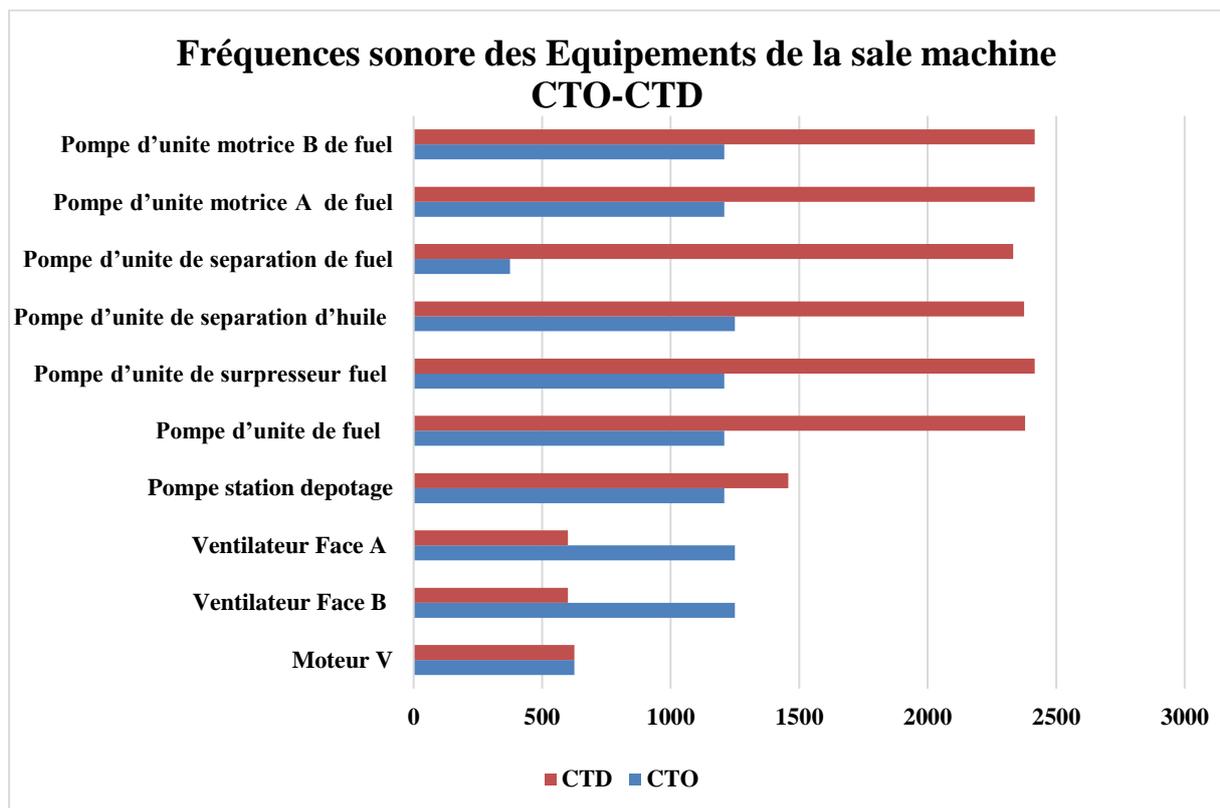


Figure 141: Fréquence d'émission sonore des Equipements de la sale des machines CTO-CTD

Les Figures 140 et 141 ci-dessous présente suivant un système masse ressort masse pour plusieurs isolant, les indices d'affaiblissement acoustique de différents matériaux. Il en ressort pour chaque type de matériaux isolant une épaisseur à laquelle l'indice d'affaiblissement est nul. Celle-ci correspond au point de fréquence critique du matériau comme présentée dans le paragraphe précédent. Les simulations, suivant des fréquences d'émission sonore, confirment les prédictions analytiques de nombreux matériaux isolant ayant des fréquence critique propre à elle. En contrôlant la largeur du canal de la structure du matériau, on peut réduire les déperditions liées aux dissipations a basse fréquence (Chen Shao and al , 2019)

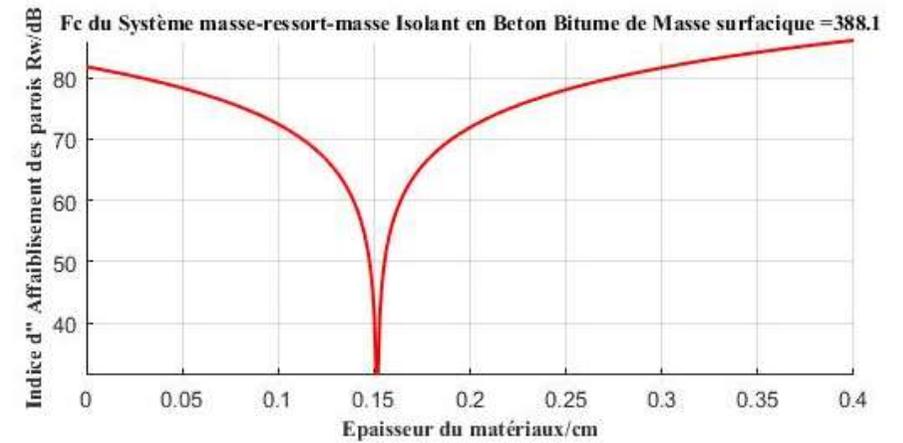
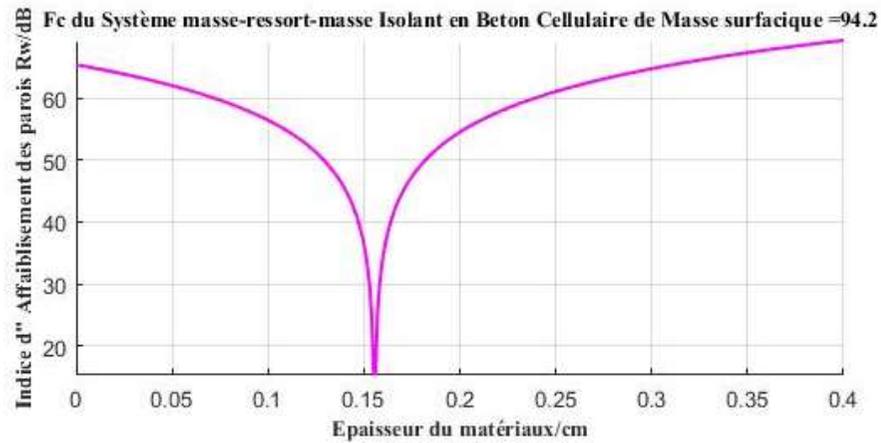
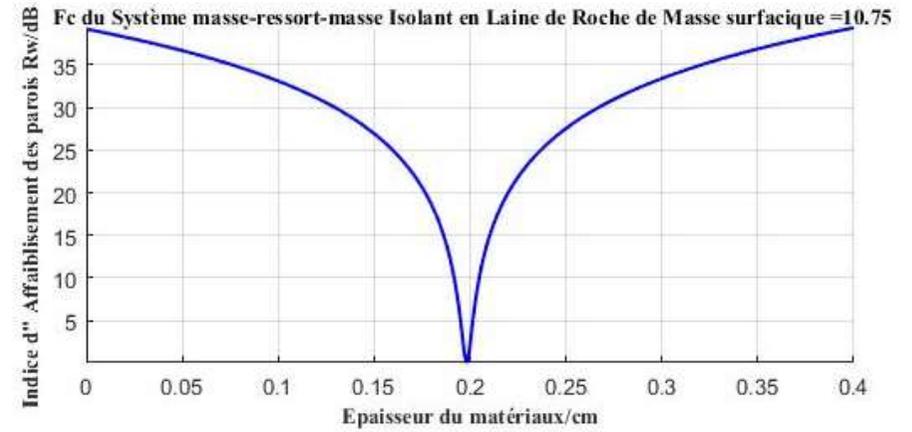
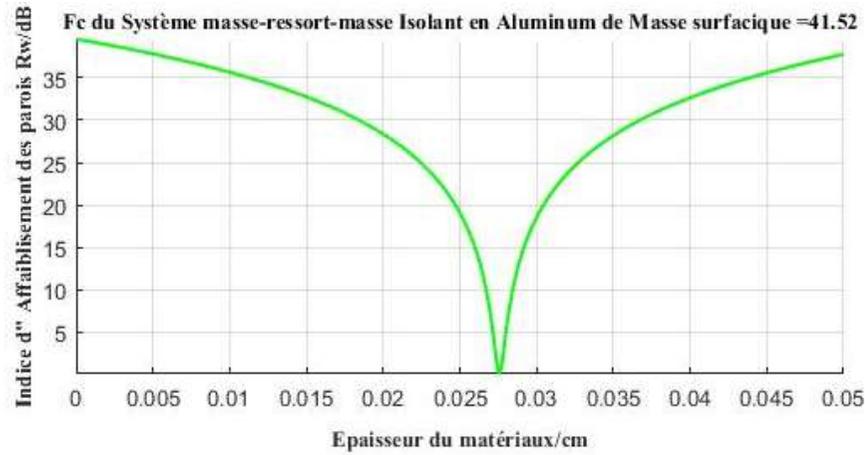


Figure 142: Indice d'affaiblissement des parois en fonction de l'épaisseur des d'isolant inorganique d'un systéme Masse-Ressort-Masse

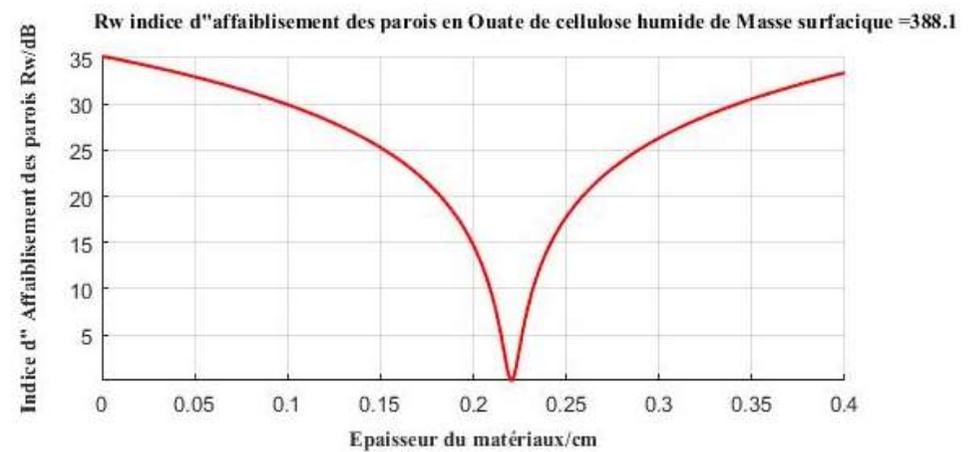
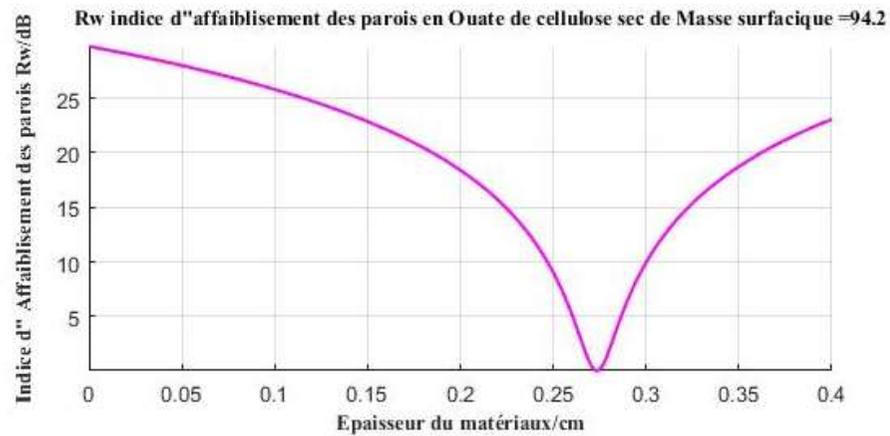
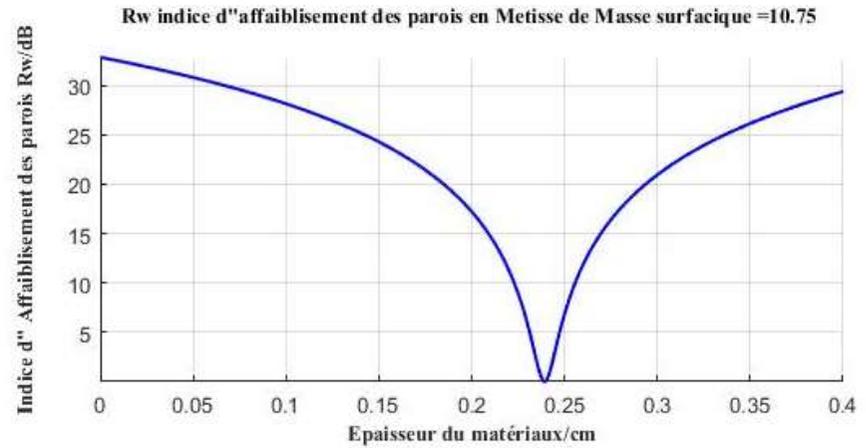
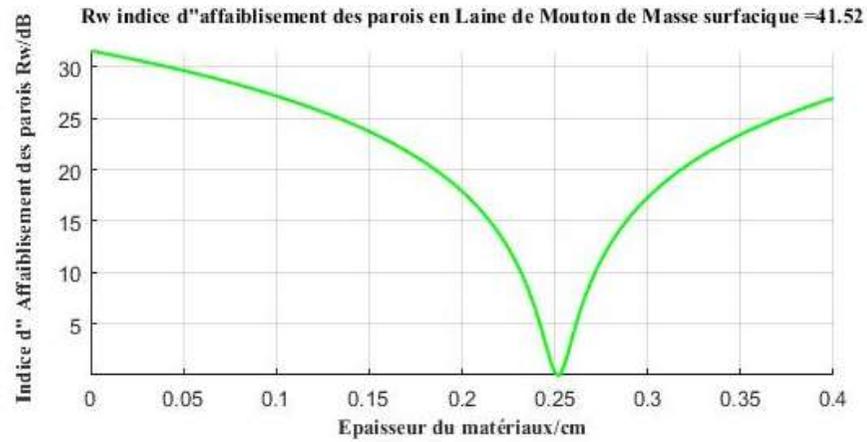


Figure 143: Indice d'affaiblissement des parois en fonction de l'épaisseur des d'isolant organique d'un systéme Masse-Ressort-Masse

3.3.1.3 Indice d'affaiblissement acoustique et épaisseurs des isolants dans la CTO et CTD

A. Indices d'affaiblissements des parois en matériaux organique tels que la Laine de mouton, Métisse, Ouate de cellulose Sec, Ouate de Cellulose Humide pour les Equipements de la CTO et de la CTD à diverses fréquences sonores d'émission

L'indice R donne l'atténuation aux bruits aériens intrinsèque d'un élément de construction. Il est représenté par un spectre donnant les performances fréquence par fréquence. Cet indice permet de comparer les performances des éléments de construction entre eux. Sa détermination s'effectue en laboratoire selon une procédure de mesurage normalisée décrite dans la norme NBN EN ISO 140-3. Les résultats des figures suivantes vont être comparés et ensuite commentés

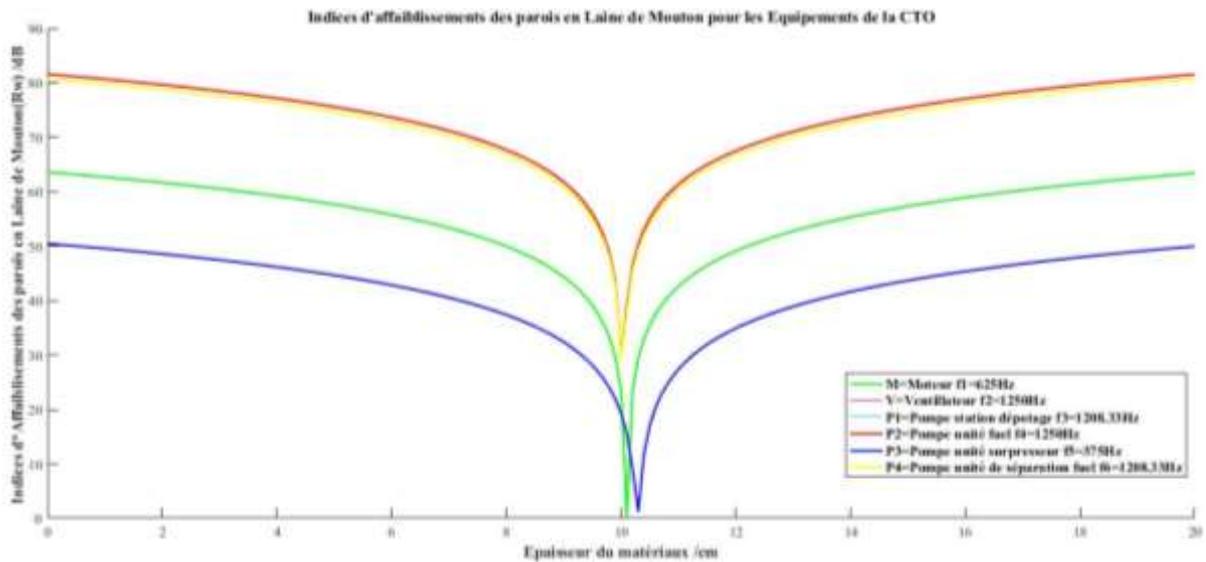


Figure 144: Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Mouton pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

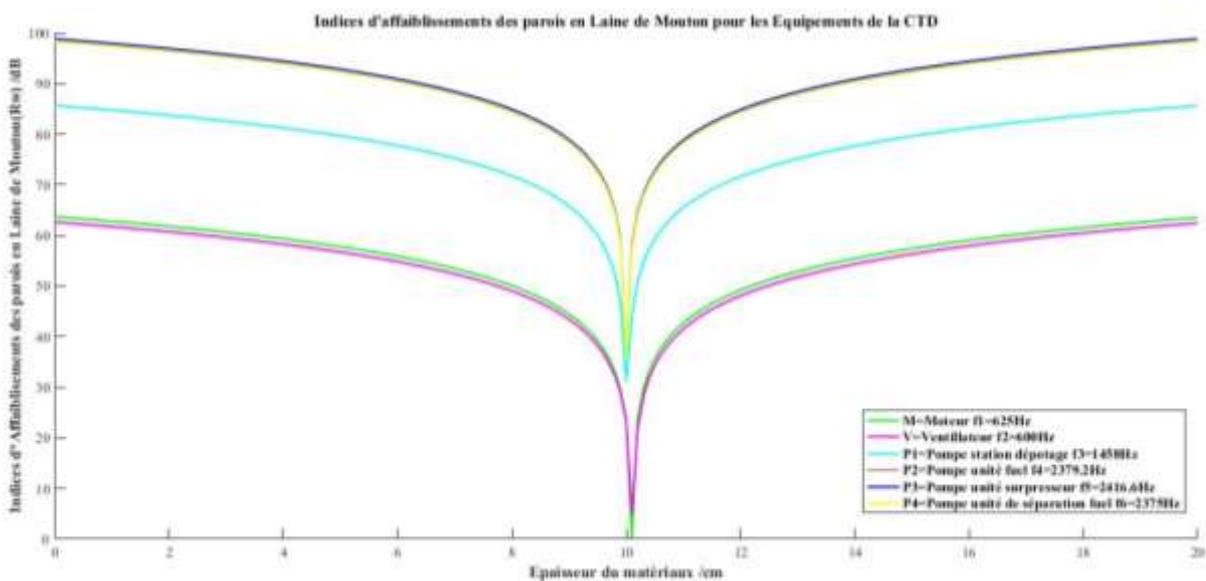


Figure 145: Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Mouton pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

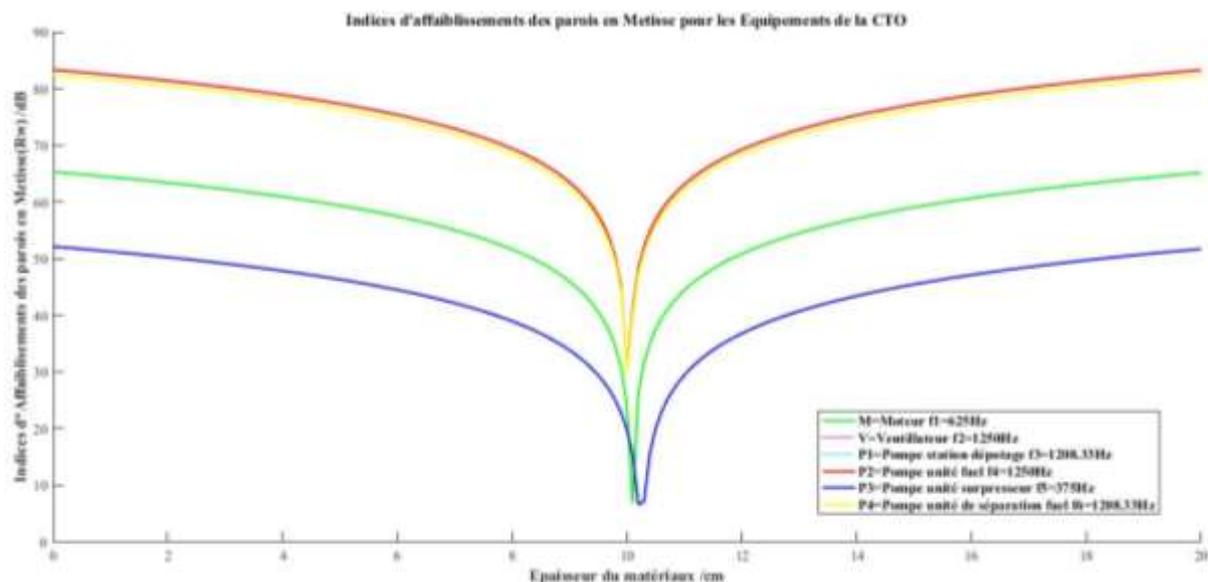


Figure 146: Indices d'affaiblissements des parois en Métisse pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

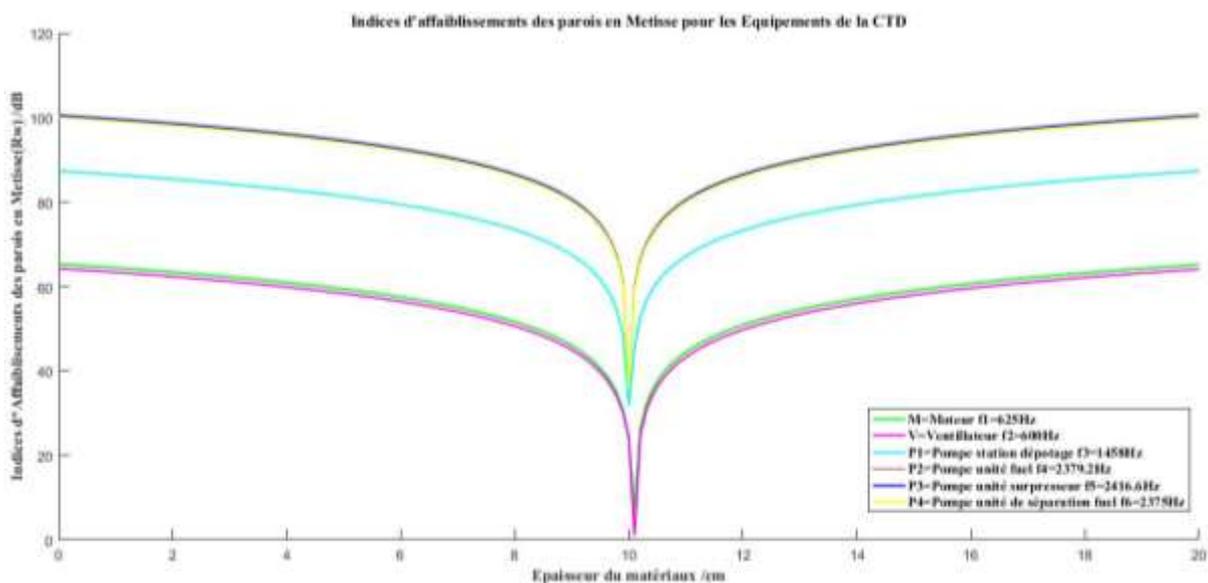


Figure 147: Indices d'affaiblissements des parois en Métisse pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

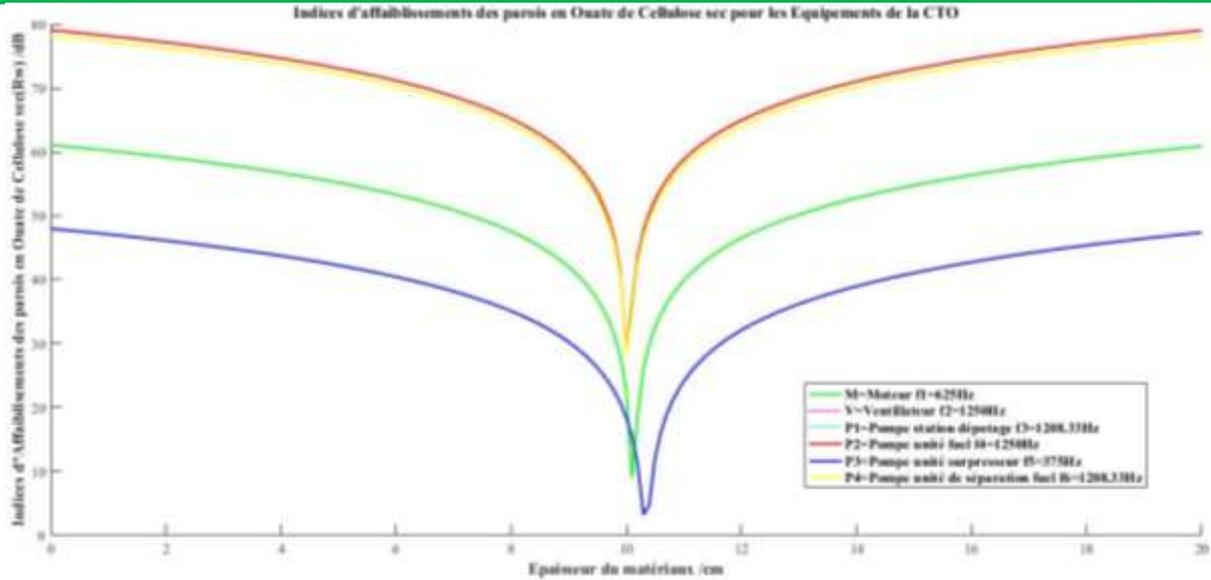


Figure 148: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose sec pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

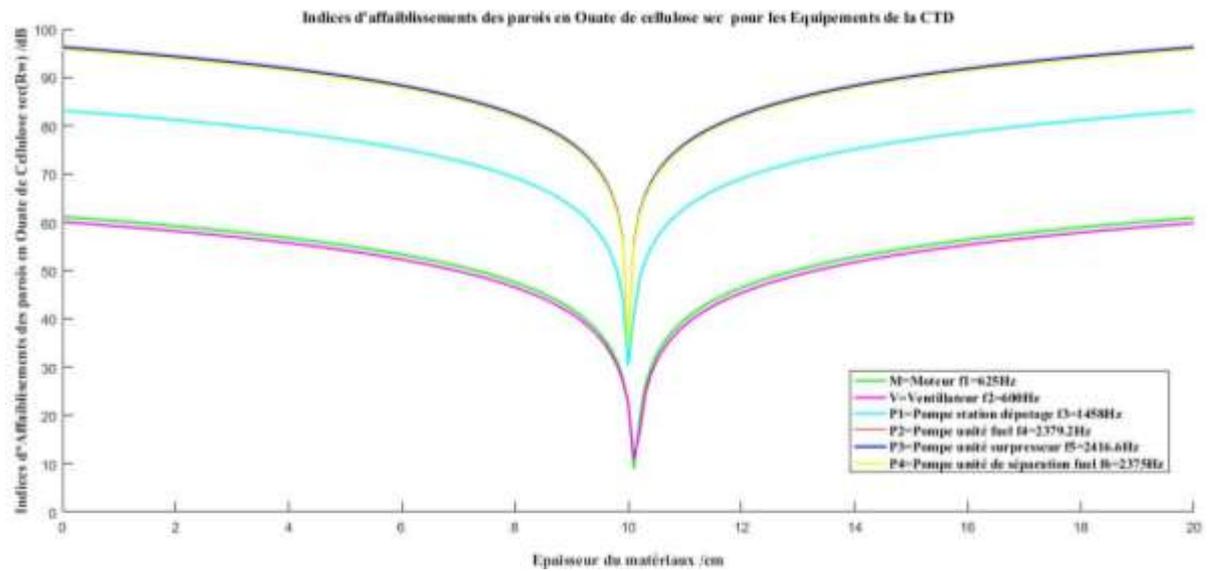


Figure 149: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose sec pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

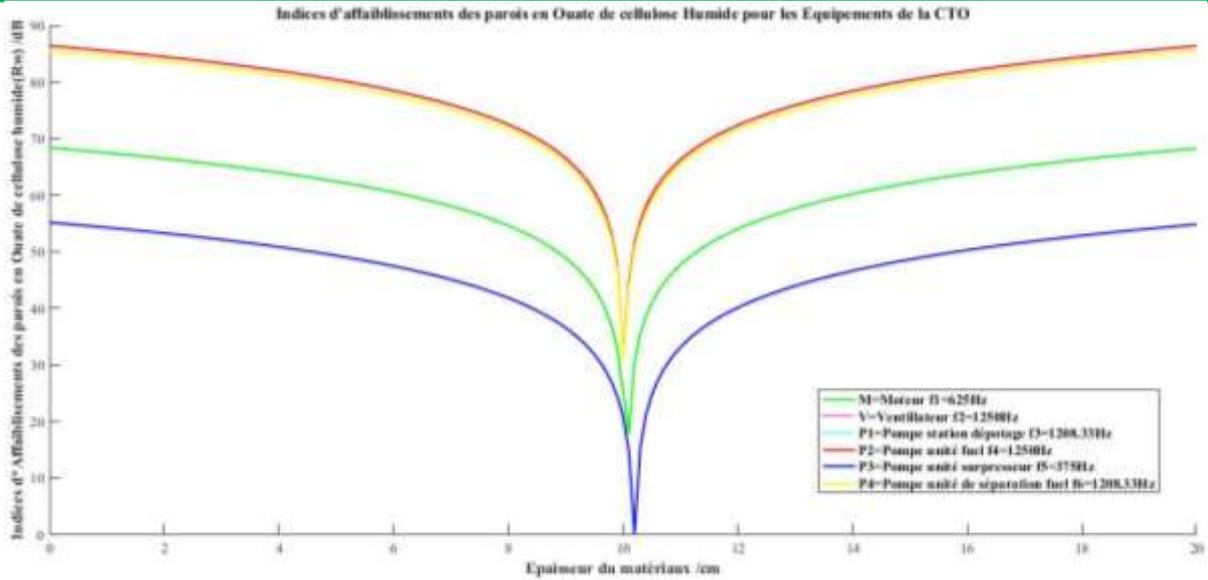


Figure 150: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose Humide pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

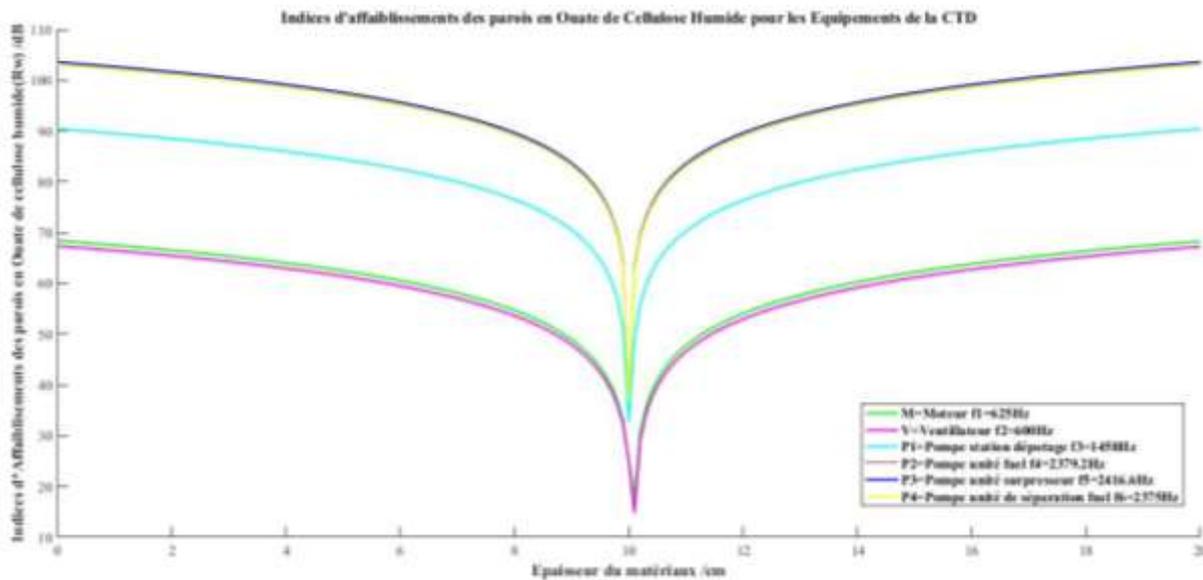


Figure 151: Indices d'affaiblissements des parois en Ouate de Cellulose Humide pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

B. Indices d'affaiblissements des parois en matériaux organique tels que l' Aluminium, la Laine de Roche, Beton Cellulaire, Beton bitume pour les Equipements de la CTO et de la CTD à diverses fréquences sonores d'émission

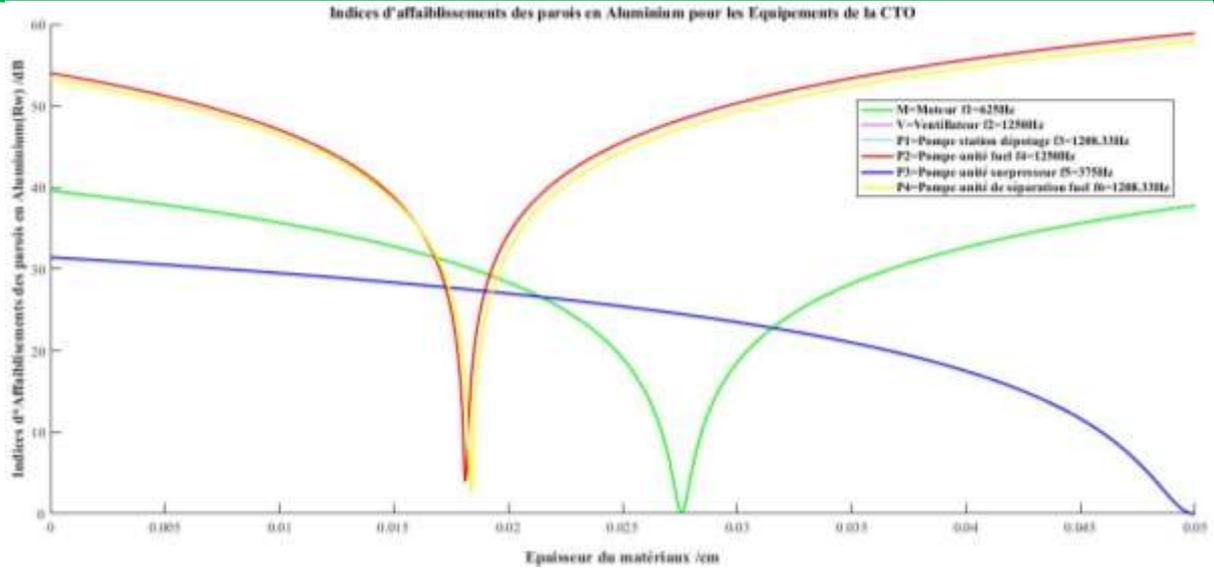


Figure 152: Indices d'affaiblissements des parois en Aluminium pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

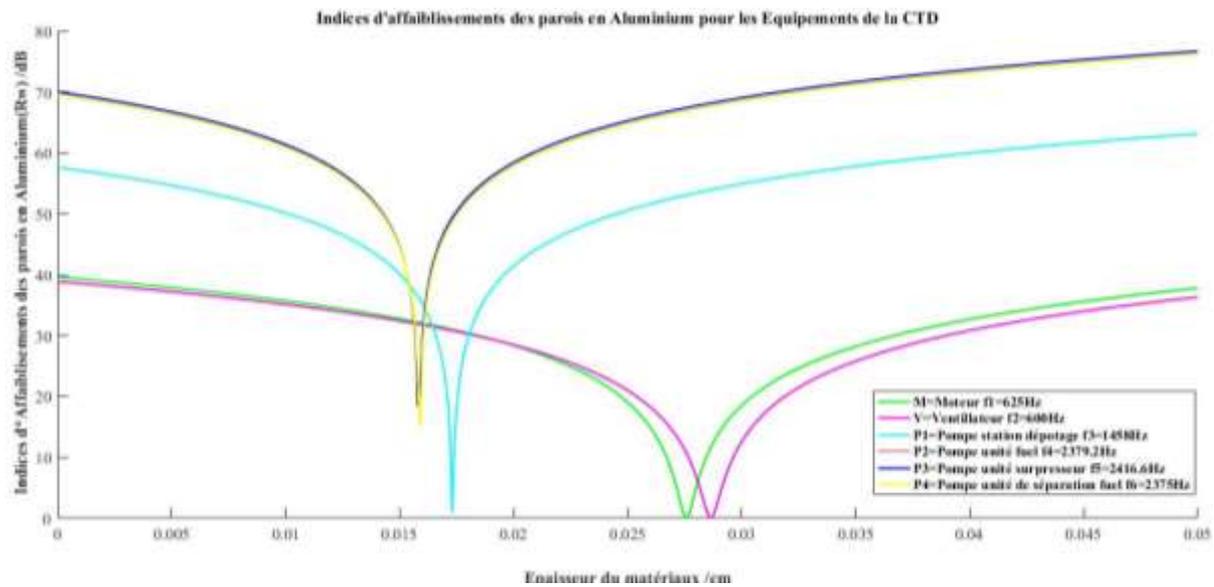


Figure 153: Indices d'affaiblissements des parois en Aluminium pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

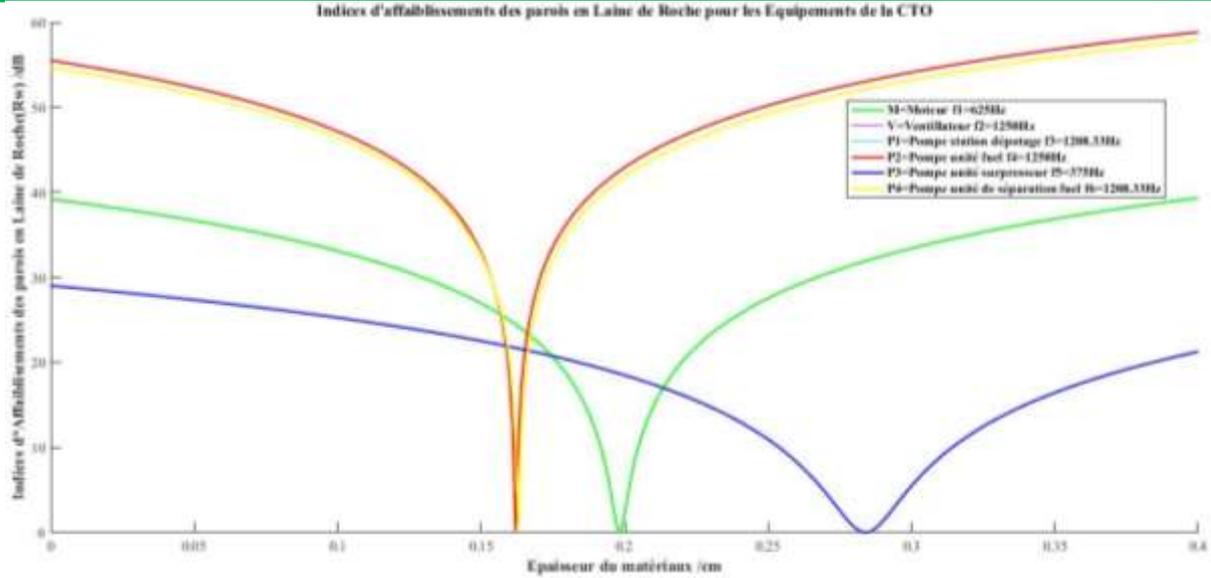


Figure 154: Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Roche pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

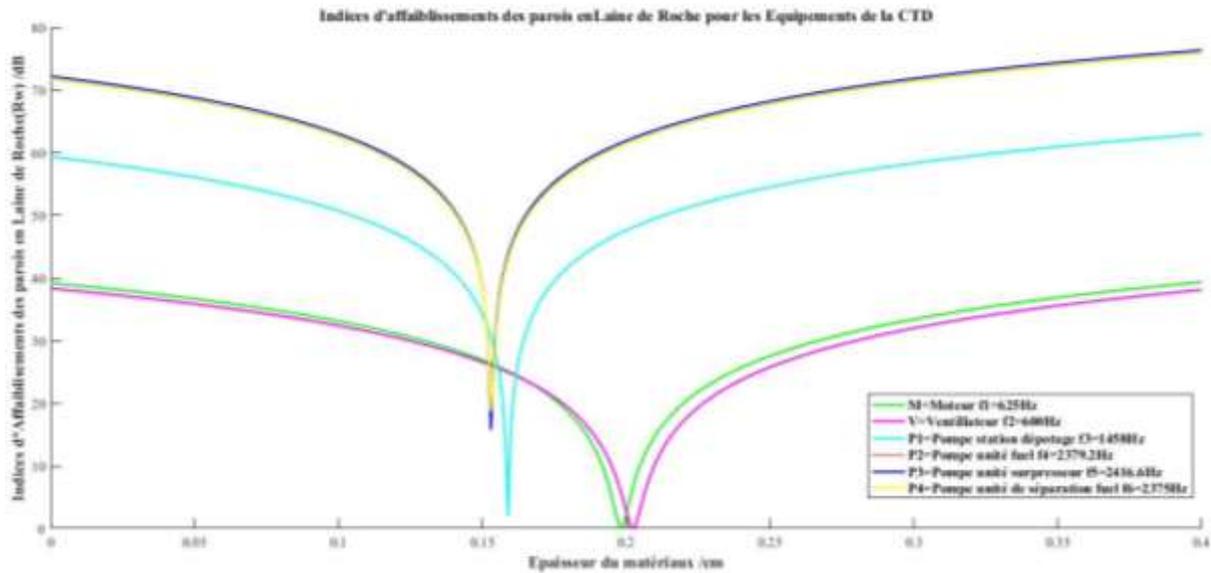


Figure 155 Indices d'affaiblissements des parois en Laine de Roche pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

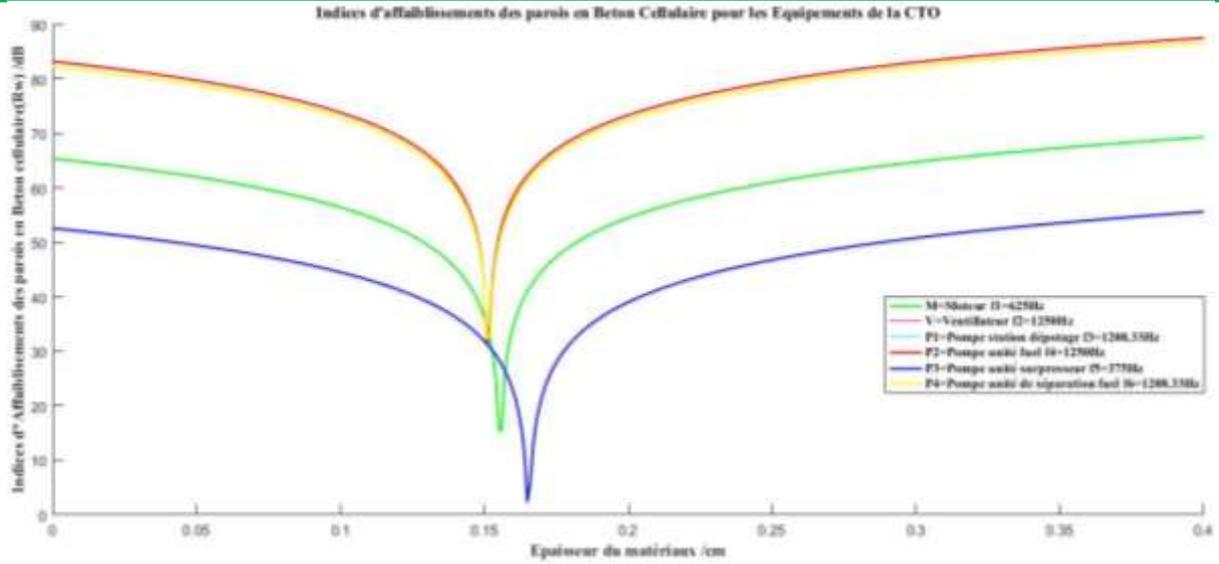


Figure 156: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Cellulaire pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

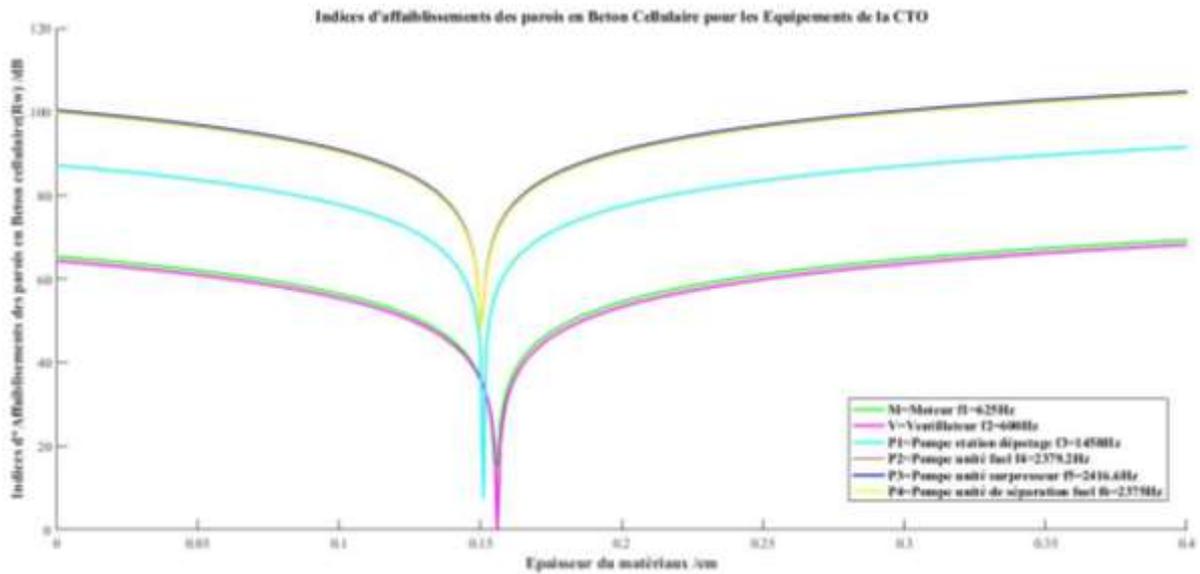


Figure 157: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Cellulaire pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

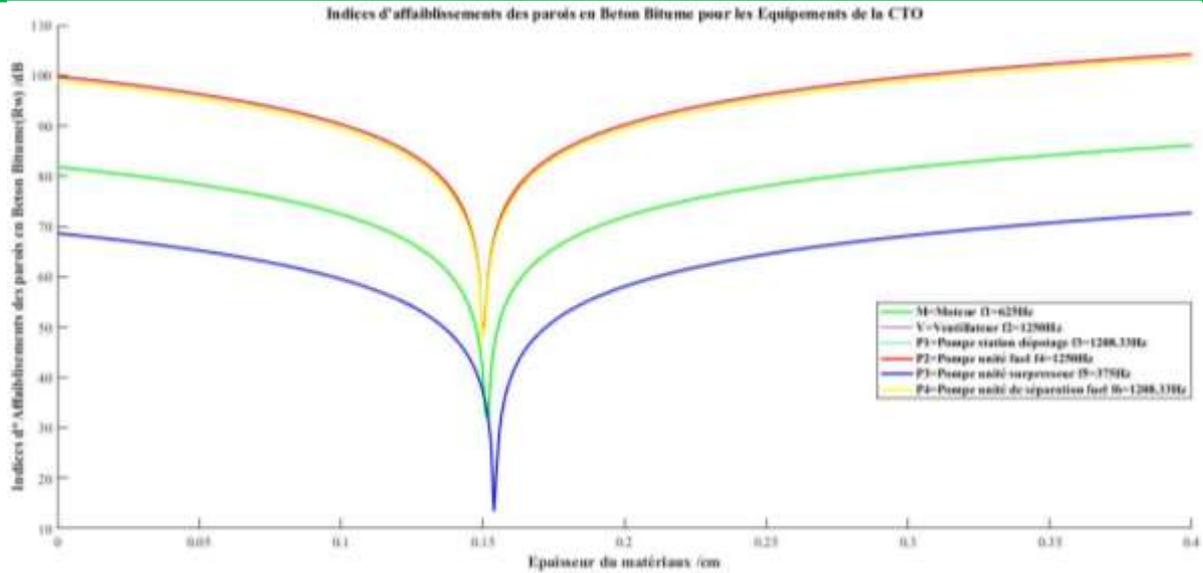


Figure 158: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Bitume pour les Equipements de la CTO à diverses fréquences sonores

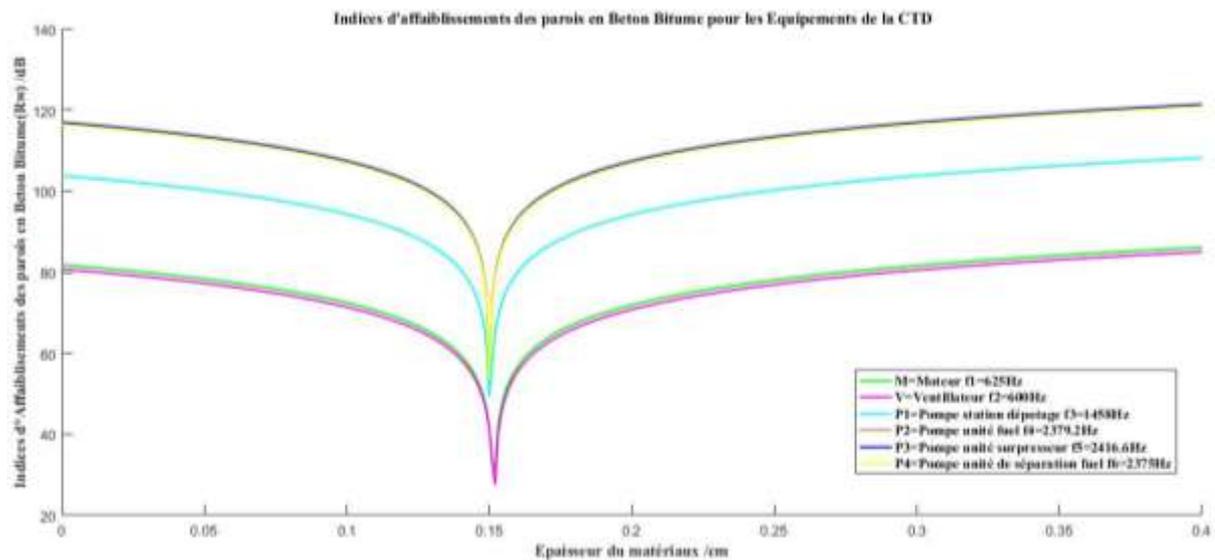


Figure 159: Indices d'affaiblissements des parois en Béton Bitume pour les Equipements de la CTD à diverses fréquences sonores

Suivant les différents résultats précédemment présentés (figures 142-157) on observe une congruence des différents indices d'affaiblissement liés à chaque type d'isolants et aux matériaux des systèmes masse ressorts masse pour chaque fréquence critique dans différentes centrales étudiées. Cette congruence, comme dans le cas des fréquences critiques ou des résonances révèle les points sensibles pour une faiblesse d'absorption du matériau utilisé dans l'affaiblissement acoustique. Tenant compte des épaisseurs des différents matériaux absorbant un constat très sensible se fait ressentir suivant chaque type de matériaux. Les points extrêmes de différentes fréquences sonores de chaque catégorie d'équipements révèlent ici un très grand nombre de points sur l'axe des indices d'affaiblissements. On établit une

correspondance à chaque point donc la variation reste continue au type de matériaux à des épaisseurs respectives lors de la traversé du bruit aérien ou solidien.

➤ Pour les matériaux en laine de mouton, Métisse, Ouate de cellulose Sec et Ouate de cellulose Humide dans les deux centrale CTO-CTD, on constate un point de convergent dans un intervalle de [0,0101-0.01101] m ou les indices d'affaiblissement des six équipements s'annulent. Cette zone correspond, fonction du type de matériaux, à des points critique ou la fréquence d'émission sonore des équipements est comprise entre [1000-3000] Hz. Deux points de chute d'indice d'affaiblissement s'écartent approximativement de l'ordre de 0.005m des autres précédemment présenté. On parle ici des indices d'affaiblissement de faible fréquence 300-650Hz, celle-ci correspondant aux équipements à basse fréquence donc le point critique est plutôt connu sous le nom de fréquence de résonance. En considérant tous les matériaux de composition organique comme dans ce cas, on se rend compte que les points de chutes correspondants aux indices d'affaiblissement pour les fréquences sonores de l'ordre de 625Hz s'écartent de l'intervalle dans laquelle les matériaux atteints généralement sa fréquence de résonance. Ces résultats corroborent avec l'états vétuste d'une centrale par rapport à l'autre. On peut comprendre comme dans l'étude des fréquence critique et de résonnance que, plus le matériau est vieillissant plus il perd ces capacités d'absorption acoustique et moins il résiste au bruit de choc.

➤ Pour les Matériaux en Aluminium, Laine de Roche, Béton cellulaire et Béton Bitume dans les deux centrale CTO-CTD, on constate comme précédemment un point de convergent cette fois ci dans un intervalle de [0,011-0.0271] m ou les indices d'affaiblissement des six équipements s'annulent. Cette zone, correspond fonction du type de matériaux, à des points critique ou la fréquence d'émission sonore des équipements est comprise entre [1000-3000] Hz. Dans ce deuxième cas des matériaux inorganique, une divergence des points de chute des indices d'affaiblissement se fait considérablement ressentir. Cette divergence rejoint l'objectif recherché qui est l'optimisation des matériaux acoustique, ceux à travers la recherche des points critiques tel que l'élasticité, les fréquences critique du matériau et surtout le coefficient d'absorption à travers l'épaisseur de chaque matériau.

➤ En ce qui concerne l'aluminium, les épaisseurs du plafond étant connue très faible [0,005-0,05] m par contre de très grand coefficient d'élasticité et de densité massique ont plutôt pour différente fréquence d'émission sonore des indices d'affaiblissements et des fréquence critique très divergent selon le type d'équipement à émission sonore.

➤ Pour différents murs composites dont l'épaisseur des matériaux isolants à laine de roche sont compris [0.005-0.025], on observe une divergence de point de chute de fréquence critique, avec des indices d'affaiblissements très dépendants des fréquences d'émissions

sonores comprise dans une plage de [0.016-0.03] m. Ces points de chute diffèrent d'une centrale à l'autre, traduisant la qualité de vétusté du type de matériaux sur le site.

➤ Les matériaux isolants des socles, support des bruits solidiens béton cellulaire ou de bitume ont quant à eux une différenciation particulière, selon leur point de chute d'indice d'affaiblissement acoustique car n'atteignent généralement pas la valeur de zéro en indice d'affaiblissement. Ceci corrobore avec les résultats précédemment illustrés sur le type de matériaux à utilisé quant il s'agit des fréquence critique et ou des fréquences de résonance. Plus le matériau est visqueux plus il absorbe peut et difficile est possible d'atteindre son point de fréquence critique mai facile d'atteindre son point de fréquence de résonance.

➤ D'un point de vue panoramique lié aux indices d'affaiblissement acoustique, suivants les fréquences d'émission sonores, pour les matériaux composés d'isolant organique, la plage de réduction sonore in situ fonction du type d'équipement se situe entre [50-100] dB. Quant aux matériaux inorganiques la plage de réduction acoustique ou d'absorption dans le cas de l'aluminium se situent pour des bruits aériens entre [28-70] dB. Par contre pour des matériaux inorganiques d'origine minéral ou l'atténuation par divergence est très faible et l'amortissement du bruit de choc est plus considéré, le niveau d'atténuation devient relativement élevé. Preuve que la méthode devient obsolète quant il s'agit des matériaux à fréquence résonnante. De ce fait on balais une plage de [30-120] dB pour différentes fréquences d'émission sonores des équipements. On peut de manière comparative des centrales CTD et CTO suivant leurs niveaux d'absorption ou d'indice d'affaiblissement des matériaux, que le niveau de la CTO reste toujours inférieur au niveau de la CTD sauf dans le cas du même matériau à des conditions différentes. Telles que, la vétusté, l'épaisseur, la fréquence sonore, critique ou de résonance et les coefficients d'absorption.

3.3.2. Méthodes d'Optimisation par Absorption : Cas des algorithmes génétiques

L'algorithme génétique exécuté, recherche sur population fixée, un individu de qualité en utilisant un ensemble d'opérateurs qui sont appliqués à celle-ci. Une population est un ensemble de points dans l'espace de conception. La population initiale est générée aléatoirement par défaut stochastique comme présenté dans les méthodes. La génération suivante de la population est recherché en utilisant la forme physique des individus de la génération initiale ou précédente a celle à rechercher.

Les chromosomes constituant l'identité génétique de l'individue optimal sont les modules de compressibilité et d'élasticité, la masse surfacique des parois externe et l'épaisseur de la cavité interne masse-ressort-masse. Les individus seront donc l'indice d'affaiblissement, la fréquence critique et de résonance.

Les détails de calcul pour la simulation d'algorithme génétique (AG) ont été réalisés sur un PC Laptop HP, (4CPU) 2 GHz, 4Go de RAM. Dans cette configuration, le temps de calcul ici dynamique est d'environ 5 min pour 100 itérations dans une configuration multiformes lier au types d'isolants testés. L'AG a été appliqué sur une population de 100 gènes avec un l'ensemble de matériaux absorbants, avec au préalable des masses des parois externes connues.

3.3.2.1 Optimisation de l'indice d'affaiblissement sur isolant des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : Fréquence sonore = 2256,548 Hz

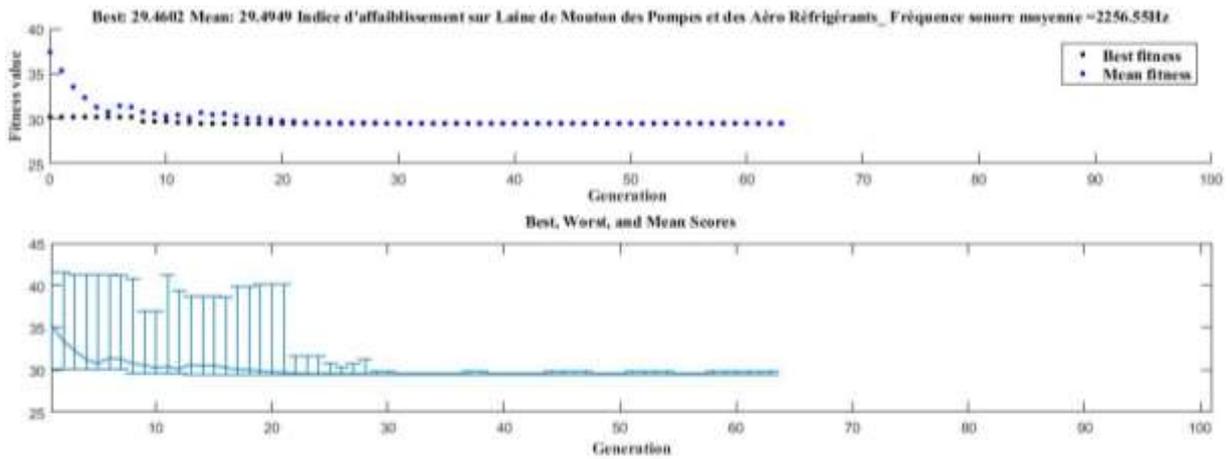


Figure 160 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Mouton des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

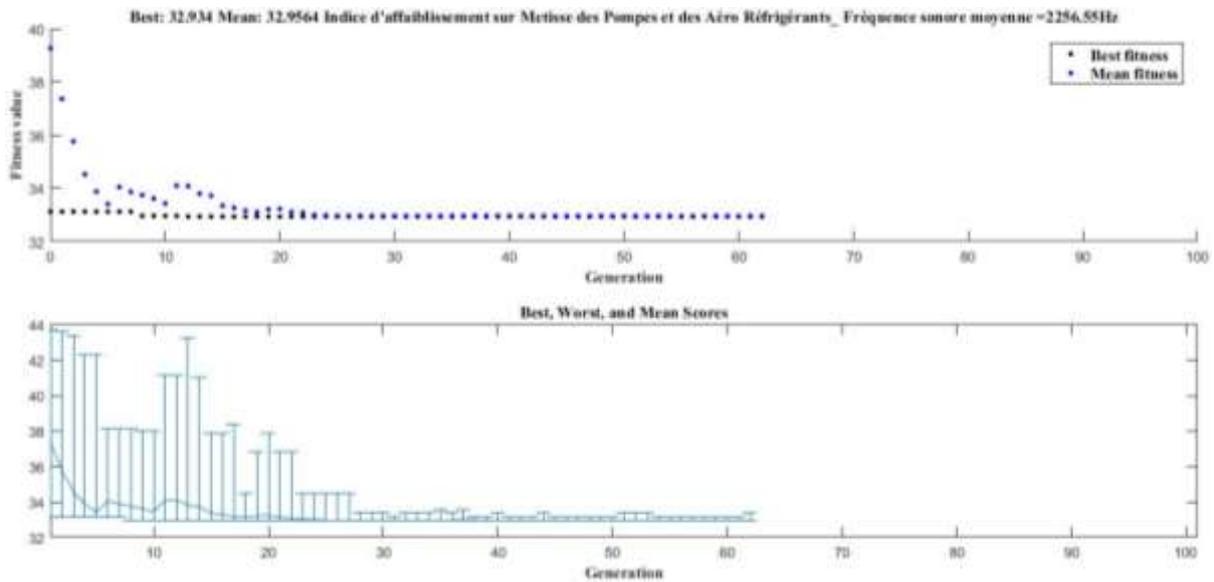


Figure 161 : Indice d'affaiblissement sur Metisse des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

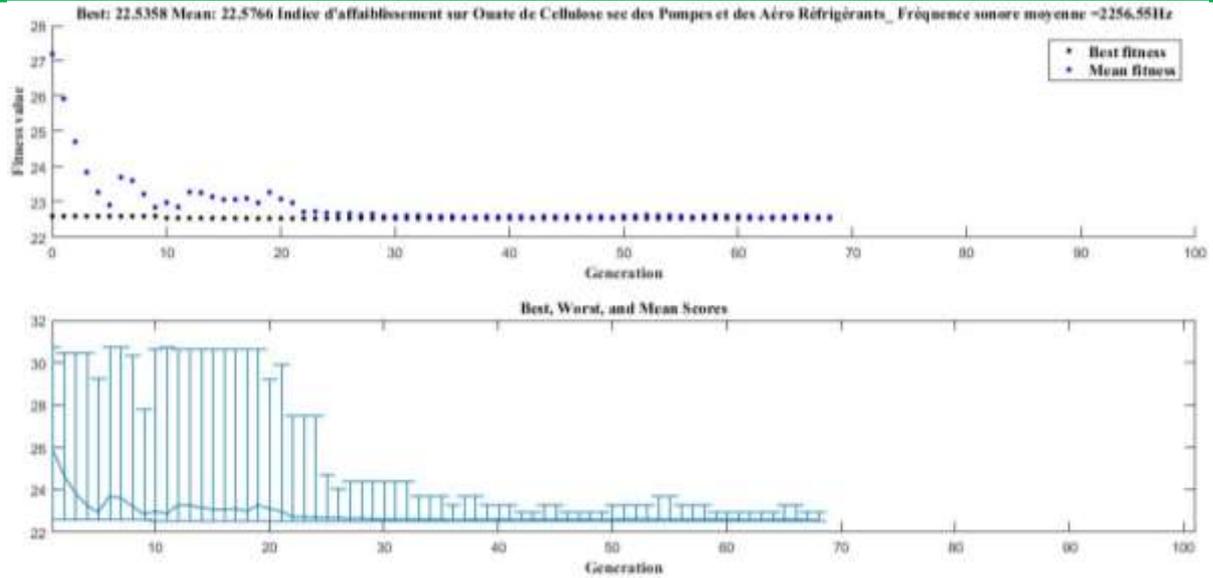


Figure 162 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose sec des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

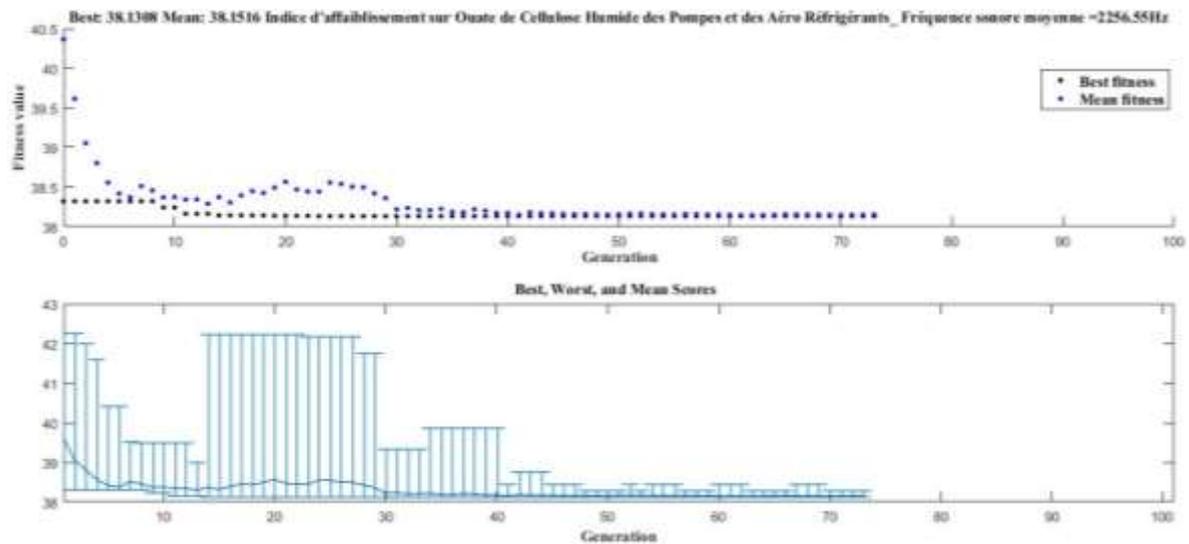


Figure 163 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose Humide des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

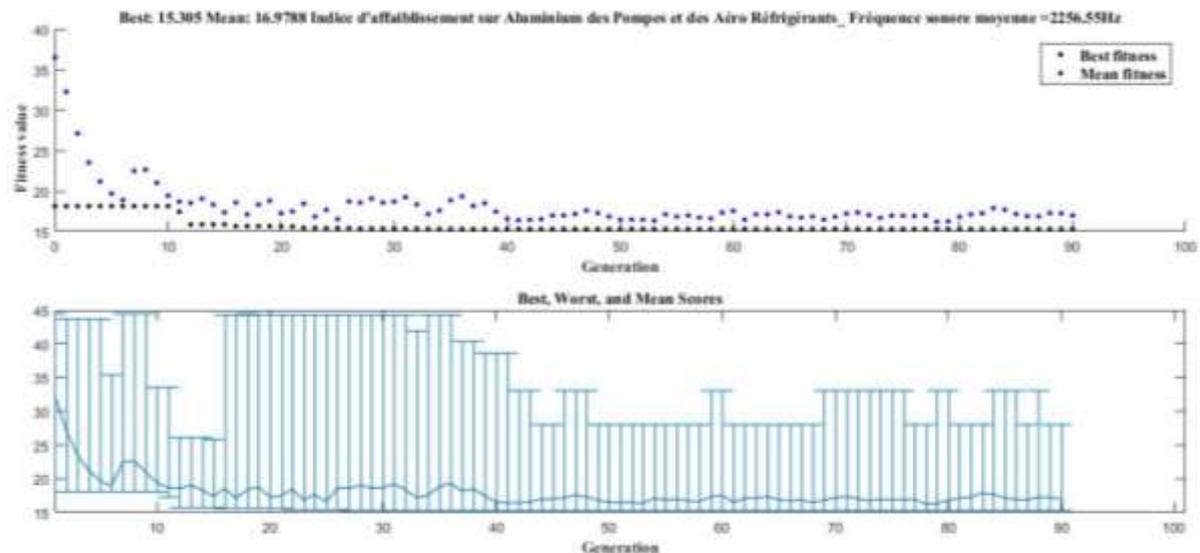


Figure 164 : Indice d'affaiblissement sur Aluminium des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

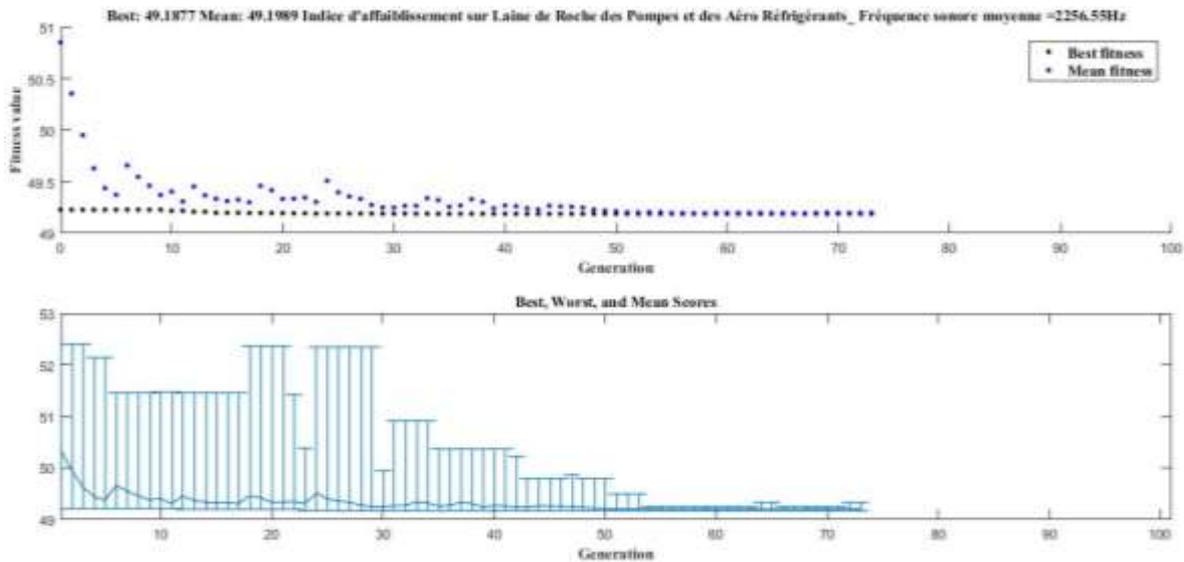


Figure 165 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Roche des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

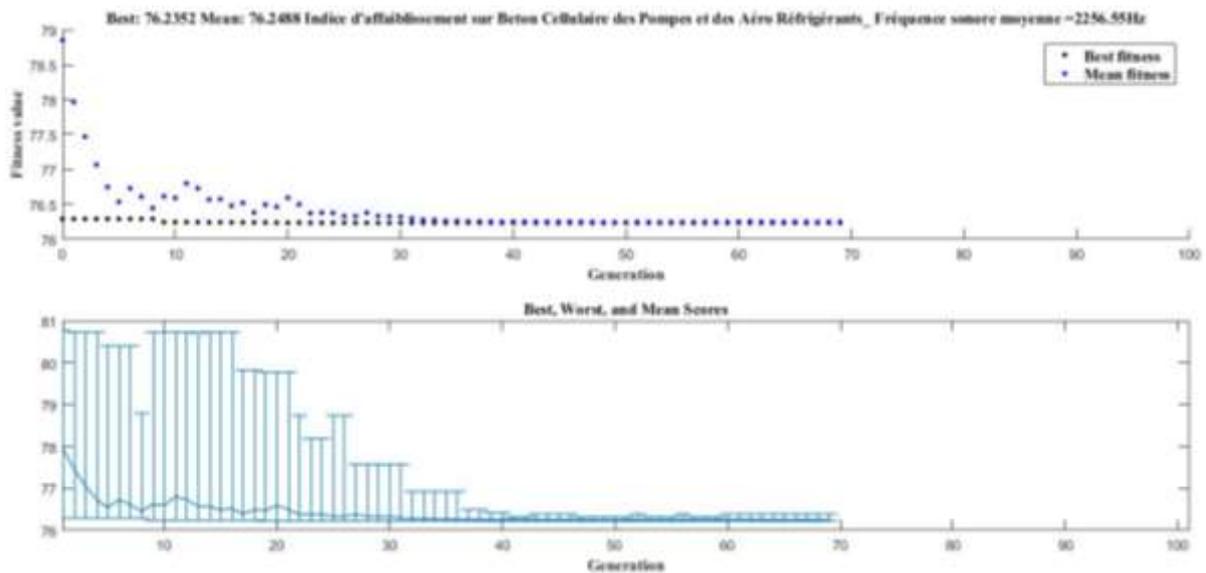


Figure 166 : Indice d'affaiblissement sur Beton cellulaire des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

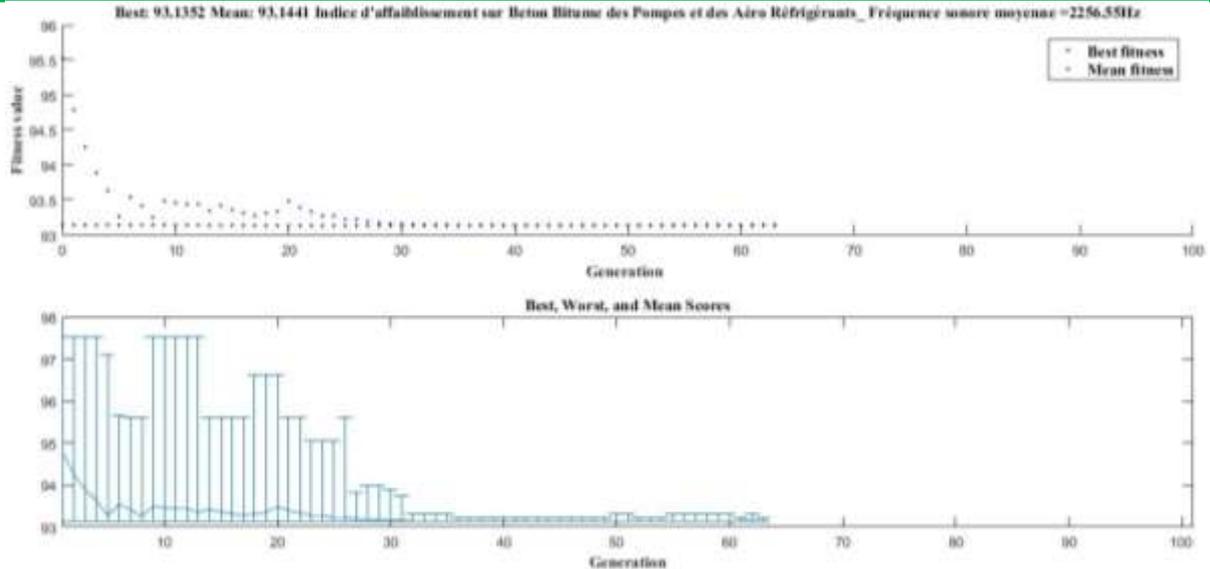


Figure 167 : Indice d'affaiblissement sur Beton Bitume des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD : $F_s = 2256,548$ Hz

Ayant créé une population initiale par défaut à l'aide d'un générateur de nombres aléatoires uniforme. L'AG s'exécute et fait apparaître uniformément les points noirs en dessous, qui dénote la meilleure qualité de l'individu rechercher, tandis que les points bleus en dessus dénote les qualités moyennes de l'individu de cette génération tout au long des itérations. L'AG présente aussi les moyenne et meilleurs valeurs numérique disponible en titre.

Typiquement, les meilleurs individus s'améliore rapidement en début de génération, dans la mesure où les individus sont conçus pour atteindre rapidement leur optimum. Les commandes de l'interface de l'AG nous permettent de démarrer dans un premier temps et dans un second temps de stopper fonction de l'existence ou non d'autres générations possibles d'entrée en reproduction ou de mutation.

En choisissant une sélection uniforme stochastique dans les figures (figure 158-165), nous obtenons comme présenté ci-dessus deux types de courbes. La courbe en bleu décrit l'ensemble des solutions obtenues suivant les principes d'action de l'AG. Sur le domaine d'évaluation cette courbe converge vers celle en noire. La courbe noire décrit les meilleurs individus retenus (best fitness value) parmi ceux sélectionnés et croisés. A la convergence l'AG arrête l'échantillonnage lorsque la fonction d'évaluation ne varie plus considérablement avec les gènes sélectionnés et la boucle fermée, on visualise le best fitness et la valeur moyenne (Means).

Pour la centrale de Dibamba ou les fréquences d'émission sonore des équipements et auxiliaires sont en moyenne autour de 2256,54 Hz

- Avec un isolant en laine de Mouton on a : Best fitness = 29,4602 dB et Means =29,4949 dB pour une épaisseur $e = [10-14]$ cm
- Avec un isolant en Métisse on a : Best fitness = 32,9340 dB et Means =32,9364 dB pour une épaisseur $e = [10-14]$ cm

- Avec un isolant en Ouate de cellulose sec on a : Best fitness = 22,5358 dB et Means =22,5766 dB pour une épaisseur $e = [12-16]$ cm
- Avec un isolant en Ouate de cellulose humide on a : Best fitness = 38,1308 dB et Means =38,1516 dB pour une épaisseur $e = [12-16]$ cm
- Avec un isolant en Aluminium on a : Best fitness = 15,305 dB et Means =16,9788 dB pour une épaisseur $e = [0,1-0,2]$ cm
- Avec un isolant en Laine de roche on a : Best fitness = 49,1877 dB et Means =49,1989 dB pour une épaisseur $e = [17-23]$ cm
- Avec un isolant en Béton cellulaire on a : Best fitness = 76,2352 dB et Means =76,2488 dB pour une épaisseur $e = [12-20]$ cm
- Avec un isolant en Beton Bitume on a : Best fitness = 93,1352 dB et Means =93,1441 dB pour une épaisseur $e = [12-20]$ cm

On remarque également que les individus ne sont pas loin les uns des autres dans une même forme d'AG. Ce qui explique la convergence rapide des deux courbes.

Pour la CTD, l'isolation des systèmes masse-ressort-masse d'un bruit aérien, tiendra compte pour les quatre premiers isolants, que l'individu optimal correspondant à l'indice d'affaiblissement prendra en fonction de son épaisseur une meilleure valeur, dite de qualité de 38,1308 dB à une fréquence d'émission sonores d'équipements et auxiliaires de 2256,54 Hz. Ce meilleur indice d'absorption correspond à la ouate de cellulose Humide.

Pour ce qui est du plafond en aluminium, dans le cadre de la CTD une seule valeur optimale d'indice d'affaiblissement sera retenue en fonction de son épaisseur celle de 15,305 dB à la même fréquence.

Il est à observé en ce qui concerne les matériaux d'origine minéral, que la valeur pour les murs constituant les bacs de rétention l'isolant retenue sera la laine de roches avec un indice d'affaiblissement de l'ordre de 49,1877 dB fonction de son épaisseur et des fréquences d'émissions sonore.

Quant au socle des salle de machines l'identification et la recherche d'un indice d'affaiblissement acoustique dans la centrale nous permet de proposer comme meilleurs matériaux isolants le béton cellulaire et bitume respectivement de 76,2352 dB et 93,1352 dB.

Pour des surfaces rigides, il est à noté que cette dernière évaluation doit subir une étude plus approfondie, de part la qualité de la source sonore. Car celle-ci à été plus basée sur le bruit aérien. Par contre le calcul d'indice d'affaiblissements de matériaux des socles se fait généralement pour des bruit solidiens.

3.3.2.2 Optimisation de l'indice d'affaiblissement sur isolant des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : Fréquence sonore=1124,548 Hz

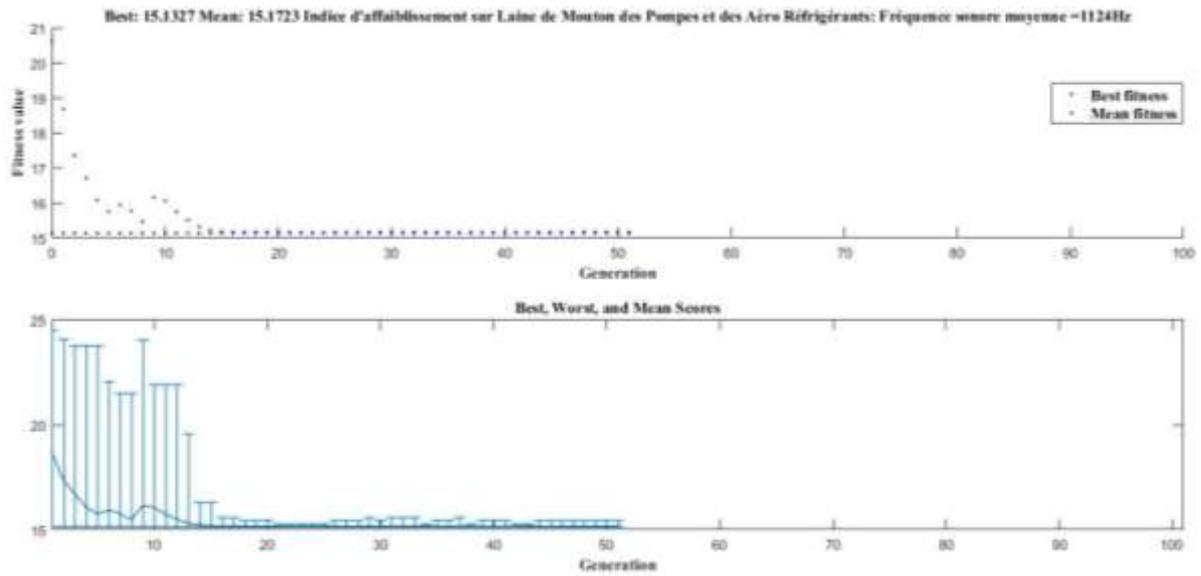


Figure 168 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Mouton des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

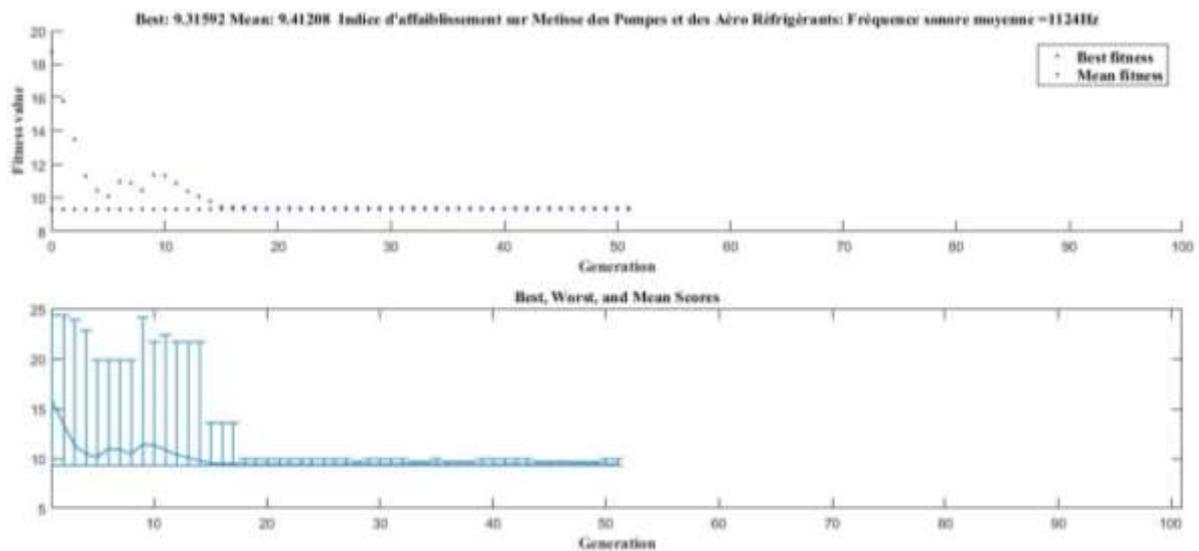


Figure 169 : Indice d'affaiblissement sur Metisse des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

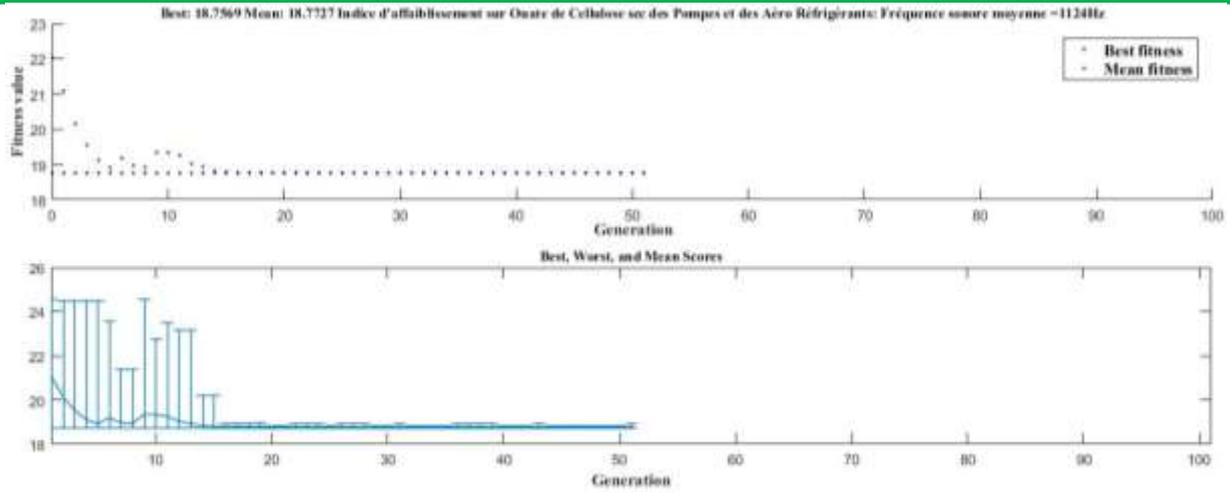


Figure 170 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose sec des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

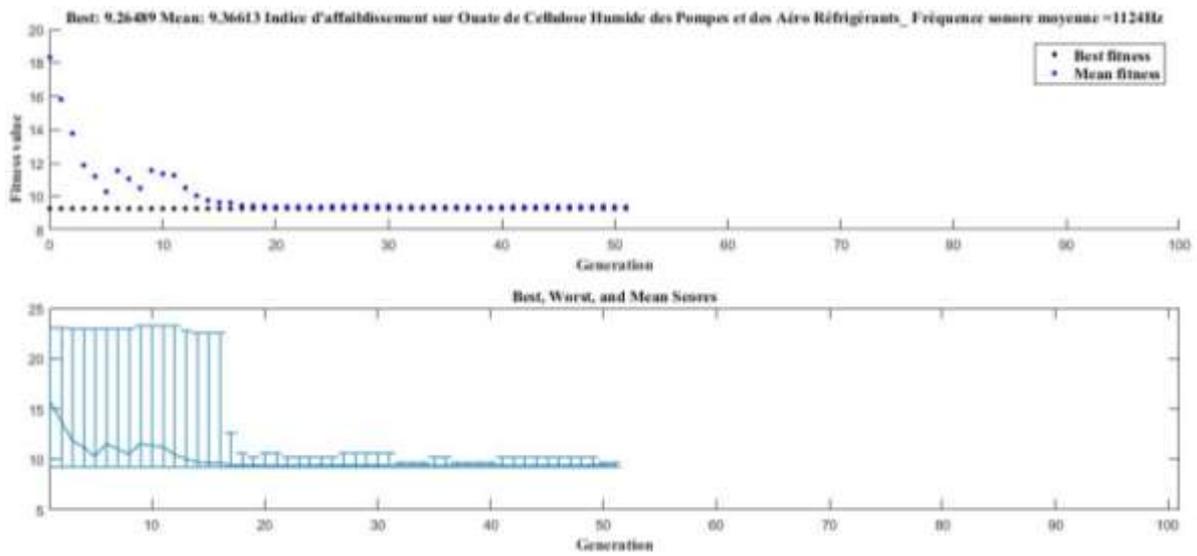


Figure 171 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de Cellulose humide des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

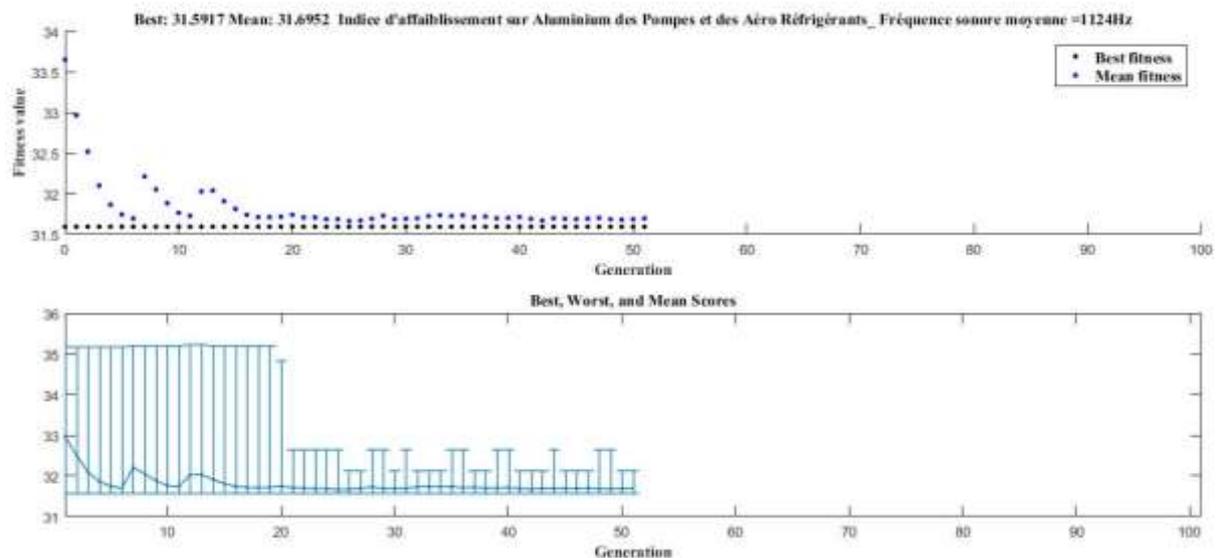


Figure 172 : Indice d'affaiblissement sur Aluminium des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

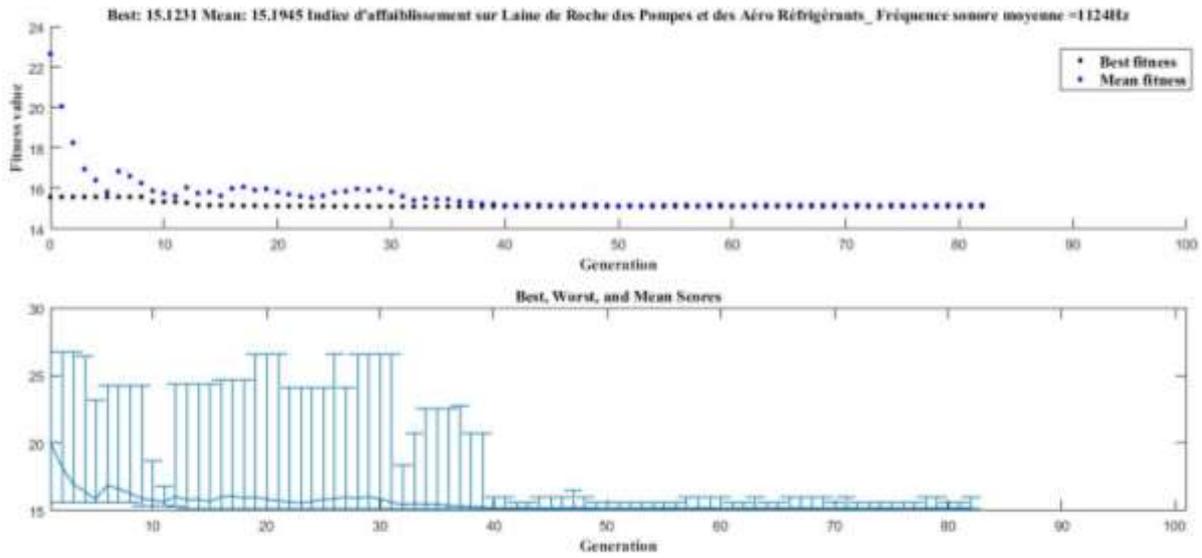


Figure 173 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Roches des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

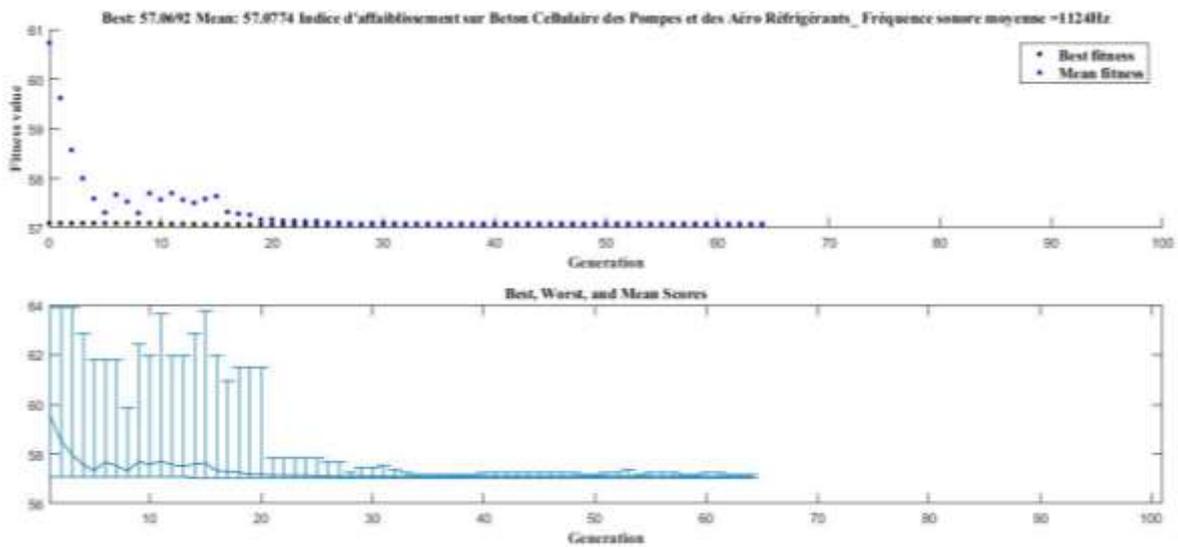


Figure 174 : Indice d'affaiblissement sur Beton Cellulaire des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

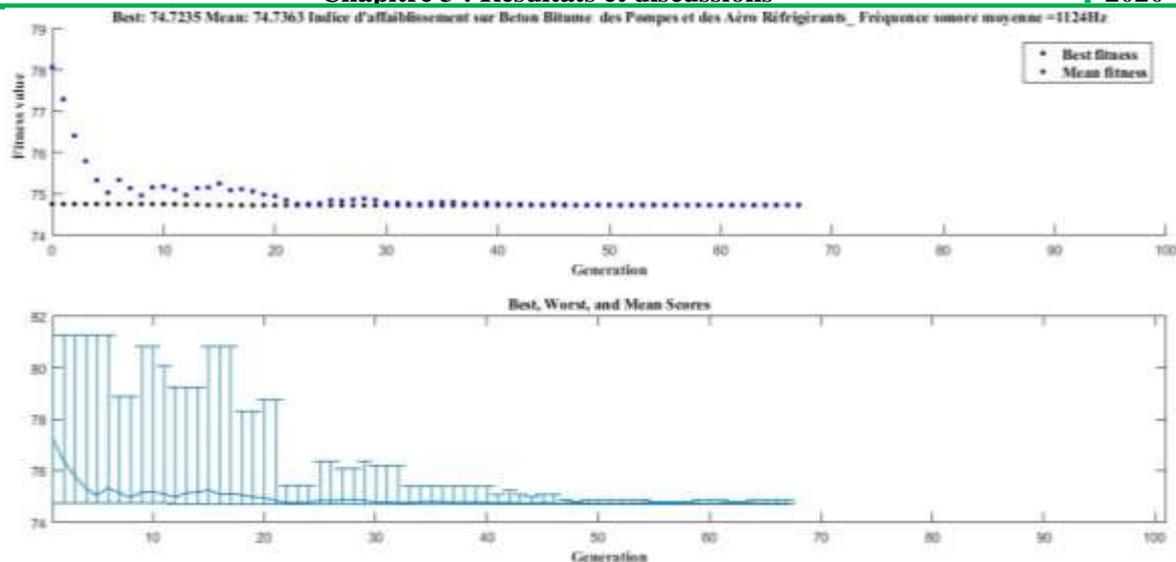


Figure 175 : Indice d'affaiblissement sur Beton Bitume des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO : $F_s = 1124,548$ Hz

Comme précédemment, en choisissant une sélection uniforme stochastique dans les figures (figure 165-173), nous obtenons comme présenté ci-dessus deux types de courbes.. A la convergence l'AG arrête l'échantillonnage lorsque la fonction d'évaluation ne varie plus considérablement avec les gènes sélectionnés et la boucle fermée, on visualise le Best fitness et la valeur moyenne (Means).

Suivant les types de matériaux organique ou inorganique, on délimite trois zones tous au long des 100 itérations. Dans la première zone, des 10-15 premières itérations les individus sont très instables pour les matériaux de types inorganique et peut instable pour les matériaux organiques. Suite à ces premières itération on conservent une seconde zones, dite tampon, ou les individus dans une suite de mutationnel croisement trouve déjà un point d'équilibre sur le type de reproduction ou on peut dire que les parents fils ont déjà un ou deux gènes recherché par le meilleurs individu la troisième phase est celle bien évidemment lier au gènes et chromosomes stables ou une différenciations visibles des courbes de ce font plus voir on parle des derniers croisement existants dans la génération.

Pour la centrale de d'Oyomabang ou les fréquences d'émission sonore des équipements et auxiliaires sont en moyenne autour de 1124,548 Hz

- Avec un isolant en laine de Mouton on a : Best fitness = 15,1327 dB et Means =15,1723 dB pour une épaisseur $e = [10-14]$ cm
- Avec un isolant en Métisse on a : Best fitness = 9,31592 dB et Means =9,41208 dB pour une épaisseur $e = [10-14]$ cm
- Avec un isolant en Ouate de cellulose sec on a : Best fitness = 18,7569 dB et Means =18,7727 dB pour une épaisseur $e = [12-16]$ cm

- Avec un isolant en Ouate de cellulose humide on a : Best fitness = 9,26489 dB et Means =9.36613 dB pour une épaisseur $e = [12-16]$ cm
- Avec un isolant en Aluminium on a : Best fitness = 31,5917 dB et Means =31,6952 dB pour une épaisseur $e = [0,1-0,2]$ cm
- Avec un isolant en Laine de roche on a : Best fitness = 15,1231 dB et Means =15,1945 dB pour une épaisseur $e = [17-23]$ cm
- Avec un isolant en Béton cellulaire on a : Best fitness = 57,0692dB et Means =57,0774 dB pour une épaisseur $e = [12-20]$ cm
- Avec un isolant en Beton Bitume on a : Best fitness = 74,7235 dB et Means =74,7363 dB pour une épaisseur $e = [12-20]$ cm

On remarque également que les individus ne sont pas loin les uns des autres dans une même forme d'AG. Ce qui explique la convergence rapide des deux courbes dans la troisième manche d'itération.

Pour la CTO, l'isolation des systèmes masse-ressort-masse d'un bruit aérien, tiendra compte pour les quatre premiers isolants, que l'individu optimal correspondant à l'indice d'affaiblissement prendra en fonction de son épaisseur une meilleure valeur, dite de qualité de 18,7569 dB à une fréquence d'émission sonores d'équipements et auxiliaires de 1124,548 Hz. Ce meilleur indice d'absorption correspond à la ouate de cellulose sec.

Pour ce qui est du plafond en aluminium, dans le cadre de la CTO une seule valeur optimale d'indice d'affaiblissement sera retenue en fonction de son épaisseur celle de 31,5917 dB à la même fréquence.

Il est à observé en ce qui concerne les matériaux d'origine minéral, que la valeur pour les murs constituant les bacs de rétention l'isolant retenue sera la laine de roches avec un indice d'affaiblissement de l'ordre de 15,1231 dB fonction de son épaisseur et des fréquences d'émissions sonore.

Quant au socle des salles de machines l'identification et la recherche d'un indice d'affaiblissement acoustique dans la centrale nous permet de proposer comme meilleurs matériaux isolants le béton cellulaire et bitume respectivement de 57,0692 dB et 74,7235 dB. Pour des surfaces rigides, il est à noter que cette dernière évaluation doit subir une étude plus approfondie, de part la qualité de la source sonore. Car celle-ci a été plus basée sur le bruit aérien. Par contre le calcul d'indice d'affaiblissements de matériaux des socles se fait généralement pour des bruits solidiens.

Par comparaisons des différents individus d'indice d'affaiblissement obtenues lors des différentes itérations dans les deux centrales pour tous les matériaux, on constate une isolation élevée suivant les matériaux de la CTD devant ceux de la CTO excepter le matériau

constitutif du plafond, donc l'aluminium. Où sa valeur plus élevée traduit réellement le niveau faible du niveau de pression sonore dans la salle des machines de la CTO.

3.3.2.3 Optimisation de l'indice d'affaiblissement sur isolant des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTO-CTD: Fréquence sonore= 625Hz

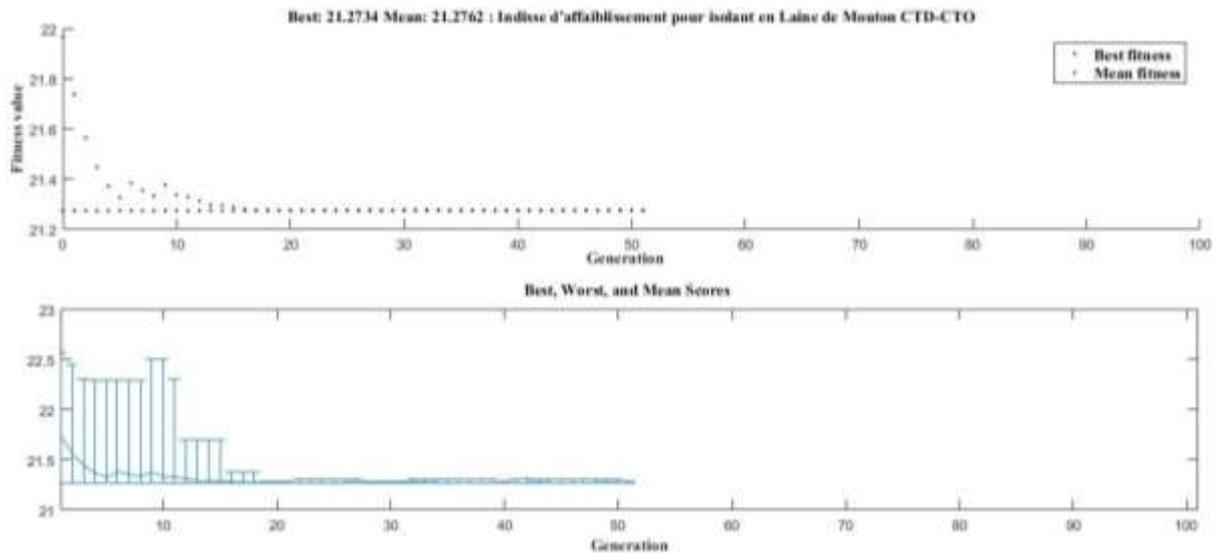


Figure 176 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Mouton des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

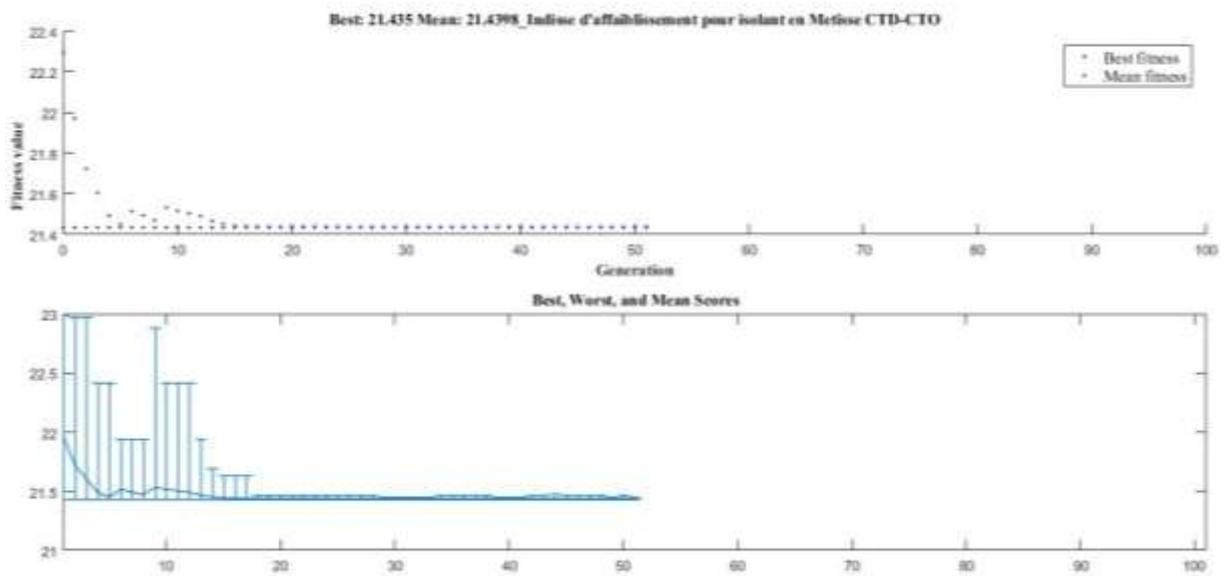


Figure 177 : Indice d'affaiblissement sur Metisse des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

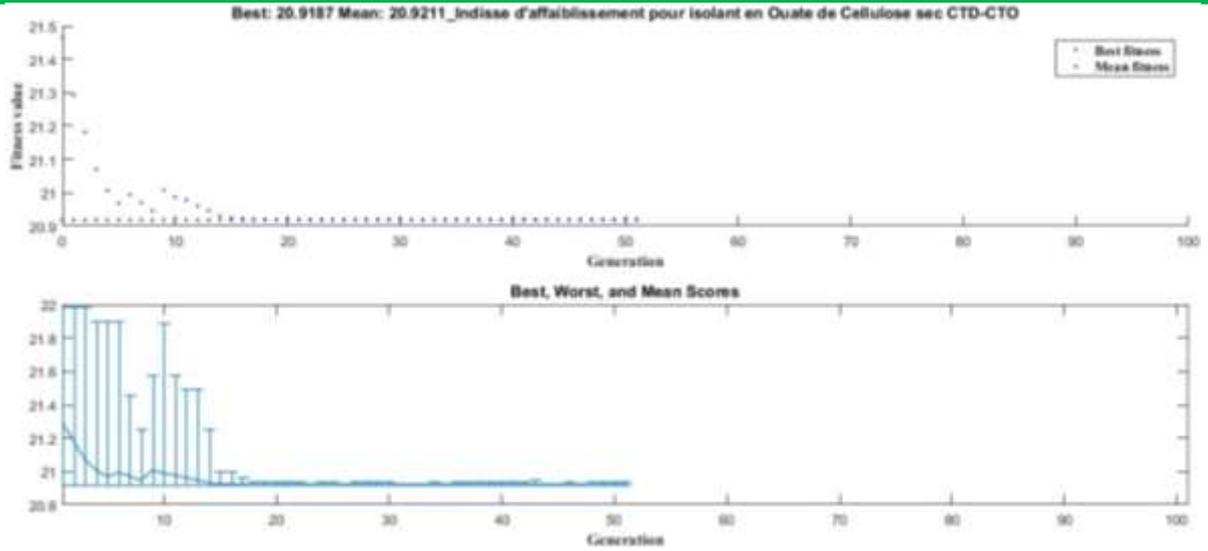


Figure 178 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de cellulose sec des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

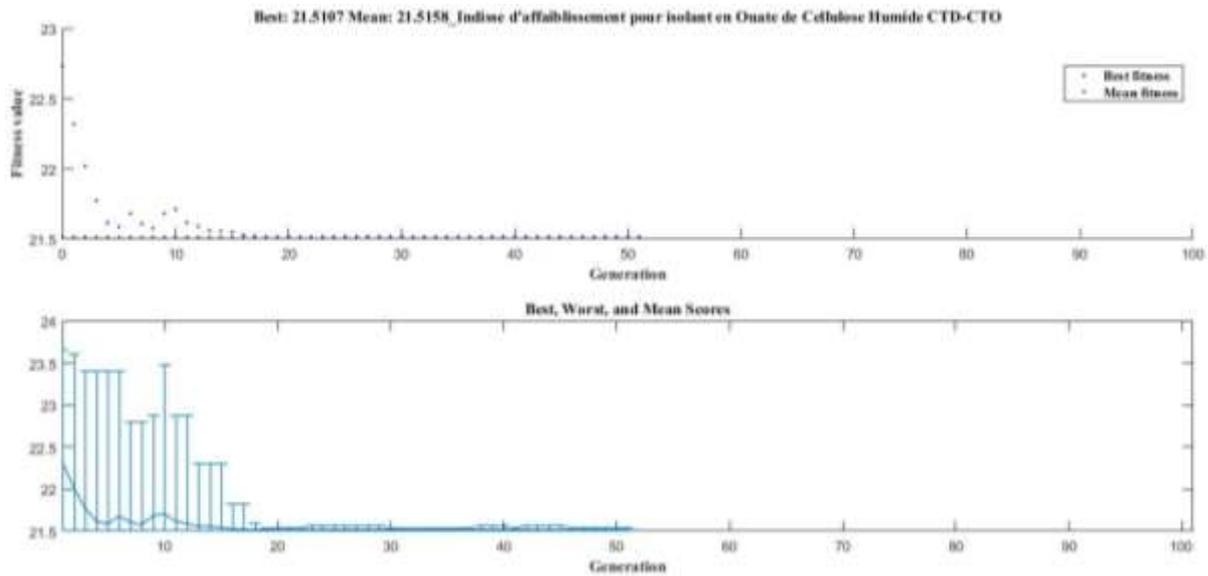


Figure 179 : Indice d'affaiblissement sur Ouate de Cellulose Humide des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

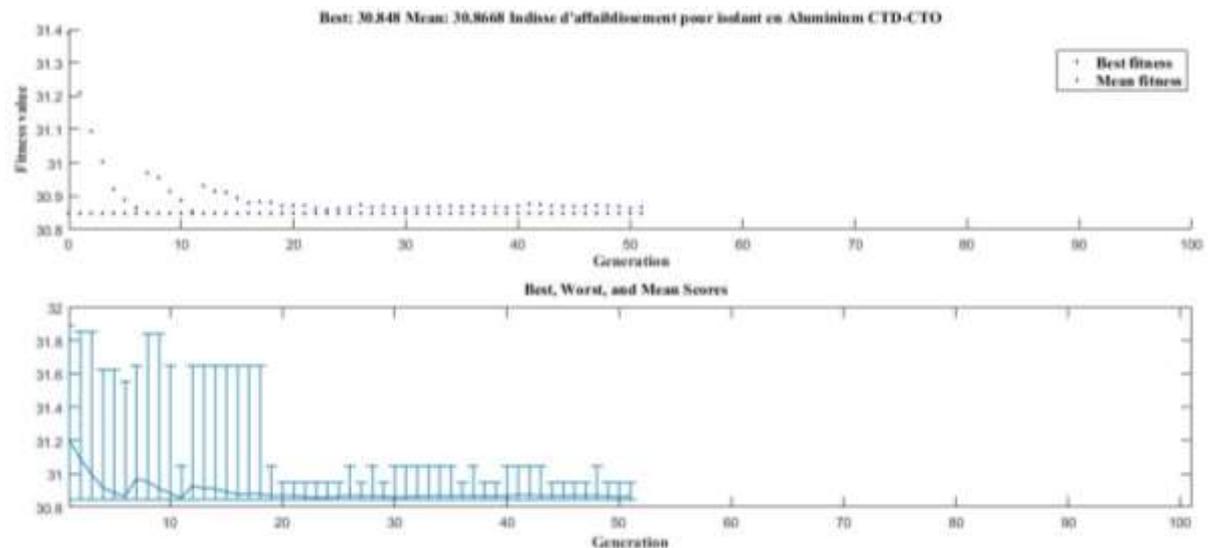


Figure 180 : Indice d'affaiblissement sur Aluminium des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

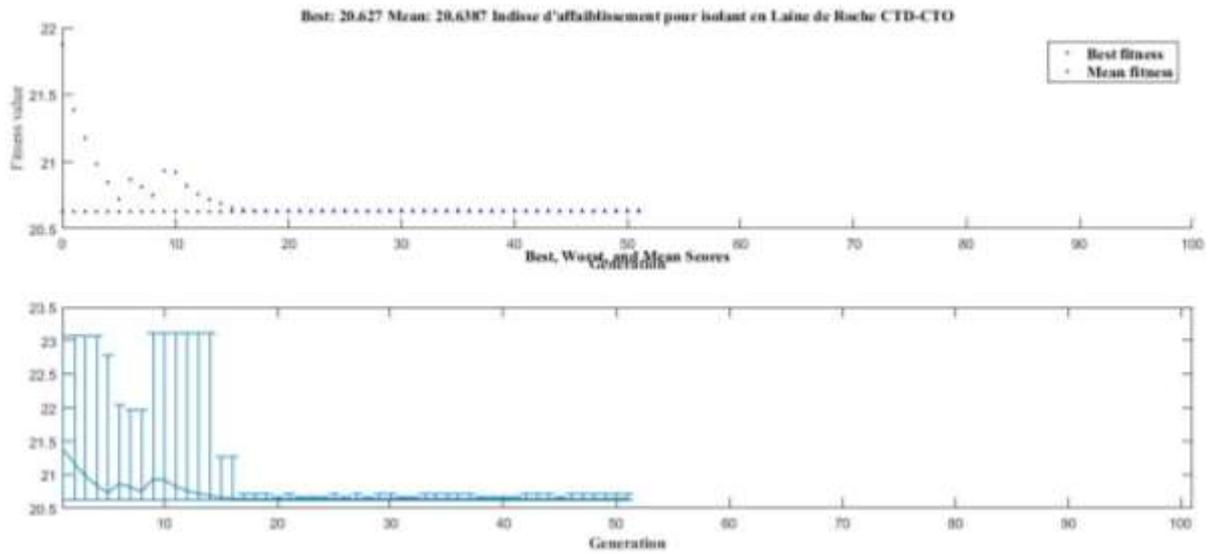


Figure 181 : Indice d'affaiblissement sur Laine de Roche des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

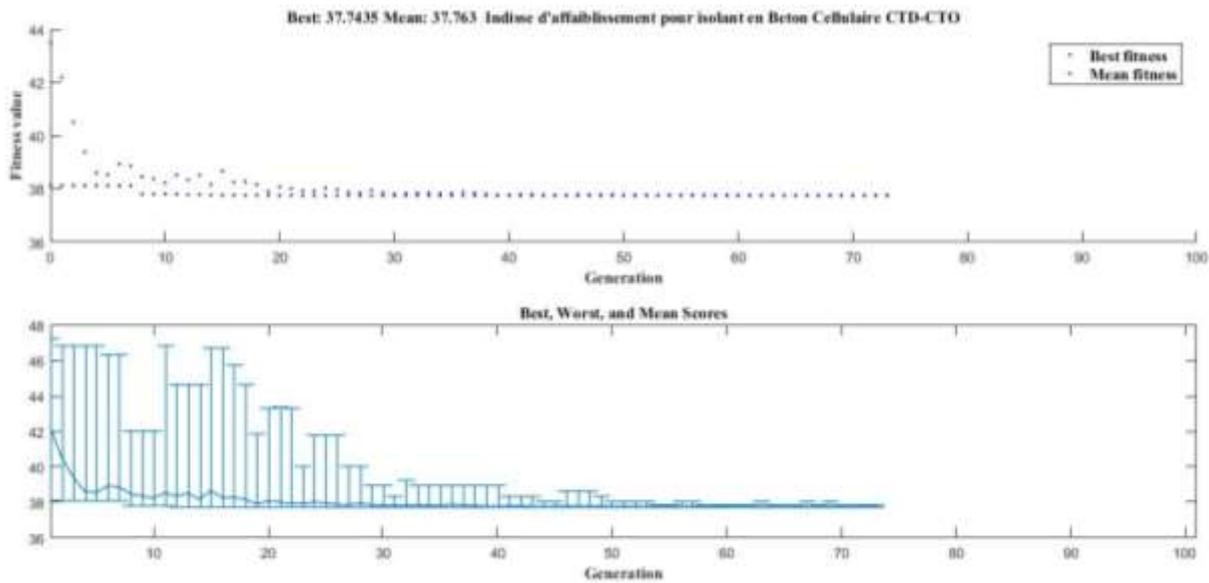


Figure 182 : Indice d'affaiblissement sur Beton Cellulaire des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

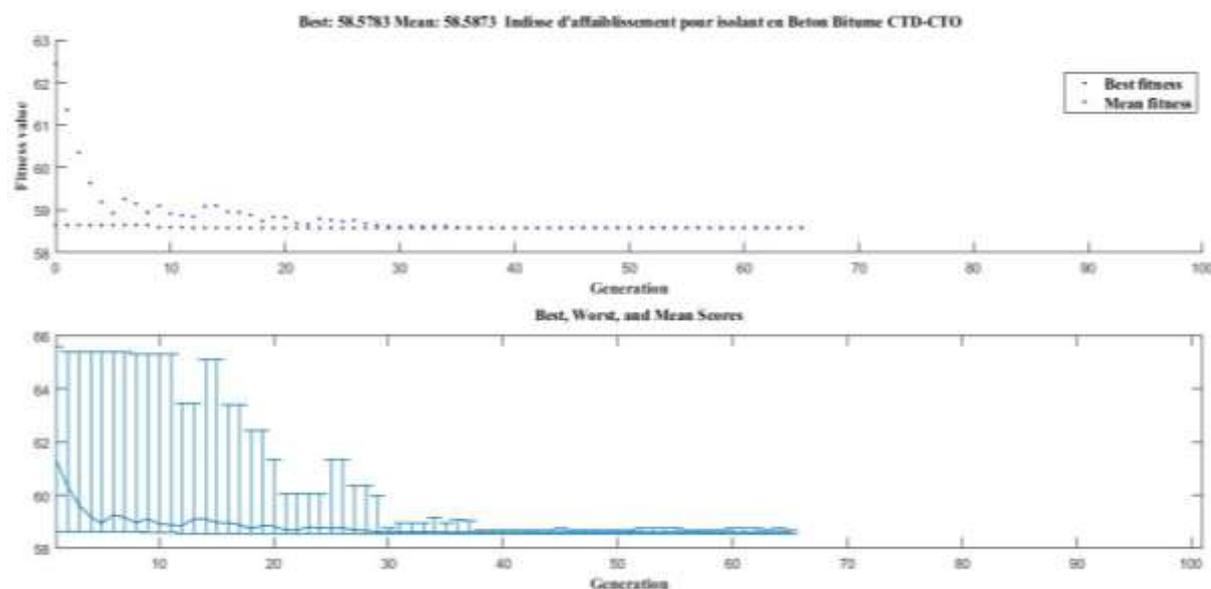


Figure 183 : Indice d'affaiblissement sur Beton Bitume des Auxiliaires de machines, Pompes et Aéroréfrigérants de la CTD-CTO : $F_s = 625$ Hz

En choisissant une sélection uniforme stochastique dans les figures (figure 174-181), nous obtenons comme présenté ci-dessus deux types de courbes. La courbe en bleue décrit l'ensemble des solutions obtenues suivant les principes d'action de l'AG. Sur le domaine d'évaluation cette courbe converge vers celle en noire. La courbe noire décrit les meilleurs individus retenus (best fitness value) parmi ceux sélectionnés et croisés. A la convergence l'AG arrête l'échantillonnage lorsque la fonction d'évaluation ne varie plus considérablement avec les gènes sélectionnés et la boucle fermée, on visualise le fitness et la valeur moyenne (Means).

Pour la centrale de Dibamba ou les fréquences d'émission sonore des équipements et auxiliaires sont en moyenne autour de 625 Hz

- Avec un isolant en laine de Mouton on a : Best fitness = 21,2734 dB et Means =21,2762 dB pour une épaisseur $e = [10-14]$ cm
- Avec un isolant en Métisse on a : Best fitness = 21,435 dB et Means =21,4398 dB pour une épaisseur $e = [10-14]$ cm
- Avec un isolant en Ouate de cellulose sec on a : Best fitness = 20,9187 dB et Means =20,9211 dB pour une épaisseur $e = [12-16]$ cm
- Avec un isolant en Ouate de cellulose humide on a : Best fitness = 21,5107 dB et Means =21,5158 dB pour une épaisseur $e = [12-16]$ cm
- Avec un isolant en Aluminium on a : Best fitness = 30,848 dB et Means =30,8668 dB pour une épaisseur $e = [0,1-0,2]$ cm
- Avec un isolant en Laine de roche on a : Best fitness = 20,627 dB et Means =20,6387 dB pour une épaisseur $e = [17-23]$ cm

- Avec un isolant en Béton cellulaire on a : Best fitness = 37,7435 dB et Means =37,763 dB pour une épaisseur $e = [12-20]$ cm
- Avec un isolant en Beton Bitume on a : Best fitness = 58,5783 dB et Means =58,5873 dB pour une épaisseur $e = [12-20]$ cm

On remarque également que les individus ne sont pas loin les uns des autres dans une même forme d'AG. Ce qui explique la convergence rapide des deux courbes.

Pour la moteur principale, l'isolation des systèmes masse-ressort-masse d'un bruit aérien, tiendra compte pour les quatre premiers isolants, que l'individue optimal correspondant à l'indice d'affaiblissement prendra en fonction de son épaisseur une meilleure valeur, dite de qualité de 21.5107 dB à une fréquence d'émission sonores d'équipements et auxiliaires de 625 Hz. Ce meilleur indice d'absorption correspond à la ouate de cellulose Humide.

Pour ce qui est du plafond en aluminium, dans le cadre de la CTD une seule valeur optimale d'indice d'affaiblissement sera retenue en fonction de son épaisseur celle de 30,848 dB à la même fréquence.

Il est à observé en ce qui concerne les matériaux d'origine minéral, que la valeur pour les murs constituant les bacs de rétention l'isolant retenue sera la laine de roches avec un indice d'affaiblissement de l'ordre de 20,627 dB fonction de son épaisseur et des fréquences d'émissions sonore.

Quant au socle des salle de machines l'identification et la recherche d'un indice d'affaiblissement acoustique dans la centrale nous permet de proposés comme meilleurs matériaux isolants le béton cellulaire et bitume respectivement de 37,7435 dB et 58,5783 dB.

Pour des surfaces rigides, il est à noté que cette dernière évaluation doit subir une étude plus approfondie, de part la qualité de la source sonore. Car celle-ci à été plus basée sur le bruit aérien. Par contre le calcul d'indice d'affaiblissements de matériaux des socles se fait généralement pour des bruit solidiens.

Conclusion

Le présent chapitre a permis d'une part de procéder à l'analyse et à l'interprétation des données industrielles, géographiques et atmosphériques des zones d'étude. D'autre part de modéliser la pollution atmosphérique, de cartographier les niveaux de puissance et pression sonore et d'optimiser suivant des modèles prédéfinis l'isolation acoustique dans les centrales thermiques. Il en découle que celles-ci sont sujettes à plusieurs discontinuités suivant des lignes atmosphériques et présentent des zones à risque élevées, pouvant conduire à des accidents in situ et des changements climatiques locaux. L'analyse des solutions ont permis d'avoir plusieurs précisions, notamment sur les concentrations des polluants, sur les niveaux de

pression et de puissances sonore sur le site et ces alentours géographique, sur les types d'isolants utiles et optimales pour une meilleure absorption acoustique et enfin sur les valeurs qualitatives nécessaires à une sécurité environnementale localisable. Tous ces éléments mis ensemble, montrent bien que les centrales mises en études sont polluantes, peuvent être remédiées quand à la qualité de polluants émis et doivent être mis sous un programme de gestion et de contrôle permanent. Par comparaison des unes aux autres, on a pu constater que certaines ont subi plus d'intense activité que d'autres. Cela nous permettant de remettre en question le niveau d'entretien et la prise en compte des pollutions local, régional et continentale.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans cette thèse, on s'est proposé de maintenir en condition opérationnelle les systèmes industriels dans une cohésion des activités de l'homme et son épanouissement dans le milieu récepteur, ceux à travers la présentation de différentes plateformes multifonctionnelles classique que sont les centrales thermiques suivant leur découpage géographique, leur procès de production énergétique, leurs impacts social, économique et surtout environnementales.

Pour mener à bien cette étude, un ordre chronologique s'est imposé à nous. Tout d'abord, une investigation des données in situ a conduit à un inventaire des polluants atmosphérique émis par chaque centrale selon le CITEPA et le GIEC et des niveaux sonores selon le CSTC et ISO 3744. Par la suite des modèles mathématiques tels que la dispersion atmosphérique selon les modèles Gaussien, la cartographie sonore selon une interpolation des points (S.Costa et al, 2011), l'optimisation des sites industrielles selon des études de performances acoustique liés aux indices d'affaiblissement des matériaux et plus en profondeur pour un diagnostic prévisionnelle, une méthode spécifique dites des algorithmes génétiques (J. H. Holland, 1975) à clôturer ces méthodes.

Les résultats de cette étude ont été effectués sur 36 mois (2009-2012) dans trois principales centrales thermiques que sont la centrale thermique d'OYOMABANG (CTO), la centrale thermique de MBALMAYO (CTM) et la centrale thermique de DIBAMBA (CTD ou DPDC). Sur cette base, différentes mesures typées pronostic ont été proposées, d'abord pour caractériser les Centrale thermique d'approvisionnement du Cameroun, ont pu, suite à des contrôles continue, établir que celles-ci fonctionnent en plein régime dans la plage de 6h PM à 00h AM, périodes pendant laquelle la consommation et la pollution sont maximale. D'autre part, tous les troisièmes mois de chaque année nous constatons que les valeurs de consommation sont maximales dans toutes les centrales en fonction. Cette période de l'année correspond bien au période d'étiage, pendant laquelle le potentiel hydroélectrique est bas, on fait appel aux centrales thermiques pour approvisionner le réseau électrique local, on constate que les polluants sont déversés dans l'atmosphère à grande quantité. Par contre tous les 7 mois de chaque année on constate une faible consommation des différents moteurs. Cette période correspond à une saison pluvieuse dans notre écosystème, ou les crues se font ressentir de même que l'augmentation du potentiel hydroélectrique, avec une faible demande d'approvisionnement par les Centrale Thermiques. De même que les consommations et la pollution évoluent simultanément en dent de scie tous au long de l'année, les deux méthodes

d'évaluation des consommations de fioul lourd par niveau d'activités et par compteur volumétrique présente une similitude, avec un écart considérable de l'ordre des centaines de tonnes de fioul lourd. Nous préconisons donc, pour ces inventaires la méthode liés au niveau d'activité à l'unité. De cette méthode, les polluants principaux à pourcentage élevé rejeter dans l'atmosphère sont par ordre décroissant ; les Oxydes d'azotes NO_x , les Oxydes de soufre SO_x , les matières particulaires PM de $10\mu\text{m}$ de diamètre, les composés Organiques (CO), les matières particulaires PM de $2,5\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$ de diamètre. Ces résultats corroborent à ceux de (Yu Zhao et al, 2008.), (Dongmei Li et al, 2012)et (Zhu Liu et al, 2015), ils permettent de dire que l'amélioration sur les méthodes mathématique a radical empirique fonctionnent aussi sur les composés Organiques (CO). De plus les quantités moyennes par ans de chaque polluant nous montrent en ce qui concerne les polluants SO_x et NO_x , que les quantités émises sont inférieures aux valeurs limites préconisées par le MINEP-Cameroun (WORLD BANK GROUP, July 1998.) (HELE Pierre, 2005 et 2011). Par contre les quantités émises de types PM et CO sont supérieures aux valeurs limites préconisées. Ajouté aux inventaires de polluants, nous avons suivants des modèles Gaussiens de distribution de polluants atmosphérique, ressortis fonction du site choisi comme source polluante, l'orientation de la pollution, les concentrations de polluants à la sortie des cheminé et une cartographie représentée par un maillage de point à différentes valeurs de vitesses choisi. Nous avons obtenu respectivement pour la CTM, CTD et la CTO des orientations de dispersion suivant les directions majeurs W, SW et W et des directions mineurs WSW, SSW et SSW, des concentrations en sortie de cheminée respectifs de 0.012kg.m^{-3} , 0.025kg.m^{-3} et 0.016kg.m^{-3} , celles-ci ont été couplés à des vitesses choisis in situ afin de pouvoir représenter une dispersion de plume dans un tunnel bien choisi, donnant ainsi la représentation local de la dispersion des polluants.

D'autre part, la comparaison suivant chaque moteur, des niveaux de puissance acoustique (L_w) et de pression sonore (L_{aeq}) au même point d'observation montre que les valeurs L_w sont toujours plus élevées que ceux des L_{aeq} . Les valeurs obtenues par mesure in situ sont inférieures aux valeurs calculées analytiquement par niveau de bruit équivalent par bandes d'octaves, représentant une accumulation sonore d'un point à un autre. Ceci lorsque les sources sont considérées indépendamment les unes des autres avec différentes formes d'atténuation telles que présentées par (JS Lamancusa, 2009) en vertu de la loi no. ISO 9613-1 : 1996 et ISO 9613-2 : 1996. Pour mieux apprécier ces différents paramètres nous avons étudiés ces émissions en un point récepteur situé à une distance (S-R) de $54,82\text{m}$ pour la CTO et 105m pour la CTD. Pour celles-ci, les niveaux de puissance acoustique L_w au niveau des sources ont pu être évaluer dans une plage de $90-150\text{dB}$ et les niveaux de pression acoustique L_{aeq} dans une plage de $45-110\text{dB}$ pour les mêmes sources. Les niveaux de pression acoustique au

niveau du récepteur est très élevé par rapport au niveau préconisé suivant l'OMS. Cette non-conformité rend vulnérable le personnel exerçant sur site et la population riveraine. C'est ainsi qu'il nous a été possible grâce à une technique de validation croisée de comparer les valeurs estimées par une méthode d'interpolation et les valeurs réelles du jeu de données échantillonnées. Des iso contours représentant le niveau de puissance sonore et de pression acoustique avec un écart respectifs des uns et des autres nous ont permis de cartographier les alentours des sources industrielles afin de repérer d'éventuelles sources secondaires qui se sont créées par superposition et par interférence lors de la propagation du bruit aérien. Ces iso contours ont pu donner une orientation générale de la direction de nuisances sonores au alentours des sites industrielles. Suivant les centrales, des directions d'orientation à la répartition de propagation des ondes sonores montrent respectivement des directions majeures NE-SO de la CTM, NE-SW majeur et NNE-SSW mineur de la CT-D et d'orientation majeur SSE-NNW de la CTO. Ces résultats nous confirment suivant chaque sites, l'influence du relief sur l'atténuation lors de la propagation des ondes acoustique et nous renseigne sur les distances de sécurité liées aux nuisances sonores.

Quant au fonctionnement des sites industrielles liées au pronostic de défaillance, la recherche de solutions s'est faite par optimisation des matériaux isolants. Suivant un algorithme génétique bien détaillé pour chaque site étudié, un test a été effectué à différentes fréquences sonore (50-4000 Hz) sur huit (08) types isolants retrouvés sur le site. Une population de 100 individus a été utilisée, le meilleur individu recherché était celui qui reflétait le meilleur indice d'affaiblissement acoustique. Pour la CTD, l'individu optimal ou indice d'affaiblissement de qualité est de 38,1308 dB à une fréquence d'émission sonores d'équipements et auxiliaires de 2256,54 Hz. Ce meilleur indice d'absorption correspond à la ouate de cellulose humide celui du plafond ; c'est l'aluminium avec un indice de 15,305 dB, pour les murs constituant les bacs de rétention. L'isolant retenue sera la laine de roches avec un indice d'affaiblissement de l'ordre de 49,1877 dB et le socle comme matériaux isolants le béton cellulaire et le bitume respectivement de 76,2352 dB et 93,1352 dB d'isolation acoustique. Pour la CTO, l'individu optimal ou indice d'affaiblissement de qualité est de 18,7569 dB à une fréquence d'émissions sonores d'équipements et auxiliaires de 1124,548 Hz. Ce meilleur indice d'absorption correspond à la ouate de cellulose sec, celui du plafond c'est l'aluminium avec un indice de 31,5917 dB, pour les murs constituant les bacs de rétention l'isolant retenue sera la laine de roches avec un indice d'affaiblissement de l'ordre de 15,1231 dB et le socle comme matériaux isolants le béton cellulaire et bitume respectivement de 57,0692 dB et 74,7235 dB d'isolation acoustique.

Perspectives

Le présent travail a consisté à optimiser la pollution atmosphérique et les nuisances sonore des Centrales thermiques du Cameroun tenant compte d'un grand ensemble de paramètres intrinsèques dans les sites industrielles. Cependant certains d'entre eux méritent d'être revus, notamment le comptage volumétrique lié au dépotage des combustibles dans les sites industriels, l'analyseur de fumées à la sortie des cheminées et le type de matériaux acoustiques utilisés lors de la construction pour l'isolation acoustique sont à envisager pour des travaux futurs.

Concernant les modèles liés aux maillages, il sera judicieux de rechercher une « échelle régionale » de dimensionnement avec un modèle de chimie de transport, pour une meilleure modélisation de la dispersion atmosphérique à grande échelle. La mise sur pied de nouveaux modèles inverses, permettant la recherche des capteurs de niveaux de concentration dans la portion d'atmosphère à étudier. L'implémentation des algorithmes génétiques liés à la recherche des points optimaux pour une atténuation de la pollution atmosphérique. Une comparaison plus approfondie avec les données satellitaires pourrait mieux apprécier le taux de concentration quant à son impact sur le changement climatique.

Quant à la cartographie sonore, un accent doit être porté, d'abord sur les méthodes de d'enregistrement des niveaux de puissance et de pression acoustique, ensuite sur le calcul lié à l'atténuation diverses et les fréquences d'émissions sonores. Enfin une cartographie sonore respectant toutes les normes environnementales dans les zones urbaines doit être érigée.

Comme environnementaliste nous préconisons la mise sur pied d'un Plan de Gestion Environnemental (PGE) qui tiendra compte des valeurs limites et des optimums que nous avons établis dans ce document afin de pronostiquer à court, moyen ou long terme un diagnostic du personnels et des équipements sur site dans un premier temps, des riverains, de la faune et de la flore pour leurs bien être dans un second temps .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(CCE) COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES. 1977. Méthode de calcul du cout de production de l'énergie électrique a partir de centrales thermiques classiques ou nucléaires. Paris : EUR 5914 FR, 1977.

(CITEPA),1995. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie industriel. France : Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique p. 16.

(CSTC) Centre Scientifique et Technique de la Construction, 2006. Acoustique environnementale Chapitre 04 : Propagation du bruit dans l'environnement. Bruxelles : <http://www.bbri.be>, 2006. 42 Pages.

(CSTC), Centre scientifique et technique de la construction. 2001. Acoustique Environnementale. Chap 02:Mésurage du bruit de l'environnement. BRUXELLES : GEMBLOUX, 2001, p. 53.

(CSTC), Centre scientifique et technique de la construction. 2004. Acoustique Environnementale . Chapitre 02.1 : Mésurage du bruit de l'environnement. BRUXELLES : GEMBLOUX, 2004, p. 53.

(CSTC), Centre scientifique et technique de la construction. 2006. Acoustique environnementale. Chap7: Bruit des installations techniques. Bruxelles : GEMBLOUX, 2006, p. 111.

(CSTC), Construction Centre Scientifique et Technique de la construction. 2004. Acoustique environnementale. Chapitre 02.1 : Mésurage du bruit de l'environnement. Bruxelles : GEMBLOUX, 2004, p. 53.

(CSTC)Centre Scientifique et Technique de la Construction, 2004. Acoustique Environnementale /Chapitre 02.1 : Mésurage du bruit de l'environnement. BRUXELLES, <http://www.bbri.be>, 2004. 53 pages.

Acurex Environmental. 1991. Evaluation Of Fuel-Based Additives For N2O And Air Toxic Control In Fluidized Bed Combustion Boilers. LONDON : Mountain View.

Alcoser E et Vizueté. 2006. organiser et programmer l'entretien des moteurs wärtsilä Vasa pour la combustion interne des combustibles lourd. LACUNGA : ECUADOR, 2006.

Alliot J and al. 1994.Intelligence Artificielle & Informatique Théorique, Cepaduès-Editions Toulouse, pp. pp. 441-460 .

Arquès. 1987. « Moteurs Alternatifs À Combustion Interne ». Québec : Masson, 1987.

ASTM International. Resonance Spectroscopy. Standard Test Methods for Hydrogen Content of Light Distillates, Middle Distillates, Gas Oils, and Residua by Low-Resolution Nuclear Magnetic. West Conshohocken, , United States. : PA 19428-2959, United States., Resonance Spectroscopy. p. 5, PA 19428-2959.

BANQUE MONDIAL. 2013. Etude d'optimisation de la mise en valeur du potentiel hydroélectrique du bassin versant de la sanaga. Yahounde : s.n., 2013. p. 15.

Beasley D and al . 1993. An interview of genetic algorithms: part 1 and 2 , research topics, University computing, pp. No.15, pp. 170-181.

Bechtel Power Corporation . 2010. Emission control technologies on stationary combustion Boilers. Washington : US EPA, 2010.

Belletati R. and al, 2001. Le pétrole. Zurich : Union Pétrolière Löwenstrasse 1, Edition 2001.

BIA METEO N°8. 2015. Brises en régions Cotieres et Montagneuses. PARIS : Coporate AIRCRAFT, 2015.

- Biocchi S. et Tenza A, 2008. Combustibles solides de recuperation etat des lieux et perspectives. France : cadet international, jkanvier 2008. p. 187, n°06-0225/1A. .
- Bies D. and Hansen C, 2009. Engineering Noise Control, Theory and Practice fourth edition. London. : Spon press InTaylor and Francis Group, 2009.
- BLINET T and al -b. 2018. ISO 10140-5, Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 5 : exigences relatives aux installations et appareillage d'essai. MAINE : CSTB, CEREMA, 2018. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME .
- BLINET T. and al - a. 2018. ISO 10140-2 / 2013, Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 2 : mesurage de l'isolation au bruit aérien. MAINE : CSTB / CEREMA, 2018. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME.
- BLINET T. and al -a. 2018. ISO 10140-2, Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 2 : mesurage de l'isolation au bruit aérien. MAINE : CSTB,CEREMA, 2018. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME.
- BLINET T. and al -c. 2018. ISO 10140-3, Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 3 : mesurage de l'isolation au bruit de choc. MAINE : CSTB,CEREMA, 2018. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME.
- BLINET T. and al. 1993. [ISO 9613-1, Acoustique. Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre. Partie 1 : calcul de l'absorption atmosphérique. France : CSTB, CEREMA, 1993. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME .
- BLINET T. and al. 2016. ISO 10140-1, Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 1 : règles d'application pour produits particuliers. MAINE : CSTB,CEREMA, 2016. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME .
- BLINET T. and al-b. 2018. ISO 10140-5 / 2013 Acoustique - Mesurage en laboratoire de l'isolation acoustique des éléments de construction - Partie 5 : exigences relatives aux installations et appareillage d'essai. MAINE : CSTB / CEREMA, 2018. N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME.
- Blocken B. and Gualtieri C, 2012. . Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. . s.l. : Environ. Model. Softw., 2012. . vol 33, 1–22. .
- Brandstatter B and Baumgartner U, 2002. Particle Swarm Optimization - Mass-Spring System Analogon., IEEE Trans. Magn., pp. Vol. 38, No. 2, pp. 997-1000.
- BUCREP, Bureau Central des Recensements et des Etudes de Population. 2015. Projection Démographique (3éme RGPH Volume III Tome 3). Yaounde-Centre : 2016, 2015. p. 91 .
- Cameroon Country Report. 2014. Energy and renewable energy, environmental governance. Yaounde : s.n., 2014. p. 25.
- Canetto P. et Jeanjean G. 2007. Techniques de reduction du bruit en entreprise . Paris : Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2007. ISBN 978-2-7389-16-36-5.
- CARREGA P, 1989. Vents et échelles de contraintes géographiques : exemples en région niçoise., L'AIC, pp. pp. 83-88.
- Carruthers J. et Hunt R, 1990. Fluid Mechanics of Airflow over Hills : Turbulence, Fluxes, and Waves in the Boundary Layer., Atmospheric Processes Over Complex Terrain, pp. 23, 83-103.
- Caruana R. and Schaffer J, 1988. Representation and hidden bias: Gray vs. binary coding for genetic algorithms, J. Laird (Ed.), Proceedings of the 5th International conference on machine Learning, San Mateo, CA, Morgan Kauffmann Pulishers, pp. pp.153-161.
- CEREMA, 1997. ISO 11654 Acoustique - Absorbants pour l'utilisation dans les bâtiments . MAINE : CSTB, N/Réf. DSC/2018-123/CG/ME.
- Cetin M. and al . 2018. A study on the determination of the natural park's sustainable tourism potential, Environ Monit Assess, p. 8.

- Cherruault Y. 1999. Optimisation: méthodes locales et globales. s.l. : Presses Universitaires de France, ISBN 2613064991064, 1999.
- Clarke C and Detroit D. 2011. Operation and Maintenance Instructions Manual. West Detroit, Michigan: Detroit Diesel Engines approved for Fire Pump Service (DDFP), 2011.
- COMMISSION EUROPÉENNE. Juillet 2006. Document de référence sur les meilleures techniques disponibles : Grandes installations de combustion. Séville – Espagne : IPPC, Juillet 2006.
- Couillet J. et al. Décembre 2002. Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. paris : INERIS DRA-2002-25427, Décembre 2002. p. 61 pages.
- Craffe N, Juillet 2003. La modélisation de la dispersion atmosphérique. Cas particulier des odeurs. Luxembourg : Fondation Universitaire Luxembourgeoise - Arlon, Juillet 2003.
- CRS. Septembre 2000. Norme sur la classification des fiouls . Septembre 2000. 500.
- CSTC. 2004. Acoustique environnementale. Chapitre 02.1: Mesurage du bruit de l'environnement (p53). . BRUXELLES : GEMBLoux, 2004.
- CTO, service d'exploitation. 2012. Archive. Yaoundé : AES-SONEL, 2012.
- Culioli J, 1994. Introduction à l'optimisation , Ellipses ISBN 26729-89428-4.
- D. Keith Wilson and al. 2007. Acoustic/seismic signal propagation and sensor performance modeling, U.S. Army Cold Regions Res. and Eng. Lab, pp. Vol. 6562, 65620R.
- Darío R. and Watterson J. 2006. Chapitre 2: COMBUSTION STATIONNAIRE ; Pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre. Royaume-Uni : Lignes directrices du GIEC , 2006.
- Darwin C and al, 1859. "The origin of species by means of natural selection. London : John Marray 1859.
- Davenport A and J. Wieringa, Aug. 2000. The revised Davenport roughness classification for cities and sheltered country. London : Davis Ca. AMS Proceedings, Aug. 2000. 3rd symp. On the Urban Environment. pp. 14-10.
- De Jong K, 1975. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. s.l. : PhD thesis, University of Michigan, Dissertation Abstracts International, 36(10), 5140B, University Microfilms, 1975.
- De Jong K. and Spears W. 1992. A formal analysis of the role of multi-point crossover in genetic algorithms, Annuals of Mathematics and Artificial Intelligence Journal, pp. Vol. 5, No. 1, pp.1-26.
- Dehlmoun L. 2012. Simulation Numérique de L'écoulement du Vent Dans Un site Urbain. Algérie : Université Des Sciences et de la Technologie mohammed boudiaf d'oran faculte de genie-mecanique, 2012.
- DELPRAT N, et al. 1992, Asymptotic wave let and gabor analysis: Extract of instantaneous frequency IEEE Transon information Theory, Vol. 32, pp. 644-664.
- Desbazeille M. Juillet 2010. Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de la vitesse de rotation du vilebrequin. Rhône-Alpes : s.n., Juillet 2010.
- Dongmei Li et al. 2012. Air Pollutant Emissions from Coal-Fired Power Plants. s.l. : Open Journal of Air Pollution,, 2012. p. 5. P 72-77.
- Douki T. and Maitre A. 2009. modulation de la genotoxicite des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en mélanges. paris : INRS, 2009.
- Doury, A. 1976. Une méthode de calcul partique et générale pour la prévision numérique des pollutions véhiculées par l'atmosphère. Paris France pp 33 : Rapport technique 4280, CEA 1976.
- Ebner Th. and al. 1998. Utilizing Feed Forward Neural Networks for Acceleration of Global Optimisation Procedures, IEEE Trans. Magn, pp. Vol. 34, No. 5, pp. 2928-2931 .

- EIIP. July 2001. Emission Inventory Improvement Program ; Uncontrolled Emission Factor listing for criteria air pollutants. <http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/> : Eastern research group, inc, July 2001.
- Elperin T. 1988. Monte Carlo structural optimisation in discrete variables with annealing algorithm, *International Journal for numerical methods in engineering*, pp. Vol. 26, pp. 815-82.
- Eltrando G.B. et Adelin M, 2008. Intérêt de L'étude des brises thermiques : exemples des brises Littorales et orographiques. 2008, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, pp. 49-61.
- ENEO. 2018. Rapport annuel 2018, Vers une modernisation de la distribution électrique. Douala: Tome 2, 2018. p. 52.
- EPA Base Case v.5.13. 2006. Summary of Emission Control Technology Retrofit Options. USA : s.n., 2006.
- Fishman G. 1997. Monte Carlo, concepts, Algorithms and Applications, Springer-Verlag, New York, pp. pp 59/ 85–90.
- Fogel L, 1994. Evolutionary Programming in Perspective: The top-Dawn View Computational Intelligence, *Imitating Life*, in Zarada, pp. pp. 135-146.
- FONTELLE J.P. 2006. Méthodes de quantification des émissions dans l'air. Centre national de référence des émissions dans l'air . PARIS : Centre Interprofessionnel Technique d'Études CITEPA, 2006. p. 17, *Technique de l'ingénieur* .
- GARDEUX V. 2011. These Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse de données de puces à ADN. PARIS : Université De Paris-Est Créteil École Doctorale (ED 532), 2011.
- Garrat J. 1992. *The Atmospheric Boundary Layer-*. Cambridge University Press : Cambridge Atmospheric and Space Science Series-Cambridge University Press, PP 20-34.
- GIEC-a. 2006. Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, Chapitre 1 : Introduction aux lignes directrices. s.l. : GIEC, 2006. Volume 1 pp 13.
- GIEC-b. 2006. Les inventaires nationaux des gaz à effet de serre Chapitre 1: Introduction. s.l. : Lignes directrices 2006 du GIEC, 2006. Volume 2 Energie, pp 32.
- Gillon F. 1997. Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur a commutations électroniques. Lille : Thèse soutenue , USTL, 1997.
- Goldberg D, 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley.
- Grant W. 4 septembre 2001. *Physics of the Atmosphere and Ocean science : Atmospheric Thermodynamics*. WISCONSIN : Sundog Publishing, 4 septembre 2001.
- Grondin O. Décembre 2004. Modélisation du moteur à allumage par compression dans la perspective du contrôle et du diagnostic . Royaume-Uni : s.n.
- GUIBET J, Septembre 2008. Carburants liquides. L'École nationale supérieure du Pétrole et des Moteurs. Louvain : Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, SEPTEMBRE 2008. p. 33 pages.
- HELE P, 2005. Normes environnementales et procédure d'inspection des installations industrielles et commerciales au Cameroun. . Yaounde : MINEP, 2005.
- HELE Pierre. 2005 et 2011. Normes environnementales et procédure d'inspection des installations industrielles et commerciales au Cameroun. Yaoundé-Cameroun : MINEP, 2005 et 2011.
- Heywood J, 1988. *Internal Combustion Engine Fundamental*. Massachusetts : Edition McGraw-Hill, 1988.
- Hohenwarter D. and al, 2014. Nocturnal boundary layer profiles and measured frequency dependent influence on sound propagation, *Applied Acoustics*, pp. vol. 76, 416–430 .

- Holland J, 1975. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975.
- Hosker J, 1985. Flow and Diffusion Near Obstacles, in: Atmospheric Science and Power Production. Canada : pp. 241–326., 1985.
- Hua Q and Yang E. 2018 effect of thickness, density and cavity depth on the sound absorption properties of wool boards, autex research journal, vol. 18, no 2, doi: 10.1515/aut-2017-0020©autex , p. 6 pages.
- Hussein I. et al. Novembre 2006. Moteur diesel suralimenté bases et calculs cycles réel, théorique et thermodynamique. Rimouski - quebec : Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE), Novembre 2006.
- IEC 60050-151. 2001. International Standard Second edition . British : British Standards Institution BS 5228: Part 1 :2009 (with Amendment 1: 2014)., 2001.
- INGRAD. 1953. A Review of the Influence of Meteorological Conditions on Sound Propagation , journal of the acoustical society of america , pp. VOL 25, 3.
- INNOSPEC. Janvier 2012. Fiche de données de sécurité : Identification de la substance et/ou du mélange. France : N°1907.
- Institut Wallon, 2000. Mesure de la Consommation de fuel. Av. Prince de Liège 7 : Ministère de la Région Wallonne DGTRE - Service de l'Énergie - 5100 Jambes, 2000.
- INTERNATIONAL DEVELOPMENT ASSOCIATION. Mai 2009. Le secteur de l'électricité au Cameroun . Yaounde : s.n., Mai 2009.
- ISO 3744 . 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, 1994.
- ISO 3744. 1994. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. 1994.
- ISO 3744:1994. Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane. .
- ISO8297. 1994. Acoustics: détermination of sound power levels of multisource industrial plants for the evaluation of sound-pressure levels in the environment- Engineering method. 1994.
- Jacobsen F. and Bree H. 2005 A comparison of two different sound intensity measurement principles, The Journal of the Acoustical Society of America, pp. vol (3) 1510–1517.
- Jourdain F. février 2010. PHENOMENOLOGIE ET MODELISATION DES TRANSFERTS DE POLLUANTS DANS L'ATMOSPHERE. Paris: CEA Cadarache, février 2010.
- K.merzouk N. 02 Mai 2006. Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en ALGERIE. Algérie : Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique, 02 Mai 2006.
- Kantorovich L and Vershik L, June 2007. Linear programming. Steklov : St. Petersburg Department of Steklov Institute of Mathematics., June 2007.
- Khanindra P, 1996. modelling and prediction of environmental noise levels near mechanised surface mines and quarries. London: Imperial university of London college of science technology and medicine, department of earth resources engineering, 1996.
- Korsakissok I. 2009. Changements d'échelle en modélisation de la qualité de l'air et estimation des incertitudes associées. Paris : Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est. 33, 2009.
- Kowalik J, Osborne M. 1968. Methods for Unconstrained optimization problems Modern analytic and computational methods in Science and Mathematics, Richard Bellman Ed, pp. ISBN 0-444-00041-0.
- Koza J 1992. Genetic Programming, Cambridge, MA, MIT Press.

- Krauss G. et Yezou R. 2009-2010. Acoustique du bâtiment . Lyon : Institut National des Sciences Appliqués de Lyon, 2009-2010. 4GCU.
- KUITCHE A. 2007-2008. Thermodynamique Appliquée. NGAOUNDERE : n°0001, 2007-2008. p. 143.
- LACOUR S. 2002. Pollution atmosphérique et inventaires d'émission. France : CEREALaboratoire d'environnement atmosphérique, 2002.
- Larsson Conny-a 1997, Atmospheric Absorption Conditions for Horizontal Sound Propagation Applied Acoustics, pp. Vol. 50, No. 3, pp. 231-245, .
- Larsson Conny-b. 1997; Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident : A local-scale simulation and sensitivity study, Atmos. Env. , pp. vol 70, 267–279. 29.
- Lauret P. juin 2014. Modélisation de la dispersion atmosphérique sur un site industriel par combinaison d'automates cellulaires et de réseaux de neurones. Saint-Étienne : École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, juin 2014.
- LI Yan and YANG WeiDong . 2012. Sound absorption performance of natural fibers and their composites, SCIENCES CHINA Technological Sciences doi: 10.1007/s11431-012-4943-1 , pp. Vol.55 No.8: 2278–2283 .
- Luna S. et al. April 2007. Air Pollution Emission Control Devices for Stationary Sources . Canada : Air & Waste Management Association (A&WMA), April 2007.
- Malek E. and al , 2006. Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes. Logan, Cache Valley : USA. Atmos. Res, 2006, Vol. vol 79, 108–122.
- Mavroidis I. 2003. Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles, Atmospheric Environment, pp. vol 37, pp 2903–2918.
- Messine F and al, 1998. Optimal Design of Electro-Mechanical Actuators: A New Method Based on Global Optimization. 1998, Ieee Transactions On Magnetics, pp. pp 10 VOL. 34, NO. 1.
- Michalewicz Z and al. 1996. Evolutionary Algorithms for Constrained Engineering Problems. 1996, Computers & Industrial Engineering Journal, pp. Vol. 30, No. 2.
- Ministère de l'Énergie et de l'Eau. 2016. Plan de Développement à long terme du Secteur de l'Électricité Horizon 2030 (PDSE 2030). Yaounde : juillet, 2016. p. 153.
- Ministère de l'Eau et de l'ENERGIE-PDSE 2030. JUILLET 2006. Plan de développement production. Yaounde : IDC-EDF-SOGREAH-BDS.
- Minoux M. 1983. Programmation mathématique : Tome 1 Théorie et algorithmes. s.l. : Ed.Dunod, 1983.
- Mirosław M, 2008. Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape, Applied Acoustics DOI: 10.1016/j.apacoust.2007.02.004, pp. Vol 69(7):583-590.
- MJ Bradley & Associates. February 2005. Best Available Technology for Air Pollution Control: Analysis Guidance and Case Studies for North America . Canada: Commission for Environmental Cooperation (CEC) of North America , February 2005 .
- Monge F, 2012. Caractéristique des Fioil lourd TBTS. [En ligne] Juin 2012. <http://nicole.cortial.net/physbts.html>.
- NDJOMO D. 1988, Les solutions solaires aux besoins énergétiques prioritaires des populations rurales des pays en développement. n°404, Revue de l'Énergie, pp. 498-503.
- Nelder J and Mead R. 1965. A Simplex Method for function Minimisation, Computer Journal, pp. Vol. 7, pp. 308-312.
- Nkué V. et Njomo D. avril 2009 Analyse du système énergétique camerounais dans une perspective., Revue de l'Énergie, Vol. n°588, pp. 102-116.

- Norton M, 1989. Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers. Cambridge : Cambridge University Press, 1989.
- NOUMOYE W. juillet 2000. Modelisation de la dispersion des polluants dans l'atmosphere au voisinage d'une centrale thermique : cas d'oyom abang. Yaounde : Laboratoire des Energies, Systemes Electriques et Electroniques, juillet 2000.
- Oberkampf et Trucano. 2002. Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics, Progress in Aerospace Sciences, Journal-Elsevier, pp. vol 38, 209–272.
- Ola O. and al. April 2007. Propagation of sound . Akure, Ondo State : Department Of Architecture School of Environmental Technology, Federal University of Technology, APRIL 2007.
- Pahner U. and Hameyer K. 2000. Adaptive Coupling of Differential Evolution and Multiquadrics Approximation for the tuning of the optimization process, IEEE Trans. Magn, pp. Vol. 36, No. 4, pp. 1047-1051.
- Pasquill F. and F.B. Smith, 1983. Atmospheric Diffusion, Third Edition. New York : Horwood Halsted Press, 1983.
- Pasquill, F. 1961. The estimation of the dispersion of windborne material, Meteorol. Mag., pp. VOL 90(1063), PP 33–49. 33.
- PATHAK K and al. 1999. Activity accounting technique for environmental noise assessment in mechanized surface mining, Environmental Monitoring and Assessment, pp. vol 56, 241–256.
- Plamenov R, juin 2011. Design a four-cylinder Internal Combustion Engine. Pamplona : Université publique de NAVARRA, juin 2011. p. 88, Projet.
- Powell M.J.D. and Skolnick M, . 1993. . Using Genetic Algorithms in Engineering Design Optimisation with non linear Constraints . pp. 424-430 : Proceedings of the fifth International Conference on Genetic Algorithms, 1993. .
- Raffinerie de LIMBE, SONARA. 2005. Certifica de Qualité. LIMBE-Cameroon : s.n., 2005. p. Vol 1 N°159.
- Rahmat Y and Michielssen E, 1999. Electromagnetic Optimisation by Genetic Algorithms, John Wiley & Sons.
- Rao S, 1996. Engineering Optimisation, Theory and Practice. s.l. : John Wiley & Sons., 1996.
- Rechenberg I, 1994. Evolution Strategy In Zarada Computational Intelligence, Imitating Life, pp. pp.147-159.
- SADEK R, mai 2013. Modélisation de l'écoulement atmosphérique à l'échelle hectométrique. LYON : L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON et NUMTECH, mai 2013.
- Sareni B. and Krahenbuhl L, 2000, Efficient Genetic Algorithms for Solving Hard Constrained Optimization Problems.IEEE transactions on magnetics, pp. VOL.36, NO. 4, pp 1027-1030 .
- Sawerysyn J, 2012. La combustion du bois et ses impacts sur la qualité de l'air. Lille : Vol 3 , 2012. p. 10. Vol. Volume 3. N°83.
- Schlesinger,S. 1979, Terminology for model credibility. Simulation, Trend of Simulation Quality, pp. vol 32, 103–104.
- Schmit-Fadhit H, 23 novembre. 2010. dispersion atmosphérique module environnement et qualité de l'air. Paris : Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA), 23 novembre. 2010. p. 86 pages.
- SOULHAC L. and al, 2002. Modélisation de la dispersion des émissions atmosphériques d'un site industriel . LYON : École Centrale de Lyon – Association, 2002.

- Sportisse B. 2003. Modélisation de la pollution atmosphérique. [auteur du livre] Laboratoire Commun EDF-R & D-ENPC Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique. Paris : Cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2003, p. 73 pages.
- Staudt E. et Bradley M, Marc 2011. Control Technologies to Reduce Conventional and Hazardous Air Pollutants from Coal-Fired Power Plants . South Street, Boston : Andover Technology Partners, Marc 2011.
- Stimpson and al, 1986. Predicting Sound Power Radiation from Built-up Structures Using Statistical Energy Analysis, Journal of Sound and Vibration , pp. Vol. 107, No.1, pp. 107-120.
- Stohl and al . 2012 Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant : determination of the source term, atmospheric dispersion, Atmos. Chem. Phys., pp. vol 2313–2343. 41, 58, 68, 78, 79.
- Storn R. and Price K. 1996. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by Differential Evolution, International Conference on Evolutionary computation Japon, pp. pp 519–423.
- Stull R, 1988.. An introduction to Boundary Layer Meteorology. CANADA : Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Stull R. 1988. An introduction to Boundary Layer Meteorology. Netherlands. PP 20, 34 : Kluwer Academic Publishers Dordrecht, The Netherlands, 1988.
- TAMBA J.G. 2013. Prospective de la demande en produits pétroliers et des émissions de ges au Cameroun jusqu'a l'horizon 2030 dans un scénario de type a1 du sres. Yaounde : these, 2013. p. 231 .
- TAMBA, J. G. 2009. Estimations des émissions des gaz a effet de serre liées a la combustion fixe dans la société nationale de Raffinage du Cameroun. Yaounde : Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Énergie et de l'Environnement, Université de yaoundé 1, 2009.
- Techniques de l'Ingénieur, septembre 2008. Combustible liquide, techniques de l'Ingénieur, Traité Génie énergétique. Génie énergétique, l'École nationale supérieure du Pétrole et des Moteurs de l'Université de Louvain. Louvain p. 33, BE 8 545.
- Tudor F. and Caillat S. Avril 2008. Techniques de dépollution dans les applications industrielles de combustion. École des Mines de Douai. Venezuela : CORIA INSA-Univ. de Rouen , Avril 2008. p. 65 pages .
- TURBELIN G. janvier 2000. Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent. PELVOUX D'ILE DE FRANCE : UNIVERSITE D'EVRYVAL D'ESSONNE U.F.R. DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE, janvier 2000.
- Valenti P, 1707. A Case Study of British Sabotage Leibniz, Papin, and The Steam Engine. British : The Newcomen Society , 1707.
- VENDEL F, avril 2011. Modélisation de la dispersion atmosphérique en présence d'obstacles complexes : application à l'étude de sites industriels. Lyon : Ecole Centrale de Lyon, avril 2011.
- Vignes P. Janvier 2016. Directive Eropéenne n°2002/49/CE. Plan de prevention du bruit dans l'environnement. Versaille : Bureau de l'Amenagement du territoire.
- Villanueva P et Plamenov R. juin 2011. Design a four-cylinder Internal Combustion Engine. Project and Engineering Department, Université public de Navarra . Pamplona : s.n., juin 2011. FINAL PROJECT.
- Vivier S, 2002. Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis. Lille : "Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs

électrotechniques modélisés par éléments finis”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2002.

WALKER KITS S, 2005. Combustible et lubrifiants . JUILAN-FRANCE : Wartsila NSD Corporation, 2005.

Walter L. août 2006. Acoustique des locaux industriels. Lausanne : SUVAPRO, août 2006. www.suva.ch/waswo-f/ / Référence: 66008.f.

Walter Lips. 2006. Acoustique des locaux. Lausanne : SUVAPRO, 2006.

WARTSILA DIESEL. mars 1996. Power Plants Technical Information. Vaasa Finland : Jarkko Vettenranta , mars 1996.

Whitaker J, 2008. Fiouls et lubrifiants : manuel de formation. JUILAN - FRANCE : Wartsila NSD Corporation, Mobil Oil Corporation, 2008.

Wieringa J, 1986. Roughness-Dependent Geographical Interpolation of Surface Wind Speed Averages, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, pp. 112 867-889.

WORLD BANK GROUP. July 1998.. Thermal Power: Guidelines for New Plants, Pollution Prevention and Abatement Handbook, , . NEW YORK : s.n., July 1998.

WORLD BANK. July 1998. Thermal Power: Guidelines for New Plants, Pollution Prevention and Abatement Handbook. s.l. : WORLD BANK GROUP, July 1998.

YANG P, 2010. Document de strategie pour la croissance et l’emploi . Yaounde : s.n., 2010.

Yang, S. J. and Elision, A.J. 1985. Machinery Noise Measurement. Oxford, pp. 26-55 : Claredon Press, 1985.

Yu Zhao et al, 2008. Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction. 8442–8452, China : Atmospheric Environment, 2008, Atmospheric Environment, Vol. 42, p. 11. Doi 10.1016/j.atmosenv.2008.08.021.

Yu Zhao et al. 2008.. Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction. s.l. : Atmospheric Environment, 2008.

Zhu Liu et al. 2015. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. China : Macmillan Publishers Limited., 2015.

ANNEXES

Annexe 1 : Multinationale opérant dans le secteur de l'Énergie au

Cameroun

Economic Profile		IBRD	Doing Business	Economy
Cameroon Trade Statistics		EU	EU – Cameroon trade overview	Economy
		Cameroon Chamber of Commerce		Economy
		AES-Sonel	Generation, transmission and distribution of electricity	Business
		The National Hydrocarbons Company (SNH)	SNH is the state controlled oil producer and exploration company	Business
		Cameroon Chamber of Commerce, Industry, Mines and Crafts	Trade	Economy
Cameroon Economic Update		World Bank	Economy, labour force and education in Cameroon	Economy
		International Monetary Fund		Economy
		OECD		Economy
		Bamenda University of Science & Technology		Education
		International University Bamenda		Education
		University of Buea		Education
Country Profile		Finpro		General
Country Profile		Rabobank		General
Cameroon at a Glance		World Bank		General
Country Profile		CIA		General
		Electricity Sector Regulatory Agency		Government
		Government		Government
		Electricity Development Corporation		Government
Cameroon Country Specific Information		US Department of State	International travel information	Government
Cameroon's Infrastructure A Continental Perspective		World Bank		Infrastructure

Cameroon Cultural Experience	Fonjweng Godlove	Wilkes University	Cameroon overview	Society
		United Nations		Society
International Tax		Deloitte	Taxation highlights in Cameroon 2012	Business
Country Energy Information		Developing Renewables		Business
Doing Business		World Bank		Business
Economic Outlook		AfDB, UN, OECD		Economy
Country Risk Classification		Finnvera		Economy
Corruption Perceptions Index		Transparency International		Society
Country BTI Transformation Level		BTI Group	BTI analyzes and evaluates the quality of democracy, a market economy and political mgmt. in 128 developing and transition countries	Economy
		International Energy Association		General
Renewable Energy Country Profiles		International Renewable Energy Agency (IRENA)		General
Cameroon: Poverty Reduction Strategy Paper		IMF		Environmental Governance
Cameroon renewable energy: Project possibilities	Charles Steedman	US Agency for International Development	Identifying actions required to develop an assessment of Cameroon's energy needs	Government
Country strategy paper 2010-2014 Cameroon		AfDB		Government
Cameroon Vision 2035		Ministry of the Economy, Planning and Regional Development, Cameroon		Government
Open Energy Info			Country profile, energy maps, tools, programs, organizations & institutions	General
Country Energy Profile & Information		Reegle	Clean energy info portal	General
Renewable Energies in Africa		European Commission, Joint Research Centre		Government
		Global Environment Facility	The GEF unites 182 countries in partnership with intl. institutions, civil society organizations, and the private sector to address global env. issues	Environmental Governance
Clean Development Mechanism		United Nations Framework Convention on Climate Change		Environmental Governance
		The Energy and Environment Partnership Africa	Project funding	Business
		MBendi	Economy, Risks, Industry, Business, Energy and a lot of other information	Business

		African Development Bank (AfDB)	Contains structured and analysed information on economic, political and social status	General
		Directory of Development Organizations	Contains list of development organizations in the country	Society
Nearly 300 elephants slain in Cameroon for ivory, government minister confirms	Tapang Tanku	CNN	Article	Environmental Governance
The Case of Cameroon	Samuel Nguiffo		Published: In Greiber, Thomas & Schiele, Simone 2011	Environmental Governance
Governance of Ecosystem Services: Lessons Learned from Cameroon, China, Costa Rica and Ecuador			Published: International Union for the Conservation of Nature	Environmental Governance
		United Nations Development Programme (UNDP)	Un-political information on country's status on environmental, social and financial situation	General
Oil and Gas Profile		A Barrel Full		Business
Energy Systems: Vulnerability - Adaptation - Resilience (VAR) 2009	Ngnikam, Tolale	Helio		General
		African Energy	Supplying solar, wind and power backup equipment on a wholesale basis	Business
		Alternative Energy Africa	Information portal about alternative energy in Africa	Business
		Inforce-Africa	International network for sustainable energy	Business
		African Wind Energy Association		Business
		Renewable Energy World	Conferences & Expo in Africa	Business
		Renewable Energy Africa		Business
		How We Made It in Africa	Insight into business in Africa	Business
		Cleantech Knowledge Hub		Business
		The World Council for Renewable Energy		Business
		International Network for Sustainable Energy		Business
		Herana Gateway	African higher education research	Education
		African Rural Energy Enterprise Development	Community-based organization developing a strategy for improved access to energy	Government
		African Center for Economic Transformation	An economic policy institute supporting the longterm growth with transformation of African economies	Government

		Nordic Development Fund	Project funding	Business
		Africa and Europe in Partnership		Government
		The Foundation for the Development of Africa	Non-profit organization supporting sustainable development	Government
		European Biomass Industry Association		Business
		Global Network on Energy for Sustainable Development	GNESD is a knowledge network facilitated by UN Environmental Programme	Government
		Global Village Energy Partnership	GVEP works with local businesses in developing countries to increase access to modern energy	Business
		World Resources Institute	WRI works with governments, companies, and civil society to build solutions to urgent env. Changes	Government
		The World Bank		Economy

Annexe 2 : Centrales thermiques isolées et exploitées par ENEO

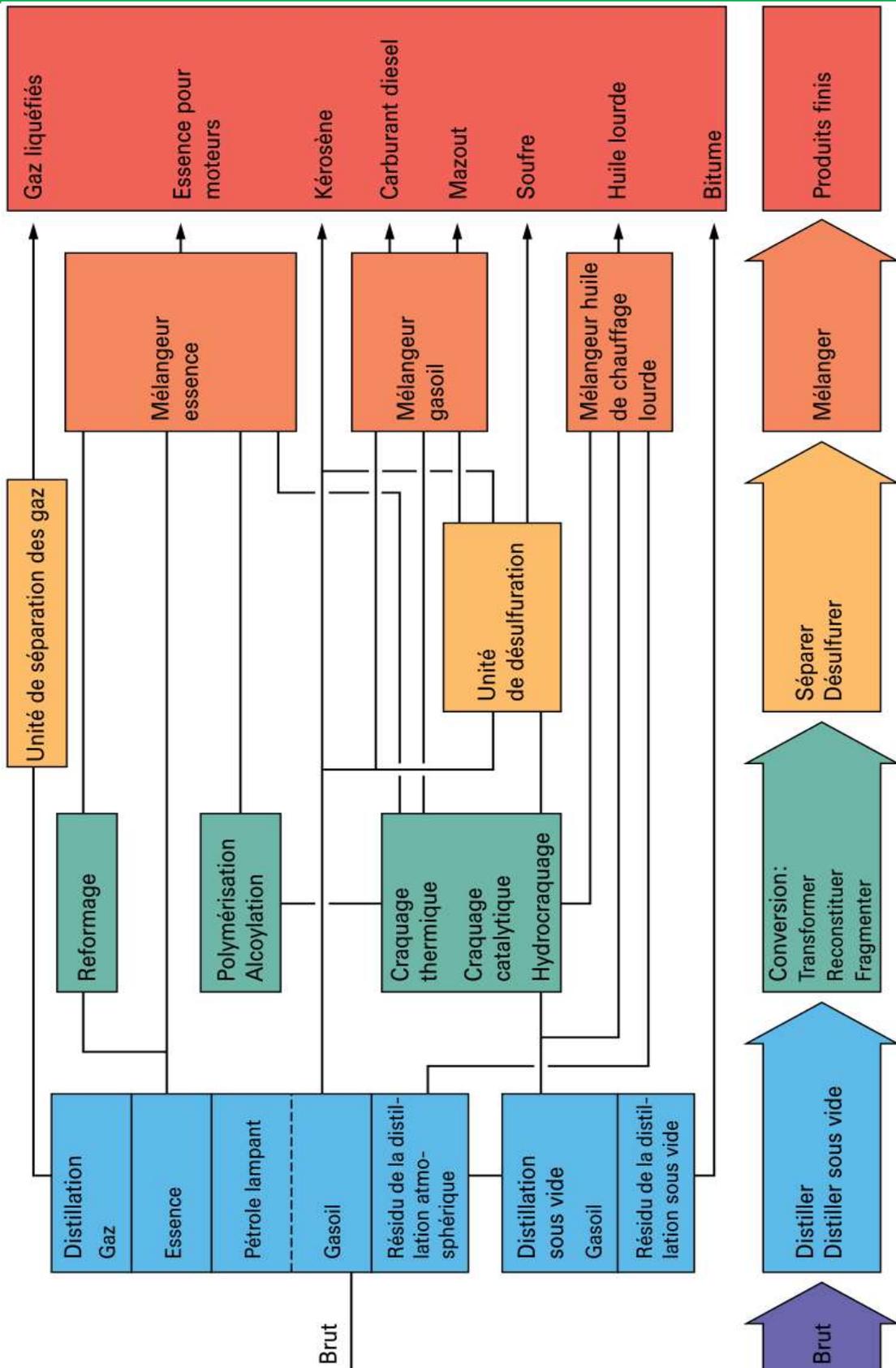
CENTRE- SUD	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée(kW)	Puissance Disponible (kW)
	MGO	L6A	200	160
AMBAM	CATERPILAR	3406 E	328	280
	MERCEDES	OM 404	196	145
	OLYMPIAN	GEH 175	128	100
DJOUR	MGO	L6A	200	150
	CATERPILAR	3406 E	256	200
YOKO	CUMMINS		132	120
	BAUDOUIIN	DK6	72	0
ENDOM	BERLIET	MID	56	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

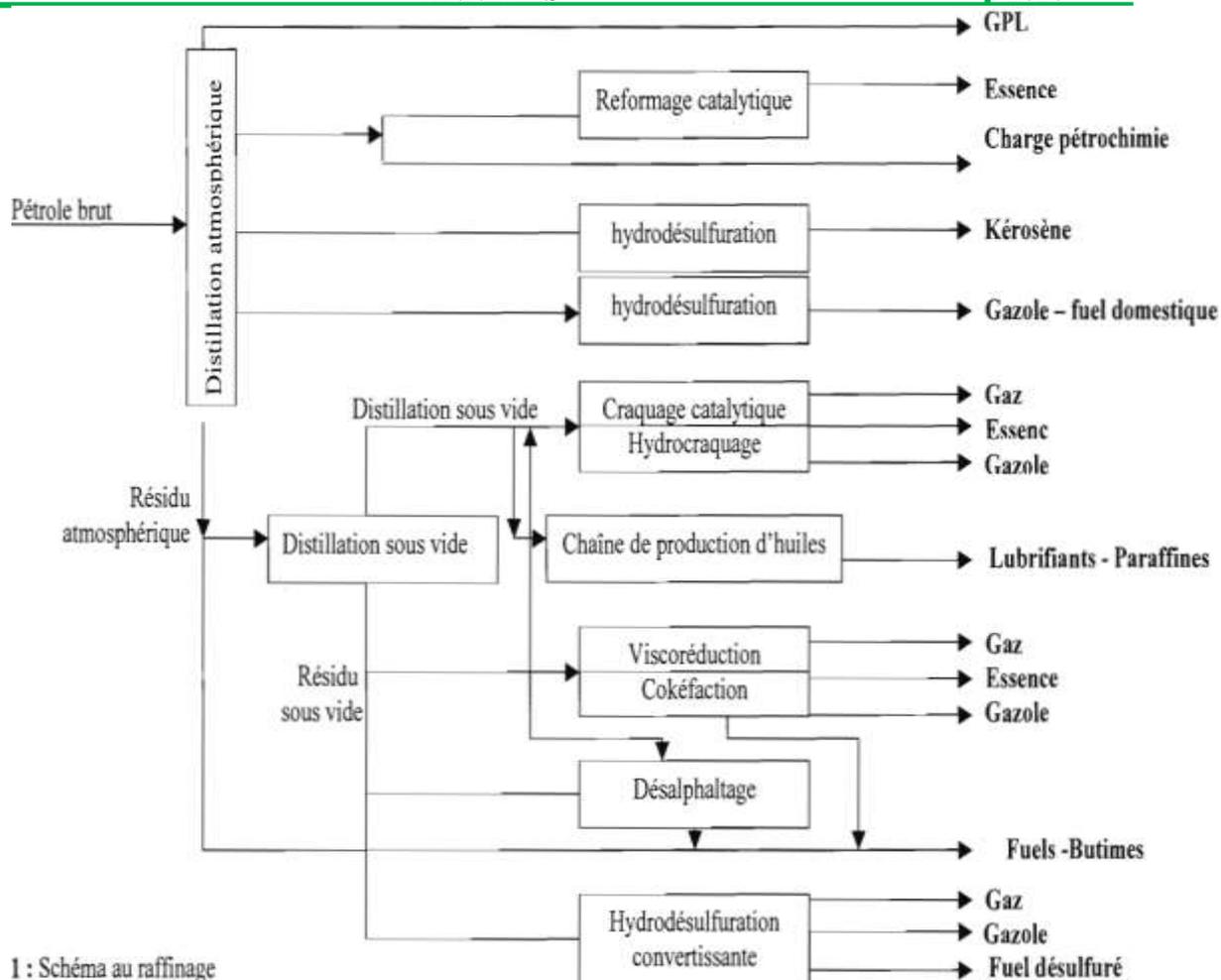
EST	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée (kW)	Puissance Disponible (kW)
BETARE OYA	Baudouin	DK4	48	36
	IVECO		62	50
	IVECO		48	36
GAROUA-BOULAI	Caterpillar	3408	225	170
	Perkins	1300	160	0
	Mercedes	OM 423	206	160
LOMIE	Volvo		200	150
	Caterpillar	3306	133	100
	John Deere	4045	80	40
YOKADOUMA	Caterpillar	3406	256	200
	Caterpillar	3406	256	0
	Perkins		528	0
MOLOUNDOU	DEUTZ	BM4F1012E	40	0
	DEUTZ	BM4F1013EC	80	70
	DIESELAIR		38	0
	DEUTZ	BM4F1013EC	80	0

NORD	Constructeur	Type de Groupe	Puissance Installée(kw)	Puissance Disponible (kW)
POLI	BAUDOUIIN	DN P6	120	90
	BAUDOUIIN	DN P4	72	54
	BERLIET	MID	56	40
TOUBORO	BERLIET	M 520	56	40
	BERLIET	MID620	56	0
	VOLVO	Penta SG 300	220	0
KOUSSERI	CATERPILLAR	3512 B	1200	0
	CATERPILLAR	3512 B	1200	0
	CATERPILLAR	3412 TT	400	350
	CATER (rental)	3306	200	150
ADAMAOUA	CATER (rental)	3306	200	0
	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
TIGNERE	Berliet	MID 620	56	40
	Berliet	MID 620	56	40
	Berliet	MID 620	56	0
NGAOUNDAL	M.G.O.	V 12 A	350	280
	Caterpillar	3406	364	330
MBAKAOU	Baudouin	DK 4	40	38
	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	Dieselaïr	6. 72	40	36
	Dieselaïr	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
MOUANKO	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 3 : Schéma de raffinage du pétrole brut cas de la SONARA (Barbey, Edition 2001)





Annexe 4 : Spécification des fiouls résiduels marins (classe F). (S. WALKER KITS, 2005)

Caractéristiques		Method of test	ME25	MF25	MG35	MH35
Densité à 15°C, kg/m³		ISO 3675/ ISO 12185	91	91	91	91
Viscosité Cinématique	à 100°C, mm ² /s	ISO 3104	5	5	5	5
	à 50°C, mm ² /s	ISO 3104	25	25	90	90
Point d'éclair, °C		ISO 2719	0	0	0	0
Carbone résiduel, % (m/m)		ISO 10370	5	0	8	2

Cendres, % (m/m)	ISO 6245	,1	,15	,15	,2
Soufre, % (m/m)	ISO 8754	,0	,0	,0	,0
Eau, % (V/V)	ISO 3733	,0	,0	,0	,0
Total des sédiments, potentiel, % (m/m)	ISO 10307-2	,1	,1	,1	,1

Annexe 5 : 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 : $m_c = \frac{87,6}{100} m$

$$\text{Ce qui correspond à X mol : } X_{mol} = \frac{m}{M(c)} \times \frac{87,6}{100}$$

- Une masse m_H de d'hydrogène : $m_H = \frac{12,02}{100} m$

$$\text{Ce qui correspond à Y mol d'atome d'hydrogène : } Y_{mol} = \frac{m}{M(H)} \times \frac{12,02}{100}$$

et donc à Y/2 mol de dihydrogène.

- Une masse m_s de soufre : $m_s = \frac{0,378}{100} m$

$$\text{Ce qui correspond à } Z \text{ mol : } Z_{mol} = \frac{m}{M(S)} \times \frac{0,378}{100}$$

∞ **Proportion relative entre le combustible et le comburant**

- **Le volume d'air** V_a nécessaire par Kg de combustible s'écrit alors :

$$V_a = \left(X + \frac{Y}{4} + Z\right) V_m \times \frac{100}{21}$$

Sachant que $V_{O_2} = \frac{21}{100} V_a$ et $V_m = 22,4 \text{ dm}^3$

Il vient :

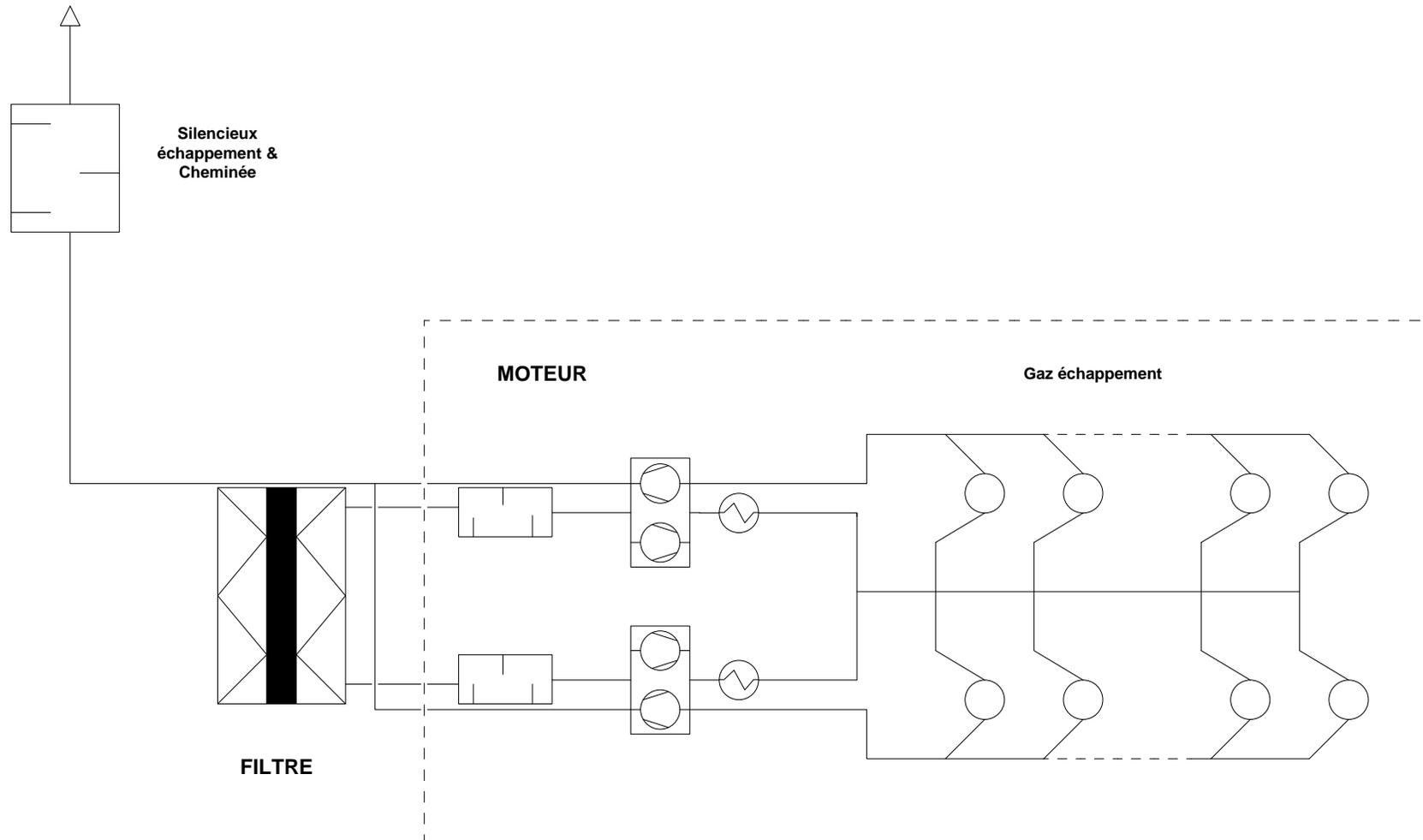
$$V_a = \left(\left(\frac{m}{M(c)} \times \frac{87,6}{100} \right) + \left(\frac{m}{M(H_2)} \times \frac{1}{2} \times \frac{12,02}{100} \right) + \left(\frac{m}{M(S)} \times \frac{0,378}{100} \right) \right) \times V_m \times \frac{100}{21}$$

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 :

$$V_f = \left(X + \frac{Y}{2} + Z\right) V_m + \frac{79}{100} \times V_a$$

Application numérique : $V_f = 11.67142 \text{ dm}^3 (\text{n})/\text{Kg}$

Annexe 6 : Présentation de quelques Sous-systèmes mis en jeux lors de la production**Figure 1 A.6** : Système d'alimentation et d'échappement en air des moteurs (CTO, 2012)

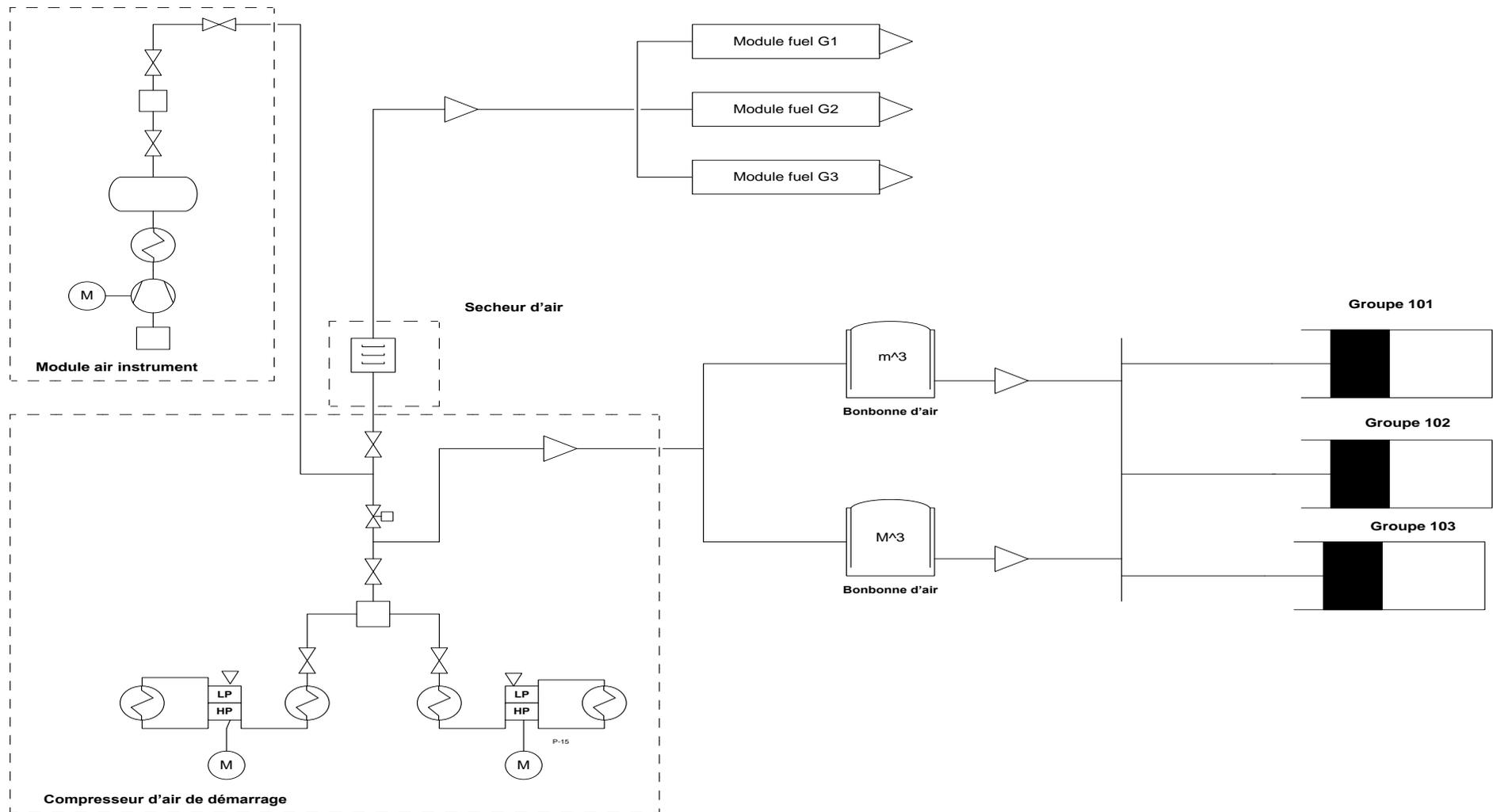


Figure 2 A.6 : Circuit d'air (CTO, 2012)

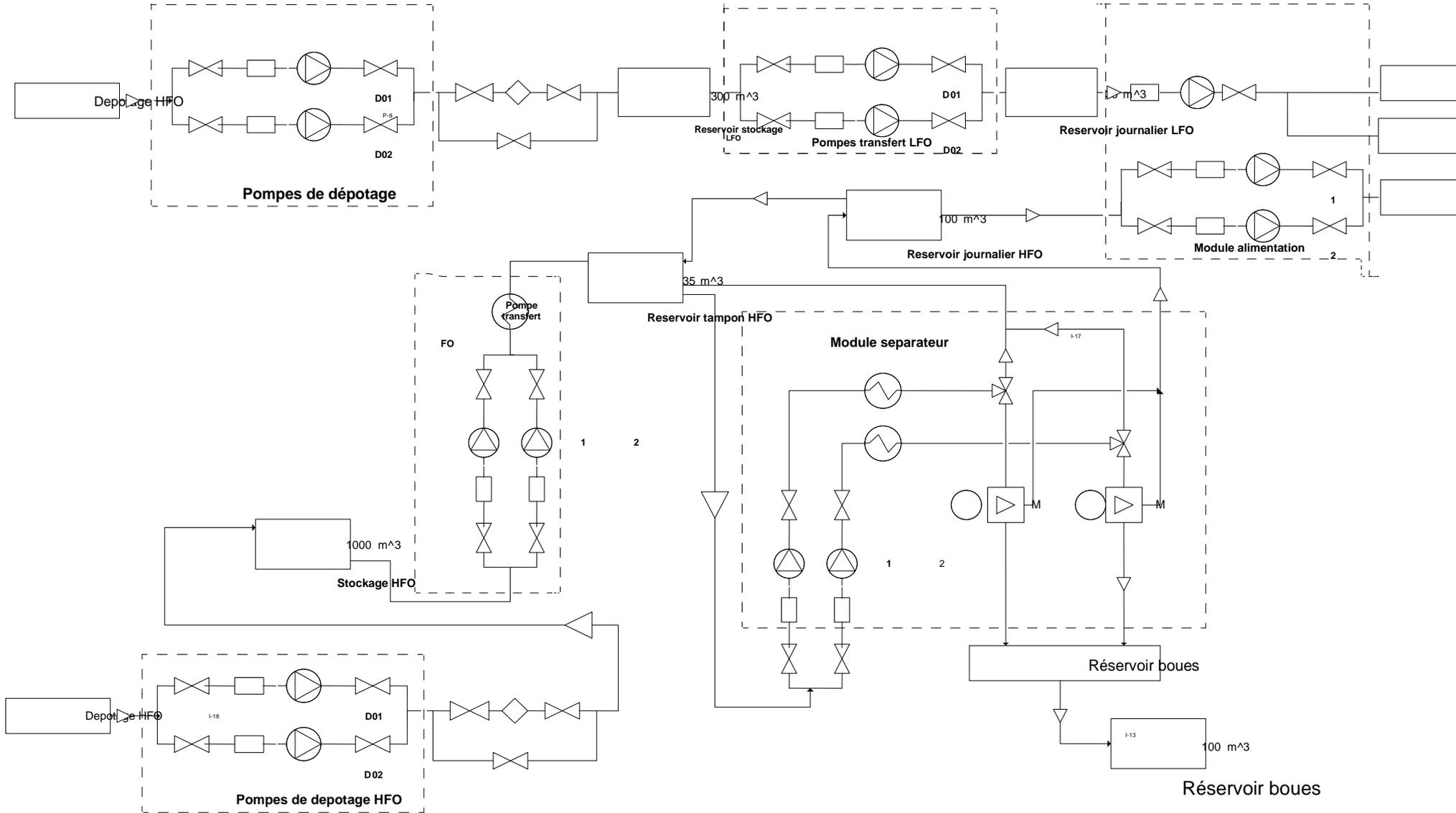


Figure 3 A.6 : Circuit commun de fuel (hors de la salle des machines) (CTO, 2012)

Annexe 7 : Bilan Thermique Et Rendement

Cette annexe détaille le calcul du rendement thermodynamique du cycle diesel idéal.

Les transformations subies par le fluide au cours du cycle théorique défini par Rudolf Diesel sont les suivantes (voir figure 1 A.5) :

- O → A : admission à pression constante,
- A → B : compression isentropique (sans perte de chaleur),
- B → C : combustion à pression constante,
- C → D : détente isentropique,
- D → A : échappement à volume constant.

Le fluide reçoit une quantité de chaleur Q_{BC} , libère une quantité de chaleur Q_{DA} et fournit un travail W . Par convention, les énergies reçues par le système sont positives et celles libérées par le système sont négatives :

$$Q_{BC} > 0, Q_{DA} < 0 \text{ et } W < 0$$

Le rendement thermodynamique du cycle est le rapport entre le travail fourni et la quantité de chaleur apportée au système :

$$\eta_{th} = \frac{|W|}{Q_{BC}}$$

D'après le premier principe de la thermodynamique, la variation d'énergie d'un système fermé est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur sous la forme de chaleur et de travail. Au bout d'un cycle, le système revient à son état initial. La variation d'énergie est nulle :

$$\Delta E = 0 = W + Q_{BC} + Q_{DA} \quad \text{et} \quad |W| = Q_{BC} - Q_{DA}$$

Le rendement s'écrit alors :
$$\eta_{th} = 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}}$$

La quantité de chaleur reçue et la quantité de chaleur cédée s'expriment en fonction des chaleurs massiques et des températures de la façon suivante :

$$Q_{BC} = mc_p (T_C - T_B)$$

$$Q_{DA} = mc_v (T_A - T_D)$$

Le rendement devient :
$$\eta_{th} = 1 + \frac{1}{\gamma} \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$$

Υ est le coefficient poly tropique. En utilisant les équations d'état des gaz parfaits au cours des diverses transformations (voir tableau B.1), on aboutit finalement à l'équation suivante :

$$r = 1 + \frac{1}{\Upsilon} \tau^{1-\Upsilon} \frac{1-c^\Upsilon}{c-1} \text{ avec } \tau = \frac{V_C}{V_B}, \text{ et } c = \frac{V_A}{V_B}$$

Tableau 1 A7 : équations d'état du Fluide au cours des diverses transformations du cycle diesel.

BC	Isobare	$\frac{T}{V} = Cte \Rightarrow T_C = cT_B$ avec $c = \frac{V_A}{V_B}$
CD	Isentrope	$TV^{\Upsilon-1} = Cte \Rightarrow T_D = \left(\frac{c}{\tau}\right)^{\Upsilon-1} T_C$ avec $\tau = \frac{V_C}{V_B}$
AB	Isentrope	$TV^{\Upsilon-1} = Cte \Rightarrow T_A = \left(\frac{1}{\tau}\right)^{\Upsilon-1} T_B$

Annexe 8 :

Tableau A8 : Relation entre les échelles temporelles et spatiales des phénomènes atmosphériques.

Echelle	L	t	1 mois	10 jour	1 jour	1heure	1min	1 sec
MACRO α	10000km		Ondes stationnaire ultra-longues					
MACRO β	2000km			Ondes barocliniques				
MESO α	200km				Fronts ouragans			
MESO β	20km				Jets nocturnes effets de montagnes	Lignes de grains, brises de mer		
MESO γ	2km					Orages, effets urbains, turbulence en air clair		
MICRO α	200m					Convection profonde, tornades	Onde de gravité	
MICRO β	20m						Tourbillon de poussière, effet de sillage	
MICRO γ	2m							Panache turbulence
Echelles			Climatologiques	Synoptiques	Meso		Micro	

Annexe 9

Tableau 1A9 : Différents descripteurs de bruit utilisés pour la mesure et représentation des niveaux de bruit. (A comparison of two different sound intensity measurement principles, 2005)

Descriptor	Abbreviation	Base Measure	Adjustment to Base Measure	Derivation	Relation to other Descriptor	Application
Weighted sound level	L_A, L_B, L_C, L_D, L_E	1. Octave or 1/3 octave band 2. Measured directly from a sound level metre.	None			General
Phons, Sones	LL_S (Steven's procedure) LL_Z (Zwicker's procedure)	1. Octave or 1/3 octave band 2. Equal loudness contour	None	$S = S_m + f(\sum S - S_m)$ $P = 40 + 10 \log 2St$		Loudness
Perceived Noise Level	L_{PN}	1. Octave or 1/3 octave band 2. Equal noisiness contour	None	$PN_t = PN_m + f(\sum PN - PN_m)$ $L_{PN} = 40 + 10 \log 2PN_t$	$L_{PN} = L_D + 7$ $L_{PN} = L_A + 13$	Noisiness
Effective Perceived Noise Level	L_{EPN}	L_{PN}	1. Duration 2. Tone	$L_{EPN} = L_{PN} + C + D$		Noisiness
Articulation Index	AI	1/3 octave band	None	ANSI, 1969		Speech Interference
Speech interference Level	SIL	Octave Bands	None	Average Octave Bands with Centre Frequencies of 500, 1000, 2000 and 4000 Hz.	$SIL = L_A + 7$	Speech Interference

Descriptor	Abbreviation	Base -Measure	Adjustment to Base Measure	Derivation	Relation to other Descriptor	Application
Preferred Noise Criteria	PNC	Octave Bands	None	See Beranek <i>et al</i> , 1971		Interior Room Noise
Statistical Sound Levels	L_X	L_A	None	Time-history		Community Noise
Traffic Noise Index	TNI	L_{10} , L_{90}	None	$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$	$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$	Traffic Noise
Equivalent Sound Level	L_{eq}	L_A	None	$L_{eq} = 10 \log (1/T) \sum 10L_i/10$	$L_{eq} = L_{90} + 0.115\sigma^2$	Community Noise
Noise Pollution Level	L_{NP}	L_{eq}	Variability	$L_{NP} = L_{eq} + 2.56\sigma$	$L_{NP} = L_{eq} + (L_{10} - L_{90})$ $= L_{50} + (L_{10} - L_{90}) + (L_{10} - L_{90})^2/60$	Community Noise
Composite Noise Rating	CNR	L_{EPN}	1. Number of events 2. Time of day	$CNR = PNL_{max} + N + K$	$CNR \approx NEF + 70$ $\approx L_{dn} + 35$ $\approx CNEL + 35$	Aircraft Noise
Noise Exposure Forecast	NEF	L_{EPN}	1. Number of events 2. Time of day	$NEF = L_{EPN} + N + K$	$NEF \approx CNR - 70$ $\approx L_{dn} - 35$ $\approx CNEL - 35$	Aircraft Noise

Descriptor	Abbreviation	Base -Measure	Adjustment to Base Measure	Derivation	Relation to other Descriptor	Application
Noise and Number Index	NNI	L_{PN}	Number of events	$NNI = \overline{PNL}_{max} + 15 \log N - 80$	$NNI = 10 \log L_{eq}/10 + 15 \log N - 80$	Aircraft Noise
Community Noise Equivalent Level	CNEL	L_{eq}	1. Time of the day 2. Optional: number of events	$CNEL = 10 \log [A + B + C]$ $A = \left(\frac{1}{24}\right) (12 \times 10^{L_{d/10}})$ $B = 3 \times 10^{(L_{e+3})/10}$ $C = 9 \times 10^{(L_{n+10})/10}$	$CNEL \approx L_{dn}$ $\approx NEF + 35$ $\approx CNR - 35$	Community Noise
Day and Night Average Sound Level	L_{dn}	L_{eq}	1. Time of the day 2. Optional: number of events	$L_{dn} = 10 \log \left[\frac{1}{24} \left((15 \times 10^{L_d/10}) + (9 \times 10^{(L_n+10)/10}) \right) \right]$	$L_{dn} \approx CNEL$ $\approx NEF + 35$ $\approx CNR - 35$	Community Noise
Isopsophic Index	N	LPN	1. Time of the day 2. Number of events	$N_d = \overline{PNL}_{max} + 10 \log N_d - 30$ $N_n = \overline{PNL}_{max} + 6 \log (3N_1 + N_2) - 31$	$N = 10 \log 10^{L_{PN}/10} + 10 \log N - 30$ $N = CNR - 18$	Aircraft Noise
Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level	WECPNL	L_{EPN}	1. Seasonal weighting 2. Time of the day 3. Number of events		$WECPNL = 10 \log 10^{L_{EPN}/10} + 10 \log N - 39.4$	Aircraft Noise

Descriptor	Abbreviation	Base -Measure	Adjustment to Base Measure	Derivation	Relation to other Descriptor	Application
Mean Annoyance Level	Q	L_A	Duration	$\bar{Q} = 13.3 \log \sum \frac{(10^{L_{A_i}/10})}{T}$ $= \frac{13.3 \log(10^{L_{A_i}} x/k)}{100}$	$\bar{Q} = 13.3 \log 10^{L_{A_i}/10}$ $+ 13.3 \log N$ $- 39.4$	Aircraft and Traffic Noise
Noisiness Index	NI	1. L_A 2. 1/3 Octave bands	1. Time of the day 2. Season 3. Duration	$\bar{NI} = 10 \log \sum_i a_{ni} \log[A]$ $A = \frac{B}{10}$ $B = L_{A_i} + 10 \log\left(\frac{1}{t_0}\right) + G + S$	$\bar{NI} = 10 \log 10^{(L_{A_i}-13)/10}$ $+ 10 \log N - 39.4$	Aircraft Noise
Total Noise Load	B	L_A	1. Time of the day 2. Number of events	$B = 20 \log[C] - K$ $C = \sum_i W_i x 10^{L_{A_i}/10}$	$B = 20 \log 10^{(L_{A_i}-13)/15}$ $+ 20 \log N - K$	Aircraft Noise
Rating Sound Level	L_r	L_A, L_{eq}	1. Impulsiveness 2. Tones 3. Duration 4. Time of the day 5. Zoning	$L_r = (L_A + I + C + D)$ (steady state noise) $L_{eq} + I + C$ (fluctuating noise)		Community Noise

Tableau 2A9 : Différents modèles de prévision du niveau de pression acoustique (compilés à partir de Tonin, 1993).

SL. No.	Name of the Model	Basic Equation
1	Oil Companies Materials Association (OCMA) Model.	$L_p = \sum_{\text{all sources}}^{\log} (L_W - K_1 - K_2)$ <p>L_W is the sound power level, K_1 is the attenuation due to spreading and soil type, K_2 is the attenuation due to ground and meteorological effects.</p>
2	VDI 2714/VDI 2720 (German Draft Standard)	$L_p = L_W + DI + K_0 - D_s - D_L - D_{BM} - D_D - D_G - D_e$ <p>L_W is the sound power level, DI is directivity index, K_0 is the solid angle reflection index, D_s is the attenuation due to geometric spreading, D_L is the air absorption factor, DBM is the ground and meteorological attenuation, D_D is the attenuation due to vegetation, D_G is the attenuation due to built-up areas, D_e is the attenuation due to barriers.</p>
3.	Oil Companies' International Study Group for Conservation of Clean Air and Water (CONCAWE) Model.	$L_p = \sum_{\text{all sources}}^{\log} (L_W + D - K_1 - K_2 - K_3 - K_4 - K_5 - K_6 - K_7)$ <p>L_W is the sound power level, D is directivity index of source, K_1 is attenuation due to geometric spreading, K_2 is atmospheric absorption, K_3 is attenuation due to ground effect, K_4 is attenuation due to meteorological effects, K_5 is correction for source height above ground, K_6 is the barrier shielding and K_7 is the in-plant screening.</p>
4	BBN/EEI (Bolt Beranek and Newman Inc. Ltd./Edison Electric Institute)	$L_p = L_W + D - 10 \log(4\pi d^2) - \left[\frac{d}{100}(a_m) + \frac{d}{100}(a_a) \right] - [-3]$ <p>L_W is the sound power level, D is directivity index of source, d is the distance from the acoustic centre of a point source to receiver, a_m is the molecular absorption rate in dB per 100m, a_a is the anomalous excess attenuation rate in dB per 100m.</p>
5	NORDFORSK Noise Model (by Lydteknisk Laboratorium, Denmark)	$L_p = L_W + \Delta L_\phi - \sum \Delta L$ <p>The second term accounts for the directivity and the third term accounts for various types of attenuation.</p>
6	ENM (Environmental Noise Model by RTA Technology Pty. Ltd.)	$L_p = \sum_{\text{all sources}}^{\log} (L_W + D - A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5)$ <p>L_W is the sound power level, D is directivity index of source. Types of attenuation accounted are geometric spreading, barrier attenuation, air absorption, wind and temperature effects and ground attenuation.</p>

Annexe 10 :**Tableau 1 A10 :** Facteurs d'émissions des GES directs et unités

	CI en Tj/Kt	Fraction de carbone oxydé	Emission de N ₂ O en Kg/Tj	Emission de CH ₄ en Kg/Tj	Emission de CO ₂ en tC/Tj	Emission de CO ₂ en Kg/Tj	Densité en tonnes/m ³
Fio		0,9	0	3	2	7	0,9
ul 3500	1,374	9	,6		1,247	7905,67	466

(Source : GIEC) (TAMBA, 2009)

Tableau 2 A10 : Facteurs d'émissions des principaux polluants

Polluants	O ₂	O _x	OV	O	PM10µm, PM2,5µm	PM10µm	HA P
Facteurs d'émissions (g /GJ) ou (Kg/TJ)	64,2	78,4	,176	,419	0,8116 ^(a)	3,8859 ^(a)	0,000841 ^(b)

a-Estimation des facteurs d'émission pour les particules (Acurex Environmental, 1991)
(EIIP, July 2001)

Annexe 11**Tableau 1 A11:** Différentes constantes fonction du type de ventilateur

Type de ventilateur	K
Flux axial : Tube et ailettes	72
Centrifuge : Pales radiales	72
Centrifuge : Pales de profil, concaves ou Convexes	59

Flux axial : propulseur	77
Centrifuge : Tubulaire	67

Tableau 2 A11 : Différentes constantes fonction du type de pompe.

Type de pompe	K_P
Centrifuge	95
A hélices	100
A mouvement alternatif	105

Tableau 3 A11 : coefficient d'atténuation atmosphérique en fonction les conditions météorologiques qui s'appliquent au site.

Température °C	Humidité relative %	Coefficient d'atténuation atmosphérique α , dB/km							
		Fréquence centrale nominale, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

(Source CSTC 2004)

Tableau 4 A11 : L'atténuation due au sol se calcule, par bande d'octave, en sommant les composantes d'atténuation pour les trois régions :

Fréquence centrale nominale Hz	A_s ou A_r ¹⁾ dB	A_m dB
63	- 1,5	- 3q ²⁾
125	- 1,5 + G × a'(h)	- 3q(1 - G _m)
250	- 1,5 + G × b'(h)	
500	- 1,5 + G × c'(h)	
1 000	- 1,5 + G × d'(h)	
2 000	- 1,5(1 - G)	
4 000	- 1,5(1 - G)	
8 000	- 1,5(1 - G)	

NOTES

$$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2})$$

$$b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

$$c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

$$d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

1) Pour calculer A_s , prendre $G = G_s$ et $h = h_s$. Pour calculer A_r , prendre $G = G_r$ et $h = h_r$.

2) $q = 0$ si $d_p \leq 30(h_s + h_r)$

$$q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p} \quad \text{si } d_p > 30(h_s + h_r)$$

(Source CSTC 2004)

Où d_p est la distance en mètres entre la source et le récepteur projetée sur le plan du sol

Tableau 5 A11: coefficient de réflexion acoustique ρ :

Objet	ρ
Murs durs et plats	1
Murs de construction avec fenêtres et petites adjonctions ou baies	0,8
Murs d'usine où 50 % de la surface est constituée par des ouvertures, des installations ou des tuyauteries	0,4
Cylindres avec surfaces réfléchissantes (réservoirs, silos)	$\frac{D \sin(\phi/2)}{2d_{sc}}$ *) où D est le diamètre du cylindre; d_{sc} est la distance entre la source et le centre C du cylindre; ϕ est le supplément de l'angle compris entre les lignes SC et CR.
Installations ouvertes (tuyauteries, tours, etc.)	0

*) Cette expression s'applique uniquement si la distance d_{sc} entre la source S et le cylindre C est beaucoup plus petite que la distance d_{cr} entre le cylindre et le récepteur.

Tableau 6 A11: Atténuation végétale en fonction de la distance de propagation

Distance de propagation, d_f m	Fréquence centrale nominale Hz							
	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
$10 \leq d_f \leq 20$	Atténuation, dB:							
	0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$	Atténuation, dB/m:							
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

(Source CSTC 2004)

Tableau 7 A11 : Atténuation en site industriel en fonction de la distance du site

Fréquence centrale nominale, Hz	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
A_{site} , dB/m	0	0,015	0,025	0,025	0,02	0,02	0,015	0,015

(Source CSTC 2004)

Annexe 12 : Programmation sous Matlab vs 2016 des Niveaux équivalent des pression sonore dans les centrales thermique (CTO-CTD-CTM)

% SEUTCHE2013-2020_SONORE

% Calcul de Dz

C2=20; Z=45.83;

lada=[0.544;2.266666667;2.266666667;0.28137931;0.28137931;0.28137931;0.272;
0.906666667;0.28137931];C3=1;Cmeteo=1;

Dz=zeros(9,1);

for k=1:9

Dz(k,1)=10*log10(3+(C2./lada(k,1)).*Cmeteo*C3*Z);

%disp(Dz(k,1));

end

disp('Matrix de Dz')

disp(Dz);

% d=54.82

% Calcul de Asol et A?cran

Hs=[0;3;3;0;0;0;0;0;4]; % d?claration du du vecteur Hauteur Hs

d=100; Dz;Hm=zeros(9,1);

Asol=zeros(9,1); Aecran=zeros(9,1);

for k=1:9

Hm(k,1)=Hs(k,1)./2;

end

disp('Matrix de Hm')

disp(Hm);

for k=1:9

Asol(k,1)=4.8-(2*Hm(k,1)./d).*(17+(300/d));

if Asol(k,1)>=0

Asol(k,1)=Asol(k,1);

elseif Asol(k,1) < 0.0;

Asol(k,1)=0;

end

Aecran(k,1)=Dz(k,1)-Asol(k,1); %pour att?nuation d'une diffraction en

haut de l'?cran

% Aecran(k,1)=Dz(k,1);%pour att?nuation d'une diffraction sur les bord

lat?raux de l'?cran

% disp(Asol(k,1)); disp(Aecran(k,1));

end

```

disp('Matrix de Asol')
disp(Asol);
disp('Matrix de Aecran')
disp(Aecran);

% Cr?ation du vecteur A (att?nuation pour les diff?rents moteurs)
% A1=A ?quivalent du moteur ; A2=A ?quivalent du moteur ventilateur face B;
% A3=A ?quivalent du moteur ventilateur face A; A4=A ?quivalent du moteur
de pompes P1;
% A5=A ?quivalent du moteur de pompes P2;A6=A ?quivalent du moteur de
pompes P3;
% A7=A ?quivalent du moteur de compresseur C1;A8=A ?quivalent du moteur de
compresseur C2;
% A9=A ?quivalent du moteur du turbocompresseur C1;
A1=[18.18;1.7696;4.8;27.4735;0.05;0.025;4.45];A2=[18.18;0.1896;3.5702;22.52
98;0.030;0.015;4.450];
A3=[18.18;0.1896;3.5702;22.5299;0.03;0.015;4.45];A4=[18.18;3.16;4.8;30.3329
];
A5=[18.18;3.16;4.8;30.3330;0.06;0.02;4.45];A6=[18.18;3.16;4.8;30.3331;0.06;
0.02;4.45];
A7=[18.18;3.16;4.8;30.4800;0.06;0.02;4.45];A8=[18.18;0.6952;4.8;25.2602;0.0
4;0.025;4.45];
A9=[18.18;3.16;3.1603;31.9726;0.06;0.02;4.45];
Kj=[17;8;8;17;17;17;17;10;17];
A=[56.7481;48.9646;48.9647;61.0029;61.003;61.0031;61.15;53.4504;61.0029];
Lw=[129.0265;133.285;143.5114;117.7875;117.7875;117.7875;98.1426;89.0103;98
.7875];
Tm=[3.841783154;3.830053763;5.636198925];T=24;
Laeq=zeros(9,1);Cp=0;Cr=0;S=zeros(3,1);

%Calcul de LAeq

for e=1:3 % ei?me intervalle de temps Tk. pendant lequel on ne peut pas
%distinguer les ?v?nements isol?s d?une p?riode sp?cifique
%T=24 heures pour des valeurs moyenne journali?re Tm

    for k=1:9 %pour les diff?rentes sources (k) fonction du type de bruit
        S(e,1)=Tm(e,1).*(10.^(0.1.*(Kj(k,1)+Lw(k,1)-A(k,1))))+S(e,1);
    end
end
disp('S')
disp(S);
% %?tape facultatif pour le i?me ?v?nement isol? puisqu'on ?
qu'effectu? une mesure
% for c=1:1
%     Q(c,1)=S(1,3);
% end
% % ei?me intervalle de temps TE. pendant lequel on ne peut pas
%distinguer les ?v?nements isol?s d?une p?riode sp?cifique
% %T=24 heures pour des valeurs moyenne journali?re Tm
%
Laeq=10.*log10(S./T);
disp('Laeq')
disp(Laeq);

```

Annexe 13 :

Tableau 1. A13 : Coefficients d'absorption acoustiques (valeurs moyennes de produits divers). (Walter Lips, août 2006)

Matériau	CdA en mm	Fréquence en Hz							$\bar{\alpha}_z$
		125	250	500	1000	2000	4000		
Béton lissé brut	-	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	
Fenêtres fermées	-	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	
Crépi usuel	-	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	
Toiture Durisol	-	0,50	0,73	0,75	0,80	0,85	0,90	0,75	
Tôle profilée lisse	-	0,06	0,20	0,15	0,14	0,10	0,05	0,12	
Tôle profilée perforée	-	0,50	0,85	0,92	0,85	0,75	0,70	0,76	
Pavaroc avec dessin	200	0,35	0,45	0,50	0,70	0,85	0,95	0,63	
Plafonds métalliques perforés trous 10 – 12 %	250	0,35	0,70	0,75	0,85	0,90	0,80	0,72	
trous 20 – 25 %	250	0,40	0,75	0,85	0,90	0,95	0,95	0,80	
Panneaux légers en laine de bois 50 mm	50	0,20	0,45	0,60	0,75	0,85	0,90	0,63	
Absorbeurs en feuille pour locaux humides	50	0,10	0,70	0,80	0,80	0,75	0,45	0,60	
Panneaux pyramidaux en matériau alvéolaire	-	0,15	0,40	0,80	1,05	1,05	1,05	0,75	
Crépi acoustique 20 mm	-	0,05	0,15	0,35	0,57	0,72	0,64	0,41	
Panneaux de fibres minérales verre/laine de pierre 50 mm		0,20	0,70	1,00	1,00	1,00	1,05	0,83	
Baffles, h/d = 1/1	-	0,20	0,40	0,70	0,80	0,85	0,80	0,63	

PUBLICATION ISSUE DE LA THESE

Liste des publications

PUBLICATIONS ISSUES DE LA THESE

- ✓ J. C. Seutche ; B. Bonoma; J. L. Nsouandele, « Assessment of Atmospheric Emission pollutants from the Thermal Power Plant: Case of Oyom-Abang Yaounde Cameroon » ,International Journal of Science and Research (IJSR), https://www.ijsr.net/search_index_results_paperid.php?id=ART20171472 , Volume 6 Issue 8, August 2017, 769 – 778.
- ✓ J. C. Seutche ; J.L. Nsouandélé ; Njingti-Nfor ; J.G. Tamba ; B. Bonoma ; « 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 (EMA),DOI: 10.1007/s10661-019-7940-z, Volume 191 Number 11- November 2019