

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université El-Hadj-Lakhdar de Batna**

**FACULTE DES SCIENCES**

**Thèse  
Présentée par  
Kamel Eddine AIADI**

**Soumise au département des sciences physiques en vue de l'obtention du  
diplôme de Docteur en Sciences Physiques**

**Thème :**

**ETUDE D'UN CAPTEUR OPTIQUE APPLIQUE À LA PETROCHIMIE**

**Devant le jury :**

Aida Med Salah	U. Mentouri Constantine	Président
Belbacha Djemai	U.El-Hadj-Lakhdar Batna	Examineur
Bouzida Belgacem Aissa	U.El-Hadj-Lakhdar Batna	Examineur
Ferhat Rehouma	U. Ouargla	Examineur
Zereg Moussa	U. El-Hadj-Lakhdar Batna	Invité
Meftah Med Tayeb	U. Ouargla	Rapporteur

**A mon père et à ma mère,  
à la mère de mes enfants,  
à mes enfants,  
à ma grande famille,**

**je dédie ce travail**

*Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au sein du laboratoire **LARENZA** de l'Université de Ouargla.*

*J'exprime mes remerciements à **Mohammed Tayeb MEFTAH**, Professeur à l'Université de Ouargla, et à **Ferhat REHOUMA**, Professeur à l'Université de Ouargla pour leurs aides et leurs soutiens constants et je leur exprime ma sincère reconnaissance pour leurs disponibilités, leurs conseils toujours judicieux et pour leurs qualités scientifiques, pédagogiques et humaines.*

*Je remercie **Mohammed Salah AIDA**, Professeur à l'Université de Constantine, de me faire l'honneur de présider le jury.*

*Je tiens à remercier **Belbacha Djemai**, **Bouzida Belgacem Aissa** et **Zereg Moussa** qui sont des Maîtres de conférence à l'Université de El-Hadj-Lakhdar à Batna d'avoir accepté d'être membres de jury.*

*Je remercie aussi **Rabah BOUANANE** Maître assistant à l'Université de Ouargla pour son aide dans ce travail.*

*Je tiens également à remercier **Saci MESSAADI** Maître de conférence à l'Université de El-Hadj-Lakhdar à Batna pour son aide administrative ainsi que sa disponibilité constante.*

*Enfin, je tiens à remercier l'ensemble des personnes du laboratoire, **permanents et thésards**.*

## **Table de matières :**

### **Préface**

### **Chapitre 1 : L'hydrocarbure : paramètres et mesures 1-8**

- I-1 Le pétrole et ses origines
- I-2 Propriétés et paramètres physiques
- I-3 Instrumentation
- I-4 Dangers des hydrocarbures

Conclusion

Références

### **Chapitre II : L'acoustique : notions et équation d'onde 9-20**

- II-1 Description physique du son
- II-2 L'équation d'onde acoustique
- II-3 Caractéristiques du son
- II-4 Les causes d'amortissement de l'onde acoustique
- II-5 Onde acoustique

Conclusion

Références

### **Chapitre III : Les capteurs 21-34**

#### III-A Capteurs

- III-A-1 Capteurs actifs et passifs
- III-A-2 Capteurs à fibre optique
  - III-A-2-a la fibre optique
  - III-A-2-b le transducteur
  - III-A-2-c l'émetteur de lumière
  - III-A-2-d le récepteur de lumière
  - III-A-2-e le circuit d'alimentation
  - III-A-2-f la chaîne de traitement

#### III-A-3 Les avantages des capteurs à fibre optique

#### III-B Les capteurs de pression et de pression acoustique

- III-B-1 généralité
- III-B-2 Oreille
- III-B-3 Le microphone
  - III-B-3-a Le microphone classique
  - III-B-3-b Le microphone optique

Conclusion

Références

### **Chapitre IV : Modélisation du capteur 35-58**

- IV-1 Modèle théorique
- IV- 2 Formulation et modélisation
  - IV-2-1 Cas général
  - IV-2-2 Cas d'une membrane circulaire
  - IV-2-3 L'équation du mouvement de la membrane d'un microphone à fibre optique.
- IV- 3 L'organigramme de la modélisation
- IV- 4 Le programme informatique
  - IV- 4 -1 Calcul des zéros de la fonction de Bessel
  - IV- 4 -2 Calcul du déplacement de la membrane
- Conclusion
- Références

## **Chapitre V : Validation et résultats 59-79**

- V-A Validation
  - V-A-1 Dimensions et paramètres
  - V-A-2 Calcul d'essais
  - V-A-3 Comparaison des résultats
  - V-A-4 Présentation graphique de la réponse et comparaisons
  - V-A-5 Comparaisons des résultats graphiques
- V-B Influence des paramètres sur la réponse de la membrane
  - V-B-1 Influence du rayon de la membrane
  - V-B-2 Influence du nombre d'ouvertures de la plaque arrière
  - V-B-3 Influence de la distance
  - V-B-4 Influence de la tension de fixation de la membrane
  - V-B-5 Influence de la densité de la membrane
  - V-B-6 Influence du volume de la chambre arrière
  - V-B-7 Influence des paramètres principaux sur la sensibilité et sur la bande de fréquences
- Références

**Conclusion 80-82**

## Préface

Dans les milieux industriels, le besoin d'un instrument de mesure précis, fiable et imperturbable est nécessaire. Dans l'industrie pétrolière ou pétrochimique, où on trouve fréquemment les changements de phase ( liquide-gaz- solide ), la pression, la température et le volume jouent le rôle principal dans la détermination de l'état de la matière pétrolière (qu'il soit pur ou mélange). A partir de la relation entre ces trois paramètres ou l'équation d'état, on détermine les autres paramètres de la matière.

Les capteurs à fibre optique peuvent être, par leurs avantages, susceptibles de surclasser toutes les technologies concurrentes. Très tôt et dès 1983, les chercheurs du domaine ont consacré une conférence internationale sur ce type de capteurs. Parmi ces capteurs, on trouve les microphones et les hydrophones à fibre optique qui sont utilisés dans le domaine sonore.

Dans ce travail, nous proposons un microphone de ce type, que nous avons adapté, pour mesurer la pression d'une part et d'autre part la vitesse du son. Celui-ci peut servir à trouver d'autres paramètres dans un hydrocarbure.

Dans un premier temps et au premier chapitre, nous allons consacrer un aperçu général sur les hydrocarbures. Alors qu'au deuxième chapitre nous établissons l'équation d'onde en faisant appel aux notions d'acoustique qui seront utiles par la suite du travail. Seront exposés au troisième chapitre les capteurs en donnant plus d'intérêt sur les capteurs à fibre optique. Au quatrième chapitre, on propose un modèle de capteur avec un programme de calcul Fortran permettant de dégager un certain nombre de paramètres physiques relatifs au capteur. L'application de ce programme sur quelques cas pratiques a fait l'objet du cinquième chapitre.

# **Chapitre I**

## **Les hydrocarbures Paramètres et mesures**

## **Introduction**

L'humanité connaît le pétrole depuis les temps reculés (Babylonie, Byzance, indiens). Le « pétrole lampant » éclaira les maisons et les rues dans le XVIII<sup>e</sup> siècle. Avec l'apparition du moteur à explosion, au XIX<sup>e</sup> le pétrole devient source de carburants pour les divers transports. Maintenant, le pétrole est la principale source d'énergie dans le monde. Le pétrole fait bouger les moyens de transports routières, navals et aériens, le pétrole fournit l'énergie électrique dans les centrales thermiques, le pétrole est la base d'une industrie chimique qui donne le plastique, ..... Le pétrole est alors indispensable à notre civilisation plus que n'importe quel autre produit pris séparément.

La découverte de très riches gisements de pétrole dans le Golf Arabique, dans les années 1950, accéléra la production et la transformation du pétrole dans le monde entier. La crise énergétique de 1973 fut grimper les prix du pétrole et le monde commença à se rendre compte du fait que les réserves du pétrole sont épuisables, par conséquent l'utilisation du pétrole devient plus économique et plus rationnelle. En revanche, l'utilisation du pétrole en tant que matière première chimique connaît une croissance accélérée [1].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux paramètres physiques et à l'instrumentation.

### **I.1. L'origine du pétrole**

Outre son aspect purement théorique, l'origine du pétrole et la formation de ses gisements représente un grand intérêt pratique permettant d'agir en connaissance de cause en cherchant de nouveaux gisements et en estimant ses réserves commerciales et hypothétiques.

Selon la théorie organique, qui est considérée scientifique et argumentée, le pétrole tire son origine des restes organiques, essentiellement d'organismes végétaux et animaux accumulés au fond des mers. Les bactéries jouèrent probablement un grand rôle dans l'accumulation des sédiments de fond.

L'hypothèse minérale, qui place l'apparition du pétrole à l'époque de la formation de la terre et des planètes du système solaire, trouve encore des partisans parmi les géologues et les chimistes.

Le pétrole (brut), est une mixture complexe, constitué essentiellement d'hydrocarbure (hydrogène et carbone) et il contient aussi, avec des quantités minimales, du soufre, d'azote, d'oxygène et du hélium. Les propriétés physiques et chimiques du pétrole dépendent de la concentration de ses constituants.

Ils peuvent être solides (paraffine), liquides (essence), liquéfiés (butane, propane) ou gazeux (méthane) [2].

## **I.2. Propriétés et paramètres physiques :**

L'équation d'état est une expression analytique qui relie la pression à la température et au volume. La plus simple et la mieux connue est celle des gaz parfaits.

$$PV = nRT$$

Mais l'application de cette équation est limitée aux gaz parfaits et aux gaz proches de ces derniers. D'autres équations d'état expérimentales sont développées pour d'autres gaz, prennent la forme générale suivante [3] :

$$p = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2 + uV + wb^2}$$

où a ; b ; u ; w sont des constantes. Dans le cas u=w=0, on retrouve l'équation de Van Der Waals.

On peut prévoir les dérivés d'une matière brute à partir des propriétés physiques. Ces derniers sont plusieurs et sont caractérisés par des paramètres. Citons quelques uns [1-4].

Densité : La densité est définie comme le rapport de la masse d'un corps au volume qu'il occupe. La densité relative est le rapport de la densité du corps considéré à celle d'un corps de référence (l'eau à 4° C dans la plupart des cas). Comme les produits pétroliers et l'eau ont des coefficients de dilatation

différents, il faut indiquer la température du produit et de l'eau lors de la détermination de la densité relative. Une densité relative est désignée par  $\rho_4^{20}$  où 20 et 4 sont, respectivement, les températures (en °C) du produit et de l'eau. La densité d'un produit pétrolier est en corrélation avec sa composition chimique.

Masse volumique (u.s density) : Elle représente la masse d'une unité de volume.

Volume massique (spécifique) : Il représente le volume occupé par une unité de masse. Il est donc l'inverse de la masse volumique.

Densité (u.s specific gravity) : Elle est définie comme le rapport de la masse volumique du gaz sur la masse volumique de l'air dans les mêmes conditions de vapeur et le rapport de la masse volumique du liquide sur la masse volumique de l'eau dans les mêmes conditions de référence.

Compressibilité : En mesurant la pression P et la température T d'un gaz il est possible de déterminer expérimentalement, pour ce gaz, l'équation d'état qui relie le volume molaire et la pression à la température est :

$$f(P,V,T)=0$$

On définit le rapport de compressibilité:  $Z=V/V^*$

où  $V^*$  est le volume molaire d'un gaz parfait dans les mêmes conditions de pression et de température.

Pour un gaz parfait  $PV = nRT$  où R est une constante et n le nombre des moles,

P : la pression du gaz

V : le volume du gaz

$$Z=PV/RT$$

La masse volumique :

$$r = \frac{M}{V} = \frac{PM}{ZRT}$$

Pour un gaz parfait  $Z=1$ . Pour un gaz réel Z varie avec la pression et tend vers 1 lorsque la pression tend vers zéro, il se rapproche alors du gaz parfait.

En l'absence de mesures expérimentales, le facteur Z peut être estimé par des corrections empiriques si la composition du gaz est connue.

Viscosité: Elle est le pouvoir caractéristique des fluides de résister au déplacement d'une partie de fluide par rapport à l'autre. La résistance à ce déplacement est proportionnelle au gradient de la vitesse en direction de la normale à l'écoulement de fluide. Elle est donnée par l'équation de Newton :

$$F = \frac{\eta S(v_2 - v_1)}{(y_2 - y_1)}$$

$\eta$  : coefficient de frottement ou de viscosité,

F : la force tangentielle extérieure,

S : l'aire des couches de fluide,

$(v_2 - v_1)$ : différence de vitesses entre deux couches de fluide séparées par les distances  $(y_2 - y_1)$ .

L'unité de la viscosité dans le système SI est (Pa·s), on l'appelle aussi la viscosité dynamique et son inverse est appelé fluidité. La viscosité cinématique est le rapport de la viscosité dynamique à la densité du fluide. L'unité dans le système international s'exprime en  $m^2/s$ .

La viscosité est mesurée à l'aide d'un viscosimètre.

Refroidis, de nombreux pétroles forment des cristaux. Dans ce cas, la loi de Newton n'est plus applicable. La viscosité des gaz (et parfois les liquides) est souvent calculée par des équations empiriques.

La viscosité varie en fonction de la température, de la pression, de la densité et de la solubilité des gaz.

Conductivité thermique: Elle se définit à partir de l'équation de Fourier qui exprime la proportionnalité entre le flux thermique  $\phi$  traversant l'unité de surface de ce milieu dans une direction donnée et le gradient de température  $(\partial T/\partial x)$  selon cette même direction :

$$j = -l \frac{\partial T}{\partial x} (\text{W/m.C}^\circ).$$

Sa valeur augmente avec la température. On peut déterminer expérimentalement la conductivité thermique.

La tension superficielle : Elle est la force par unité de longueur exercée par un liquide (un gaz) ou une vapeur sur un liquide ou une vapeur (ou gaz) sur la couches entre le liquide et le gaz ou la vapeur.

Cette tension peut être mesurée dans les laboratoires (unité SI : N/m). Comme elle peut être calculée à partir des équations empiriques. Cette tension est appelée superficielle si la force est exercée entre deux liquides.

Pouvoir calorique : Le pouvoir calorifique d'un combustible à T (C°) est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une quantité unitaire de ce combustible, la combustion étant effectuée à la pression atmosphérique.

Elle est calculée à partir de l'équation suivante :

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d_0}} (\text{KJ/m}^3)$$

W : l'indice de Wobbe dépend de la composition du fluide,

d<sub>0</sub> : densité dans les conditions normales.

L'indice de réfraction : Il est le rapport de la vitesse de la lumière monochromatique dans le vide à la vitesse de la lumière dans le milieu. Il change avec la température. Il présente un grand intérêt non seulement pour les corps purs mais aussi pour les mélanges pétroliers complexes. Il est d'autant plus petit que la teneur relative en hydrogène des hydrocarbures est plus élevée.

Il y a d'autres températures caractérisant les mélanges et les produits pétroliers comme les températures de congélation, de cristallisation, d'inflammation,...

Tous les paramètres sont reliés par des relations empiriques, variant d'un produit à un autre et d'une région à une autre.

### **I.3. Instrumentations :**

L'une des premières informations requises pour exploiter un gisement d'hydrocarbure concerne le diagramme de phases. Les différentes méthodes utilisées pour déterminer le diagramme de phase et les propriétés physiques des phases sont appelées PVT (pression, volume, température) [5].

La détermination expérimentale des propriétés d'un hydrocarbure nécessite la technique de prise d'un échantillon qui est souvent délicate et qui peut être la cause d'erreurs importantes. Les techniques employées en cours de forage ne donnent que des informations limitées à un faible rayon autour du puits. Les essais permettent d'étendre ce rayon d'investigation à des larges zones et de fournir des renseignements sur la perméabilité lointaine, l'hétérogénéité, les limites du réservoir, ainsi que la porosité et la compressibilité des roches magasins.

Les essais servent à définir un indice de productivité pour les puits à effluent liquide, ou une courbe de potentiel pour les puits à gaz. On déduit le meilleur taux d'exploitation et éventuellement, le déclenchement d'une stimulation si le puits est estimé colmaté. L'évolution des pressions moyennes ou pseudo statiques dans l'aire de drainage du puits permet d'estimer les volumes des diverses phases en place, le rapport gaz/huile et le rapport eau/huile, et de prévoir leur variation.

Dans certains cas, la connaissance des pressions de fond peut être primordiale, par exemple pour fixer le seuil d'abondons. La mesure simultanée des pressions de fond et de tête permet d'estimer le gradient de la colonne de fluide en statique et en écoulement.

Les essais de puits ont pour objet la mesure des paramètres essentiels à la connaissance du puits et du gisement. La connaissance de ces paramètres exige

la mesure simultanée, avec le plus de précision possible, des débits, des pressions et des températures du fond et de la surface du puit.

Le pétrole et ses dérivés sont des mélanges assez complexes d'hydrocarbures et de leurs hétérodérivés. L'analyse de tels mélanges par composés demande beaucoup de temps [6].

#### **I.4. Dangers des hydrocarbures :**

Propagation des vapeurs et des gaz : La propagation des vapeurs et gaz peut se faire sur des distances importantes, suivant les conditions atmosphériques et en fonction des grandeurs physiques du gaz ou des vapeurs (densité, température, pression,...).

Inflammabilité : Les hydrocarbures sont inflammables, même à des températures relativement basses, dans le cas d'échauffement, d'étincelle électrique,...

Lorsque les gaz contiennent de l'hydrocarbure sulfuré, il peut y avoir formation de sulfure de fer pyrophorique susceptible de s'enflammer spontanément en contact de l'air.

La flamme dans un mélange inflammable se propage dans tout le volume, les explosions se propagent ainsi.

Les hydrocarbures peuvent présenter d'autres dangers, comme : le pollution de l'air (un propagation de 0.5% de vapeur d'hydrocarbures dans l'air respiré presque une toxicité à l'organisme humaine) [7].

#### **I.5. Conclusion :**

On constate que :

Il y a une variété de paramètres utilisés dans le domaine de l'analyse des hydrocarbures et qu'il y a une variété d'analyseurs. Chaque un de ces derniers est adapté à une famille de paramètres.

Ces paramètres sont reliés entre eux par des relations empiriques et par conséquent la connaissance de chacun facilite plus l'analyse.

La pression, à côté de la température, constitue le paramètre maître dans toutes les mesures. La mesure de ces paramètres est délicate et pénible à cause des conditions dures et rudes dans le champ et les conditions de prélèvement des échantillons dans les laboratoires. Les instruments de mesures ou les capteurs utilisés doivent être précis et peuvent, notamment, supporter les conditions citées précédemment. Dans ce qui suit, on présente un capteur optique de pression et un autre paramètre qui peut être utile à l'analyse du pétrole et ses produits.

**Référence :**

- [1].V. Proskouriakov, A. Drabkine; La chimie du Pétrole et du Gaz; Editions Mir de Moscou 1981.
- [2].V. Sokolov , A. Foursov ; Prospections détaillées de champs de pétrole et de gaz ; Editions Mir 1979 traduction française 1983.
- [3].A..Tarek, Hydrocarbon Phase Behavior in Contribution in Petroleum Geology and Engineering Vol.7 Gulf Publishing Company 1989
- [4].A.. Rojey, B. Durand, C. Jullian et M. Valais : Le gaz naturel, production, traitement, transport. Publications de l'Institut Français du Pétrole ; Editions Technip 1994
- [5]. Productions et Traitements des Pétroles Bruts Salés ; Editions Technip 1976
- [6]. Manuel des Essais de Puits; Editions Technip 1972
- [7]. Production Stockage Exploitation; Editions Technip 1969

## **Chapitre II**

### **L'acoustique Notions et équation d'onde**

## **Introduction :**

L'acoustique est la science qui étudie le son et ses propriétés : naissance et propagation ; sources et capteurs ; ondes et champs.

L'acoustique constitue depuis longtemps une discipline en soi, justifiée par son importance et sa diversité quotidienne. On la trouve dans la vie courante (audio et audiovisuel), dans le domaine de l'architecture, l'électronique, la physiologie, la biologie, et la médecine. Dans l'industrie, elle est exploitée dans la topographie sous-marine, dans le contrôle des structures industrielles, dans la caractérisation et la détection des défauts etc.... Elle s'appuie sur plusieurs théories : mécaniques, thermodynamiques et conservation de la matière... Elle a, comme l'optique, une relation avec la physiologie humaine. Quelques notions utiles à notre étude seront exposées dans ce chapitre.

### **II.1. Description physique du son**

Le son est une perturbation (vibration) des particules de l'air provoquée par une source sonore et captée par une oreille ou par un capteur [1].

Dans la nature, le son est généré par différentes sources : [2]

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

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

-sources harmoniques : les instruments musicales et électroniques.

Physiquement, on peut définir le son comme une oscillation mécanique de pression qui se propage dans un milieu (fluide, solide) longitudinalement dans le temps et dans l'espace avec une vitesse qui s'appelle la célérité du son.

Le son est un phénomène physique d'origine mécanique qui consiste en la variation de pression (très faible), donnant naissance à une onde.

Quand on veut caractériser un son selon ses composantes fréquentielles, on distingue généralement [3]:

-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 anharmonique : est une superposition de sons purs dont les fréquences ne sont pas tous multiples d'une fréquence unique,

-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, telles que la pression et la vitesse des particules

## II.2. L'équation de l'onde acoustique:

L'étude que nous allons proposer est d'une dimension[4-5]. On considère un cylindre, d'axe Ox, de section S est rempli d'un fluide non visqueux, compressible. Une certaine masse  $dm$ , entre  $x$  et  $x+dx$ , occupant un volume au repos  $dV_0=Sdx$ .  $x(x,t)$  caractérise le déplacement en  $x$ . Le volume en mouvement est :

$$dV = S[dx + x(x+dx, t) - x(x, t)]$$

$$dV = dV_0 \left( 1 + \frac{\partial x}{\partial x} \right) \quad \text{car} \quad \frac{\partial x}{\partial x} \ll 1 \quad (2.1)$$

On appelle la dilatation  $d$  :

$$d = \frac{dV - dV_0}{dV_0} = \frac{\partial x}{\partial x} \quad (2.2)$$

La masse étant conservée, la variation du volume entraîne alors une variation de la masse volumique égale à:

$$dm = r_0 dV_0 = r dV \quad (2.3)$$

Les tranches comprimées sont plus chaudes que les tranches dilatées: les transformations sont suffisamment rapides vis-à-vis du transfert de chaleur pour que l'on puisse négliger l'échange entre les différentes tranches. Comme de plus, les mouvements sont de faibles amplitudes, les transformations sont

considérées comme adiabatiques et réversibles, c'est-à-dire isentropiques, d'où le coefficient de compressibilité isentropique :

$$c_s = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_s = -\frac{1}{dV_0} \frac{dV - dV_0}{P - P_0} = -\frac{d}{P} \quad (2.4)$$

Des équations (2,3) et (2,4) on déduit que  $\Rightarrow P = -\frac{1}{c_s} \cdot \frac{\partial x}{\partial x} \quad (2.5)$

Si on néglige le poids du fluide, la relation fondamentale de la dynamique sur  $ox$  s'écrit :

$$r_0 A dx \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = A(P_0 + P(x, t)) - A(P_0 + P(x + dx, t)) = -A \frac{\partial P}{\partial x} dx$$

d'où :  $r_0 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.6)$

Des équations (2,4) et (2,5) on déduit que  $\Rightarrow \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} - r_0 c_s \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$

C'est l'équation de d'Alambert avec célérité (ou vitesse de propagation) :

$$c = \frac{1}{\sqrt{P_0 c_s}} \quad (2.8)$$

En appliquant les relations  $PV^\beta = cte$  et  $PV = nRT$  qui sont valables pour les gaz parfaits, on trouve que la célérité est égale à :

$$c = \sqrt{\frac{gRT}{M}} \quad (2.9)$$

où  $M$  est la masse molaire,  $\beta$  et  $\gamma$  sont les constantes du gaz parfait. On trouve que  $C$  ne dépend ni de  $r$  ni de  $P$ .

Dans le cas à trois dimensions, la célérité à la même valeur :

$$c = \frac{1}{\sqrt{P_0 c_s}}$$

### Remarques :

- La célérité du son calculée par  $c_T$ , le coefficient de compressibilité isotherme (à température constante  $c_T = \gamma c_s$ ), au lieu de  $c_s$  donne une valeur loin de la réalité.

$$c_T = \frac{c_s}{\sqrt{\gamma}} \text{ dans le cas des gaz parfaits .}$$

, Dans l'équation de d'Alambert, il apparait (par homogénéité) que  $x \sim ct$  ;

$$\text{Dans l'équation de la chaleur } \left( D \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial t} \right) f = 0$$

et par une analyse dimensionnelle  $\frac{x^2}{D} \sim t$

pendant une période  $T$  l'onde acoustique parcourt  $x_{\text{onde}} = cT$  et la distance parcourue par la chaleur est  $x_{\text{chaleur}} = \sqrt{DT}$ .

L'approximation d'adiabaticité est  $x_{\text{chaleur}} \ll x_{\text{onde}}$

$$T \gg \frac{D}{c^2} T$$

Dans le cas de l'air ( $D = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $c = 340 \text{ m s}^{-1}$ )

$$T \gg 1,7 \cdot 10^{-10} \approx \frac{1}{f_l} \quad : \quad f_l = 1 \text{ GHz (ultrasonique)}$$

Si on dépasse  $f_l$ , on ne conserve pas l'adiabaticité.

### II.3. Les caractéristiques du son et de l'onde acoustique

L'onde acoustique est caractérisée par la célérité qui est la vitesse avec laquelle l'onde acoustique se propage ou la vitesse du son qui dépend des caractéristiques physiques du milieu. Par exemple la célérité du son dans l'air [6]

:

$$343 \text{ m/s} \quad \text{à } 20^\circ \text{ C}$$

$$331,29 \text{ m/s} \quad \text{à } 0^\circ \text{ C.}$$

La vitesse du son dans quelques matériaux est donnée dans le tableau (2.1)

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

**Tableau 2.1** Vitesse du son dans quelques matériaux (à 21°C) en m/s

Souvent on classe les ondes acoustiques selon leurs fréquences  $f$  :

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

On trouve aussi d'autres caractéristiques [7-8] .

### **II.3.1. La pression acoustique**

La pression acoustique correspond à une variation de la pression atmosphérique 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  $p_0 = 0.00002$  Pa jusqu'à à 200 Pa [7].

### **II.3. 2.La force sonore (La sonie)**

La sonie ou la "force sonore" est la sensibilité en fonction de la fréquence. Par exemple une pression acoustique de  $2 \cdot 10^{-2}$  Pa peut provoquer une sensation auditive à 50 Hz, mais à 4000 Hz une pression de moins de  $2 \cdot 10^{-5}$  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

### **II.3.3. L'intensité et la puissance d'une onde sonore**

Les ondes sonores mettent en mouvement des particules d'un milieu élastique. Elles transportent une énergie sonore exprimée principalement par l'intensité et la puissance acoustiques .

La puissance acoustiques 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  $W/m^2$

### **II.3. 4.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:

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

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

- une raison pratique selon laquelle les pressions acoustiques tolérées par l'oreille couvrent une large étendue de  $10^{-5}$  Pa à 10 Pa soit dans un rapport de  $10^6$ . L'échelle logarithmique compresse la gamme des valeurs utilisées du son faible (0 dB) au son fort (120 dB) dans un intervalle réduit, 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. Et un niveau sonore de 180 dB correspond à 1/5 de la pression atmosphérique.

### **II.3.5. Hauteur d'un son**

La hauteur du son est la fréquence à laquelle le son est produit où émis. On distingue trois intervalles (octaves) pour les sons audibles[13] :

- 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.

### II.3. 6. Timbre d'un son

Puisque une onde sonore est caractérisée par une amplitude et une fréquence, on trouve plusieurs sons différents qui ont la même amplitude et la même fréquence, mais sont distingués 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.

### II.3. 7. 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) [9].

L'admittance acoustique  $Y(\omega)$  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  $Y$ ):

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

### II.3.8. Les causes d'amortissement du son :

L'amortissement est causé par trois types d'absorption d'énergie, qui sont produites par la relaxation moléculaire, la viscosité et la conduction thermique[4].

Dans les trois cas il s'ajoute un terme d'amortissement à l'équation d'onde. Cette dernière s'écrit sous la forme :

$$\Delta x - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + a \frac{\partial}{\partial t} \Delta x = 0,$$

où  $a$  est le coefficient d'amortissement et dont la solution s'écrit sous la forme:

$$x = x_0 e^{-ax} e^{iw\left(\frac{x}{c}-t\right)}$$

Les trois causes d'atténuation ont en commun :

De ne pas modifier la célérité : elle reste celle de la propagation isentropique.

Le coefficient d'amortissement est proportionnel au carré de la fréquence ; ainsi pour des ultrasons lointains ( $\approx 10^3$  Khz) l'amortissement est notable.

Dans le domaine audible ( $\approx 1$  Khz) les atténuations sont sans conséquences.

#### II.4. Onde acoustique dans un pavillon sonore :

Une onde acoustique se propage suivant  $ox$  dans un pavillon de révolution qui possède une section circulaire variable notée  $S(x)$  [4].

La dilatation :

$$d = \frac{dV - dV_0}{dV_0} = \frac{(Sx)(x+dx) - Sx(x)}{Sdx} = \frac{1}{S} \frac{\partial(Sx)}{\partial x}$$

$$c_s = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_s = -\frac{d}{P} \quad (2.10)$$

$$P = -\frac{1}{c_s S} \cdot \frac{\partial(Sx)}{\partial x} \quad (2.11)$$

La relation fondamentale :

$$r_0 S dx \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = (PS)(x) - (PS)(x+dx) + dF \quad (2.12)$$

$dF$  est la force résultante portée par  $ox$  exercée par la paroi du pavillon :

$$dF = P ds \cos q \quad ds : \text{surface latérale}$$

$$dF = P \cdot \frac{dS}{dx} \cdot dx \quad \text{car : } ds \cos q = dS$$

La relation (2.12) s'écrit donc :

$$r_0 S dx \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{\partial PS}{\partial x} dx + PdS = -S \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (2.13)$$

$$r_0 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{inchangée par rapport au cylindre droit.}$$

(2,13) se réécrit sous la forme :

$$P = -\frac{1}{c_s} \left( \frac{\partial x}{\partial x} + \frac{x}{S} \cdot \frac{dS}{dx} \right) = -\frac{1}{c_s} \left( \frac{\partial x}{\partial x} + x \frac{d \ln S}{dx} \right) \quad (2.14)$$

$$-c_s \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( x \frac{d \ln S}{dx} \right) = r_0 c_s \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

donc on trouve :

$$\frac{\partial^2 x}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{\partial x}{\partial x} \left( \frac{d \ln S}{dx} \right) = 0 \quad (2.16)$$

$$\text{où : } c^2 = \frac{1}{r_0 c_s}$$

En général, le terme supplémentaire dans l'équation d'onde est à coefficient non constant.

Cet terme fait que l'amplitude de l'onde propagée change. La seule fonction qui rend ce coefficient constant est :  $S(x) = S_0 e^{ax}$ . L'amplitude augmente dans le cas  $a > 0$ , et elle diminue dans le cas  $a < 0$ .

Pour une solution harmonique,  $x(x, t) = X(x) \cdot e^{-i\omega t}$ , l'équation (2.16) donne :

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + a \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + \frac{\omega^2}{c^2} X = 0 \quad (2.17)$$

.On cherche une solution  $x(x, t) = A e^{i(kx - \omega t)}$  pour l'équation (2.17)

On aura cette solution que si :

$$k^2 - iak + \frac{\omega^2}{c^2} = 0 \quad (2.18)$$

Cette équation de second degré a pour :

$$\Delta = -a^2 + 4 \frac{\omega^2}{c^2}$$

des solutions imaginaire :

$$k_1 = \frac{ia}{2} + \frac{i}{2} \sqrt{-4 \frac{\omega^2}{c^2} + a^2} \quad \text{et} \quad k_2 = ia - \frac{i}{2} \sqrt{-4 \frac{\omega^2}{c^2} + a^2} \quad (2.19)$$

Cette solution pour  $x(x,t)$  ne se propage pas, c'est une onde évanescence. Tout le fluide vibre en phases et l'amplitude de la vibration décroît au fur et à mesure que la section de pavillon augmente.

2) Si  $\Delta \geq 0$ , solutions de l'équation du second degré sont :

$$k_1 = \frac{ia}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{a^2 - 4 \frac{w^2}{c^2}} \quad \text{et} \quad k_2 = \frac{ia}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{a^2 - 4 \frac{w^2}{c^2}} \quad (2.20)$$

Si on prend  $b = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 - 4 \frac{w^2}{c^2}}$  ;  $x(x,t)$  s'écrit alors :

$$x(x,t) = e^{-\frac{ax}{2}} [A_1 e^{i(bx-wt)} + A_2 e^{-(bx+wt)}] \quad (2.21)$$

Le facteur  $e^{-\frac{ax}{2}}$  fait atténuer l'onde. L'autre facteur de  $x(x,t)$  fait propager l'onde.

Dans le cas

$$\Delta = 0, \quad w = w_c = \frac{ac}{2} \quad (2.22)$$

Cette pulsation de coupure est caractéristique de la propagation au dessous de laquelle il n'y aura pas de propagation

### Conclusion :

On constate que le son, par ses propriétés, peut caractériser les milieux où il se propage. Sa vitesse qui est dépendante seulement du milieu, peut nous servir comme paramètre supplémentaire du milieu et donc une information en plus sur le milieu. Une propagation sonore dans un pavillon à géométrie hyperbolique, nous permet de trouver la vitesse d'un son pur si on connaît la pulsation de coupure et le paramètre de l'hyperbole. Dans ce cas, nous aurons besoin d'un capteur ou plus précisément d'un microphone pour la détermination de la vitesse du son. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

**Référence :**

- [1] 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
- [2] Philippe Blanc-Benon, Propagation en milieu inhomogène et thermo  
acoustique, Centre Acoustique, Ecole Centrale de Lyon, 69134 Ecully, France.
- [3] John Wiley & Crocker, M.J, Handbook of Acoustics, Toronto, Canada, 1998
- [4].Christian Garing ; Ondes mécaniques et diffusion; Edition ellipses 1998
- [5] L.Landau et E.Lifchitz ; Mécanique des fluides; Edition MIR1971
- [6] Brüel et Kjaer Ed, Acoustique Noise Measurement, (1979).
- [7] Coriadre Vilain, Notions Générales d'Acoustique(Deuxième version), ICP-  
INPG, Grenoble, Paris.
- [8] Georges Asch et collaborateur, Les Capteurs en instrumentation industrielle,  
Edition Dunod 1991.

## **Chapitre III**

### **Capteurs**

## INTRODUCTION :

Les capteurs jouent le rôle des machines et traduisent donc une certaine perception de la réalité physique environnante. Une meilleure connaissance de celle-ci passe donc par le développement et la mise en œuvre de capteurs plus diversifiés et performants.

Bien entendu, une large variété d'instruments classiques est à la disposition de la technologie et de l'ingénieur, mais certains besoins restent mal couverts. C'est pourquoi, les chercheurs développent des capteurs fondés sur l'utilisation des nouvelles techniques.

Les capteurs à fibres optiques, par leurs petite taille et poids, isolation galvanique, passivité chimique, tenue en température..., rendent possibles des mesures dans les milieux tels que les atmosphères humides, chimiquement réactives et corrosives, où les vibration sont importantes ; où des interférences électromagnétique sont présentes, et bien entendu, partout on les difficultés d'accès sont telles que la souplesse du capteur devient primordiale. De plus, ces capteurs offrent une certaine compatibilité avec les réseaux de transmission à fibre optique. Le champ d'application des capteurs à fibre optique est en perpétuel élargissement et couvre dorénavant presque tout l'ensemble de la mesure des grandeurs physiques.

Ce chapitre est divisé en deux parties la première sur des généralités sur les capteurs et la deuxième sur les capteurs de pression et de pression acoustique.

### III.A. Capteurs

La figure 3-1 représente le schéma général d'un capteur [1].

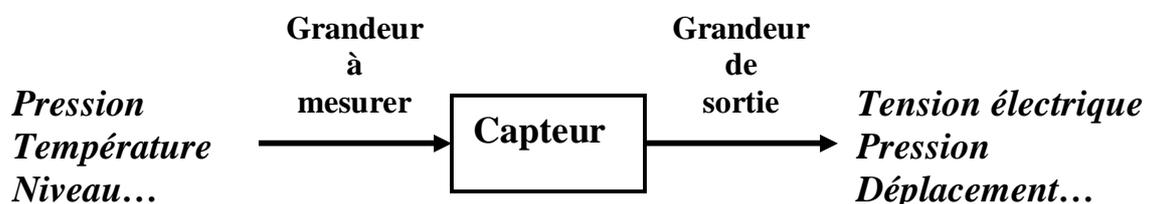


Fig. 3-1 le schéma générale d' un capteur

### III.A.1. Capteur actif et capteur 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.

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 fondé sur 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 [1].

Exemple : une membrane soumise à une différence de pression.

Les capteurs sont basés sur plusieurs effets, on peut citer:

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-électrique (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 dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux.

L'effet Hall : Le champ magnétique crée dans le matériau un champ électrique.

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.

On peut citer aussi quelques types de capteurs [1] :

les capteurs de position et de déplacement : potentiomètre résistif, capteurs inductif, capacitif et de proximité,

les capteurs de déformation, de force, de pesage, de couple : jauge d'extensomètre capteurs piézoélectriques,

les capteurs tachymétriques (de vitesse) : génératrice à courant continu et capteur à reluctance variable,

les capteurs de température : varistances, thermocouples, capteurs au silicium, thermistances CTN, thermistances CTP,

les capteurs de pression et acoustique : microphones et hydrophones.

On trouve aussi d'autres types de capteurs comme les capteurs d'humidité, les capteurs magnétiques....

### **III.A.2. Capteur à fibre Optique**

Les capteurs à fibres optiques sont issus de la rencontre de deux technologies : les fibres optiques et l'optoélectronique. Ces deux dernières décennies, l'une et l'autre ont connue un développement extraordinaire : 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.

Un capteur à fibre optique est un dispositif comprenant au moins une fibre et permettant de recueillir des informations représentatives des grandeurs observées par l'intermédiaire d'ondes lumineuses circulant dans le ou les fibres soit de coder optiquement l'information liée à la grandeur à mesurer, l'influence de celle-ci se réalisant sur une grande longueur. Dans le premier cas, les fibres sont passives : elles ne servent qu'à amener la lumière et/ou à retransmettre le signal fourni par un dispositif de mesure basé sur un autre phénomène physique (capteurs extrinsèques). Dans le second cas, elles seront actives : la grandeur à

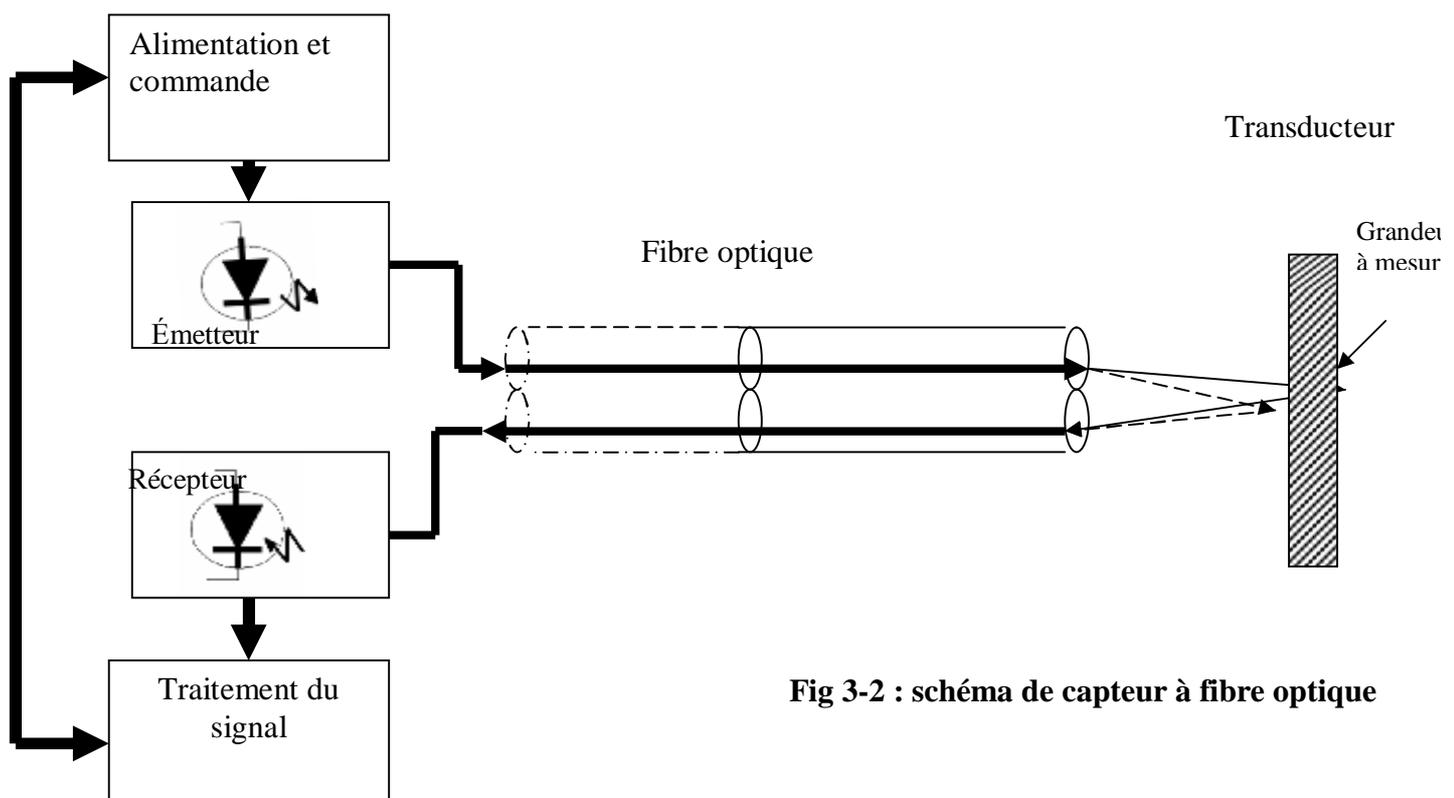
mesurer agit directement ou indirectement grâce à un revêtement spécial entourant le conducteur de lumière (capteurs intrinsèques) [2-5].

Les capteurs à modulation d'intensité ont été développés très tôt. Ils offrent les avantages de la simplicité, de la sûreté, du moindre coût. Cependant pour obtenir une bonne stabilité, il faut s'affranchir des problèmes de variation d'intensité de la source, des pertes variables des fibres. On utilise principalement la modulation par pertes dues aux microcourbures et la modulation par réflecteur et par masque en mouvement

À côté des capteurs à modulation d'intensité, on trouve des capteurs qui sont plus compliqués et plus sensibles : les capteurs à modulation de phase et de polarisation.

De manière générale, l'architecture d'un capteur à fibres optiques comporte au minimum 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 (Fig.3-2).

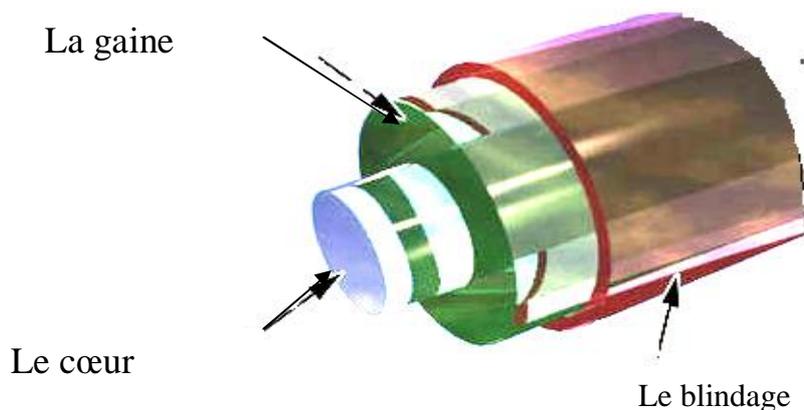
Le choix de ces parties est optimal, mais des compromis sont souvent nécessaires ne serait-ce que pour des raisons économiques.



**Fig 3-2 : schéma de capteur à fibre optique**

### III.A.2.1. 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. Généralement, elle est composée d'un milieu diélectrique que l'on nomme cœur recouvert d'un second milieu nommé la gaine optique (fig. 3-3). La fibre peut être multimode ou monomode, à saut d'indice ou à gradient d'indice, en verre ou en plastique mais plus souvent en silice. 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  $n_c$ , du cœur. (fig. 3-4).

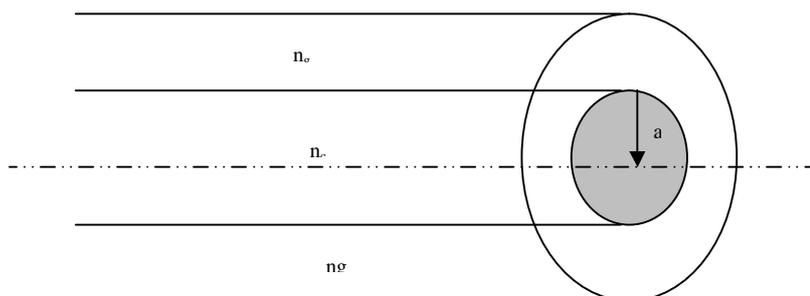


**Fig 3-3 : composantes d'une fibre optique**

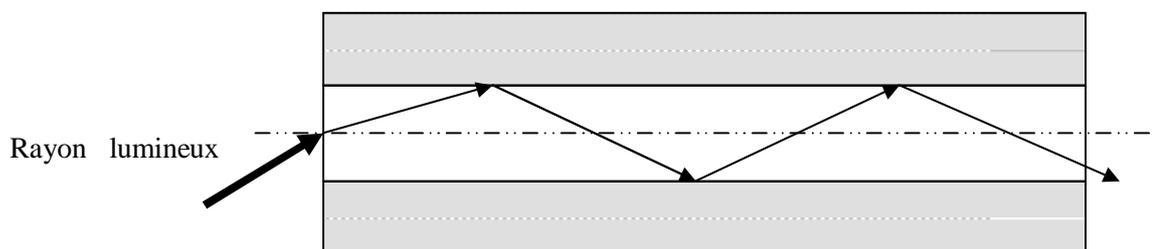
La fibre optique est utilisée en domaine d'instrumentation pour :

- transmettre l'information sous forme des 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 à transmission est que les deux milieux soient d'indices de réfraction différents  $n_1 > n_2$  (fig 3-5).



**Fig.3-4 : milieux et indices de réfraction de la fibre optique**



### III.A.2.2 Fig. 3-5 : La transmission du signal au cœur de la fibre

Il est l'élément sensible. La fibre peut jouer le rôle d'un transducteur. Celui-ci est un 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 des grandeurs à mesurer, par exemple :

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

### III.A. 2.3. L'émetteur de lumière

Les sources de lumière possèdent des caractéristiques différentes (puissance, cohérence, fiabilité, dimension et prix). Soient en régime continu, modulé ou impulsionnel, les sources utilisées sont les interfaces optiques d'émission.

Une interface optique d'émission contient le composant opto-électronique d'émission :

- les diodes électroluminescentes (DEL)
- les diodes laser (DL)
- les diodes superluminescentes (DSL)

qui effectue la conversion électrique/optique. Chacune de ces sources possède des caractéristiques différentes (puissance, dimensions, faisabilité, prix ...).

#### **III.A.2. 4. Le récepteur de lumière**

Le détecteur de lumière ou l'interface optique de réception, qui effectue la conversion inverse, est généralement un photodiode simple (PD) ou avalanche (PDA) et parfois une barrette de photodiode ou un tube photomultiplicateur (PM).

#### **III.A. 2.5. Le circuit d'alimentation**

Il s'agit d'une alimentation classique en énergie via des fils électriques, mais d'autres possibilités sont parfois utilisées comme les batteries ou l'opto-alimentation dans les cas où tout apport d'énergie par un câble électrique n'est pas envisageable.

#### **III.A. 2.6. La chaîne de traitement**

Elle comporte : des étages d'amplification, des circuits de filtrage, un démodulateur extrayant l'information liée au paramètre recherché et souvent un calculateur gérant l'expérimentation. La chaîne de traitement dépend du mode d'utilisation du capteur et le montage optique.

On trouve aussi d'autres composants optiques complémentaires comme les coupleurs, polariseurs, lames retards, correcteurs,...

#### **III.A. 3. Les 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, de point de vue performances, dimensions, fonctionnement et fiabilité et durée de vie.

**Performances** : leur sensibilité peut être extrême et seulement limitée par le bruit dans le détecteur<sup>1</sup>. Le temps de réponse du transducteur lui même est généralement très court ; en pratique la bande passante n'est limitée que par le système électronique de détection.

**Dimensions** : 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 légèreté, associée à l'absence de conduction de la chaleur, en fait un candidat pour plusieurs applications.

**Fonctionnement** : 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 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; la mesure peut être effectuée sans contact et donc parfaitement non perturbatrice. Il ont une 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). Une 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 radiations...).

---

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

Les capteurs (CFO) possèdent un caractère non perturbateur pour le milieu à ausculter, dégagent une quantité de chaleur négligeable. Les capteurs peuvent réaliser des mesures à des très grandes distances du système électronique.

**Environnement** : ce type de capteur ne perturbe pas son environnement. Il peut notamment être employé en environnement explosif; les fibres peuvent être utilisées dans des milieux fortement hostiles où tout autre technologie ne peut pas fonctionner : haute températures, très forte pression, fortes perturbations électromagnétiques et rayonnement nucléaire.

**Fiabilité et durée de vie** : la durée de vie des composantes optoélectroniques (émetteur-récepteur) est estimée à environ 10 ans, ce qui offre aux capteurs CFO une excellente potentialité de survie

### **III. B - les capteurs de pression et de pression acoustique**

#### **III.B.1. Généralités**

La détection et la transmission du son nécessitent l'emploi des capteurs convenables. La fonction de ce capteur est de recueillir 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; transformant l'énergie acoustique en une autre forme d'énergie. Le fonctionnement d'un capteur sonore se résume de la façon suivante : capture de vibrations sonores puis transformations en un autre forme. Pratiquement, les capteurs ont un large domaine d'utilisation dans notre vie, tel qu'ils sont utilisés pour la transmission du son et des informations, transmissions téléphoniques, émission et réception des ondes acoustiques, topographie sous-marine, les mesures industrielles et actuellement la communication avec les machines et les ordinateurs par la voix humaine. Avant la description des capteurs industriels, nous allons présenter l'oreille ; comme capteur physiologique de référence.

### **III. B.2 L'oreille**

L'oreille humaine ou animale est l'organe récepteur du son. Elle fonctionne comme un bon capteur du son. Le système auditif peut être divisé en deux parties :

-la partie périphérique : oreille externe (pavillon et conduit auditif externe) et oreille moyenne (tympan et osselets)

-la partie interne qui comprend un organe appelé membrane basilaire sur laquelle sont disposées des cellules ciliées qui transforment les vibrations mécaniques en messages nerveux.

L'oreille perçoit un son (ou un bruit) chaque fois qu'une perturbation isolée ou périodique ébranle l'air environnant et frappe le tympan (capteur mécanique). Les cellules ciliées sont sensibles à des fréquences différentes en fonction de leur position le long de la membrane basilaire. Elles émettent un signal nerveux proportionnel à l'intensité du signal sonore dans cette fréquence.

Les fréquences audibles par l'oreille vont de 20 Hz à 20 kHz, et les intensités se répartissent entre le seuil d'audibilité  $p=2 \cdot 10^{-5}$  Pa et le seuil de douleur de 10 Pa à 20 Pa.

### **III. B.4. Le microphone**

Le microphone est un capteur électroacoustique ou opto-acoustique transforme les ondes acoustiques en signal électrique ou optique. Il comporte une membrane sensible à la pression acoustique [1].

Le microphone est le plus important capteurs en acoustique, 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.

#### **III. B.4 .1 Le Microphone classique**

Le microphone classique, généralement, est un transducteur électroacoustique transforme le son en signal électrique.

Pour cette transformation, l'un des principes physiques suivants est utilisés: principe piézo-électrique, électromagnétique (ou électrodynamique) et électrostatique.

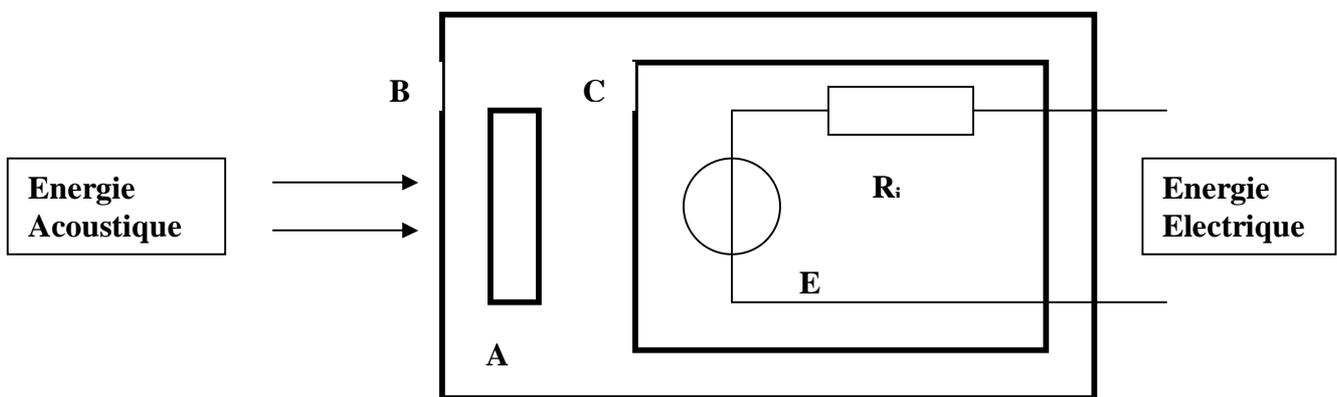
Le schéma bloc d'un microphone est représenté dans le fig 3.1 ;

A : L'élément transducteur

B : Le boîtier du microphone

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

La forme et les ouvertures du boîtier ont une grande importance sur une des qualités du microphone : la directivité



**Fig 3.6: schéma d'un Microphone**

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

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

### 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.

Ce type de microphone offre une haute qualité ce qui lui a valu une grande utilisation en studio. Ils sont surtout sensibles aux chocs et aux vents. Ils ont impérativement besoin d'un transformateur.

#### 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 proportionnelles à son déplacement. C'est le fonctionnement inverse d'un haut-parleur.

#### 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

#### 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.

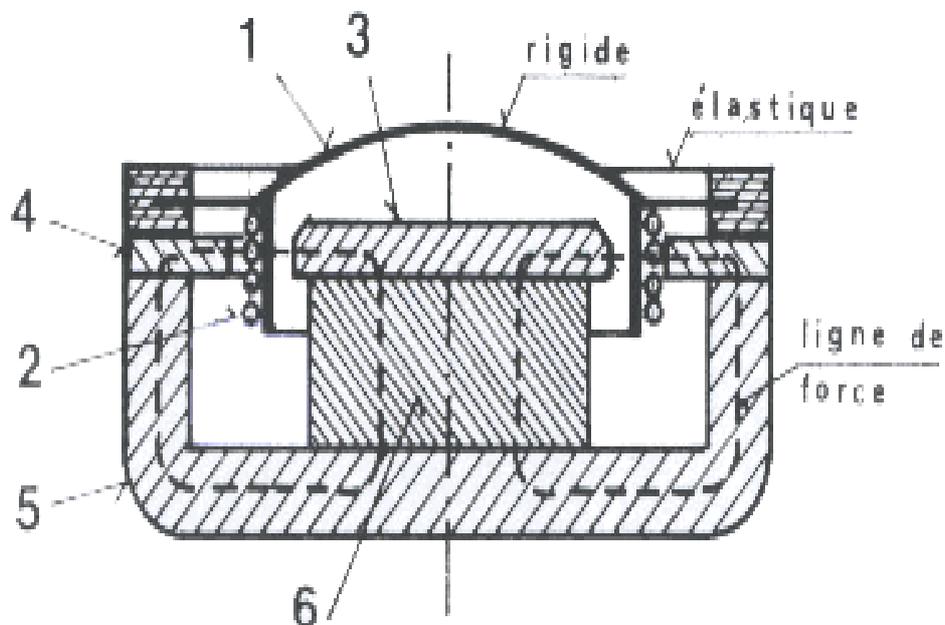
#### Microphone à électret

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 refroidit brusquement, conserve une polarisation de manière définitive : C'est un électret.

### Microphone " à charbon "

Le fonctionnement repose sur les contacts imparfaits des molécules 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.



- 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 3.7**  
**Coup schématique d'un Microphone**  
**électrodynamique**

### 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 3.7).

### **Conclusion :**

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente. Le problème est que ce prélèvement d'information pourra être dans des milieux rudes et durs comme les champs pétroliers et aussi des matières dangereuses comme les hydrocarbures. Dans ce cas les capteurs optiques pourront être la solution. En générale, les capteurs de pression et de pression acoustique ont le même principe. Les capteurs de la pression acoustique sont appelés les microphones ou les hydrophones. Dans le prochain chapitre, nous allons proposer une étude détaillée d'un modèle de capteur. Cette étude peut servir à la réalisation des deux types de capteurs : de pression et de pression acoustique.

### **Références :**

- [1] Georges Asch et collaborateurs : Les Capteurs en instrumentation industrielle, Edition Dunod 1991.
- [2] Eric Udd ; Fiber optic sensors : An introduction for engineers and scientists John Wiley and Sons (1991).
- [3] Frederic De Fornel; les ondes évanéscents en optique et en opto-electronique; Edition Eyrolles (1998)
- [4] E. L. Safford Jr; Fiber optics and laser, Edition TAB Books inc (1984).
- [5] P. Ferdinand ;Capteurs à fibre optique et réseaux associés ; TEC doc. (1987)

## Chapitre IV

### Modélisation du capteur

## **Introduction**

Le modèle théorique choisi du capteur à fibre optique est celui du microphone à fibre optique introduit dans le chapitre précédent.

Notre étude va se baser sur la membrane du capteur parce qu'elle est la seule partie du capteur exposée aux effets du milieu extérieur. En effet les dimensions de la membrane et la nature de sa matière jouent un rôle majeur sur la détermination de la sensibilité du capteur.

Dans ce chapitre, nous allons élaborer un programme de calculs du déplacement de la membrane de ce modèle théorique. La simulation du mouvement de la membrane et le programme de son déplacement sont faits en trois phases.

Phase 1 : la formulation mathématique et modélisation:

On détermine la formule du déplacement de la membrane en fonction ses dimensions et ses paramètres caractéristiques.

Phase 2 : élaboration de l'algorithme de programmation :

La procédure de réalisation du programme se fait suivant un algorithme et un organigramme de calcul.

Phase 3 : élaboration du programme informatique.

Les différents calculs du déplacement de la membrane seront effectués à l'aide d'un programme informatique en langage Fortran 90.

### **IV.1. Le modèle théorique**

Le modèle que nous proposons est représenté dans la figure 5-1. On détermine les équations de mouvement de la membrane, les modes propres de vibrations et l'équation de déplacement de la membrane du capteur à fibre optique [1].

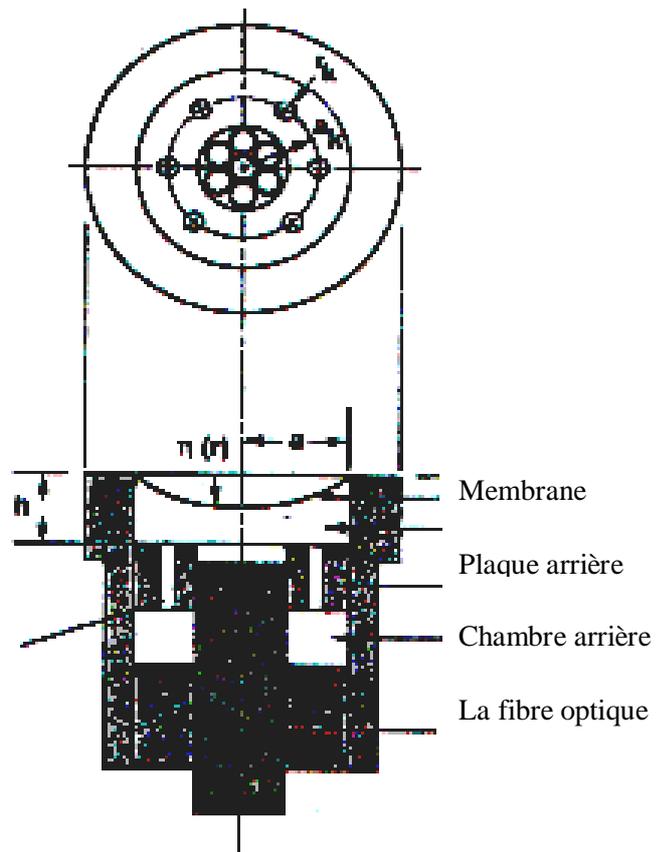


Fig.4.1 Coupe longitudinale du microphone à fibre optique

Les paramètres du capteur

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

## IV.2. la formulation mathématique et modélisation

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 paragraphe

### IV.2.1. Le cas général:

L'équation d'onde dans un milieu élastique est en générale sous la forme [2] :

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (4.1)$$

où  $p$  est la pression acoustique et  $c_0$  est la vitesse de propagation. Pour une membrane tendue, sous une tension linéique  $T$  considérée constante sur toute la membrane, l'équation du mouvement à la surface peut être considérée comme l'équation du mouvement d'un élément surfacique  $dx \cdot dy$  (figure 5-2).

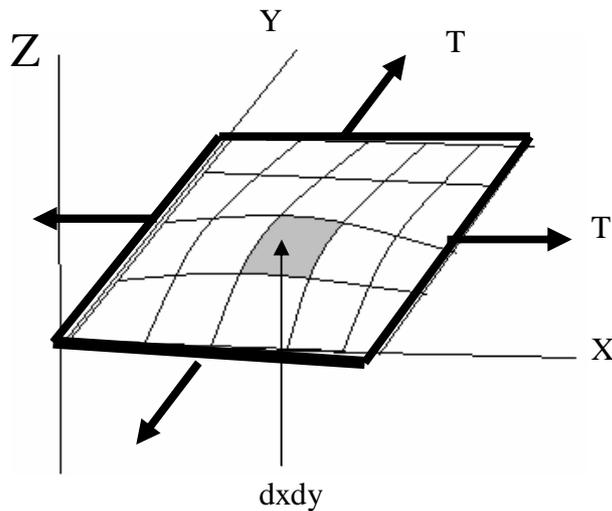


Fig .4-2 mouvement de la membrane

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

$$Tdy = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} dx = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} dx dy \quad (4.2)$$

et d'une force selon l'axe X :

$$Tdx = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} dy = T \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} dx dy \quad (4.3)$$

En totale, la force résultante :

$$F = T \left( \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) dx dy \quad (4.4)$$

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

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \quad (4.5)$$

alors d'après la loi de la mécanique classique  $F=M \cdot g$ , on trouve :

$$s \, dx \, dy \, \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = T \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) dx \, dy \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = \frac{T}{s} \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \quad (4.7)$$

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

$$\frac{T}{s} = v^2 \quad v : \text{vitesse de propagation}, \quad (4.8)$$

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

$T$  : la tension de fixation, N/m

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

Si on considère la solution de la forme :

$$h = F_1(x) \cdot F_2(y) \cdot T(t) \quad (4.9)$$

Par dérivation :

$$-w^2 f_1(x) f_2(y) \cdot \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = v^2 (f_2(y) T(t) \cdot \frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} + f_1(x) T(t) \cdot \frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2}) \quad (4.10)$$

puis par division ;

$$\frac{1}{T(t)} \cdot \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = v^2 \left[ \frac{1}{f_1(x)} \frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{f_2(y)} \frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2} \right] = -w^2 \quad (4.11)$$

on trouve la fonction gouvernant T(t) :

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + w^2 T(t) = 0 \quad (4.11a)$$

$$T(t) = E \sin(wt) + F \cos(wt) \quad (4.11b)$$

Pour  $f_1(x)$  et  $f_2(y)$  on trouve les équations :

$$-\frac{w^2}{v^2} - \frac{1}{f_2(y)} \frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2} = \frac{1}{f_1(x)} \frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} = a^2 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial^2 f_1(x)}{\partial x^2} + a^2 f_1(x) = 0 \quad (4.13a)$$

$$\frac{\partial^2 f_2(y)}{\partial y^2} + \left( \frac{w^2}{v^2} - a^2 \right) f_2(y) = 0 \quad (4.13b)$$

$$\frac{w^2}{v^2} - a^2 = b^2; a^2 + b^2 = \frac{w^2}{v^2} \quad (4.14)$$

Donc :

$$f_1(x) = A \sin ax + B \cos ax \quad (4.15)$$

$$f_2(y) = C \cdot \sin by + D \cos by \quad (4.16)$$

Sous les conditions initiales :  $t=0 \quad \eta=0$

$$\begin{aligned} h(x, y, 0) = f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot F = 0 & \quad \Rightarrow \quad F = 0 \\ T(t) = E \cdot \sin wt \\ h = f_1(x) \cdot f_2(y) \cdot T(t) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Sous les conditions aux limites ;

$$\begin{aligned} x=0 \\ h = f_1(0) \cdot f_2(y) \cdot T(t) = 0 \\ B \cdot f_2(y) \cdot T(t) = 0; B = 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

$y=0$

$$\begin{aligned} D \cdot f_1(x) \cdot T(t) = 0; D = 0 \\ h = A \sin ax + C \sin by \cdot T(t) \end{aligned} \quad (4.19)$$

$x=L_1$  ;

$$\begin{aligned} \sin aL_1 = 0; aL_1 = np; a = \frac{np}{L_1} \\ h(L_1, y, t) = A \sin aL_1 \cdot \sin by \cdot T(t) = 0 \\ h_n(x, y, t) = A_n \sin \frac{np}{L_1} x \cdot \sin by \cdot T(t) = 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Donc

$$h_n = \sum_n A_n \sin \frac{np}{L_1} x \cdot \sin by \cdot T(t) \quad (4.21)$$

Pour  $y=L_2$ ;

$$h(x, L_2, t) = A_n \sin \frac{np}{L_1} x \cdot \sin bL_2 \cdot T(t) = 0$$

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

$$h_m = \sum_n A_n \sin \frac{np}{L_1} x \cdot \sin \frac{mp}{L_2} y \cdot T(t)$$

(4.22)

La solution générale devient :

$$h(x, y, t) = \sum_{n,m} A_{n,m} \sin\left(\frac{n1px}{L_1}\right) \sin\left(\frac{m2py}{L_2}\right) \cos(w_{n,m}t)$$

(4.23)

#### IV.2.2.Cas d'une membrane circulaire :

En utilisant le système de coordonnées polaires

$$c^2 \nabla^2 h(r, q, t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} h(r, q, t)$$

et

$$\nabla^2 \equiv \frac{1}{r^2} \left[ \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right)^2 + \frac{\partial^2}{\partial q^2} \right]$$

(4.25)

$$h(r, q, t) = f(r, q) e^{i\omega t}$$

(4.26)

les solutions harmoniques sont exprimées par :

$$h(r, q, t) = R(r)Q(q)e^{i\omega t} \quad (4.27)$$

**R** : partie radiale de l'équation

**Q** : la partie angulaire

Par la séparation des deux parties et d'après les équations (4.25) et (4.26) on trouve :

$$\frac{r^2}{R} \left( \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} \right) + k^2 r^2 = - \frac{1}{Q} \frac{\partial^2 Q}{\partial q^2} \quad (4.28)$$

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

Donc

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial q^2} = -m^2 Q \quad (4.29)$$

Sa solution harmonique :

$$Q(q) = \cos(mq + j) \quad (4.30)$$

$\Phi$  : est la phase initiale.

$m$  : est une constante.

Aussi de l'équation (3.28)

on déduit :

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \left( k^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R = 0 \quad (4.31)$$

La résolution de cette équation nécessite l'appel des fonctions de Bessel de première espèce  $J_m(kr)$  et deuxième espèce  $Y_m(kr)$ , et la solution devient sous la forme :

$$R(r) = AJ_m(kr) + BY_m(kr) \quad (4.32)$$

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

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

Dans l'équation (4)  $\lim_{kr \rightarrow 0} \dots \rightarrow 0$

$$\implies B=0$$

Donc

$$R(r) = AJ_m(kr) \quad (4.33)$$

Dans les conditions au contour  $R(a)=0 \implies J_m(ka)=0$ .

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

$$k_{mn} = \frac{z_{mn}}{a} \quad (4.34)$$

Et le mouvement et les modes des vibrations de la membrane sont déterminés par la somme des solutions discrètes :

$$h(r, q, t) = \sum_{m,n} A_{mn} J_m(k_{mn} r) \cos(mq + j_{mn}) e^{iW_{mn}t} \quad (4.35)$$

D'où  $k_{mn}a = z_{mn}$  →

$$W_{mn} = \frac{C \cdot z_{mn}}{a}$$

Ce sont les modes de fréquences de vibrations normales de la membrane circulaire fixée au contour, fig.4-3.

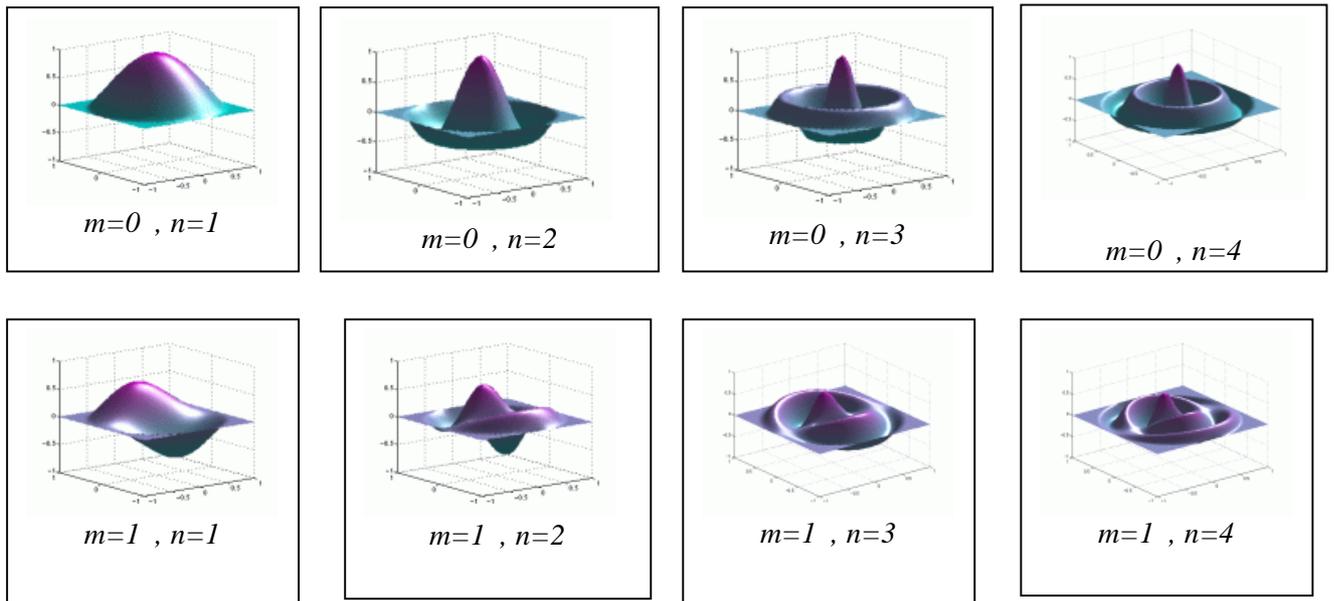


Fig.4-3 modes de vibrations de la membrane

#### IV.2.3 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 [3] :

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

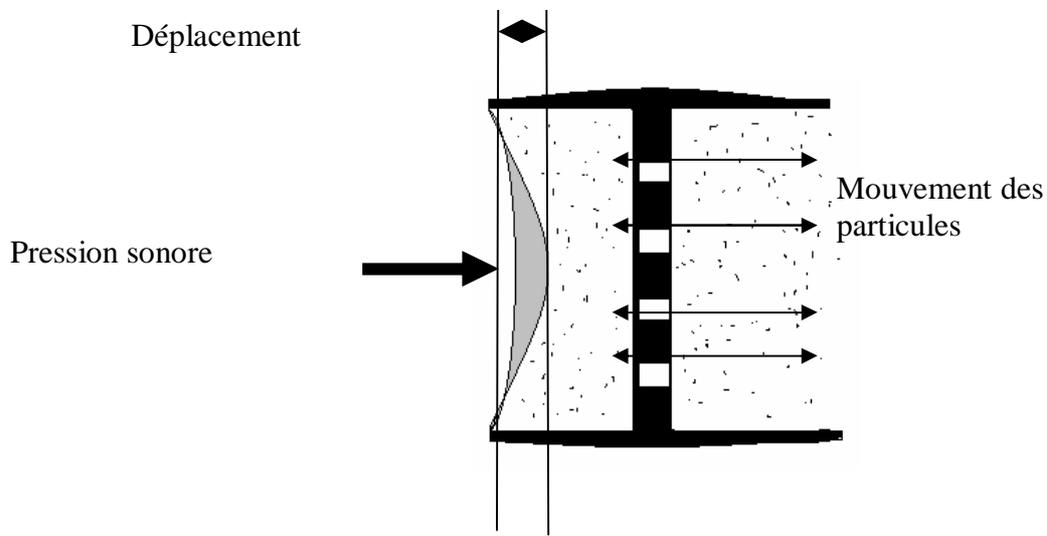


Fig. 4-4: mécanisme du mouvement de membrane et particules d'air

$$\nabla^2 h(r, q) + k^2 h(r, q) = \frac{p_i}{T} + \frac{p(r, q, 0)}{T} \quad (4.35)$$

avec

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

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

$$k = 2pw \left( \frac{S_M}{T} \right)^{1/2}$$

$\omega$  : 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.

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 s'intéresse qu'à  $\eta(0)$  parce que la réflexion du faisceau lumineux se fait au centre de la membrane dans le microphone à fibre optique (fig.4-4).

Le déplacement  $\eta(r)$  est donné par:

$$\langle h(r) \rangle = \frac{P_i}{TK^2} \frac{J_2(Ka)}{J_0(Ka) + D} \quad (4.36)$$

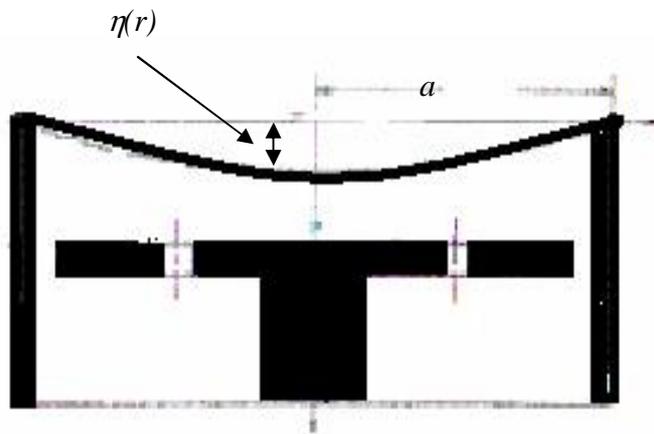


Fig. 4-5: le déplacement au point centrale de la membrane.

$P_i$  : 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

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

D'après la relation (4.32), le déplacement de la membrane vaut:

$$h(r) = \frac{P_i}{TK^2} \cdot \frac{J_0(K.r) - J_0(K.a)}{J_0(K.a) + D} \quad (4.37)$$

$r$  : de 0 à  $a$  (rayon de la membrane)(fig 4-5)

$p_i$  : pression incidente.

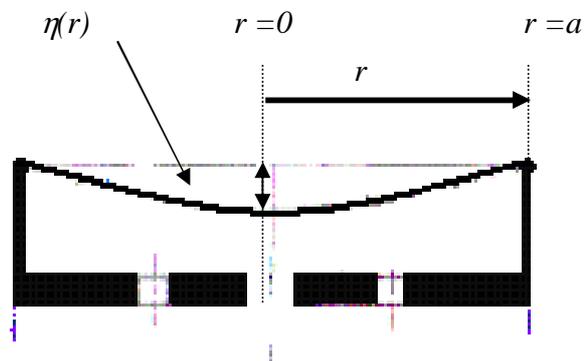


Fig 4-6 le déplacement au point  $r=0$

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

$$h(0) = \frac{P_i}{TK^2} \cdot \frac{1 - J_0(K.a)}{J_0(K.a) + D} \quad (4.38)$$

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

$$D = -i \frac{4\omega R_0 J_0(Ka)}{\rho T J_2(Ka)} \sum_{m=0}^{\infty} \left( -i\omega \Theta_m + \sum_{s=1}^q \Gamma_s s_s \Gamma_m J_0(x_m a_s) \right) \frac{1}{T_m J_0(x_m a)} \left( \frac{J_2(Ka) d(m)}{4K^2 a^2} + \frac{J_1(Ka) [1-d(m)]}{2Ka(K^2 a^2 - x_m^2 a^2)} \right) \quad (4.39)$$

$\rho_0$  densité statique de l'air , kg/m<sup>2</sup>

$s_s$  : surface de s<sup>ième</sup> trou , m<sup>2</sup>

D'après,

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1(x_m a) = 0 \\ L_m = \sqrt{L^2 - x_m^2} \\ K_m = \sqrt{K^2 - x_m^2} \\ g_m = \frac{K_m L_m}{x_m^2} \end{array} \right.$$

Et la relation :

$$L = \sqrt{-i\omega R_0 / m} \quad m^{-1}$$

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

$$J_1(x_m a) = 0 \quad \Longrightarrow \quad x_m$$

Les  $x_m ; m=0$  à  $\infty$  : sont les solutions de l'équation de propagation .

Et

$$\Theta_m = 2p \left( \frac{Ka J_0(x_m a) J_0(Ka)}{(K^2 - x_m^2) J_0(Ka)} - \frac{a^2}{2} d(m) \right) \quad (4.40)$$

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

$$\Gamma_m = \frac{\sin A + g_m \sin B}{\sin A \cos B + g_m \cos A \sin B} \quad (4.41)$$

Avec

$$A = K_m h$$

$$B = L_m h$$

$$T_m = \frac{K_m \{ [1 - \cos A \cdot \cos B] + g_m \cdot g_m^{-1} \cdot \sin A \cdot \sin B \}}{\sin A \cdot \cos B + g_m \cdot \cos A \cdot \sin B} \quad (4.42)$$

$$P_m = p \cdot a^2 \cdot J_0^2(x_m \cdot a)$$

La matrice :  $_{i(q \times l)}$  est déterminée par la relation :

$$Y = [I + A]^{-1} \cdot b \quad (4.43)$$

$I$  : matrice identité

$\beta(k)$  vecteur avec ;

$$b_k = \frac{r_0 W^2}{s_k} \left( \sum_{l=1}^q \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\Theta_m \cdot \Gamma_m \cdot J_0(x_m \cdot a_l) \cdot Y_{kl}}{P_m T_m} \right) \quad (4.44)$$

$A(k,s)$  matrice dont les éléments sont donnés par :

$$a_{ks} = -i \frac{W r_0 s_s}{s_k} \left( \sum_{l=1}^q \sum_{m=0}^{\infty} \frac{J_0(x_m \cdot a_s) J_0(x_m \cdot a_l) \cdot Y_{kl}}{P_m T_m} \right) \quad (4.45)$$

$Y_{kl}$  : éléments de la matrice  $Y(q,q)$  telle 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 
$$Z_C = \frac{gr_0 c_T^2}{i\omega V} \quad (4.46)$$

et 
$$Z_k = \frac{(8r_0 \omega \mu)^{1/2}}{pr_k^2} \left(1 + \frac{l_k}{2r_k}\right) + i \frac{\omega r_0 (l_k + 1.7r_k)}{pr_k^2} \quad k = 1, 2, 3, \dots, q \quad (4.47)$$

$\gamma$  : rapport de la chaleur spécifique

$C_T$  : la vitesse du son, m/s

$\mu$  : viscosité absolue de l'air, Ns/m<sup>2</sup>

Les expressions des paramètres du circuit électrique équivalent :

Dans ce modèle, les paramètres du circuit électriques sont donnés par les expressions suivantes [2 ]:

*La masse de la membrane*  $M_M = 5S_M / 12pa^2$   $(kg/m^4)$

*Conformité de la membrane*  $C_M = pa^2 / 2T$   $(m^5/N)$

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

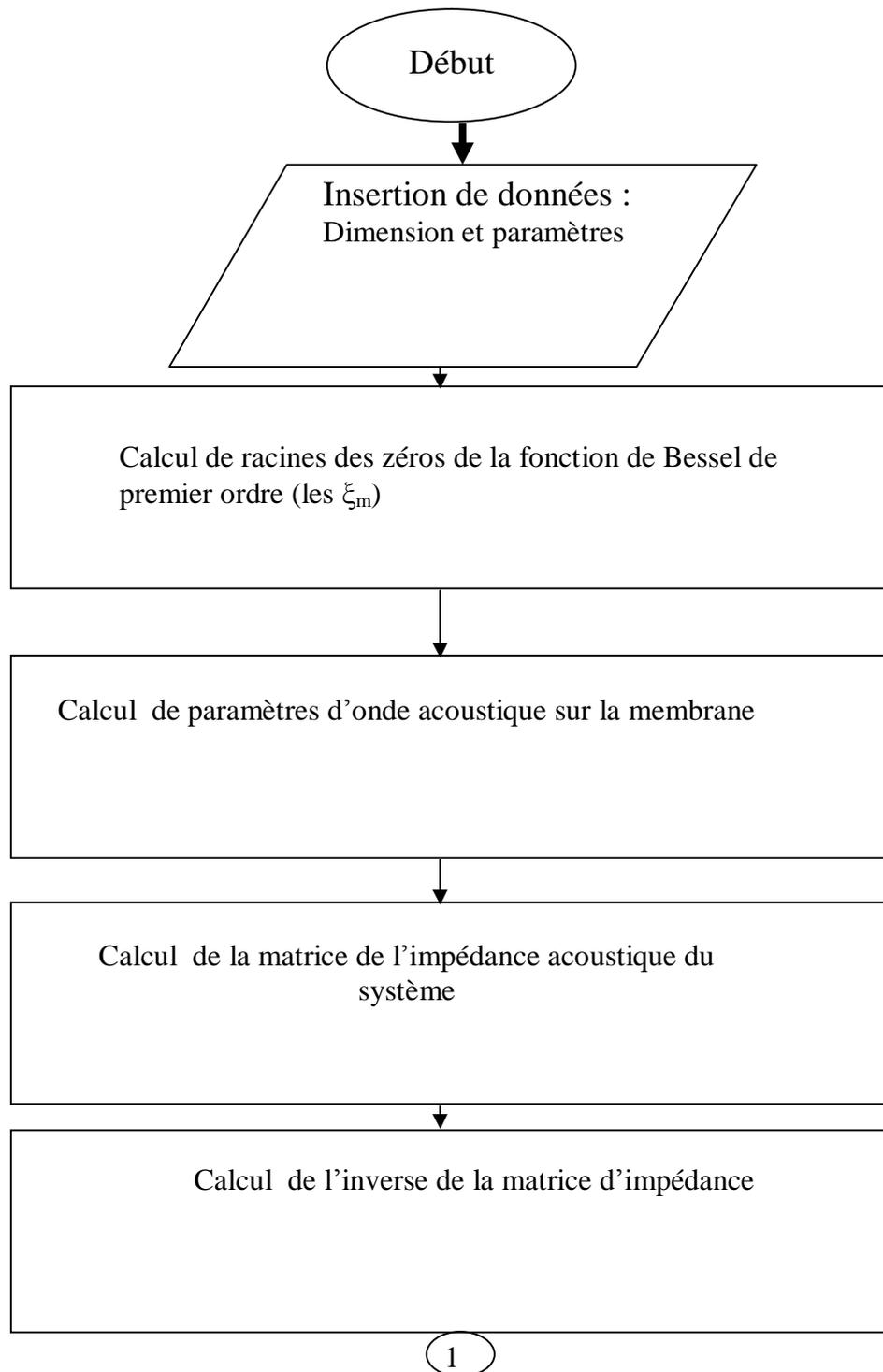
*Résistance de la couche d'air de la cavité*  $R_A = 2T \operatorname{Im}(D) / wpa^2$   $(Ns/m^5)$

*Facteur de qualité*

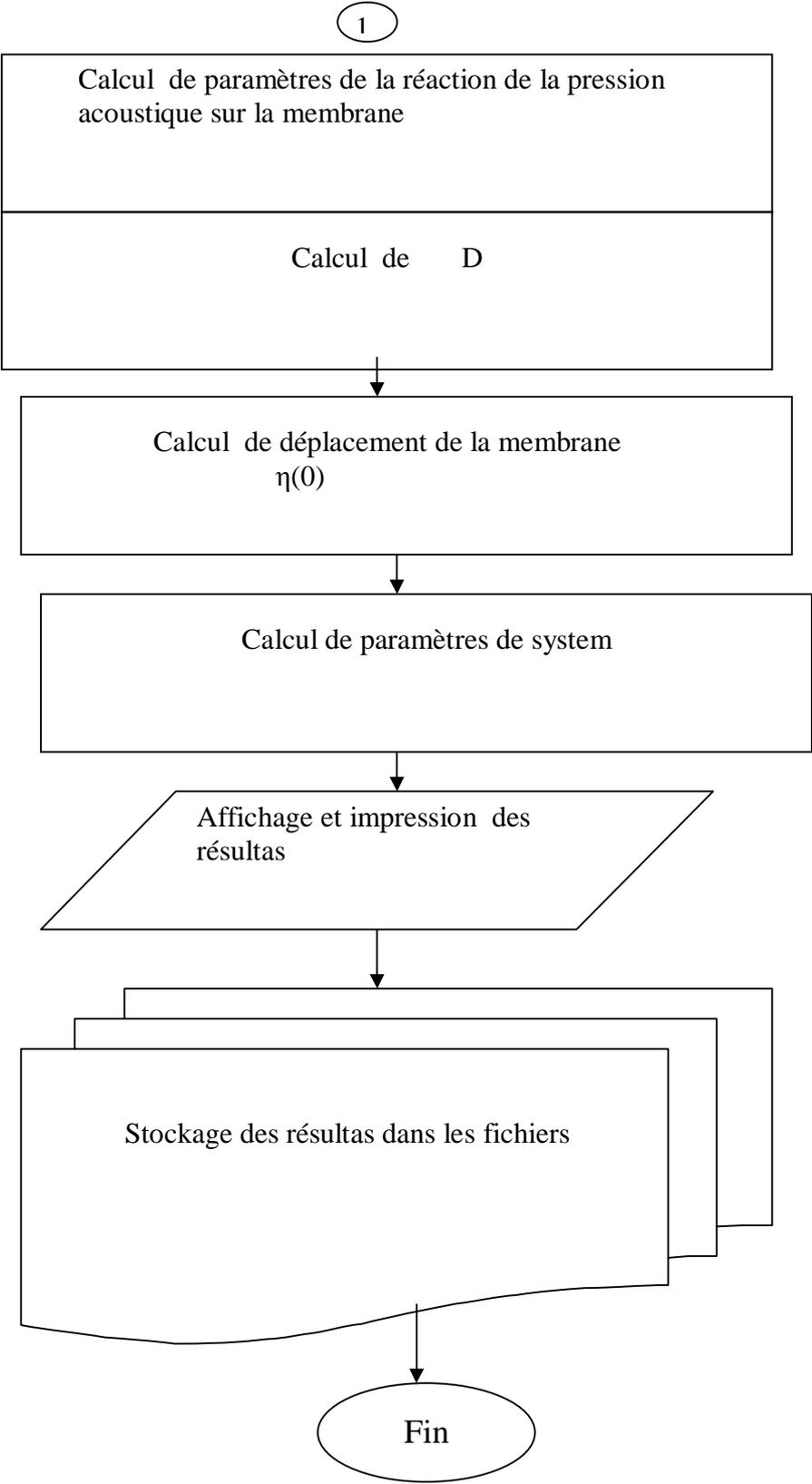
$$Q = \frac{1}{R_A} \left( \frac{M_M (C_A + C_M)}{C_A \cdot C_M} \right)^{1/2}$$

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

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



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



## IV. 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 [4-5].

### IV.4.1 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 sur l'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,  $X_m$ .

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

#### IV.4.1.1 Aperçu sur Le programme de calcul des Zéros de la fonction de Bessel $J_1(x)$

```

      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
```

#### IV.4.2 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

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

Etape 6: calcul du déplacement de la membrane

Etape 7 : calcul des éléments du système (éléments du circuit équivalent).

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

##### IV.4.2.1 Aperçu sur le programme de calcul (en Fortran 90)

```
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
•
•
•
•
•
•
•
```

```

!*****
!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)

```

## **Conclusion :**

Après un calcul et une programmation, on a pu trouver le déplacement de la membrane du capteur en fonction de tous ses paramètres. Le changement de tout paramètre influe sur ce déplacement et par la suite sur la bande fréquentielle et la sensibilité du capteur. Cette influence sera traitée dans le prochain chapitre.

## Références :

- [1] Allan J.ZUCKERWAR, Thoretical response of condenser Microphone, Norfolk, VIRGINIA, 1978.
- [2] Andong Hu and Frank W. Cuomo, Theoretical and experimental study of a fiber optic microphone, Universiy of Rhode Island, Kingston, 1991.
- [3] L.LANDOU et E.LIFCHITZ, Théorie de L'élasticité, T2, Edition MIR, MOSCO, (1967).
- [4] H.BABAAMER, fortran 77, Edition BERTI, Alger, 1989.
- [5] FAROULT et D.SIMON, Fortran structuré et méthodes Numériques, DUNOD informatique,Paris,1987

## **CHAPITRE V**

### **Validation et résultats**

## **Introduction**

Plusieurs travaux sont faits sur les microphones à fibre optique usant différents principes [1-5].

Le choix de notre modèle est basé sur un modèle théorique et expérimental du microphone.

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. Ceci constitue en soi même une validation du programme de simulation vis à vis des résultats déjà publiés. Nous développerons cette validation dans la partie A de ce chapitre. Dans la partie B, on utilise notre programme de calcul pour déterminer l'influence, sur la réponse de la membrane (la sensibilité et la bande de fréquence).

On fait varier les paramètres suivants : 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  $V$ .

### **V.A. Validation**

#### **V.A.1 Dimensions et paramètres**

Les dimensions et les paramètres mécaniques et acoustiques du modèle d'étude sont représentés dans le tableau suivant.

**Tableau 5-1**

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

**Tableau 5-2 les données numériques du modèle**

<b>a</b>	<b><math>3.175 \cdot 10^{-3}</math></b>	<i>M</i>
<b><math>\sigma_M</math></b>	<b><math>5.677 \cdot 10^{-3}</math></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>	<b>1.98 10<sup>-3</sup></b> <i>M</i>
	<b>a<sub>2</sub></b>	<b>2.78 10<sup>-3</sup></b>
<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>

## V.A..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.

<i>m</i>	0	1	2	...	30	...
	0.00	3.831710	7.000013	...	95.000020	..
$\xi_{m1}(x_m a)$	0.00	1206.838	2204.729	...	29921.270	..

$L_m$	$.823002 \cdot 10^{-06}$ $-i .799665$ $10^{+04}$	$.498605 \cdot 10^{+04}$ $-i.513003 \cdot 10^{+04}$	$.482321 \cdot 10^{+04}$ $-i.530322 \cdot 10^{+04}$	...	$.854514 \cdot 10^{+03}$ $-i.299335$ $10^{+05}$	.. .
$K_m$	$.541282$ $10^{+01} +$ $i .895282$ $10^{+09}$	$00.0 +i.120684$ $10^{+04}$	$00.00+i.220473$ $10^{+04}$	...	$00.00$ $+i.299213$ $10^{+05}$	.. .
$\Theta_m$	$.159769 \cdot 10^{-07}$ $+i .00.00$	$350766 \cdot 10^{-08}$ $+i 00.00$	$-.782910 \cdot 10^{-09}$ $+i 00.00$	...	$-.115880 \cdot 10^{-11}$ $+i 00.00$	.. ..

- Les zéros de la fonction de Bessel et les paramètres acoustiques  $L_m, K_m, \gamma_m$  et  $\Theta_m$ :

- Les impédances

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

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

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  $M_m = 0.597525\text{E-}07$

### V.A..3 La comparaison des resultats

#### V.A.3.1 Comparaison avec les relations approximatives

En comparant les résultats de calcul à ceux de calculés par les relations approximatives [6], on trouve que le déplacement de la membrane calculé par la relation approximative :

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

Donc

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

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

et on trouve la sensibilité mécanique du microphone calculée par la relation :

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

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

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

### V.A.3.2 Comparaison avec le modèle de référence

On compare les valeurs de calcul de notre programme avec les résultats du modèle de référence en utilisant les paramètres du système. Le modèle de référence est conçu pour les fréquences audibles (Tableau 5-3).

Tableau 5-3 :

Elément 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 des paramètres du microphone à fibre optique obtenus par le programme de modélisation et ceux du modèle référence sont très proches théoriquement dans la plage de basses fréquences.

## V.A. 4. Présentation graphique de la réponse et comparaison

### V.A. 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 qui dépend de :

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

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

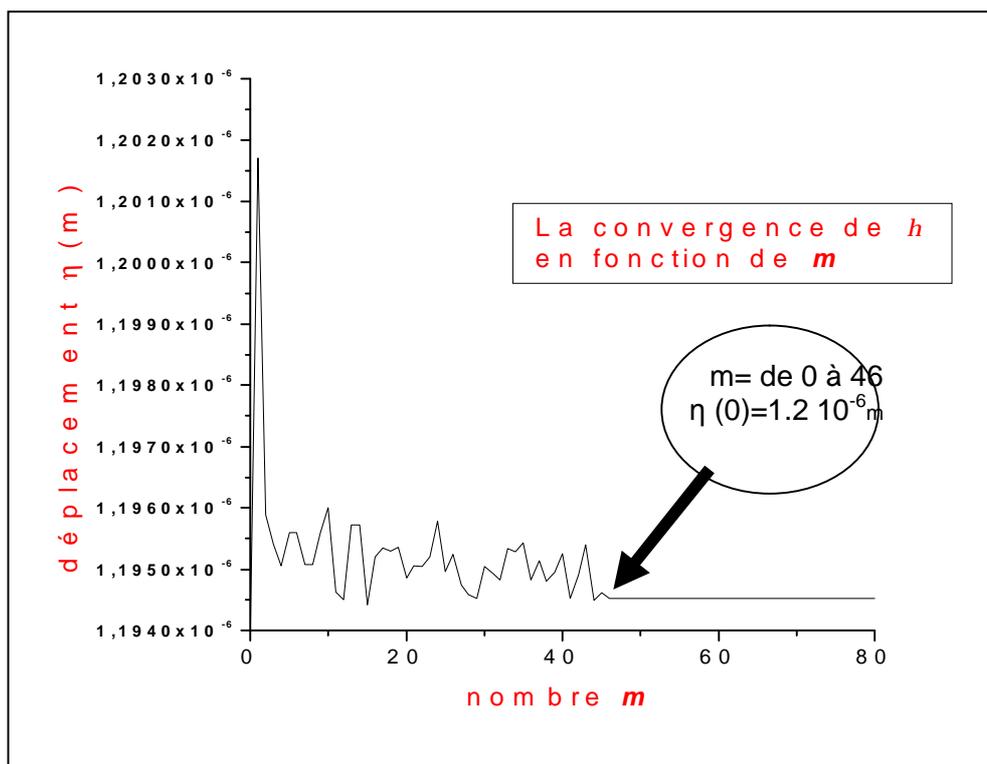


Fig 5.1 : courbe du déplacement pour différents valeurs de  $m$

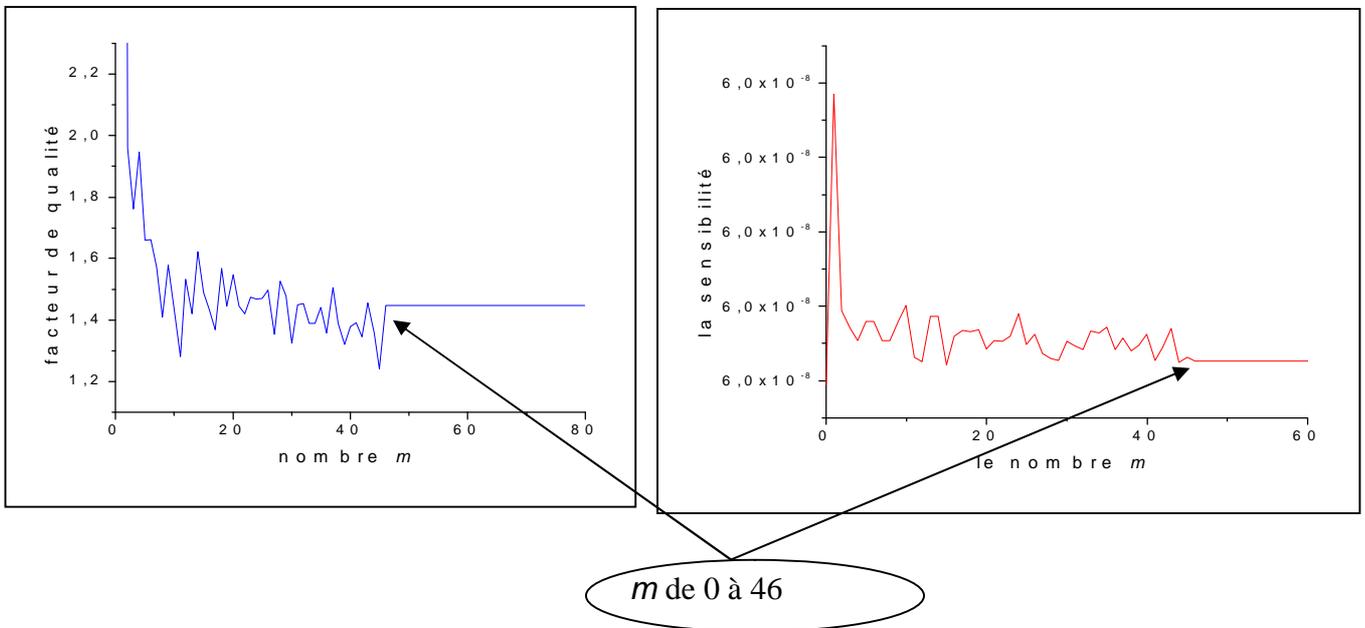


Fig 5.2: courbes du facteur de qualité et de la sensibilité pour différents valeurs de  $m$ .

Donc on choisit l'intervalle de  $m$  de 0 à 46 dans le programme Fortran.

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

De la relation (4.38), 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  $h(0) = f(p_i)$  graphiquement fig(5.3).

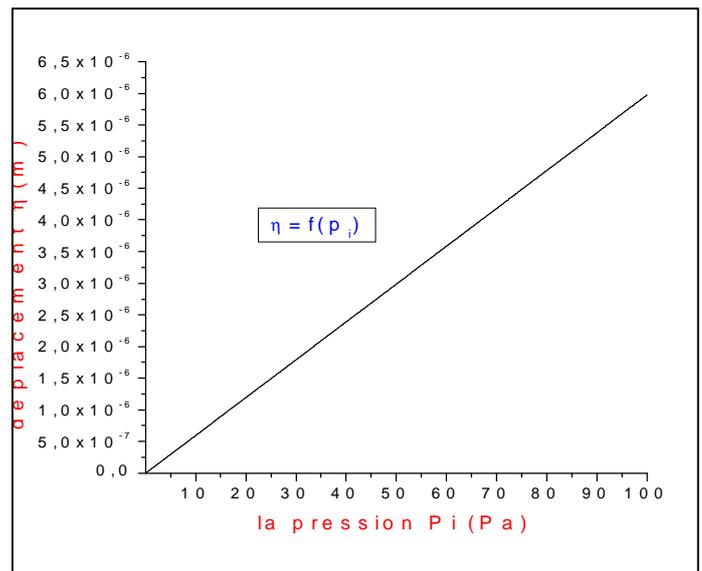


Fig. 5.3: courbe du déplacement en fonction de la pression

### V.A.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 dépend de la fréquence (au-dessus de la résonance).

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

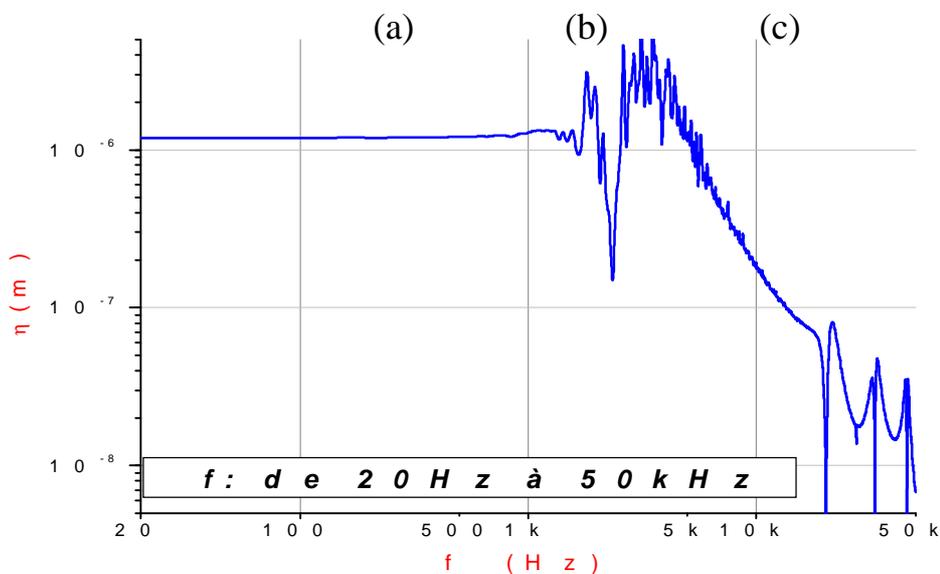
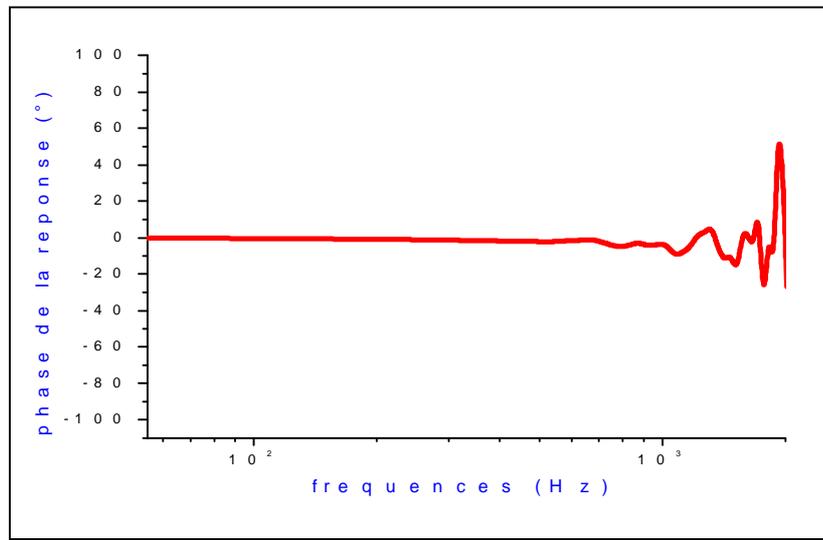


Fig 5.4 : le déplacement en fonction de la fréquence de 20 Hz à 50 kHz

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

Dans cette région le déplacement est en phase avec l'excitation (fig 5.5).

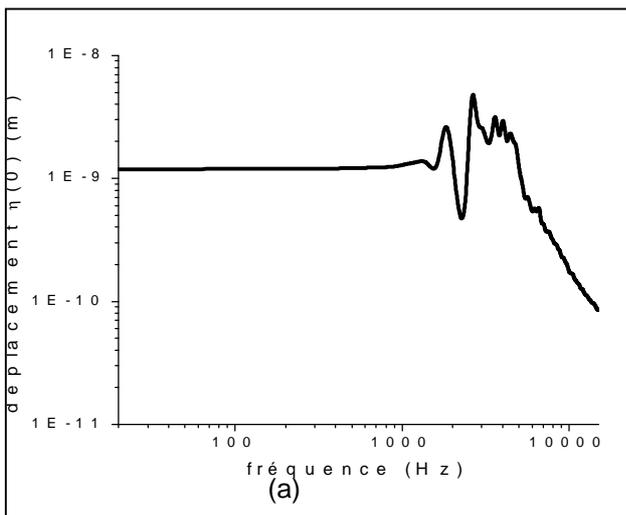
Fig. 5.5 : la phase du déplacement



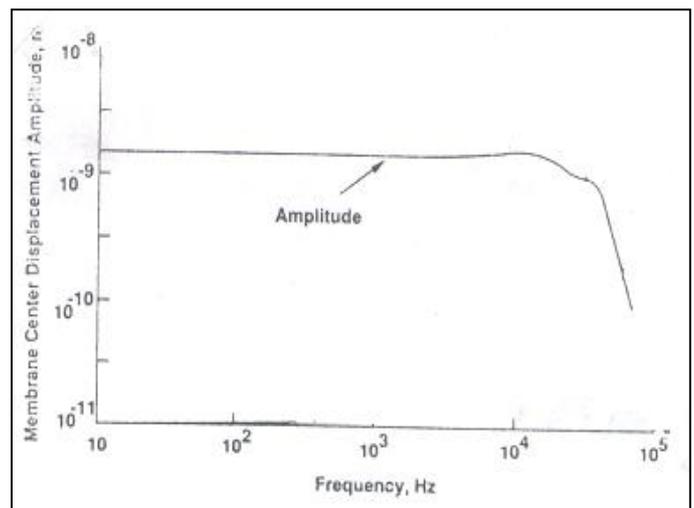
## V.A. 5 Comparaison des résultats graphiques

### V.A.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 [6]. En plus, elles ajoutent des détails manquants fig(5-6) et fig(5-7)



(a)



(b)

Fig 5-6 : le déplacement en fonction de la fréquence  
 (a) : notre étude  
 (b) une étude théorique

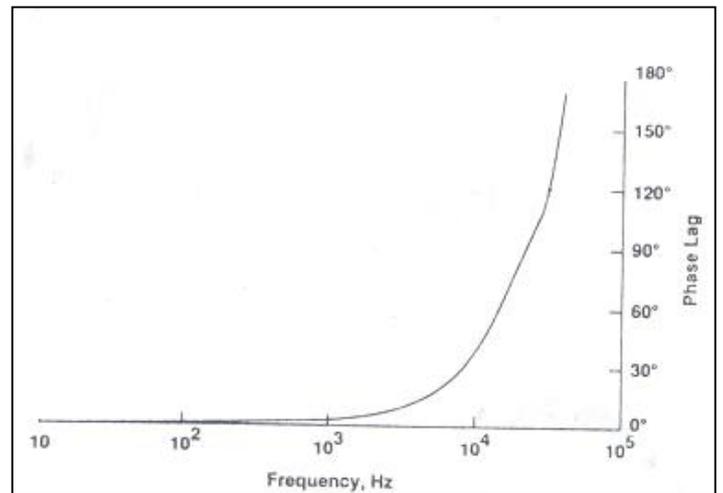
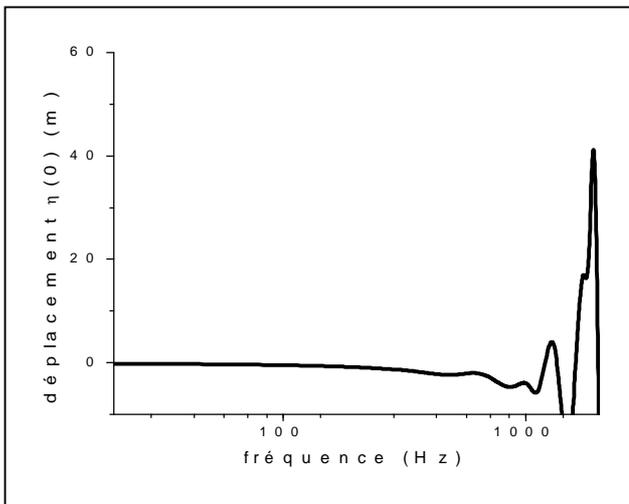


Fig. 5-7 la phase en fonction de la fréquence

- (a) : notre étude  
 (b) : une autre étude théorique

### V.A. 5.2 Deuxième comparaison

En comparant la courbe du déplacement de notre étude avec celle d'une autre étude pratique[7], 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(5.8).

Les dimensions de ce modèle pratique sont :

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

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

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

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

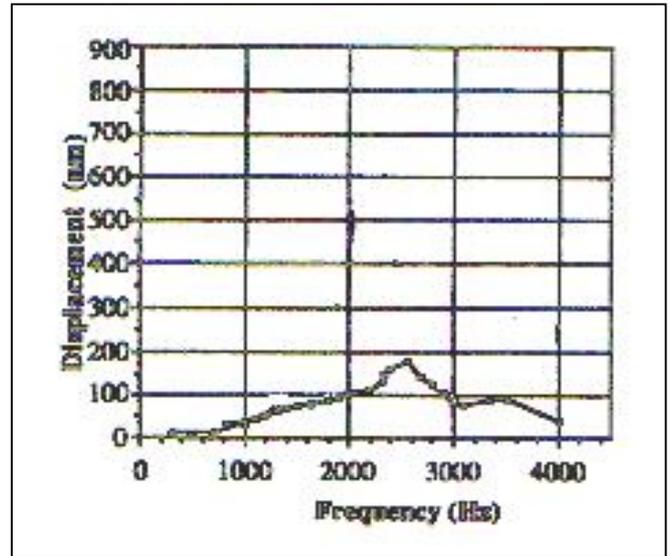
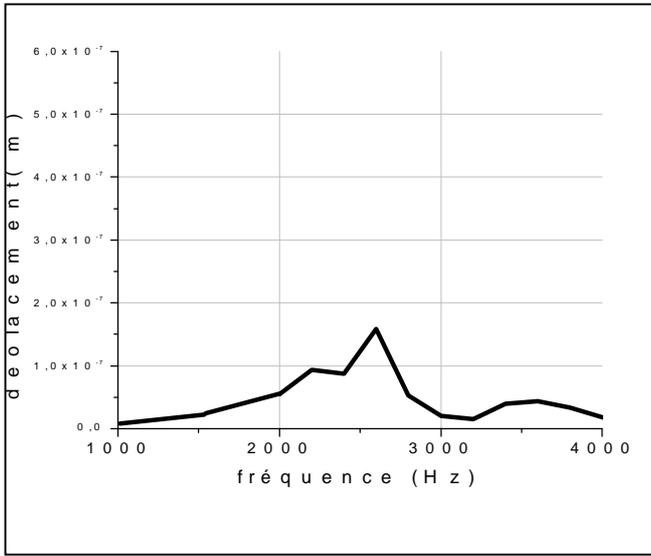


Fig.5-8 la phase en fonction de la fréquence  
 (b) : notre étude  
 (b) : une autre étude théorique

## V.B. L'influence des sur la réponse de la membrane

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

Le rayon est un paramètre important qui caractérise la membrane du microphone. Son choix influé sur le déplacement et par la suite sur la sensibilité figure (5-9).

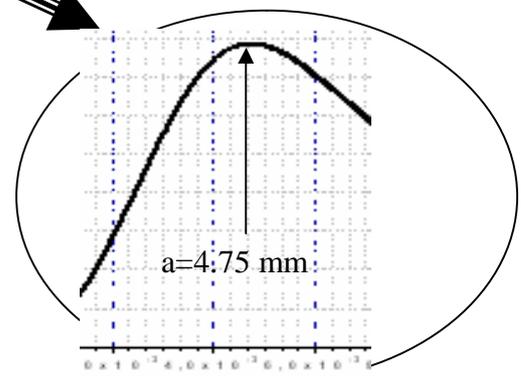
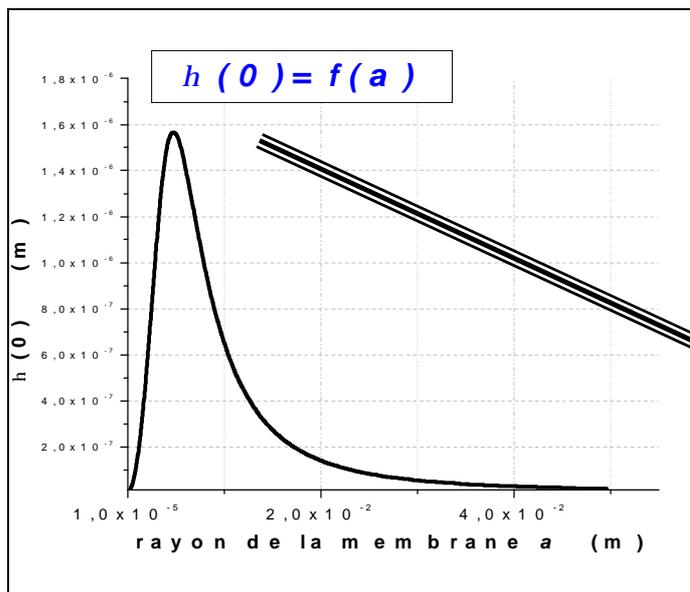
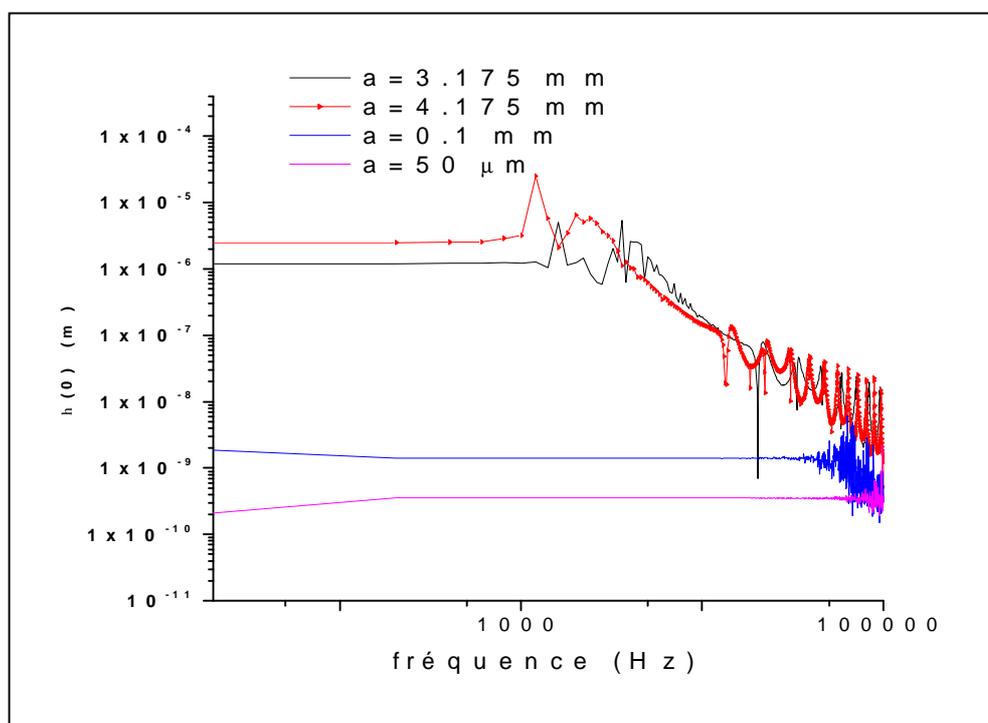


Fig 5-9 : graphe de déplacement en fonction de rayon

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 inférieures 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 atteindre 80 kHz avec un rayon de 50  $\mu\text{m}$  figure(5-10).



V.B.2

Fig 5-10 : courbes de déplacement en fonction t de la fréquence pour différent rayons

## V.B. 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(5-11).

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

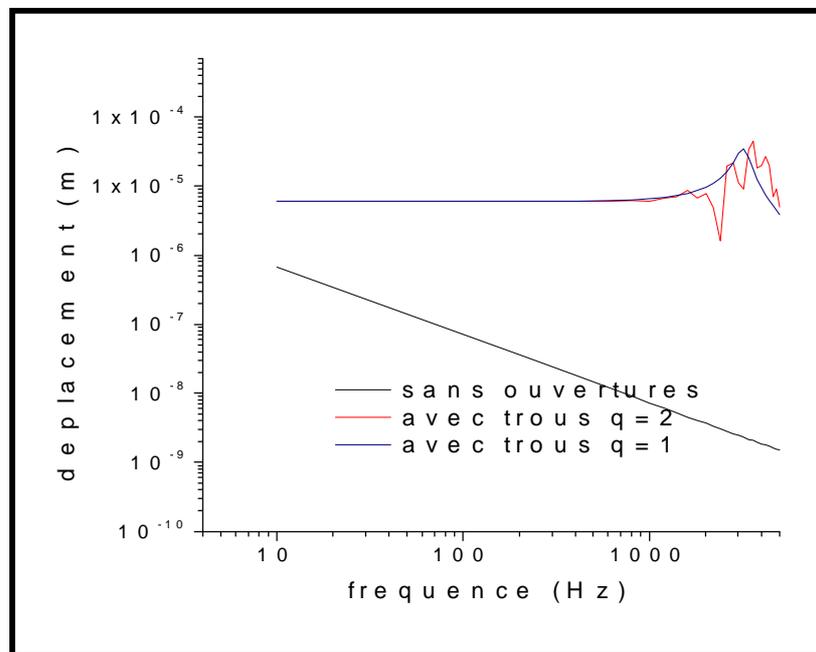


Fig 5-11 : courbes de déplacement en fonction la fréquence à la présence et l'absence d'ouvertures

## V.B.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 sur la bande de fréquences, figure (7.4). Néanmoins, elle est importante dans le transfert de l'intensité lumineuse entre la fibre optique et la membrane [6].

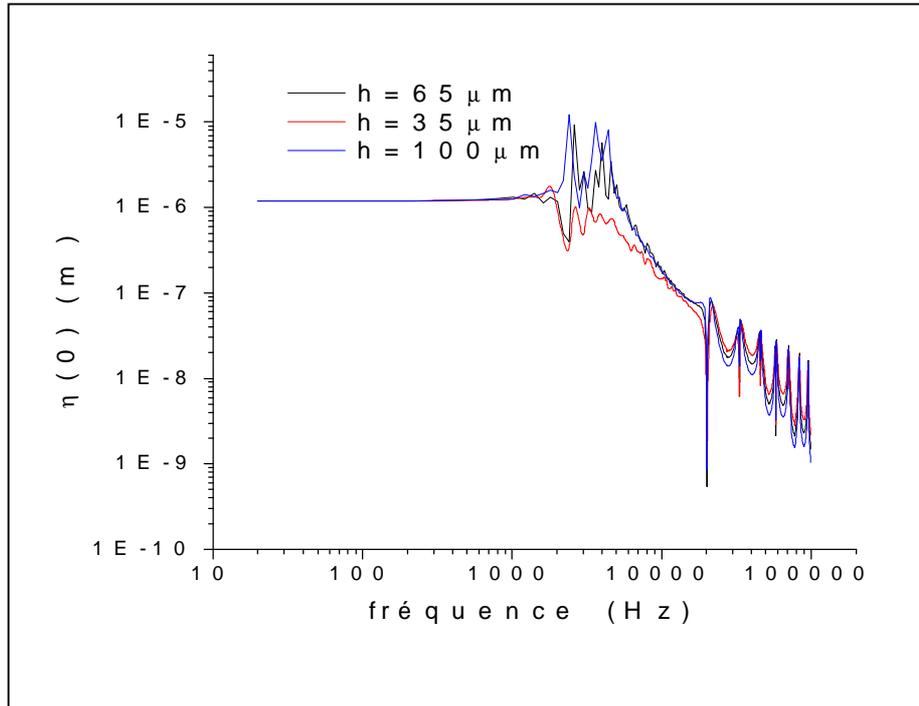
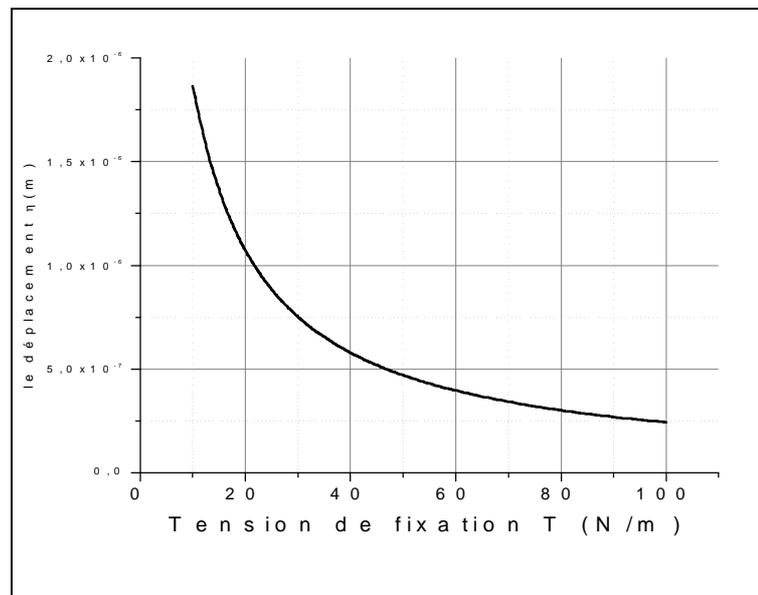


Fig 5-12 : courbe de déplacement en fonction de la fréquence et distance  $h$

#### V.B.4. Influence de la tension de la fixation de la membrane

La tension de fixation de la membrane a une grande influence sur la réponse : sensibilité, figure (5-13) et bandes de fréquences figure (5-14). Elle représente un paramètre très important dans le fonctionnement de la membrane.

Fig 5-13 : courbe de déplacement en fonction de la tension  $T$



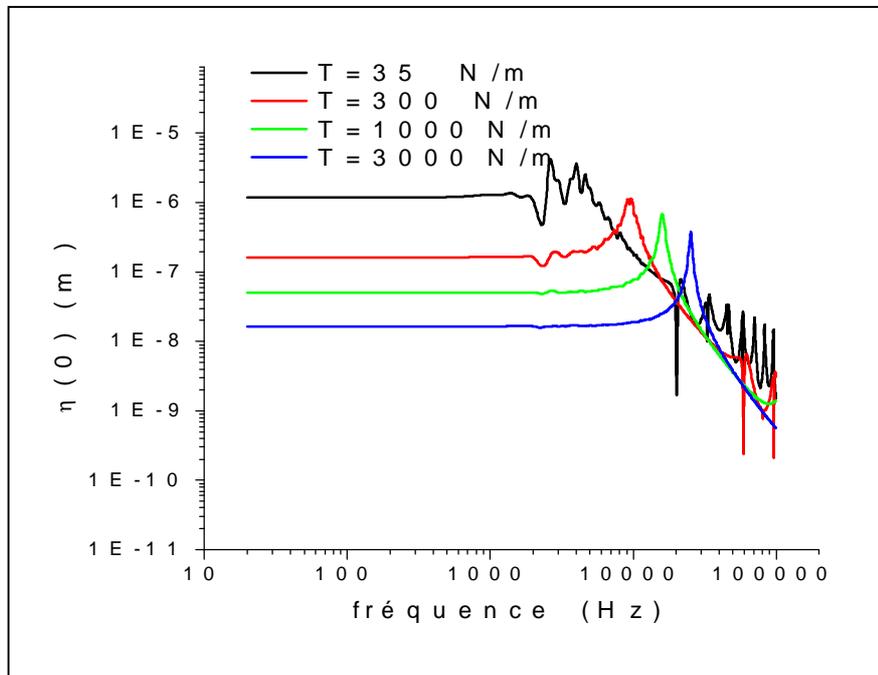


Fig. 5-14 : courbes de déplacement en fonction de la tension  $T$  et la fréquence.

### V.B.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 figure (5-15) .

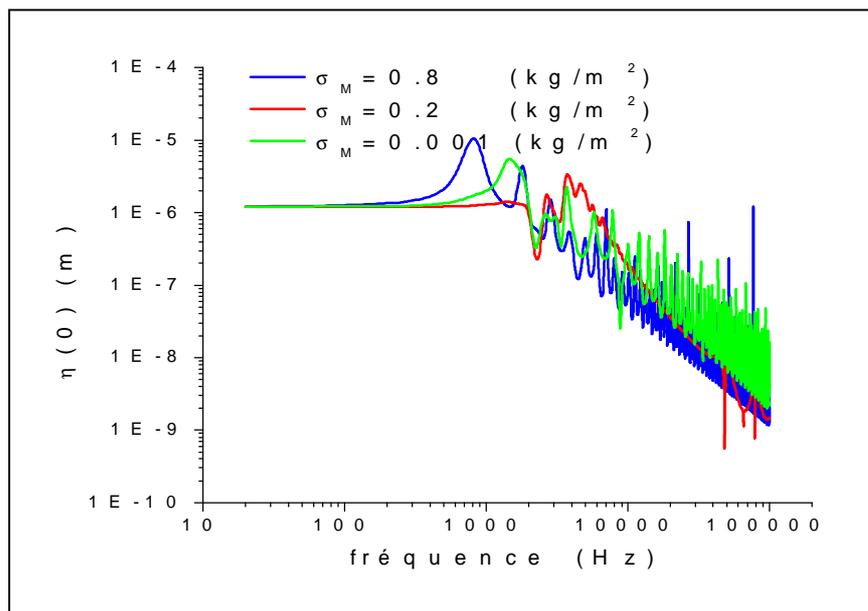


Fig 5-15 : courbe de déplacement en fonction de la densité  $\sigma_M$  et de la fréquence

### V.B.6 Influence du 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, conformément à la relation 4.46. 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 fréquences est négligeable, figure (5-16).

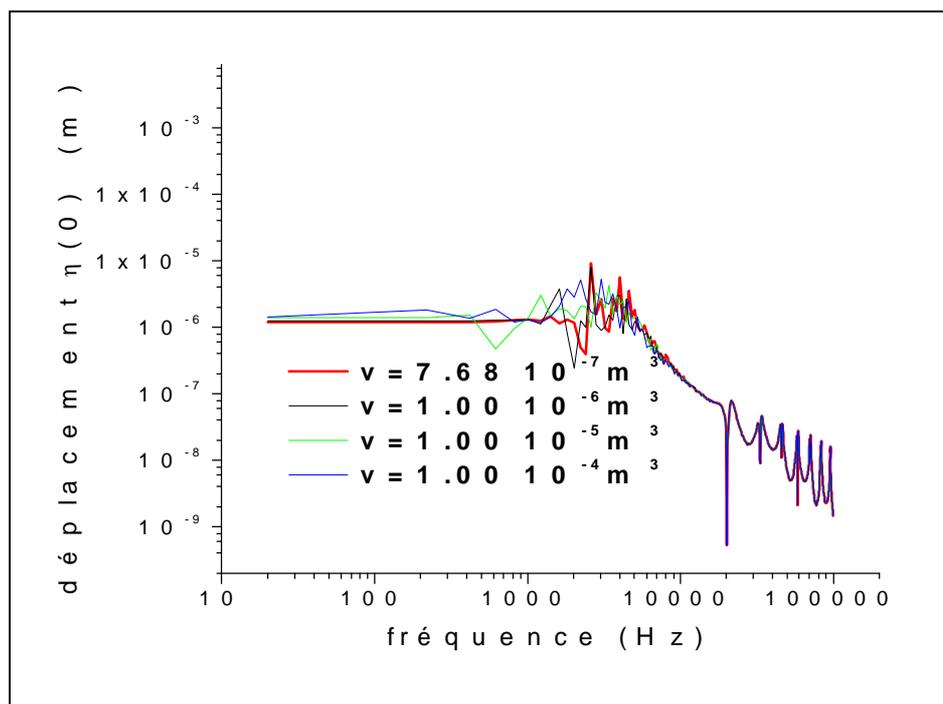


Fig 5-16 courbe du déplacement en fonction de la fréquence pour différents volumes

### V.B. 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 de ce chapitre, ces paramètres sont le rayon, la tension et la densité.

Dans le tableau (5.3), on a regroupé les résultats obtenus à partir de plusieurs graphes. Ce tableau donne la fréquence maximale de la bande et les valeurs correspondants de  $a$  (*rayon*),  $T$  (*tension*),  $\sigma_M$  (*densité surfacique*) et du déplacement  $h(0)$ .

A		200µm	250 µm	500 µm	1 mm	3.175 mm	5 mm	12 mm
T	$\sigma_M$							
30	0.001	43000	27780	<b>19475</b>	6722	1876	1030	<b>5081</b>
	0.005	40000	26658	<b>16560</b>	5636	1397	990	<b>3628</b>
	0.1	26600	15892	<b>9445</b>	3535	1382	962	<b>1170</b>
	0.15	22600	13376	<b>7770</b>	3007	1232	883	<b>801</b>
	0.2	20000	10711	<b>6835</b>	2558	1098	816	<b>582</b>
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	<b>22894</b>	7065	2025	1200	<b>10977</b>
	0.005	46250	34100	<b>17412</b>	6409	1614	1195	<b>5364</b>
	0.1	30000	21710	<b>10560</b>	5730	1462	1136	<b>1427</b>
	0.15	25000	15380	<b>8711</b>	4358	1358	962	<b>1149</b>
	0.2	21000	12210	<b>7534</b>	3769	1210	872	<b>995</b>
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	<b>31020</b>	9049	2927	1310	<b>21152</b>
	0.005	51470	52290	<b>29600</b>	7945	2277	1300	9444
	0.1	33600	35540	<b>17670</b>	6477	1933	1220	2201
	0.15	32490	30170	<b>14800</b>	6000	1608	1200	1794
	0.2	28000	26238	<b>12000</b>	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	<b>32000</b>	22965	2426	1433	<b>23150</b>
	0.005	66345	55830	<b>30100</b>	21440	2019	1260	11588
	0.1	48500	38600	<b>17311</b>	10232	1823	1252	2574
	0.15	42500	32210	<b>15216</b>	7829	1820	1224	2201
	0.2	37000	29400	<b>13000</b>	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	<b>43723</b>	27238	2833	3465	<b>30350</b>
	0.005	82847	63194	<b>42080</b>	26065	2721	3230	15192
	0.1	62662	45096	<b>27325</b>	15185	2647	1630	3436
	0.15	56792	40871	<b>24372</b>	12943	2182	1400	2817
	0.2	51400	37357	<b>21000</b>	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	<b>100000</b>	<b>65401</b>	37923	11341	6590	<b>66756</b>
	0.005	100000	<b>100000</b>	<b>63940</b>	36876	10458	6035	27730
	0.1	100000	<b>92674</b>	<b>45060</b>	23644	5710	3850	6582

	0.15	98200	<b>85100</b>	<b>40230</b>	20484	5016	3501	5268
	0.2	93500	<b>79300</b>	<b>35000</b>	18442	4442	3214	4615
Ordre de $\eta(0)$		$1 \cdot 10^{-10}$	$5.2 \cdot 10^{-10}$	$0.5 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$0.3 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$

Tableau 7.1

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

### Références :

[1] L.Satyanaryana et al , " Liquid-petroleum-gas sensor based on a spinal semiconductor ,ZnGa<sub>2</sub>O<sub>4</sub>" ,Sensors and Actuators B 46 (1998)1-7.

[2] V.Wilkens\*,Ch.Koch , " Fiber-Optic Multilayer Hydrophone for Ultrasonic Measurement " , Ultrasonics 37 (1999) 45 -49 .

[3] Nordert Furstenau et al "Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Fiber –Optic Microphone " , JEEE Transtions on instrumentation and measurement Vol.47.No.1 FEBRYARY 1998.

[4] - Sverre Knudesen , " An Ultrasonic Fiber-Optic Hydrophone Incorporating a Puush –Pull Transducer in a Sagnac Interferometer " ,Journal of Lightwave Technology , VOL. 12,NO.9.Spebtemener 1994.

[5] S.T.vohra et al, " High Sensitivity Pressure Sensors Utilizing Advanced Polymer Coatings " , U.S.Naval Research Laboratory .Code 5670 ,Washington DC 20375 ,USA.

[6] Andong Hu and Frank W. Cuomo, Theoretical and experimental study of a fiber optic microphone, University of Rhode Island, Kingston, 1991.

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

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES:

Dans ce travail et à l'aide d'un programme informatique, on a étudié la réponse (déplacement et bande de fréquences) d'une membrane d'un capteur à fibres optiques quand les paramètres caractéristiques de celui-ci changent.

Après une série de calculs effectués à l'aide de notre programme, on a obtenu des représentations graphiques de la réponse à partir desquelles on aboutit à la conclusion suivante:

- les paramètres du microphone les plus influents sur la sensibilité caractérisée par le 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 fréquences 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 tels 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 fréquences 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.
- on peut réaliser un capteur à fibre optique de ce type qui fonctionne dans l'ultrason, l'audible et l'infrason en changeant seulement les paramètres  $(a, T, \sigma_M)$ .

Par ailleurs, nos résultats peuvent s'appliquer pour :

- ù le choix de la plage de fréquences de fonctionnement du microphone en fonction des dimensions proposées.
- ù le choix des dimensions du capteur en fonction des fréquences obtenues.
- ù la proposition d'un modèle réalisable pratiquement.
- ù une étude pour développer un matériau pour la réalisation d'un capteur avec caractéristiques spécifiques.
- ù d'autres études sur les autres parties du microphone à fibre optique (la fibre optique, l'émetteur et le récepteur).

D'après les résultats obtenus dans cette thèse, on peut conclure que: le capteur qui était conçu, originalement, comme microphone peut jouer le rôle d'un capteur de pression dans des milieux durs comme les champs pétroliers et dans la matière dangereuse comme les hydrocarbures. Ce capteur peut être calibré en changeant la pression de la chambre arrière. Dans ce cas, on préfère utiliser un capteur robuste de grande taille au lieu d'un capteur moins robuste et de petite taille. Ce choix est possible puisque nous avons plusieurs possibilités de choix (voir tableau ci haut). Ce capteur peut jouer, évidemment, le rôle d'un

microphone pour mesurer le son dans un hydrocarbure servant à trouver d'autres paramètres.

On propose alors d'ajouter un pavillon sonore de paramètre géométrique connu (étudié dans le chapitre II) au microphone.

A l'aide d'une source sonore, à basse fréquence variable, placée devant le pavillon sonore, on peut calculer la vitesse du son dans l'hydrocarbure à l'aide de la formule (2-) en lisant la fréquence de coupure.

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

## **Résumé:**

Un capteur précis, fiable, imperturbable et qui peut être utilisé dans des milieux fortement hostiles est nécessaire dans l'industrie pétrochimique et pétrolière. Un capteur optique peut satisfaire à toutes ces conditions. Dans ce travail, on propose un modèle de capteur à fibre optique pouvant mesurer la pression qui est un paramètre essentiel dans le domaine pétrolier. Cet appareil peut aussi mesurer la vitesse du son dans un fluide quand on lui ajoute un pavillon sonore. Celle-ci permet de déterminer d'autres paramètres utiles dans le domaine. Plus précisément, nous avons étudié le déplacement de la membrane jouant le rôle du transducteur d'un capteur à fibre optique et nous avons analysé l'influence des paramètres géométriques et physiques sur le déplacement. Ce travail peut contribuer au développement de nouveaux instruments de mesures dans le domaine de pétrochimie.

## **Abstract :**

A precise sensor, reliable, imperturbable and which can be used in strongly hostile mediums is necessary in petrochemical and oil industry. An optical sensor can satisfy all these conditions. In this work, we propose a model of an optical fiber sensor which can measure the pressure, which is an essential parameter in the oil field. This device can also measure the speed of sound in a fluid when a sound pavilion is added to it. In this case it will be possible to determine other useful parameters in the field. More precisely, we studied the displacement of the membrane playing the role of the transducer of a sensor with optical fiber and we analyzed the influence of the geometrical and physical parameters on displacement. This work can contribute to the development of new measuring instruments in the field of petrochemistry.