

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

\*\*\*\*\*

Paix-Travail-Patrie

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE  
YAOUNDE

\*\*\*\*\*



REPUBLIC OF CAMEROON

\*\*\*\*\*

Peace-Work-Fatherland

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

HIGHER TEACHER TRAINING  
COLLEGE OF YAOUNDE

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

*DEPARTMENT OF PHYSICS*

**CONTRIBUTION A L'INSONORISATION  
ACOUSTIQUE DES PAROIS D'UNE SALLE  
MACHINES : CAS DE LA CENTRALE  
THERMIQUE DE MBALMAYO**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur de l'Enseignement  
Secondaire de Deuxième Grade

(D.I.P.E.S.II)

*Par:*

**ENABA Jules-Bertrand**

*Titulaire du D.I.P.E.S.I Licencié en physique*

Matricule: 07Y583

*Sous la Direction de :*

**BEGUIDE BONOMA**

(Maître de Conférences)

Année Académique : 2015 - 2016

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à ma famille.

## Remerciements

D'entrée de jeu, je remercie le Seigneur Dieu Tout Puissant qui est au commencement et à la fin de toute chose. En effet c'est uniquement par le biais de la grâce, de l'amour et de la bénédiction qu'il me comble chaque jour que ce travail à été réalisé.

Ecrire étant toujours le fruit d'une collaboration, nombreux sont ceux qui de diverses manières ont contribué à la naissance de ce mémoire. Il m'est impossible de les citer tous mais certains d'entre eux méritent une mention spéciale, ainsi :

Mes remerciements vont tout d'abord au responsable de mon mémoire Pr. BEGUIDE BONOMA qui a daigné m'accepter comme son étudiant dans le cadre de ce travail.

Je remercie tous les enseignants qui m'ont tenu pendant les deux ans de formation et en particulier ceux du département de physique.

Je remercie le Dr. NSOUANDELE Jean Luc de l'I.S.S. de MAROUA pour les échanges fructueux, conviviaux et constructifs.

Je tiens particulièrement à présenter mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à Mr Jean Calvin SEUTCHE NDIZE doctorant en énergétique qui a encadré mes activités et qui m'a soutenu au cours de la rédaction de ce mémoire. Par ses compétences scientifiques sa disponibilité et sa gentillesse, il a grandement contribué au bon déroulement de ce travail.

Je remercie également Marie Louise MBONDJI qui m'a toujours soutenu et procuré un soutien multiforme tout au long de mon cursus académique ; qu'elle trouve ici l'expression de ma gratitude et de ma reconnaissance pour le rôle de cette grande sœur malheureusement partie si tôt qu'elle a su accomplir de fort belle manière depuis que nos chemins se sont croisés.

Je remercie ma famille auprès de laquelle j'ai toujours eu un soutien infaillible et de tous les instants en commençant par mes grands-parents, mes parents, mes oncles et tantes, mes frères et sœurs, mes neveux et cousins, mes enfants (Junior, Brice, Kandayan et Pierre Menez).

Je remercie mes amis (WILLIAM, SERGE, RODRIGUE, PATRICK) pour leur soutien.

Je remercie tous mes camarades de promotion en particulier les retours sur titre (WOUKENG, WOUMO, NKWENKEU, LANGOUO, ELOUNDOU, EBOUEM, KOLOKO, BIKEK) pour les moments d'échanges et de partage, mais aussi pour la convivialité et l'esprit de groupe qui a toujours prévalu au sein de notre promotion.

Je remercie enfin tous ceux qui de près ou de loin ont apporté une contribution à la réalisation de ce mémoire, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

## Table des matières

<b>Dédicace.....</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>ii</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>v</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1.....</b>	<b>3</b>
<b>REVUE DE LITTERATURE .....</b>	<b>3</b>
1-1 Généralités sur le bruit .....	4
1-1-1 Sources et modes de propagation du bruit .....	4
1-1-1-1 Définition .....	4
1-1-1-2 Sources du bruit.....	4
1-1-1-3 Types de bruit : bruit aérien, bruit solidien .....	6
1-1-1-4 Propagation du bruit .....	6
1-2- Caractéristiques du bruit et évaluation des niveaux sonores. ....	7
1-2-1- Caractéristiques du bruit .....	7
1-2-2 Evaluation des niveaux sonores .....	9
1-3 Fonctionnement de l'oreille et impact sonore .....	12
1-3-1 Fonctionnement de l'oreille .....	12
1-3-2 Impact sonore .....	14
1-4- Insonorisation acoustique.....	18
1-4-1 Les encoffrements (Pascal J.C., 2009) .....	19
1-4-2- Autres techniques d'insonorisation.....	21
1-4-2-1 Montage «antivibratile» .....	21
1-4-2-2 Traitement acoustique des locaux .....	21
<b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODOLOGIE D'EVALUATION DU BRUIT ..</b>	<b>23</b>
2-1- Techniques d'évaluation des nuisances sonores .....	24
2-1-1 Matériel d'évaluation du son.....	24
2-1-1-1 Les dosimètres.....	25
2-1-2 Technologie des sonomètres .....	26

2-1-2-1 Sonomètre intégrateur/moyenieur .....	28
2-1-2-2 Sonomètre analyseur ou conventionnel.....	29
2-2 Méthodologie d'évaluation du bruit.....	31
2.2.2 Les ventilateurs .....	35
2.2.3 Les pompes .....	36
2.2.4 Les compresseurs .....	37
2.2.5 Les types d'atténuations.....	37
2.2.5.1 Divergence géométrique .....	39
2.2.5.2 Absorption atmosphérique ou atténuation atmosphérique .....	39
2.2.5.3 L'effet de sol .....	40
2.2.5.4 Atténuation due aux obstacles ( $A_{écran}$ ).....	42
2.2.5.5 Effet d'écran par diffraction .....	44
2.2.5.7 Correction météorologique.....	47
2.2.5.8 Autres types d'atténuations ( $A_{divers}$ ).....	48
2-3-Méthodologie d'analyse générale .....	50
<b>CHAPITRE 3.....</b>	<b>53</b>
<b>ETUDE DE CAS : LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO .....</b>	<b>53</b>
3.1. Présentation générale de la centrale.....	54
3.2 Présentation des données et discussions .....	56
3.2.1 Niveau de puissance sonore et de pression acoustique équivalent en fonction de la position.....	58
3.2.2 Niveau de puissance sonore et pression acoustique équivalent en fonction de la puissance du moteur.....	59
3-2-4 Comparaison des niveaux de puissance sonore et de niveau de pression sonore ...	65
<b>CHAPITRE 4 : IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF .....</b>	<b>68</b>
4.1 Intérêt didactique .....	69
4.2 Fiche pédagogique : TP sur l'utilisation d'un sonomètre.....	69
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>72</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>74</b>

## **Abstract**

In a world resolutely turned rapid towards rapid industrialization and no limit is imposed, the fight against noise generated by all the various activities has always been the subject of several research activities both theoretically and practically. It is in this register that fits work which aims to offer a contribution to the mitigation of noise coming from the room of the power station MBALMAYO.

To achieve the desired goal we will carry out assessment of noise levels following two approaches: an experimental approach of measuring the sound levels in the CTM website using the sound level meter and at different positions; a second digital approach is used in which the characteristics of the sound sources to assess these noise levels to finally realize a comparison of the results of these two approaches.

The main results show that sound pressure levels and sound power levels decrease with the distance of source when we go away from sources. Another important result is the sound levels are greatly reduced for high frequencies when the operate simultaneously. It equally from this study that any action taken with a view to sound proof CTM must rely on two levers that are on one hand the characteristics of the engines, but also the distance between the homes of the central and the highway contribution must be taken in account for this evaluation.

**Key words: Noise, Sound attenuation, sound pressure level, sound power level, equivalent pressure level.**

## Liste des abréviations

### Acronymes

**BF** : Basse fréquence

**CSTC** : Comité Scientifique et Technique des industries Climatiques

**CTM** : Centrale Thermique de MBALMAYO

**dB**: décibel

**EDC**: Electricity Development Corporation

**HF** : Haute fréquence

**INRS** : Institut National pour la Recherche Scientifique

**ISO**: International Standard Organisation

**RIS** : Réseau Interconnecté Sud

### Lettres et Symboles Grec

**L<sub>w</sub>** : Niveau de puissance  
acoustique ;

**L<sub>p</sub>** : Niveau de pression  
acoustique ;

**L<sub>Aeq,T</sub>** : Niveau de pression  
acoustique continu équivalent  
pondéré ;

**N** : Nombre d'aubes ou de pales ;

**D** : Débit d'air du ventilateur ;

**d<sub>ss</sub>** : Distance entre source-source ;

**d<sub>SR</sub>** : Distance source-récepteur ;

**K<sub>j</sub>** : Terme correctif en fonction de  
la source

**β** : Angle de déviation de l'onde  
incidente

**d<sub>SO</sub>** : distance source-obstacle ;

**d<sub>RO</sub>** : distance récepteur-obstacle ;

**ρ** : Coefficient de réflexion  
acoustique ;

**d<sub>f</sub>** : distance de propagation à  
travers la végétation ;

**T** : période qui commence à t<sub>1</sub> et se  
termine à t<sub>2</sub> ;

**Dz** : atténuation par effet de diffraction

**G** : Facteur de sol

**A<sub>sol</sub>** : atténuation par effet de sol

**A<sub>écran</sub>** : atténuation par effet d'écran

$\lambda$  : Longueur d'onde

**C<sub>météo</sub>** : correction météorologique

**A<sub>atm</sub>** : atténuation par absorption atmosphérique

**P** : pression acoustique

**A<sub>div</sub>** : atténuation par divergence géométrique



## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Abaque d'addition de deux niveaux sonores (15) .....	10
<b>Figure 2:</b> Coupe transversale de l'oreille (Rapport sur le bruit CIDB, 2013).....	12
<b>Figure 3:</b> Courbes de Flecher et Munson. (Champilou et Coutant, 2011/2012) .....	14
<b>Figure 4:</b> (A) Structure typique d'un encoffrement : carcasse support, (B) Panneaux avec trappes de visite, (C) Encoffrement monté sur socle avec ouvertures pour aération (10) .....	19
<b>Figure 5:</b> Illustration des diverses voies de transmission d'un encoffrement. ....	20
<b>Figure 6:</b> Le sonomètre (2).....	27
<b>Figure 7:</b> Schéma fonctionnel du sonomètre (6) .....	28
<b>Figure 8:</b> (A) Sonomètre intégrateur ; (B) Sonomètre wifi ; (C) Sonomètre analyseur ;.....	28
<b>Figure 9:</b> Sonomètre SMART SENSOR AR 814 .....	30
<b>Figure 10 :</b> Relations entre le bruit et les vibrations des machines électriques.....	34
<b>Figure 11:</b> Profil de la surface (ISO, 1996).....	42
<b>Figure 12:</b> Condition d'effet d'écran (ISO, 1996).....	43
<b>Figure 13:</b> Paramètre géométrique d'un écran .....	43
<b>Figure 14:</b> Effet d'écran par diffraction (ISO, 1996) .....	44
<b>Figure 15:</b> Diffraction par simple et double écran (Seutche, 2013) .....	45
<b>Figure 16:</b> Surface de réflexion d'un obstacle (5).....	47
<b>Figure 17:</b> Distance de propagation $d_f$ à travers la végétation (5).....	49
<b>Figure 18:</b> Atténuation en fonction de la distance du site industriel (5) .....	49
<b>Figure 19:</b> Centrale thermique de MBALMAYO .....	54
<b>Figure 20:</b> Tanks d'eau et de fioul de la CTM .....	55
<b>Figure 21:</b> Salles de contrôle de la CTM .....	56
<b>Figure 22:</b> Niveau de puissance et de pression équivalent en fonction de la position .....	58
<b>Figure 23:</b> Niveau de puissance sonore en fonction de la puissance.....	59
<b>Figure 24:</b> Niveau de pression acoustique en fonction de la puissance du moteur .....	60
<b>Figure 25:</b> Niveau de pression acoustique par bande d'octave fonction de la puissance.....	61
<b>Figure 26:</b> Niveau de pression acoustique équivalent en fonction de la puissance des moteurs .....	62
<b>Figure 27:</b> Niveau de puissance numérique Lw(A) HF fonction du moteur.....	63
<b>Figure 28:</b> Niveau de puissance et pression en fonction des fréquences .....	64
<b>Figure 29:</b> Comparaison des puissances sonores et de pression acoustique .....	65

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> « Addition » de deux niveaux sonores exprimés en décibels- Quantité A de décibels, connaissant la différence arithmétique d des deux niveaux (15) .....	11
<b>Tableau 2:</b> Règlementation du bruit selon les recommandations de la Banque Mondiale ..	17
<b>Tableau 3:</b> Types de surdité en fonction du niveau sonore (Classification des surdités selon leur degré de gravité (BIAP) (13) .....	17
<b>Tableau 4:</b> Caractéristiques des moteurs .....	56
<b>Tableau 5:</b> Niveau de pression et de puissance sonores en fonction de la position .....	57
<b>Tableau 6:</b> Niveau de puissance et de pression équivalent numériques.....	59
<b>Tableau 7:</b> Niveau de pression sonore équivalent $L_{Aeq}$ (dB) et de puissance sonore $L_w$ (dB) � la source de chaque moteur. ....	63
<b>Tableau 8:</b> Récapitulatif des différentes atténuations en fonction des caractéristiques des moteurs. ....	65

## Introduction générale

Depuis plusieurs années, les conditions d'utilisation des machines ont considérablement évolué et les contraintes tant économiques qu'environnementales poussent à la réalisation de machines compact, légères et ayant un impact sonore fortement atténué. A ce titre, la conception et l'optimisation des machines acoustiques imposent de prendre en considération de nombreux phénomènes à savoir : vibro-acoustique, acoustique, mécanique, électromagnétique etc....

Les activités industrielles ont, ces dernières décennies, connu une croissance de bruit qui a apporté à notre société une nouvelle forme de pollution et de nuisance. Dans un souci de confort et de sécurité, mais aussi dans un contexte normatif de plus en plus strict, la lutte contre le bruit est devenue l'un des thèmes de recherches et demeure un domaine porteur pour les années futures. Dans l'environnement des lieux où s'effectuent des travaux bruyants (milieu de travail) le bruit peut-être source de gêne effective pouvant conduire à des surdités professionnelles.

Dans l'optique de limiter le bruit reçu par un individu, il existe de façon globale trois familles de solutions qui consiste soit à réduire le bruit à la source, soit à isoler le récepteur (isolation acoustique des façades) ou enfin soit à modifier la propagation acoustique entre la source et le récepteur pour que le niveau sonore arrivant sur le récepteur soit réduit.

La lutte contre la gêne et les problèmes de santé occasionnés par les nuisances sonores et vibratoires dans l'industrie, les transports, l'environnement et le bâtiment, correspond à une très forte mobilisation de la part des acteurs socio-économiques et scientifiques. L'utilisation de traitements acoustiques passifs, impliquant essentiellement des matériels poreux classiques (laines, mousses), constitue l'un des moyens les plus utilisés pour réduire ces nuisances sonores. Ces dispositifs sont certes efficaces en hautes et moyennes fréquences, mais leurs performances acoustiques se dégradent en basses fréquences alors que beaucoup de spectres de sources de bruit rencontrés dans divers secteurs tels que le trafic routier, les équipements de bâtiments ou l'industrie (machines), présentent une énergie importante dans cette zone.

Parmi les dispositifs absorbants acoustiques généralement utilisés pour réduire ces niveaux de bruit on y retrouve les systèmes passifs dissipatifs qui consistent à placer un matériau absorbant sur le trajet de l'onde ; de plus la nécessité des solutions compatibles avec les contraintes de poids, d'épaisseur, de cout, et l'absence de modèles réalistes en basses fréquences simulant finement le comportement vibroacoustique des matériaux poroélastiques

ont fait que les solutions connues et disponibles actuellement ne permettent pas d'agir efficacement sur les basses fréquences.

L'objectif dans la réduction du bruit réside autant dans la conformité à la réglementation et dans le souci de préservation de la santé du personnel, que dans le respect de la viabilité de l'entreprise et des processus de travail. Il s'agira de trouver un compromis entre les contraintes rencontrées et l'efficacité recherchée.

Le présent travail qui a pour finalité d'apporter une contribution à l'insonorisation acoustique des parois de la salle machines de la CTM vise à donner les outils nécessaires pouvant constituer les fondements de toute action visant à atténuer la pollution sonore issue de la Centrale Thermique de MBALMAYO. Ce travail est bâti sur quatre chapitres déclinés de la manière suivante :

- Le premier chapitre traite des généralités sur l'acoustique et sur l'insonorisation acoustique des parois. Il fait un tour d'horizon sans aucune prétention d'être exhaustif sur l'ensemble des connaissances en rapport avec l'onde sonore notamment ses caractéristiques, sa propagation et son impact dans un milieu de propagation...;

-Le second chapitre intitulé matériel et méthodologie d'évaluation du bruit présente le matériel utilisé pour l'acquisition des données et expose l'approche mathématique d'évaluation des niveaux sonores qui nous permet d'interpréter le phénomène physique dans le cadre du système qui est étudié. Il présente l'aspect théorique d'évaluation des niveaux sonores ainsi que le matériel utilisé pour évaluer les niveaux tant au niveau des sources que du milieu récepteur.

-Le troisième chapitre pour sa part est consacré à l'étude d'un cas pratique qui est la Centrale Thermique de MBALMAYO ; l'analyse des résultats obtenues à l'issue de cette étude est assortie d'une discussion conséquente.

-Le quatrième chapitre donne l'implication pédagogique de notre travail dans le système éducatif étant donné que nous sommes appelés à enseigner au secondaire.

Une conclusion générale de ce mémoire dresse une synthèse globale des travaux réalisés et clos le travail par une évocation des perspectives de recherche future.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LITTERATURE**

## **Introduction**

Face à un monde de plus en plus industrialisé, générateur de nuisances et de pollutions multiples, le bruit est ressenti comme une nuisance majeure par l'individu en tant que citoyen ou travailleur. Compte tenu de l'influence qu'il exerce sur notre quotidien, il est important d'emblée de planter le décor avec des notions fondamentales liées à l'acoustique, à la propagation des ondes et des techniques courantes de réduction du bruit assorties de certaines réglementations ayant cours dans le domaine.

Dans ce premier chapitre, nous faisons connaissance de façon générale du bruit par le biais des ondes sonores car les deux sont intrinsèquement liés en particulier de ses sources et modes de propagation, ses caractéristiques, de quelques pathologies causées par le bruit, des techniques usuelles à l'instar des encoffrements et des actions courantes permettant de réduire son impact.

### **1-1 Généralités sur le bruit**

#### **1-1-1 Sources et modes de propagation du bruit**

##### **1-1-1-1 Définition**

Selon le Larousse le bruit est défini comme : « Ensemble de sons sans harmonie » ; les anglo-saxons par contre parlent de : « Son jugé indésirable par le sujet qui le reçoit ». Ces deux définitions laissent transparaître le caractère ambigu de la notion de bruit. En effet alors que la première définition accorde la part belle au stimulus qui le provoque, la seconde par contre s'intéresse plutôt à la sensation qui en résulte. Du point de la physique, le bruit est la manifestation spécifique d'une source vibratoire qui se propage par ondes dans un milieu matériel. Le son dont est issu est une vibration mécanique d'un fluide qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce dernier.

##### **1-1-1-2 Sources du bruit**

Il est convenable dans la suite de définir d'entrée de jeu ce qu'est une source car pour un travailleur exposé par exemple, la source est l'équipement qui fait du bruit ; par contre pour le concepteur de cet équipement il s'agit du mécanisme interne qui va faire que l'équipement fasse du bruit. Une source de bruit se caractérise par :

- la puissance acoustique qu'elle émet ;
- sa directivité, qui traduit la répartition spatiale de la puissance émise ;
- son spectre qui traduit la répartition fréquentielle de cette puissance.

La chaîne globale de génération du bruit peut se décrire de la manière suivante :

- La source primaire est la toute première excitation, la source « originelle » du bruit :

\*elle est solidienne dès lors qu'elle se manifeste sous forme de force : c'est le cas de contact entre pièces ;

\*elle est aérienne, si elle se manifeste directement sous la forme de variation de pression (cas d'un échappement par exemple), ou si elle se fait à travers une cavité de l'équipement (volume interne d'un carter).

Lorsque l'équipement devient lui-même une source de bruit : on l'appelle source apparente, pour bien noter qu'il y a déjà eu la chaîne « émission/propagation » à l'origine de son propre bruit. Cette source apparente génère des bruits solidiens par ses éléments de structure avec la vibration comme paramètre générateur du bruit. On peut dire que l'équipement a transformé ses forces internes en vibrations des bruits aériens via ses ouvertures éventuelles devenant ainsi équivalent à un assemblage de sources apparentes solidiennes et aériennes dont le bruit se propage vers l'opérateur.

Ce schéma général de génération du bruit présente plusieurs avantages :

- garder les distinctions des natures aérienne et solidienne, dont on sait qu'elles se traitent différemment ;
- décomposer le problème en plusieurs étapes, pour le ramener à plusieurs problèmes simples, et ainsi mettre en évidence les différentes voies d'action dont on dispose ;
- mettre en évidence la source primaire et décliner les étapes spécifiques des passages de la force à la vibration, puis de la vibration au bruit ;
- mettre en évidence qu'une source apparente est constituée de plusieurs sources élémentaires, solidienne et aérienne ;
- décrire toute situation en une cascade de problèmes élémentaires du même type : émission/propagation/réception. Si par exemple l'équipement est encoffré, l'encoffrement devient à son tour source apparente. Les actions peuvent donc concerner l'équipement, la propagation entre l'équipement et l'encoffrement en tant que source sur lequel on peut donc appliquer les méthodes propres aux sources.

A tout prendre, pour les sources solidiennes il subsiste donc une différence entre la source primaire, qui est une force, puis la source apparente qui est la vibration qui en découle. Ce lien entre force et vibrations s'appelle transfert vibratoire et suit des lois physiques spécifiques. Par ailleurs, les propagations entre les sources primaires et apparentes, puis entre la source apparente « finale » et l'opérateur si elles suivent des principes analogues présentes dans la pratique des différences dues au fait que le milieu de propagation final est le local dont les dimensions sont importantes par rapport aux volumes des sources apparentes.

### **1-1-1-3 Types de bruit : bruit aérien, bruit solidien**

Si tous les bruits suivent le processus émission, propagation, réception on peut néanmoins les distinguer selon plusieurs types liés à la nature des éléments qui en sont à l'origine ou qui les véhiculent.

Ainsi une source dite « aérienne » génère directement le bruit, c'est-à-dire une variation de la pression de l'air dans le milieu ambiant : c'est le cas des instruments de musique à vent, des sirènes, des détonations.... La propagation de ce bruit est également aérienne dès lors qu'elle se réalise également dans l'air ambiant. En bref, un bruit aérien est un bruit produit dans l'air et se propageant dans l'air. Le bruit solidien pour sa part est celui produit au contact d'une structure et se propageant dans cette structure. Cependant un bruit peut-être généré indirectement à partir du contact entre deux pièces solides : engrenage, contact roue/rail, choc entre deux pièces...Le système excité par ce contact réagit, la variation de pression de l'air est une conséquence de ce contact et de la réaction qui en découle : on parle alors de « source solidienne ». De même, si le bruit se transmet au sein d'une structure solide (rail, conduite, sol...), la propagation est dite solidienne. La distinction vaut son pesant d'or car en fonction du type de source ou du type de propagation, les lois physiques et mathématiques sont différentes de même que les solutions de réduction devant être mis en œuvre. Il faut noter néanmoins que la distinction ou la limite entre bruit aérien et bruit solidien n'est pas aussi tranchée qu'elle en a l'air car la vibration des parois d'un local crée par le bruit solidien crée le bruit aérien de même pour les basses fréquences, et pour des matériaux légers le bruit aérien peut se convertir en bruit solidien.

### **1-1-1-4 Propagation du bruit**

D'un point de vue acoustique, le son est la propagation d'ondes de pression dans un milieu matériel et qui se manifeste par une variation de pression du milieu ambiant (l'air en général).

Il se propage sous forme d'ondes qui à l'image de vagues dans un milieu liquide retracent le parcours de cette variation de pression. La propagation des bruits se fait principalement selon un ou plusieurs des trois modes suivant :

❖ Par dispersion : Dans un espace libre on observe une dispersion de l'énergie acoustique, le niveau du bruit décroissant en fonction de la distance. Cette décroissance spatiale en fonction de la distance peut être quantifiée en fonction de la source de bruit. C'est le cas d'une source ponctuelle (usine, discothèque...) pour laquelle en champ libre et dans un espace ouvert le niveau sonore décroît de 6dB chaque fois que la distance par rapport à la source est doublée. Il faut noter que dans les locaux fermés, cette valeur n'est atteinte que si



ceux-ci sont exempts de réflexions. En l'absence de masque, le niveau sonore décroît de 3dB chaque fois que la distance par rapport à la source est doublée.

- ❖ Par réflexion et absorption sur un obstacle : on observe alors un phénomène de réverbération d'une partie de la vibration sur les parois et obstacles rencontrés
- ❖ Par transmission de la vibration aux matériaux : le bruit se propage aux solides (parois, structures...).

Entendre un bruit peut paraître immédiat, en réalité le processus suivi par celui-ci se décompose en trois étapes :

\*à l'origine le bruit est émis par une source : un équipement, une personne, un phénomène quelconque l'a généré ;

\*il se propage ensuite jusqu'à l'endroit où on l'entend, à travers un chemin plus ou moins complexe constitué éventuellement de réflexions diverses ;

\*en cet endroit, il est capté par un récepteur qui peut-être un appareil de mesure ou une oreille humaine...

Lorsque la source primaire se propage ou se transforme au sein de l'équipement, cette propagation est solidienne si elle se fait via les structures de l'équipement (arbres, paliers, carters...); elle est aérienne si elle se fait à travers une cavité de l'équipement (volume interne d'un carter....)

Analyser un bruit reçu nécessite de prendre donc en compte ces trois étapes que sont l'émission, la propagation et la réception.

## **1-2-Caractéristiques du bruit et évaluation des niveaux sonores.**

### **1-2-1- Caractéristiques du bruit**

Le bruit se manifeste à travers le son, c'est la raison pour laquelle les caractéristiques d'un bruit sont intrinsèquement liées à celles des sons qui le constitue. Tout son en effet résulte de la vibration d'un corps qui met à son tour en vibration l'air environnant sous forme d'ondes de pression et de dépression, c'est cette variation de pression qui se déplace de proche en proche. Comme caractéristiques principales du bruit on a :

**L'intensité:** Il s'agit de l'impression de force sonore ressentie au niveau de l'oreille. Elle est définie comme le flux d'énergie par unité de temps et à travers l'unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation de la vibration sonore ; elle est notée  $I$  et son unité est  $W/m^2$ . Etant donné que l'intensité d'un bruit n'est pas d'accès facile dans la pratique, et pour tenir compte de la dynamique de la perception du son par l'oreille humaine qui est très importante, l'échelle de mesure de l'intensité d'un son et par extension d'un bruit

est logarithmique à base 10 et utilise le dixième du Bel (B) qui est l'unité de mesure comme unité. On l'appelle le décibel en abrégé dB.

On définit globalement et exprimée en dB :

$$\text{-le niveau d'intensité sonore : } L_I = 10 \log \left( \frac{I_{eff}}{I_{ref}} \right) \quad [1.1]$$

Avec  $I_{ref} = 10^{-12} \text{ W / m}^2$

$I_{eff}$  = Intensité acoustique efficace en  $\text{W/m}^2$

L'intensité moyenne est définie par :  $I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t).dt$

-le niveau de pression acoustique exprimé en décibel est donné par :

$$L_p = 10 \log \left( \frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{P_{eff}}{P_{ref}} \right) \text{ où } P_{ref} = 2.10^{-5} \text{ Pa.} \quad [1.2]$$

La pression efficace  $P_{eff}$  est la valeur moyenne de  $P(t)$  entre les instants  $t_1$  et  $t_2$  avec :

$$P_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t).dt$$

$$\text{-le niveau de puissance sonore : } L_W = 10 \log \left( \frac{W_{eff}}{W_{ref}} \right) \quad [1.3]$$

Avec  $W_{ref} = 10^{-12} \text{ W}$

La pression acoustique instantanée en un point  $P(t)$  est définie comme étant l'écart entre la pression totale et la pression statique moyenne (en général pression atmosphérique), elle s'exprime en Pascal. Pour une source omnidirectionnelle (envoyant la même énergie dans toutes les directions) et de petite dimension par rapport à la distance du point d'écoute, les ondes acoustiques sont sphériques et on a les relations suivantes entre les différentes

grandeurs mises en jeu :  $I = \frac{P_{eff}^2}{\rho_0 c}$  avec  $P_{eff}$  la pression acoustique efficace de la source ( $\text{N/m}^2$ )

et  $C =$  célérité du son dans l'air  $\rho_0 c = 400 \text{ Kg.m}^{-2} \text{ S}^{-1}$  l'impédance acoustique caractéristique de

l'onde sonore,  $\rho_0 =$  masse volumique de l'air, et  $I = \frac{W}{(4\pi r^2)}$  avec  $W =$  puissance acoustique

de la source,  $4\pi r^2 =$  surface de la sphère de rayon  $r$  en  $\text{m}^2$

La puissance acoustique d'une source  $W(t)$  est la quantité d'énergie émise par celle-ci par unité de temps elle s'exprime en watt (W). Le phénomène acoustique en un point dépend donc

non seulement de la source et de sa puissance acoustique, mais aussi de la position du point par rapport à cette source.

**La fréquence** : elle correspond au nombre de vibrations par seconde émises par la source sonore, elle se mesure en Hertz(Hz) et est directement liée à la hauteur du son perçu. A une fréquence faible correspond un son grave et à une fréquence élevée correspond un son aigu.

Afin de tenir compte de la sensibilité physiologique de l'oreille humaine qui varie suivant les fréquences et pour que le niveau sonore mesuré corresponde au mieux à celui perçu par l'oreille, on introduit dans l'appareil des filtres de pondération. Ainsi, on applique au son mesuré un filtre qui suit la courbe moyenne des atténuations acoustiques de l'ouïe humaine en fonction de la fréquence. Ce filtre est une pondération liée à la fréquence et traduit une équivalence du comportement de l'oreille humaine, on l'appelle pondération « A » ; on parle dès lors de décibel pondéré A qu'on note dB(A) :

En général on utilise couramment trois types de filtres de pondérations :

- A : qui permet d'évaluer la sensation des bruits dont les niveaux sonores sont inférieurs à 55dB (c'est la zone des bruits gênants dans le bâtiment) ;
- B : qui permet d'évaluer la sensation des bruits moyens c'est-à-dire ceux dont les niveaux sont compris entre 55dB et 85dB qu'on note dB(B) ;
- C : qui permet d'évaluer la sensation des bruits dont les niveaux sont supérieurs à 85 à 1000Hz qu'on note dB(C)

En d'autres termes on « triche » sur la mesure du sonomètre pour que celui-ci indique non pas le niveau sonore effectif, mais bien le niveau sonore perçu par notre oreille. Dans un esprit de simplification de l'écriture des niveaux sonores, pour un niveau  $L=60\text{dB(A)}$  on notera

$L_A= 60\text{dB}$

### **1-2-2 Evaluation des niveaux sonores**

Le bruit est un mélange de sons différents, ayant chacun sa fréquence et son niveau sonore. Pour l'analyser, il faut évaluer le niveau sonore à chacune des fréquences qui composent ce bruit. Cette analyse permet d'identifier la prépondérance de composantes en fréquences graves, médiums ou aigues.

Lorsque deux sources produisent des sons en un point, ce sont les intensités acoustiques (ou les carrés des pressions acoustiques) qui s'ajoutent et non pas les niveaux sonores en décibels. Si on considère deux sources telles que :

$L_{I_1} = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right)$  et  $L_{I_2} = 10 \log \left( \frac{I_2}{I_0} \right)$  le niveau d'intensité acoustique résultant du fonctionnement des deux sources est :

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I_1 + I_2}{I_0} \right) \quad [1.4]$$

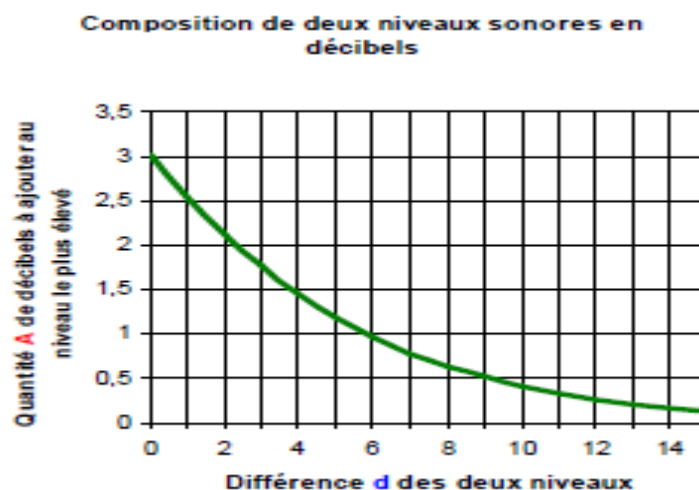
Si les deux sources produisent la même intensité,  $I_1=I_2$  le niveau résultant sera :

$$L_I = 10 \log \left( 2 \frac{I_1}{I_0} \right) = L_{I_1} + 10 \log 2 \text{ soit } L_{I_1} + 3 \text{dB} \quad [1.5]$$

Cet exemple montre l'importance de 3dB car un écart de 3dB, correspond à deux sons dont l'un a deux fois plus d'énergie que l'autre. Du fait de l'échelle logarithmique, on ne peut pas ajouter arithmétiquement les décibels de deux bruits simultanés pour arriver au niveau sonore global. Il convient d'utiliser deux règles:

\* Pour deux bruits de niveaux très différents (écart supérieur à 13dB) : le plus fort couvre complètement le plus faible.

\* Pour deux bruits de niveaux voisins (écart inférieur ou égal à 13dB) : il faut calculer la différence en dB et ajouter au niveau le plus élevé la valeur correspondante (en dB). En général, si on veut éviter des calculs faisant intervenir des logarithmes, on utilise des tableaux ou des abaques pour additionner deux niveaux sonores dont on connaît la différence arithmétique « d » en décibels comme le montre la figure :



**Figure 1:** Abaque d'addition de deux niveaux sonores (15)

**Tableau 1:** « Addition » de deux niveaux sonores exprimés en décibels- Quantité A de décibels, connaissant la différence arithmétique **d** des deux niveaux (15)

<b>d</b> (dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>A</b> en dB	3	2,5	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,33	0,26

Le domaine fréquentiel est découpé en intervalles normalisés de fréquences et l'analyse fréquentielle s'effectue soit à largeur de bande constante ( $\Delta f = \text{cte}$ ), soit à largeur de bande relative constante ( $\Delta f / f = \text{constante}$ ). Dans la pratique, on utilise plutôt les analyses à  $\Delta f / f = \text{constante}$  dont les plus usités sont les analyses en 1/3 d'octave et 1/1 d'octave qui correspondent mieux à la résolution fréquentiel de l'oreille humaine. Cette notion de bande d'octave est souvent utilisée dans le domaine musical et nous donnons dans ce qui va suivre quelques définitions (Krauss G. et al, 2009/2010) :

**- Analyse par bande d'octave**

Une octave est l'intervalle de fréquences dont la borne supérieure a une valeur double de la borne inférieure. En d'autres il s'agit d'un rapport de fréquence  $[f_1 - f_2]$  tel que

$$\frac{f_1}{f_2} = 2$$

L'ensemble des fréquences audibles est couvert par 10 bandes d'octave normalisées telles que : [22,5-45], [45-90], [90-180], [180-350], [350-700], [700-1400], [1400-2800], [2800-5600], [5600-11200], [11200-22400]. Chacune de ces bandes est caractérisée par sa

fréquence médiane définie par :  $f_m = \sqrt{f_1 \times f_2}$  [1.6]

Avec  $f_1$  et  $f_2$  les fréquences extrêmes de la bande en Hz.

Ces fréquences sont respectivement : [31,5-63-125-250-500-1000-2000-4000-8000-16000].

L'analyse d'octave est encore appelée analyse à 70% car  $\Delta f / f_m = 0,707$  avec  $\Delta f = f_2 - f_1$ .

**-Analyse par bande de tiers d'octave**

Une bande de tiers d'octave est un intervalle de fréquences  $[f_1 - f_2]$  tel que le rapport :

$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2}$  On déduit de cette définition que 3 bandes de tiers d'octave successives constituent

une bande d'octave. Les bandes de tiers d'octave sont plus étroites que les bandes d'octave : on dit que l'analyse de tiers d'octave est plus fine que celle d'octave. Les fréquences médianes ou centrales sont définies par :

$$f_m = \sqrt[3]{f_1 f_2} \quad [1.7]$$

Leurs valeurs sont : 10, 12,5, 16, 20,25, 31,5, 40, 50-63-80, 100, 125...Hz

L'analyse en tiers d'octave est encore appelée analyse à :  $\frac{\Delta f}{f_m} = 0,233$

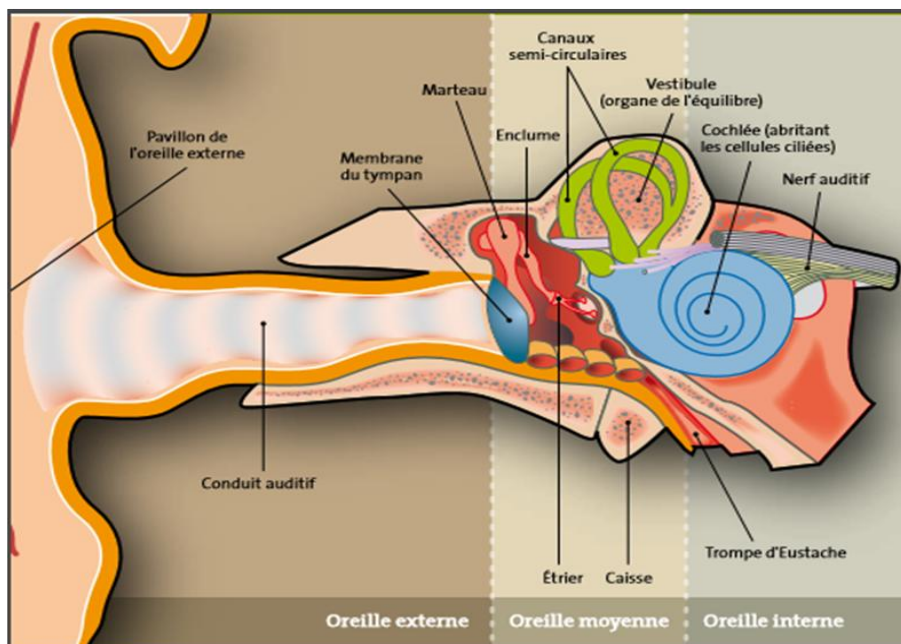
Chaque bande d'octave étant la somme de trois bandes de tiers d'octave, il est possible de passer d'une analyse par tiers d'octave à une analyse d'octave en regroupant 3 par 3 les niveaux mesurés, selon la méthode classique d'addition des décibels.

### 1-3 Fonctionnement de l'oreille et impact sonore

#### 1-3-1 Fonctionnement de l'oreille

L'oreille est le principal organe du corps humain qui est affecté au premier chef par les effets du bruit c'est à ce titre qu'il fait l'objet de notre attention dans le paragraphe suivant. Le bruit perturbe les possibilités de communication en réduisant l'intelligibilité de la parole, il peut gêner la réalisation des tâches demandant une certaine vigilance. En masquant la perception d'un évènement ou d'un signal, le bruit peut augmenter le facteur de risque dans la production d'un évènement accidentel.

L'oreille est un organe périphérique de l'audition. La photographie suivante présente une coupe transversale de l'oreille.



**Figure 2:** Coupe transversale de l'oreille (Rapport sur le bruit CIDB, 2013)

On y distingue trois parties bien différenciées (Rapport sur le bruit CIDB, 2013) :

➤ *L'oreille externe* : elle est composée par un pavillon en forme d'entonnoir évasé, présentant un certain nombre de replis et d'anfractuosités auquel fait suite un canal régulier, mesurant environ 2,5cm de long et 0,8cm de diamètre : c'est le conduit auditif externe. Elle

collecte, localise, amplifie et dirige les ondes sonores vers le tympan ; c'est une fine membrane qui vibre comme le tambour.

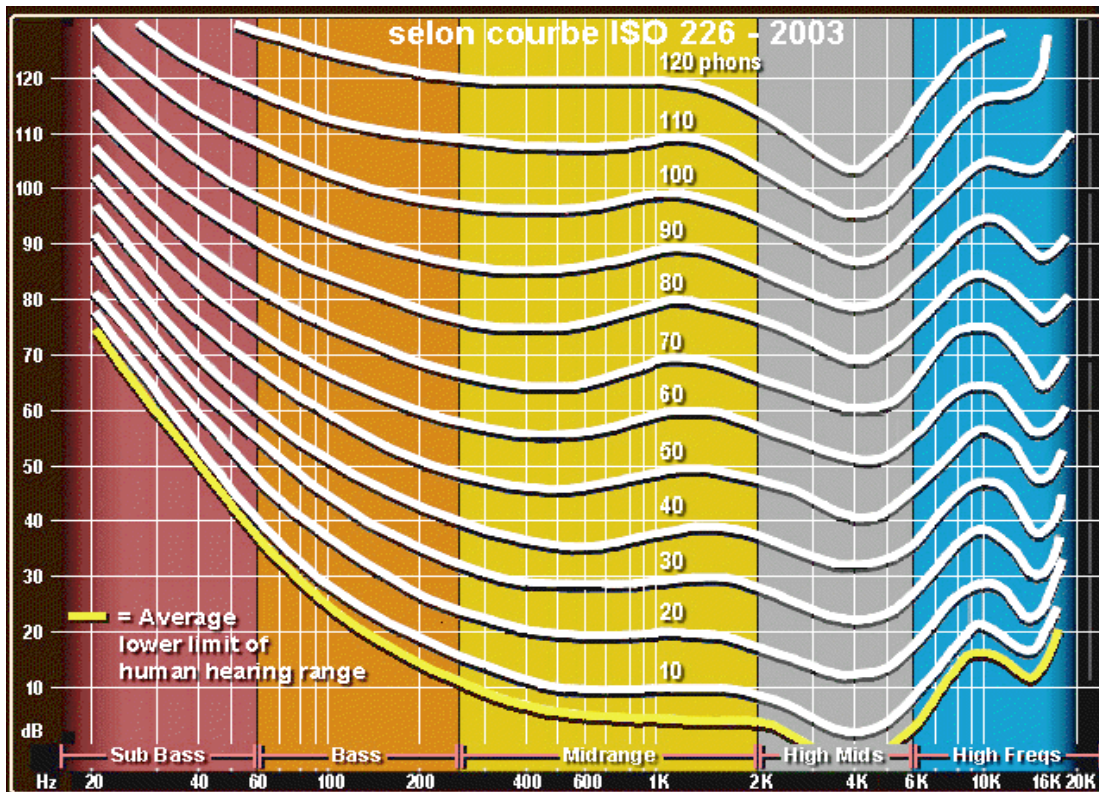
➤ *L'oreille moyenne* : c'est une cavité remplie d'air comprise entre le tympan et l'oreille interne, ces deux étant séparée par la fenêtre ovale qui fait suite au conduit auditif externe duquel l'oreille moyenne est séparée par la membrane du tympan. Elle est formée par une cavité d'environ 1 à 2cm<sup>3</sup> dans l'os temporal. La caisse du tympan est fermée par la membrane du tympan coté oreille externe et du coté de l'oreille interne par deux ouvertures plus petites : la fenêtre ronde et la fenêtre ovale. Cette caisse communique encore vers l'avant avec le pharynx par la trompe d'eustache et vers l'arrière avec les mastoïdes. Un des petits osselets relie la membrane du tympan avec la membrane de la fenêtre ovale. Elle a pour fonction, à l'aide de la chaîne des osselets (marteau, enclume et étrier), de transformer mécaniquement les vibrations aériennes en vibrations solidiennes.

➤ *L'oreille interne* : c'est le cœur du système auditif. Elle est constituée, d'une part du vestibule, organe qui permet de garder notre équilibre dans l'espace, et d'autre part d'une cavité remplie de liquide qui contient la cochlée de limaçon. Au sein de la cochlée se trouve l'organe de Corti. Il s'agit d'un élément important de l'ouïe comprenant les cellules sensorielles de l'audition, appelées les cellules ciliées. Elles captent l'énergie acoustique et la transforment en influx nerveux ; les fibres du nerf auditif se chargent de transmettre l'information au cerveau. Le cortex cérébral interprète le message qu'il reçoit et génère la sensation auditive, image perceptive du message sonore capté par l'oreille.

Le système auditif est complètement achevé au septième mois de la vie intra utérine, mais l'intégration du son nécessite des structures nerveuses qui ne sont pleinement en fonction qu'entre la première et la deuxième année de vie. Le fait qu'un son soit audible ou non dépend principalement de notre système auditif car il a ses limites et il faut en tenir compte puisque le confort ou la correction acoustique sont liés à notre perception auditive. Les limites de notre ouïe sont les suivantes :

- En dessous de 20Hz inaudible : infrasons
- De 20Hz à 400Hz audible : grave
- De 400Hz à 1600Hz audible : médium
- De 1600Hz à 20kHz audible : aigu
- Au dessus de 20kHz inaudible : ultrasons

Les courbes de FLETCHER et MUNSON nous montre la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence :



**Figure 3:** Courbes de Flecher et Munson. (Champilou et Coutant, 2011/2012)

Cette courbe révèle que l'oreille humaine :

- Ne peut entendre que des sons de fréquence comprise entre 20 et 15000 Hz
- Présente une sensibilité diminuée aux basses fréquences. Par exemple, un son de 40dB à 1000 Hz aura la même impression de niveau sonore qu'un son de 60dB à 62,5Hz.
- Perçoit les bruits moyens et forts avec une sensibilité presque identique, quelle que soit la fréquence.

A tout prendre, elle est plus sensible aux fréquences médiums situées entre 500 et 5000Hz soit les fréquences émises par la parole, elle atténue par contre énormément les basses fréquences et à tendance à amplifier les fréquences entre 1et 6kHz (Champilou et Coutant, 2011/2012)

### 1-3-2 Impact sonore

Dans le paragraphe qui suit on s'intéresse de plus près à l'action du bruit sur l'environnement immédiat où il est produit et notamment sur les individus sujet à ses effets. Avant de parler des pathologies auxquelles s'expose notre système auditif à la suite de l'action du bruit il est judicieux de présenter de façon succincte le processus qui préside à l'audition de ce dernier. En effet nous entendons grâce à l'action combinée des trois parties principales de l'oreille car le son est capté par l'oreille externe (pavillon, conduit auditif) puis transmis à l'oreille moyenne (tympen, chaîne des osselets), qui amplifie le son et le transmet à



l'oreille interne où se trouve la cochlée, reliée au cerveau par le nerf auditif. C'est elle qui transforme le son en message nerveux compréhensible par le cerveau. La cochlée renferme des cellules ciliées internes qui transforment la vibration sonore en influx nerveux, et des cellules ciliées externes, qui amplifient les vibrations, les analysent et les aiguillent selon leur fréquence vers les fibres nerveuses correspondantes. Le message nerveux issu de la cochlée est ensuite transmis par le nerf auditif jusqu'aux aires auditives cérébrales, qui intègrent ce message et permettent d'entendre et de comprendre l'information sonore. Ainsi, c'est au niveau des structures corticales que les bruits sont identifiés et que les sons de parole prennent sens. Si l'une des étapes de ce processus ne peut s'effectuer correctement, l'audition sera altérée.

Notre système auditif est capable de classer les signaux acoustiques qui lui parviennent c'est ce qui nous permet de suivre une seule conversation sans être gêné par les bruits parasites ; cette capacité à reconnaître les fréquences des différents sons perçus, à comprendre dans le bruit s'appelle l'écoute sélective. En cas de perte auditive, cette aptitude est particulièrement affectée.

Un nombre croissant d'études révèle que dans certaines situations de forte exposition, le bruit constitue un véritable enjeu de santé publique. Si la sensation de douleur se manifeste vers 120 dB(A), la fatigue auditive survient bien en dessous de ce seuil ; notre oreille commence à souffrir sans que nous le sachions à partir d'une exposition à 85dB(A) pendant 8heures. L'exposition répétée à des niveaux sonores élevés détruit peu à peu les cellules ciliées de l'oreille interne et conduit à une perte auditive progressive et insidieuse. En effet la perte d'audition passe inaperçu au début car elle apparait d'abord dans les fréquences aiguës peu utilisées dans la vie courante, autour de 4000Hz à 6000Hz. Ce n'est lorsqu'elle gagne progressivement les fréquences moyennes, celles de la conversation courante que l'on s'en rend compte.

Classiquement, le système auditif est considéré en danger à partir d'une exposition de 85dB(A) sur une journée de travail de 8 heures. Les conséquences d'une exposition à de trop forts niveaux de bruit sont avant tout physiologiques. Ils peuvent aller de la simple fatigue à des lésions du système auditif et à la surdité. Cependant les risques d'un autre ordre peuvent être cités :

-Les effets non traumatiques : il s'agit des répercussions néfastes pour d'autres fonctions sans pour autant mettre l'audition face à un danger particulier ; ce sont des effets d'ordre comportemental, une ambiance bruyante peut gêner la communication ou détourner l'attention. Le bruit détériore donc les performances des opérateurs, en particulier de ceux

exerçant des tâches intellectuelles ou cognitives demandant de la concentration. Même lorsqu'il ne présente pas de danger pour l'homme, le bruit est un élément indésirable car il cause :

-La fatigue auditive : L'exposition à un bruit intense peut provoquer une souffrance temporaire, des sifflements d'oreilles, des bourdonnements (acouphènes), ainsi qu'une baisse momentanée de l'activité auditive. Cette fatigue auditive demande quelques semaines sans surexposition au bruit pour disparaître. Le bruit est cause de fatigue même sous les seuils réglementaires.

-La surdité : types et degrés

En fonction de l'endroit atteint par un dysfonctionnement, on parlera de surdité de transmission ou de surdité de perception.

#### \*Surdités de transmission

Les surdités de transmission sont des baisses de l'audition dues à une altération de l'oreille externe ou de l'oreille moyenne. Elles peuvent être dues à la présence d'un obstacle dans le conduit auditif (bouchon d'oreille, coton), à des otites (infections de l'oreille moyenne), des perforations du tympan, des malformations ou des maladies héréditaires. Elles sont d'ordre mécanique et se guérissent généralement par traitement médicamenteux ou par intervention médicale.

#### \*Surdités de perception

Les surdités de perception sont des baisses de l'audition dues à un dysfonctionnement de la cochlée, du nerf auditif ou des structures cérébrales. Elles peuvent être dues à des traumatismes sonores, des maladies, des malformations... mais le plus souvent elles sont dues au vieillissement naturel des cellules sensorielles (presbycusie). La presbycusie touche essentiellement des personnes âgées mais elle peut aussi apparaître chez les jeunes : on parle alors de presbycusie précoce.

Pour faire face au bruit, il existe un cadre réglementaire défini par la Banque Mondiale et qui est résumé dans le tableau 2. A cette réglementation nous associons dans le cadre de notre travail celle d'un bureau d'expertise qui est le Bureau International d'Audiophonologie en abrégé BIAP (voir tableau 3) qui donne les types de surdité en fonction de la perte auditive en décibel.

**Tableau 2** : Règlements du bruit selon la Banque Mondiale (Seutche, 2013)

	Jour (7h00 - 22h00)	Nuit (22h00 - 7h00)
Zones résidentielles, institutionnelles ou écoles	55 dB	45 dB
Zones industrielles et commerciales	70 dB	70 dB

Selon le Bureau International d'Audiophonologie (BIAP), les surdités peuvent être classées en fonction de la perte auditive (mesurée en décibel dB), de la façon suivante :

**Tableau 3**: Classification des surdités selon leur degré de gravité (BIAP)

(Sarraf-Moayeri, 2009-2010)

Perte en dB	Type de surdité	Conséquences
0 à 20dB	Audition normale	
21 à 40dB	Surdité légère	Voix basse ou lointaine difficilement perçue.
41 à 70dB	Surdité moyenne	Parole perçue si on élève la voix. Quelques bruits familiers sont encore perçus.
71 à 90dB	Surdité sévère	Parole perçue à voix forte près de l'oreille. Seuls les bruits forts sont perçus.
91 à 119dB	Surdité profonde	Aucune perception de la parole. Seuls les bruits très forts sont perçus.
120dB	Cophose	Rien n'est perçu.

L'exposition prolongée à des niveaux de bruit intenses détruit peu à peu les cellules ciliées de la cochlée. Elle conduit progressivement à une surdité dite de perception qui est irréversible. Dans ce cas l'appareillage par des prothèses électroniques est l'unique recours, malgré qu'il se contente d'amplifier l'acuité résiduelle et ne restitue pas la fonction auditive dans son ensemble : l'efficacité de ces solutions est donc limitée.

Les pertes de l'audition se manifestent par des anomalies telles que :

- La presbycusie(modification du seuil d'audition avec l'âge): elle se manifeste par une raideur du tympan accompagnée d'une ankylose des osselets.
- les traumatismes sonores : ici on note la rupture du tympan, la déformation du tympan et la rupture des cils par cisaillement.

\*Effets du bruit sur le sommeil : Les perturbations du sommeil inhérent au bruit font régulièrement l'objet d'enquêtes et de sondages. Elles concernent particulièrement les

riverains résidant à proximité des sites bruyants (usines, axes routiers, aéroports, Camrail...). Cette forme de nuisance met en jeu différents facteurs physiologiques et psychologiques. Sur le plan psychologique, outre la gêne exprimée, on relève des formes diverses de perturbation qui se manifestent en priorité par des ajustements comportementaux : fermeture des fenêtres, isolation, changement de chambres, décalage des horaires et surtout, consommation de somnifères. Sur le plan physiologique, le bruit se traduit principalement par une perturbation de l'organisation du sommeil.

Outre ses effets sur l'audition du travailleur, le bruit peut avoir également des conséquences néfastes sur l'homme dans le cadre de ses activités professionnelles. Il peut en effet, lui faire courir des risques allant de la simple perturbation temporaire à l'atteinte de son activité physique. Citons entre autres :

- les conséquences directes sur la sécurité par non audition des signaux d'avertissement.
- les conséquences indirectes sur la sécurité par réduction des facultés d'attention, diminution de la dextérité, accroissement de la fatigue, etc. ;
- les conséquences sur la qualité du travail

#### **1-4-Insonorisation acoustique**

L'insonorisation acoustique désigne l'ensemble des procédés mis en œuvre pour empêcher le bruit de pénétrer dans un milieu clos (isolation acoustique) ou d'en sortir (correction acoustique) afin de réduire les échanges thermiques entre une enceinte (intérieur d'un bâtiment par exemple) et le milieu extérieur. Elle désigne aussi l'ensemble des matériaux utilisés pour isoler un dispositif. La correction acoustique vise à limiter la réverbération, le niveau de l'onde sonore et à améliorer l'intelligibilité de la parole ou le confort acoustique à l'intérieur d'un local tandis que l'isolation acoustique vise à se protéger des bruits émanant de l'extérieur du local considérée. A ce titre le traitement acoustique d'une enceinte dans le but d'obtenir le confort acoustique et la conformité aux exigences de performance réglementaire, sera basée sur une conception architecturale intégrant une isolation acoustique de qualité, associée à une correction acoustique adaptée à l'usage de ladite enceinte.

Pour minimiser l'impact du bruit émis par une machine trop bruyante sur le milieu environnant, deux types d'actions globales doivent être menées conjointement :

- l'isolation acoustique,
- l'isolation vibratoire

Les dispositifs d'insonorisation fréquemment usités pour cette action sont principalement :

- les dispositifs absorbants (revêtement, baffles acoustiques),

- les écrans acoustiques,
- les cloisons, bardages et cabines,
- les encoffrements (capotages),
- les silencieux....

#### 1-4-1 Les encoffrements (Pascal J.C., 2009)

En ce qui concerne l'insonorisation acoustique des machines trop bruyantes, l'encoffrement est la solution la plus utilisée pour atténuer les effets sonores.

On appelle encoffrement ou capotage une enveloppe qui enferme la source (machine) totalement ou partiellement et dont la fonction est de réduire le rayonnement acoustique. Il est constitué globalement d'une enceinte (capotage) qui enveloppe le plus complètement possible la machine dont le bruit est à réduire comme on peut le voir :

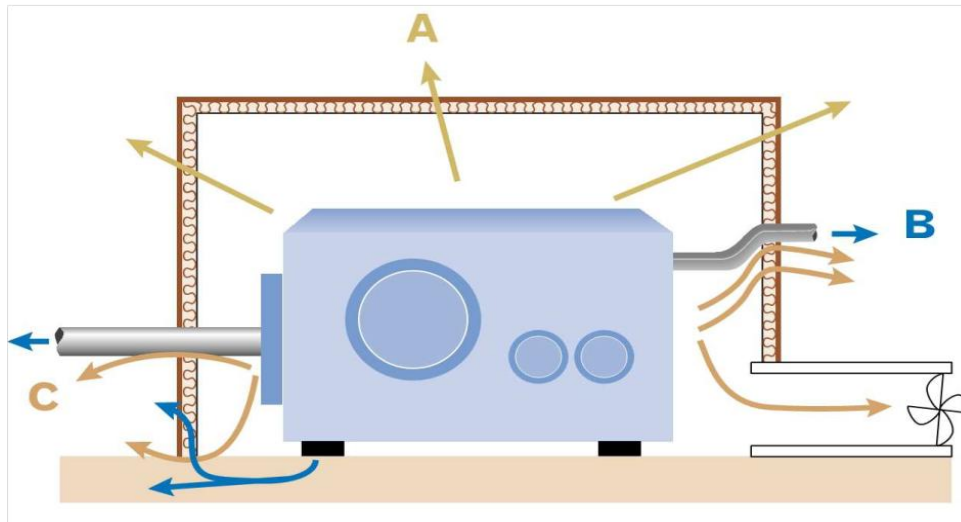


**Figure 4:** (A) Structure typique d'un encoffrement : carcasse support, (B) Panneaux avec trappes de visite, (C) Encoffrement monté sur socle avec ouvertures pour aération (10)

On distingue :

- le capotage complet : il recouvre entièrement la machine, mais peut présenter des ouvertures pour la commande ou l'aération : la réduction du bruit est assurée de manière globale.
- le capotage intégré : c'est un encoffrement acoustique fermé qui est monté directement sur le bâti de la machine ; compact, il épouse les formes de la machine.
- le capotage partiel : il est seulement mis en œuvre sur les parties bruyantes de la machine quand celles-ci sont nettement séparées. C'est une protection acoustique de type écran qui est rarement suffisante pour obtenir une amélioration très importante.

La figure ci-dessous illustre les principaux modes de transmission de l'énergie acoustique vers l'extérieur d'une machine recouverte par un encoffrement.



**Figure 5:** Illustration des diverses voies de transmission d'un encoffrement.

(A : voie aérienne ; B : voie solidienne ; C : fuites) (Dupont J.B., 2007)

L'énergie acoustique peut se propager par l'air à travers l'encoffrement (on parle alors de bruit aérien), par les structures (bruit solidien), ainsi que par les ouvertures pratiquées volontairement ou non sur l'encoffrement (fuites).

L'encoffrement ne permet de réduire que la proportion aérienne du bruit rayonné par la machine, son efficacité sur le bruit global d'une machine dépend donc directement de la proportion de bruit aérien rayonné par cette dernière dans le bruit global. Il faut néanmoins relever que lorsque cette solution est possible elle permet souvent un affaiblissement important pouvant dépasser 20dB(A) à condition toutefois que les règles de base suivantes soient respectées : parois homogènes de masse et d'amortissement suffisants, découplage élastique du capotage par rapport à la machine, étanchéité au bruit des composants du capot et réduction des points faibles sur le plan de l'acoustique (notamment aux orifices d'alimentation et de sortie des matériaux de la machine). Un encoffrement est plus efficace lorsque ses parois ne sont pas excitées directement par les vibrations générées par la machine (par voie solidienne). Cette efficacité dépend aussi de la nature des parois car elles doivent être choisies pour réduire la puissance transmise, mais aussi pour absorber l'énergie acoustique et ainsi minimiser le champ à l'intérieur de l'enceinte. En général, un encoffrement (ou capotage) est une enveloppe qui enferme la source sonore (machine) totalement ou partiellement et dont la fonction attendue est de réduire son rayonnement acoustique.

Les parois de l'encoffrement constituent une barrière au bruit aérien rayonné par la source, mais l'optimisation des performances de celui-ci passe par la maîtrise de l'ensemble des chemins de transmission à savoir :

-la propagation à travers les parois qui assure l'isolement acoustique. L'indice d'affaiblissement acoustique en est la caractéristique principale.

-l'étanchéité : elle doit être assurée au niveau des assemblages et des ouvertures fonctionnelles par des joints, des silencieux, des chicanes, etc....

-la propagation solidienne : les attaches du capot sur la source, les éléments de machine solidaires du capot ou le traversant doivent être isolés sur le plan vibratoire. Il est également indispensable de désolidariser le capotage de toute source d'excitation, que ce soit la machine ou le sol.

## **1-4-2- Autres techniques d'insonorisation**

### **1-4-2-1 Montage «antivibratile»**

Le montage «antivibratile» des machines a pour objet de limiter la transmission des vibrations à d'autres éléments de structure voisins. Il vient en complément des efforts effectués pour réduire le bruit intrinsèquement émis par les machines. Les dispositifs «antivibratiles» s'intercalent entre le sol et la machine (ou son socle, massif lourd et rigide, sur lequel elle est fixée si nécessaire). Ce type de montage doit être systématiquement envisagé. L'adéquation aux machines des dispositifs «antivibratiles», applicables également au capotage, est d'une importance déterminante pour obtenir les résultats attendus et garantir le fonctionnement optimal de l'ensemble. Leur détermination par le calcul et leur choix, en type, en nombre et en position, sont du domaine des bureaux d'étude qualifiés en la matière.

### **1-4-2-2 Traitement acoustique des locaux**

Il consiste à revêtir le plafond et éventuellement les murs de matériaux absorbants, afin de réduire au niveau le plus bas la réverbération sonore du lieu de travail (absorption acoustique) soit à mettre en œuvre des procédés pour isoler deux espaces entre eux (isolation acoustique).

\* les matériaux absorbants : Les matériaux utilisés pour le traitement acoustique des parois sont généralement des matériaux poreux à base de fibres minérales (laines de verre ou de roche) ou de mousses synthétiques (mélanine, polyuréthane). Leur absorption acoustique varie avec leur épaisseur, leur porosité et leur densité. Ils sont souvent protégés, par un voile de verre, une peinture microporeuse, un pare-vapeur, un film métallique ou une tôle perforée. Ces revêtements affectent leur efficacité. Seuls les films très minces (épaisseur  $< 30\text{g/m}^2$ ) ou les tôles à taux de perforation d'au moins 20% altèrent peu les performances. Pour être efficace en basses fréquences, ces matériaux doivent avoir une bonne épaisseur (50-100mm).

À défaut, l'absorption à ces fréquences peut être renforcée par des solutions complémentaires plus élaborées utilisant les effets résonateur un quart d'onde (aussi appelé effet membrane) ou résonateur de Helmholtz.

\*Le revêtement de plafond ou en faux plafond : Dans ce cas, il est fréquent qu'un vide d'air appelé plénum soit laissé entre le plafond constitué de matériau absorbant à base de laine minérale. Ce vide d'air contribue à augmenter l'absorption. Il doit être en adéquation avec les données techniques du fournisseur (en général il est de l'ordre de 200mm).

\*Les baffles suspendus verticalement : Posés de façon très dense, ils peuvent être plus efficaces que des faux plafonds acoustiques, en particulier aux basses fréquences.

\*Le revêtement mural : Le barrage intérieur est réalisé avec des panneaux métalliques perforés (ou crevés, mais ils sont alors bien moins efficaces). Une première couche d'absorbant à base de laine minérale est déroulée, suivie d'une seconde couche d'isolant de type feutre de bardage posée sous la peau extérieure ; elles sont séparées par un pare vapeur. Quelle que soit la solution retenue, il est toujours plus économique et plus efficace d'agir à la conception que de corriger a posteriori.



**CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODOLOGIE D'EVALUATION  
DU BRUIT**

## **Introduction**

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 des sons fait que leur étude n'est rendu possible qu'à travers des indicateurs psycho acoustiques associés au niveau sonore, à la hauteur et de manière globale au timbre des sons. Le présent chapitre s'articule autour de deux axes principaux et a pour but de donner le matériel requis pour l'évaluation des différents niveaux sonores d'une part ainsi que la méthodologie d'analyse de ces derniers d'autre part.

### **2-1- Techniques d'évaluation des nuisances sonores**

#### **2-1-1 Matériel d'évaluation du son**

Le calcul méthodique du bruit se fait sur la base des informations telles que :

- \* Données sur la source (localisation, dimensions, émission sonore ou puissance acoustique) ;
- \* Atténuations sur le chemin de propagation ;
- \* Données sur le milieu récepteur.

Si les données sur l'atténuation du bruit sur le chemin de propagation sont connues et relativement faciles à modéliser, les informations sur la source de bruit sont par contre moins évidentes à prendre en compte. Il ne sera fait mention dans ce qui va suivre que des instruments de mesurage les plus courants, susceptibles d'être rencontrés dans les services de médecine du travail, d'hygiène et de sécurité.

De manière générale, tout instrument de mesurage comprend essentiellement les composantes suivantes :

1. Un microphone convertissant les fluctuations de pression de l'air en un signal électrique analogique.
2. Un amplificateur-analyseur où le signal électrique est amplifié et analysé afin de déterminer certaines caractéristiques du signal original (valeur efficace, valeur maximale, spectre de fréquence...).
3. Un dispositif d'affichage qui peut être un appareil à cadran, un enregistreur graphique, un oscilloscope, etc...

Un tel système possède des caractéristiques de performances qu'il est important de connaître afin pouvoir interpréter correctement les valeurs de sortie.

Ces caractéristiques sont (Malchaire J., 1993)

a. la réponse en fréquence (bande passante) qui est la bande de fréquences dans la quelle le rapport entre les signaux d'entrée et de sortie reste constant, à une tolérance près. Idéalement, ce rapport doit être constant dans la gamme de fréquences de 20 à 20000 Hz à 1dB près.

b. la linéarité qui signifie que l'amplitude du signal de sortie est une fonction linéaire de l'amplitude du signal d'entrée.

c. la gamme dynamique qui est la gamme d'amplitudes pour laquelle le système reste linéaire. Cette gamme dynamique est limitée d'un coté par le bruit de fond et les parasites électriques du système et d'autre part par la non-linéarité des circuits électriques (distorsion) si le signal est trop grand.

On peut utiliser deux types d'appareils: le dosimètre et le sonomètre pour des mesures plus précises.

### 2-1-1-1 Les dosimètres

Le dosimètre de bruit est un appareil très utilisé dans le passé, mais qui tend à disparaître au profit des sonomètres intégrateurs. Comme son nom l'indique, il mesure une dose  $D$  définie par :

$$D = \frac{t}{t_L} \times 100 \quad [2.1]$$

Où  $t$  est la durée de travail et  $t_L$  la durée de référence selon un certain système de pondération.

Le dosimètre est un appareil de la taille d'un paquet de cigarettes, qui peut être facilement porté par la personne dont on cherche à évaluer la dose de bruit. Il comprend un microphone omnidirectionnel, un circuit électronique de détection semblable à celui du sonomètre et un étage supplémentaire d'intégration afin d'évaluer la dose. L'affichage de cette dose peut être direct sur l'appareil – ce qui est très pratique puisqu'il permet de suivre la progression de l'exposition- ou bien requérir un appareil auxiliaire – version donc moins préférable. Des études (Shackleton et Piney, 1984) ont montré que ces perturbations étaient minimales lorsque le microphone se trouvait placé à la hauteur de l'oreille. Sa position idéale est donc au bord du casque ou, à défaut, au col du sujet. Pour ce faire, il faut que le microphone puisse être isolé du dosimètre, ce qui n'est pas toujours le cas.

Certaines précautions sont à prendre en compte dans l'emploi du dosimètre. Il est bien sur nécessaire de vérifier l'état des piles à intervalle de temps régulier. Il faut également protéger le microphone des poussières : ceci peut se faire en l'introduisant dans une gaine en mousse légère qui ne perturbera pas le champ sonore. Il faut encore étalonner régulièrement le

dosimètre au moyen d'une source étalon. Certains dosimètres disposent d'un mode de fonctionnement permettant d'accélérer cet étalonnage. Enfin, le dosimètre devra être verrouillé et les contrôles inaccessibles pour le sujet.

L'électronique du dosimètre doit répondre aux mêmes exigences que les sonomètres : linéarité, gamme dynamique, pondération A, constante de temps, calcul de valeurs efficaces, comportement aux hautes températures, le niveau de seuil de l'appareil.

En résumé, les critères de sélection d'un dosimètre sont les suivants (Malchaire J., 1993) :

- microphone champ diffus d'un demi-pouce, détachable avec fil de connexion de 50 cm et système de fixation au col ou au casque du travailleur ;
- pondération A ;
- principe d'égalité d'énergie ( $q=3$ ) ;
- pas de niveau de bruit seuil ou, plus exactement, niveau de bruit de seuil le plus faible possible ;
- pas de niveau de bruit de seuil ou, plus exactement, niveau de bruit de seuil le plus faible possible ;
- affichage de la dose en mode normal et en mode accéléré, permettant l'étalonnage du dosimètre ;
- indicateur de charge de batteries.

Il existe actuellement sur le marché des appareils susceptibles d'être portés par les travailleurs et permettant d'enregistrer de multiples paramètres (dont  $N_{aeq,T}$ ,  $N_{min}$ ,  $N_{min} \dots$ ) au fil du temps. Il s'agit d'appareils plus coûteux qu'un simple dosimètre. Cependant, ce type d'appareil s'avère très utile pour déterminer l'histoire de l'exposition au bruit, rechercher les phases de travail les plus bruyantes et optimiser le choix des solutions : on les appelle les sonomètres intégrateurs.

### **2-1-2 Technologie des sonomètres**

C'est un appareil comportant un micro à larges bandes calibré capable d'analyser la fréquence et l'intensité d'un bruit. Les sonomètres permettent de mesurer et comparer des sons et des bruits par mesure globale du niveau de pression acoustique instantanée, ou par la mesure du niveau des composants du bruit ; cette dernière pouvant elle-même s'effectuer de deux manières différentes : soit en groupant les composantes par bandes plus ou moins larges : c'est l'analyse spectrale, soit en séparant les composantes par fréquences (ou par modes) : c'est l'analyse modale.

La figure suivante représente un sonomètre avec ses principales parties :



**Figure 6:** Le sonomètre (2)

Il s'agit d'un appareil portatif utilisé pour mesurer des niveaux sonores soit physique en dB, soit pondérés (dB(A), dB(B) ou dB(C)) qui représentent des niveaux réellement perçus par l'individu. Il est compris (Krauss G. et al, 2009/2010) :

a) Le microphone

Sensible et fidèle il convertit les variations de pression de l'air produites par un bruit en un signal électrique proportionnel. Il existe trois types de microphones :

- \* piézoélectriques, utilisés pour les sonomètres courants ;
- \* à condensateur, utilisés pour les sonomètres de précision ;
- \* dynamiques, utilisés essentiellement en radiodiffusion.

L'efficacité d'un microphone dépend de sa sensibilité qui est définie comme étant:

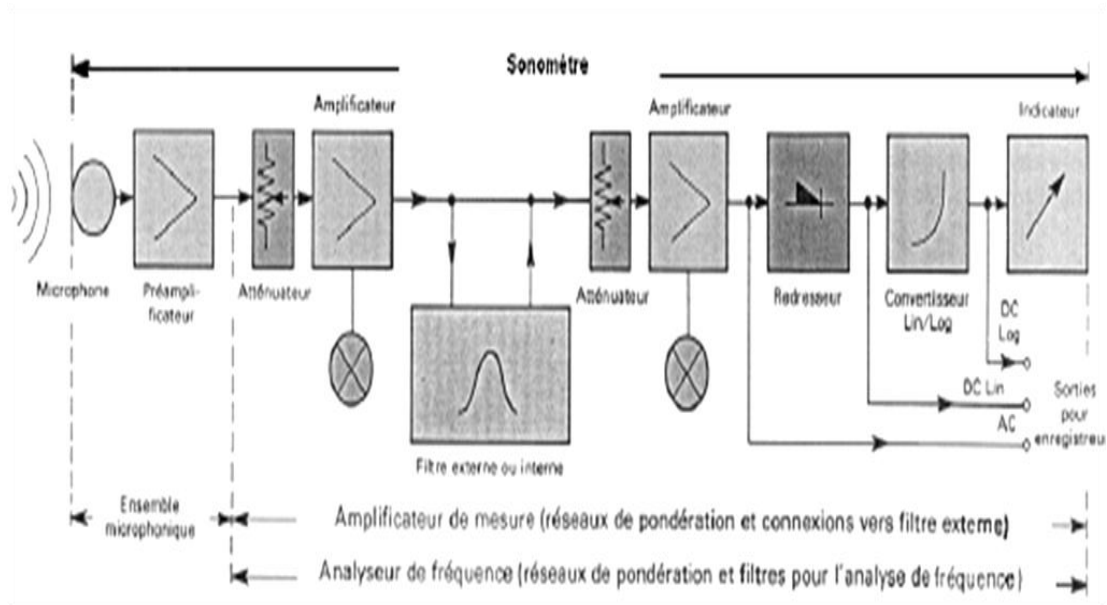
\*soit l'amplitude (en mV) du signal de sortie (en circuit ouvert) pour une pression sonore incidente de 1 Pascal (soit 94 dB) ;

\*soit une valeur en décibels définie en adoptant comme référence une tension  $V_0 = 1$  volt.

b) Le préamplificateur (amplificateur-détecteur)

Il est monté près du microphone qui convertit la haute impédance de ce dernier en une basse impédance de façon à pouvoir utiliser de longs câbles pour appliquer le signal à l'entrée de l'amplificateur sans altérer la sensibilité de l'ensemble de mesure.

-Après amplification et pondération ou filtrage par un amplificateur à gain variable, le signal est appliqué à un redresseur spécial. Celui-ci comprend des constantes de temps bien définies pour l'intégration des fluctuations du niveau alternatif afin d'obtenir un signal continu proportionnel à son niveau efficace qui est ensuite appliqué à l'indicateur pour donner une lecture directe de ce dernier. Le schéma global de fonctionnement d'un sonomètre peut se présenter comme :



**Figure 7:** Schéma fonctionnel du sonomètre (6)

Les sonomètres existent en deux principales familles : les conventionnels qui fournissent des valeurs instantanés et les intégrateurs plus performants qui donnent des niveaux intégrés équivalents après mesure. Quelques sonomètres parmi les plus usités :



**Figure 8:** (A) Sonomètre intégrateur ; (B) Sonomètre wifi ; (C) Sonomètre analyseur ; (D) Sonomètre à deux gammes de mesure

### 2-1-2-1 Sonomètre intégrateur/moyen

Très simples, ces instruments conviennent aux mesures ponctuelles ou à l'évaluation basique de l'ambiance sonore d'un environnement. « Si l'on veut étudier l'impact

sonore d'une centrifugeuse, d'une pompe à chaleur ou d'un moteur diesel qui tourne toujours au même rythme, un sonomètre conventionnel pourra faire l'affaire. Mais dès que le bruit est fluctuant, ou que l'on veut en étudier l'évolution finement sur de longues périodes de temps, il faudra utiliser un sonomètre intégrateur » (Lafont Tranche A., 2010). En effet les sonomètres intégrateurs ne s'arrêtent pas à de simples mesures instantanées, ils sont capables d'afficher un niveau de bruit équivalent noté  $L_{eq}$ . Il s'agit du niveau correspondant à l'énergie du bruit perçu sur une période donnée. Sauf exception, les sonomètres intégrateurs sont aussi moyenneur : ils peuvent alors moyenner les  $L_{xeq}$ , sur une durée choisie par l'utilisateur. Ces valeurs  $L_{xeq}$ , et en particulier les  $L_{Aeq}$ , sont très utiles dans bien des situations. Ces valeurs donnent une bonne idée d'un niveau de bruit continu, tels que le bruit du trafic ou le ronronnement des machines industrielles. En complément du niveau  $L_{XYmax}$ , elles conduisent aussi à mieux appréhender les niveaux sonores dans les environnements où certains sons se démarquent du bruit ambiant, comme les passages des avions dans les environs d'un aéroport ou la mise en route répétée d'une machine dans une usine. Un sonomètre intégrateur/moyenneur doit être capable de mesurer tous ces paramètres. Certains sonomètres proposent aussi de calculer le niveau d'exposition au bruit, noté  $L_{AE}$  ou l'indice d'exposition quotidienne noté  $L_{ex,d}$  où  $d$  est la durée d'une journée de travail.

### **2-1-2-2 Sonomètre analyseur ou conventionnel**

Au sommet de la famille des sonomètres intégrateurs, on trouve une sous-famille particulièrement sophistiquée : les analyseurs. Ces instruments ne se limitent pas à une mesure globale du bruit comme leurs homologues ; ils le décomposent 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) (Delprat N., Esudie B et al, 1992): le nombre de bandes détermine alors la finesse de l'analyse. Ces fonctions ont de multiples applications. Dans l'industrie ou dans le domaine de la santé au travail, ils repèrent les fréquences les plus gênantes de l'environnement extérieur ou intérieur, afin de choisir le matériau absorbant ou les méthodes de protection les plus adaptées. Ces FFT peuvent se faire en temps réel ou en différé à condition de déterminer au préalable ce qu'on cherche à identifier.

L'annexe 1 présente un ensemble de sonomètres avec des caractéristiques fonction du fabricant (représentant ou distributeur) du modèle, du type et de la conformité à la norme, de la plage de mesure (dynamique), des grandeurs mesurées, de la capacité de stockage, de l'autonomie, de la sortie vers le PC et de ses applications.

Pour ce qui est de notre étude le choix a été fait grâce aux fiches techniques des sonomètres en concordance avec les normes internationales en la matière et celui utilisé est le sonomètre SMART SENSOR version AR814 respectant les normes IEC 651 TYPE2 et ANSI S1.4 et de classe 2 (voir annexe 1 tableau 2) ; c'est un appareil de mesure robuste et précis destiné à l'utilisation en intérieur et en extérieur.



**Figure 9:** Sonomètre SMART SENSOR AR 814

Avant d'utiliser le sonomètre un certain nombre d'opérations préalables sont nécessaires (MALCHAIRE J., 1993) :

1. Etalonnage : le comportement du sonomètre est susceptible de varier en fonction de la tension électrique d'alimentation, de la température, etc... La première opération est donc de vérifier l'étalonnage de l'appareil en transmettant au microphone un bruit d'intensité connue créé par une source étalon et en ramenant la lecture du sonomètre à la valeur correspondante. Cet étalonnage doit-être effectué avant toute utilisation de l'appareil.

2. Choix de l'amortissement : Pour un bruit continu (moteur électrique, transformateur, ventilateur, turbine, ...) et pour un bruit formé d'impulsions assez rapprochées pour donner l'impression d'un bruit continu (plus de 200/min), la lecture est la même quel que soit l'amortissement utilisé. En général, cependant, les bruits sont intermittents et le niveau sonore varie constamment dans un intervalle qui peut être très large. Les normes réglementaires recommandent le plus souvent d'utiliser l'amortissement « lent ». Si la gamme de fluctuations est faible, on a recours à l'amortissement « rapide ».



Si le niveau sonore varie dans un intervalle très large et de façon continue (cas du bruit de trafic qui peut varier dans un intervalle de 25 dB), il est impossible d'obtenir un mesurage significatif à partir du sonomètre. Il faut dès lors recourir à d'autres techniques, telles que l'analyse statistique du bruit.

3. Positionnement du sonomètre : La présence du microphone, du sonomètre et, a fortiori, de l'observateur sont susceptibles de perturber le champ sonore aux fréquences élevées. Cette perturbation est minime si le champ est diffus et le spectre sonore continu. La forme du sonomètre a souvent été choisie de façon à minimiser ces erreurs et on peut les négliger. Par contre, si le champ est très directionnel et si le son est composé de quelques sons purs seulement, l'erreur pouvant résulter des réflexions sur l'observateur peut atteindre 3 à 5 dB dans la gamme de fréquences de 200 Hz à 4kHz, avec un maximum aux environs de 400 Hz. Il convient donc de tenir le sonomètre le plus loin possible à l'avant du corps. En modifiant la position du corps par rapport au sonomètre, on peut se rendre compte si des précautions supplémentaires sont nécessaires. Si oui, il faut éloigner le microphone de l'observateur en utilisant un câble souple d'extension entre le microphone et le sonomètre ou en faisant usage d'un appareil indicateur séparé, connecté à la sortie auxiliaire du sonomètre. Si l'on désire mesurer le champ sonore rayonné directement par une source, on doit veiller à situer le microphone à l'écart de toute surface possible de réflexion et de préférence dans une chambre sourde sans onde stationnaire. Le microphone doit être du type champ libre  $0^0$  et dirigé vers la source.

4. Mesurages à l'extérieur : Lorsque des mesurages sont réalisés à l'extérieur, les mouvements d'air peuvent perturber directement le mesurage en créant sur la grille du microphone un bruit de turbulence parasite. La solution consiste à prévenir cette turbulence en plaçant sur le microphone une boule de polyester à cellules ouvertes, très poreuse. Cet écran n'atténue pas (ou de façon négligeable) les ondes sonores, mais fait en sorte que le bruit généré par le vent soit de 15 à 25 dB inférieur à ce qu'il serait sans l'écran. Le même écran protège le microphone contre les poussières et devrait donc être utilisé pour tous les mesurages en milieu industriel.

## **2-2 Méthodologie d'évaluation du bruit**

Un bruit est défini comme étant une onde résultant de la vibration de l'air à la suite de pressions et dépressions. Le son à partir duquel on obtient le bruit peut être produit par un ébranlement d'un milieu élastique qui se transmet au milieu environnant (air) et qui arrive sur un récepteur (tympan, micro). Cet ébranlement se transmet sous forme de vibrations

longitudinales allant de la source vers le récepteur (ondes acoustiques). Physiquement, il s'agit d'un flux d'énergie à travers l'unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation de la vibration sonore et du point de vue physiologique le son dépend du jugement de celui qui le reçoit. La sensation sonore qui est plus difficile à cerner varie comme le logarithme de l'excitation.

L'évaluation du bruit ou plus précisément du niveau sonore global  $L_p$  se fera selon deux approches :

\*une approche analytique bâtie sur les équations des niveaux de puissance acoustique des différentes sources de bruit dont la somme à laquelle nous allons soustraire les différentes atténuations répertoriées le long du trajet des ondes sonores pour enfin obtenir le niveau de pression acoustique équivalent en tout point. Cette première étape est tributaire d'une acquisition préalable des données avec le sonomètre. Pour cela avec notre sonomètre de classe 2 nous allons effectuer des relevés en plusieurs points du local et en dehors de celui-ci avec les filtres A et C, puisque la plupart des sons à mesurer ont un niveau fluctuant, les valeurs mesurées vont dépendre de la constante de temps utilisée ainsi : S=Slow=Lent= constante de temps de 1 seconde (les fluctuations sont fortement moyennées) ; F=Fast = Rapide= constante de temps de 125ms et I=Impulse= impulsif=constante de temps de 35ms à la montée et 1,5s à la descente

\*une approche numérique basée sur la mise sur pied d'un code de calcul MATLAB afin d'évaluer les niveaux de pression, les atténuations et le niveau de pression acoustique global numériquement. Les valeurs numériques utilisées pour faire tourner le programme seront celles obtenues avec le sonomètre ainsi que celles issues des caractéristiques des moteurs.

On définit le niveau de puissance acoustique ( $L_w$ ) analogue au niveau de pression acoustique ( $L_p$ ) comme étant (Seutche J.C., 2013) :

$$L_w = 10 \log \left( \frac{I}{I_o} \right) \text{ où } L_w = 10 \log \left( \frac{P}{P_o} \right) \quad [2.2]$$

Avec  $L_w$  le niveau de puissance acoustique en dB

On définit aussi  $I$  comme étant le flux d'énergie par unité de temps et à travers l'unité de surface telle que :  $I = \frac{P}{S}$  [2.3]

Il faut noter que la pression acoustique est prise au niveau du milieu récepteur (point de fixation du sonomètre) et la puissance acoustique au niveau de la source émettrice. Ces deux grandeurs varient en fonction de plusieurs facteurs tels que : le temps de réverbération

(lorsque la propagation a lieu en espace clos), la correction, le milieu récepteur et plusieurs autres facteurs. Le bruit produit par le moteur étant notre principal centre d'intérêt nous présentons ci-dessous le processus global de génération du bruit dans les machines électriques.

En général, le bruit émis par une machine électrique provient de deux processus principaux (Amine-Ait Hammouda, 2005) :

\* Le fonctionnement de la machine provoque des vibrations de certaines pièces solides ; ces pièces transmettent plus ou moins ces vibrations à l'air avec lequel elles sont en contact. La puissance acoustique transmise est alors proportionnelle à l'aire de la surface vibrante.

\* Dans le cas d'un ventilateur, le fonctionnement provoque des fluctuations de pression. Ces fluctuations se propageant en partie directement dans l'atmosphère si le ventilateur débite de l'air en circuit ouvert, en partie en provoquant la vibration des parois du ventilateur et des conduites, lesquelles transmettent plus ou moins ces vibrations à l'air extérieur.

Les ondes émises par la machine peuvent être réfléchies par divers obstacles, et notamment les parois de la salle. La variation de pression en un point est alors le résultat de la superposition des variations de pression dues à l'onde directe et aux diverses ondes réfléchies possibles. Il peut alors y avoir en certains points et à des fréquences données renforcement des sons et en d'autres points atténuation du son global : ceci est le phénomène des ondes stationnaires qui donnent lieu à des résonances acoustiques. Les causes qui sont à l'origine des vibrations sources du bruit sont de trois principaux ordres :

-aérodynamique (ventilateurs....)

-magnétique (effet de denture....)

-mécanique (roulement, engrenages, balourd mécanique...)

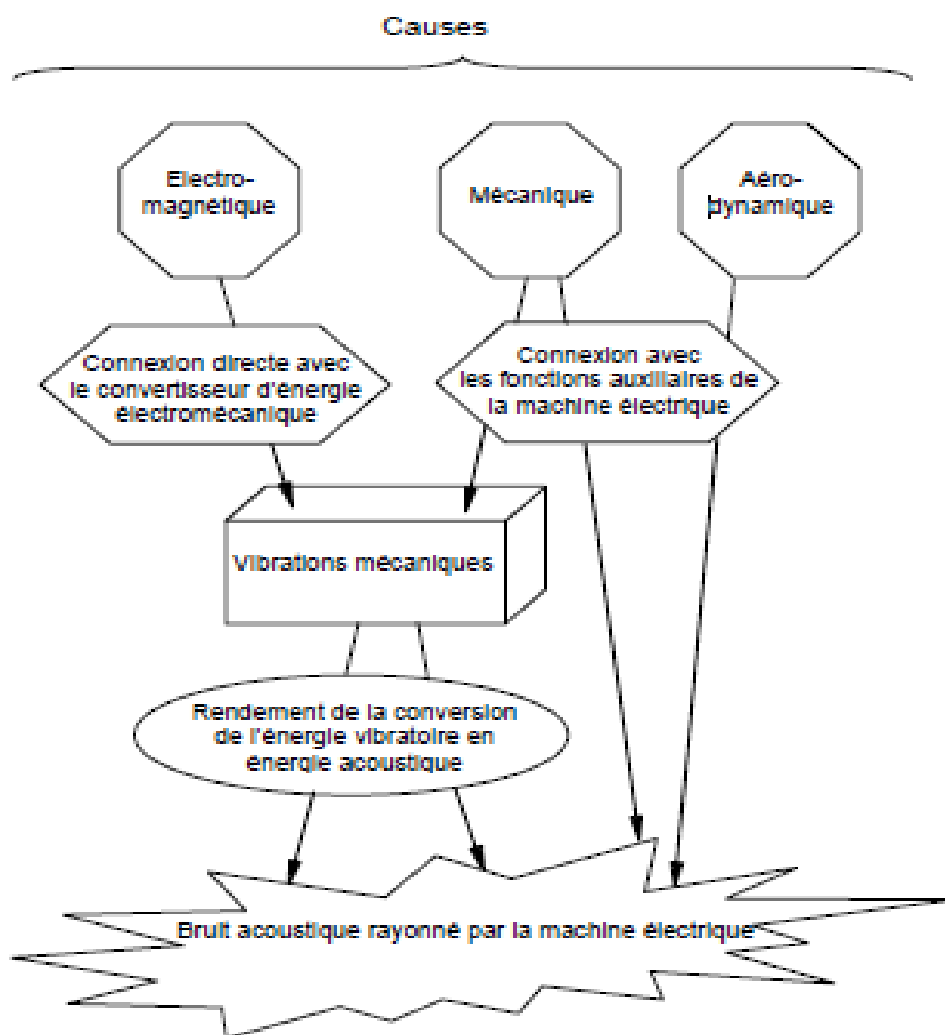
Les bruits d'origine aérodynamique dus au ventilateur et, plus généralement, à tout ce qui a trait au mouvement du fluide de refroidissement, représentent pour la plupart des moteurs plus de la moitié du bruit global surtout dans les vitesses élevées.

Le bruit magnétique du aux vibrations périodiques de l'induction dans les diverses parties de la machine constituent l'essentiel du reste du bruit global. La caractéristique principale de ce bruit est qu'il disparaît dès l'instant où la machine cesse d'être alimentée. Les principaux points, ayant une conséquence directe sur la génération et la propagation du bruit magnétique sont les suivant :

-construction de la machine : répartition du bobinage statorique rotorique conduisant à la distribution non sinusoïdale du champ dans l'entrefer,

- effet de la denture stator et rotor ayant pour conséquence l'apparition d'harmoniques d'encoches,
- causes extérieures à la machine : alimentation et la charge de la machine...
- défaut de construction : présence d'un entrefer excentrique...
- niveau de saturation des dents

En l'absence de défauts particuliers dus aux roulements, au bon équilibrage du rotor de la machine et à la bonne réalisation de la transmission, le bruit d'origine mécanique représente normalement une faible partie du bruit global. La figure ci-dessous illustre les relations entre le bruit et les vibrations des machines électriques.



**Figure 10** : Relations entre le bruit et les vibrations des machines électriques

(Amine AIT-H., 2005)

Les sources de bruit sont extrêmement nombreuses et variées au sein de la salle machines, nous nous intéresserons aux plus gros émetteurs de bruit intervenant pendant la combustion du combustible qui sont les moteurs diesel, les génératrices et les ventilateurs de

refroidissement de la salle. L'évaluation du niveau de puissance à la source sonore émettrice se fera en suivant la formule empirique :

### 2.2.1 Moteurs et génératrices

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

-Mécaniques : déséquilibre des parties mobiles et de la machine,

-Electriques : phénomènes de magnétostriction + déformation causées par l'attraction des poles,

-Aérodynamiques : ventilateur associé au moteur plus les turbulences dans les circuits de refroidissement. En général, les bruits sont à large spectre et les fréquences pures liées aux circuits d'air et au ventilateur varient entre 500 et 4000Hz.

On définit le niveau de puissance acoustique  $L_w$  pour ce type d'équipement en fonction de la vitesse et de la taille du moteur (Seutche J.C., 2013) :

$$L_w = 20 \log P + 15 \log N + 13 \quad [2.4]$$

Avec P : Puissance nominale du moteur en CV

N : la vitesse de rotation en tours par minutes (tr/min)

Comparativement à d'autres modèles le moteur électrique est relativement silencieux (souvent < 90dB(A)) mais la vitesse de rotation élevée exige un réducteur qui devient ipso facto une source de bruit secondaire environnant 110 à 115dB à cause des engrenages.

### 2.2.2 Les ventilateurs

C'est l'une des sources les plus bruyantes en industrie. Le bruit discontinu du aux pales et aux aubes est parfois appelé fondamental du ventilateur à une fréquence :

$$f = \frac{N \cdot R}{60} \quad [2.5]$$

Avec : f= fréquence 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

Par ailleurs, le bruit aérodynamique correspond aux fréquences fondamentales harmoniques et le bruit non aérodynamique correspond aux vibrations de l'ensemble moteur et ventilateur. Les fabricants fournissent des tableaux spécifiques pour les valeurs par bandes d'octave des niveaux de puissance en décibels des ventilateurs. Dans ce cas, on considère  $L_w$  comme le bruit correspondant à l'aspiration (ou au refoulement). Ces valeurs de niveau de

puissance sont un départ pour un calcul acoustique de réseau dont l'étude complète vise le calcul de  $L_p$  donné dans un local ou dans les environs du site étudié. Le niveau de puissance acoustique des ventilateurs suivant une bande de fréquence précise (500Hz-4000Hz) est donné selon l'équation (Seutche J.C., 2013) :

$$L_w = 10 \log D + 20 \log P_s + K \quad [2.6]$$

Avec : D= débit du ventilateur en m<sup>3</sup>/h en dB

$P_s$ =pression statique en cm de colonne d'air,

K=constante fonction du type de ventilateur (Seutche J.C., 2013)

$L_w$ = niveau de puissance en dB

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 grand 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 identique à un passage périodique des pales devant les pièces fixes s'opposant à l'écoulement du fluide. Ici on retrouve les bruits dus à l'écoulement de fluide. Le bruit peut être généré en de nombreux endroits d'un système de canalisation et transmis efficacement par l'intermédiaire du fluide véhiculé ou dans des conduites. Ce type de bruit est essentiellement fonction du régime d'écoulement du fluide, caractérisé par le nombre de Reynolds (Seutche J.C., 2013).

### 2.2.3 Les pompes

Ce sont généralement les sources hydrauliques mécaniques (cavitation, fluctuation de pression dans le fluide, impact 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 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 (Seutche J.C., 2013) :

$$f = \frac{N \cdot n_c}{60} \quad [2.7]$$

Avec N=vitesse de rotation en tours par minute (tr/min)

$n_c$  = nombre de cycles de pression de la chambre par révolution

$f$  = fréquence en Hertz (Hz)

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 (Seutche J.C., 2013) :

$$L_W = 10 \log P + K_P \quad [2.8]$$

Avec P= puissance en CV,

$K_P$ = constante fonction du type de pompe (tableau2 annexe 2)

$L_W$ = niveau de puissance sonore en dB

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

#### 2.2.4 Les compresseurs

Source principale de bruit d'échappement, il s'agit de 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. La puissance acoustique totale des compresseurs (de 500Hz à 4000Hz) peut être estimée par l'équation (Seutche J.C., 2013) :

$$L_W = 10 \log P + 86 \quad [2.9]$$

Avec  $L_W$  (dB) ; P= puissance en CV

L'équation de base du niveau de pression acoustique continu équivalent par bande d'octave, par vent portant au niveau d'un récepteur calculé en bande d'octave de 63kHz à 8kHz pour chaque source ponctuelle (Seutche J.C., 2013) :

$$L_{A_{eq,T}} = L_W + K - A \quad [2.10]$$

Avec  $L_W$ = niveau de puissance par bande d'octave de la source ponctuelle en dB

$K$ = correction de directivité considérée comme nulle pour une source omnidirectionnelle en espace libre en dB

$A$ = atténuation par bande d'octave de la source ponctuelle au récepteur durant la propagation en dB.

#### 2.2.5 Les types d'atténuations

De manière générale les facteurs qui interviennent lors de la propagation du son dans un milieu sont :

-Forme géométrique de la source : elle peut-être cohérente ou incohérente

-les conditions météorologiques : turbulence atmosphérique

-le type de terrain et contour : absorption du sol, réflexion

-l'absorption atmosphérique du son

-les obstacles : maisons, barrières, végétation

L'absorption ou atténuation totale par bande d'octave est donc définie de la manière suivante (Seutche J.C., 2013) :

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} + A_{écran} + A_{divers} \quad [2.11]$$

Avec :  $A_{div}$  = atténuation due à la divergence géométrique en dB

$A_{sol}$  = atténuation due à l'effet de sol en dB

$A_{atm}$  = atténuation due à l'absorption atmosphérique en dB

$A_{écran}$  = atténuation due aux obstacles ou écran en dB

$A_{divers}$  = atténuation due à d'autres effets (végétation,...) en dB

Pour les bruits à caractère impulsif, c'es-à-dire des bruits dont le niveau varie très rapidement dans le temps, il est préférable d'en calculer l'énergie moyenne sur un temps d'observation T donné. Ainsi le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A en décibel par vent portant est la somme des différentes contributions pour les différentes sources et pour les différentes bandes d'octave (Seutche J.C., 2013) :

$$L_{A_{eq},T} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^m T_k 10^{0,1[L_{A_{eq},j} + K_j]} \right\} \quad [2.12]$$

Avec i= évènement isolé pour la i<sup>ème</sup> mesure, j= j<sup>ième</sup> source fonction du type de bruit, k= k<sup>ième</sup> intervalle de temps T<sub>k</sub>, pendant lequel on ne peut pas distinguer les évènements isolés d'une période spécifique T celle de notre étude considèrera une valeur du temps moyen de fonctionnement en soirée T<sub>k</sub> par année.

Le terme correctif K<sub>j</sub> est défini par le tableau 3 annexe 2.

A long terme L<sub>T</sub>, le niveau moyen de pression acoustique pondéré A est (Seutche, 2013) :

$$L_{A_{eq},T} (L_T) = L_{A_{eq},T} - C_{météo} \quad [2.13]$$

Avec C<sub>météo</sub> : correction météorologique en dB



Pour des cas particuliers où on considère de manière composite par alternance de jours et de nuits, on peut évaluer les niveaux sonores journaliers composites (jour/nuite), y compris le terme correctif par la relation (Seutche J.C., 2013):

$$L_{A_{eq,T}} = 10 \log \left\{ \frac{d}{24} 10^{0,1[L_{A_{eq,d}} + K_d]} \right\} \quad [2.14]$$

Pour les différentes formes d'atténuation nous ne considérons que des cas pour lesquels nous possédons des informations.

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

### 2.2.5.1 Divergence géométrique

C'est le premier phénomène intervenant dans la propagation acoustique et il est du 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)

$$A_{div} = \left[ 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] \quad [2.15]$$

Avec :

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

d<sub>0</sub> = 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.

### 2.2.5.2 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) :

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad [2.16]$$

$\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  (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) :

$$\alpha = 869 * f^2 \left\{ 1,84 * 10^{-11} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \left[ 0,01275 \frac{e^{-2239,1/T}}{F_{r,O} + f^2 / F_{r,O}} + 0,1068 \frac{e^{-3352/T}}{F_{r,O} + f^2 / F_{r,N}} \right] \right\} \quad [2.17]$$

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 obtenues à partir des relevés du lieu considéré. Avec :

$$F_{r,O} = 24 + 4,04 * 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \quad [2.18]$$

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

$$F_{r,N} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \left( 9 + 280 h e^{\left\{ -4,17 \left[ \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\}} \right) \quad [2.19]$$

Fréquence de relaxation de l'azote en Hz

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

Le tableau 4 annexe 2 donne quelques valeurs du coefficient d'atténuation atmosphérique par bande d'octave du bruit en fonction des conditions expérimentales.

### 2.2.5.3 L'effet de 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

$$\text{relation (ISO, 1996): } A_{sol} = A_s + A_r + A_m \quad [2.20]$$

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

Les différentes composantes se calculent en se servant du tableau5 Annexe2.

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

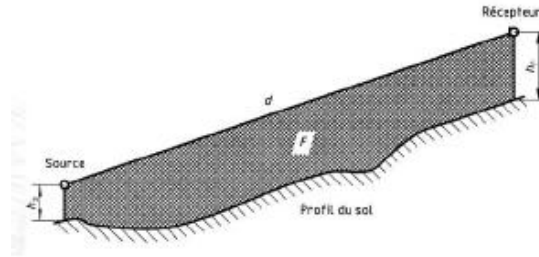
-le son n'est pas pur

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

$$A_{sol} = 4,8 - \left( \frac{2h_m}{d} \right) \left[ 17 + \left( \frac{300}{d} \right) \right] \geq 0 \quad [2.21]$$

$$\text{Avec : } h_m = \frac{F}{d} \quad \text{en m} \quad [2.22]$$

où F est l'aire de la partie hachurée ( $m^2$ ) et d=distance source-récepteur (m)



**Figure 11:** Profil de la surface (ISO, 1996)

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 [2.21], la correction de directivité  $K$  de l'équation [2.10] devra inclure un facteur supplémentaire  $K_\omega$  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 :

$$K_\omega = 10 \log \left\{ 1 + \left[ d^2 + (h_s - h_r)^2 \right] / \left[ d^2 + (h_s + h_r)^2 \right] \right\} dB \quad [2.23]$$

Avec :  $h_s$  hauteur de la source (m) ;  $h_r$  celle du récepteur (m) ;  $d$  = distance source-récepteur

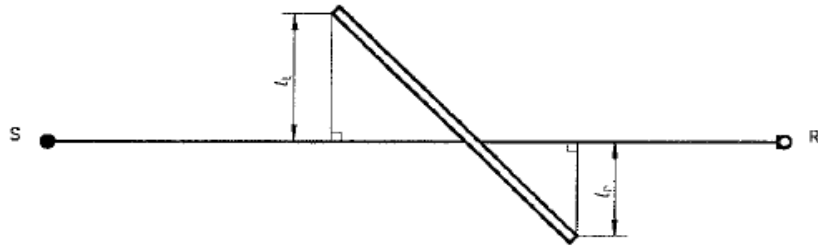
#### 2.2.5.4 Atténuation due aux obstacles ( $A_{écran}$ )

Un objet est considéré comme écran s'il remplit les conditions suivantes (ISO, 1996) :

-masse surfacique supérieure à  $10 \text{Kg/m}^2$ , salle de machine aux murs en aluminium, celle étudiée est de  $540 \text{Kg/m}^2$

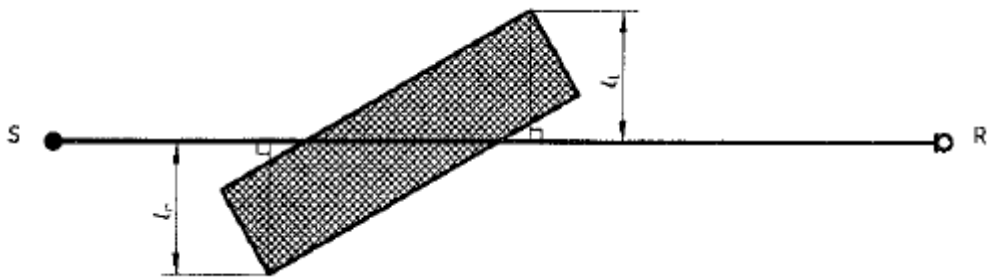
-surface fermée (pas de trous, fissures...)

-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 :



$$(l_i + l_r) > \lambda$$

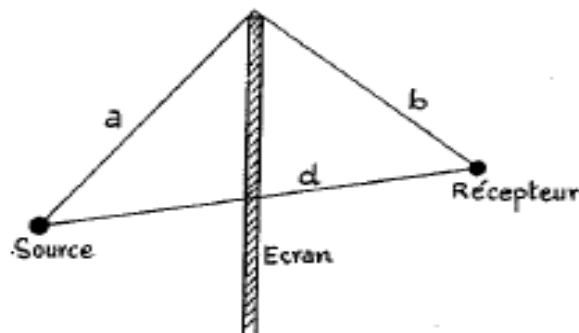
[2.24]



**Figure 12:** 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 13:** Paramètre géométrique d'un écran

L'atténuation de l'écran dans ce cas est définie par (LAMANSUCA J.S., 2009) :

$$A_{\text{écran}} = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \quad (\text{dB}) \quad \text{pour } N \geq -0,2 \quad [2.25]$$

$$\text{Avec } N = \pm \frac{2}{\lambda} \delta \quad [2.26]$$

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.  $\lambda$  est la longueur d'onde émise par la source en mètres (m).

$$\delta = (a + b - d) \quad [2.27]$$

$\delta$  = Allongement de parcours en mètres (m)

La détermination de  $A_{\text{écran}}$  tient compte d'autres effets tels que :

### 2.2.5.5 Effet d'écran par diffraction

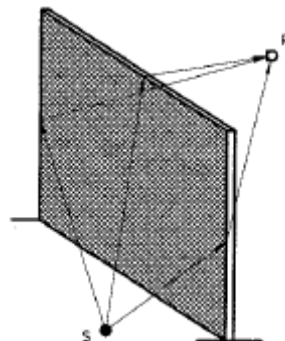
L'effet de diffraction n'est pas négligeable, il doit se calculer par :

$$\text{En haut de l'écran : } A_{\text{écran}} = D_z - A_{\text{sol}} > 0 \quad [2.28]$$

$$\text{Sur les bords de l'écran : } A_{\text{écran}} = D_z > 0 \quad [2.29]$$

$D_z$  = atténuation de l'écran par bande d'octave et définie par [2.30]

$A_{\text{sol}}$  = atténuation due au sol en l'absence de l'écran (c-à-d quand on enlève l'écran)



**Figure 14:** Effet d'écran par diffraction (ISO, 1996)

L'atténuation due à l'écran en décibels (dans le cas d'un seul trajet sonore significatif) est donné par (Seutche J.C., 2013) :

$$D_z = 10 \log \left[ 3 + (C_2 / \lambda) C_3 z K_{\text{météo}} \right] \quad [2.30]$$

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 :

$$C_3 = \left[ 1 + (5\lambda / e)^2 \right] / \left[ (1/3) + (5\lambda / e)^2 \right] \quad [2.31]$$

$\lambda$  = 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

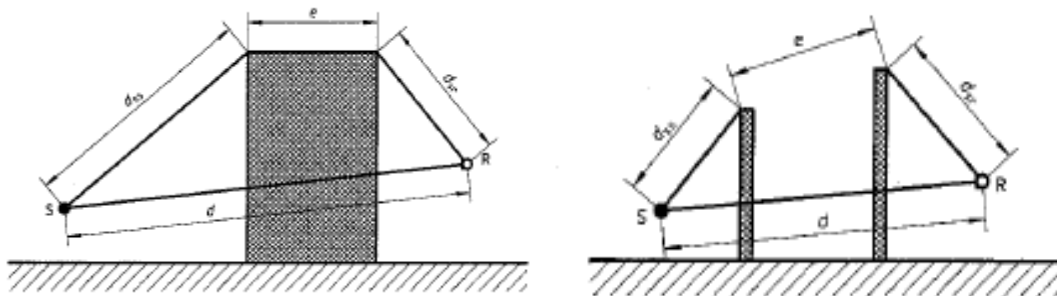
$$z = \left[ (d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2 \right]^{1/2} - d \quad z = \left[ (d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2 \right]^{1/2} - d \quad [2.32]$$

$a$  = 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) :



a) Simple diffraction

b) Double diffraction

**Figure 15:** Diffraction par simple et double écran (Seutche, 2013)

Le facteur de correction  $K_{météo}$  qui tient compte des conditions météorologiques dans l'équation [2.30] s'exprime par la relation :

Pour  $Z > 0$

$$K_{météo} = \exp \left[ - \left( \sqrt{2000} \right) \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}} \right]$$

Pour  $Z < 0$   $K_{météo} = 1$  [2.33]

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.

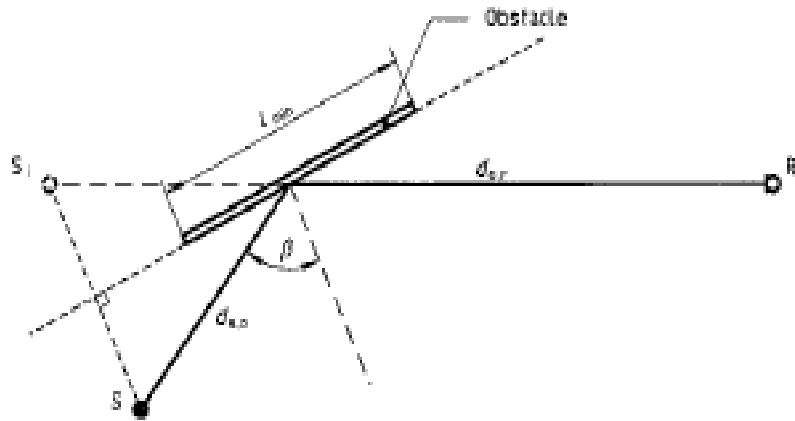
### 2.2.5.6 Atténuation par réflexions

Ce type d'atténuation est défini pour les réflexions remplissant les conditions :

- Une réflexion spéculaire peut-être construite comme sur la figure 12.
- 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) :

$$\frac{1}{\lambda} > \left[ \frac{2}{(l_{\min} \cos \beta)^2} \right] \left[ \frac{d_{s,o} d_{o,r}}{d_{s,o} + d_{o,r}} \right] \quad [2.34]$$





**Figure 16:** Surface de réflexion d'un obstacle (5)

$\lambda$  = 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

$\beta$  = 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) :

$$L_{w,image} = L_w + 10\lg(\rho) + D_{ir} \quad [2.35]$$

Avec  $\rho$  : coefficient de réflexion du son sur la surface de l'obstacle ( $>0,2$ ). Les valeurs de ce coefficient sont présentées dans le tableau 6 annexe 2.

$D_{ir}$  = Indice de directivité de la source en direction de l'image récepteur

### 2.2.5.7 Correction météorologique

Elle sera faite en s'appuyant sur la base de deux considérations ci-dessus élaborées à savoir :

-considération par vent portant :  $L_{f,T}(DW) = L_w + D_c - A \quad [2.36]$

-considération sur une année :  $L_{A,T}(LT) = L_{A,T}(DW) - C_{météo} \quad [2.37]$

L'expression de  $C_{météo}$  ci-dessus est fonction de la source et de celle du récepteur et on a :

$$\text{Si } d_p \leq 10(h_s + h_r), \text{ alors } C_{\text{météo}} = C_0 \left[ 1 - 10 \frac{(h_s + h_r)}{d_p} \right] \quad [2.38]$$

$$\text{Si } d_p > 10(h_s + h_r), \text{ alors } d_p = d_1 + d_2 \quad [2.39]$$

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  $C_0 = 5\text{dB}$ .

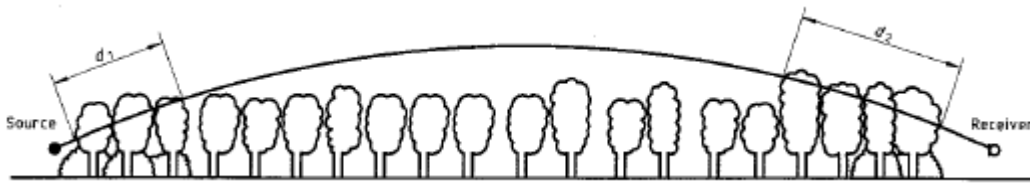
Dans notre étude, on considère que l'ensemble des sources sont concentrées en un point central à une hauteur nulle ainsi que le récepteur. On en déduit donc :  $C_{\text{météo}} = 3\text{dB}$

### 2.2.5.8 Autres types d'atténuations ( $A_{\text{divers}}$ )

Le calcul de ce terme prend en compte les contributions de les tous autres effets ne pouvant être obtenus de manière classique tels que : la végétation (foret, ...), l'environnement (site industriel,...), les maisons, les immeubles...

#### a) Atténuation due à la végétation

La végétation a deux types d'effet sur la propagation du son en foret : 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 17:** Distance de propagation  $d_f$  à travers la végétation (5)

La distance de propagation  $d_f$  en mètres à travers la végétation est donnée par :

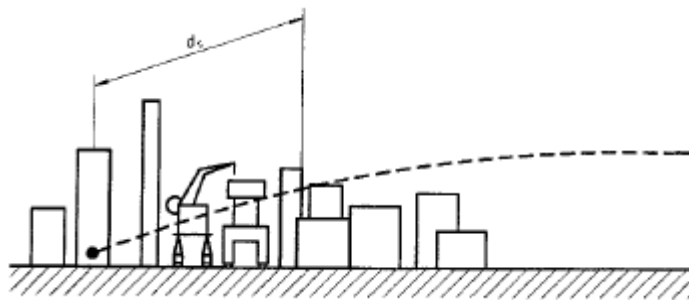
$$d_f = d_1 + d_2 \quad [2.40]$$

Pour déterminer  $d_1$  et  $d_2$  on considère un trajet courbé dont le rayon est supposé égal à 5Km.

Le tableau 7 annexe 2 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 8 annexe 2 donne l'atténuation en fonction de la distance du site.



**Figure 18:** Atténuation en fonction de la distance du site industriel (5)

#### **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 :

$$A_{habitation} = 0,1Bd_b - 10 \log \left( 1 - \frac{P}{100} \right) \quad \text{en dB} \quad [2.41]$$

Avec B= densité des habitations le long de ce trajet

$d_b$  =longueur du trajet acoustique à travers la région édiflée de maisons.

$$trajet = \frac{S_{maison}}{S_{totale}} \quad [2.42]$$

$P$  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 vue 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.

### 2-3-Méthodologie d'analyse générale

Nous ressortons et analysons toutes les situations d'impact positif ou négatif identifié. Ces situations seront classées en fonction du type dans lequel ils agissent et le degré de dangerosité ou d'importance. L'évaluation en vue du classement d'un impact dans une catégorie d'importance donnée peut se faire sur la base des critères suivants :

- le degré de perturbation ou l'intensité du facteur générateur de l'impact ;
- la portée spatiale ou temporelle du facteur (effets immédiats, prévisibles ou imprévisibles) ;
- la probabilité pour que l'impact identifié se produise ;
- la sensibilité de la composante environnementale affectée par le facteur considéré ;
- les effets induits du facteur de l'opération générateur à savoir : effet direct ou indirect, exogène ou endogène, à court ou à long terme, et enfin réversible ou irréversible ;

-les risques encourus par les populations de la zone d'influence immédiate du site de l'unité.  
Le niveau de certitude ou d'incertitude dans l'intensité de l'impact qui relève de l'expérience de l'expert dans le domaine.

L'évaluation de l'importance de l'impact repose sur une hiérarchisation de la qualité fondée sur la portée croisée de l'intensité de la source, de l'impact identifié, la sensibilité environnementale de la cible et son étendue. L'intensité de la source (degré de perturbation du milieu en fonction de la sensibilité ou de la vulnérabilité de la composante impactée) peut-être hiérarchisée sur la base des critères ci-après :

- Qualité de l'activité : faible, modérée, importante
- Nature des émissions : toxicité ou non, biodégradabilité, persistance
- Fréquence d'occurrence : ponctuelle, occasionnelle, continue
- Existence d'une réglementation : valeur limite ou autorisation

Les effets permanents sont dus aux effets fonctionnels de l'activité, qui se manifestent tout au long de l'existence de la cause et éventuellement se prolongent après extinction de la cause.

Les effets temporaires sont des effets limités dans le temps, soit ils disparaissent immédiatement après cessation de la cause, soit que leur intensité s'atténue progressivement jusqu'à disparaître. Leur caractère temporaire n'empêche pas qu'ils peuvent avoir une ampleur importante, nécessitant alors des mesures de réduction appropriées.

Les impacts réversibles disparaissent après application des mesures tandis que les impacts irréversibles persistent après avoir été plus ou moins réduits en fonction des moyens propres à la limitation des conséquences. La dimension spatiale d'un impact est caractérisée par la notion d'étendue, celle-ci pouvant être :

- ponctuelle (limitée au site d'opération)
- locale (au-delà du site d'opération à près de 40Km)
- régionale (au-delà des limites locales).

## **Conclusion**

Les méthodes d'étude présentées à savoir les méthodes d'évaluation d'impact générale, d'estimation des émissions sonores et de qualification de l'impact sont faites de manière empirique et ayant un niveau de calcul moyen pour ce qui est des estimations quantitatives. Ceci parce qu'il nous a été permis de posséder des appareils de mesure appropriés supposés idéals pour la quantifier les émissions. La méthodologie utilisée d'évaluation des émissions sonores et quantification des impacts est basée sur les normes NF EN, du CSTC (Centre Scientifique Technique de la Construction, 2006). Nous présenterons dans la suite de notre travail les résultats et interprétations qui en découlent concernant les impacts sur le milieu récepteur.

## **CHAPITRE 3**

### **ETUDE DE CAS : LA CENTRALE THERMIQUE DE MBALMAYO**

## Introduction

La méthodologie d'évaluation des niveaux sonores et des atténuations présentée dans le chapitre précédent est mise en œuvre dans un cas pratique. Elle nous servira de tremplin pour établir les résultats qui vont suivre. Les relevés effectués sur le site sont présentés dans la suite de notre travail assortis des calculs et des analyses appropriées. Ces analyses et éventuellement les conclusions conséquentes expliquant ces résultats sont exposés dans la suite de notre travail.

### 3.1. Présentation générale de la centrale

La centrale thermique de MBALMAYO (CTM) est une installation très récente de qui est sous la gestion d'EDC qui est la société qui chargé du segment de développement de l'électricité au Cameroun. Cette centrale a été construite sur fonds du programme thermique d'urgence. Cette centrale est située sur l'axe lourd Mbalmayo- Ebolawa à quelques mètres du carrefour reliant les villes de Mbalmayo, Sangmélima et Ebolowa.

La centrale est constituée de neuf(09) générateurs de type Caterpillar dont sept(07) sont opérationnels, et de quatre (04) transformateurs, chaque moteur est équipé de deux cheminées d'environ 1m de hauteur chacune.



**Figure 19:** Centrale thermique de MBALMAYO



La centrale dispose de trois grands tanks dont deux servent comme réserve de fioul (180m<sup>3</sup> de capacité chacun) et l'autre comme réserve d'eau (300m<sup>3</sup> de capacité). La coordination des installations de la CTM est faite depuis un poste de contrôle (figure 21).



**Figure 20:** Tanks d'eau et de fioul de la CTM



**Figure 21:** Salles de contrôle de la CTM

C'est une centrale conçue pour produire 10 MW d'électricité en mode de fonctionnement normal c'est-à-dire lorsque tous les neuf(09) générateurs sont en fonctionnement. L'énergie produite par la centrale est injectée dans le Réseau Interconnecté Sud (RIS) afin de palier au problème d'approvisionnement pendant les périodes de forte demande et d'étiage.

### 3.2 Présentation des données et discussions

Comme on l'a précisé plus haut, la CTM est équipée de neuf(09) dont sept(07) sont effectivement en service. Le suivant présente les caractéristiques des différents moteurs de la CTM.

**Tableau 4:** Caractéristiques des moteurs

	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	P(CV)	Vrp (tr/min)	Fréq (Hz)	Tension sortie alter (volt)	Marque	Puissance active (kW)
M1	850	1177,6	1500	50	400	Caterpillar	1600
M 2	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
M 3	850	1104	1500	50	400	Caterpillar	1500
M 4	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
M 5	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
M 6	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
M 7	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400

Après la détermination des caractéristiques des principales sources de bruit de la CTM (moteurs) on a procédé à des mesures des niveaux de puissance acoustique et de pression sonores à l'aide du sonomètre à différentes positions à l'intérieur du site et aux alentours en ayant pris le soin au préalable de mesurer le bruit de fond.

Niveau de pression sonore  $L_{aeq}$  et niveau de puissance sonore en fonction de la position.

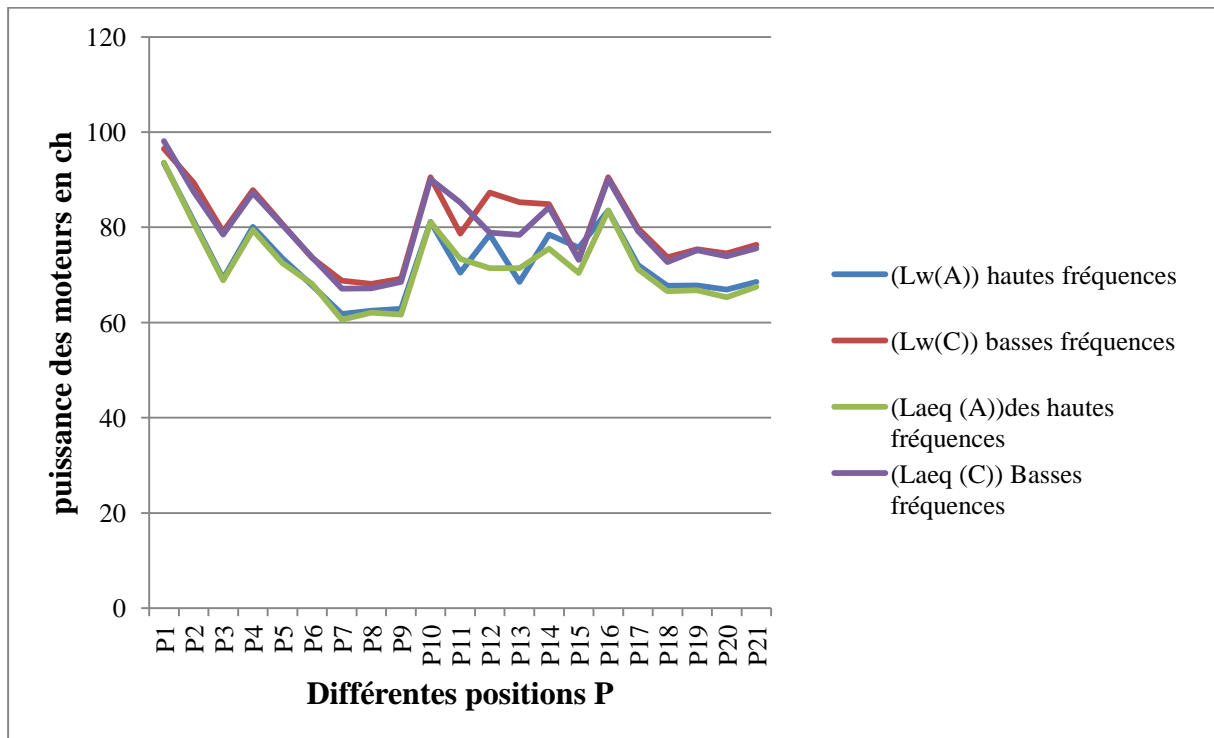
**Tableau 5:** Niveau de pression et de puissance sonores en fonction de la position

<b>Position</b>	<b><math>L_w(A)</math> HF</b>	<b><math>L_w(C)</math> BF</b>	<b><math>L_{aeq}(A)</math> HF</b>	<b><math>L_{aeq}(C)</math> BF</b>
P1	93,5	96,5	93,6	98,1
P2	81,3	89,4	80,9	87,5
P3	69,2	79,1	68,9	78,5
P4	80,1	87,8	79,4	87,2
P5	73,5	80,7	72,5	80,5
P6	67,8	73,6	68,1	73,7
P7	61,8	68,8	60,6	67,1
P8	62,5	68,1	62,1	67,2
P9	62,9	69,2	61,7	68,5
P10	81,2	90,5	81,1	90,1
P11	70,5	78,7	73,4	85,2
P12	78,5	87,3	71,4	78,9
P13	68,5	85,3	71,4	78,4
P14	78,5	84,9	75,5	84,2
P15	75,7	73,4	70,4	73,2
P16	83,5	90,5	83,5	90,1
P17	72,2	79,8	71,2	79,2
P18	67,7	73,7	66,6	72,7
P19	67,8	75,4	66,8	75,2
P20	66,9	74,5	65,3	73,9
P21	68,5	76,3	67,5	75,6

Les positions auxquelles nous avons repérées les niveaux de pression sonores  $L_{aeq}$  (A et C) et de puissance sonore  $L_w$  suivent la répartition géographique des quatre points cardinaux (Nord, Sud, Est, Ouest) de telle manière que chaque direction comporte cinq(05) points.

### 3.2.1 Niveau de puissance sonore et de pression acoustique équivalent en fonction de la position

Les courbes obtenues avec ces valeurs donnent :



**Figure 22:** Niveau de puissance et de pression équivalent en fonction de la position

Comme nous avons vu dans la littérature, pour une position donné le niveau de puissance sonore est toujours plus élevé que celui de pression sonore. En ce qui concerne le niveau de pression acoustique en fonction de la fréquence, il est toujours plus élevé en basse fréquence qu'en basse fréquence. Qu'importe la position à laquelle on se trouve, cela reste valable pour le niveau de puissance acoustique pour deux fréquences différentes (basse et haute fréquence)

Nous constatons que pour deux cinq points successifs dans une direction donnée, les niveaux acoustiques à basse fréquence sont toujours plus élevés que les niveaux acoustiques à haute fréquence. De plus la variation entre deux positions du niveau de pression acoustique est due au relief de ces deux positions cela l'effet des atténuations obtenue numériquement. Lorsqu'on s'éloigne de la source originelle de bruit, l'impact des diverses atténuations liées

aux différentes formes de propagation conduit à une réduction considérable et progressive suivant une direction et à des positions consécutives.

A l'aide d'un code MATLAB, on a évalué les niveaux de puissance sonore et de pression acoustique en fonction du type de moteur.

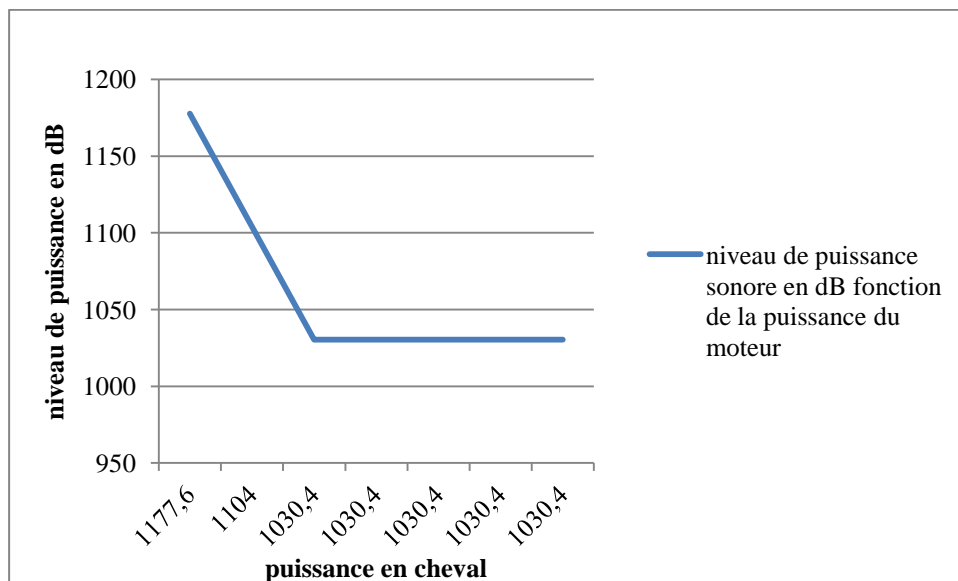
### 3.2.2 Niveau de puissance sonore et pression acoustique équivalent en fonction de la puissance du moteur

**Tableau 6:** Niveau de puissance et de pression équivalent numériques

	Lw(A) (HF)	Lw(C) (BF)	Laeq(A) (HF)	Laeq (C) (BF)	Lw(A) HF Num	Laeq(A) HF Num
M1	100,3	103,6	100,3	101,5	122,0613	114,5867
M2	102,7	103,5	98,9	103,6	120,9015	106,0369
M3	98,5	104	98,8	103,9	121,5008	106,6362
M4	98,3	102	98	102	120,9015	112,0315
M5	99,1	102,2	98,2	102,1	120,9015	112,0315
M6	99,7	103,6	99,5	103,1	120,9015	112,0315
M7	97,5	100,3	97,5	99,8	102,9015	111,4642

A partir de ces données nous avons tracé des caractéristiques permettant de mieux appréhender le fonctionnement de notre système (CTM). On obtient :

#### a) Niveau de puissance sonore fonction de la puissance de chaque moteur

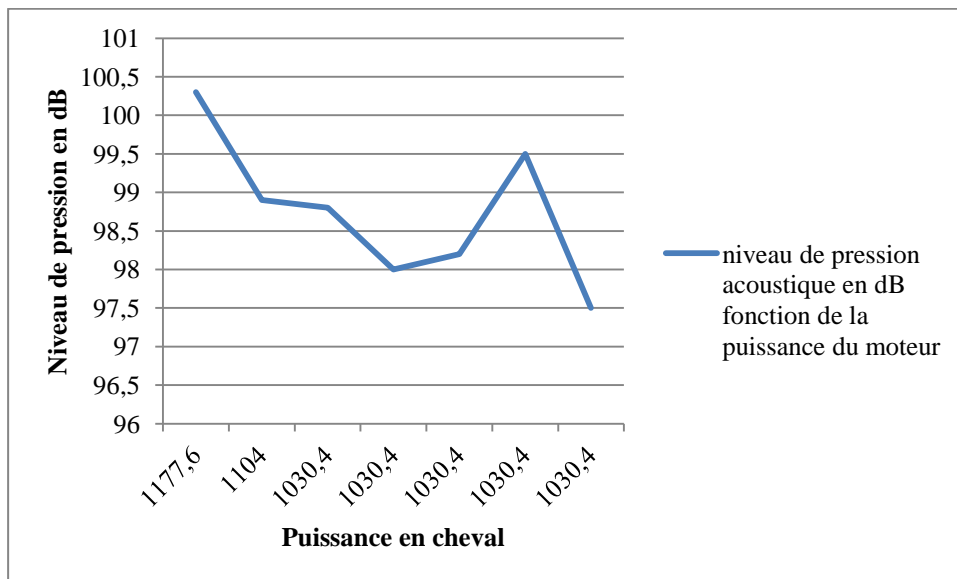


**Figure 23:** Niveau de puissance sonore en fonction de la puissance

On remarque que la puissance sonore c'est-à-dire la capacité de nuisance sonore intrinsèque d'un moteur dépend de sa puissance. En effet plus celle-ci est élevée plus le moteur fait du bruit pour les cinq derniers qui ont la même puissance, la courbe est une droite parallèle à l'axe des abscisses.

### b) Niveau de pression acoustique en fonction de la puissance du moteur

Nous avons évalué la pression acoustique en fonction de la puissance du moteur c'est-à-dire le bruit créé en un point par chaque moteur en fonction de sa puissance. On a le graphe suivant Laeq(A) HF :

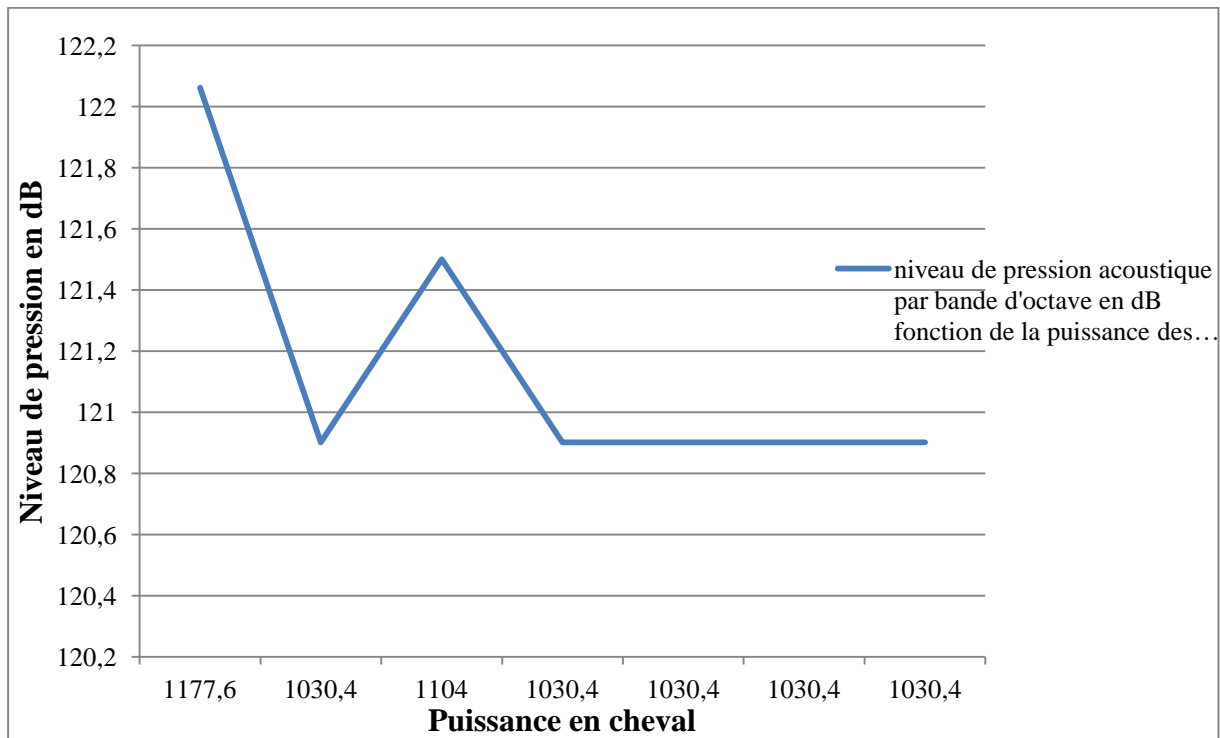


**Figure 24:** Niveau de pression acoustique en fonction de la puissance du moteur

En dehors du premier et du troisième moteur qui ont des puissances différentes, on s'attendrait à ce que le niveau de pression acoustique des autres moteurs soit identique. Le résultat obtenu peut se justifier par le fait la mesure des niveaux de pression des moteurs a été réalisé alors que tous les moteurs étaient en fonctionnement, en effet pour mieux quantifier le niveau de pression acoustique d'un moteur donné il aurait fallu que les autres ne soient pas en fonctionnement. Ce niveau de pression est fonction du moteur considéré et de la position de l'opérateur. Car le moteur 7 étant en bout de ligne subit des effets atténués des autres moteurs à l'exception du moteur 6 qui est directement proche de lui, tandis que le moteur 1 qui est à l'entrée de la salle et non loin de la route fait ressortir non seulement le bruit du moteur mais également celui des véhicules qui passent non loin de là sur l'axe lourd Yaoundé- Ebolowa. Cette hypothèse est confortée par la courbe numérique obtenue de MATLAB car pour les

moteurs de même puissance la pression acoustique est la même alors que pour le premier moteur on a une pression acoustique maximale.

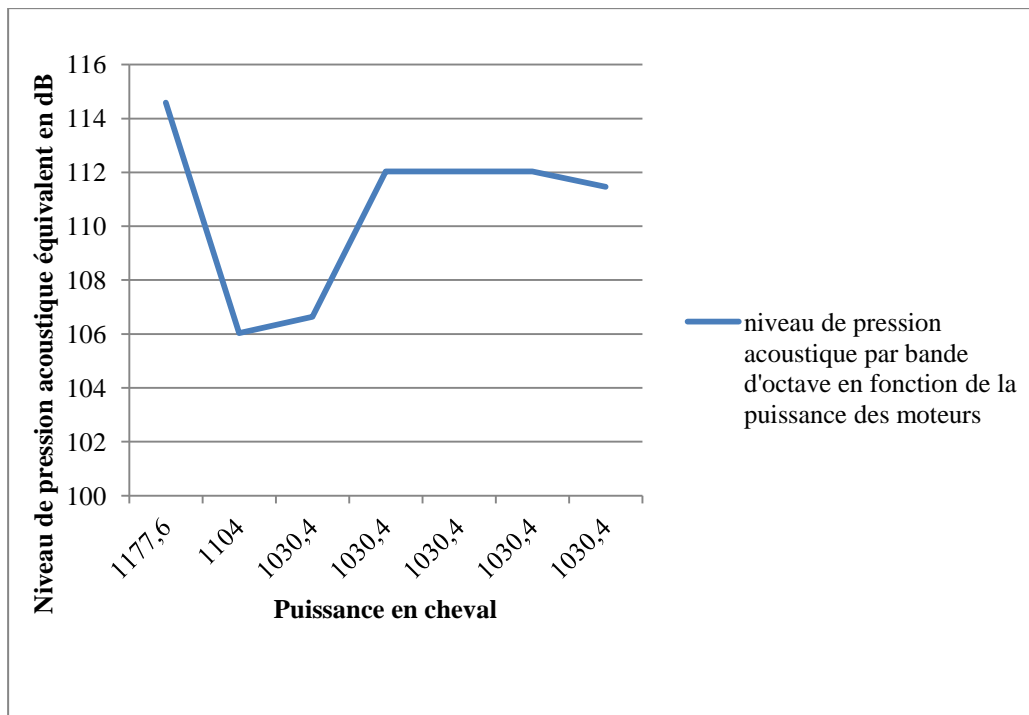
Les figures suivantes présentent la variation de la puissance acoustique par bande d'octave  $L_w(A)$  HF numérique (fig.25) en fonction de la puissance du moteur et la variation du niveau de pression acoustique équivalent par bande d'octave en fonction de la puissance des moteurs (fig.26)



**Figure 25:** Niveau de pression acoustique par bande d'octave fonction de la puissance.

En évaluant le niveau de pression acoustique équivalent de chaque moteur par bande d'octave en fonction de la puissance des autres moteurs on a :



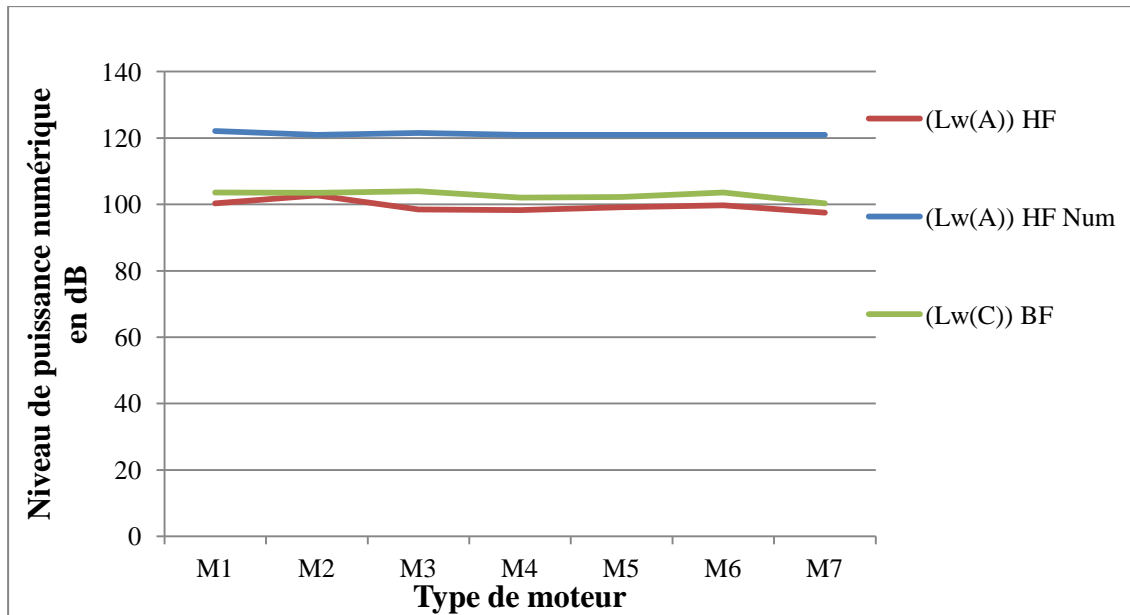


**Figure 26:** Niveau de pression acoustique équivalent par bande d’octave en fonction de la puissance des moteurs

Les courbes obtenues pour les niveaux acoustiques en fonction des puissances sonores (fig. 25) et (fig.26) montrent pour les niveaux acoustiques fonction des puissances pour les basses fréquences sont toujours élevées que celles des niveaux acoustiques en hautes fréquences. Concernant les puissances de chaque moteur, les niveaux de pression sonores sont inférieurs au niveau de puissance sonore et ce résultat est valable quelle que soit la puissance des moteurs. Par ailleurs, s’il s’agit de deux moteurs à des puissances différentes le niveau de puissance sonore sera fonction de la puissance du moteur le plus élevé. Par contre le niveau de pression sonore consistera en plus du niveau de puissance acoustique  $L_w$ , pour les basses fréquences, l’atténuation due à la propagation, ce qui est conforme aux résultats.

En évaluant les niveaux de puissance acoustique en haute fréquence en fonction du type de moteur on obtient :





**Figure 27:** Niveau de puissance numérique Lw(A) HF fonction du moteur

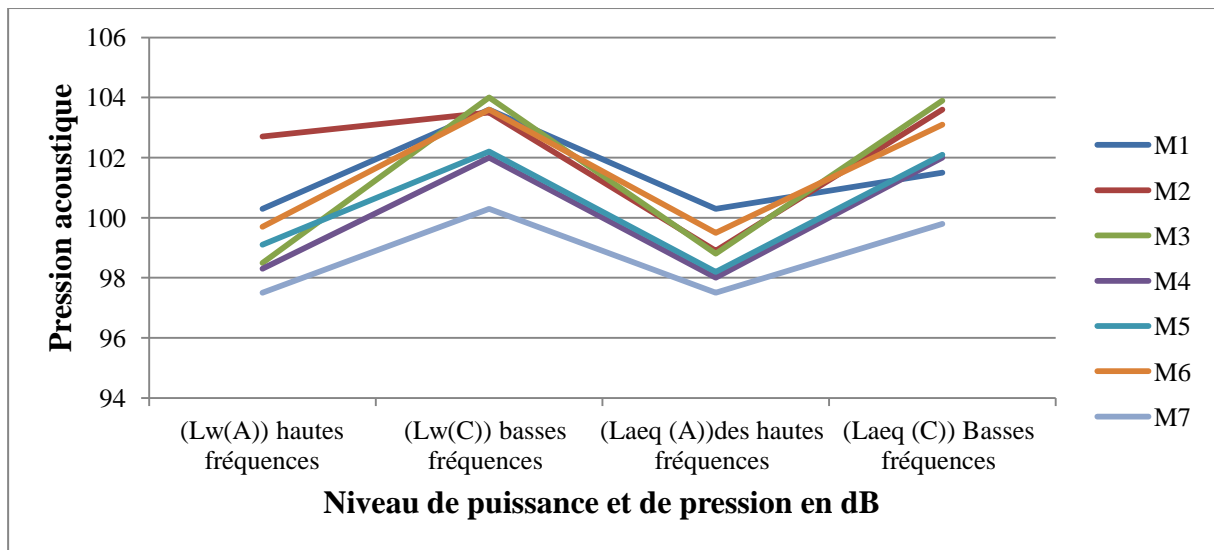
On remarque que les courbes obtenues par simulation numérique en haute et basse fréquence sont semblables.

### 3.2.3 Puissance sonore et pression acoustique par mesure du sonomètre

**Tableau 7:** Niveau de pression sonore équivalent Laeq (dB) et de puissance sonore Lw (dB) à la source de chaque moteur.

Moteur	Lw(A) HF	Lw(C) BF	Laeq(A) HF	Laeq(C)BF
M1	100,3	103,6	100,3	101,5
M2	102,7	103,5	98,9	103,6
M3	98,5	104	98,8	103,9
M4	98,3	102	98	102
M5	99,1	102,2	98,2	102,1
M6	99,7	103,6	99,5	103,1
M7	97,5	100,3	97,5	99,8

En comparant les niveaux de puissance sonore avec les pressions acoustiques en BF et HF:



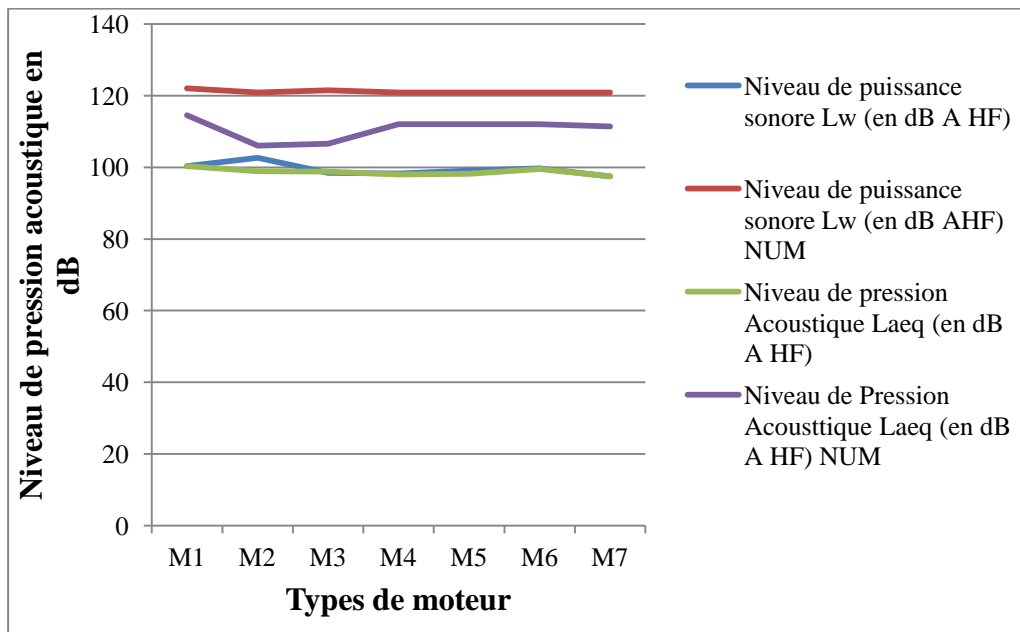
**Figure 28:** Niveau de puissance et pression en fonction des fréquences

Les niveaux de pression acoustique et de puissance acoustique sont grandes en basse fréquence et faibles en haute fréquence. Autrement dit lorsque tous les moteurs sont en fonctionnement, le niveau de puissance sonore est fortement atténué pour les hautes fréquences par rapport aux basses fréquences, et en ce qui concerne le niveau de pression acoustique, le phénomène reste le même. Nous pouvons conclure sur la base des différentes plages de puissance sonore (Tableau 2) et selon la loi cadre de la Banque Mondiale, toute personne se trouvant sur le site sera exposé à trois types de surdité :

- surdité légère au niveau de chaque moteur [21-40] dB
- surdité moyenne au niveau de chaque moteur [41-70] dB
- surdité sévère au niveau de chaque moteur [71-90] dB
- surdité profonde au niveau de chaque moteur [91-119] dB

### 3-2-4 Comparaison des niveaux de puissance sonore et de niveau de pression

sonore



**Figure 29:** Comparaison des puissances sonores et de pression acoustique

Pour un moteur donné, les valeurs des niveaux acoustiques évaluées numériquement sont toujours supérieures à celles collectées à l'aide du sonomètre. Nous pouvons dire en ce qui concerne ces valeurs empiriques qu'elles ne prennent pas en compte de la totalité des atténuations et du facteur de correctivité. Cela peut s'expliquer par les différentes formes de propagation dans un milieu donné, car pour un micro fixé sur un sonomètre l'ensemble des ondes acoustiques ne convergeront pas toutes en ces points. Ainsi il sera donc important de vérifier le manuel d'utilisation de chaque sonomètre afin de réaliser une meilleure prise de données. A cet effet il faudra tenir compte de la totalité des atténuations indiquées par la fiche technique pour être à mesure de comparer les valeurs obtenues à la suite d'une campagne de prise des données à celles figurant sur cette dernière.

**Tableau 8:** Récapitulatif des différentes atténuations en fonction des caractéristiques des moteurs.

	Moteur 1	Moteur 2	Moteur 3	Moteur 4	Moteur 5	Moteur 6	Moteur 7
Pu (CV)	1177,6	1030,4	1104	1030,4	1030,4	1030,4	1030,4
Nbre	1	1	1	1	1	1	1
Dv (m <sup>3</sup> /h)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
N (tr/min)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500

Fréq nom. (Hz)	50	50	50	50	50	50	50
Fréq. son (Hz)	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Coef att atm à 20 <sup>0</sup>	2,8	0,3	0,3	5	5	5	5
H(m)	3	3	3	3	3	3	3
$\lambda$ (m)	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272
Lw (dB)	122,0613	120,9015	121,5008	120,9015	120,9015	120,9015	120,9015
Dz (dB)	5,6294	5,6368	5,6329	5,6368	5,66368	5,6368	5,6368
Kj(dB)	17	8	8	17	17	17	17
A mét (dB)	3	3	3	3	3	3	3
Adiv (dB)	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18	18,18
Atm. (dB)	1,7696	0,1896	0,1896	3,16	3,16	3,16	3,16
Att.sol (dB)	0	2,6082	3,42	3,7	4,0754	4,1634	4,8
Aécr (dB)	0	-2,6082	-3,42	-3,7	- 4,0754	- 4,1634	- 4,2327
Avég (dB)	0,05	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06
A ind. (dB)	0,025	0,015	0,015	0,02	0,02	0,02	0,02
A hab. (dB)	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45
Atot sce (dB)	24,4746	22,8646	22,8646	25,87	25,87	25,87	26,4373
Lp (dB)	114,5867	106,0369	106,6362	112,0315	112,0315	112,0315	111,4642
Lp Matlab (dB)	114,5867	106,0369	106,6362	112,0315	112,0315	112,0315	111,4642

## CONCLUSION

A tout prendre, l'analyse des résultats ci-dessus suggère que :

-le niveau de puissance et de pression acoustiques d'un moteur (source) est fortement dépendant de ses caractéristiques, du milieu environnemental dans lequel il se trouve (propagation solide ou aérienne) et du point récepteur. De plus on a évalué pour chaque type de moteur des niveaux de pression acoustique, de puissance sonore, les atténuations suivant le milieu de propagation et surtout un niveau équivalent de tous les moteurs. Il en

découle que si nous tenons compte du temps de fonctionnement pendant 24 heures, et des évènements isolés d'une source quelconque, la valeur du niveau de pression acoustique équivalent total 113,6483dB obtenue confirme la dangerosité que représente la nuisance issue de la CTM. Si à ce risque de surdité on ajoute le fait que les moteurs sont vieillissant au de cinq années d'activité, alors on dépassera largement la plage de la surdité profonde pour se retrouver dans le domaine de la cophose car le niveau sonore étant largement supérieur à 120dB.

## **CHAPITRE 4 : IMPLICATION SUR LE SYSTEME EDUCATIF**

## **4.1 Intérêt didactique**

Rendu au terme de notre travail, il est tout à fait convenable de présenter l'intérêt pédagogique que revêt ce dernier. En effet l'objectif premier de nos deux années de formation à l'E.N.S est de nous aguerrir d'outils susceptibles de faire de nous des enseignants du secondaire rompu à la tâche et ayant un bon background. A ce titre il est incongru qu'un mémoire synthétisant les savoir-faire, savoirs-être, savoir-vivre et savoirs capitalisés à l'issue de ladite formation ne fasse pas apparaître le caractère essentiellement pédagogique de notre formation. Ainsi nous allons nous atteler dans ce qui va suivre à la mise en exergue de l'implication pédagogique de ce mémoire. Telle que l'indique son intitulé : «Contribution à l'insonorisation acoustique des parois d'une salle machines : cas de la centrale thermique de MBALMAYO », l'apprenant du secondaire en particulier celui de la classe terminale scientifique peut trouver ici des bases de calcul sur les ondes ; bien que l'objet de notre étude porte sur les ondes acoustiques on peut toujours sur la base de certaines déductions transposer cette méthodologie aux ondes mécaniques ou électriques qui sont inscrites au programme du lycée. Un autre centre d'intérêt serait d'apprendre à manipuler le sonomètre pour prendre des mesures de puissance et de pression acoustique pour les élèves de l'enseignement technique. Notre travail est fondamentalement dépendant des relevés sonométriques obtenues sur le terrain au niveau de la CTM par conséquent, l'utilisation du sonomètre est l'objectif de notre implication pédagogique.

## **4.2 Fiche pédagogique : TP sur l'utilisation d'un sonomètre**

\* Présentation du sonomètre : Sonomètre intégrateur à mémoire de type SLS 95

Caractéristiques :

- Capacité de stockage de 56000 à 4 000 000 de valeurs
- Liaison RS232 pour le transfert des données sur PC
- Possibilité de traitement des données sur ordinateur
- Analyse fréquentielle en octave ou en 1/3 d'octave par filtrage numérique en temps réel
- Portable et autonome (6 piles d'alimentation)

\*Logiciel d'exploitation : DDBATI32 qui permet le transfert, l'analyse des données et l'impression des spectres de bruit mesurés.

\*Présentation sommaire du sonomètre. Il comporte :

-trois boutons dans la partie haute : celui de gauche correspond à la mise en marche, les deux autres à la configuration

-un clavier d'utilisation qui comporte : une touche centrale de validation des choix Val ; des touches + et - pour incrémenter les valeurs ; une touche ESC pour revenir en arrière ; une touche Leq pour les mesures de spectre ; trois touches 1,2 et 3 en bas qui ne seront pas utilisées.

\*Utilisation du sonomètre : Vérifier que les deux boutons de droite sont en position haute, allumer le sonomètre avec le bouton de mise en marche. Mettre le troisième bouton en position basse, si le lien RAZ apparait sur le menu principal, faire une RAZ des mémoires pour effacer toutes les mesures précédentes. Le menu demande deux confirmations de la RAZ

\*Mesures : deux types de mesures sont utilisées :

-Intensité sonore globale en temps réel Lp : dans le menu sélectionner Mes, valider Val ; choisir Lp puis Val. Relever la valeur correspondante du niveau sonore. Cette mesure est instantanée et en temps réel donc elle est susceptible de fluctuations. Sortir par Esc

\*Mesure et transferts de spectre en Leq : sélectionner Mes puis Val, choisir Leq puis Val, avec les flèches aller sur A et faire apparaître 1/1 (octave) ou 1/3 (tiers d'octave) avec + et - ; ne pas valider. Appuyer sur la touche Leq pour démarrer les mesures, durant l'enregistrement un compteur défile en haut à droite de l'écran. Au bout de 10 secondes, appuyer sur Leq pour arrêter la mesure puis sur Esc. A la question stockage ? Répondre Oui puis recommencer une autre acquisition ou transférer les résultats sur le PC. Pour transférer les mesures en mode Leq, il faut sonomètre au câble RS232 du PC, dans le menu principal aller sur Dep puis Val, aller sur Transfert puis Val, sur le PC lancer le programme d'acquisition icône « acoustique » s'il n'est pas ouvert, aller sur fichier puis transfert sonomètre et cliquer sur le bouton initialisation dans la boîte de dialogue qui apparait, ensuite cliquer sur transférer.

Pour afficher le spectre, on peut utiliser l'icône Tracer et dans le menu tracé/paramètre choisir la pondération pour passer de dB à dB(A), on peut également afficher le niveau global et imprimer le spectre correspondant.



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Notre travail a consisté à évaluer les niveaux de puissance acoustique de la CTM à partir des caractéristiques des différents moteurs constituant l'unité de production d'une part, et d'autre part à évaluer ces niveaux sonores sur la base d'un code MATLAB pour pouvoir confronter les différents résultats obtenus.

Les travaux réalisés au cours de cette étude bien que capital ne sont pas suffisant pour mieux viabiliser un projet officiel d'étude d'impact sonore. A cet égard nous serons pour cela appelé à approfondir nos recherches sur la dispersion des nuisances sonores et l'optimisation acoustique de toutes les composantes de la centrale afin de maîtriser au mieux l'impact environnemental. En outre la proximité de la centrale avec l'axe routier implique la prise en compte de ce facteur dans l'évaluation des niveaux afin de fournir des résultats plus fiables et reflétant au mieux la réalité des niveaux sonores dans et surtout autour de la centrale. Comme autre axe de recherche, nous envisageons dresser une cartographie de la nuisance sonore de la centrale à l'aide d'un logiciel approprié. Tous ces axes de recherche permettront la mise sur pied d'une centrale respectueuse des normes environnementales du point de vue sonore.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) **AMINE AIT-HAMMOUDA(2005)**. Pré-dimensionnement et étude de sensibilité vibro-acoustique de machines à courant alternatif et à vitesse variable. Thèse de Doctorat. Université des sciences et de la technologie de Lille. France
- (2) **CHAMPILOU Vincent et COUTANT Bastien (2011/2012)**. Correction acoustique des salles de TD 3N21 et 3N22. Rapport de Projet de fin d'études, Université Henri Poincaré.
- (3) **DELPRAT N, ESUDIE B. et al (1992)**. Asymptotic wave let and gabor analysis: Extract of instantaneous frequency
- (4) **DUPONT Jean- Baptiste(2007)**. Contrôle actif d'impédance pour la réduction du bruit transmis par un encoffrement, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France.
- (5) **ISO 9613-2:1996(E)**
- (6) **KRAUSS Gérard, YEZOU René, KUZNIK Frédéric (2009/2010)**. Acoustique du Bâtiment (cours). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
- (7) **LAFONT Tranche Alain, (2010)**. Mesure du bruit: sonomètres (D.A KIMO, Interviewer)
- (8) **LAMANCUSA J.S. (2009)**. Outdoor Sound Propagation. Noise Control
- (9) **MALCHAIRE Jacques (1993)**. Programmes de conservation de l'audition : Organisation en milieu industriel. Editions MASSON. Collection de monographies de médecine du travail. PP. 36-38 Paris. France
- (10) **PASCAL Jean-Claude (2009)**. Insonorisation industrielle : les encoffrements. Université du Maine. France
- (11) **Rapport sur le bruit (CIDB, 2013)**. Centre d'Information et de Documentation sur le Bruit.
- (12) **SEUTCHE NDIZE Jean Calvin (2013)**. Impact sur la combustion du fioul lourd sur l'environnement dans la centrale thermique d'OYOM-ABANG. Mémoire de Master Université de Yaoundé I. Cameroun
- (13) **SARRAF-MOAYERI A. (2009-2010)** Le Centre d'Evaluation et de Réadaptation des Troubles de l'Audition (CERTA) d'Angers : enjeux, retombées, perspectives. Mémoire présentée en vue de l'obtention du diplôme d'Etat d'audioprothésiste. Université Henri Poincaré. Faculté de pharmacie de Nancy. France.

(14) **SHACKLETON S.** and **PINEY M.D. (1984).** A comparison of two methods of measuring personal noise exposure. Ann. Occup. Hyg. Vol. 28 Issue 4 PP. 373-3790.

(15) [www.bruit.fr/images/stories/pdf/](http://www.bruit.fr/images/stories/pdf/A1_bruit.pdf) A1\_bruit.pdf (30/05/2016 à 17h)

## ANNEXES

### Annexe 1

**Tableaux 1 A1 : Caractéristiques groupées des sonomètres**


Les sonomètres										
Fabricant (représentant ou distributeur)	Modèle	Type	Conformité à la norme	Plage de mesure (dynamique)	Grandeurs mesurées	Capacité de stockage	Autonomie	Sortie vers PC	Applications	Observations
Etech (Testoec)	SL130	Conventionnel	Type 2 (NF EN 60651)	30-130 dB (50 dB)	Lp (A,C) (S,F) max	Non	240 h	Non	Mesures généralistes	Avertisseur de niveau sonore avec alarme sonore et visuelle. Sortie alarme pour sirène, giraphone... (liaison par relais AC ou DC en option). Microphone déportable et rotatif sur 180 degrés. Grand affichage.
	HD600	Conventionnel	Classe 2 (NF EN 61672)	30-130 dB (50 dB, auto)	Lp (A,C) (S,F) max, min	20 000 enregistrements	30 h	USB	Mesures généralistes	Logiciel PC et câble USB en standard.
BK Precision (Testoec)	BK735	Conventionnel	Type 2 (NF EN 60651)	30-130 dB (50 dB, auto)	Lp (A,C) (S,F) max, min	32 000 enregistrements	50 h	RS232	Mesures généralistes	Banquette. Logiciel PC et câble RS232 en standard.
	BK733A	Conventionnel	Type 2 (NF EN 60651)	30-130 dB (50 dB)	Lp (A,C) (S,F) max, min	Non	50 h	Non	Mesures généralistes	Logiciel PC et câble RS232 en option.

**Tableau 2 A1 : Fiche technique du sonomètre SMART SENSOR**

**SMART SENSOR®**

Model: ARR14

**Digital sound level meter  
Operation manual**

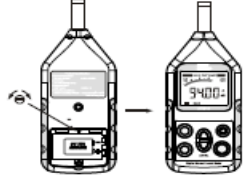
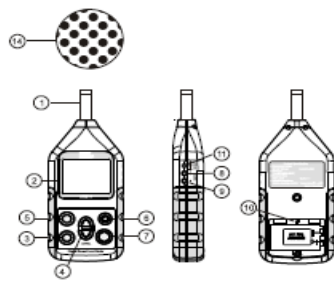


**A Precautions:**  
Please read this operation manual carefully before using this equipment for correct operations. This equipment have been designed to meet the measurement requirement of Safety Engineers, Health, Industrial Safety offices and Sound Quality control in various environment.

**B Features:**  
1) This unit was designed according to the IEC651 TYPE2& ANSI S1.4 TYPE2 for sound level meters.  
2) Instantaneous sound measure function.  
3) Measurement range: 30-130 decibel  
4) With two equivalent weighted sound pressure levels, A and C.  
5) Fast & Slow dynamic characteristic modes.  
6) AC and DC signed output for frequency analyzer level recorder, FFT analyzer, graphic recorder etc.

**C Specifications:**  
1) Accuracy: +/- 1.5 dB (under reference conditions)  
2) Frequency range: 31.5 Hz - 8.5 KHz  
3) Linearity range: 50 dB  
4) Measuring level: 30-130 dBA, 35-130 dBC  
5) Frequency weighting: A, C  
6) Resolution: 0.1dB  
Display: 0.5 secretary  
7) Bar graph: 50 dB scale at 1 dB step for monitoring current sound pressure level display period: 50 mS  
8) Level ranges: 30-80 dB; 50-100 dB; 60-110 dB; 80-130 dB;  
9) Over indicate over range:  
Under indicate less than lower limit of the range.  
10) AC output: 0.707 Vrms at FS output impedance approx 500 Ω  
11) DC output: 10 mV / dB output impedance approx 100 Ω  
12) Time weighting: Fast / Slow  
13) Microphone: 1/2 inch Electret Condenser microphone  
14) Max: Maximum hold  
15) Power supply: 1\*9V alkaline cells or DC 9V adapter  
Power life: About 30 hrs (alkaline cells)  
16) Self calibration time: 10 sec (every turn on)  
17) Operating Temperature: 0°C to 40°C  
Operating Humidity: 10% to 80% RH  
18) Storage Temperature: -10°C to 60°C

Storage Humidity: 10% to 70%RH  
19) Dimensions: 265(L)\*72(W)\*35 (H) mm  
20) Weight: 300g (including batteries)

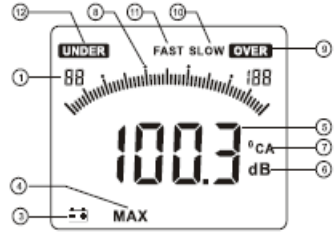
**FRONT**

**D Calibration Procedures:**  
Please use a Standard Acoustic Calibrator.

- 1) Make the following settings:  
Display: SPL (dBA) Time weighting: FAST  
Level range: 60 to 110 dB  
Measurement mode: MAX function disable
- 2) Insert the microphone carefully into the 1/2 inch hole of the Calibrator.
- 3) Turn on the Calibrator and adjust the Protonimeter in side the Battery compartment of the unit( shown in the diagram 1 ). The level of the unit ( shown in the diagram 1 ). The level display will indicate the desired Level (94.0).  
Our products are all well calibrated before Shipment. Recommended recalibration cycle: 1 year.

**E Name and Functions:**

- 1) Electret Condenser Microphone.
- 2) LCD Display.
- 3) Power switch
- 4) Level range control switch:  
30dB~80dB; 50dB~100dB;  
60dB~110dB; 80dB~130dB.
- 5) Maximum value hold switch. (MAX)
- 6) Frequency weighting select switch.  
A: A- weighting for general sound level measurements.  
C: C- weighting for checking the low frequency content of noise.
- 7) Time weighting select switch.  
Fast: For normal measurements.  
Slow: For checking average level of fluctuating noise.
- 8) AC output terminal: 0.707 Vrms Corresponding to each range step.
- 9) DC out put terminal: output 10 mV/ dB
- 10) Calibration control
- 11) External DC 9V power supply terminal.



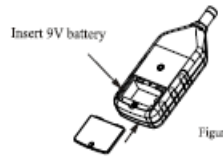
**12) Battery Door.**  
**13) Tripod mounting screw.**  
**14) Windscren.**

**F LCD Display Description:**

- 1) Level range.
- 2) Instantaneous sound pressure level.
- 3) Low battery mark.
- 4) Maximum value is held during measuring.
- 5) Measuring value.
- 6) Measurement Unit.
- 7) Frequency weighting A/C.
- 8) Level range Bar graph.
- 9) Rang over.
- 10) Slow time weighting.
- 11) Fast time weighting.
- 12) Range under.

**G Pre-operations:**

- 1) Use Screwdriver open battery door and install four 1.5V batteries in the battery compartment.
- 2) Install battery door with Screwdriver.
- 3) When the battery voltage drops below the operating Voltage, mark  $\pm$  appears . Please replaced with new one.
- 4) When the DC adapter is used, insert the plugs (3.5 φ) of the adapter into the DC 9V connector







on the side panel.

**H Operation direction:**

- 1) Turn on power
- 2) Select the desired response and weighting, also select desired rang.
- 3) If weighting for general noise sound level, please select dBA.
- 4) If the sound source consists of the short bursts of only catching sound peak, set response to FAST. to measuring average sound level, use the slow setting.
- 5) When MAX mode is chosen. The instrument captures and hold the maximum noise level.

**I Cautions**

- 1) Do not operate the unit at high temperature and Humidity environment.
- 2) Please take out battery from unit if not in use for any extended period of time.
- 3) Once using the unit in the presence of wind, it is a must to mount the windscren to not pick up undesired signals.
- 4) Operating Environmental condition:  
Humidity ≤ 80%RH,  
Temperature from 0°C to 40°C.

## Annexe 2

**Tableau 1 A 2 : Différentes constantes K 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 A2 : Différentes constantes  $K_p$  fonction du type de pompe**

Type de pompe	$K_p$
Centrifuge	95
A hélices	100
A mouvement alternatif	105

**Tableau 3 A 2 : Termes correctifs  $K_j$  pour l'évaluation des niveaux sonores**

Type	Spécification	Terme correctif du niveau dB
Sources de bruit	Circulation routière	0
	Avion	3 à 6
	Chemin de fer <sup>a</sup>	-3 à -6
	Industrie	0
Caractère de la source	Impulsionnel ordinaire <sup>b</sup>	5
	Fortement impulsionnel	12
	Impulsionnel de niveau élevé	—
	Tons proéminents <sup>c</sup>	3 à 6
Période de temps	Soirée	5
	Nuit	10
	Week-end <sup>d</sup>	5

**Tableau 4 A2 : Coefficient d'atténuation atmosphérique  $\alpha$  du bruit en fonction des conditions météorologiques**

Température °C	Humidité relative %	Coefficient d'atténuation atmosphérique $\alpha$ , 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	32,0	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	29,1	69,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	6,2	28,2	69,8	202
15	60	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	30,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	62,8

(Source : CSTC 2004)

**Tableau 5 A2 : Calcul des composantes de l'atténuation due au sol par bande d'octave**

Fréquence centrale nominale Hz	$A_s$ ou $A_r$ <sup>1)</sup> dB	$A_m$ dB
63	- 1,5	- 3q <sup>2)</sup>
125	- 1,5 + G × a'(h)	- 3q(1 - G <sub>m</sub> )
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)

Avec  $d_p$  la distance entre la source et le récepteur projetée sur le plan du sol.

**Tableau 6 A2 : Coefficient de réflexion acoustique  $\rho$**

Objet	$\rho$
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)	$\frac{D \sin(\phi/2)}{2d_{sc}} \text{ *)}$ <p>où</p> <p><math>D</math> est le diamètre du cylindre;</p> <p><math>d_{sc}</math> est la distance entre la source et le centre C du cylindre;</p> <p><math>\phi</math> est le supplément de l'angle compris entre les lignes SC et CR.</p>
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 7 A2 : 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 8 A2 : Atténuation en terrain 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 3

**Tableau 1 : Caractéristiques des moteurs de la CTM**

	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	P(CV)	Vrp (tr/min)	Fréq (Hz)	Tension sortie alter (volt)	Marque	Puissance active (kW)
Moteur 1	850	1177,6	1500	50	400	Caterpillar	1600
Moteur 2	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
Moteur 3	850	1104	1500	50	400	Caterpillar	1500
Moteur 4	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
Moteur 5	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
Moteur 6	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400
Moteur 7	850	1030,4	1500	50	400	Caterpillar	1400

### Annexe 4 Code de calcul des niveaux sonores

```

%niveau de puissance sonore Lw pour les moteur M1,M2,M3,M4,M5,M6,M7
P=[1177.6;1030.4;1104;1030.4;1030.4;1030.4;1030.4];
N=[1500;1500;1500;1500;1500;1500;1500];Lw=zeros(7,1);
for k=1:7;
Lw(k,1)=20*log10(P(k,1))+15*log10(N(k,1))+13;
end
disp('matrice Lw');
disp(Lw);
%atténuation par diffraction Dz
C2=20;Z=4;lamda=[122.0613;120.9015;121.5008;120.9015;120.9015;120.9015;120.
9015];C3=1;Kmeteo=1;
Dz=zeros(7,1);
for k=1:7
Dz(k,1)=10*log10(3+(C2./lamda(k,1)).*Kmeteo*C3*Z);
%disp(Dz(k,1));
end
disp('matrix de Dz')
disp(Dz);
%d=30
%Calcul de Asol et Aécran

```

```

Hs=[3;3;3;3;3;3;3];%déclaration du vecteur Hauteur Hs
d1=[16;16;16;16;16;16;16];d2=[35;35;35;35;35;35;35];d3=[50;50;50;50;50;50;50;50;50];Dz=zeros(7,1);Hm=zeros(7,1);
d4=[60;60;60;60;60;60;60];d5=[85;85;85;85;85;85;85];d6=[95;95;95;95;95;95;95];d7=[105;105;105;105;105;105;105];
for k=1:7
    Hm(k,1)=Hs(k,1)./2;
end
disp('Matrix de Hm')
disp(Hm);Asol=zeros(7,1);Aecran=zeros(7,1);
for k=1:7
Asol(k,1)=4.8-(2*Hm(k,1)./d1(k,1)).*(17+(300/d1(k,1)));
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 atténuation d'une diffraction en haut de
    %Aecran(k,1)=Dz(k,1);%pour atténuation d'une diffraction sur les bord latéraux de l'écran
end
disp('Matrix de Asol')
disp(Asol);
disp('Matrix de Aecran')
disp(Aecran);
% Création du vecteur A (atténuation pour les différents moteurs)
% A1=A équivalent du moteur 1 ; A2=A équivalent du moteur 2;
% A3=A équivalent du moteur 3; A4=A équivalent du moteur 4;
% A5=A équivalent du moteur 5;A6=A équivalent du moteur 6;
% A7=A équivalent du moteur 7;
Kj=[17;8;8;17;17;17;17;10;17];
A=[24.4746;22.8646;22.8646;25.87;25.87;25.87;26.4373];
Tm=[4.63;3.84;3.154;3.005;3.376;3.8;5.6];T=24;
Laeq=zeros(7,1);Cp=0;Cr=0;S=zeros(7,1);
%Calcul de Laeq
for k=1:7;
Laeq(k,1)=Lw(k,1)+Kj(k,1)-A(k,1);
end
disp('matrice Laeq');
disp(Laeq);

%Calcul de LAeq,T
S=zeros(7,1);
for e=1:7 % eième intervalle de temps Tk. pendant lequel on ne peut pas
%distinguer les évènements isolés d'une période spécifique
%T=24 heures pour des valeurs moyenne journalière Tm
for k=1:7; %pour les différentes sources (k) fonction du type de bruit
%Le niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A,
%par vent portant est la somme des différentes contributions pour les
différentes sources;
S(e,1)=Tm(e,1).*(10.^(0.1.*(Kj(k,1)+Lw(k,1)-A(k,1))))+S(e,1);
end
end
disp('matrice de S')
disp(S);
% étape facultatif pour le ième événement isolé puisqu'on à qu'effectué
une mesure
% for c=1:1
% Q(c,1)=S(1,3);
% end

```

```
% % eiéme intervalle de temps TE. pendant lequel on ne peut pas
% %distinguer les évènements isolés d'une période spécifique
% %T=24 heures pour des valeurs moyenne journalière Tm
LAeq=zeros(7,1);
for e=1:7
LAeq=10.*log10(S(e,1)./T);
end
disp('matrice de LAeq')
disp(LAeq);
```