



**UNIVERSITE DE OUARGLA**  
Faculté des Sciences et Sciences  
de l'Ingénieur  
Département des Sciences Physiques

N° d'ordre :  
N° de série :

## **Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

## **MAGISTER**

Spécialité : Physique

Option : Physique des matériaux

**Par : Rabah BOUANANE**

**Thème :**

### **ETUDE DE LA MEMBRANE D'UN MICROPHONE A FIBRE OPTIQUE**

Dans le but d'améliorer le fonctionnement

**Soutenu Publiquement le :23/03/2004**

**Devant le Jury composé de :**

<b>Mr M.T.MEFTAH</b>	<b>Professeur,</b>	<b>Univ . Ouargla</b>	<b>Président</b>
<b>Mr O.BOUKRAA</b>	<b>M. Conférences,</b>	<b>Univ .Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr D.BENATTOUS</b>	<b>M. Conférences,</b>	<b>C.U . El Oued</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr F.REHOUMA</b>	<b>M. Conférences,</b>	<b>Univ . Ouargla</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr K.E.AIADI</b>	<b>M.A.C de cours,</b>	<b>Univ. Ouargla</b>	<b>Co.Rapporteur</b>

**UNIVERSITE DE OUARGLA**  
Faculté des Sciences et Sciences  
de l'Ingénieur  
Département des Sciences Physiques

**Thème :**

**ETUDE DE LA MEMBRANE D'UN  
MICROPHONE A FIBRE OPTIQUE**  
Dans le but d'améliorer le fonctionnement

**MAGISTER**

**Spécialité : Physique**  
**Option : Physique des matériaux**

**Par : Rabah BOUANANE**  
**Promoteur : Ferhat REHOUMA**  
**Co. Promoteur : Kamal Eddine AIADI**

**Soutenu Publiquement le :23/03/2004**  
**Devant le Jury composé de :**

<b>Mr M.T.MEFTAH</b>	<b>Professeur,</b>	<b>Univ . Ouargla</b>	<b>Président</b>
<b>Mr O.BOUKRAA</b>	<b>M. Conférences,</b>	<b>Univ .Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr D.BENATTOUS</b>	<b>M. Conférences,</b>	<b>C.U . El Oued</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr F.REHOUMA</b>	<b>M. Conférences,</b>	<b>Univ . Ouargla</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr K.E.AIADI</b>	<b>M.A.C de cours,</b>	<b>Univ. Ouargla</b>	<b>Co.Rapporteur</b>

**ملخص:** الدراسة الخاصة بغشاء ميكروفون الليف الضوئي أهمية كبيرة في تحديد خصائصه

الميكانيكية ومجال فعالية الميكروفون.

هذه الأطروحة تتناول في الدراسة اهتزازات غشاء ميكروفون الليف الضوئي ومقدار الانتقال والتقوس على سطح الغشاء في نقطة المركز عند التقاطه لأمواف وضغوط صوتية وفوق صوتية وهذا الانتقال والتقوس هو حساسية الغشاء للضغط والذبذبات الصوتية. بناءا على نموذج لميكروفون، أجريت نمذجة لميكروفون باليف الضوئي واعد برنامج للحسابات (برنامج حاسوب ) لمعرفة تأثير العوامل على إجابة الغشاء من حيث مقدار حساسيته ومجال التردد . وقد استنتج، بعد سلسلة من الحسابات والمنحنيات العوامل الأكثر تأثير في الإجابة وتم الحصول علي نتائج مختلفة لعمل الميكروفون في مجالات تردد صوتية وفوق صوتية لمختلف الأبعاد والخصائص.

**الكلمات المفاتيح:** الميكروفونات، ميكروفون الليف الضوئي، الانتقال والتقوس في الأغشية الرقيقة، اللواقط بالألياف الضوئية، علم الصوتيات.

**Résumé :** L'étude de la membrane d'un microphone à fibre optique revêt un grand intérêt dans sa caractérisation et dans la réponse de fonctionnement du microphone.

Ce mémoire présente une étude du déplacement de la membrane (la sensibilité) provoquer par les pressions acoustiques au centre de la membrane. D'après un modèle théorique d'un microphone à fibre optique, une modélisation et un programme informatique de calcul sont réalisés pour effectuer une série de calculs et de représentations graphiques de la réponse de cette membrane.

A partir des graphes des réponses, les paramètres les plus influents sur la réponse sont conclus. Et des différents résultats en fréquence sonores et ultra sonore pour différentes valeurs de ces paramètres sont déterminés.

**Mots clés :** les microphone, microphone à fibre optique, déplacement et flexion des membranes, capteurs à fibre optique, l'acoustique.

**Abstract:** the study of membrane of fibre optic microphone is very interesting in its characterisation and in the response of the functioning of a microphone.

This dissertation deals with the study of the displacement. The sensibility caused by the waves and the acoustic pressures at the centre of a membrane , according to a theoretical model of fibre optic microphone , a computerized programme and a modelisation are realized to carry out a series of counting and graphic representations of the response of a membrane.

From the graphe of the response , the parametetes the most influencing on the response are concluded, and different results sounding and ultra sounding for different values of these parameters are determined.

**Keywords:** microphones, fiber optic microphone, the membranes displacement and bending, optic fiber sensors, acoustics.

# Sommaire

## **INTRODUCTION**

<b>Chapitre I : SON ET ACOUSTIQUE.....</b>	<b>3</b>
Introduction.....	4
I.1. Description physique du son.....	4
I.3 L'acoustique et l'onde acoustique.....	5
I.3.1 Ondes acoustiques.....	5
I.3.2 Classification des ondes acoustiques.....	6
I.3.3 Equation des ondes acoustiques.....	6
I.4 La Pression acoustique.....	7
I.5 La force sonore (La sonie).....	7
I.6 L'intensité et la puissance d'une onde sonore.....	8
I.7 Le niveau sonore.....	8
I.8 Hauteur d'un son.....	9
I.9 Timbre d'un son.....	9
I.10 Impédance acoustique .....	9

## **Chapitre II : LES CAPTEURS A FIBRE OPTIQUE ..... 11**

II.1. Généralités.....	12
II.2 L'oreille.....	13
II.3 Capteurs classiques .....	14
II.3.1 Capteur actif et passif .....	15
II.3.2 quelques types de capteurs.....	16
II.4 Capteur à fibre optique .....	16
II.4.1 La fibre optique .....	17
II.4.2 Le transducteur .....	19
II.4.3 l'émetteur de lumière.....	19
II.4.4 le récepteur de lumière.....	20
II.4.5 le circuit d'alimentation.....	20
II.4.6 la chaîne de traitement .....	20
II.4.7 Avantages des capteurs à fibre optique .....	20

## **Chapitre III : LES MICROPHONES..... 22**

Introduction.....	23
III.1.1 Le Microphone classique.....	23
III.1.2 Microphone à ruban.....	24
III.1.3 Microphone à bobine mobile.....	24
III.1.4 Microphone piézoélectrique.....	24

III.1.5 Microphone à condensateur.....	24
III.1.6 Microphone à électret.....	24
III.1.7 Microphone " à charbon ".....	25
III.1.8 Microphones électrodynamiques.....	25
III.2 Le Microphone à fibre optique.....	26
III.2.1 La cavité et la chambre arrière.....	27
III.2.2 La plaque arrière.....	27
III.2.3 La fibre optique .....	28
III.2.4 La membrane.....	29
III.3 Les paramètres électriques équivalents à un microphone à fibre optique.....	29

#### **Chapitre IV:L'ETUDE DU MOUVEMENT DE LA MEMBRANE DU MICROPHONE.....**

Introduction .....	31
IV.1 L'équation d'onde acoustique d'une membrane.....	32
IV.2 Equation de mouvement de la membrane d'un microphone à fibre optique.....	39

#### **Chapitre V : MODELISATION DU MOUVEMENT DE LA MEMBRANE DU MICROPHONE A FIBRE OPTIQUE.....**

Introduction.....	42
V.1 Les étapes de modélisation .....	43
V.2 Le modèle théorique.....	44
V.3 L'organigramme illustrant les différentes étapes de modélisation .....	50
V.4 La programmation informatique .....	52
v.4.1. Programme de cacul des zéros de la fonction de Bessel.....	52
V.4.2 Programme de calcul du déplacement de la membrane.....	53

#### **Chapitre VI : CALCULS ET COMPARAISONS.....**

Introduction.....	56
VI.1 Dimensions et paramètres.....	57
VI.2 calcul d'essais .....	58
VI.3 la comparaison des résultats .....	60
VI.3.1 Comparaison avec les relations approximatives .....	60
VI.3.2 Comparaison avec modèle de référence .....	61
VI. 4 Présentation graphique de la réponse et comparaison.....	62
VI 4.1 la sensibilité de la membrane et la qualité de réponse.....	62
VI.4.2. Le déplacement $\eta(0)$ et la pression incidente $P_i$ .....	63
VI.4.3. Le déplacement $\eta(0)$ en fonction de la fréquence $f$ .....	64
VI .4.5 Comparaison des résultats graphiques.....	65
VI .4.5.1 Première comparaison .....	66
VI .4.5.2 Deuxième comparaison .....	67

#### **Chapitre VII : RESULTAS ET ANALYSES.....**

Introduction .....	68
	69

VII.1 Influence du rayon ( $a$ ) de la membrane.....	69
VII.2 L'influence du nombre d'ouvertures de la plaque arrière .....	71
VII.3 Influence de la distance $h$ .....	71
VII.4 Influence de la tension de fixation de la membrane.....	72
VII.5. Influence de la densité surfacique de la membrane.....	73
VII.6 Influence du volume de la chambre arrière.....	74
VII.7 Influence des paramètres principaux sur la sensibilité et la bande.....	75
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	80
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	83

## *Avant Propos*

-من لا يشكر الناس لا يشكر الله-

C'est avec le plus grand plaisir que je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **F. REHOUMA**, Maître de Conférences à l'université de Ouargla et Monsieur **K.E. AIADI**, Maître Assistant Chargé de cours à l'université de Ouargla, qui m'accordé une attention particulière et un soutien spécial dans cette étude. Je les remercie aussi pour leurs conseils et les discussions menées au cours de la réalisation de ce travail. Je les prie de trouver ici, l'assurance de ma vive gratitude.

Je désigne tous mes compliments à Monsieur **M.T MEFTAH**, Professeur et Directeur du laboratoire de recherche à l'université de Ouargla, qui me fera l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens à dresser mes reconnaissances à Monsieur **D. BENATTOUS**, Maître de Conférences à l'université de El Oued et Monsieur **O. BOUKRAA**, Maître de Conférences à l'université de Ouargla, pour avoir accepté de participer au jury de mon mémoire.

Mes vifs remerciements et ma profonde gratitude vont particulièrement envers **le staff et les enseignants** de la faculté de Sciences et Sciences de l'Ingénieur et de l'Université de Ouargla, pour les nombreux services qu'ils m'ont rendus et leurs soutiens durant ma formation en post graduation.

Mes remerciements vont également au directeur régional de université de la formation continue de Ouargla, **Mr B. DADAMOUSA**, qui ma constamment conseillé et aidé au cours de ma formation, à tous **les membres de ma famille** pour leurs soutien moral et à tous le **personnel du CFC de Ouargla**.

# INTRODUCTION



## INTRODUCTION

Les capteurs jouent le rôle des organes de sens des machines et traduisent certaines perceptions de la réalité physique environnante.

Les progrès en matière de capteurs et d'instrumentation par le développement et la mise en œuvre permettent maintenant d'accéder à la mesure des grandeurs physiques avec une très grande précision et haute fiabilité.

Une large variété d'instruments classiques à la disposition du technologue et de l'ingénieur, mais aussi certains besoins, restent mal couverts. C'est pourquoi les laboratoires de recherche développent des transducteurs fondés sur l'utilisation des nouvelles technologies (micro-électronique, optique intégrée, fibre optique ...)

Les capteurs à fibre optique, de par leurs petite taille et poids, isolation galvanique, passivité chimique et tenue en température, rendent possibles des mesures dans les milieux tels que les atmosphères sévères, chimiquement réactives ou corrosives, et partout où les difficultés d'accès sont telles que la souplesse du capteur devient primordiale.

Dans le domaine de l'acoustique, le microphone est l'instrument qui joue le rôle de bon capteur de pression acoustique par le phénomène piézoélectrique et l'effet capacitair.

La recherche de fabrication d'un capteur acoustique miniaturisé, moins compliqué dans la conception et plus fiable en fréquences ultra son, donne naissance à l'idée de transformer un microphone classique, qui fonctionne sous l'effet piézo-électrique ou l'effet capacitair en un microphone qui fonctionne à base de fibre optique.

Le microphone à fibre optique est un capteur en cours de développement base sur la nouvelle technologie des fibres optiques dans le but d'utilisation pour différentes mesures. Il permet de détecter des ondes sonores et des pressions acoustiques dans les milieux extrêmement sévères (haute température, champ électrique ou champ magnétique intense). Le microphone à fibre optique est un convertisseur acoustique-optique.

La membrane joue le rôle principal dans un microphone à fibre optique. Le déplacement de la membrane transforme le signal acoustique (pression sur la membrane) en un signal optique.

Pour que cette membrane soit fiable et sensible aux petites variations de son et de pression acoustique, on cherche à améliorer ses caractéristiques mécaniques (dimensions et matériau), élargir la plage de fréquence de fonctionnement et obtenir une bonne qualité de réponse du microphone.

L'objet de ce mémoire est d'améliorer le fonctionnement du microphone optique sur une large bande de fréquence acoustique (sonore et ultrasonore). Cette étude est présentée comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le domaine du son et l'acoustique et la description physique du son.

Le deuxième chapitre porte sur les capteurs à fibre optique et leurs mécanismes de fonctionnement.

Le principe de fonctionnement du microphone à fibre optique est présenté dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième et le cinquième chapitre, on présente le mouvement de la membrane, les étapes de sa modélisation et le programme informatique de calculs.

Les calculs, les résultats et les analyses sont présentés dans les deux derniers chapitres.

# Chapitre I

## Le son et l'acoustique

## INTRODUCTION

Le son est un phénomène important dans la vie humaine. Il est difficile de s'en isoler. Il est le mode de communication le plus utilisé. Un être humain n'a pas besoin d'énergie extérieure pour parler [1] [2] [3].

De plus, le son crée une ambiance particulière dans différents domaines. On le trouve dans la vie quotidienne (audio et audiovisuel), dans les domaines de l'architecture, l'électronique, la physiologie, la biologie, et la médecine. Dans l'industrie, il est exploité dans la topographie sous-marine, dans le contrôle des structures industrielles, dans la caractérisation et la détection des défauts, etc...

### I.2. Description physique du son

Le son est une perturbation (vibration) des particules de l'air provoqués par une source sonore et captés par nos oreilles, sous la forme de sons vocaux, musicaux ou de bruit [2] [4].

Dans la nature, les sons sont générés par différentes sources :

-sources impulsionnelles comme les chocs, les détonations, les percussions

-sources aléatoires : les vagues, le vent...

-sources harmoniques : les instruments musicaux et électroniques

Physiquement, on peut définir le son comme une oscillation mécanique de pression qui se propage dans un milieu (fluide, solide) longitudinalement avec une vitesse qui s'appelle célérité du son [2] [5].

Donc, le son est le phénomène physique d'origine mécanique consistant en une variation de pression (très faible), donnant naissance à une onde.

Quand on veut caractériser un son selon son contenu fréquentiel, on distingue généralement [5]:

**-Le son pur** : son sinusoïdal caractérisé par sa fréquence d'oscillation.

-**Le son complexe harmonique** : c'est une superposition de sons purs dont les fréquences sont multiples d'une fréquence appelée : fréquence fondamentale.

-**Le son complexe inharmonique** : C'est une superposition de sons purs dont les fréquences n'ont pas de lien entre elles.

-**Le bruit** : il correspond à une variation «aléatoire» de la pression acoustique.

Dans la pratique les sons rencontrés comportent généralement une composante bruitée et une composante harmonique, et la vibration sonore se traduit par la modification spatiale et temporelle des grandeurs caractéristiques du milieu de propagation, tel que :

- la pression
- la vitesses des particules

### I.3. L'acoustique et l'onde acoustique

L'acoustique, est la science qui étudie les propriétés du son ; comment naît le son, comment ce propagent, les sources et les capteurs du son, les ondes et les champs acoustiques ?.

#### I.3.1 Ondes acoustiques

Les ondes acoustiques (sonores) sont des vibrations mécaniques de faibles amplitudes qui se propagent dans un milieu élastique [5][2].

Les caractéristiques de l'onde :

**La célérité** (ou vitesse de propagation) est la vitesse à laquelle se propage l'onde acoustique et dépend des caractéristiques physiques du milieu. Célérité du son dans l'air [1][2] :

343 m/s	à 20° C
331,29 m/s	à 0° C.

la vitesse du son dans quelques matériaux est donnée dans le tableau (I.1)

**La période** de l'onde est l'intervalle de temps qui sépare deux états vibratoires identiques et successifs d'un point du milieu de propagation.

**La fréquence** est le nombre de périodes par unité de temps (nombre d'oscillations par seconde)

**La pulsation** est définie par la relation:  $\omega = 2\pi f$

**La longueur d'onde** est la distance parcourue par l'onde en une période.  $\lambda = cT = c / f$

Tableau I.1

Vitesse du son dans quelques matériaux (à 21°C) en m/s [2].

<u>Matériau</u>	<u>Vitesse du son</u>
<i>Air</i>	344
<i>Bois résineux</i>	3 350
<i>Eau douce</i>	1 480
<i>Aluminium</i>	5 150
<i>Eau salée</i>	1 520
<i>Acier léger</i>	5 050
<i>Glace</i>	3 200
<i>Plomb</i>	1 220
<i>Vitre</i>	5 200
<i>Plexiglas</i>	1 800
<i>Panneau de gypse</i>	6 800
<i>Béton</i>	3 400

### I.3.2 Classification des ondes acoustiques

Les ondes acoustiques sont des ondes mécaniques que l'on classe selon leur fréquence  $f$  [6][3]:

- infrasons :  $f < 20$  Hz ;
- sons audibles :  $20$  Hz  $< f < 20$  kHz ;
- ultrasons :  $20$  kHz  $< f < 200$  MHz ;
- hyper sons :  $f > 200$  MHz.

### I.3.3. Equation des ondes acoustiques

Les ondes se propagent dans tout milieu à la fois massique et élastique. La pression acoustique est régie par une relation appelée équation d'onde donnée par [2] [5]:

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad \text{où } \Delta \text{ est l'opérateur laplacien.}$$

$c$  : célérité du son

$p$  : pression

Dans le cas d'une onde sinusoïdale de pulsation  $\omega$  :

$$p(\underline{r}, t) = p(\underline{r}) \cdot \cos(\omega t),$$

On trouve l'équation dite de **Helmholtz** :

$$\Delta p(\underline{r}) + k^2 \cdot p(\underline{r}) = 0 \quad \text{où } k : \text{ est l'amplitude du vecteur d'onde est définie par}$$

$$k = \frac{\omega}{c}$$

#### I.4. La Pression acoustique

La pression acoustique correspond à une variation de la pression atmosphérique, variation induite par la vibration des molécules d'air. Elle est reliée à une intensité acoustique et une impédance du milieu de propagation.

L'unité de mesure de la pression acoustique est le **Pascal** (Pa) :

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Les ondes sonores aériennes sont de très petites oscillations de la pression de l'air. Les pressions perceptibles vont du seuil d'audibilité  $p_0 = 0.00002 \text{ Pa}$  jusque à  $200 \text{ Pa}$  (Tableau I.2) [2].

#### I.5. La force sonore (La sonie)

La sonie ou la "force sonore" est la sensibilité en fonction de la fréquence. Par exemple, pour provoquer une sensation auditive à  $50 \text{ Hz}$ , une pression acoustique de  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$  est nécessaire mais à  $4000 \text{ Hz}$ , une pression de moins de  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  suffit. Le seuil de sensation est variable en fonction de la fréquence. Il est possible de définir des courbes

d'isosensation pour des niveaux sonores donnés à 1000 Hz appelés phones ; ces courbes ont été établies en 1918 par FLETCHER et MUNSON [7]

## I. 6. L'intensité et la puissance d'une onde sonore

Les ondes sonores mettent en mouvement des particules de milieu élastique. Elles transportent une énergie sonore exprimée principalement par l'intensité et la puissance acoustiques [4][7].

La puissance acoustique est l'énergie communiquée dans un volume et l'intensité est la puissance par unité de surface.

$$I = \frac{P_w}{S}$$

$P_w$  : puissance

$S$  : surface

L'unité de  $I$  : est  $W/m^2$

## I.7. Le niveau sonore

En acoustique, les niveaux sonores sont mesurés par l'échelle des décibels (**dB**). L'échelle dB est une échelle relative (sans dimensions) que l'on retrouve dans plusieurs domaines de la physique. La spécificité de chaque domaine apparaît dans le choix des valeurs de référence prises pour établir les niveaux zéros de l'échelle.

Cette échelle donne un rapport important entre les sons perçus les plus faibles (environ  $10^{-5}$  Pa) et les sons les plus forts (quelques dizaines de Pa). Pour la mesure de la pression acoustique, on adopte une échelle logarithmique.

Le niveau de pression acoustique (ou niveau SPL, en anglais Sound Pressure Level), dont l'unité est le décibel, est défini par[1][ 7] :

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (\text{dB}) ; \quad P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

Le choix d'utilisation des grandeurs logarithmiques en acoustique -l'échelle de décibel- est basé sur deux raisons :

- Une raison pratique. Les pressions acoustiques tolérées par l'oreille couvrent une large étendue de  $10^{-5}$  Pa à 10 Pa : il y a un rapport de  $10^6$ . L'échelle logarithmique compresse la gamme de valeurs utilisées du



son faible (0 dB) au son fort (120 dB) dans un intervalle réduit plus simple à manipuler.

- Une raison physiologique. La sensation de force d'un son varie avec le logarithme de l'intensité sonore et non avec l'intensité du son elle-même.

Dans cette échelle, les sons audibles s'étendent de 0 à 120 dB. Un niveau sonore de 180 dB correspond à 1/5 de la pression atmosphérique (Tableau I.2) [3].

## I.8. Hauteur d'un son

La hauteur du son est la fréquence dans laquelle le son est produit ou émis. On distingue trois intervalles (octaves) pour les sons audibles [3] :

- les basses fréquences (graves) de 20 à 200 Hz
- les médiums de 200 à 2000 Hz
- les hautes fréquences (aiguës) de 2000 à 20000 Hz.

## I.9. Timbre d'un son

Puisque une onde sonore est caractérisée par une amplitude et une fréquence, on trouve plusieurs sons différents ayant la même amplitude et la même fréquence, mais distincts par la forme de l'onde.

Le timbre du son dépend de la forme de l'onde du signal sonore. En général, il est défini comme : l'attribut de la sensation auditive suivant lequel un auditeur peut différencier deux sons présentés dans les mêmes conditions et ayant la même sonie et la même hauteur.

## I.10. Impédance acoustique

Comme en électricité, la notion d'impédance n'est valable que pour les systèmes linéaires ; elle est définie à partir de grandeurs mesurées dans le domaine fréquentiel. En acoustique, l'impédance est le quotient, noté  $Z(\omega)$ , d'une grandeur dynamique (pression) et une grandeur cinématique (vitesse) [2][3][7].

L'admittance acoustique  $\underline{Y}(\omega)$  est le rapport inverse de l'impédance. Notons que l'admittance scalaire n'est pas l'inverse d'une impédance scalaire mais est un élément de la matrice  $Y$ :

$$[Y] = [Z]^{-1} \quad : y_{ij} \text{ n'est pas égal à } 1/z_{ij}.$$

Tableau I.2 :  
Différentes valeurs de pression acoustique et leurs niveaux d'intensité [2].

<b>Pression acoustique</b>	<b>Niveau de pression acoustique</b>	<b>Environnement type</b>	<b>Description subjective moyenne</b>
N/m <sup>2</sup>	dB		
200	140	Décollage d'un avion militaire à une distance de 30 m	Intolérable
20	120	Chaudière (niveaux maximaux) Salle des machines d'un navire (vitesse maximale)	
6,3	110	Poinçonneuse automatique (position de l'opérateur) Atelier de fabrication de tôle – meulage à la main Usine de fabrication des textiles	
2	100	Atelier à tour automatique Rame de métro souterrain (niveaux maximaux) Salle d'imprimerie	Très bruyant
6,3 x 10 <sup>-1</sup>	90	Gros camion à une distance de 6 m Chantier de construction – forage pneumatique	
2 x 10 <sup>-1</sup>	80	Bordure d'une rue achalandée Bureau avec machines de tabulation	
6,3 x 10 <sup>-2</sup>	70	Radio jouant fort (dans une chambre moyenne à la maison)	Bruyant
2 x 10 <sup>-2</sup>	60	Restaurant Grand magasin	
6,3 x 10 <sup>-3</sup>	50	Bruit de conversation à une distance de 1 m Bureau normal	Tranquille
2 x 10 <sup>-3</sup>	40	Zone de banlieue moyenne Conversation murmurée à une distance de 2 m Secteur résidentiel la nuit	
6,3 x 10 <sup>-4</sup> 2 x 10 <sup>-4</sup>	30 20	Bruit de fond dans un studio de télévision ou d'enregistrement	Très calme
6,3 x 10 <sup>-5</sup> 2 x 10 <sup>-5</sup>	10 0	Seuil normal d'audition	

## **Chapitre II**

# **Les capteurs à fibre optique**

## **II.1. Généralités**

La détection et la transmission du son nécessitent l'emploi de capteurs convenables. La fonction de ce capteur est de capter le signal sonore (la pression acoustique) et de le transformer en une autre forme de signal qui est l'image fidèle du signal sonore capté. A ce titre, un capteur acoustique est un transducteur d'énergie; il transforme l'énergie acoustique en une autre forme d'énergie.

Le fonctionnement d'un capteur sonore se résume de la façon suivante : capture d'énergie de vibrations sonores puis transformations en une autre forme d'énergie.

Pratiquement, les capteurs ont un large domaine d'utilisation dans notre vie, tels qu'ils sont utilisés pour la transmission du son et des informations : transmissions téléphoniques, émission et réception des ondes acoustique, topographie sous-marine, mesures industrielles et actuellement communication avec les machines et les ordinateurs par voix humaine.

Un capteur à fibre optique est un dispositif comprenant au moins une fibre et permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs observées par l'intermédiaire d'ondes lumineuses circulant dans la ou les fibres [8].

Les capteurs à fibres optiques sont issus de la rencontre de deux technologies : les fibres optiques et l'optoélectronique. L'une et l'autre ont connu un développement extraordinaire surtout dans le domaine de la télécommunication ces deux dernières décennies : amélioration des performances, diminution des coûts, miniaturisation. Tout cela a permis l'émergence de ces capteurs dont le champ d'application recouvre entièrement celui des capteurs traditionnels et offre également de nouvelles possibilités.

Aussi les assemblages comportant un capteur conventionnel et un système de transmission par fibres optiques sont des transducteurs, avec une fibre optique et une l'interface entre la fibre et le milieu externe dans le but de transformer des mesures extérieures en signaux optiques [9].

Avant la description du capteur à fibre optique dans ce chapitre, nous allons présenter l'oreille , comme capteur physiologique référence, et le capteur classique.



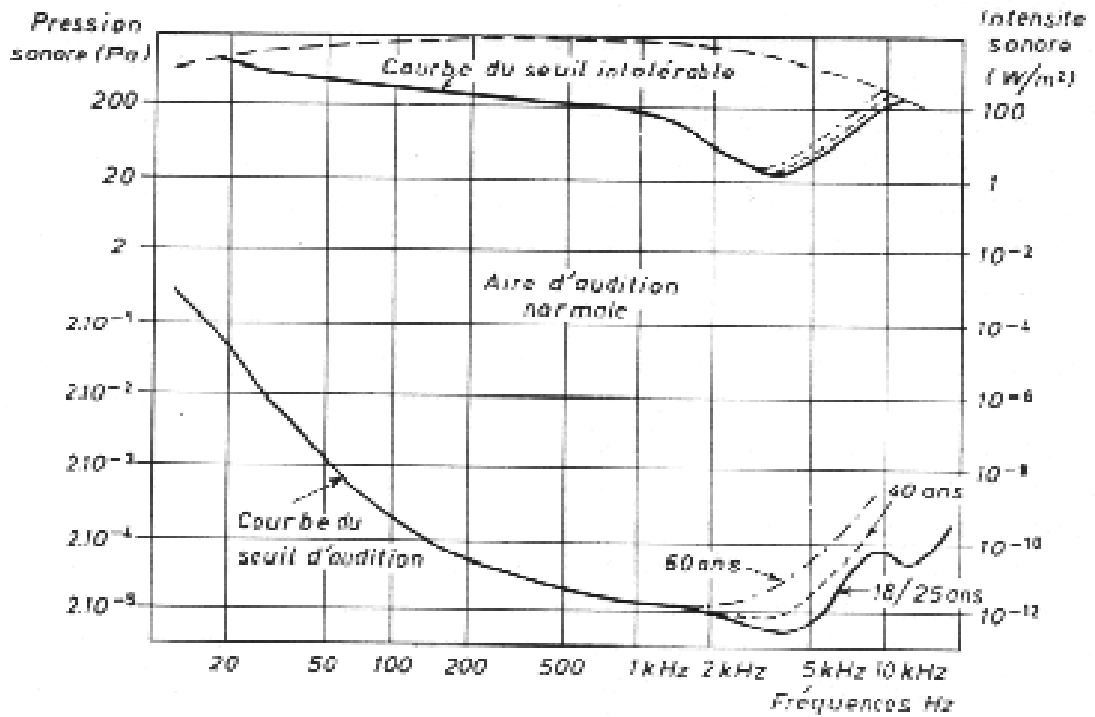
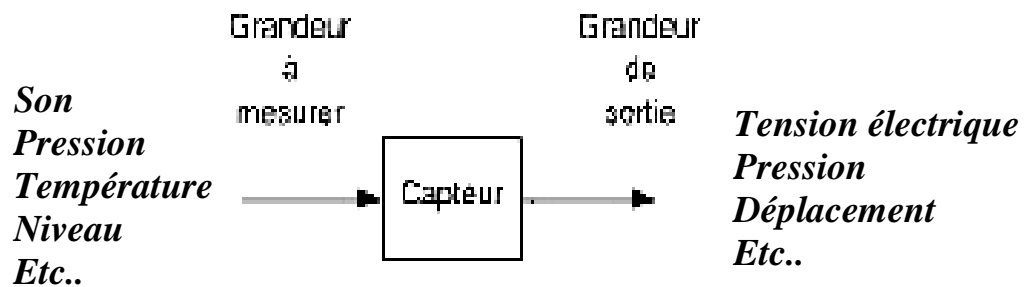


Fig 2.2 : courbes de sensation de l'oreille

### II.3 Capteur classique

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique)[7]. Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



### II.3.1. Capteur actif et passif

Un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement [7].

Un capteur passif est fondé sur le principe de la variation de l'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée, le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteurs est la variation de l'une de ses dimensions ; le cas de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile, ou le principe d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression, accélération ...

Exemple : une membrane soumise à une différence de pression.

Les capteurs les plus classiques sont basés sur :

- **L'effet thermoélectrique :**

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures différentes, est le siège d'une force électromotrice.

- **L'effet piézo-électrique :**

Une contrainte mécanique appliquée à certains matériaux piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une charge électrique.

- **L'effet d'induction électromagnétique :**

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique.

- **L'effet photoélectrique :**

C'est la libération de charges électriques de la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux.

- **L'effet Hall :**

le champ magnétique crée dans le matériau un champ électrique

- **L'effet photovoltaïque :**

C'est une modification de la tension aux bornes d'une jonction PN provoquée par des électrons libérés au voisinage de cette jonction.

### II.3.2\_Quelques types de capteurs classiques [7]

- **Les capteurs de position et de déplacement :**
  - Potentiomètre résistif
  - Capteurs inductifs
  - Capteurs capacitifs
  - Capteurs de proximité
  
- **Les capteurs de déformation, de force, de pesage, de couple :**
  - Jauges d'extensiométrie
  - Capteurs piézoélectriques
- **Les capteurs tachymétriques (de vitesse) :**
  - Génératrice à courant continu
  - Capteur à reluctance variable
  
- **Les capteurs d'humidité**
  
- **Les capteurs magnétiques**
  
- **Les capteurs de température :**
  - Varistances
  - Thermocouples
  - Capteurs au silicium
  - Thermistances CTN
  - Thermistances CTP
- **Les capteurs de pression et acoustique :**
  - Hydrophones
  - Microphones.

### II.4. Capteur à fibre optique

De manière générale, l'architecture d'un capteur à fibres optiques comporte a minima les parties suivantes : une fibre optique, un transducteur, un émetteur de lumière, un récepteur de lumière, un circuit d'alimentation, une chaîne de traitement du signal.[8 ][9 ][10]



### Schéma d'un capteur à fibre optique

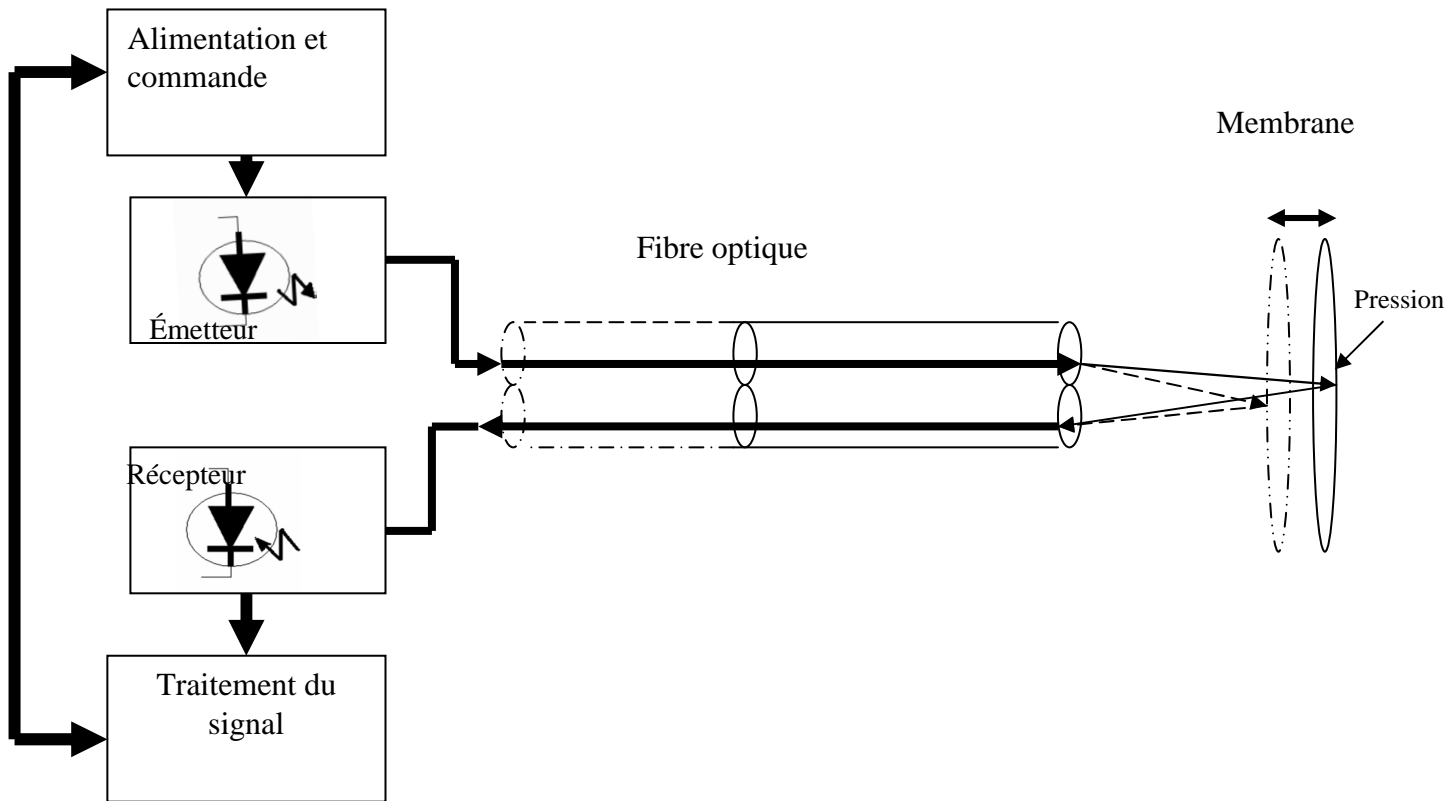


Fig 2.3 : schéma de capteur à fibre optique

#### II.4.1. La fibre optique

La fibre optique est une baguette très fine d'un matériau transparent étiré dont l'aspect filiforme lui confère de la souplesse [7][8]. Généralement, elle est composée d'un milieu diélectrique que l'on nomme cœur, recouvert d'un second milieu nommé la gaine optique (fig2.4). La fibre peut être multimode ou monomode.

La gaine optique et le cœur de la fibre sont réalisés en matériau de silice ( $\text{SiO}_2$ ) la gaine étant plus dopée avec du dioxyde de germanium ( $\text{GeO}_2$ ), afin de créer

une différence entre les indices de réfraction. L'indice de réfraction  $n_g$  (de la gaine) est inférieur à  $n_c$  (de cœur) (fig 2.5).

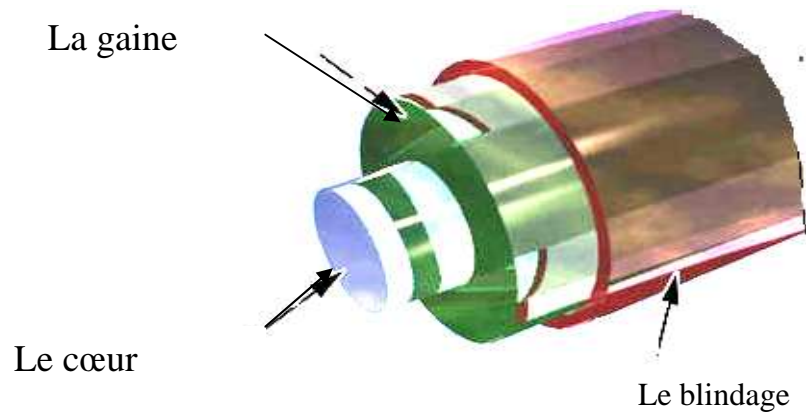


Fig 2.4 : composantes d'une fibre optique

La fibre optique est utilisée en domaine d'instrumentation pour :

- transmission d'information sous forme de signaux optiques
- effectuer des mesures dans les zones d'accès difficile
- détecter des signaux lumineux sous l'action d'une grandeur physique (température, pression, déplacement ...).

La condition à respecter dans les normes de fabrication des fibres optiques est : deux milieux d'indices de réfraction différents  $n_1 > n_2$  pour la transmission du signal (fig 2.6) [7].

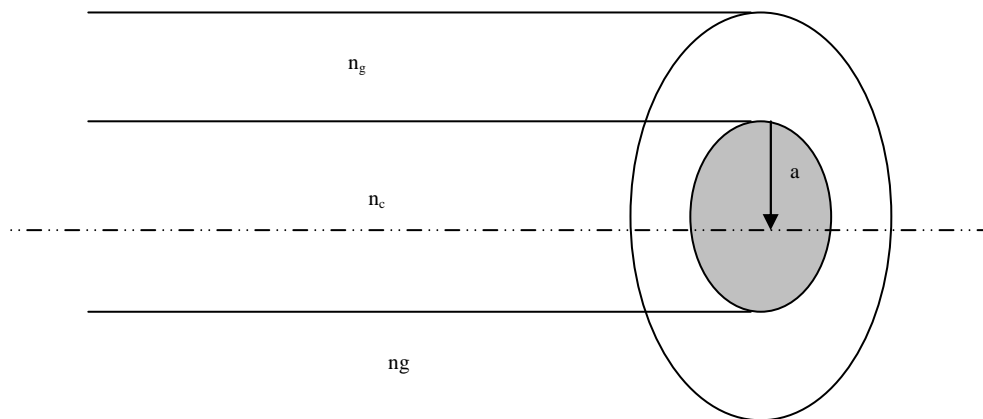


Fig. 2.5 : milieux et indices de réfraction de la fibre optique

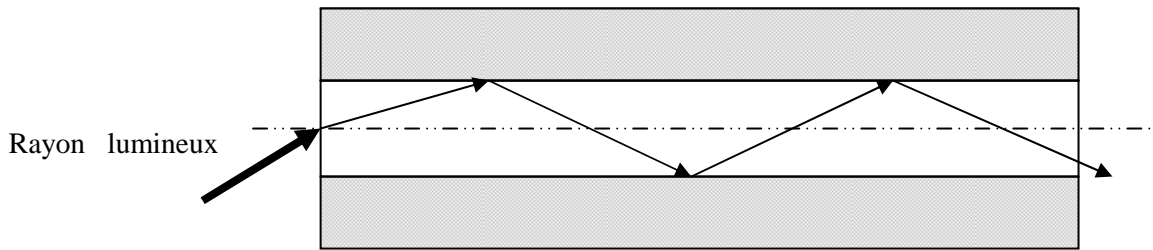


Fig. 2.6 : transmission du signal au cœur de la fibre

## II.4.2 Le transducteur

Un transducteur est l'élément qui modifie les caractéristiques de la lumière (intensité, polarisation, longueur d'onde...) par le champ environnant à mesurer. Le transducteur est une interface détectrice de grandeurs à mesurer [8][9], par exemple :

- détecteur de température
- détecteur de pression
- détecteur de phase
- détecteur de déplacement
- etc...

## II.4.3 l'émetteur de lumière

En régime continu, modulé ou impulsionnel, les sources utilisées sont les interfaces optiques d'émission [9].

Une interface optique d'émission contient un composant opto-électronique d'émission (diodes électroluminescentes (DEL), diodes laser (DL), diodes superluminescentes (DSL)) qui effectue la conversion électrique/optique. Chacune de ces sources possède des caractéristiques différentes (puissance, dimensions, faisabilité, prix ...)[9][10].

#### **II.4.4. le récepteur de lumière**

Le détecteur de lumière ou l'interface optique de réception est constituée d'une photodiode (PD) qui effectue la conversion inverse [8], [10].

#### **II.4.5. le circuit d'alimentation**

L'alimentation du capteur est plus souvent classique ; l'énergie via des fils électrique, mais parfois des batteries ou d'opto-alimentations sont utilisées.

#### **II.4.6. la chaîne de traitement**

La chaîne de traitement dépend du mode d'utilisation du capteur et du montage optique et peut comporter :

- des étages d'amplification
- un circuit de filtrage
- un démodulateur d'informations

#### **II.4.7. Avantages des capteurs à fibre optique**

Les principaux avantages des capteurs à fibre optique sont liés soit aux propriétés des fibres optiques soit aux propriétés spécifiques de certains systèmes du point de vue performances, dimensions, fonctionnement et fiabilité [7], [8].

##### **Avantages liés aux fibres optiques**

- Discret, le capteur ne perturbe pas son environnement. Il peut notamment être employé en environnement explosif;
- son insensibilité électromagnétique est parfaite (très hautes tensions, parasites électromagnétiques, discrétion);
- sa dimension transversale est très faible ; la petitesse du diamètre des fibres conduit à trois avantages pour le capteur : une faible masse, un faible encombrement et une grande souplesse d'utilisation.
- sa dimension longitudinale est grande : le capteur peut être positionné à grande distance, sans perte de signal;

-sa légèreté (associée à l'absence de conduction de la chaleur) en fait un candidat pour les applications spatiales et aéronautiques.

### **Avantages spécifiques du système**

- plus grande sensibilité que les capteurs traditionnels ; elle peut être extrême et seulement limitée par le bruit photonique <sup>1</sup>.
- grande souplesse de configuration géométrique : le capteur autorise notamment des mesures sans contact sur des objets en mouvement, ou dans des milieux interdisant tout contact physique (milieux en haute température, en haute radiation...).
- possibilité de fonctionner à hautes températures. Les fibres utilisées sont le plus souvent en silice, parfois en plastique. La silice a un point de fusion à 1850°C et peut transmettre sans problème jusqu'à 600 à 700°C. Dans la pratique, c'est l'enduction extérieure en époxyacrylate qui limite la température de ces fibres entre -30°C et +60°C. Des fibres spéciales sont utilisées dans des environnements à hautes températures. Une enduction polymères de polyamide permet de fonctionner jusqu'à 400°C par exemple;
- bonne résistance aux rayonnements nucléaires ainsi qu'aux impulsions électro - magnétiques qui seraient dues à une explosion atomique;
- bonne adaptation à toute mesure à distance : le capteur à fibres optiques se prête à la télétransmission pour le contrôle des processus industriels mettant en oeuvre des matières toxiques ou dangereuses (certains lasers, chimie pétrolière, centrales nucléaires).

---

<sup>1</sup> le bruit quantique ou le bruit de photon produit par le signal optique.

**Chapitre III**

**Les Microphones**

## INTRODUCTION

Le microphone est un capteur électroacoustiques ou opto-acoustique qui transforme les ondes acoustiques en signal électrique ou optique. Il comporte une membrane sensible à la pression acoustique [7].

Le microphone est le plus important capteur en acoustique : il transforme la variation de pression en variation de signal électrique ou optique. Au cours de cette transformation deux étapes sont distinguées :

- la transformation acoustique -> mécanique
- la transformation mécanique -> électrique ou optique.

Dans le présent chapitre, on traite le microphone classique et le microphone à fibre optique.

### III.1 Le Microphone classique

Le microphone classique, généralement, est un transducteur électroacoustique qui transforme les sons en signal électrique.

Pour cette transformation, l'un des principes physiques suivants est utilisé: principe piézo-électrique, électromagnétique (ou électrodynamique) et électrostatique [1] [3][6].

Le schéma bloc d'un microphone est représenté dans le fig 3.1 ;

A : L'élément transducteur

B : Le boîtier du microphone

C : Le générateur E et sa résistance interne  $R_i$

La forme ainsi que les ouvertures du boîtier vont avoir une grande importance sur une des qualités du microphone, la directivité.

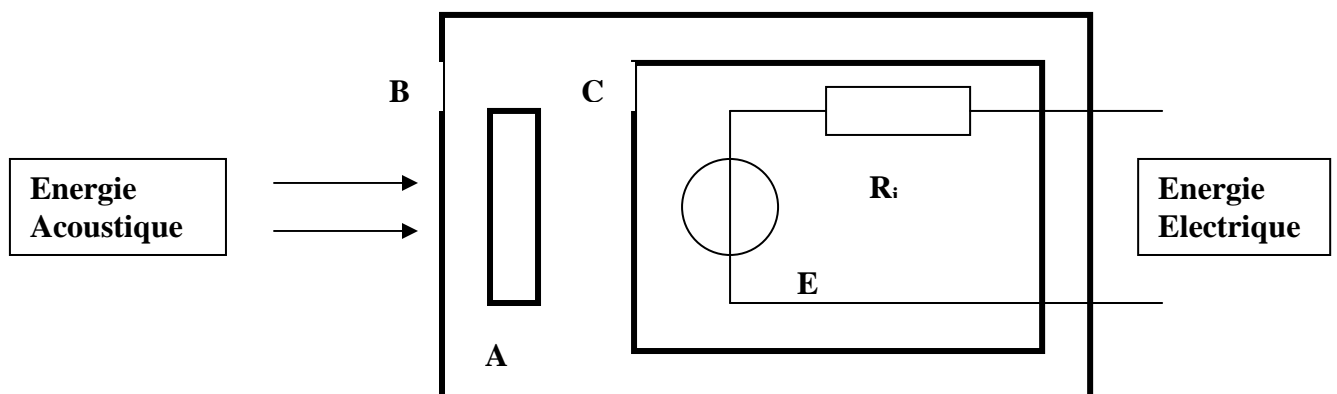


Fig 3.1: schéma d'un Microphone

Les microphones sont classés selon leurs propriétés acoustiques et plus particulièrement suivant leur directivité (sensibilité au champ acoustique) :

- les microphones à pression
- les microphones à gradient de pression
- les microphones mixtes.

### **III.1.1 Microphone à ruban**

Un ruban métallique (ou alliage conducteur) se déplace au milieu d'un champ magnétique, ce qui modifie le circuit magnétique et par conséquent le courant circulant dans le circuit. Les variations de courants se retrouvent au secondaire du transformateur [7].

Ce type de microphone offre une haute qualité ce qui lui a valu une grande utilisation dans les studios. Ils étaient surtout sensibles aux chocs et aux vents. Il avait impérativement besoin d'un transformateur.

### **III.1.2 Microphone à bobine mobile**

La membrane est solidaire d'une bobine mobile qui se déplace dans l'entrefer d'un aimant permanent puissant. La loi de Faraday stipule que tout déplacement d'une bobine dans un champ magnétique engendre une force électromotrice à ses bornes proportionnelle à son déplacement. C'est le fonctionnement inverse d'un haut-parleur.

### **III.1.3 Microphone piézoélectrique**

La membrane déforme une petite pastille piézo-électrique. Il s'agit d'un matériau présentant une structure atomique cristalline comme le quartz. Un tel matériau présente aux surfaces une force électromotrice proportionnelle à la déformation mécanique. La métallisation des surfaces permet de " récupérer " cette tension

### **III.1.4 Microphone à condensateur**

La capsule est constituée d'un condensateur variable dont une des armatures est une membrane mobile d'un poids négligeable tendue très près d'une armature fixe.

Pour fonctionner, le condensateur doit être polarisé par une tension électrique de l'ordre de 50V à 60V. Les déplacements de la membrane entraînent une



variation de capacité, qui est traduite par une variation de tension aux bornes de la résistance de charge.

### **III.1.5 Microphone à électret**

Ce sont des microphones à condensateur n'ayant pas besoin d'une polarisation aussi élevée pour fonctionner. Certains plastiques conservent une certaine polarisation (orientation électrique des molécules). Par exemple, un film de polycarbonate métallisé, polarisé sous une tension de 3kV dans une étuve à 120 degrés Celsius puis refroidi brusquement, conserve une polarisation de manière définitive : C'est un électret.

### **III.1.6 Microphone " à charbon "**

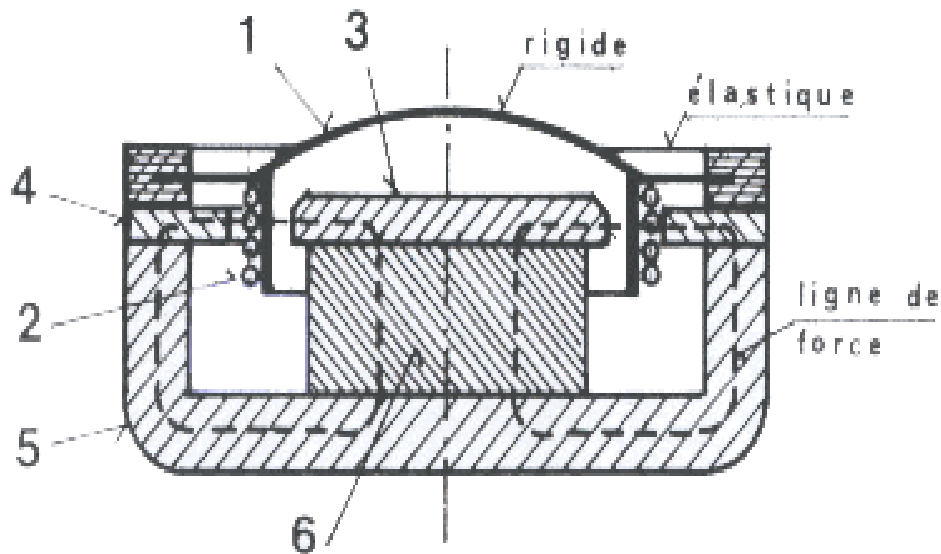
Le fonctionnement repose sur les contacts imparfaits des grains de charbon entre elles. Les granules de charbon remplissent un volume fermé par la membrane. Le déplacement de celle-ci entraîne une variation de résistance qui est transmise par le transformateur. C'est le plus vieux système de microphone (inventé par M.Hughes) et il a été utilisé par tous les appareils téléphoniques jusqu'à aujourd'hui.

### **III.1.6 Microphones électrodynamiques**

Les variations de pression de l'air agissent sur une membrane rigide en son milieu, souple et élastique en ses bords.

Cette membrane entraîne une bobine très légère (quelques dizaines de mg) dans l'entrefer d'un circuit magnétique ayant un aimant permanent à haute induction rémanente.

Par son déplacement, la bobine mobile coupe les lignes de force du champ magnétique présent dans l'entrefer : une force électromotrice proportionnelle aux variations de pression de l'air est engendrée dans la bobine (fig 3.2)



- 1/ Membrane en un alliage d'aluminium ou en une matière plastique
- 2/ Bobine mobile : quelques spires de fil fin
- 3/ Pièce polaire intérieure
- 4/ Pièce polaire extérieure
- 5/ Culasse pour fermer le circuit magnétique
- 6/ Aimant permanent ayant une induction rémanente élevée

Fig 3.2 Coupe schématique d'un Microphone électrodynamique

### III.2 Le Microphone à fibre optique

Le microphone à fibre optique se compose de cinq parties principales qui jouent des rôles importants dans son fonctionnement, de la réception du signal acoustique, par la membrane jusqu'à l'émission du signal optique à travers la fibre.(fig 3.3)[11][12]

Les cinq parties sont : la membrane, la cavité, la plaque arrière, la chambre arrière et la fibre optique

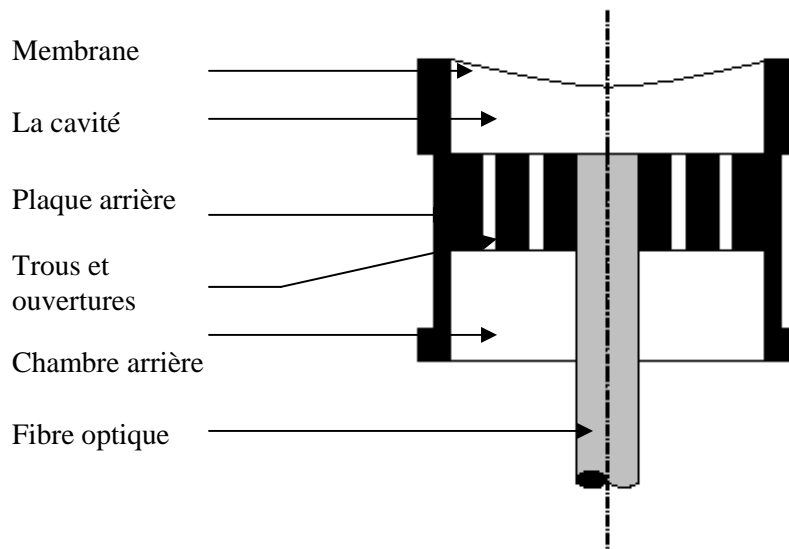


Fig. 3.3: différentes parties d'un microphone à fibre optique

### III.2.1 La cavité et la chambre arrière

La cavité et la chambre arrière sont deux enceintes remplies de particules de fluide (généralement l'air) qui communiquent entre elles par l'intermédiaire de trous.

La cavité est de faibles dimensions par rapport à la chambre arrière. Cette dernière est caractérisée par son volume.

### III.2.2 La plaque arrière

La plaque arrière contient un certain nombre de trous ou de fentes, placés sur des cercles centrés appelés ouvertures, assurant le mouvement des particules du fluide entre la cavité et la chambre arrière. (fig 3.4)

Grâce au mouvement des particules guidé par les trous, le milieu crée une réaction importante à la pression incidente sur la membrane et pour chacune des ouvertures et la chambre a sa propre impédance.

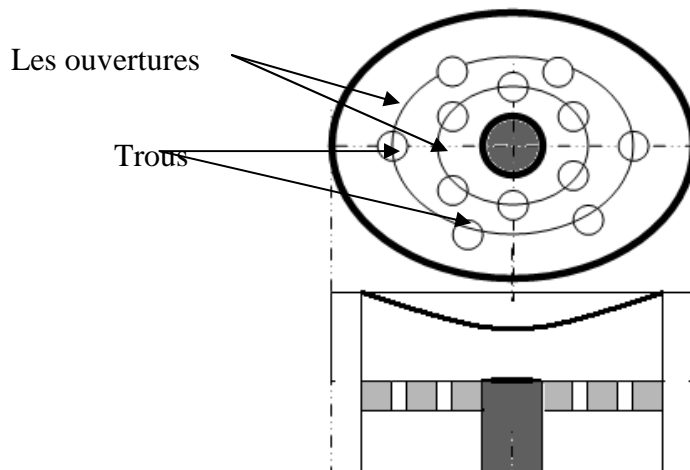


Fig 3.4 : les trous et les ouvertures de la plaque arrière

### III.2.3 La fibre optique :

La fibre optique est le guide de faisceaux lumineux émis et réfléchis entre la membrane du microphone et les organes de traitement du signal lumineux.(fig 3.5)

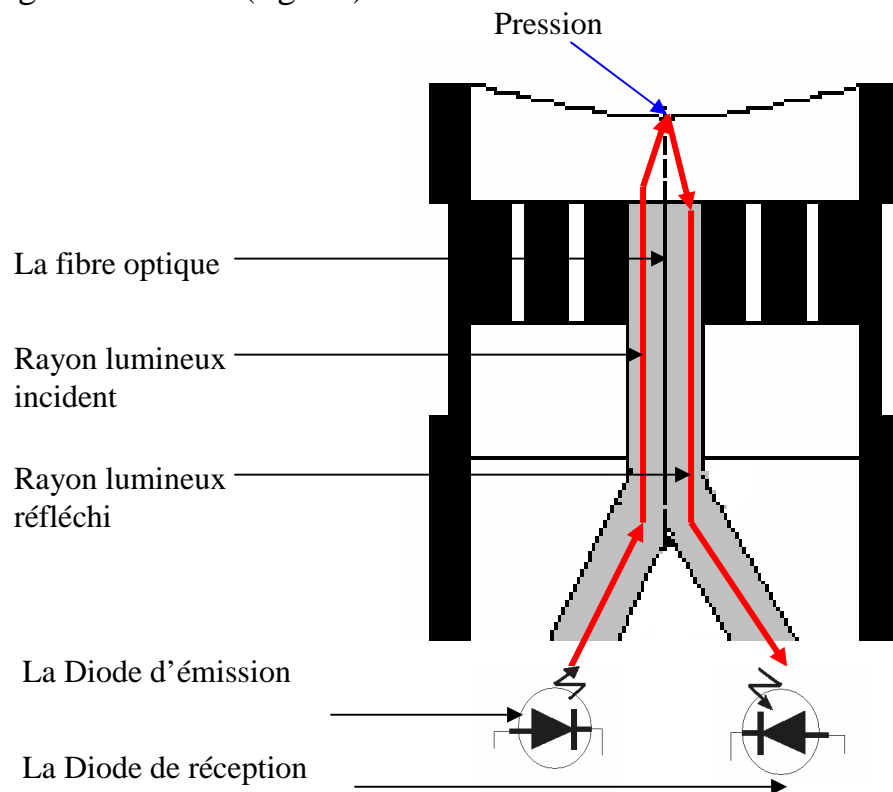


Fig 3.5 schéma du microphone à fibre optique

### III.2.4 La membrane:

La membrane est la partie utilisée comme capteur intermédiaire entre le milieu extérieur et les organes internes du microphone. Elle réfléchit le signal optique provenant de la fibre optique. Sa déformation, sous l'effet de la pression acoustique, change le signal optique réfléchi (fig 3.5).

C'est une plaque souple et fine fabriquée en matériau métallique ou plastique.

L'étude du fonctionnement et des caractéristiques de cette membrane est le sujet de ce mémoire.

### III.3 Les paramètres électriques équivalents à un microphone à fibre optique

Le circuit électrique équivalent à un microphone à fibre optique est représenté dans la figure (3.6) où :

$M_M$	La masse de membrane
$C_M$	Conformité de la membrane
$C_A$	Conformité de la couche d'air de la cavité
$R_A$	Résistance de la couche d'air de la cavité

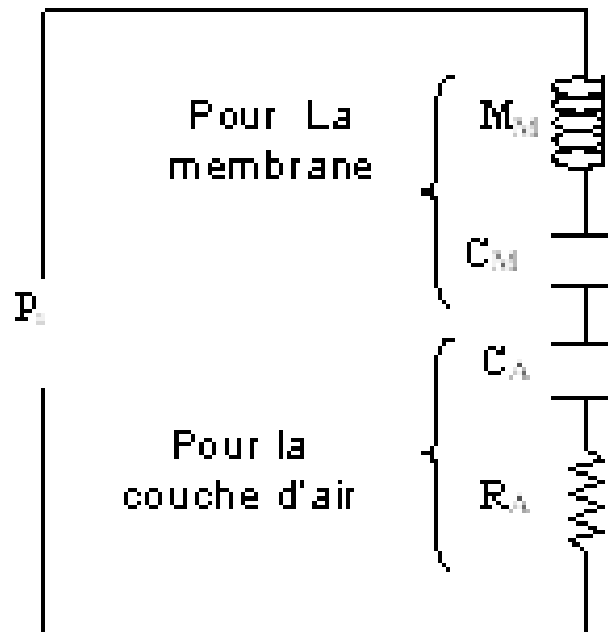


Fig3.6.: circuit équivalent mécanique du Microphone

## Chapitre IV

L'étude du mouvement de  
la membrane du microphone

## Introduction

L'étude des vibrations d'une membrane élastique dans le cas général en mode libre et sous l'action d'une pression acoustique est l'objet de ce chapitre.

On détermine les équations de mouvement de la membrane, les modes propres de vibration et l'équation de déplacement de la membrane du microphone à fibre optique.

### IV.1. L'équation d'onde acoustique d'une membrane

#### Le cas général:

L'équation d'onde acoustique dans un milieu élastique est en général sous la forme [13][14] :

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0,$$

$P$  : pression acoustique

$c_0$  : vitesse de propagation des ondes sonores dans l'air(longitudinales)

Pour une membrane tendue, sous une tension linéique  $T$  considérée constante dans toute la membrane, l'équation du mouvement à la surface peut être considéré comme l'équation du mouvement d'un élément  $dx.dy$  (figure 4.1).

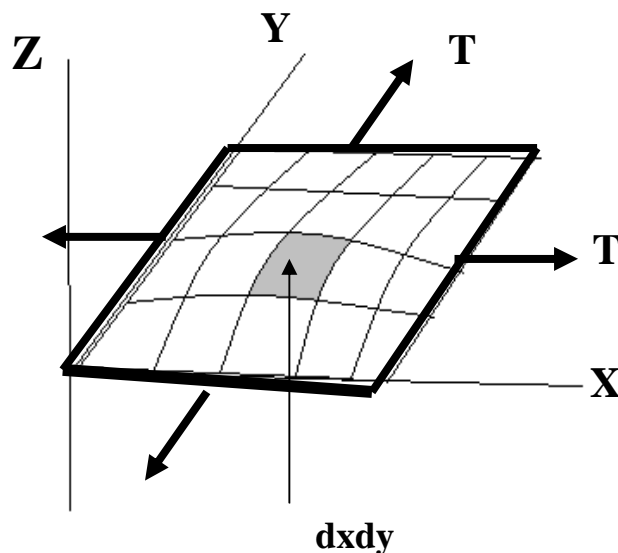


Fig 4.1 mouvement de la membrane



Si  $\eta$  est le déplacement de la membrane suivant l'axe Z, l'action d'une force  $Tdy$  sur l'axe Y, est donnée :

$$Tdy \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} dx = T \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} dx dy$$

et Tdx sur l'axe X :

$$Tdx \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} dy = T \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} dx dy$$

En totale, la force résultat :

$$F = T \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) dx dy$$

Si  $\sigma$  est la masse d'unité de surface (densité surfacique) en Kg/m<sup>2</sup>, alors la masse d'un élément en mouvement est :  $\sigma dx dy$ , et son accélération est :

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}$$

D'après la loi de la mécanique classique **F=M.γ** :

$$\sigma dx dy \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = T \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) dx dy$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \frac{T}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right)$$

C'est l'équation d'onde sur une membrane vibrante avec :

$$\frac{T}{\sigma} = v^2 \quad v : \text{vitesse de propagation,}$$

Pour les ondes sonores stationnaires, ce mouvement est considéré comme des vibrations transversales.

T : la tension de fixation, N/m

$\sigma$  : la densité surfacique, kg/m<sup>2</sup>

Les variables temps et distances ( t, x, et y ) sont indépendantes, donc :

$$\eta = f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot T(t)$$

Par dérivation :

$$-\omega^2 f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = v^2 (f_2(y) \cdot T(t) \cdot \frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} + f_1(x) \cdot T(t) \cdot \frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2})$$

Par division ;

$$\frac{1}{T(t)} \cdot \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = v^2 \left[ \frac{1}{f_1(x)} \frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{f_2(y)} \frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2} \right] = -\omega^2$$

La fonction T(t) :

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + \omega^2 T(t) = 0;$$

$$T(t) = E \cdot \sin \omega t + F \cos \omega t$$

Pour  $f_1(x)$  et  $f_2(y)$  ;

$$-\frac{\omega^2}{v^2} - \frac{1}{f_2(y)} \frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2} = \frac{1}{f_1(x)} \frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} = -a^2$$

$$\frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} + a^2 f_1(x) = 0$$

$$\frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2} + \left( \frac{\omega^2}{v^2} - a^2 \right) f_2(y) = 0$$

$$\frac{\omega^2}{v^2} - a^2 = b^2; a^2 + b^2 = \frac{\omega^2}{v^2}$$

Donc :

$$f_1(x) = A \sin ax + B \cos ax$$

$$f_2(y) = C \sin by + D \cos by$$

Dans les conditions initiales :  $t=0$   $\eta=0$

$$\eta(x, y, 0) = f_1(x).f_2(y).F = 0 \quad \Rightarrow \quad F = 0$$

$$T(t) = E \sin \omega t$$

$$\eta = f_1(x).f_2(y).T(t)$$

Dans les conditions aux limites :

$$x=0, \quad \eta=0$$

$$\eta = f_1(0).f_2(y).T(t) = 0$$

$$B.f_2(y).T(t) = 0; B = 0$$

$$y=0, \quad \eta=0$$

$$D.f_1(x).T(t) = 0; D = 0$$

$$\eta = A \sin ax + C \sin by.T(t)$$

$$x=L_1, \quad \eta=0$$

$$\sin aL_1 = 0; aL_1 = n\pi; a = \frac{n\pi}{L_1}$$

$$\eta(L_1 y, t) = A \sin aL_1 \cdot \sin by.T(t) = 0$$

$$\eta_n(x, y, t) = A_n \sin \frac{n\pi}{L_1} x \cdot \sin by.T(t)$$

Donc

$$\eta = \sum_n A_n \sin \frac{n\pi}{L_1} x \cdot \sin by.T(t)$$

Pour  $y=L_2$  ,  $\eta=0$

$$\eta(x, L_2, t) = A_n \sin \frac{n\pi}{L_1} x \cdot \sin bL_2.T(t) = 0$$

$$\sin bL_2 = 0; bL_2 = n\pi; b = \frac{n\pi}{L_2}$$

$$\eta_m = \sum_n A_{n,m} \sin \frac{n\pi}{L_1} x \cdot \sin \frac{m\pi}{L_2} y.T(t)$$

La solution générale devient :

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n,m} A_{n,m} \sin\left(\frac{n\pi x}{L_1}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{L_2}\right) \cos(\omega_{n,m} t)$$

**Cas d'une membrane circulaire :**

En utilisant le système de coordonnées polaires

$$(c^2 \nabla^2 \eta(r, \theta, t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \eta(r, \theta, t) \quad (1)$$

et

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \left[ \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right)^2 + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right] \quad (2)$$

$$\eta(r, \theta, t) = f(r, \theta) e^{i\omega t}$$

Les solutions harmoniques sont exprimées par :

$$\eta(r, \theta, t) = R(r)Q(\theta)e^{i\omega t}$$

**R** : partie radiale de l'équation

**Q** : la partie angulaire

Par la séparation des deux parties et d'après les équations (1) et (2) :

$$\frac{r^2}{R} \left( \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) + k^2 r^2 = - \frac{1}{Q} \frac{\partial^2 Q}{\partial \theta^2} \quad (3)$$

Le membre à droite de l'équation égale à une constante  $m^2$

Donc

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial \theta^2} = -m^2 Q$$

Sa solution harmonique :

$$Q(\theta) = \cos(m\theta + \varphi)$$

$\varphi$  : est la phase initiale.

$m$  : est une constante.

Aussi de l'équation (3)

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \left(k^2 - \frac{m^2}{r^2}\right)R = 0$$

La résolution de cette équation nécessite l'appel de fonctions de Bessel de premier ordre  $J_m(kr)$  et second ordre  $Y_m(kr)$  aux variables complexes, et la solution devient sous la forme :

$$R(r) = AJ_m(kr) + BY_m(kr) \quad (4)$$

Pour une membrane fixée au contour, on trouve la solution de R et Q pour les conditions aux limites :

$\eta(r, \theta, t) = 0$  si  $r = a$  : a rayon de la membrane

Dans l'équation (4)  $\lim_{kr \rightarrow 0} \mathbf{B} = 0$

$$\Longrightarrow \mathbf{B} = 0$$

Donc

$$R(r) = AJ_m(kr) \quad (5)$$

Dans les condition au contour  $R(a) = 0 \Longrightarrow J_m(ka) = 0$ .

Si on désigne par  $z_{mn}$  la  $mn^{ieme}$  valeur où la fonction de Bessel s'annule, les valeurs discrètes de k :

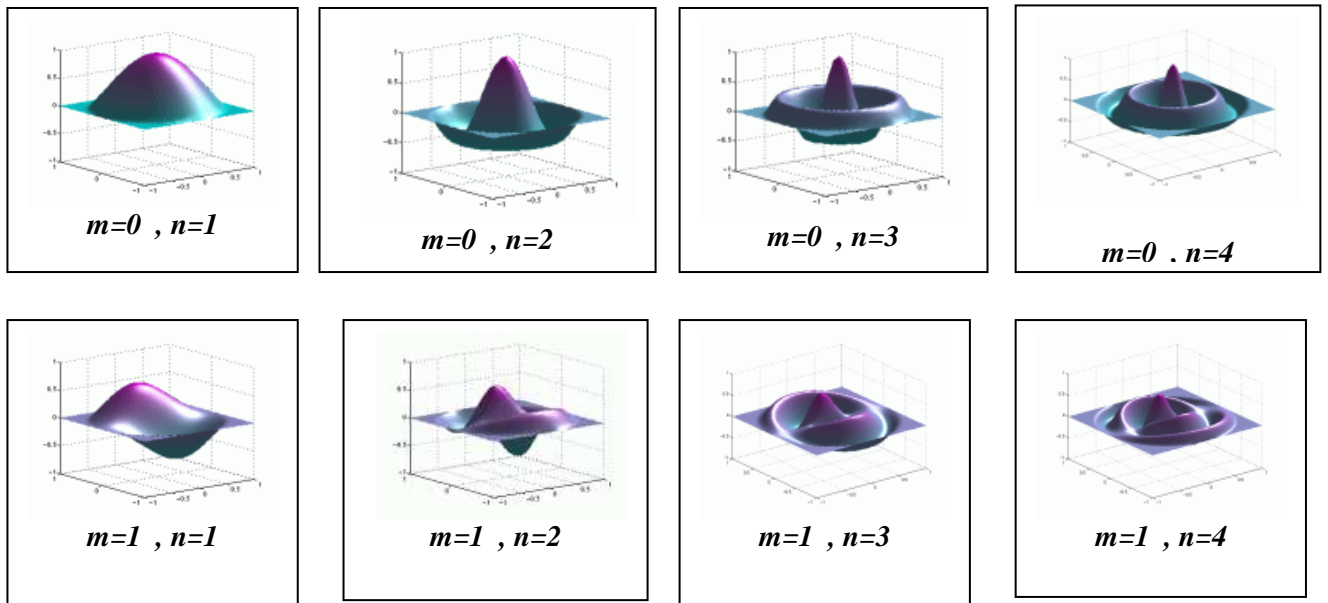
$$k_{mn} = \frac{z_{mn}}{a} .$$

Le mouvement et les modes de vibration de la membrane sont déterminés par la somme des solutions discrètes :

$$\eta(r, \theta, t) = \sum_{m,n} A_{mn} J_m(k_{mn} r) \cos(m\theta + \varphi_{mn}) e^{i\omega_{mn} t} \quad (6)$$

D'où  $k_{mn}a = z_{mn} \rightarrow \omega_{mn} = \frac{c \cdot z_{mn}}{a}$  les modes de fréquences de vibrations normales de la membrane.

Les modes de vibrations normales d'une membrane circulaire fixée au contour, figure(4.2).



Fig(4.2) modes de vibrations de la membrane

## IV.2 Equation du mouvement de la membrane d'un microphone à fibre optique

L'équation de déplacement de la membrane sous l'action d'une pression acoustique est formulée par deux termes [11],[15] :

- Premier terme dû à la pression incidente
- Deuxième terme dû à la réaction de pression sur la surface de la membrane. Cette réaction est provoquée par le mouvement de particules d'air dans les trous de la plaque arrière, figure (4.3).

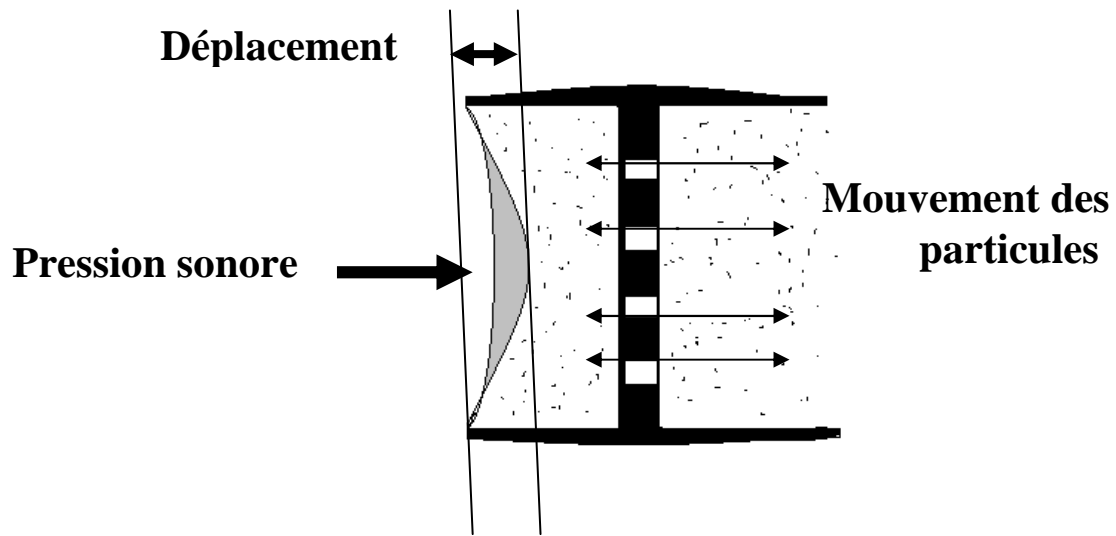


Fig. 4.3: mécanisme du mouvement de membrane et particules d'air

$$\nabla^2 \eta(r, \theta) + k^2 \eta(r, \theta) = \frac{p_i}{T} + \frac{p(r, \theta, 0)}{T} \quad (7)$$

$\eta(r, \theta)$  déplacement de la membrane

$k$  : nombre d'onde sonore sur la membrane

$\omega$  : pulsation

$\sigma_M$  : densité surfacique de la membrane

$T$  : tension de fixation

$p_i$  : pression sonore incidente

$p(r, \theta, 0)$  : réaction de pression sur la surface de membrane.

$$k = 2\pi\omega \left( \frac{\sigma_M}{T} \right)^{1/2}$$

Le déplacement de la membrane est fortement lié aux conditions aux limites :

$\eta(a, \theta) = 0$  ;  $a$  rayon de membrane

$\eta(0, \theta) =$  valeur finie

On ne s'intéresse qu'à  $\eta(0)$  parce que la réflexion du faisceau



lumineux se fait en ce point, dans le microphone à fibre optique de la figure(4.4).

la valeur moyenne de déplacement  $\eta(r)$  [15 ]:

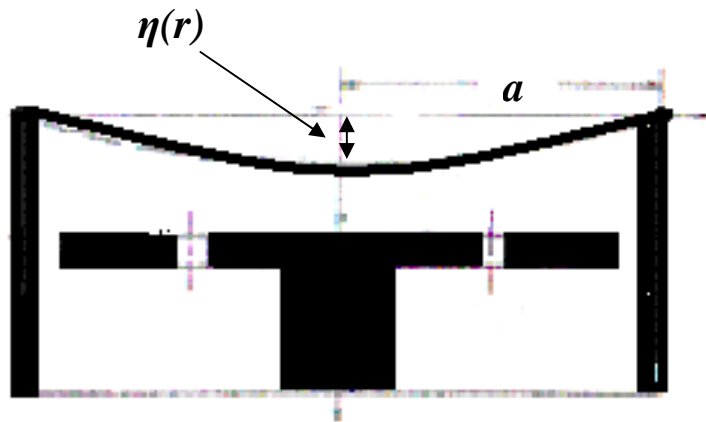


Fig. 4.4: le déplacement au point central de la membrane.

$$\langle \eta(r) \rangle = \frac{P_i}{TK^2} \cdot \frac{J_2(Ka)}{J_0(Ka) + D} \quad (8)$$

$P_i$ : pression sonore incidente

$T$ : tension de fixation

$K$ : nombre d'onde sonore sur la membrane

$J_2, J_0$ : fonctions de Bessel.

$D$ : paramètre dû à la réaction de pression sur la membrane

**CHAPITRE V**

**Modélisation du mouvement de la  
membrane du microphone à fibre  
optique**

## INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous essayons d'élaborer un programme de calculs pour un modèle théorique d'une membrane d'un microphone à fibre optique pour différents paramètres et dimensions.

La simulation du mouvement de la membrane et le programme de son déplacement est fait en 4 étapes.

Ce chapitre est consacré pour les trois premières étapes, la dernière étape sera l'objet du chapitre suivant.

### V.1. Les étapes de modélisation

#### **ETAPE 1 : la formulation mathématique:**

D'après un modèle du microphone [11], on détermine la formule de déplacement en fonction des dimensions et des paramètres du microphone.

#### **ETAPE 2 : élaboration de l'algorithme de programmation :**

Le chemin de réalisation du programme à partir des données jusqu'au résultats se fait suivant un algorithme et un organigramme de calcul.

#### **ETAPE 3 : élaboration du programme informatique.**

Les différents calculs du déplacement de la membrane seront réalisés par un programme informatique en langage **Fortran 90**

#### **ETAPE 4 : calculs et comparaison des résultats obtenus avec les autres études et essais expérimentaux**

Après l'obtention des résultats de calcul par notre programme, on utilise la comparaison des résultats avec :

- Les résultats des relations approximatives de calcul [11].
- Les résultats du modèle d'étude réalisé suivant les éléments du système de circuit équivalent du microphone à fibre optique [11] :

- la masse de la membrane
- la conformité de la membrane
- la conformité de la couche d'air
- la résistance
- le facteur de qualité.

- les résultats d'une réalisation pratique d'un modèle industriel du microphone à fibre optique utilisée dans les systèmes de communication [16].

## V.2. Le modèle théorique

On choisi le modèle théorique du microphone à fibre optique [11] comme référence de la modélisation, en utilisant les formules et les données de ce microphone pour réaliser les calculs et en comparant les résultats obtenus avec ceux de l'étude théorique de cette référence.

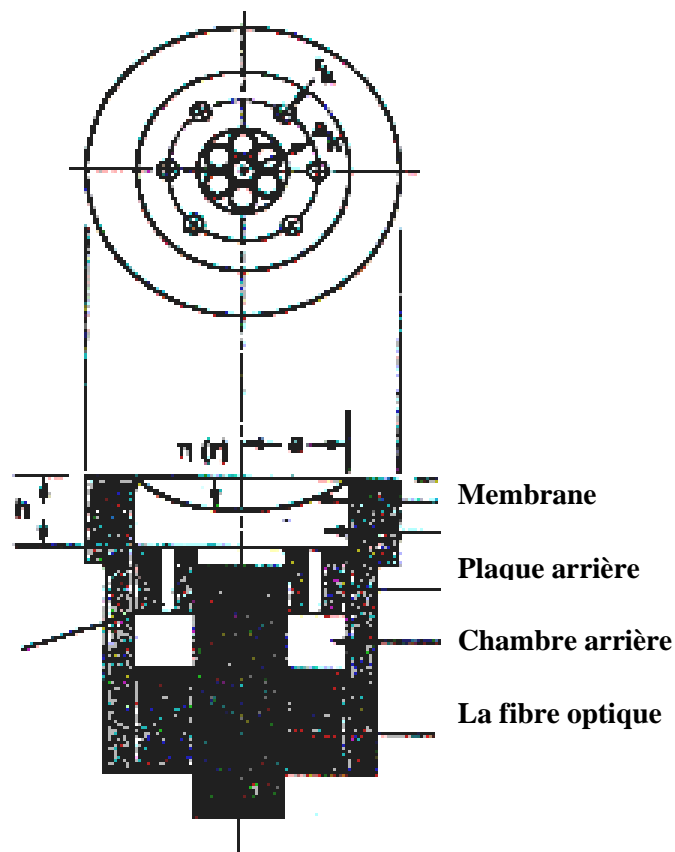


Fig.5.1 Coupe longitudinale du microphone à fibre optique

### Les paramètres du microphone à fibre optique

$a$	Rayon	$m$
$\sigma_M$	Densité surfacique	$Kg/m^2$
$T$	Tension de fixation	$N/m$
$q$	Nombre d'ouvertures	-
$r_k$	Rayon des trous des ouvertures	$m$
$a_k$	Rayon de positionnement des ouvertures	$m$
$l_k$	Profondeur des trous	$m$
$h$	Distance entre la membrane et la plaque arrière	$m$
$V$	Volume de chambre arrière	$m^3$

### Formule de calcul de déplacement de la membrane $\eta(r)$ :

Le déplacement de la membrane en fonction de  $r$  :

$$\eta(r) = \frac{P_i}{TK^2} \cdot \frac{J_0(K.r) - J_0(K.a)}{J_0(K.a) + D} \quad (1)$$

$r$ : de 0 à  $a$  (rayon de la membrane)(fig 5.2)

$P_i$ : pression incidente.

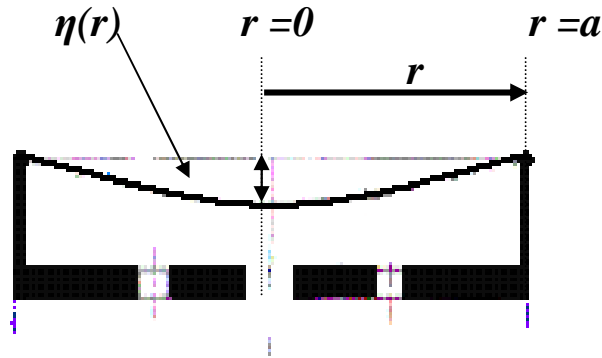


Fig 5.2 le déplacement au point  $r=0$

Au centre de la membrane (  $r=0$  ), le déplacement est :

$$\eta(0) = \frac{P_i}{TK^2} \cdot \frac{1 - J_0(K.a)}{J_0(K.a) + D} \tag{2}$$

$K = \omega(\sigma_M / T)^{1/2}$  C'est le nombre d'onde du son sur la membrane,  $m^{-1}$   
 $\omega$  : la pulsation sonore,  $s^{-1}$

$$D = -i \frac{4\omega\rho_0 J_0(K.a)}{\pi T J_2(K.a)} \sum_{m=0}^{\infty} \left( -i\omega\Theta_m + \sum_{s=1}^q \Upsilon_s s_s \Gamma_m J_0(\xi_m a_s) \right) \frac{1}{T_m J_0(\xi_m a)} \left( \frac{J_2(K.a) \delta(m)}{4K^2 a^2} + \frac{J_1(K.a) [1 - \delta(m)]}{2Ka(K^2 a^2 - \xi_m^2 a^2)} \right) \tag{3}$$

$\rho_0$  densité statique de l'air,  $kg/m^3$   
 $s_s$  : surface de  $s^{ième}$  trou,  $m^2$

D'après,

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1(\xi_m a) = 0 \\ L_m = \sqrt{L^2 - \xi_m^2} \\ K_m = \sqrt{K^2 - \xi_m^2} \\ \gamma_m = \frac{K_m L_m}{\xi_m^2} \end{array} \right. ; L = \sqrt{-i\omega\rho_0 / \mu} \quad , m^{-1}$$

la relation de Bessel  $J_1(x) = 0$  , On détermine les modes propres de vibrations de la membrane, tel que :

$J_1(\xi_m a) = 0 \implies$  Les  $\xi_m ; m=0 \text{ à } \infty$  :sont les solutions de l'équation de propagation .

Et

$$\Theta_m = 2\pi \left( \frac{Ka.J_0(\xi_m.a).J_0(K.a)}{(K^2 - \xi_m^2).J_0(K.a)} - \frac{a^2}{2}.\delta(m) \right) \quad (4)$$

$$\delta(m) = 1 \text{ si } m=0, =0 \text{ si } m \neq 0.$$

$$\Gamma_m = \frac{\sin A + \gamma_m \cdot \sin B}{\sin A \cdot \cos B + \gamma_m \cos A \cdot \sin B} \quad \text{Avec} \quad \begin{array}{l} A = K_m h \\ B = L_m h \end{array}$$

$$T_m = \frac{K_m \{ [1 - \cos A \cdot \cos B] + \gamma_m \cdot \gamma_m^{-1} \cdot \sin A \cdot \sin B \}}{\sin A \cdot \cos B + \gamma_m \cdot \cos A \cdot \sin B}$$

$$P_m = \pi \cdot a^2 \cdot J_0^2(\xi_m \cdot a)$$

La matrice :  $\Upsilon(q \times 1)$  est déterminée par la relation :

$$\Upsilon = [I + A]^{-1} \cdot \beta \quad (5)$$

$I$  : matrice identité

$\beta(k)$  vecteur avec ;

$$\beta_k = \frac{\rho_0 \omega^2}{s_k} \left( \sum_{l=1}^q \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\Theta_m \cdot \Gamma_m \cdot J_0(\xi_m \cdot a_l) \cdot Y_{kl}}{P_m T_m} \right)$$

$\mathbf{A}(k,s)$  matrice avec ;

$$a_{ks} = -i \frac{\omega \rho_0 s_s}{s_k} \left( \sum_{l=1}^q \sum_{m=0}^{\infty} \frac{J_0(\xi_m \cdot a_s) J_0(\xi_m \cdot a_l) \cdot Y_{kl}}{P_m T_m} \right)$$

$Y_{kl}$ : éléments de la matrice  $Y(q,q)$  tel que ;

$$Y = [Z]^{-1}$$

$Z(q,q)$  est la matrice de l'impédance acoustique:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_C & Z_C & \dots & Z_C \\ Z_C & Z_2 + Z_C & \dots & Z_C \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ Z_C & Z_C & \dots & Z_q + Z_C \end{bmatrix}$$

Avec 
$$Z_C = \frac{\gamma \rho_0 c_T^2}{i \omega V} \quad (6)$$

Et 
$$Z_k = \frac{(8 \rho_0 \omega \mu)^{1/2}}{\pi r_k^2} \left( 1 + \frac{l_k}{2 r_k} \right) + i \frac{\omega \rho_0 (l_k + 1.7 r_k)}{\pi r_k^2} \quad (7) \quad k = 1, 2, 3, \dots, q$$

$\gamma$  : rapport de la chaleur spécifique  
 $c_T$  : la vitesse du son, m/s  
 $\mu$  : viscosité absolu de l'air, Ns/m<sup>2</sup>



### Les expressions des paramètres du circuit électrique équivalent :

Dans ce modèle, les paramètres du circuit électrique sont donnés par les expressions suivantes [11]:

*La masse de membrane*  $M_M = 5\sigma_M / 12\pi a^2$   $(\text{kg}/\text{m}^4)$

*Conformité de la membrane*  $C_M = \pi a^2 / 2T$   $(\text{m}^5/\text{N})$

*Conformité de la couche d'air de la cavité*  $C_A = \pi a^2 / 2T \operatorname{Re}(D)$   $(\text{m}^5/\text{N})$

*Résistance de la couche d'air de la cavité*  $R_A = 2T \operatorname{Im}(D) / \omega \pi a^2$   $(\text{Ns}/\text{m}^5)$

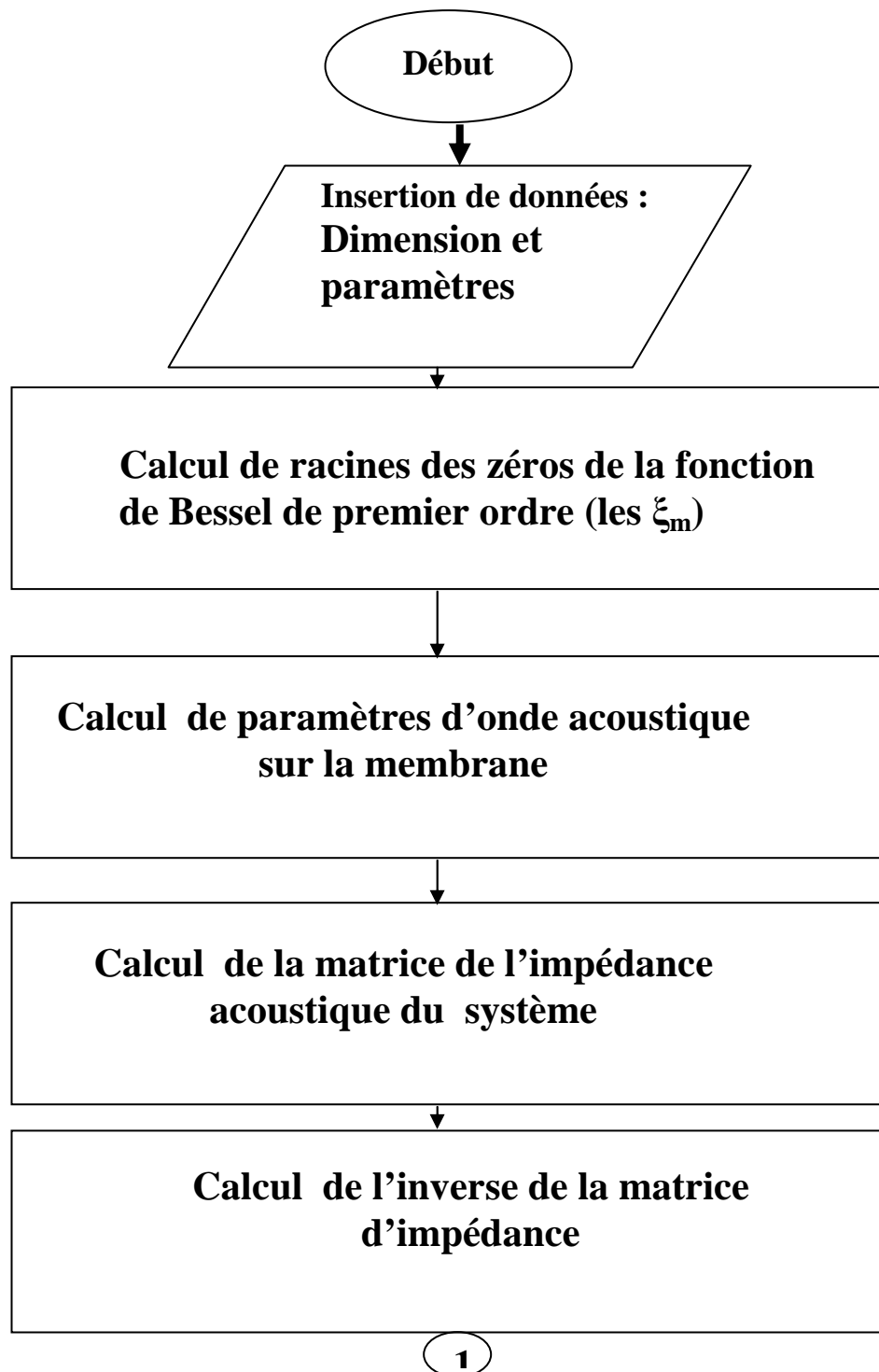
*Facteur de qualité*

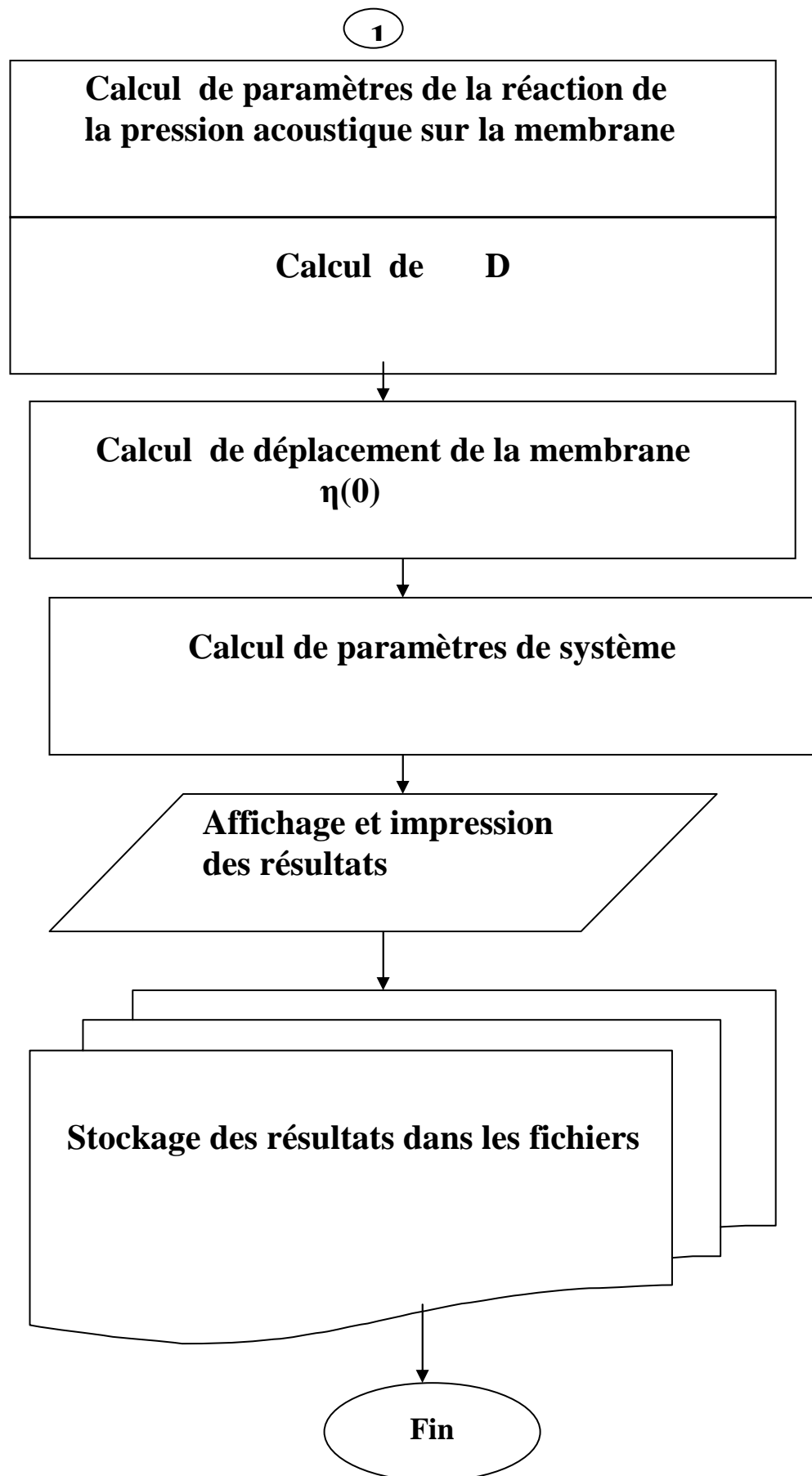
$$Q = \frac{1}{R_A} \left( \frac{M_M (C_A + C_M)}{C_A \cdot C_M} \right)^{1/2}$$

$\operatorname{Re}(D)$  la partie réelle de  $D$

$\operatorname{Im}(D)$  : la partie imaginaire de  $D$

### V.3 L'organigramme illustrant les différentes étapes de modélisation





## V.4 Le programme informatique

Pour effectuer les calculs numériques, on utilise le FORTRAN 90 comme langage de programmation, vu sa grande capacité en calculs mathématiques (réels et complexes)[17][18].

### V.4.1 Programme de calcul des zéros de la fonction de Bessel

Ce programme calcule les points où la fonction de Bessel de 1<sup>ère</sup> ordre s'annule pour un intervalle de 0 à  $\infty$ .

Calculons ensuite les racines  $X_m$ ;  $m = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ . Et suivant la dimension du rayon de la membrane du microphone ( $a$ ), le programme calcule les solutions propres de l'équation de l'onde acoustique sur la membrane (les  $\xi_m$ ).

La méthode numérique utilisée dans ce programme pour les recherches des zéros est celle de la bisection[18]

### Aperçu sur Le programme de calcul des Zéros de la fonction de Bessel $J_1(x)$

```

program cbessel
!   programme de calcul des zeros de la fonction de bessel J1(x)
  DIMENSION e(100,2),d(100,2),p0(100,3),rf(100,2)
  real a,res,pa,s,e
        integer k,i,j,nz
        print*, 'Donnez le nombre des Zeros de la fonction de Bessel entre 1 et 100'
        read(*,*)nz
        a=0
        pa=.5
        k=1
        f=a+pa
        .
        .
        .
        .
        .
        .

```

```

      .
      .
      .
      rf(k,2)=BESJ1(rf(k,1))
      print*,rf(k,1),rf(k,2)
      write(8,50)k,rf(k,1)
50  format('Bessl-zero',I3,5X,F12.7)
47  continue
      close(8)
      read (*,*)s
      end
! le sous programme
      subroutine poinz(a,b,f1,k,p1,p2,p3)
      real f1,test
100  pa=.00001
      a=a+pa
      b=a+pa
110  f1=BESJ1(a)
      f2=BESJ1(b)
      test=f2*f1
      2  print*,a,b,test
      if (test.LT.0) then
      a=b
      b=a+pa
      goto 110
      end if
      if (f1.LE.1e-10) then
      goto 500
      end if
      goto 100
500  p1=a
      p2=b
      p3=f1
      return
      end

```

### V.4.2 Programme de calcul du déplacement de la membrane

Le programme de calcul comporte les étapes suivantes :

**Etape 1 :** insertion des données (dimensions et paramètres du modèle).

**Etape 2 :** calcul des paramètres intermédiaires suivants les zéros de la fonction de Bessel.

**Etape 3:** calcul de la matrice de l'impédance acoustique du système.

**Etape 4:** calcul de l'inverse de la matrice acoustique par la méthode de Jordan [18]

**Etape 5:** calcul de paramètres de la réaction de pression.

**Etape 6:** calcul du déplacement de la membrane

**Etape 7 :** calcul des éléments de system (éléments du circuit équivalent).

**Etape 8 :** insertion des résultats de calculs dans des tableaux et des fichiers

### Aperçu sur le programme de calcul (en Fortran 90)

```

program micromod
  ! Bloc de déclarations
      DIMENSION ksy(101),zksy(101),lm(101),km(101),gamm(101(
      DIMENSION lp(100),r(100),zk(100),z(100,201(
      DIMENSION y(100,100),segm(101(
      DIMENSION irm(101),tm(101),pm(101),tetam(100(
      DIMENSION Ak(101,101),bc(100),sr(100),at(100(
      DIMENSION      ai(101,101),ay(101,101),bk(101),vk(101(
  integer k,m,ps,q
  real a,gm,ton,lp,rr
  real dens,ksy,k1,destat,df,fw,mu,zksy
  real bc,k11,co1,s,pi,r,sr,seg,at,deplm

  COMPLEX ll,lm,km,gamm,zk,zc,z,y,cof
  COMPLEX irm,t11m,t12m,t2m,tm,pm,tetam,lly
  COMPLEX am,bb,bm,bm1,resa,sa,som,som1,ai,ak
  COMPLEX ay,bk,vk,co,sd,ssd,so1,ssd1,pr1,pr2,pr3,ss,d,tk1,depl

  !Insertion de données *****

  print*, 'donnez la pression acoustique pi'
  read(*,*)Pi
  print*, 'donnez la fréquences fw'
  read

      .
      .
      .
      .
      .

```

```

!*****
!Calcul du déplacement n(r) *****

tk1=ton*(k1**2)*(BESJ0(k1*a)+d)

rr=0. ! pour le centre de la membrane r=0

! le déplacement n(r)

df=BESJ0(k1*rr)-BESJ0(k1*a)
depl=pi*df/tk1

deplm=(real(depl)**2+aimag(depl)**2)**.5

!*****

sensb1=deplm/pi

bmms=5*gm/(12*3.1416*a**2)
cmb=(3.1416*a**4)/(2*ton)
cair=(3.1416*a**4)/(2*ton*real(d))
rair=(2*ton*aimag(d))/(w*3.1416*a**4)

facq=(1/rair)*(bmms*(cmb+cair)/(cmb*cair))**0.5

print*,le déplacement =,depl
write(40,10005)pi
10005 format('la pression Pi=',E12.4)
write(40,10006)fw
10006 format('la fréquence f=', F12.4)
write(40,10007)d
10007 format(' d= ',2E15.6)
write(40,10008)bmms
10008 format('La masse Mm = ',F12.6)
write(40,10009)cmb
10009 format('conformité de la membrane = ',E15.6)
write(40,10010)cair
10010 format('conformité de la couche d air = ',E15.6)
write(40,10011)rair
10011 format('résistance d air = ',E15.6)
write(40,*)
write(40,10015)facq
10015 format('Le facteur de qualite ',F12.6)
write(40,10020)sensb1
10020 format('La sensibilité = ',E15.6)
10050 write(40,10060)deplm
10060 format(' déplacement =',2E15.6)
10070 write(40,10080)d
10080 format('D= ',2E15.6)
! end do
close(40)
close(50)

read(*,*)s

end

```

**CHAPITRE VI**

**Calculs et Comparaisons**



## Introduction

Le choix de notre modèle est basé sur un modèle théorique [11] et expérimental du microphone [16].

On effectuera les calculs avec les mêmes dimensions et paramètres du modèle de base, et on propose, par la suite, d'autres dimensions et paramètres dans le but de déterminer le fonctionnement et les caractéristiques de la membrane.

## VI.1 Dimensions et paramètres

Les dimensions et les paramètres mécaniques et acoustiques du modèle d'étude<sup>1</sup> sont représentés dans le tableau suivant.

**Tableau VI.1**

La partie Du MFO	Elément	Symbole	nature	unité
La Membrane	Rayon	a	Réel	m
	Densité surfacique	$\sigma_M$	Réel	Kg/m <sup>2</sup>
	Tension de fixation	T	Réel	N/m
Trous et ouvertures	Nombre d'ouvertures	q	Réel	-
	Rayon des trous de ouvertures	r <sub>k</sub>	Réel	m
	Rayon de positionnement des ouvertures	a <sub>k</sub>	Réel	m
	Profondeur des trous	l <sub>k</sub>	Réel	m
Chambre arrière et l'air	Distance entre la membrane et la plaque arrière	h	Réel	m
	Volume de chambre arrière	V	Réel	m <sup>3</sup>
	Densité statique de l'air	$\rho$	Réel	Kg/ m <sup>3</sup>
	Viscosité absolue d'air	$\mu$	Réel	N.s / m <sup>2</sup>
	Rapport de chaleur spécifique	$\gamma$	Réel	
Le son	Vitesse de son (isothermal)	C <sub>T</sub>	Réel	m./s
	Fréquence	f	Réel	Hz
	Pression incidente du son	P <sub>i</sub>	Réel	Pa

Tableau VI.2 les données numériques du modèle [11]

<b>a</b>	<b>3.175 10<sup>-3</sup></b>	<i>m</i>
<b>σ<sub>M</sub></b>	<b>5.677 10<sup>-3</sup></b>	<i>Kg/m<sup>2</sup></i>
<b>T</b>	<b>35</b>	<i>N/m</i>
<b>q</b>	<b>2</b>	-
<b>r<sub>k</sub></b> <sub>k=1,2</sub>	<b>7.94 10<sup>-4</sup></b>	<i>m</i>
<b>a<sub>k</sub></b> {	<b>a<sub>1</sub></b>	<i>m</i>
	<b>a<sub>2</sub></b>	<i>m</i>
<b>l<sub>k</sub></b> <sub>k=1,2</sub>	<b>0.102 10<sup>-3</sup></b>	<i>m</i>
<b>h</b>	<b>65 10<sup>-6</sup></b>	<i>m</i>
<b>V</b>	<b>7.68 10<sup>-7</sup></b>	<i>m<sup>3</sup></i>
<b>ρ<sub>0</sub></b>	<b>1.205</b>	<i>Kg/m<sup>3</sup></i>
<b>μ</b>	<b>4.30 10<sup>-6</sup></b>	<i>N.s/m<sup>2</sup></i>
<b>γ</b>	<b>1.403</b>	
<b>C<sub>T</sub></b>	<b>290.2</b>	<i>m./s</i>
<b>f</b>	<b>2 à 100000</b>	<i>Hz</i>
<b>P<sub>i</sub></b>	<b>2 10<sup>-5</sup> à 200</b>	<i>Pa</i>

## VI.2 CALCUL D'ESSAIS

On prend les dimensions du tableau 6.2 et on effectue les calculs pour trouver le déplacement du centre de la membrane.

- Les zéros de la fonction de Bessel et les paramètres acoustiques **L<sub>m</sub>**, **K<sub>m</sub>**, **γ<sub>m</sub>** et **Θ<sub>m</sub>** :

<i>m</i>	0	1	2	...	30	...
	0.00	3.831710	7.000013	...	95.000020	..
<b>ξ<sub>m</sub></b>	0.00	1206.838	2204.729	...	29921.270	..
<b>j<sub>1</sub>(ξ<sub>m</sub>a)</b>						.
<b>L<sub>m</sub></b>	.823002 10 <sup>-06</sup> -i .799665 10 <sup>+04</sup>	.498605 10 <sup>+04</sup> -i.513003 10 <sup>+04</sup>	.482321 10 <sup>+04</sup> -i.530322 10 <sup>+04</sup>	...	.854514 10 <sup>+03</sup> -i.299335 10 <sup>+05</sup>	..
<b>K<sub>m</sub></b>	.541282 10 <sup>+01</sup> i .895282 10 <sup>+09</sup>	00.0 +i.120684 10 <sup>+04</sup>	00.00+i.220473 10 <sup>+04</sup>	...	00.00 +i.299213 10 <sup>+05</sup>	..
<b>Θ<sub>m</sub></b>	.159769 10 <sup>-07</sup> +i .00.00	350766 10 <sup>-08</sup> +i 00.00	-.782910 10 <sup>-09</sup> +i 00.00	...	-.115880 10 <sup>-11</sup> +i 00.00	..

**- Les impédances**

Pour une pression acoustique  $P_i = 20 \text{ Pa}$  à la fréquence :  $f=250 \text{ Hz}$ , on obtient :

Impédance de la chambre  $Z_c = .000000-i.11802110^{+09} \text{ ohm}$

**La matrice Z**

$$Z = \begin{bmatrix} .478589 \cdot 10^{+06} -i.115210 \cdot 10^{+09} & .000000 \cdot 10^{+00} -i.118021 \cdot 10^{+09} \\ .000000 \cdot 10^{+00} -i.118021 \cdot 10^{+09} & .478589 \cdot 10^{+06} -i.115210 \cdot 10^{+09} \end{bmatrix}$$

**La matrice Y**

$$Y = \begin{bmatrix} .294359 \cdot 10^{-07} -i.170720 \cdot 10^{-06} & .294271 \cdot 10^{-07} +i.175008 \cdot 10^{-06} \\ .294271 \cdot 10^{-07} +i.175008 \cdot 10^{-06} & .294359 \cdot 10^{-07} -i.170720 \cdot 10^{-06} \end{bmatrix}$$

.

**Le vecteur  $B_k$** 

$$B = \begin{bmatrix} .594434 \cdot 10^{+01} +i.148482 \cdot 10^{+04} \\ .101369 \cdot 10^{+00} +i.752538 \cdot 10^{+03} \end{bmatrix}$$

**Les matrices de l'impédance des ouvertures A et V**

$$A = \begin{bmatrix} .72897210^{+03} -i.41897010^{+01} & .14343610^{+04} +i.36617010^{+01} \\ .36916310^{+03} +i.62518810^{+00} & .72910910^{+03} -i.479848 \cdot 10^{+01} \end{bmatrix}$$

Le vecteur  $V_s$

$$V = \begin{bmatrix} .824890 \cdot 10^{-01} + i .156548 \cdot 10^{+01} \\ -.417938 \cdot 10^{-01} + i .238823 \cdot 10^{+00} \end{bmatrix}$$

Le paramètre de la réaction de pression acoustique  $D$

$$D = .205509 \cdot 10^{+00} + i .240576 \cdot 10^{-01}$$

Le déplacement de la membrane  $\eta(0)$  :

Le déplacement  $\eta(0)$  au centre de la membrane est :

$$\eta(0) = 0.119505 \cdot 10^{-05} \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \eta(0) = 1.2 \text{ } \mu\text{m}$$

La sensibilité mécanique  $M_m = 0.597525\text{E-}07$

## VI.3 LA COMPARAISONS DES RESULTATS

### VI.3.1 Comparaison avec les relations approximatives

En comparant les résultats de calcul à celles calculées par les relations approximatives.[11]

Tel que :

Le déplacement de la membrane calculé par la relation approximative :

$$\boxed{\frac{\eta(0)}{p_i} \approx \frac{a^2}{4T}}$$

Donc

$$\boxed{\eta(0) \approx \frac{a^2 \times p_i}{4 \times T} = 0.14 \times 10^{-5} \text{ m}}$$

c-à-d:  $\eta(0) \approx 1.4 \mu\text{m}$

Et la sensibilité mécanique du microphone calculée par la relation :

$$M_m = \frac{\eta(0)}{p_i} \approx \frac{a^2}{4T} = 0.72 \times 10^{-7}$$

Donc  $M_m \approx 0.72 \cdot 10^{-7}$

**Remarquons** que les calculs obtenus par le programme et ceux calculés approximativement sont très proches.

### VI.3.2 Comparaison avec le modèle de référence [11]

On compare les valeurs de calcul de notre programme avec les résultats de modèle de référence en utilisant les paramètres du système. Le modèle de référence fonctionne dans les basses fréquences (Tableau 6.3).

**Tableau VI.3 :**

Élément du système	Résultats de modèle de référence	Résultats de calcul
<i>masse membrane</i> $M_M$ (kg/m <sup>4</sup> )	74.7	74.7
<i>conformité de membrane</i> $C_M$ (m <sup>5</sup> /N)	4.60 10 <sup>-12</sup>	4.56 10 <sup>-12</sup>
<i>Conformité de la couche d'air</i> $C_A$ (m <sup>5</sup> /N)	1.94 10 <sup>-11</sup>	2.2 10 <sup>-11</sup>
<i>résistance de la couche d'air</i> $R_A$ (Ns/m <sup>5</sup> )	4.30 10 <sup>6</sup>	3.4 10 <sup>6</sup>
<i>facteur de qualité</i> $Q$	1.042	1.323

D'après le tableau de résultats calculés, on remarque que les résultats de calcul de paramètres de microphone à fibre optique obtenus par le programme de modélisation et celles de modèle référence sont très proches théoriquement dans la plage de bases fréquences.

## VI. 4. Présentation graphique de la réponse et comparaison

### VI 4.1 la sensibilité de la membrane et la qualité de réponse

La bonne réponse en déplacement avec une grande sensibilité et un bon facteur de qualité dépende:

- des dimensions et de la forme géométrique du microphone.
- de la plage de fréquences d'utilisation du microphone.

Théoriquement,  $m$ , le nombre des solutions de l'équation de propagation de l'onde acoustique sur la membrane, est de  $0$  à  $\infty$ . Pratiquement, on le choisit de  $0$  à un nombre fini.

Graphiquement, le déplacement, facteur de qualité et la sensibilité convergent vers une valeur constante à partir de  $m=46$  dans les courbes représentés aux figures (6.1 et 6.2).

les intervalles des itérations en fonction de nombre  $m$  sont représentés dans les courbes : de déplacement, de facteur de qualité et de la sensibilité :

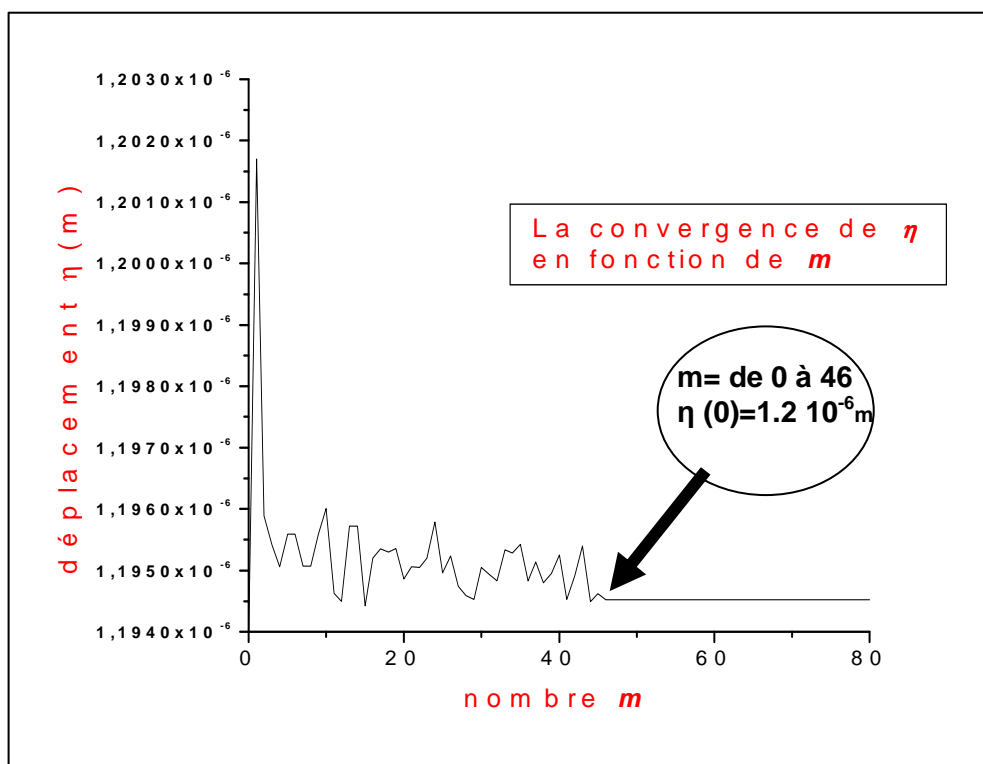


Fig 6.1 : courbe du déplacement pour différents valeurs de  $m$

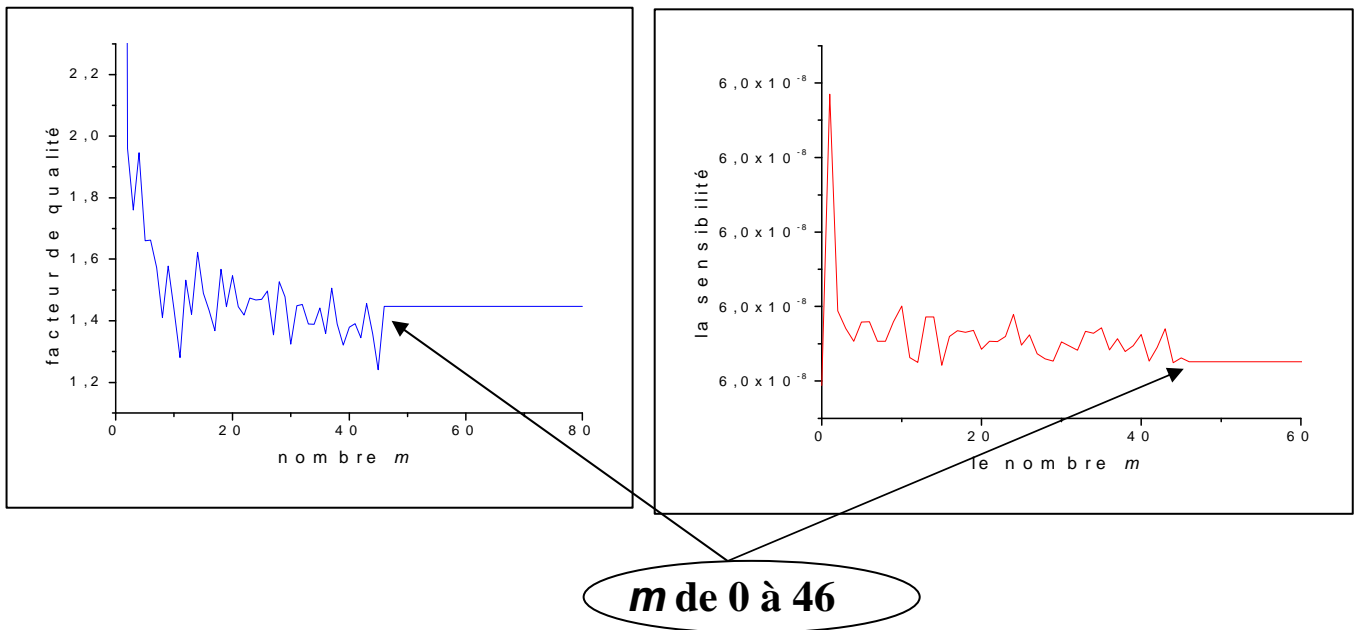


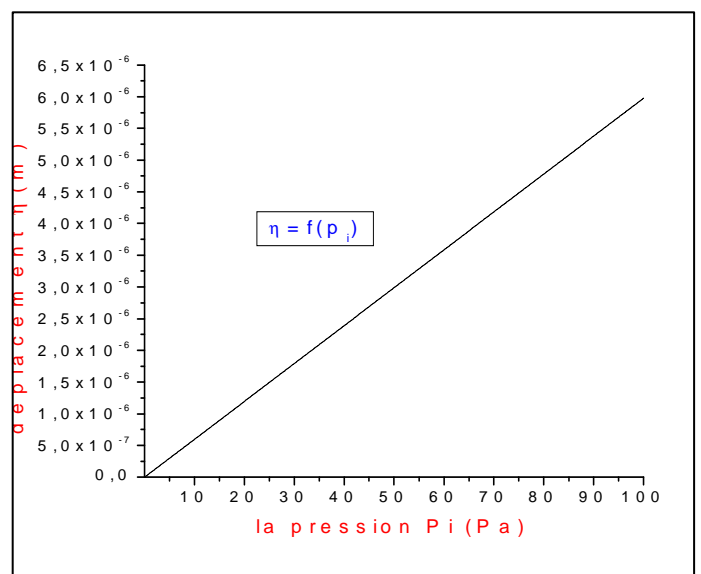
Fig 6.2: courbes du facteur de qualité et de la sensibilité pour différents valeurs de  $m$ .

Donc on choisi l'intervalle de  $m$  de 0 à 46 dans le programme informatique.

### VI.4.2. Le déplacement $\eta(0)$ et la pression incidente $P_i$

De la relation (5.2 Ch 5), le déplacement est directement proportionnel à la pression acoustique incidente sur la surface de la membrane. De même, on trouve une droite représentant la relation  $\eta(0) = f(p_i)$  graphiquement fig(6.3).

Fig. 6.3: courbe du déplacement en fonction de la pression



### VI.4.3. Le déplacement $\eta(\theta)$ en fonction de la fréquence $f$

Dans la réponse de la membrane en fréquences, on observe :

- la région (a), la réponse est indépendante de la fréquence (au dessous de la résonance).
- la région (b), c'est la région de résonance.
- La région (c), la réponse dépende de la fréquence (au –dessus de la résonance).

Dans le figure (6.4) et à l'échelle logarithmique, la déplacement est représenté en fonction de la fréquence dans les trois régions a,b et c.

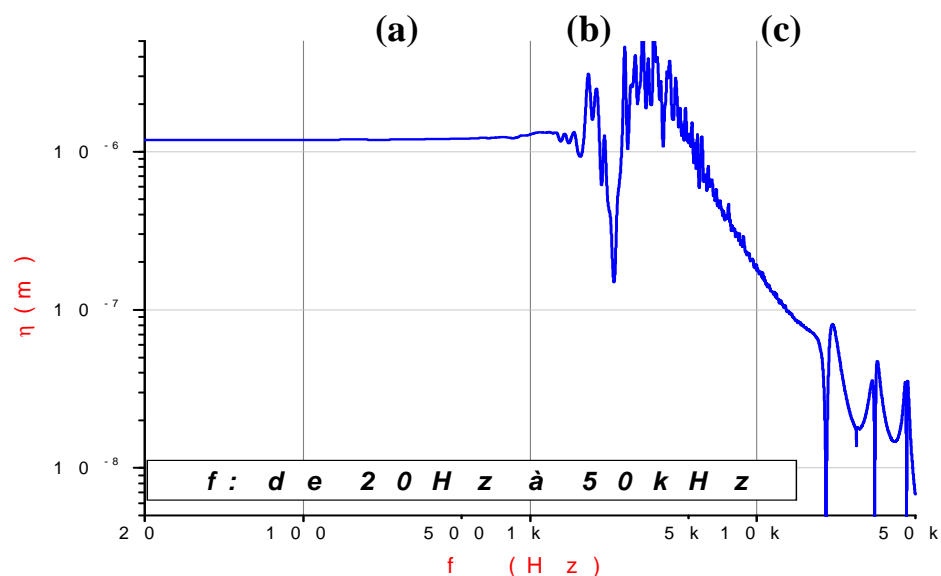


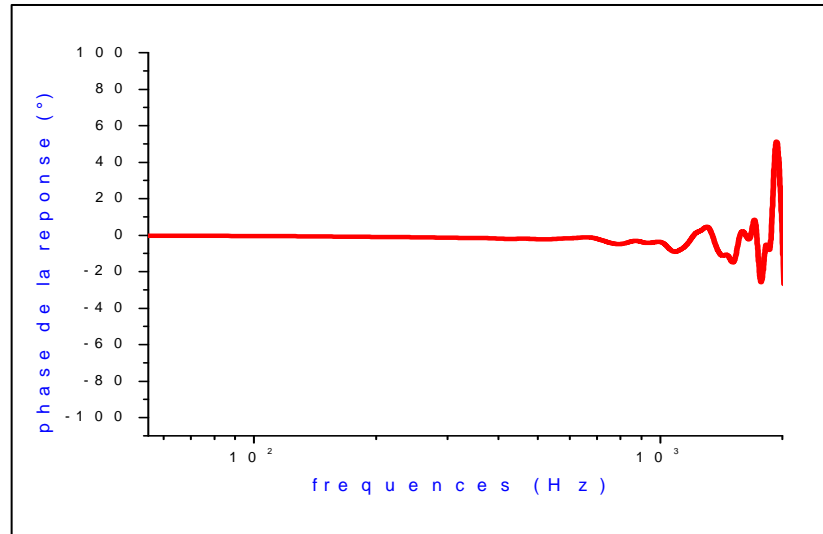
Fig 6.4 : le déplacement en fonction de la fréquence de 20 Hz à 50 kHz

Le microphone fonctionne dans la région (a). Elargir cette région est l'un des objectifs de ce mémoire.

Dans cette région le déplacement est en phase avec l'excitation (fig 6.5).



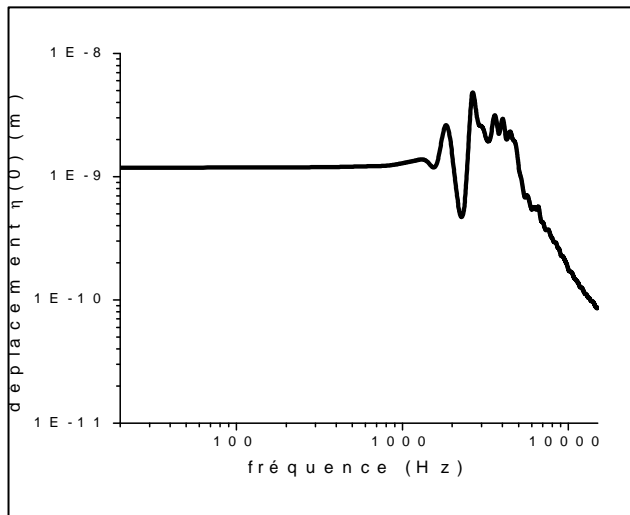
Fig. 6.5 : la phase du déplacement



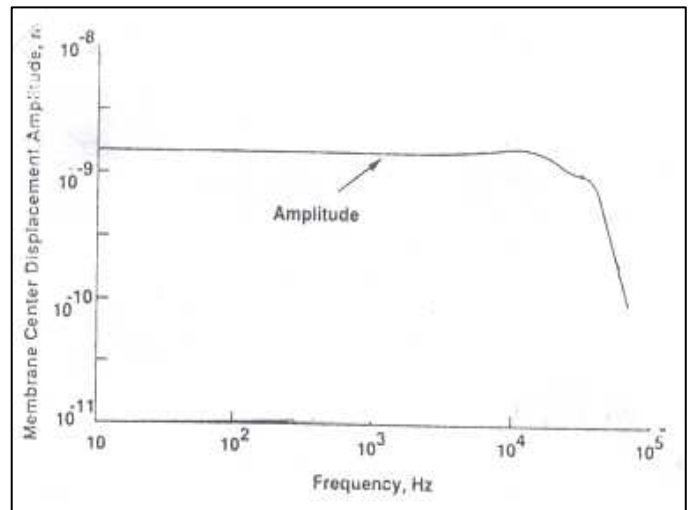
### VI .4.5 Comparaison des résultats graphiques

#### VI .4.5.1 Première comparaison

Les courbes graphiques obtenues, par notre programme, sont en accord avec celles d'une autre étude théorique du modèle de référence [11]. En plus, elles ajoutent des détails manquants fig(6.6) et fig(6.7)

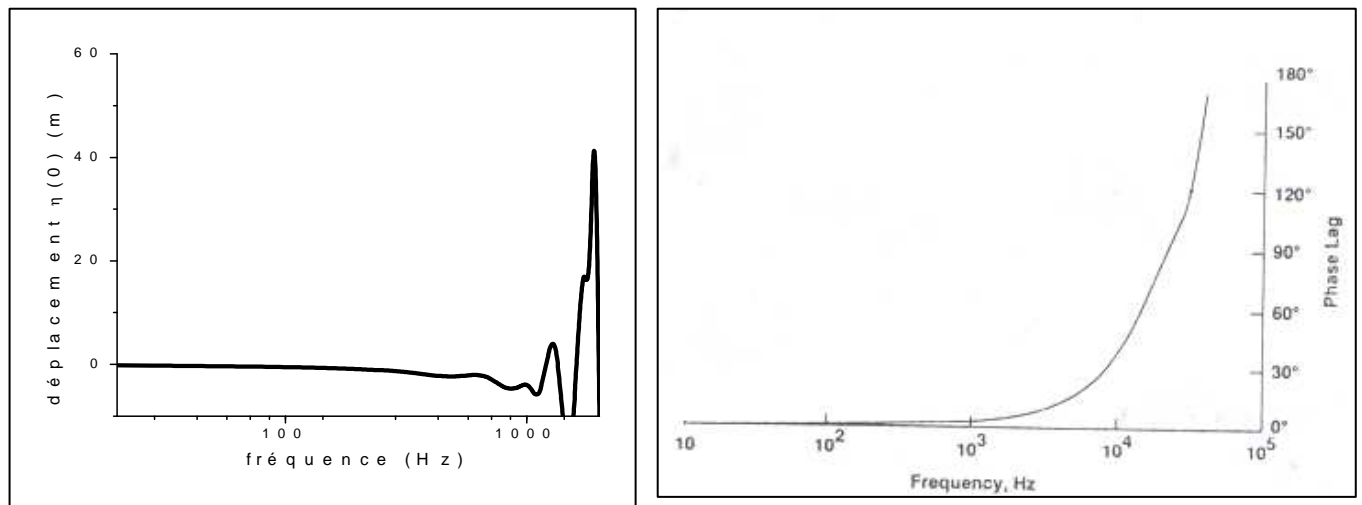


(a)



(b)

Fig 6.6 : le déplacement en fonction de la fréquence  
 (a) : notre étude  
 (b) une étude théorique [11]



(a)

(b)

Fig. 67 la phase en fonction de la fréquence

(a) : notre étude

(b) : une autre étude théorique[11 ]

### VI .4.5.2 Deuxième comparaison

En comparant le courbe du déplacement de notre étude avec celle d'une autre étude pratique[16], d'un microphone à fibre optique utilisé dans les systèmes de communication et de transmission téléphonique, on observe les mêmes allures avec plus de détails fig(6.8).

Les dimensions de ce modèle pratique sont :

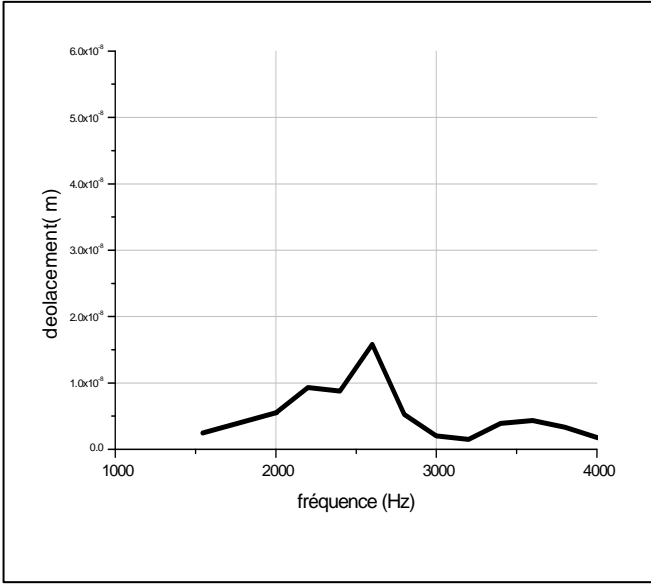
Le rayon  $a= 12 \text{ mm}$

La distance  $h = 60 \mu\text{m}$

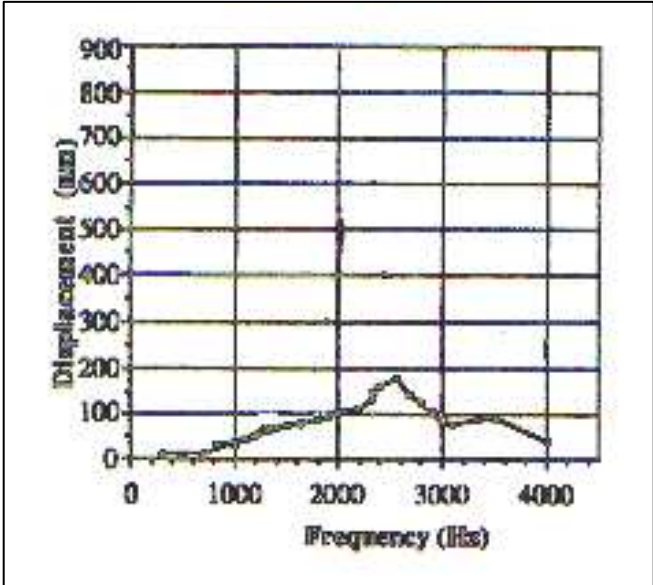
La tension  $T= 30 \text{ N/m}$

Le volume de la chambre arrière :  $V= 33.163810^{-05} \text{ m}^3$

— a = 3 . 1 7 5  
 — a = 4 . 1 7 5  
 — a = 0 . 1 m r  
 — a = 5 0 μ m



(a)



(b)

Fig. 6.8 déplacement en fonction de fréquence

- (a) : de notre étude
- (b) une autre étude pratique[3]

**CHAPITRE VII**

**Résultas et Analyses**

## Introduction

Dans ce chapitre, on utilise le modèle théorique pour déterminer l'influence des différentiels paramètres sur la réponse de la membrane (la sensibilité et la bande de fréquence).

On procède par fixer certaines paramètres et varier d'autres, ce qui permet de généraliser l'étude.

Ces paramètres sont : le rayon  $a$ , le nombre d'ouvertures  $q$ , la distance  $h$ , la tension de fixation  $T$ , la densité surfacique  $\sigma_M$  et le volume de la chambre arrière  $V$ .

### VII.1 Influence du rayon ( $a$ ) de la membrane

Le rayon est un paramètre important qui caractérise la membrane du microphone. Son choix influe sur le déplacement et par la suite sur la sensibilité figure (7.1).

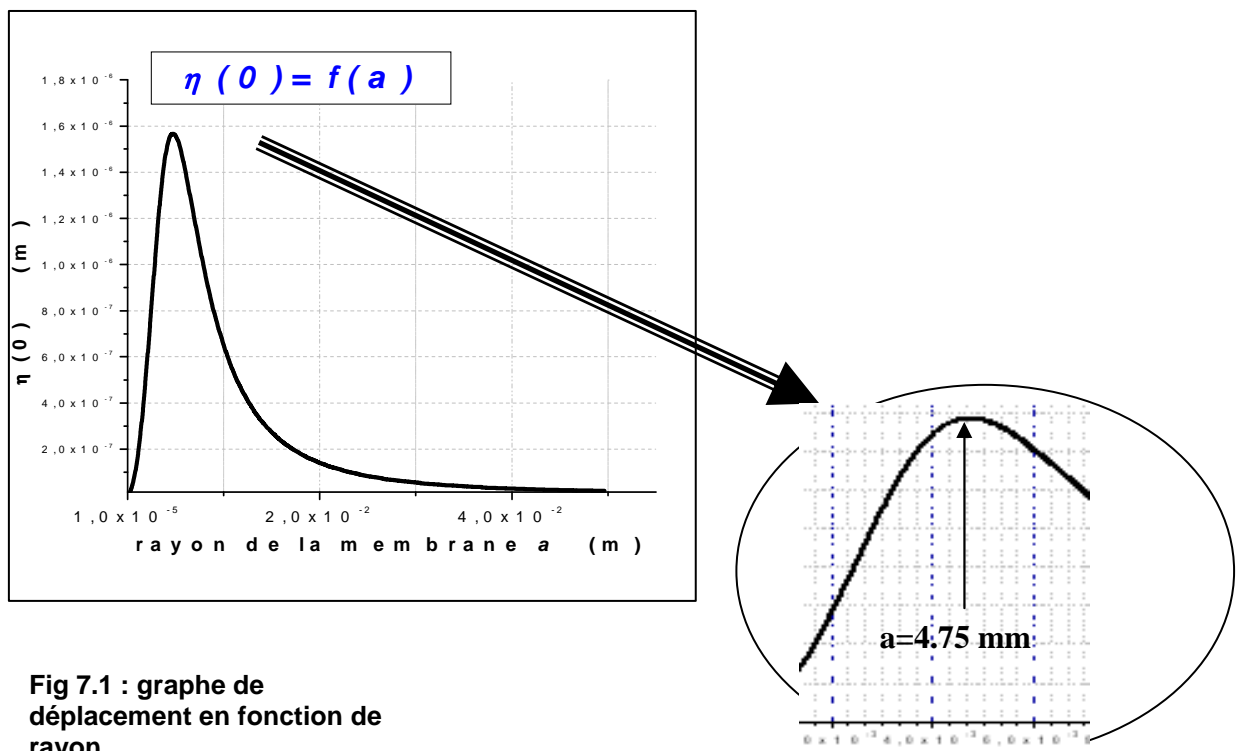


Fig 7.1 : graphe de déplacement en fonction de rayon

Dans notre cas, le choix de  $a$  doit être dans la région de  $a = 4.75 \text{ mm}$  pour un bon déplacement et une bonne sensibilité

Pour que  $r_k$  et  $a_k$  restent inférieure à  $a$ , que les valeurs de  $V$  et  $h$  correspondent toujours à un cylindre de rayon  $a$  et que  $l_k$  ne sera jamais supérieure à la hauteur du microphone, on a relié ces paramètres avec le rayon  $a$ , quand on fait varier ce dernier dans notre programme. Autrement dit, on a posé ces paramètres avec le rayon  $a$  (les paramètres du microphone de référence) sous le même zoom.

Si on diminue le rayon  $a$ , on peut élargir la bande de fréquence de fonctionnement. On peut attendre 80 kHz avec un rayon de 50  $\mu\text{m}$  figure(7.2).

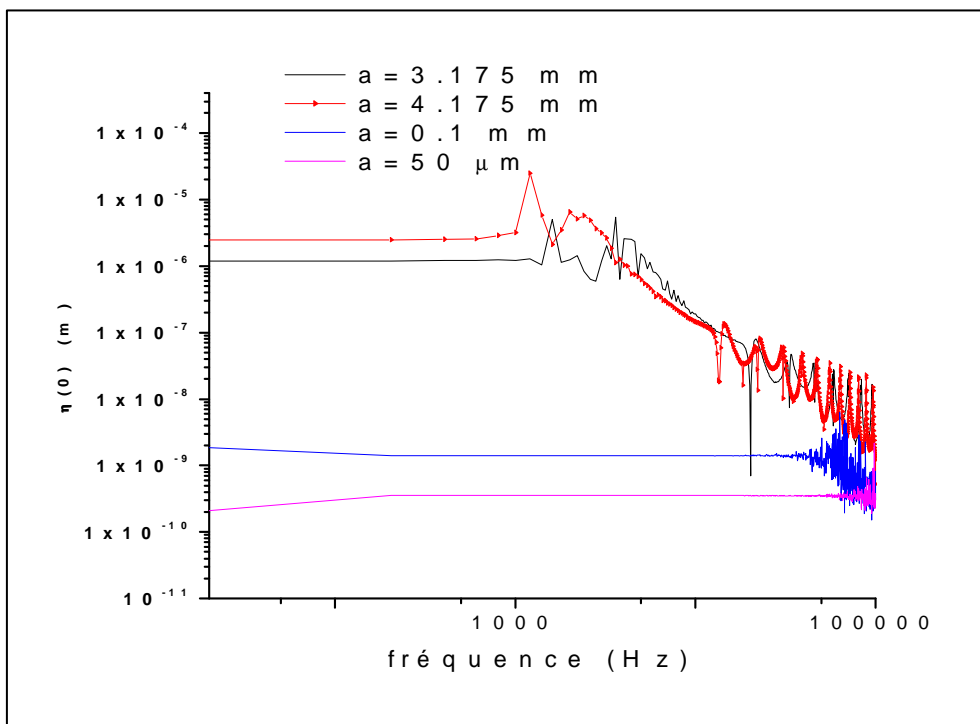


Fig 7.2 : courbes de déplacement en fonction de la fréquence pour différents rayons

## VII.2 L'influence du nombre d'ouvertures de la plaque arrière

Nos résultats montrent que le déplacement ne change pas quand  $q$  (nombre d'ouvertures) prend les valeurs  $1, 2, 3 \dots$  et chute vers une valeur inférieure quand  $q$  prend la valeur  $0$  (sans ouvertures) figure(7.3).

L'existence d'ouvertures est nécessaire pour le fonctionnement de la membrane. Le nombre d'ouverture ne change rien dans la bande de fréquence figure (7.3).

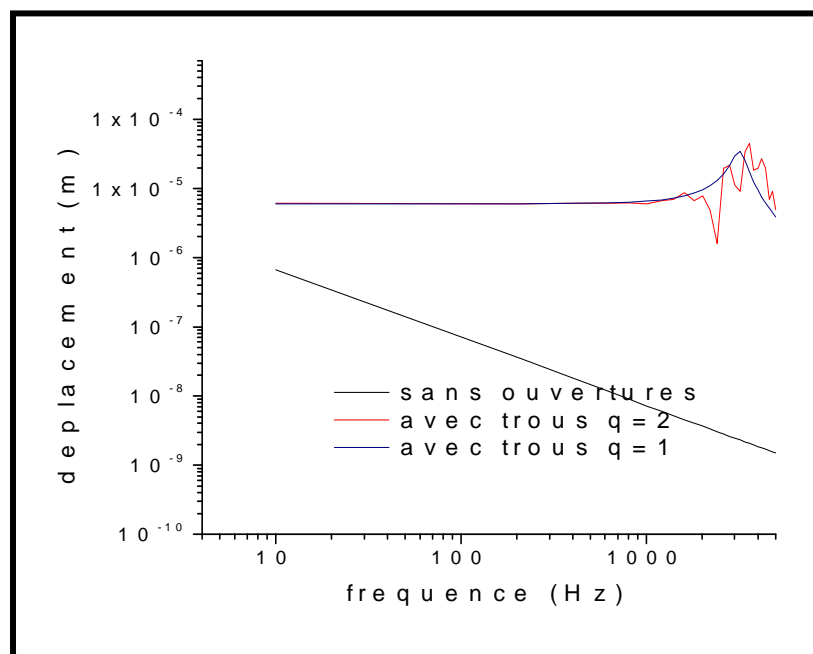


Fig 7.3 : courbes de déplacement en fonction la fréquence à la présence et l'absence d'ouvertures

## VII.3 Influence de la distance $h$

La distance  $h$  est la distance entre la membrane et plaque arrière. Elle n'a pas d'influence sur le déplacement et la bande de fréquence, figure (7.4).

Néanmoins, elle est importante dans le transfert de l'intensité lumineuse entre la fibre optique et la membrane [11]

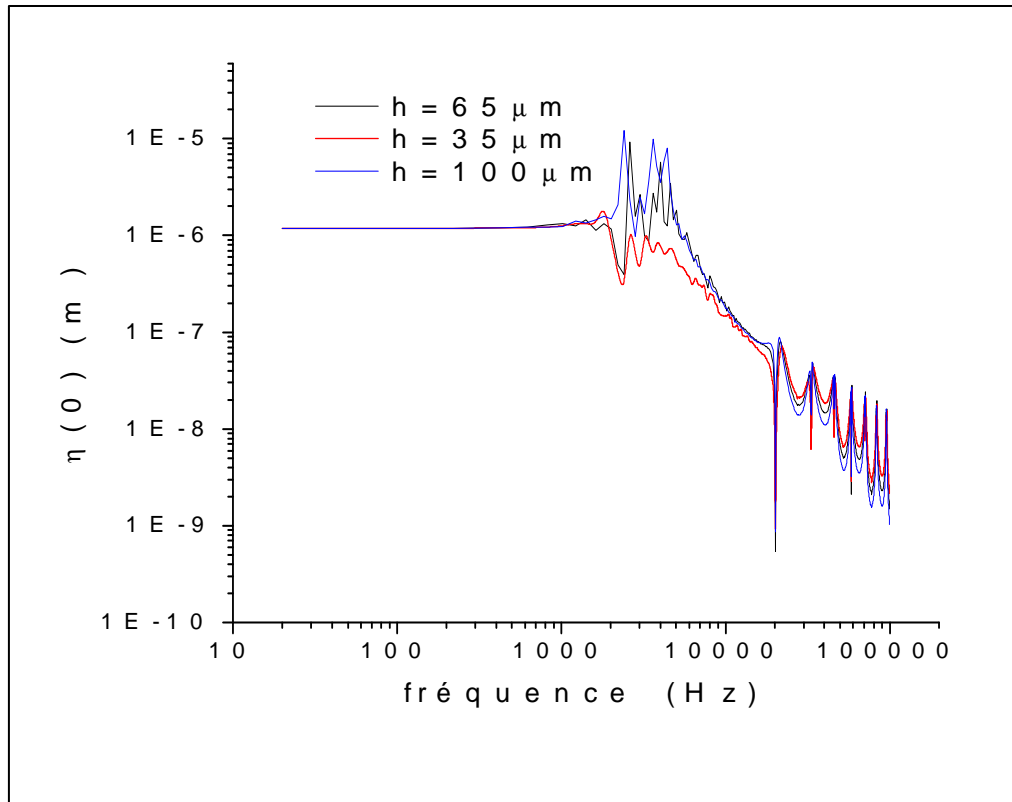
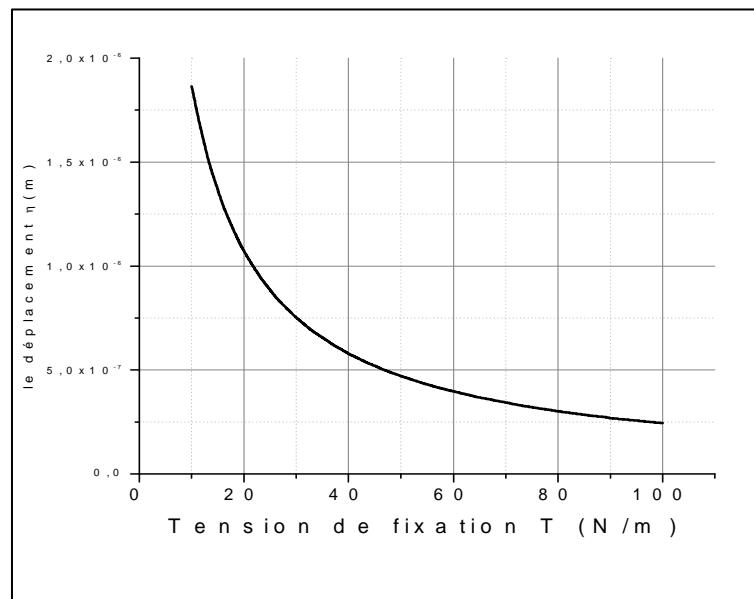


Fig 7.4 : courbe de déplacement en fonction de la fréquence et distance  $h$

### VII.4 Influence de la tension de la fixation de la membrane

La tension de fixation de la membrane a un grand influence sur la réponse : sensibilité, figure (7.5) et bandes de fréquence figure (7.6) . elle représente un paramètres très important dans le fonctionnement de la membrane.

Fig 7.5 : courbe de déplacement en fonction de la tension  $T$





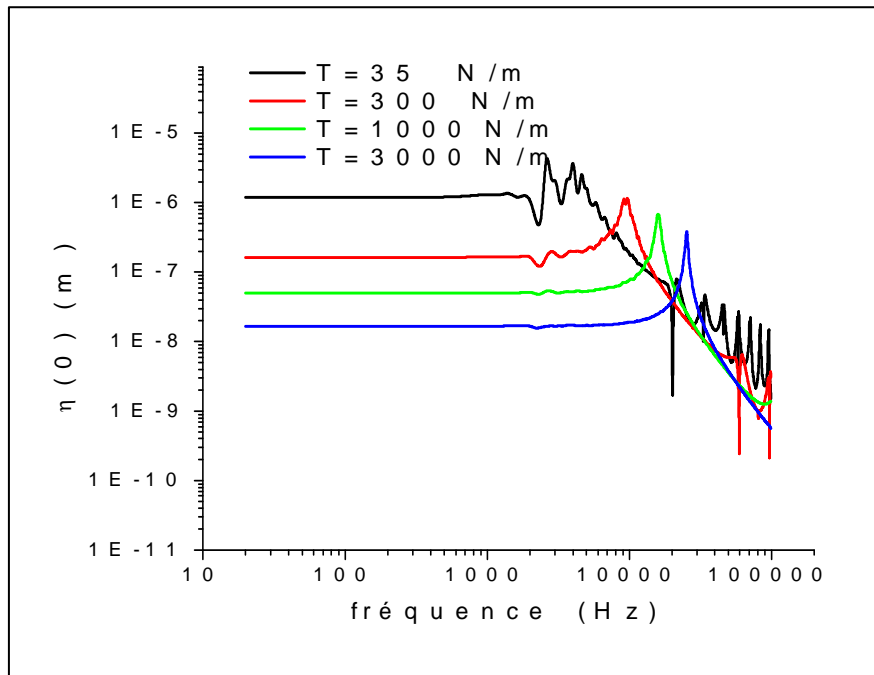


Fig 7.6 : courbes de déplacement en fonction de la tension  $T$  et la fréquence.

## VII.5 Influence de la densité de la membrane

La densité  $\sigma_M$  caractérise le matériau de la membrane. Elle influe sur le déplacement et sur la bande de fréquences, figure (7.7).

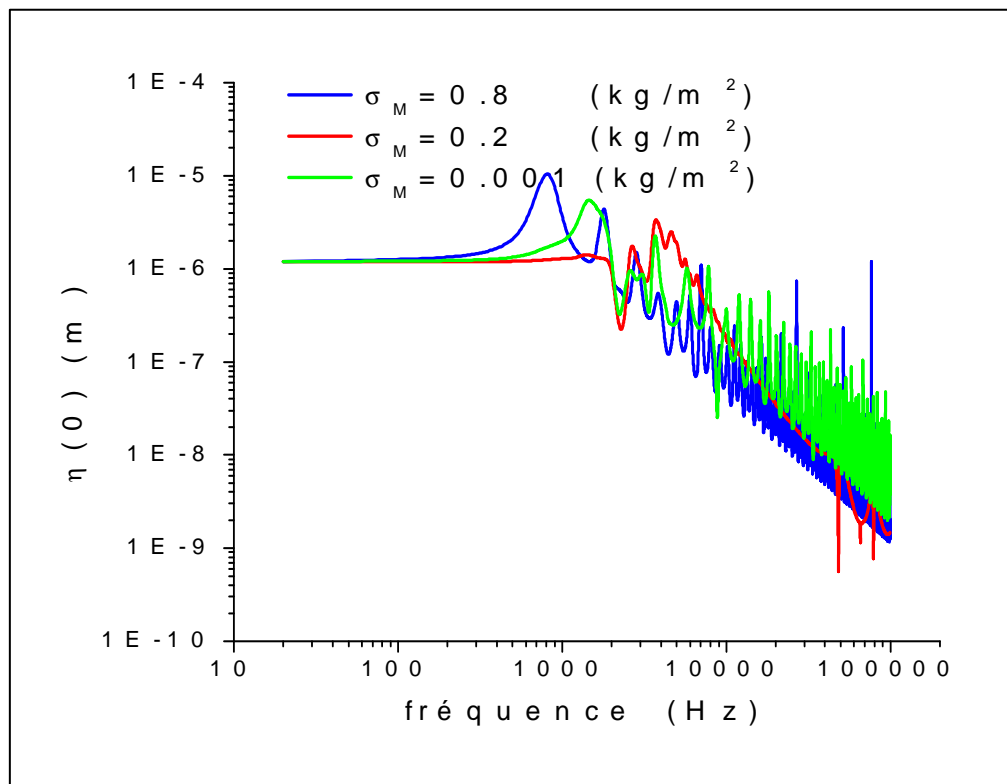


Fig 7.7 : courbe de déplacement en fonction de la densité  $\sigma_M$  et de la fréquence

## VII.6 Influence de volume de la chambre arrière

Le déplacement varie faiblement avec le volume de la chambre arrière du microphone. Le volume est inversement proportionnel à l'impédance acoustique de la chambre arrière, relation (6), chapitre 5. Ce qui permet d'améliorer la sensibilité et de choisir l'impédance du microphone, en variant le volume. L'influence de ce dernier sur la bande de fréquence est négligeable, figure (7.8).

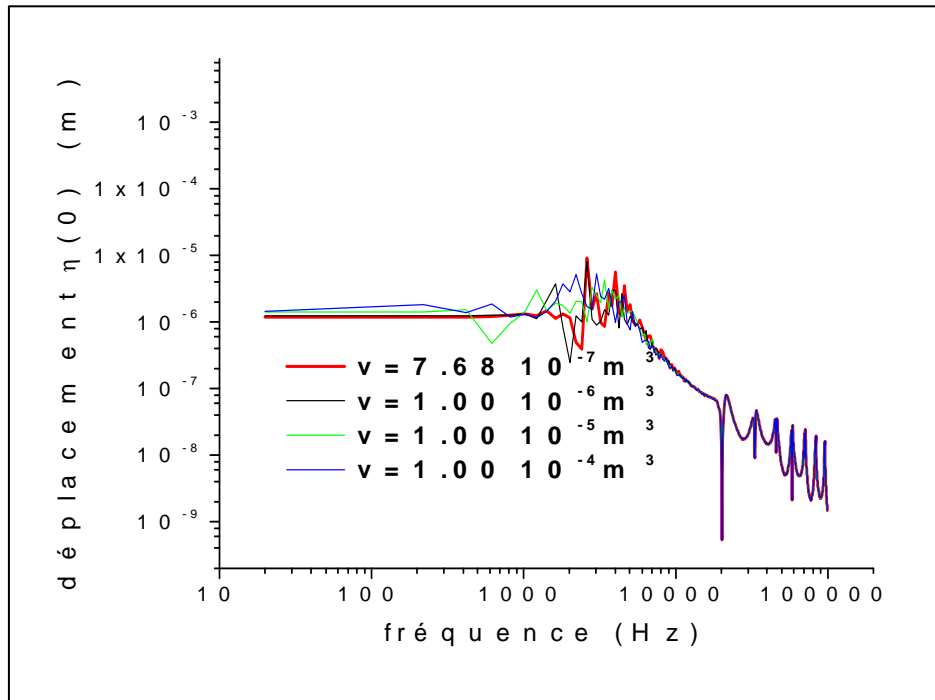


Fig 7.8 courbe du déplacement en fonction de la fréquence pour différents volumes

### VII.7 Influence des paramètres principaux sur la sensibilité et la bande de fréquence.

Dans ce paragraphe, on s'intéresse qu'aux paramètres qui ont une influence importante sur la sensibilité et la bande de fréquence. D'après les paragraphes précédents dans ce chapitre, ces paramètres sont le rayon, la tension et la densité.

Des résultats sont obtenus à partir de plusieurs graphes, quelques exemples de ces derniers sont représentés dans les figures (7.9), (7.10), (7.11).

Dans le tableau (7.1), on a regroupé les résultats des graphes. Cet tableau donne la fréquence maximale de la bande et les valeurs correspondants de  $a$  (rayon),  $T$  (tension),  $\sigma_M$  (densité surfacique) et du déplacement.

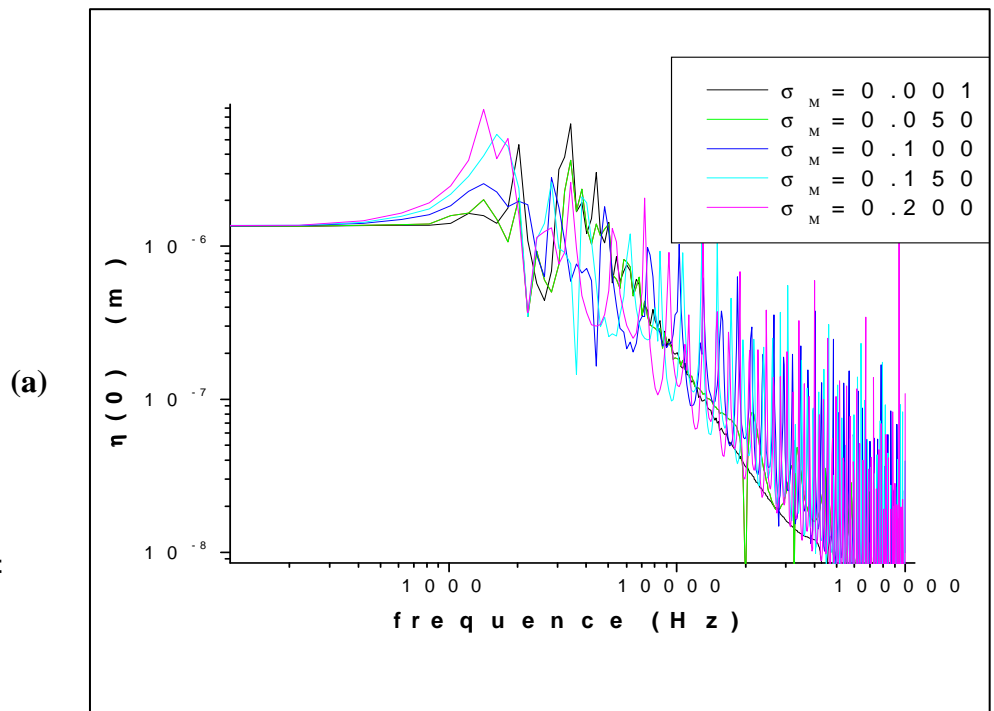


Fig 7.9 courbes du déplacement en fonction de la fréquence pour différentes densités.

(a) le rayon  $a=3.175 \cdot 10^{-3}$  m, la tension  $T= 30$  N/m

(b) le rayon  $a=5.00 \cdot 10^{-6}$  m, la tension  $T= 50$  N/m

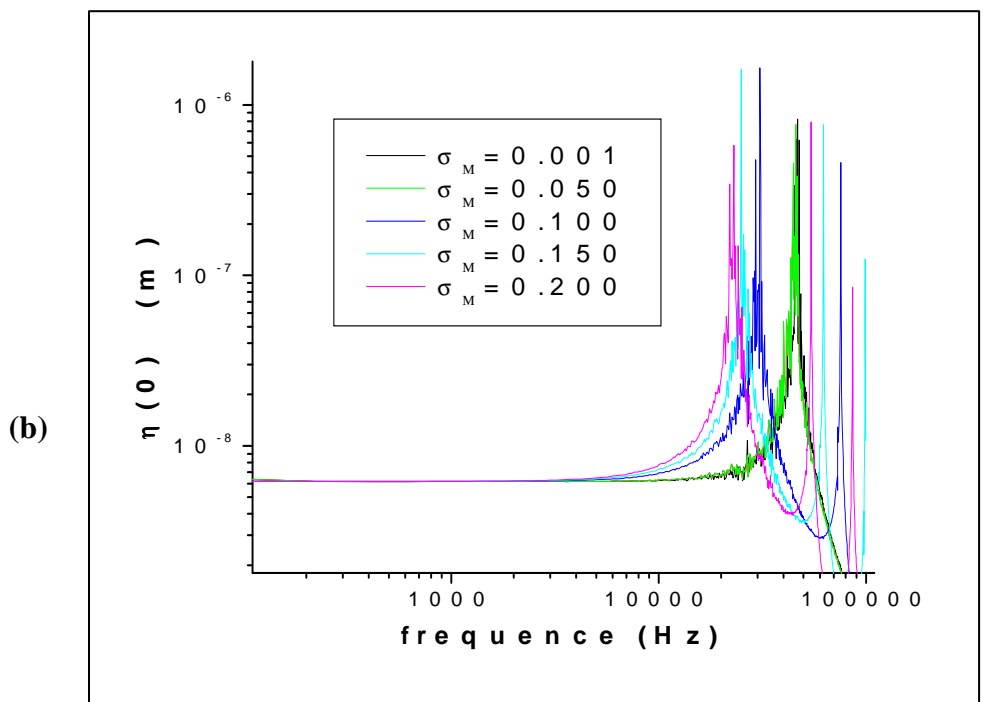
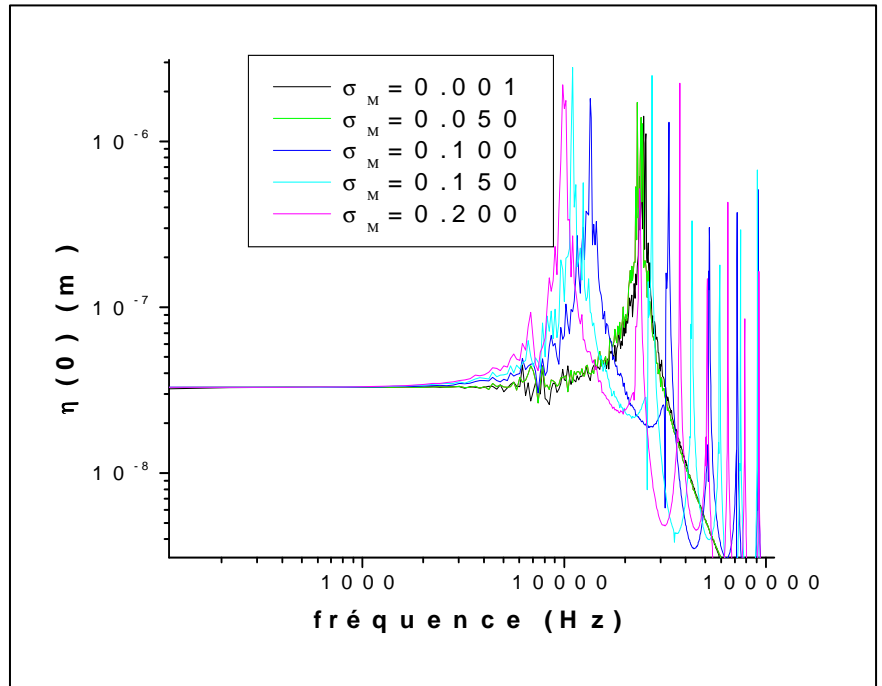


Fig 7.10 courbes de déplacement en fonction de la fréquence pour différentes densités.

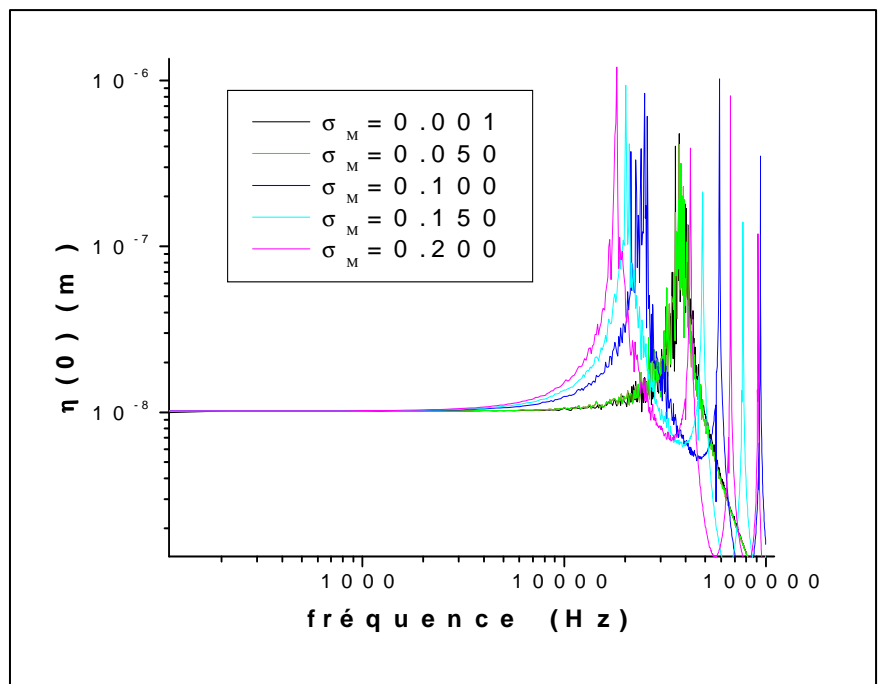
(a) le rayon  $a=1.00 \cdot 10^{-3}$  m, la tension  $T= 150$  N/m

(b) le rayon  $a=250 \cdot 10^{-6}$  m, la tension  $T= 30$  N/m

(a)



(b)



(a)

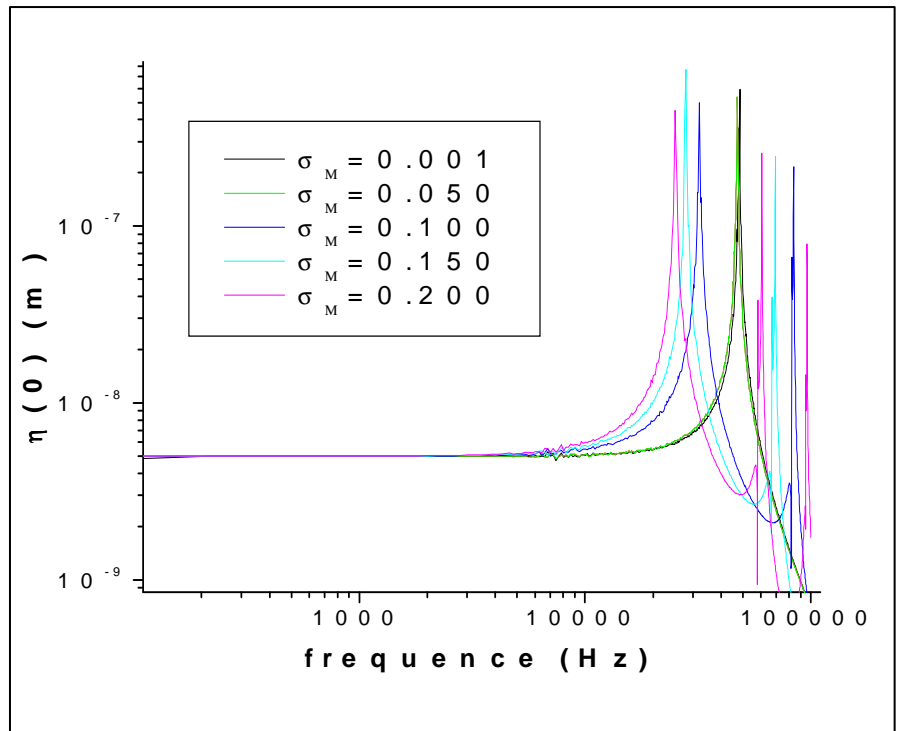


Fig 7.11 courbes de déplacement en fonction de la fréquence pour différentes densités.

(a) le rayon  $a=1.00 \cdot 10^{-3}$  m, la tension  $T= 1000$  N/m

(b) le rayon  $a=250 \cdot 10^{-6}$  m, la tension  $T= 300$  N/m

(b)

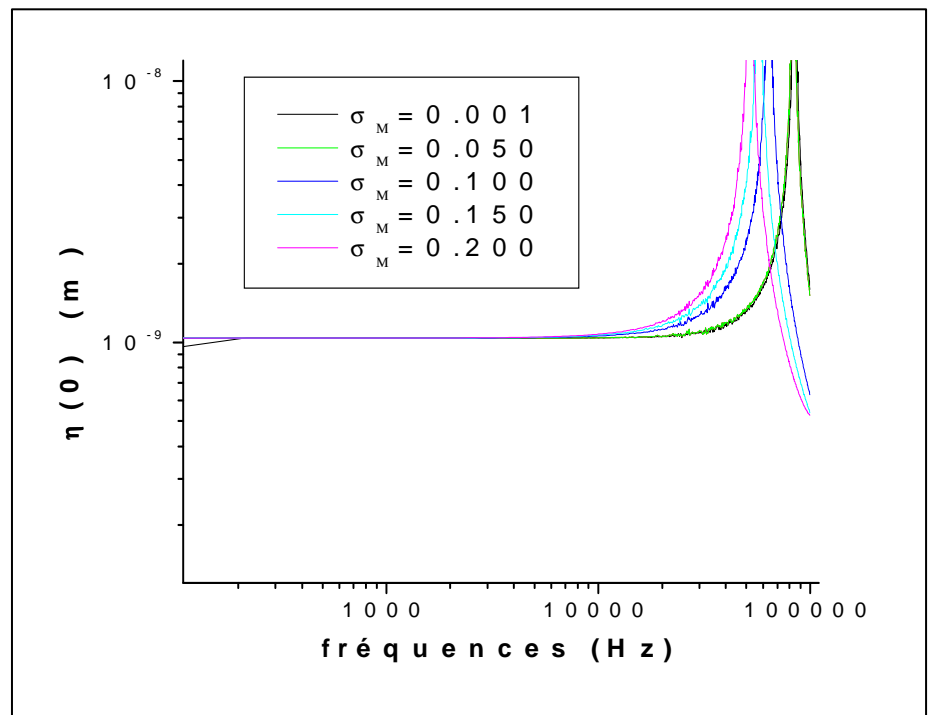


Tableau 7.1

a		200µm	250 µm	500 µm	1 mm	3.175 mm	5 mm	12 mm
T	$\sigma_M$							
30	0.001	43000	27780	19475	6722	1876	1030	5081
	0.005	40000	26658	16560	5636	1397	990	3628
	0.1	26600	15892	9445	3535	1382	962	1170
	0.15	22600	13376	7770	3007	1232	883	801
	0.2	20000	10711	6835	2558	1098	816	582
Ordre de $\eta(0)$		$5 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$0.5 \cdot 10^{-7}$	$0.5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
50	0.001	47400	35550	22894	7065	2025	1200	10977
	0.005	46250	34100	17412	6409	1614	1195	5364
	0.1	30000	21710	10560	5730	1462	1136	1427
	0.15	25000	15380	8711	4358	1358	962	1149
	0.2	21000	12210	7534	3769	1210	872	995
Ordre de $\eta(0)$		$0.5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$9.5 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-6}$
100	0.001	54800	53180	31020	9049	2927	1310	21152
	0.005	51470	52290	29600	7945	2277	1300	9444
	0.1	33600	35540	17670	6477	1933	1220	2201
	0.15	32490	30170	14800	6000	1608	1200	1794
	0.2	28000	26238	12000	5826	1444	1067	1436
Ordre de $\eta(0)$		$1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$0.2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
150	0.001	70320	56800	32000	22965	2426	1433	23150
	0.005	66345	55830	30100	21440	2019	1260	11588
	0.1	48500	38600	17311	10232	1823	1252	2574
	0.15	42500	32210	15216	7829	1820	1224	2201
	0.2	37000	29400	13000	6835	1737	1196	1751
Ordre de $\eta(0)$		$0.7 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$0.6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$
300	0.001	84170	65301	43723	27238	2833	3465	30350
	0.005	82847	63194	42080	26065	2721	3230	15192
	0.1	62662	45096	27325	15185	2647	1630	3436
	0.15	56792	40871	24372	12943	2182	1400	2817
	0.2	51400	37357	21000	10262	1839	1206	2453
Ordre de $\eta(0)$		$8 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$3.4 \cdot 10^{-9}$	$0.8 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
1000	0.001	100000	100000	65401	37923	11341	6590	66756
	0.005	100000	100000	63940	36876	10458	6035	27730
	0.1	100000	92674	45060	23644	5710	3850	6582
	0.15	98200	85100	40230	20484	5016	3501	5268
	0.2	93500	79300	35000	18442	4442	3214	4615
Ordre de $\eta(0)$		$1 \cdot 10^{-10}$	$5.2 \cdot 10^{-10}$	$0.5 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$0.3 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$

	Fréquence entre 0 et 1000
	Fréquence entre 4000 et 10000
	Fréquence entre 1000 et 4000
	Fréquence entre 10000 et 20000
	Fréquence entre > 20 000

## Conclusion et Perspectives



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES:

Dans ce mémoire, on a étudié la réponse (déplacement et bande de fréquence) d'une membrane d'un microphone à fibres optique quand les paramètres qui caractérisent varient.

Après une série de calculs effectués par notre programme, on a obtenue des représentations graphiques de la réponse. Cette étude permet de conclure les points suivants:

- les paramètres du microphone les plus influents sur la sensibilité (déplacement de la membrane) sont :
  - le rayon de la membrane  $a$
  - la tension de fixation de la membrane  $T$
  - la densité surfacique de la membrane surfacique  $\sigma_M$ .
- les paramètres les plus influents sur la bande de fréquence de fonctionnement du microphone sont aussi le rayon  $a$ , la tension  $T$  et la densité  $\sigma_M$ .
- les paramètres les moins influents sur la sensibilité sont : le nombre d'ouvertures  $q$  dans la plaque arrière du microphone et les dimensions des trous de chaque ouverture tel que :
  - le rayon du trou  $r_k$
  - la profondeur du trou  $l_k$
  - le rayon de positionnement du trou pour chaque ouverture  $a_k$
- les paramètres non influents sur le déplacement de la membrane et la bande de fréquence sont :
  - la distance  $h$  entre la membrane et la plaque arrière
  - le volume de la chambre arrière  $V$ .
- l'existence des ouvertures, sur la plaque arrière, a une grande influence sur la réponse du microphone .déterminé le degré d'influence de chaque paramètre sur la réponse de la membrane.
- Les résultats de l'étude est récapitulé dans le tableau VII.1. ce tableau peut être exploitable pour la réalisation des microphones optiques dans le domaine sonore et ultrasonore .

Finalement, nous espérons que ce travail contribuera au développement d'autres modèles de microphone et de capteur à fibre optique dans le but de fabriquer des capteurs plus fiables, fidèles et moins compliqués.

## Liste Des Tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Vitesse du son dans quelques matériaux.....	<b>6</b>
<b>Tableau II.2</b> : Différentes valeurs de pressions acoustiques et leurs niveaux d'intensités .....	<b>10</b>
<b>Tableau VI.1</b> : Les dimensions et les paramètres du modèle d'étude.....	<b>57</b>
<b>Tableau VI.2</b> : Les données numériques du modèle.....	<b>58</b>
<b>Tableau VI.3</b> : La comparaison des éléments du système.....	<b>61</b>
<b>Tableau VII.1</b> : Les résultats.....	<b>79</b>

## Liste Des Figures

Fig.2.1 L'oreille humaine.....	13
Fig.2.2 Courbes de sensation de l'oreille.....	12
Fig.2.3 Schéma de capteur à fibre optique.....	17
Fig.2.4 Composantes d'une fibre optique.....	18
Fig.2.5 Milieux et indices de réfraction de la fibre optique.....	18
Fig.2.6 Transmission du signal au cœur de la fibre optique...	19
Fig.3.1 Schéma d'un microphone.....	23
Fig. 3.2 Coupe schématique d'un microphone électrodynamique...	26
Fig.3.3 Différentes parties d'un microphone à fibre optique....	27
Fig.3.4 Les trous et les ouvertures de la plaque arrière .....	28
Fig.3.5 Schéma de fonctionnement du microphone à F.O.....	28
Fig.3.6 Circuit équivalent mécanique du M.F.O.....	30
Fig.4.1 Mouvement de la membrane.....	32
Fig.4.2 Modes de vibration de la membrane.....	39
Fig.4.3 Mécanisme du mouvement de la membrane.....	40
Fig.4.4 Le déplacement au point central de la membrane.....	41
Fig.5.1 Coupe longitudinale du microphone à fibre optique....	44
Fig.5.2 Le déplacement au point $r=0$ .....	46
Fig.6.1 Courbe du déplacement en fonction de $m$ .....	62
Fig.6.2 Courbe de sensibilité et facteur de qualité.....	63
Fig.6.3 Courbe du déplacement en fonction de la pression.....	63
Fig.6.4 Déplacement en fonction de la fréquence.....	64
Fig.6.5 Phase en fonction de la fréquence.....	65
Fig.6.6 Comparaison des déplacements .....	65
Fig.6.7 Comparaison des phases.....	66
Fig.6.8 Comparaison de déplacement avec une étude pratique.	67
Fig.7.1 Graphe du déplacement en fonction du rayon.....	69
Fig.7.2 Courbe de déplacement –fréquence- rayon.....	70
Fig.7.3 Courbe de déplacement –fréquence- ouvertures.....	71
Fig.7.4 Courbe de déplacement –fréquence- distance $h$ .....	72
Fig.7.5 Courbe de déplacement en fonction de la tension $T$ ....	72
Fig.7.6 Courbe de déplacement –fréquence- tension .....	73

Fig.7.7 Courbe de déplacement –fréquence- densité.....	74
Fig.7.8 Courbe de déplacement –fréquence- volume V.....	75
Fig.7.9 Courbes de la réponse en fonction de T et de $\sigma_M$ .....	76
Fig.7.10 Courbes de la réponse en fonction de T et de $\sigma_M$ .....	77
Fig.7.11 Courbes de la réponse en fonction de T et de $\sigma_M$ .....	78

# Bibliographies

- [1] Brüel et Kjaer Ed, Acoustique Noise Measurement, (1979).
- [2] Xavier Boutillon, René Caussé, Antoine Chaigne, Benoît Fabre, Joël Gilbert, Lexique d'acoustique, (CNRS, LMS, école polytechnique, IRCAM, Paris, ENSTA, Palaiseau, LAM, Université Paris 6, CNRS, LAUM, Le Mans).
- [3] Coriadre Vilain, Notions Générales d'Acoustique (Deuxième version), ICP-INPG, Grenoble, Paris.
- [4] R. Pujol, Le traitement du son dans l'oreille interne, Pour la Science, n°154, Août 1990
- [5] Philippe Blanc-Benon, Propagation en milieu inhomogène et thermo acoustique, Centre Acoustique, Ecole Centrale de Lyon, 69134 Ecully, France
- [6] Claude CENDRE, Les Microphones, Eyrolles, 1999.
- [7] Georges Asch et collaborateur, Les Capteurs en instrumentation industrielle, Edition Dunod, Paris, 1991.
- [8] Pierre FERDINAND, Capteurs à fibres optiques et réseaux associés, Paris, France
- [9] Eric UDD, Fiber Optic Sensor, A Wiley interscience publication, John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [10] Pierre Lecoy, Télécommunication optique, Edition Hermès, Paris, 1992.
- [11] Andong Hu and Frank W. Cuomo, Theoretical and experimental study of a fiber optic microphone, University of Rhode Island, Kingston, 1991.

[12] Alexander KOTS et Alexander PARITSKY, Fiber optic Microphone for Harsh Environment, BOSTON, Massachusetts, (1999).

[13] Alonzo & Vin, Physique générale , champs et ondes, OPU, Alger,89.

[14] L.LANDOU et E.LIFCHITZ, Théorie de L'élasticité, T2, Edition MIR, MOSCO, (1967).

[15] Allan J.ZUCKERWAR, Thorical response of condenser Microphone, Norfolk, VIRGINIA, 1978.

[16] Abedlrafik Malki, Rachi Gafsi, Pierre Lcoy & Yves Mevel, Fibre optique microphone for communication system, école centrale Paris, 1996.

[17] H.BABAAMER, fortran 77, Edition BERTI, Alger, 1989.

[18] S.FAROULT et D.SIMON, Fortran structuré et méthodes Numériques, DUNOD informatique,Paris,1987