

CHAPITRE I

PROBLEMES DE CARACTERISATION DES FIBRES

PRESENTATION DES METHODES THERMIQUES

L'utilisation des ondes électromagnétiques dans le domaine des fréquences optiques pour transmettre un signal est difficile dans l'atmosphère en particulier à cause de l'absorption moléculaire et des turbulences atmosphériques. Elle connaît aujourd'hui un développement très rapide grâce à la propagation guidée dans les fibres optiques. Il n'en demeure pas moins qu'il existe des pertes de flux dans un guide optique caractérisées par le coefficient d'atténuation β_T défini de la façon suivante. Si ϕ_0 est le flux couplé à l'entrée de la fibre de longueur L, il ressort un flux ϕ_L

$$\phi_L = \phi_0 \exp(-\beta_T L)$$

On exprime couramment β_T en dB/km ; 4,3 dB/km correspondant à 10^{-5} cm^{-1} . La caractérisation des guides, en particulier sur le plan des pertes est nécessaire pour l'amélioration de leurs performances. Parmi les causes de pertes figure l'absorption qui peut être mesurée par des méthodes thermiques que nous décrivons dans ce chapitre.

Si, dans le domaine des télécommunications on cherche à minimiser les perturbations du guidage de la lumière, il a été récemment montré (1) que l'analyse des effets d'une contrainte mécanique ou thermique appliquée à la fibre permet de la transformer en capteur de pression ou de température.

I-1 Deux problèmes liés à la caractérisation des fibres

I-1-1 Rappels sur les fibres optiques

Une fibre optique est un guide diélectrique cylindrique

constitué d'un coeur et d'une gaine optique d'indice de réfraction plus faible. La répartition d'indice dans le coeur peut-être uniforme, pour une fibre à saut d'indice, ou au contraire variable. Dans ce cas le gradient d'indice est réalisé en introduisant de façon contrôlée des dopants tels que le bore, le fluor, le germanium, le phosphore dans la silice hautement purifiée. Les méthodes de fabrication qui dépendent du type de fibre considérée ne seront pas évoquées ici (2).

I-1-2 Principales causes de pertes dans une fibre optique

Il existe deux mécanismes d'absorption qui constituent une première cause de pertes. L'interaction des photons avec la silice elle-même peut exciter les vibrations moléculaires créant ainsi des bandes d'absorption dans l'infrarouge. L'absorption de photons plus énergétiques donne lieu à des transitions électroniques et donc à des pics dans l'ultraviolet.

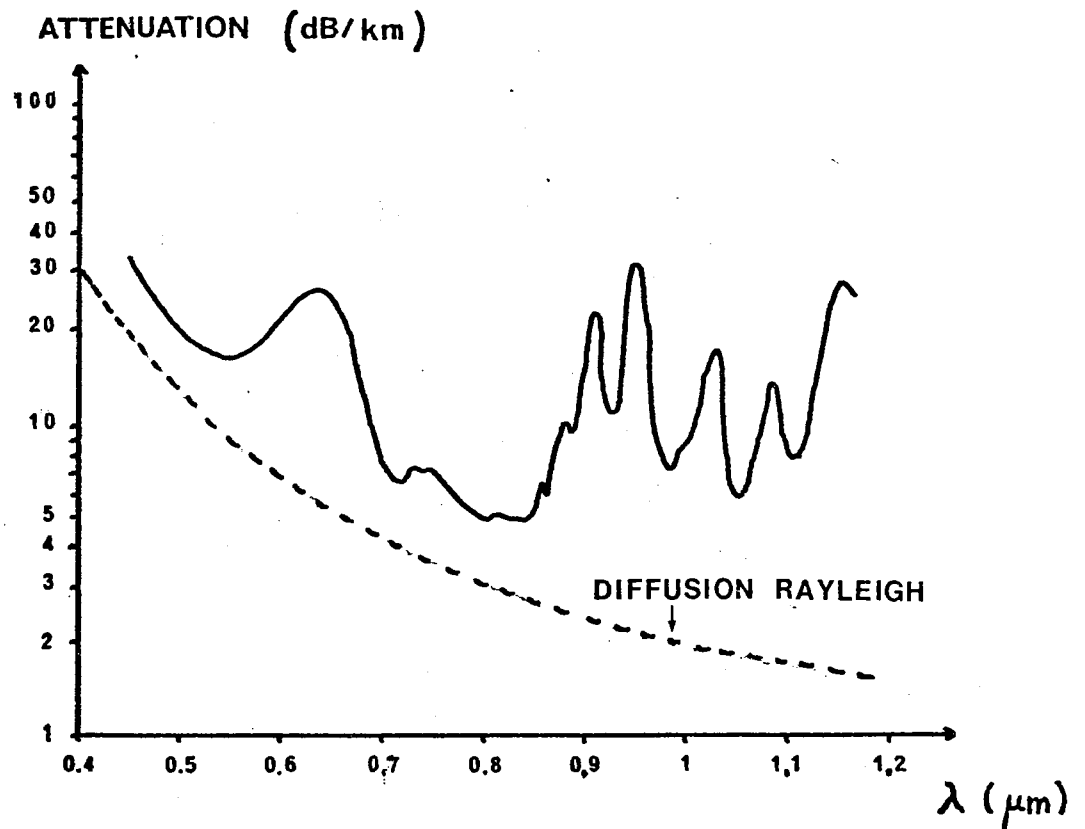
La silice contient d'autre part des dopants introduits volontairement mais aussi des impuretés (Ti, Co, Fe, OH⁻) qui présentent leurs propres bandes d'absorption.

Une seconde cause importante d'atténuation est la diffusion Rayleigh. Sous l'action du champ d'une onde électromagnétique, les charges électriques contenues dans la matière se mettent à osciller. Etant ainsi accélérées, elles réémettent de l'énergie électromagnétique dans toutes les directions en raison de λ^{-4} où λ est la longueur d'onde incidente. Actuellement, les télécommunications utilisent $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$ où la diffusion Rayleigh est déjà atténuée. Les meilleures performances des fibres se situent dans l'infrarouge à $1,3 \mu\text{m}$ et plus récemment $1,55 \mu\text{m}$ où des atténuations de 0,7 dB/km ont été enregistrées. A cela, il faut ajouter les processus de diffusion inélastique Raman et Brillouin ainsi que d'éventuelles fluorescences mais qui n'interviennent que pour une faible part.

Enfin, la présence de microbulles ou de micro courbures est responsable de pertes assimilables à une diffusion. Notons qu'une fabrication soignée des fibres permet de minimiser ces effets.

I-1-3 - Méthodes classiques de mesure de pertes

L'amélioration des fibres passe ^{par} le contrôle des impuretés et des dopants qui implique une spectroscopie d'absorption. Or, les méthodes classiques de spectroscopie (spectrophotométrie, rétrodiffusion) ne permettent pas de séparer absorption et diffusion. En particulier, l'étude du rapport flux transmis sur flux réfléchi fournit un spectre d'absorption superposé à un fond important de diffusion Rayleigh.



Du fait de la grande transparence du matériau, une telle étude nécessite l'emploi de grandes longueurs de fibres et le résultat fournit l'atténuation moyenne. La rétrodiffusion (3) est plus performante. Cette technique consiste à injecter une courte impulsion lumineuse de forte énergie à une extrémité de la fibre et à observer à cette même extrémité le flux rétrodiffusé par les différentes parties.

Une analyse temporelle de ce signal permet de préciser les variations d'atténuation le long de la fibre, la résolution spatiale étant liée à la durée de l'impulsion (typiquement 3m pour des impulsions de 10ns). Cependant, l'inconvénient majeur est la faiblesse du flux rétrodiffusé.

Notons enfin qu'une analyse en spectroscopie Raman de la lumière diffusée permet à priori de déterminer la nature des dopants (4).

L'absorption de la lumière, liée à des transferts d'énergie non radiatifs, entraîne un échauffement de l'échantillon ; les méthodes thermiques sont donc particulièrement bien adaptées aux mesures de ce type de pertes. L'application au cas des fibres optiques des méthodes présentées dans le paragraphe suivant permettent, de façon non destructive la discrimination des causes de pertes dans un guide optique. La mesure obtenue est locale avec une résolution de quelques centimètres pour l'une d'entre elles. La réalisation de telles expériences permettra parallèlement de contribuer à la détermination de la nature de certaines atténuations dont l'origine est mal connue.

Des pertes élevées, appelées pic de fibrage, apparaissent autour de 630 nm à la suite de l'étirage de la fibre à partir de la préforme. L'hypothèse d'un pic de fluorescence (4) récemment faite à la suite d'une analyse de la lumière diffusée par spectroscopie Raman peut-être confirmée par une méthode thermique.

D'autre part, l'utilisation de fibres optiques en zone irradiée entraîne une augmentation énorme des pertes (5). Sachant que les verres s'opacifient lorsqu'ils sont soumis à des irradiations de haute énergie, il est probable qu'il s'agisse d'absorption.

Enfin, ils convient de citer l'emploi de guides optiques pour transporter de la lumière sur de courtes distances comme dans un avion, une automobile... Dans ce but, sont actuellement étudiées des fibres synthétiques (6) dont la mise au point nécessite une caractérisation sur la plan de l'absorption (contrôle de composition etc...).

II-1-4 Problème lié à l'utilisation d'une fibre comme capteur

Lorsqu'on applique localement une contrainte mécanique à une fibre optique, la propagation de la lumière à l'intérieur est perturbée. Le principe d'un capteur tient dans l'étude des modifications du champ électromagnétique à la sortie du guide. De façon plus précise, la lumière ne peut se propager que suivant certains modes dans une fibre et si son diamètre est de l'ordre de quelques longueurs d'onde, elle devient monomode (2). En toute rigueur, il s'agit de deux modes orthogonaux du champ électromagnétique qui, si la fibre a une parfaite symétrie de révolution, sont dégénérés (ils se propagent à la même vitesse). L'application d'une contrainte entraîne, par effet photoélastique (7), une modification de l'indice de réfraction souvent anisotrope ; autrement dit la fibre devient biréfringente et la dégénérescence de mode est ainsi levée. On dispose alors de toutes les techniques d'analyse interférométriques en lumière polarisée pour mesurer les variations de la biréfringence induite sur la fibre.

Suivant que la contrainte est d'origine mécanique ou thermique la fibre est transformée en capteur de pression ou de

température. Il importe donc, dans la mise au point d'un capteur de température, de connaître le gradient thermique qui existe à l'intérieur de la fibre. Le temps de réponse est donc principalement déterminé par la vitesse à laquelle la chaleur diffuse, grandeur essentiellement liée à la diffusivité thermique (8) χ_f de la fibre, rapport de la conductivité thermique K_f et de sa capacité calorifique par unité de volume (ρ_f masse volumique, C_f chaleur spécifique) : $\chi_f = K_f / \rho_f C_f$. La détermination de χ_f est donc importante mais délicate. La présence de dopants et d'impuretés entraîne certainement des différences entre les paramètres thermiques de la fibre et ceux de la silice pure. Un tel guide étant de plus, par construction, étiré à partir d'une préforme, doit posséder des caractéristiques qui s'écartent sensiblement de celles du matériau massif, sans parler d'une anisotropie éventuelle de la conductivité thermique. Ces deux faits impliquent par conséquent une mesure in situ sur le produit étiré (fibre) de très faible diamètre typiquement 120 μm .

Les méthodes classiques (8) de mesure de diffusivité qui, pour la plupart passent par la mesure de la conductivité thermique K_f à l'aide de thermocouple se montrent ici très délicates à mettre en oeuvre. En effet, cette grandeur étant liée à la diffusion de la chaleur, il faut, pour sa mesure, étudier le flux thermique engendré par une source de chaleur dans l'échantillon ce qui paraît très difficile pour un matériau de 60 μm d'épaisseur. Les dimensions du thermocouple sont alors grandes devant celles de la fibre ; cela peut perturber sensiblement la mesure.

I-2 Présentation de deux méthodes thermiques de mesure d'absorption

Les méthodes thermiques proposées ici, sont non destructives et exemptes de contact entre la fibre et le détecteur.

Le principe est simple : un échantillon E absorbant est éclairé par une onde électromagnétique. L'énergie électromagnétique absorbée par l'échantillon est transformée en chaleur augmentant ainsi sa température, et provoquant plusieurs phénomènes simultanés. Du point de vue mécanique, il y a dilatation et sur le plan thermique, la différence de température qui existe entre E et le milieu qui l'entoure, provoque une diffusion de la chaleur. La répartition de température de l'environnement de E est donc modifiée. Si ces élévations sont importantes, rayonnement et convection prennent alors une part importante dans les échanges thermiques (8).

La répartition de température dans le milieu extérieur à E est caractéristique de la quantité d'énergie absorbée par l'échantillon. Il reste à détecter ces variations de températures et à les relier à l'absorption. La méthode la plus naturelle est la calorimétrie (9) mais sa mise en oeuvre est difficile du fait des faibles élévations de température, 10^{-4} à 10^{-5} °C pour la fibre

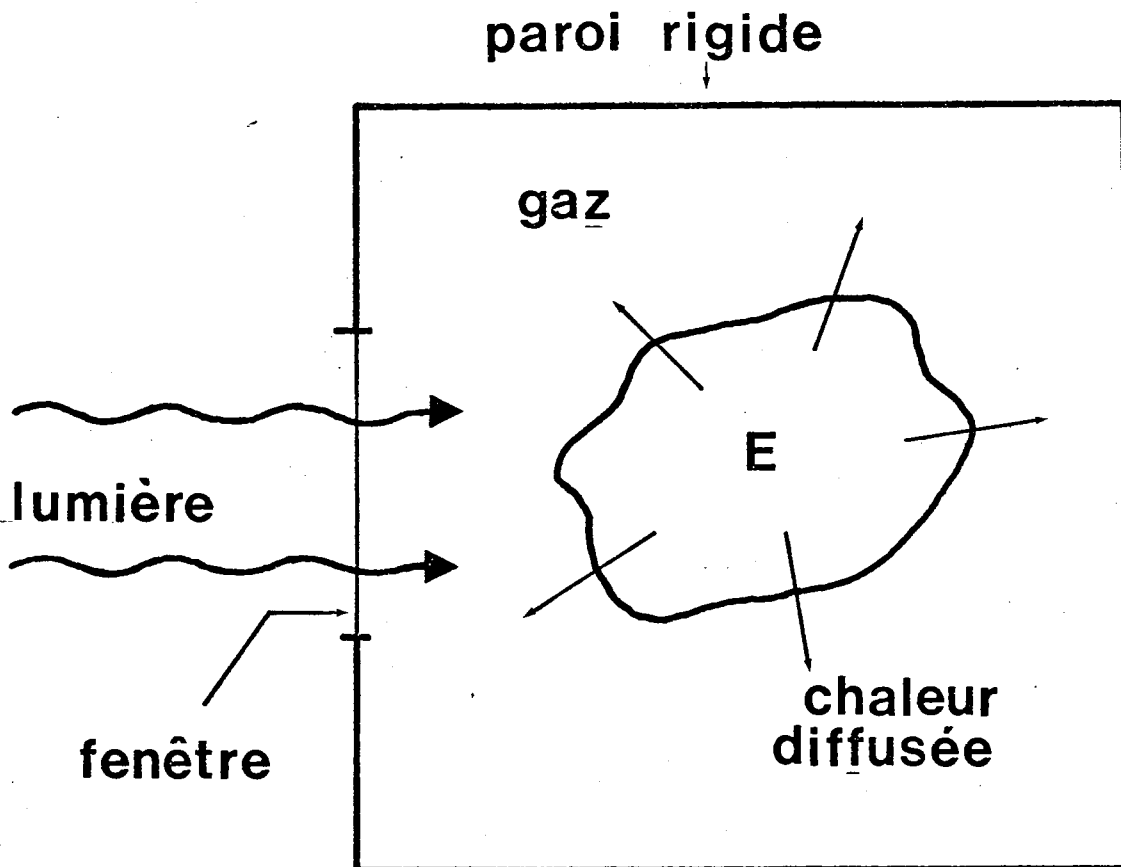
D'autres méthodes, basées sur une approche thermique, ont été présentées en 1974 (10). Nous en décrivons deux autres différentes.

I-2-1 Technique photoacoustique

L'échantillon est dans ce cas entouré d'un gaz dont le volume est maintenu constant par un récipient rigide (cellule photoacoustique).

Toute variation de température dans le gaz se traduit alors par une modification de la pression qui reste très faible dans le cas de matériaux peu absorbants (10^{-7} à 10^{-9} atm

pour la fibre). La mesure statique de telles surpressions est d'une part difficile et de plus perturbée par toute fluctuation



due à des phénomènes parasites. Pour surmonter cette difficulté, il suffit de moduler en amplitude la lumière incidente qui entraîne alors l'apparition d'une pression alternative à la même fréquence qui est détectée par un microphone. Le signal électrique obtenu est traité par démodulation synchrone augmentant ainsi le rapport signal à bruit. Ces phénomènes constituent le principe de l'effet photoacoustique dont l'existence est connue depuis une centaine d'années : A.G. Bell 1880 (11).

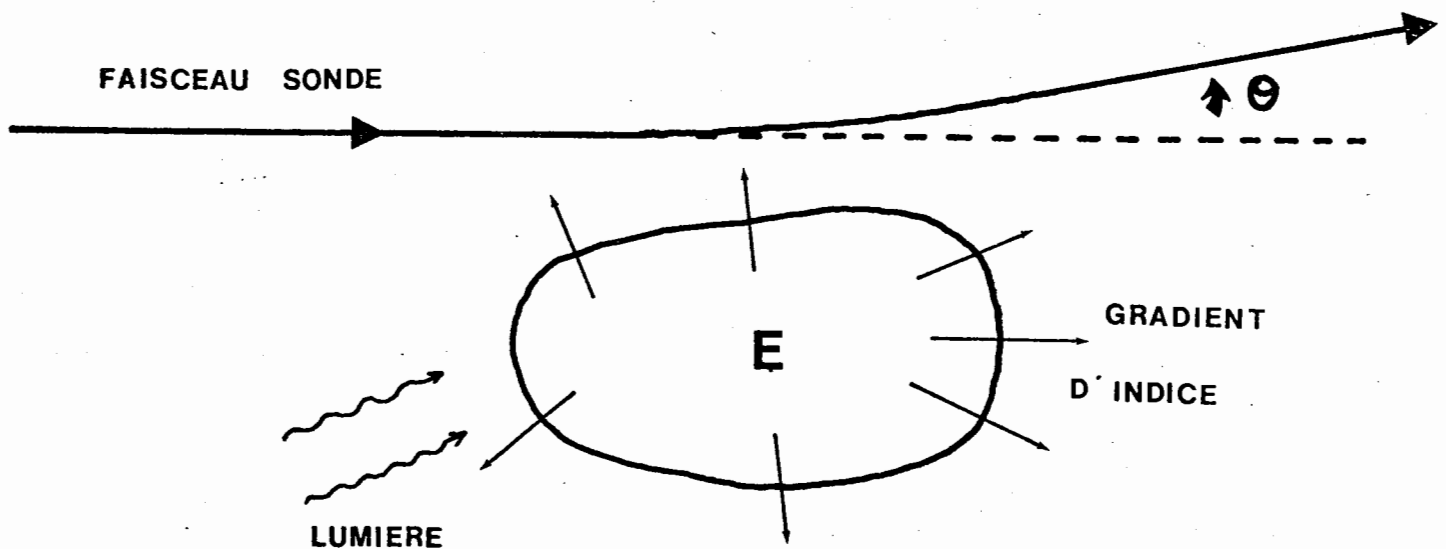
Son utilisation n'a commencé qu'une cinquantaine d'années plus tard, pour étudier l'absorption des gaz (l'échantillon est le gaz lui-même) dans le domaine infrarouge (12). Ce n'est que depuis quelques années que l'effet photoacoustique connaît un nouvel essor tant sur le plan théorique qu'expérimental. Le premier modèle théorique quantitatif a été proposé par Parker en 1973 (13). Une théorie plus complète de l'effet photoacoustique dans la matière condensée due à Rosencwaig et Gersho (14) a suivi en 1976. Ces dernières années, ces modèles n'ont cessé d'être améliorés tenant compte de phénomènes de plus en plus nombreux (Bennett et Forman (15), Aamodt (16), Mc Donald (17)). Plus récemment encore, l'utilisation de sources pulsées pour l'étude des liquides a été développée (Tam (18)). La spectroscopie photoacoustique, plus particulièrement sensible à l'absorption apporte des résultats là où d'autres méthodes sont mises en difficulté. La plupart des méthodes classiques de spectroscopie concernent l'étude du rapport du flux transmis Φ_t par l'échantillon au flux incident Φ_i .

Avec des matériaux très absorbants ou très diffusants la quantité Φ_t/Φ_i est très petite devant 1 et le signal détecté est très faible. Notons que l'utilisation de flux incidents importants peut-être nuisible par échauffement dans le cas de l'absorption. La technique photoacoustique est alors particulièrement adaptée, tout échauffement dû à la lumière absorbée contribuant au signal de pression. A l'opposé, dans le cas de matériaux très transparents Φ_t/Φ_i est voisin de l'unité et le spectre d'absorption est superposé à un fond continu important, le rapport signal à bruit étant faible. La photoacoustique, basée sur les pertes par absorption permet d'éliminer ce fond lumineux. La fibre optique entre dans cette catégorie mais présente d'autres avantages qui sont exposés plus loin.

Cependant, si le signal photoacoustique est principalement relié à l'absorption, il est vrai qu'une partie de la lumière diffusée par l'échantillon peut-être absorbée par les parois de la cellule et donner lieu au même effet. Cette influence peut devenir prépondérante dans le cas de matériaux très diffusants. Aussi, une autre méthode de détection de la répartition de température dans le milieu environnant a été récemment mise au point, indépendante de la lumière diffusée.

I-2-2 - Principe de la déviation photothermique ou effet mirage

Le principe de détection de la répartition de température n'est plus la mesure d'une pression (il n'y a plus de cellule), mais est basé sur le fait qu'il existe un gradient de température qui, lui-même induit un gradient d'indice. Ce gradient peut alors être détecté.



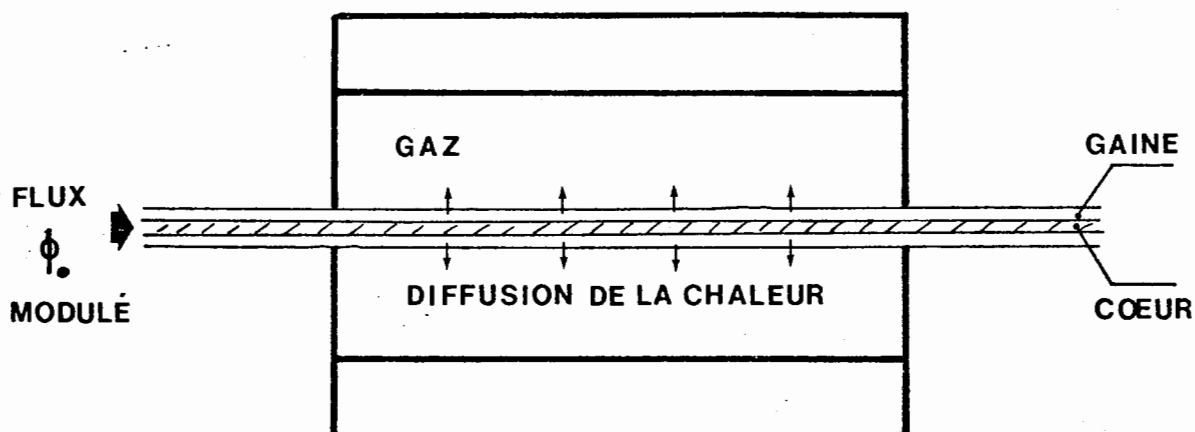
en observant la déviation θ d'un faisceau lumineux (19). Pour les mêmes raisons que précédemment, il est préférable de moduler la lumière et d'effectuer une démodulation synchrone. Cette technique basée sur l'effet mirage a des performances comparables et parfois meilleures que la photoacoustique (20) ; elle est appliquée à de nombreux échantillons avec succès (21), (22).

Les deux méthodes présentées ont été utilisées dans le cas de la fibre optique.

I-3 Application des méthodes thermiques aux fibres optiques

I-3-1 - Photoacoustique

L'application de la technique photoacoustique aux fibres optiques consiste à injecter dans celle-ci de la lumière modulée en amplitude. Une fraction de l'énergie lumineuse guidée dans le coeur de la fibre est absorbée et donc transformée en chaleur qui diffuse radialement à travers la gaine optique avant d'atteindre le gaz.



Il suffit alors que la fibre traverse une cellule hermétiquement close pour qu'une pression modulée apparaisse dans le gaz. Ce signal photoacoustique est proportionnel à la densité d'énergie perdue par absorption (ch. II) soit, en appelant β le coefficient d'absorption par unité de longueur et S la section du coeur de la fibre, $\beta\phi/S$. C'est cette propriété et le guidage de la lumière par l'échantillon lui-même qui rendent la méthode applicable. En effet, bien que β soit faible (de l'ordre de 10^{-5} cm^{-1} ou 4,3 dB/km) la section S du coeur de la fibre est très petite ($9 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ pour une fibre multimode, encore moins pour une monomode) et pour des flux d'une centaine de milliwatts, on obtient des densités d'énergie importantes (10^4 W/m^3).

Dans le cadre d'une spectroscopie d'absorption sur un échantillon, il existe un facteur d'échelle souvent indéterminé sur le coefficient d'absorption et par conséquent la mesure absolue de β nécessite en général un étalonnage. Bien que dans le cas de la fibre, la symétrie de révolution permette de calculer l'amplitude du signal, un étalonnage permet d'éviter toutes les lacunes inhérentes à l'utilisation d'un modèle. Cet étalonnage peut-être aisément réalisé en remplaçant la fibre par un fil résistif parcouru par un courant alternatif de fréquence angulaire $\omega/2$ (moitié de la fréquence angulaire de modulation pour la fibre). Par effet Joule, il apparaît alors dans le fil une source de chaleur connue, proportionnelle à I^2 donc à la fréquence ω . Une étude de la répartition de température dans le gaz présentée au chapitre II montre que lorsque les signaux donnés par le fil et la fibre sont égaux, il existe une relation simple entre $\beta\phi$ et I^2 .

L'utilisation d'une grande longueur de fibre est inutile car on augmenterait certes la quantité de chaleur transmise au gaz mais aussi son volume et l'amplitude du signal ne serait pas accrue.

La technique photoacoustique apporte donc une méthode locale et non destructive de discrimination entre les pertes par diffusion et par absorption (23).

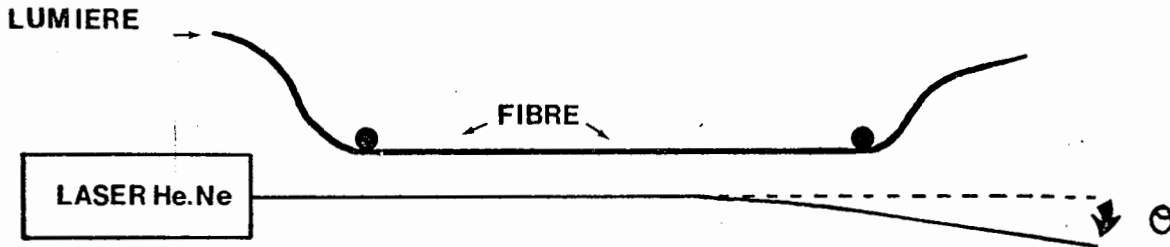
Elle est en fait beaucoup plus riche. La chaleur doit diffuser à travers la gaine optique avant d'atteindre le gaz. Ce phénomène de diffusion se fait avec une vitesse finie déterminée par la diffusivité thermique χ_f précédemment introduite. Par suite, lorsque la lumière est modulée en amplitude, il apparaît un déphasage entre le signal photoacoustique et le signal de modulation dû à l'inertie thermique de la gaine. Ce déphasage est d'autant plus important que la fréquence de modulation ν est élevée. Une étude de ce déphasage en fonction de ν permet d'atteindre la diffusivité χ_f de la fibre. De telles études ont été menées par ailleurs sur des échantillons plans (24). L'avantage de cette méthode par rapport aux méthodes classiques est d'une part de disposer d'une source de chaleur dans l'échantillon et d'autre part l'absence de tout contact avec un détecteur. Tous ces avantages existent pour l'effet mirage mais en plus, la lumière diffusée n'intervient pas dans ces cas.

I-3-2 - Déviation photothermique

Le principe de l'application à la fibre optique de l'effet mirage consiste à mesurer l'angle de déviation d'un faisceau laser He-Ne initialement parallèle à la fibre en l'absence du gradient d'indice dans le gaz.

L'avantage de la fibre, pour cette méthode est de pouvoir donner lieu à de grandes longueurs d'interaction l à laquelle l'angle θ est proportionnel. Cependant, si l devient trop grand, le problème de la déformation du faisceau laser (faisceau gaussien) peut se poser et la définition de sa

déviations n'est pas immédiate. Ce problème peut-être évité en réalisant le même étalonnage que dans la méthode photoacoustique,



ce qui réduit la mesure à la comparaison de deux signaux (23). Enfin, les déviations enregistrées sont très faibles (de l'ordre de 1'') et la mesure de tels angles nécessite la mise en oeuvre de détecteurs très performants dont un type est décrit au chapitre III.

La mesure de la diffusivité de la fibre par cette méthode est possible mais nécessite l'utilisation de fréquences de modulation élevées (chapitre II) et donc un détecteur de bande passante suffisamment élevée.

En conclusion, les méthodes thermiques, tant photoacoustique qu'effet mirage semblent adaptées, par leur nature et leur sensibilité, à la mesure du coefficient d'absorption β d'une fibre optique. La technique de l'effet mirage, complètement indé-

pendante de la lumière diffusée confirmera ici les résultats des expériences utilisant la cellule photoacoustique qui a une géométrie mieux adaptée au problème. Enfin, la technique photoacoustique, par son caractère dynamique, fait intervenir l'inertie thermique de la fibre et par là même permet de mesurer la diffusivité thermique d'un matériau aussi fin.

CHAPITRE II

APPROCHE THEORIQUE

Ce chapitre est consacré à l'élaboration d'un modèle théorique permettant d'évaluer le signal en amplitude et en phase, engendré par l'absorption de lumière modulée dans une fibre, dans le cadre des deux méthodes proposées au chapitre I : utilisation d'une cellule photoacoustique et photodéviation d'un faisceau sonde par "effet mirage".

II-1 - Modélisation du dispositif

II-1-1 - Densité de chaleur produite par absorption de lumière.

Après quelques dizaines de centimètres parcourus, la lumière est presque totalement guidée dans le coeur de la fibre. Pour une fibre monomode, la répartition d'énergie électromagnétique y est parfaitement connue, mais il n'en est plus de même pour une fibre multimode.

Dans tous les cas, le coeur d'une fibre optique ayant un faible diamètre, de l'ordre de 60 μm si elle est multimode, la diffusion de la chaleur (pour des fréquences peu élevées, voisines de quelques centaines de hertz) suffira à rendre la répartition de température quasi uniforme à l'intérieur de la fibre. Cette propriété, qui sera démontrée dans un prochain paragraphe autorise à considérer la répartition de la source de chaleur due à l'absorption comme uniforme dans le coeur de la fibre.

Ce point posé, il reste à relier l'intensité de la source de chaleur au coefficient d'absorption de la fibre.

Considérons de la lumière monochromatique de longueur d'onde λ modulée sinusoidalement à la fréquence angulaire ω se propageant dans la fibre ; ω est relié à la fréquence ν par $\omega = 2\pi\nu$.. L'ensemble des causes de pertes dans le guide optique peuvent être représentées par le coefficient d'atténuation en puissance par unité de longueur $\beta_T(\lambda)$ qui est somme des différents coefficients liés à chaque type de pertes (absorption, diffusion...). $\beta(\lambda)$ désignera le coefficient d'absorption par unité de longueur. En appelant ϕ_0 le flux lumineux à l'entrée de la cellule ou de la zone d'interaction de la fibre et du faisceau sonde, la perte de puissance sous forme de chaleur dans un élément de longueur dz à l'abscisse z vaut alors :

$$d\phi = \beta(\lambda) \phi_0 \left(\frac{1 + \cos \omega t}{2} \right) \exp(-\beta_T(\lambda)z) dz$$

Comme il est d'usage dans l'étude des régimes harmoniques nous utiliserons la notation complexe avec une dépendance temporelle $\exp i\omega t$ qui conduit immédiatement à :

$$d\phi = \beta(\lambda) \phi_0 \left(\frac{1 + \exp i\omega t}{2} \right) \exp(-\beta_T(\lambda)z) dz.$$

Par suite de la faible atténuation des fibres optiques ($\beta_T \approx 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ ce qui correspond à 4,3 dB/km) et des longueurs considérées (la cellule photoacoustique a quelques centimètres de long) le produit $\beta_T(\lambda) \cdot z$ est très petit devant l'unité et la puissance perdue sous forme de chaleur par unité de volume est :

$$W = \frac{\beta(\lambda) \phi_0}{2S} (1 + \exp i\omega t) \quad (\text{II.1})$$

Dans cette expression, S désigne la section droite du coeur de la fibre. Dans le cadre de cette approximation, la densité de chaleur est indépendante de z , ce qui entraîne la

nullité du flux thermique à travers toute section droite de la fibre. Cette remarque permet de traiter le problème indépendamment de la coordonnée z . Notons que, bien que β soit très faible, (10^{-5} cm^{-1} ou $4,3 \text{ dB/km}$) la section du coeur est elle aussi très petite ($S \simeq 10^{-3} \text{ mm}^2$) ce qui permet pour des flux d'une centaine de milliwatts d'obtenir des densités d'énergie importantes (typiquement 10^4 W/m^3). Cette caractéristique, due au fait que la lumière est guidée par l'échantillon, permet d'envisager une réalisation expérimentale. Contrairement aux autres expériences de photoacoustique, les effets de parois pour faire entrer la lumière dans l'échantillon n'existent pas (15).

II-1-2 - Symétrie de l'échantillon - Schéma du dispositif.

Par suite du guidage de la lumière à l'intérieur du coeur de la fibre, la source de chaleur provoquée par absorption possède la symétrie de révolution.

La connaissance de cette source de chaleur autorise le calcul analytique de la répartition de température dans la fibre et, par continuité, dans le milieu environnant.

Cette étape étant franchie, il faut distinguer les deux types de montage envisagés : d'une part, dans le cas de la cellule photoacoustique, l'amplitude complexe de la pression doit être évaluée et dans le cas de l'effet mirage, le calcul porte sur l'angle de déviation du faisceau sonde.

Bien que théoriquement possible, un calcul complet du signal, pression ou déviation, est relativement lourd. Il apparaît donc pratique, en vue d'une mesure du coefficient d'absorption β de la fibre, d'étalonner le système en substituant à celle-ci un fil chauffant parcouru par un courant

alternatif pour lequel la source de chaleur créée par effet Joule est parfaitement connue. L'intensité du courant électrique dans le fil est alors ajustée de façon à obtenir la même pression ou la même déviation suivant la méthode mise en oeuvre.

Dans les expériences de photoacoustique, le fait d'enfermer la fibre dans une cellule ne devait pas rompre la symétrie de révolution. Le montage consiste donc à placer la fibre sur l'axe d'une cellule cylindrique fermée à ses deux extrémités par des fenêtres percées au diamètre de la fibre en leur centre. (figure II.1).

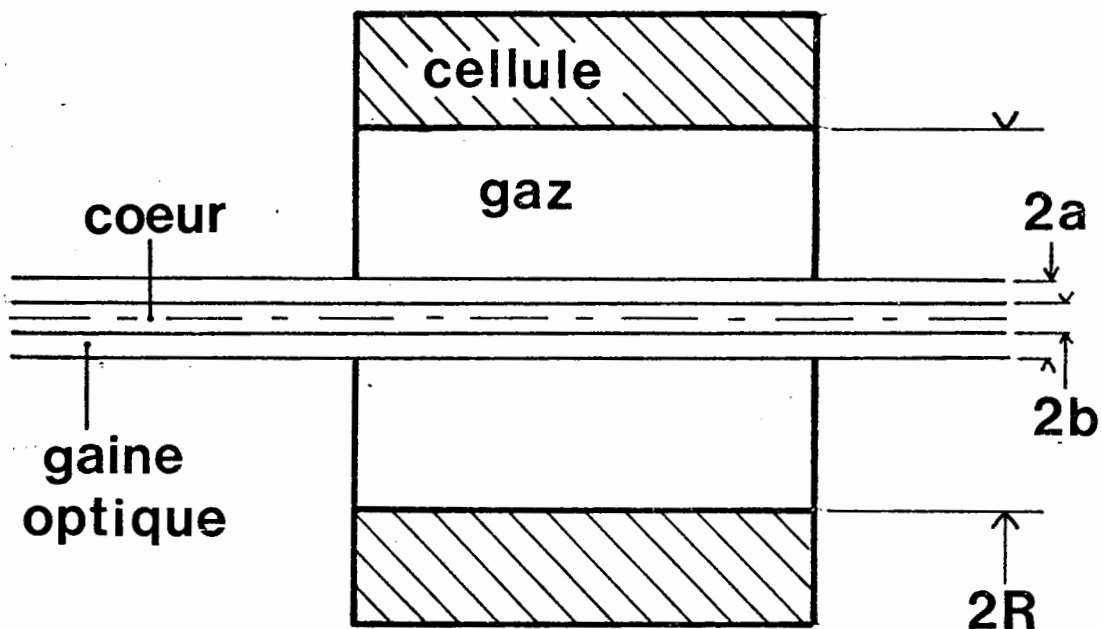


Figure II-1 : Schéma de la fibre dans la cellule

L'utilisation de "l'effet mirage" ne permet pas de préserver cette symétrie. Le faisceau sonde se propage parallèlement à la fibre tendue entre deux points. La direction du