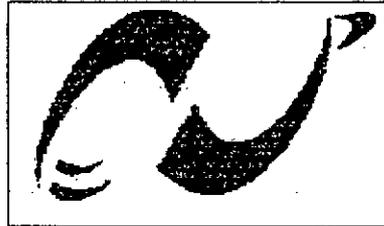


M0017/014

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

OPTION : TELECOMMUNICATIONS

MEMOIRE DE MAGISTER

PRESENTEE PAR : CHERBI (épouse BAZI)LYNDA

Ingénieur d'Etat en Electronique
(Option télécommunications, USTHB)

Thème

CONCEPTION ET REALISATION D'UN BANC DE TESTS AUTOMATISE
UTILISANT UN CAPTEUR ANGULAIRE A FIBRE OPTIQUE
APPLICATION A LA REEDUCATION FONCTIONNELLE

Soutenu publiquement le 21 / 10 / 2001 devant le jury composé de :

M ^r R. AKSAS	Professeur (ENP)
Président	
M ^r M. MEHENNI	Maître de conférence (ENP)
Rapporteur	
M ^r M. TRABELSI	Chargé de cours (ENP)
Examineur	
M ^r B. BOUSSEKSOU	Chargé de cours (ENP)
Examineur	
M ^r C. LARBES	Chargé de cours (ENP)
Examineur	

E.N.P. 10, Avenue Hassen Badi -El-Harrach- ALGER

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

OPTION : TELECOMMUNICATIONS

MEMOIRE DE MAGISTER

PRESENTEE PAR : CHERBI (épouse BAZI)LYNDA.

Ingénieur d'Etat en Electronique
(Option télécommunications, USTHB)

Thème

CONCEPTION ET REALISATION D'UN BANC DE TESTS AUTOMATISE
UTILISANT UN CAPTEUR ANGULAIRE A FIBRE OPTIQUE
APPLICATION A LA REEDUCATION FONCTIONNELLE

Soutenu publiquement le 21 /10/ 2001 devant le jury composé de :

M^r R. AKSAS
Président

Professeur (ENP)

M^r M. MEHENNI
Rapporteur

Maître de conférence (ENP)

M^r M. TRABELSI
Examineur

Chargé de cours (ENP)

M^r B. BOUSSEKSOU
Examineur

Chargé de cours (ENP)

M^r C. LARBES
Examineur

Chargé de cours (ENP)

E.N.P. 10, Avenue Hassen Badi -El-Harrach- ALGER

AVANT PROPOS

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire des techniques et systèmes digitaux du département d'électronique de l'Ecole Nationale Polytechnique, sous la direction de Mr. M.MEHENNI (Maître de conférences à l'E.N.P)

Je tiens à lui exprimer mes plus sincères remerciements pour m'avoir offert la possibilité d'explorer le domaine pratique de la fibre optique, pour ses précieux conseils et son aide sans réserve tout au long de ce travail.

Ma reconnaissance va également au Dr HABI, chargé de cours à l'INH pour sa disponibilité, son aide et ses conseils éclairés.

Je tiens à exprimer toute ma sympathie à tous mes ami(e)s pour toute l'aide et leur soutien tout au long de l'élaboration de ce projet.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation et l'amélioration de ce travail.

Dédicaces

A mon cher époux qui m'a toujours soutenue et encouragée dans mes projets

A mes chers parents pour leurs précieux conseils durant toutes ces années

A ma sœur Kahina et son époux et leur petite fille Yasmine

A toutes mes sœurs et ma chère grand mère

A ma belle mère et mon bon père et mes belles sœurs

A toute ma famille paternelle et maternelle.

A mes ami(e)s qui se reconnaîtront

A tous ceux qui partagent avec moi la passion de la science

Je dédie ce mémoire

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
---------------------	----------

CHAPITRE I: La fibre optique

I. Principes fondamentaux de la fibre optique	2
I.1. Définition de la fibre optique	2
I.2. Principe de Snell- Descartes	2
I.3. Angle de Brewster	3
I.4. Ouverture numérique	4
I.5. Existence des modes de propagation	6
II. Les différents types de fibres	7
III. L'atténuation dans une fibre optique	8
IV. Traction et pression dans une fibre optique	13
V. Les pertes par courbure dans une fibre optique	16
VI. Théorie des ondes guidées dans une fibre optique	21

CHAPITRE II: Le capteur à fibre optique et son environnement

I. Introduction	24
II. Définition d'un capteur à fibres optiques	24
III. Fonctions d'un capteur à fibre optique	25
IV. Capteur intrinsèque - capteur extrinsèque	25
V. Description du capteur réalisé	25
V.1. Choix de la fibre optique	26
V.2. Caractéristiques de la fibre utilisée	31
V.3. Les Connecteurs	33
V.4. Les modules optoélectroniques	35

CHAPITRE III: Le banc de test automatisé

I. Introduction	43
II. Description du banc de tests réalisé	43
III. Description du système mécanique	45
IV. Le capteur à fibre optique et ses éléments optoélectroniques	46
V. Le moteur pas à pas	46
V.1. Principe du moteur pas à pas	46
V.2. Moteur pas à pas utilisé	47
V.3. Caractéristiques statiques et dynamiques	48

V.4. Alimentation des moteurs pas à pas	49
V.5. Caractéristiques du moteur utilisé	50
V.6. Organigramme de commande du moteur	51
VI. Module de puissance pour le moteur	51
VII. Microcontrôleur 68HC11	53
VII.1. Intérêt du microcontrôleur	54
VII.2. La carte EVB	55
VII.3. La numérisation	56
VII.4. Potentiomètre de recopie	57
VIII. Automatisation du banc de test	58
VIII.1. Programmation	58
VIII.2. Réception	59
VIII.3. Organigramme du programme principal	60
CHAPITRE IV: Résultats expérimentaux et commentaires	
I. Atténuation dans la fibre optique courbée	64
I.1. Courbe d'étalonnage du potentiomètre de recopie	64
I.2. Tension détectée à la sortie du capteur à fibre optique	65
II. Influence du placement de la courbure par rapport à l'émission et la réception sur l'atténuation	67
II.1. Longueur émission - courbure	67
II.2. Longueur réception - courbure	68
II.3. Conclusion sur l'influence longueur émission- courbure , longueur réception- courbure sur l'atténuation	69
III. Mode flexion - extension	69
> IV. Fatigue de la fibre	71
CONCLUSION	73
BIBLIOGRAPHIE	74
ANNEXES	76

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Nous avons exploité dans cette recherche l'atténuation de la lumière par courbure se propageant dans un guide d'onde lumineuse qui est la fibre optique constituant le capteur angulaire.

Un banc de tests automatisé est réalisé pour étudier le comportement de l'onde lumineuse guidée par la fibre optique posée sur une articulation simulant le mouvement flexion-extension d'un membre du corps humain: le bras par exemple. Le capteur à fibre optique réalisé mesure l'atténuation de puissance (ou de tension) relevée en bout de guide, provoquée par la courbure de la fibre optique.

La réalisation du banc de tests est obtenue par un système mécanique simulant l'articulation d'un bras humain. Un moteur pas à pas, piloté par un micro-ordinateur de type PC via une unité de puissance, fixe le nombre de pas c'est à dire l'angle à imposer à l'articulation. Après une certaine temporisation, la valeur de la puissance reçue est relevée et transférée vers le PC pour un traitement ultérieur.

L'automatisation du banc de tests tourne autour du microcontrôleur 68HC11 qui assure la commande du moteur pas à pas, l'acquisition de la réponse du capteur et le transfert vers le PC. L'application de ce travail peut se faire en rééducation articulaire puisque certaines pathologies fonctionnelles requièrent cette spécification qui demande de quantifier la cinématique angulaire des mouvements imposés au patient. Après avoir effectué les différents tests sur le capteur réalisé pour une articulation simulée, on peut l'appliquer directement sur le membre du patient pour détecter la cinématique angulaire effectuée par ce dernier et enregistrer les résultats obtenus.

Suivant la puissance reçue, fonction de l'angle de courbure, on déduira le taux de récupération de l'articulation chez le patient, par exemple l'angle de flexion de l'avant bras.

CHAPITRE I

LA FIBRE OPTIQUE

I. Principes fondamentaux de la fibre optique

Le capteur réalisé dans ce travail utilise un élément très important qu'est la fibre optique. Afin de comprendre le choix de la fibre optique utilisée et les limites de son utilisation, nous allons voir ses caractéristiques principales et le principe de propagation de la lumière dans ce type de guide d'onde [1, 2, 3, 4,5,6].

I.1. Définition de la fibre optique

La fibre optique est un guide de lumière, régi par la loi de Snell-Descartes, constitué d'un cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique d'indice de réfraction plus faible.

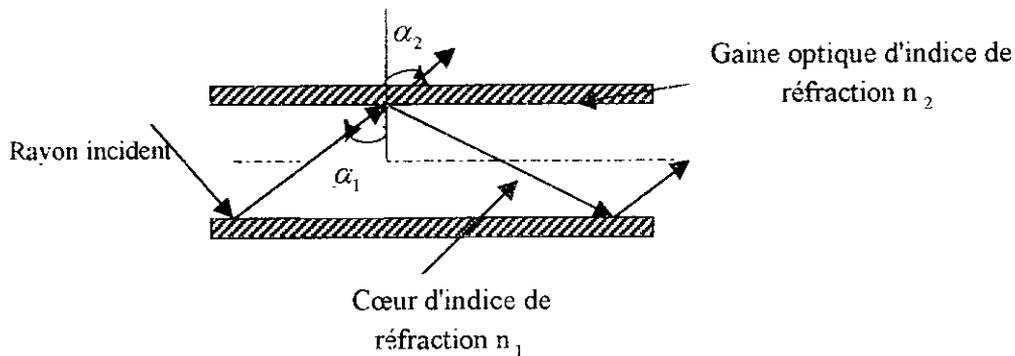


Figure 1.1: schéma d'une fibre optique

I.2. Principe de Snell-Descartes

La loi de Snell-Descartes caractérise le passage d'une onde d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 sous un angle d'incidence α_1 :

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (1)$$

où α_2 est l'angle du rayon réfracté dans le milieu 2

n_i : indice de réfraction du milieu i qui est défini par la relation suivante:

$$n_i = \frac{C}{V_i} \quad (2)$$

C : vitesse de la lumière dans le vide en m /s

V_i : vitesse de la lumière dans le milieu i en m /s; le milieu i caractérise les deux milieux cœur et gaine optique.

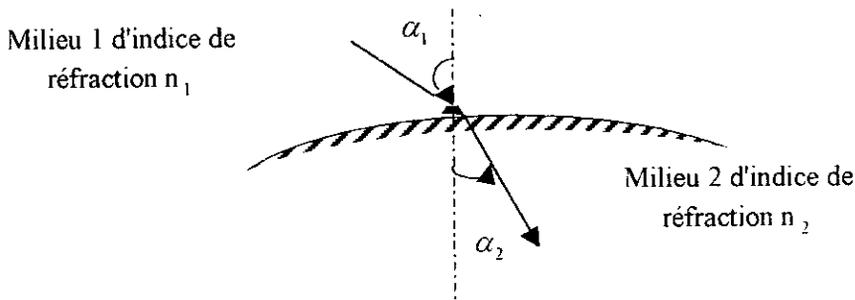


Figure 1.2: Principe de Snell -Descartes

1.3. Angle de Brewster

Il existe une valeur limite de l'angle d'incidence pour lequel l'onde se réfléchit à l'interface cœur -gaine, qu'est appelé angle critique ou angle de Brewster.

$$\text{Pour } \alpha_2 = 90^\circ, \text{ on a } \sin \alpha_{1c} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Avec $n_2 < n_1$; ce qui impose au deuxième milieu d'avoir un indice de réfraction inférieur à celui du premier.

Si un rayon lumineux passe sous des angles d'incidence croissants, d'un milieu plus dense (avec un indice de réfraction n_1) dans un milieu moins dense (avec un indice de réfraction n_2), il arrive pour un angle d'incidence α_c que l'angle de réfraction soit $\beta_o = 90^\circ$. Dans ce cas, le rayon lumineux se propage parallèlement à l'interface des deux milieux. Pour tous les rayons lumineux ayant un angle d'incidence α supérieur à l'angle critique α_c , Il n'y a plus de rayons réfractés dans les milieux moins denses.

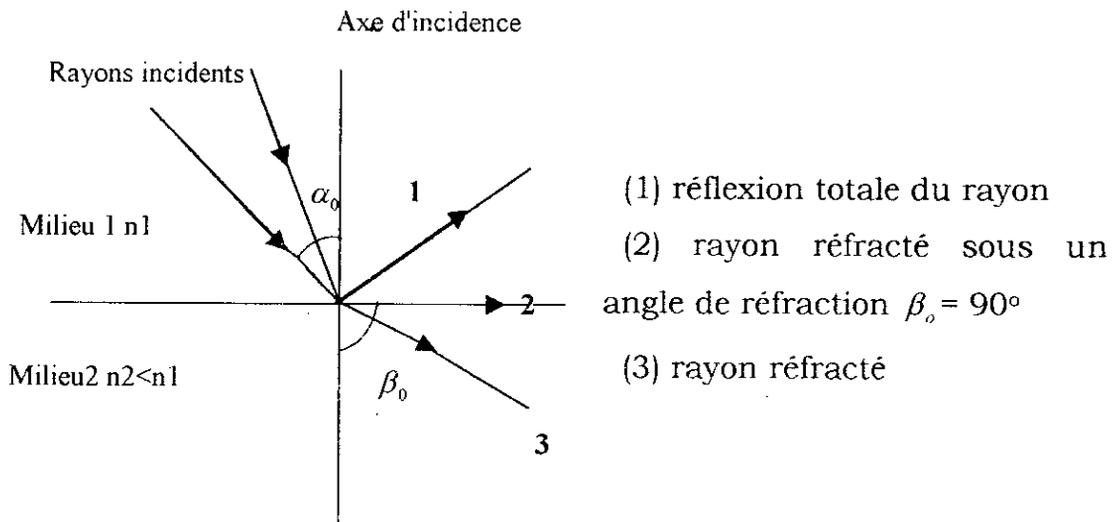


Figure 1.3: Réflexion totale de lumière

A l'interface des deux milieux, ces rayons lumineux sont réverbérés dans les milieux plus denses, ce phénomène est appelé réflexion totale des rayons lumineux .

La réflexion totale ne peut avoir lieu que s'il y a transition d'un rayon lumineux du milieu plus dense au milieu moins dense; l'inverse n'est pas possible.

I.4.L'ouverture numérique

L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum que doit avoir le faisceau incident pour assurer sa propagation dans la fibre optique.

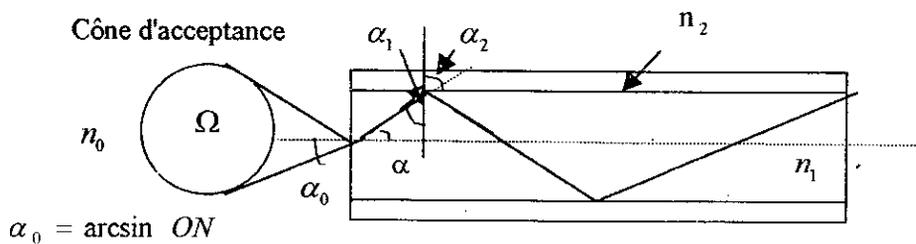


Figure 1.4: L'ouverture numérique d'une fibre optique à saut d'indice

D'après la figure 1.4 on a :

$$\begin{aligned} n_0 \sin \alpha_0 &= n_1 \sin \alpha \\ n_1 \sin \alpha_1 &= n_2 \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (4)$$

si $\alpha_2 \leq 90^\circ$ on a une réflexion totale, en tenant compte de cette condition on aura :

$$\Rightarrow \sin(\alpha_1) = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 = \frac{n_2}{\sin \alpha_1} \quad (5)$$

Comme $\alpha_1 = 90 - \alpha \Rightarrow \sin \alpha_1 = \cos \alpha$

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_1}{n_0} \sin \alpha \quad (6)$$

$$\sin \alpha_0 = \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right)^{1/2} \frac{n_1}{n_0} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_0} \quad (7)$$

On définit l'ouverture numérique (ON) par :

$$ON = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_0} \quad (8)$$

On constate que plus l'ouverture numérique est grande plus la puissance lumineuse injectée dans la fibre optique est importante.

L'angle solide formé par le cône d'acceptance est défini par la relation suivante :

$$\Omega_{\alpha_0} = 2\pi(1 - \cos \alpha_0) \quad (9)$$

1.5. Existence des modes de propagation

On peut analyser la nature de propagation de lumière selon deux théories: la géométrique et l'ondulatoire [1,2,3,7]. La première nous montre que la lumière se propage dans une fibre optique par une succession de réflexions totales internes, par contre la deuxième nous montre qu'il y a à l'intérieur du guide d'onde des interférences entre les diverses ondes. Pour qu'il y ait propagation effective de l'énergie, ces interférences doivent être constructives, c'est à dire ne pas conduire à une annulation du champ électrique ou magnétique et donc de l'énergie, mais cette condition entraîne que certaines directions de propagation qui étaient permises par l'optique géométrique ne peuvent pas en fait avoir lieu. Etant donné que toutes les structures physiques sont quantifiées, la propagation de la lumière dans une tige diélectrique cylindrique représentant la fibre optique est donc quantifiée, elle se traduit par une équation de dispersion, dont toutes les solutions ne sont pas acceptables. L'analyse introduit des formes et des écritures précises caractérisées chacune par deux nombres entiers définissant la structure de la fonction d'onde qui est une des solutions du problème.

Ces fonctions s'appellent des modes en électromagnétisme. Ces modes guidés dans une fibre optique sont en nombre fini qui est approximativement [3] :

$$N = 2\pi \frac{1}{2} \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \quad (10)$$

Où F est la fréquence normalisée par rapport à la fréquence de travail, c'est un paramètre qui définit les conditions de propagation de la lumière dans la tige.

$$F = 2\pi n_1 \sqrt{2\Delta} \frac{a}{\lambda} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} K_0 a \quad (11)$$

λ : longueur d'onde dans l'espace libre.

2 a est le diamètre du cœur.

avec $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ et $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$.

II. les différents types de fibres

Le guidage de la lumière impose une modification de sa vitesse en fonction d'une coordonnée transverse du guide. On peut réaliser une franche discontinuité physique entre le cœur au centre du cylindre et la gaine à l'extérieur pour obtenir ce qu'on appelle une fibre à saut d'indice. Comme on peut aussi réaliser une variation progressive de l'indice entre le centre du cœur et la gaine pour avoir une fibre à graduation d'indice.

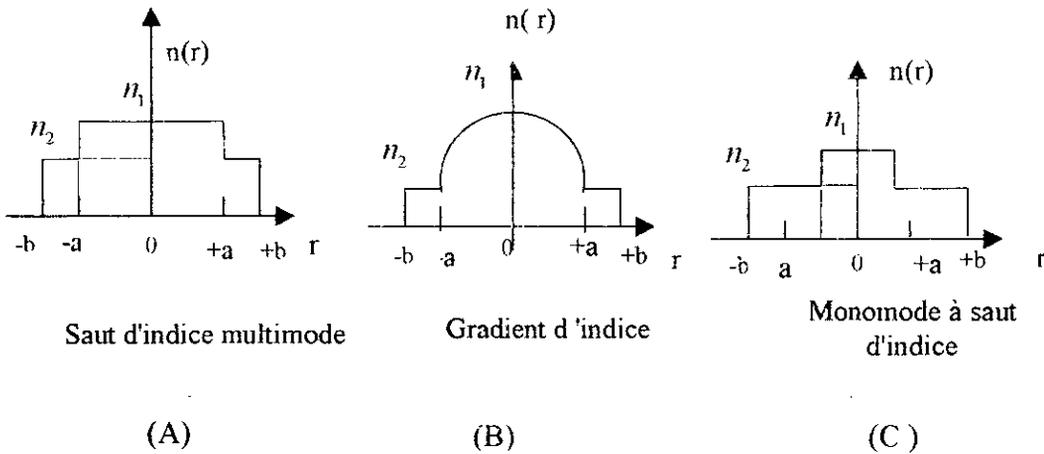


Figure 1.5: profils d'indice des fibres optiques

La figure 1.5 schématise les trois types des fibres optiques où (A) représente la section droite d'une fibre à saut d'indice de rayon du cœur 'a' et celui de la gaine est 'b', une telle fibre est multimode. (C) représente la section droite d'une fibre de même type dont le rayon du cœur est plus petit pour que le guide obtenu soit monomode. (B) représente la section droite d'une fibre optique à gradient d'indice où l'indice de réfraction n_1 du cœur diminue de la valeur n_1 à n_2 lorsque la distance r à l'axe de révolution varie de 0 à a ; une telle fibre est multimode.

Cas particulier

D. Marcuse (1981) a montré que le mode de propagation est unique si la variable de la fonction de Bessel J_0 solution de l'équation de propagation est inférieure à 2.405 (premier zéro de la fonction). La fibre aura un comportement unimodal si $F < F_c = 2.405$ sachant que F est la fréquence normalisée; ce qui conduit à définir un diamètre du cœur maximal par cette relation:

$$a_{\max} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2.405}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (12)$$

Les cœurs des fibres monomodes sont extrêmement petits. Notons à titre de comparaison que les fibres multimodes possèdent des diamètres plus grands que ceux des monomodes, ce qui facilite leur connectique.

III. L'atténuation dans une fibre optique

Dans l'application du capteur réalisé, l'atténuation est une caractéristique qui joue un rôle important dans la mesure désirée. Il existe dans une fibre optique de nombreuses causes conduisant à l'affaiblissement d'un signal lors de la propagation [1,7]. On doit distinguer les causes fondamentales dues à la nature des matériaux entrant dans la composition du guide et les causes secondaires produites par des imperfections de la technologie de fabrication qui sont par nature réductibles. Les différentes causes d'atténuation peuvent être:

III.1. Diffusion de Rayleigh

Elle est produite par des non uniformités à l'échelle microscopique de la densité de la matière et donc de l'indice de réfraction constituant la fibre. La loi qui régit cet effet montre que cette diffusion décroît en $\frac{1}{\lambda^4}$ lorsque λ croît; dans les fibres récentes, cet effet représente dans les fenêtres des transmissions environ 90% de l'atténuation totale.

III.2. L'absorption ultraviolette

Elle est due aux transitions électroniques de la matière, elle est quasiment négligeable dans le domaine visible, c'est en effet la queue de la bande d'absorption située avant $0.2 \mu\text{m}$ qui y subsiste.

III.3. L'absorption infrarouge

Elle est due aux modes de vibration du réseau et plus précisément aux harmoniques de ces modes dont la queue des bandes s'étale jusqu'à $16 \mu\text{m}$ dans le cas de la silice pure.

Les mécanismes à l'origine de l'atténuation réductible des fibres optiques sont : l'absorption produite par les impuretés chimiques difficiles à éliminer et celles créées par les micros-courbures dues à des imperfections microscopiques de la géométrie du guide (défauts de symétrie, fluctuations du rayon de cœur ou de l'interface cœur - gaine) attribuées aux erreurs de fabrication.

III.4. Pertes par absorption

Il y a deux sortes d'absorption : absorption intrinsèque et absorption extrinsèque. L'absorption intrinsèque dépend de deux facteurs : l'un se produit quand un photon induit une transition électronique entre des bandes d'énergie dans le solide considéré, le deuxième est lié au fait que les différents constituants du verre ou du polymère possèdent des fréquences propres. Par exemple, une liaison Si-O entre un atome de silicium et un atome d'oxygène donne une vibration thermique constante. Un dipôle électrique associé à cette liaison peut être excité par le champ électrique d'une onde électromagnétique, pour cette excitation l'onde subit une perte d'énergie ce qu'on appelle absorption. Cependant l'absorption extrinsèque est due à des impuretés dont les ions de transition et les ions OH^- provenant des traces d'eau et se trouvant dans la fibre optique.

Le coefficient d'absorption dû à la matière de transition est exprimé par la relation suivante [7]:

$$\alpha = \sum \text{ions}_M C_M \left(\frac{C_M^{n^+}}{C_M} \right) \epsilon_M^{n^+} \quad (13)$$

avec C_M : concentration de l'impureté M,

$\frac{C_M^{n^+}}{C_M}$: concentration relative de l'état d'oxygénation n^+ de l'impureté M

dans la matière considérée,

$\epsilon_M^{n^+}$ coefficient d'absorption de l'impureté M dans l'état d'oxygénation n^+ .

En pratique, toutes ces atténuations (fig.1.6) se combinent et produisent des pertes sur l'énergie transportée par l'onde guidée, il est donc important de quantifier cet effet de façon simple pour comparer les différentes fibres optiques. Les sources utilisées possédant une largeur spectrale relativement faible, l'atténuation globale dans ces fibres peut être considérée comme constante sur la bande spectrale .

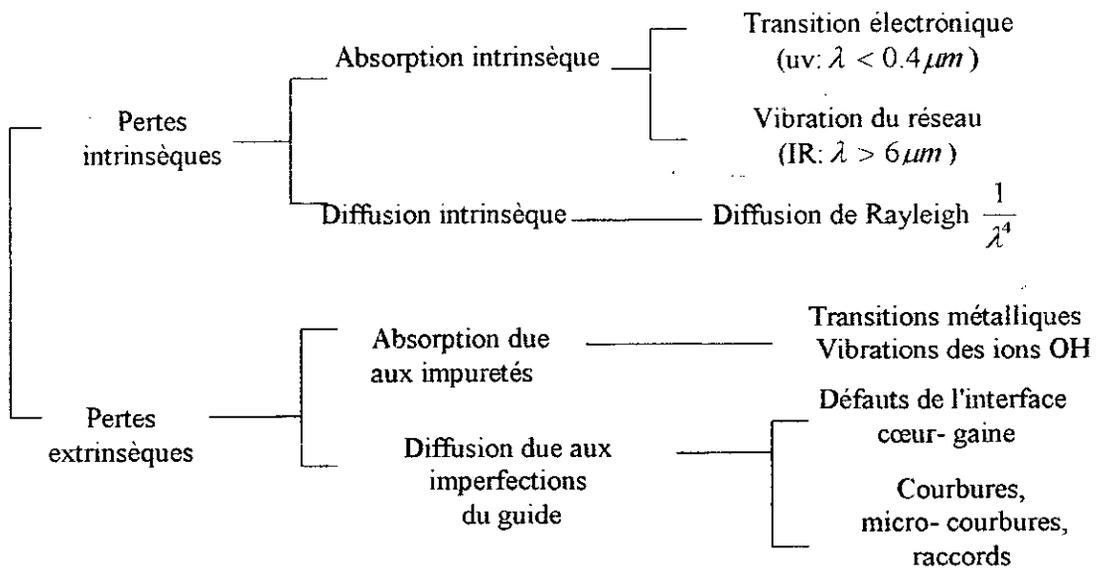


Figure 1.6 : différents types de pertes dans une fibre optique

III.5. Perte par couplage des modes

En injectant la lumière dans une fibre optique suivant une direction déterminée, on introduit dans la fibre des modes bien définis qu'on peut trouver seulement en bout de fibre dans le cas d'une fibre idéale. Cependant, en pratique la fibre présente un certain nombre de défauts qui entraînent la création d'un mélange entre les angles ou directions de propagation; c'est à ce moment que le couplage des modes a lieu et qui peut être créé par des micro-courbures ou par défauts d'interfaces cœur - gaine ou même par la diffusion.

III.5.1. La diffusion

Elle est créée par certains défauts dans le cœur de telle sorte que quand un mode arrive sur un centre de diffusion, il est absorbé et réémis à la même longueur d'onde mais dans des directions différentes de la direction d'arrivée; le mode initial est alors transformé en d'autres modes. Etant donné que certaines directions ne répondent plus aux conditions de réflexion totale, certains modes sont alors perdus.

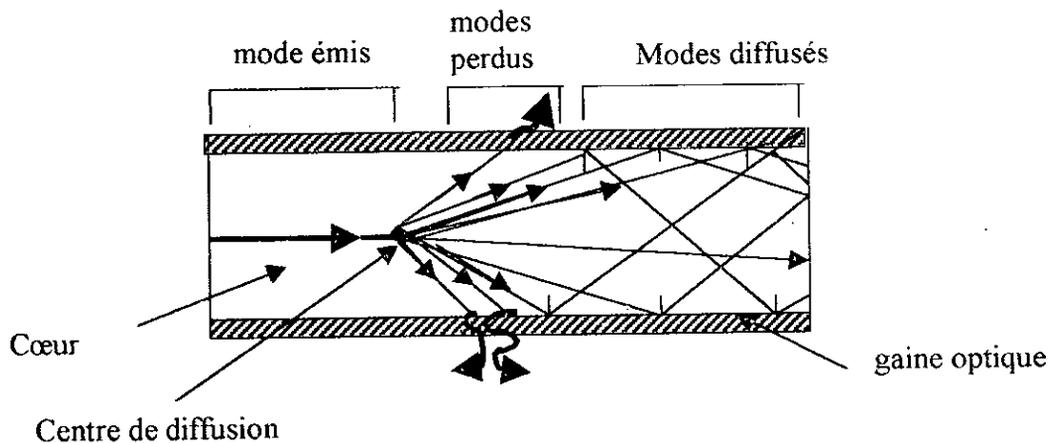


Figure 1.7: couplage de mode par un centre de diffusion

III.5.2. Equilibre modal

La modification de la distribution des modes à la sortie de la fibre par rapport à l'entrée est d'autant plus grande que le nombre de défauts entraînant le couplage est important. Il existe une certaine distance dans la fibre pour laquelle cette distribution ne dépendra plus des conditions d'injection de lumière mais de la nature de la fibre; on dit alors que la distance d'équilibre L_{eq} est atteinte. Si la fibre présente beaucoup de défauts, le couplage des modes se réalisera sur une courte distance et la distance d'équilibre peut varier de quelques mètres à quelques kilomètres selon la qualité de la fibre. Pour notre application du capteur angulaire réalisé, la longueur de fibre constituant ce capteur est largement inférieure à la longueur d'équilibre modal qui va de 40 à 80 mètres selon la fibre utilisée. En effet, pour atteindre l'équilibre modal il existe des mélangeurs d'ondes qui forcent les différents modes à leur position définitive. Cependant dans notre application ne pas atteindre l'équilibre modal ne porte pas préjudice au bon fonctionnement de notre capteur utilisant une petite longueur.

III.6. Conclusion sur l'atténuation dans une fibre optique

Après avoir analysé les différents facteurs qui peuvent entraîner des pertes optiques dans une fibre optique, on peut quantifier communément l'atténuation d'une fibre optique à l'aide du nombre définissant la perte par unité de longueur d'onde; on définit généralement le paramètre Γ (dB/Km) comme étant l'atténuation en amplitude du champ électrique et l'atténuation en puissance est donc 2Γ .

La loi de Beer-Lambert reliant la puissance incidente $p(0)$ à la puissance de sortie $p(L)$ après un parcours guidé de longueur L s'écrit:

$$P(L)=P(0) \exp (-2\Gamma L) \quad (14)$$

L'atténuation est définie par la relation:

$$a= 10\log(p(L)/p(0)) \quad (15)$$

En remplaçant $p(L)$ par son expression, nous obtenons:

$$a = 10 \log(\exp(-2\Gamma L)) = -10(2\Gamma L) \log(e) \quad (16)$$

$$\text{et } \frac{|a|}{L} = 4.34(2\Gamma) \doteq \Gamma_T \quad (17)$$

Cette équation relie 2Γ et Γ_T l'atténuation en puissance dont l'unité est le dB/Km. Cette atténuation est la somme des différents paramètres d'atténuation:

$$\Gamma_T = \Gamma_{diffusion} + \Gamma_{absorption} = \Gamma_{courbures} \quad (18)$$

IV. Traction et pression dans une fibre optique

L'atténuation de lumière dans une fibre optique est non seulement due aux défauts de sa structure mais il existe aussi des facteurs extérieurs qui peuvent influencer la propagation de la lumière dans un guide optique[7].

IV.1. Traction

La courbure cause non seulement l'atténuation de lumière, mais aussi des tensions mécaniques supplémentaires à la surface de la fibre optique. Cette surface peut être soit en traction ou bien en compression par rapport à son axe et cela selon sa disposition par rapport au centre de courbure .

Quand une fibre optique est soumise à une force F , la contrainte σ est exprimée par la relation suivante:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (19)$$

σ est exprimée en pascal

S est la surface d'application de la force F .

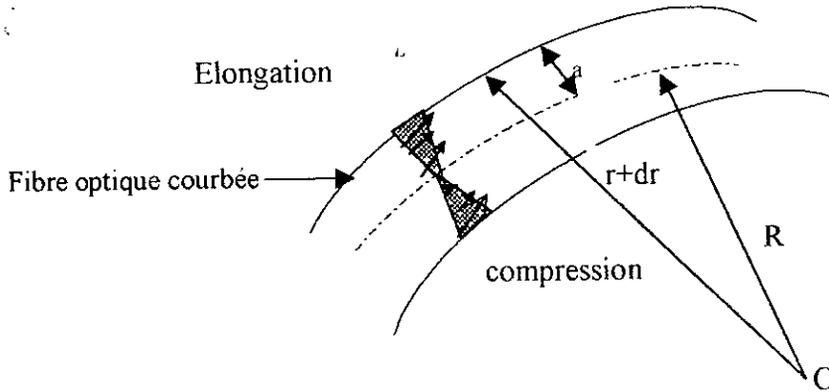


Figure 1.8: Allongement en fonction de l'angle de courbure

Quand la fibre subit une dilatation ε (élongation) sous l'effet de la contrainte σ , on a:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l_0} \quad (20)$$

où dl : est la dilatation linéique

l_0 : est la longueur initiale de la fibre.

On peut aussi constater l'effet de dilatation et de compression Figure(1.8).

Avec :

$$dl = \Delta r \Theta \quad \text{et} \quad l_0 = R \Theta \quad (21)$$

Avec $0 < \Theta < 180^\circ$

Dans notre cas, $\Delta r = a = 0.5 \text{ mm}$: est constant puisque c'est le rayon de la fibre, R est le rayon de courbure.

IV.2.Pression

Quand on applique une pression sur la surface plane élastique possédant une certaine rigidité, les forces de contact entre la fibre et la surface ne sont pas uniformes. La fibre subira une courbure sous l'effet de cette force appliquée $F(z)$ par unité de longueur.

Le déplacement latéral $x(z)$ de l'axe de la fibre est relié à $F(z)$ par la relation suivante [4]:

$$\frac{d^4 \chi}{dz^4} = \frac{F(z)}{H} \quad (22)$$

Où $H = EI$ est la raideur de la fibre,
 E : est le module d'YOUNG,
 I : est le moment d'inertie.

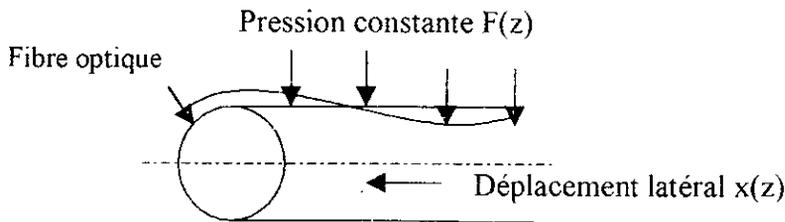


Figure 1.9: Déformation de la fibre en fonction de la pression

Vu qu'il y a un déplacement de l'axe latéral $x(z)$ qui est dû à l'application de la pression, il y a une variation de propagation de la lumière à l'intérieur du guide d'onde. Une pression de 1.5 bars peut entraîner une atténuation de 5 à 15 dB et cela dépend de la rigidité de la fibre sur laquelle est appliquée la pression $f(z)$.

IV.3. Conclusion sur l'influence de traction et pression sur le positionnement de la fibre

Exercer une traction sur une fibre lors de sa courbure est délicat au même titre que la pression dans l'application du capteur réalisé; cela dépendra de la fixation et du guidage du capteur sur l'élément dont on veut connaître sa cinématique angulaire. Pour éviter ce type de problème, il ne faut pas dépasser le rayon de courbure minimal donné dans le cahier des charges de la fibre optique constituant le capteur (voir **l'annexe A**). En ce qui concerne le problème de pression, il faut que l'articulation serve seulement comme guidage pour qu'elle n'exerce aucune pression sur le capteur réalisé.

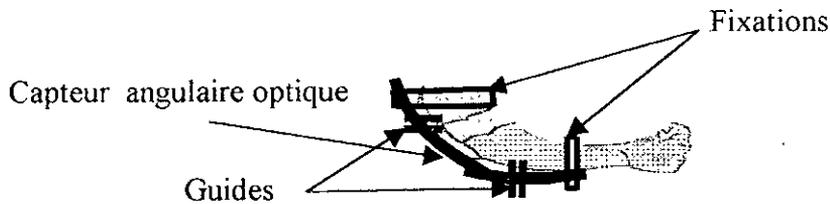


Figure I.10: Exemple de fixation du capteur sur un bras

V. Les pertes par courbure dans une fibre optique

L'atténuation par courbure a fait l'objet de plusieurs recherches [9,10] qui ont été abordées par les théories de l'optique ondulatoire et géométrique. Ces recherches se sont intéressées au calcul du coefficient d'atténuation par courbure qui est défini de la manière suivante:

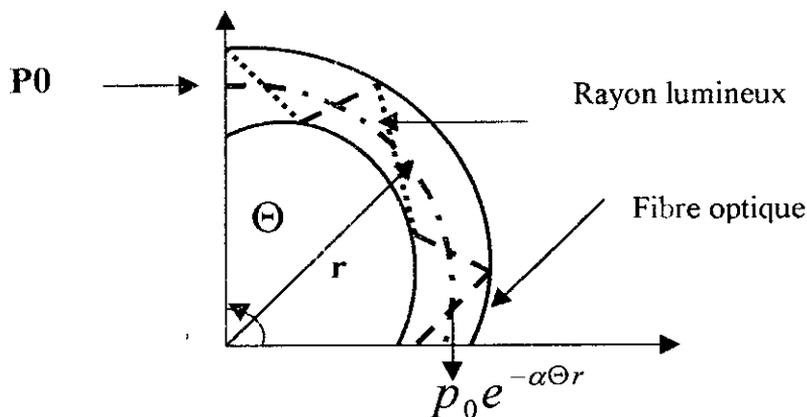


Figure I.11: Atténuation dans une fibre optique courbée

La puissance P_0 qui entre dans la fibre optique courbée en ressort atténuée. Le coefficient α d'atténuation et la longueur courbée (Θr) interviennent dans une exponentielle décroissante.

V.1. L'optique ondulatoire

Dans l'optique ondulatoire on trouve plusieurs théories comme celle de MARCUSE[22] ou comme celle de KAUFMAN et TERRAS[23] où ils ont dérivé la formule des pertes par courbure pour des fibres optiques.

Les formules trouvées dans ces théories pour calculer les pertes par courbure sont nombreuses, on va présenter quelques unes:

Formule de Marcuse

Il a exprimé la perte de courbure avec la relation suivante [22]:

$$2\alpha = \frac{\sqrt{\pi} K^2 \exp\left[\frac{2 R \gamma^3}{3 B_g^2}\right]}{\ell_v^{3/2} V^2 \sqrt{R} k_{v-1}(\gamma a) K_{v+1}(\gamma a)} \quad (23)$$

Où $\gamma = (B_g^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = w \sqrt{\zeta_0 \mu_0}$$

$$K = (n_1^2 k^2 - B_g^2)^{1/2} \quad \mu = \beta_g R$$

ν : ordre de fonction de HANKEL de 1^{iere} espère,

k : constante de propagation de l'espace libre,

B_g : constante de propagation du mode guidé,

R : rayon de courbure,

$$V = K a^2 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2},$$

a : rayon de la fibre,

n_1 : indice de réfraction du cœur,

n_2 : indice de réfraction de la gaine,

$$e_\nu = \begin{cases} 2 & u = 0 \\ 1 & u \neq 0 \end{cases} \text{ avec la représentation de HANKEL modifiée [22].}$$

$$k_{\nu-k-1/2}(\gamma a) = \left(\frac{\pi}{2\alpha\gamma}\right)^{1/2} e^{-\alpha\gamma} \sum_{\mu=0}^{\mu=\nu-k-1} \frac{(\nu-k+\mu-1)!}{\mu!(\nu-k-\mu-1)! (\alpha\gamma)^\mu} \quad (24)$$

La formule de KAUFMAN et TERRAS

KAUFMAN et TERRAS ont développé un système d'intégrales qui permet de calculer le coefficient d'atténuation des pertes pour les modes d'ordre élevé.

La fraction de puissance q perdue dans ce cas par rapport à la puissance initiale P_0 injectée dans la fibre est:

$$q = 1 - 1/P_0 \sum p_{vp} \exp(-2\alpha_{vp}d) \quad (25)$$

P_{vp} puissance initiale dans un mode d'ordre (v, p) ,

d : distance courbée

$$\text{et} \quad 2\alpha = \frac{2K^2 \exp(-2\gamma a)}{\ell v \sqrt{\pi} \gamma^{5/2} R^{3/2} V^2 |H_{\mu}^{(2)}(\zeta)|^2 K_{v-1}(\gamma a) K_{v+1}(\gamma a)} \quad (26)$$

avec $\zeta = n_2 K(R+a)$

La quantité $H_{\mu}^{(2)}$ est la fonction de Hankel de seconde espèce.

Toutes ces théories longues et fastidieuses restent des approches car elles se basent sur des approximations et des hypothèses.

V.2. Optique géométrique

De nombreuses recherches spécialisées en optique ont été faites en s'intéressant au trajet du rayon lumineux dans une fibre optique pour développer des formules itératives. SNYDER[25] s'est inspiré des lois de Fresnel et des équations de Maxwell qui indiquent que tous les rayons se réfléchissant sur une surface courbée entre deux diélectriques ne peuvent être réfléchis que partiellement, ces pertes à l'interface sont évaluées à partir du coefficient de transmission de puissance généralisé qui est :

$$T = 1 - \frac{\text{puissance de rayon réfléchi}}{\text{puissance du rayon incident}} \quad (27)$$

$$T = \frac{1}{\pi \Theta_c} \left(\frac{2}{K \rho} \right)^{1/3} \left| \text{Ai} \left(\Delta \exp \left(\frac{2\pi i}{3} \right) \right) \right|^{-2} \quad (28)$$

$$\text{Avec } \Delta = \left(\frac{K \rho}{2} \right)^{2/3} (\Theta_c^2 - \Theta_i^2)$$

Θ_c est le complément de l'angle critique: $\Theta_c^2 = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2$,

n_1 et n_2 : indices de réfraction du cœur et de la gaine optique,

$K = \frac{2\pi m_1}{\lambda}$ avec λ la longueur d'onde,

ρ : coefficient de réflexion de Fresnel,

$\Theta_i = \frac{\pi}{2} - \Theta_N$, avec Θ_N est l'angle que fait le rayon avec la normale,

A_i est un coefficient d'une fonction nommée Airy, développée par SNYDER

R est le rayon de courbure dans le plan d'incidence.

V.3. Effet de la courbure

En pratique, l'effet d'une courbure locale est négligeable lorsque le rayon de courbure R est grand devant un rayon de courbure critique R_c , donné empiriquement [4] par :

$$R_c = \frac{2a n_1^2}{ON^2} \quad \text{pour les fibres multimodes} \quad (29)$$

$$R_c = 20 \frac{\lambda}{(n_1 - n_2)^{3/2}} \left(2,75 - \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad \text{pour les fibres monomodes} \quad (30)$$

Avec $\lambda_c = 4a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$: longueur d'onde de coupure

Lorsque R n'est pas trop proche de R_c , la perte transitoire due à la courbure dans une fibre multimode est exprimée avec la relation suivante:

$$\alpha_c (dB) = 10 \log \left[\frac{R}{R - R_c} \right] \quad (31)$$

Dans les deux cas, on remarque qu'une forte différence d'indice permet d'être moins sensible aux courbures ainsi qu'aux microcourbures, c'est aussi le cas d'un petit diamètre du cœur.

V.3.1 Analyse des pertes par courbure et la formule théorique choisie

La recherche bibliographique effectuée a montré que la théorie sur laquelle se base notre capteur a été étudiée par plusieurs chercheurs. Pour bien comprendre ce phénomène on exposera les différentes causes ensuite on présentera la formule qu'on a retenue pour calculer le coefficient d'atténuation.

V.3.1.1. Causes des pertes par courbure

A l'entrée d'une section courbée, il y a augmentation de l'angle Θ que le rayon fait avec l'interface cœur-gaine, les modes d'ordre élevés sont alors réfractés. Les modes d'ordre plus faible voient leur atténuation augmenter par couplage avec les modes réfractés. Dans le cas des fibres monomodes, le mode fondamental devient à fuite.

V.3.1.2. Formule théorique choisie

Dans la partie courbée, les rayons du cœur qui sont au voisinage de l'incidence critique α_c sont partiellement réfractés et perdent ainsi une partie de l'énergie guidée.

La fraction de puissance perdue peut être calculée en utilisant le modèle développé par Halley [1]:

$$P(\ell) = p_0 e^{-\alpha \ell} \quad (32)$$

P_0 : puissance initiale dans la fibre rectiligne

α : Coefficient d'atténuation par courbure

ℓ : longueur courbée

Sur la longueur du trajet courbé, l'affaiblissement linéique α augmente de $\Delta\alpha$ (dB/ km) qui est calculable par l'expression suivante:

$$\Delta\alpha = 10 \log \left(1 - \frac{2an_1^2}{ON^2 r} \right) \quad (33)$$

Où a : rayon de la fibre,

r : rayon de courbure,

ON : ouverture numérique,

n_1 : indice de réfraction du cœur.

Pratiquement pour $r \geq 1\text{cm}$ la perte de courbure est très faible.

La formule(33) est plus simple et très exploitable, elle permet de déterminer l'influence des différents paramètres constitutifs de la fibre optique lors de la courbure. L'atténuation sera d'autant plus grande que l'indice de réfraction et le diamètre de la fibre optique seront grands; par contre l'ouverture numérique doit être choisie relativement faible. En toute logique plus le rayon de courbure est faible, plus l'atténuation par courbure sera importante.

VI. Théorie des ondes guidées dans une fibre optique

Pour connaître entièrement les champs à l'intérieur de la fibre; on a utilisé les équations de Maxwell du système d'équations(34) caractérisant la propagation des ondes électromagnétiques dans un diélectrique m qui peut être soit le cœur ou la gaine optique [4].

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla (\varepsilon_m \vec{E}) = 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \varepsilon_m \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \vec{H} = 0 \end{array} \right. \quad (34)$$

E : champ électrique (v/m),

H : champ magnétique (A/m),

\mathcal{E}_m : permittivité électrique, $\mathcal{E}_m = \epsilon_0 n_m^2$ (F/m),

μ_m : perméabilité magnétique, $\mu_m = \mu_0$ (H/m).

Pour résoudre ces équations, on utilise un système de coordonnées cylindriques (r, φ, z) bien adapté à la symétrie de la fibre. Si l'onde lumineuse se propage selon l'axe (oz) , les composantes des champs sont alors données par:

$$\begin{cases} \vec{E} = (E_r, E_\varphi, E_z) \\ \vec{H} = (H_r, H_\varphi, H_z) \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} E_i = \exp[i(\omega t - \beta Z)] E_i(r, \varphi) \\ H_i = \exp[i(\omega t - \beta Z)] H_i(r, \varphi) \end{cases}$$

A l'aide des deux premières relations de MAXWELL, on obtient les systèmes suivants:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - i\beta E_\varphi = -\mu_0 i\omega H_r \\ \frac{\partial E_z}{\partial r} + i\beta E_r = \mu_0 i\omega H_\varphi \\ \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} = -\mu_0 i\omega H_z \end{cases} \quad (35)$$

$$\text{et } \begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - +i\beta H_\varphi = i\omega \epsilon_m E_r \\ -\frac{\partial H_z}{\partial r} - i\beta H_r = i\omega \epsilon_m E_\varphi \\ \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = i\omega \epsilon_m E_z \end{cases} \quad (36)$$

Les systèmes (35,36) permettent d'écrire chaque composante en fonction des composantes longitudinales E_z et H_z ou de leurs dérivées:

$$\begin{cases} E_r = -i\mu_0 w \left[\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} + \frac{\beta}{\mu_0 w} \frac{\partial E_z}{\partial r} \right] (\varepsilon_m \mu_0 w^2 - \beta^2)^{-1} \\ E_\varphi = -i\mu_0 w \left[\frac{\beta}{\mu_0 w r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \right] (\varepsilon_m \mu_0 w^2 - \beta^2)^{-1} \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} H_r = i\varepsilon_m w \left[\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\beta}{\varepsilon_m w} \frac{\partial H_z}{\partial r} \right] (\varepsilon_m \mu_0 w^2 - \beta^2)^{-1} \\ H_\varphi = i \left[\frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} + \varepsilon_m w \frac{\partial E_z}{\partial r} \right] (\varepsilon_m \mu_0 w^2 - \beta^2)^{-1} \end{cases} \quad (38)$$

CHAPITRE II

LE CAPTEUR A FIBRE OPTIQUE
ET
SON ENVIRONNEMENT

I. Introduction

Depuis leur invention, voici plus d'un quart de siècle, les fibres se sont imposées dans les communications; elles se sont engagées sur d'autres voies comme celles des capteurs à fibres optiques. Les équipements de communication diffèrent des capteurs par la nature du signal transmis, l'un est conçu de manière à véhiculer le signal avec le minimum de perturbation tandis que l'autre doit délivrer le plus fort signal possible en réponse à une perturbation spécifiée[5,11].

Le capteur à fibres optiques bénéficie néanmoins des qualités des fibres optiques de télécommunication (isolation électrique, immunité aux perturbations électromagnétiques, sécurité intrinsèque aux températures élevées et aux fortes irradiations; ect...).

II. Définition d'un capteur à fibre optique

Un capteur à fibre optique est défini comme un système à une ou plusieurs fibres capable soit de transporter l'information recueillie entre l'extrémité de fibre et le milieu extérieur, soit de coder optiquement l'information liée à la grandeur à mesurer[1,2,4,5,6,11].

Dans le premier cas, les fibres sont passives : elles ne servent qu'à amener la lumière 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 entamant le conducteur de lumière (capteurs intrinsèques).

III. Fonctions d'un capteur à fibre optique

Les capteurs peuvent assurer quatre fonctions différentes [11]:

- l'acquisition d'un paramètre externe au système (saisie externe d'une information pour un automatisme fonctionnant en boucle ouverte)
- la surveillance du système par acquisition d'un paramètre interne (saisie interne, en boucle ouverte)
- la stabilisation d'un système (saisie interne, boucle fermée)
- l'asservissement d'un système à un paramètre externe (saisie externe, boucle fermée)

IV. Capteur intrinsèque - capteur extrinsèque

Le capteur à fibres optiques sera dit **intrinsèque** lorsque l'élément sensible est constitué par une ou plusieurs fibres optiques dont une ou plusieurs caractéristiques de transmission, de réflexion ou d'émission de la lumière dépendent de la (des) fibre(s) optique(s).

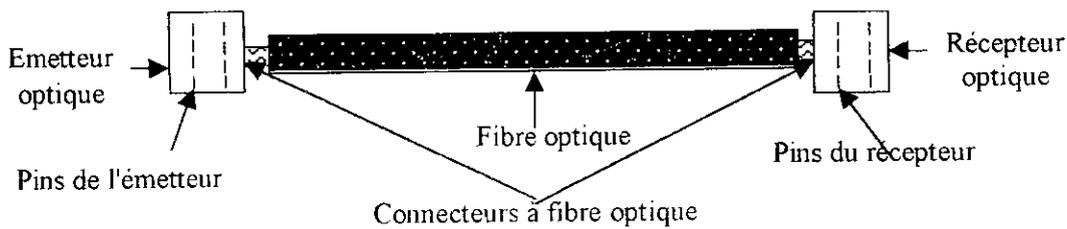
Le capteur sera dit **extrinsèque** lorsque les caractéristiques de la lumière sont modifiées par la grandeur à mesurer à l'extérieur de la (des) fibre(s) optique(s)[5,6,7,14] .

V. Description du capteur réalisé

Le capteur conçu dans cette recherche est un capteur extrinsèque puisque l'information angulaire est obtenue par la courbure de la fibre qui

est une contrainte extérieure et qui doit modifier les caractéristiques de la puissance lumineuse à la sortie de la fibre.

Le capteur est composé d'une fibre optique qui est un élément sensible à la courbure, d'un émetteur optique qui envoie de la lumière dans celle-ci sous l'effet d'une excitation et d'un récepteur optique à l'autre bout de la fibre pour détecter le signal lumineux converti en un courant par le récepteur (photodiode PIN)(FigII.1).



FigureII.1: Description du capteur à fibre optique réalisé

V.1. Choix de la fibre optique

Nous allons présenter les différentes contraintes scientifiques et matérielles qui ont influencé le choix de la fibre optique pour la réalisation du capteur.

Le profil d'indice est un paramètre essentiel dans le principe d'atténuation par courbure c'est lui qui désigne le type de la fibre optique.

V.1.1. Fibre à gradient d'indice

WINKLER [20] a montré que les fibres à gradient d'indice présentent une plus faible atténuation par courbure. Contrairement aux fibres à saut d'indice, elles ont été réalisées pour garder le maximum d'énergie à

l'intérieur du cœur. C'est pour cette raison qu'on a décidé de ne pas travailler avec ce type de fibre.

V.1.2. Fibre à saut d'indice

On trouve deux sortes dans ce type de fibres : monomode et multimode

V.1.2.1. Fibre Monomode

On peut déduire à partir de la formule (33) que la fibre à retenir doit posséder une faible ouverture numérique. Les fibres monomodes sont connues pour leur ouverture numérique faible. Cependant GAMBLING [10] qui a étudié les pertes de rayonnement dans les fibres monomodes ou de faible ouverture numérique montre qu'il existe des pertes transitoires discontinues entre les sections des fibres rectilignes et courbées.

On peut définir ces pertes transitoires comme des pertes qui ne suivent aucune loi mathématique connue dans la zone de transition dont la longueur est une fonction du rayon de courbure de la fibre optique. Comme on constate que plus l'angle de courbure (rayon de courbure) augmente plus ces pertes transitoires augmentent considérablement sur une plus grande longueur, d'ailleurs elles peuvent être plus importantes que celles dues à la courbure.

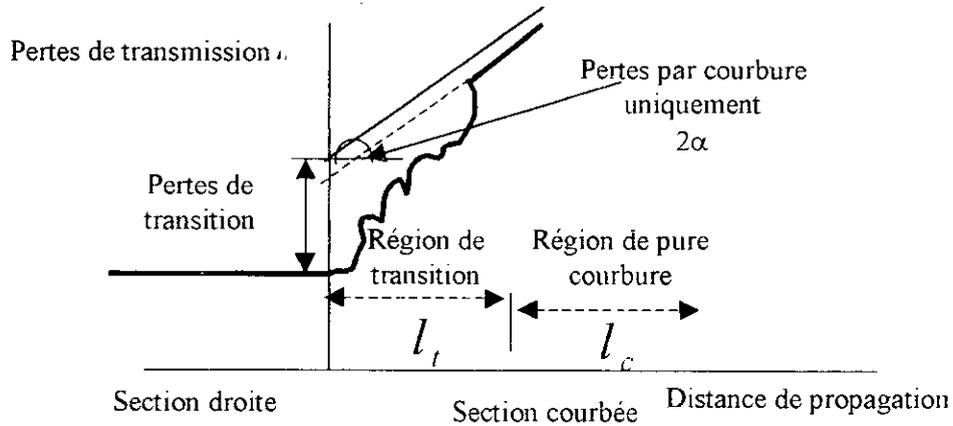


Figure II.2: Diagramme schématique des variations de perte de transmission dans une fibre monomode

GAMBLING a expliqué un peu plus tard que la zone de transition, où se produisent les pertes, est créée par l'échange qui se produit entre le mode électromagnétique hybride HE_{11} et le mode de fuite LP_{11} ce qui entraîne par la suite une oscillation de la quantité de puissance guidée dans le cœur. Toutes ces contraintes nous permettent d'éviter de choisir une fibre à saut d'indice monomode même si la formule (33) exprimant l'atténuation nous impose une ouverture numérique faible. GAMBLING a précisé que le fait de travailler avec une faible ouverture numérique entraînera une augmentation remarquable des pertes transitoires dans une fibre courbée, la seule solution qui nous reste était de choisir des fibres multimodes proches des monomodes.

V.1.2.2. Fibre multimode

Pour éviter les problèmes cités ci-dessus et satisfaire la formule (33), on a préféré travailler avec la fibre possédant une grande ouverture numérique, ce qui nous a poussé à prendre la fibre à saut d'indice

multimode ayant un grand diamètre. Une chose est sûre: c'est que la fibre à saut d'indice rejoint rapidement la distribution modale d'équilibre ce qui permet de stabiliser la puissance confinée dans le cœur sur une petite longueur.

V.1.3. Diamètre de la fibre

Le capteur à réaliser est sensé subir plusieurs contraintes mécaniques; or plus le diamètre de fibre constituant le capteur est faible plus la tenue mécanique des connecteurs diminue. En pratique [3], la fibre de faible diamètre possède une rigidité insuffisante pour maintenir les connecteurs à ses extrémités sans des microcourbures; nous devons donc choisir des fibres ayant un diamètre supérieur à 500 μ m.

V.1.4. Composition de la fibre

Il existe trois sortes de fibres optiques selon leur composition [3]:

- cœur et gaine silice
- cœur silice, gaine polymère
- cœur et gaine polymère

Les fibres en silice sont plus conductrices et leurs pertes ne dépassent pas 2 dB/km; alors que les pertes linéiques des fibres plastiques se situent entre 200 dB/km pour les meilleurs et 800dB/km selon la longueur d'onde utilisée.

Si l'atténuation linéique est une grandeur significative pour le choix d'une fibre en communication (grande longueur de fibre), dans le cas du

capteur angulaire, une grande atténuation est en fait un avantage puisque comme cela a été vu au chapitre(1), tous les facteurs qui augmentent le coefficient d'atténuation linéique interviennent directement ou indirectement dans l'atténuation par courbure. Cependant, le paramètre déterminant dans le choix de la fibre optique pour la réalisation d'un capteur angulaire reste le rayon minimal de courbure. Pour les fibres en silice, le rayon descend rarement en dessous de 20mm. Or certaines articulations à étudier, comme le doigt par exemple, ont un rayon de courbure de l'ordre de 10mm.

Nous avons donc opté pour la fibre en plastique à cause de sa souplesse qui présente un avantage certain.

V.1.5. La gaine protectrice

La rigidité de la gaine protectrice de la fibre diminue sa souplesse mais une fibre nue s'expose à certaines contraintes:

Les fibres silice-silice deviennent très cassantes lorsqu'on les dénude, les fibres silice - Plastique sont moins fragiles mais peuvent provoquer des microbrisures ou cassures aux angles de courbure étroits et les fibres plastiques- plastique sont beaucoup plus résistantes même dénudées.

V.1.6. Conclusion sur le type de fibre utilisée

Suite à toutes ces considérations citées ci dessus, nous avons décidé d'utiliser une fibre optique à saut d'indice multimode, possédant le cœur, la gaine optique en polymère et la gaine protectrice en plastique.

V.2. Caractéristiques de la fibre utilisée

V.2.1. Données du constructeur

La fibre utilisée dans notre recherche possède les caractéristiques fournies par la fiche technique du constructeur [24] qui sont les suivantes voir (l'annexe A):

Référence de la fibre optique	PGU-CD1001-22-E
Diamètre de gaine protectrice	2.2mm
Diamètre du cœur	1mm
Indice de réfraction de la gaine optique n_2	1.405
Indice de réfraction du cœur n_1	1.492
Atténuation à 820nm	200dB/km
Ouverture numérique ON	0.50
Angle d'acceptance	60°

V.2.2. Atténuation linéique

Il est intéressant de connaître la réponse en fréquence de la fibre optique pour déterminer son comportement autour de la longueur d'onde de travail:

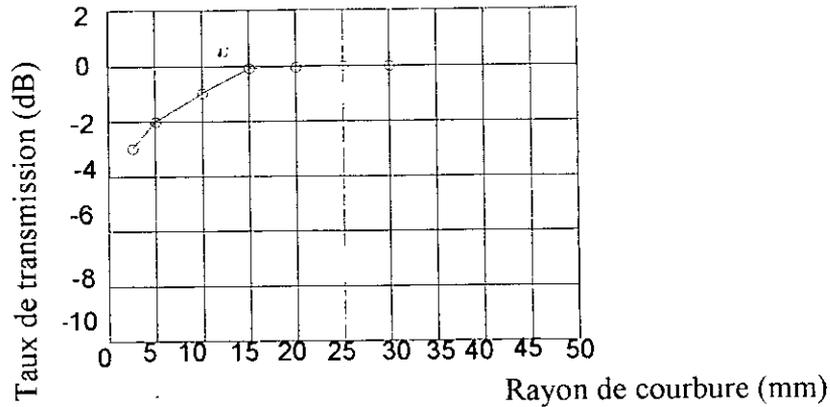


Figure II.4: Taux de transmission en fonction du rayon de courbure

V.3. Les Connecteurs

La connexion pose un problème délicat du fait qu'elle a de grands risques de pertes dues aux connexions. Les connecteurs servent soit à lier:

- Fibre - fibre,
- émetteur optoélectronique - fibre,
- fibre - récepteur optoélectronique.

V.3.1. Caractéristiques optiques

Quand la fibre est coupée, elle est considérée comme un guide d'onde à sortie ouverte, pour la conception des connecteurs le rayonnement de ce type de guide d'onde a été étudié [4] approximativement en utilisant l'approche géométrique appliquée à une surface transversale d'une fibre possédant un angle d'acceptance. L'énergie confinée dans cette fibre peut être calculée en appliquant le principe d'adaptation. L'approche géométrique est utilisée dans les

connecteurs pour comprendre les conditions d'injection de lumière, en considérant la théorie des pertes par réflexion donnée par l'équation de réflexion de Fresnel.

V.3.2. Caractéristiques générales

On peut améliorer sensiblement le bilan des pertes optiques en soudant la fibre plastique ou silice selon un procédé approprié; ceci a pour effet de réduire des pertes dues aux effets de Fresnel, mais cette technique pose des problèmes de rendre la connexion indéconnectable. Pour éviter ce genre de problème, on utilise souvent une colle spéciale pour fibre qui offre les mêmes performances en matière de réduction de pertes optiques. En connexion classique, on trouve sur le marché deux sortes de connecteurs : connecteur + embase + éléments optoélectroniques (c'est le cas des connecteurs utilisés dans notre application) ou bien des connecteurs avec optique et éléments optoélectroniques intégrés.

Les industriels offrent une grande variété de ces connecteurs ST et SMA: le premier est utilisé pour les petits diamètres par contre le deuxième est utilisé pour les grands diamètres comme dans le cas de notre recherche où on a utilisé un diamètre de $1000\mu\text{m}$.

V.3.3. Réalisation de la connexion

La fibre est dénudée sur (5mm) avec un cutter puis polie avec un papier abrasif très fin, ensuite elle est introduite dans le connecteur pour

la mettre dans le guide du module optoélectronique jusqu'au contact de l'extrémité de la lentille optique. Un écrou de blocage impose le guidage et le maintien de la fibre optique à l'intérieur de ce module.

Le module optoélectronique est doté d'une lentille convergente adaptée au diamètre de la fibre utilisée, il est d'une grande immunité à la lumière extérieure.

V.4. Les modules optoélectroniques

Les conversions d'un signal électrique en un signal lumineux et réciproquement sont réalisées par des composants optoélectroniques d'émission et de réception qui sont des diodes à semi conducteurs. Ces composants sont faciles à utiliser grâce aux avantages qu'ils offrent comme: petit volume, faible échauffement, tension et courant faibles, fiabilité et la facilité d'être modulés jusqu'aux très hautes fréquences car les matériaux couramment disponibles permettent de couvrir la gamme de longueur d'onde du vert jusqu'à l'infrarouge moyen.

La connexion des éléments optoélectroniques émetteur optique (D.E.L) et le récepteur optique(photodiode PIN) à la fibre optique demande une grande précision pour éviter toute sorte d'atténuation autre que celle due à la courbure. Pour satisfaire cette précision on a utilisé des modules spécialisés[18] qui contiennent ces éléments optoélectroniques, des lentilles pour assurer la focalisation du faisceau lumineux dans la fibre. On a utilisé aussi ce type de module pour une raison d'encombrement surtout dans le cas où l'on désire utiliser ce capteur sur un patient.

V.4.1. L'émetteur optique

L'émetteur optique utilisé dans la réalisation de ce capteur est contenu dans le module optoélectronique de Honeywell 4401-016 [18,19], il est sous forme d'une diode électroluminescente (D.E.L) qui émet un signal lumineux sous une excitation d'une tension de 5V par effet de recombinaison radiative. On a mis en série avec cette DEL une résistance de protection pour la polariser en courant et non pas en tension voir (l'annexe B).

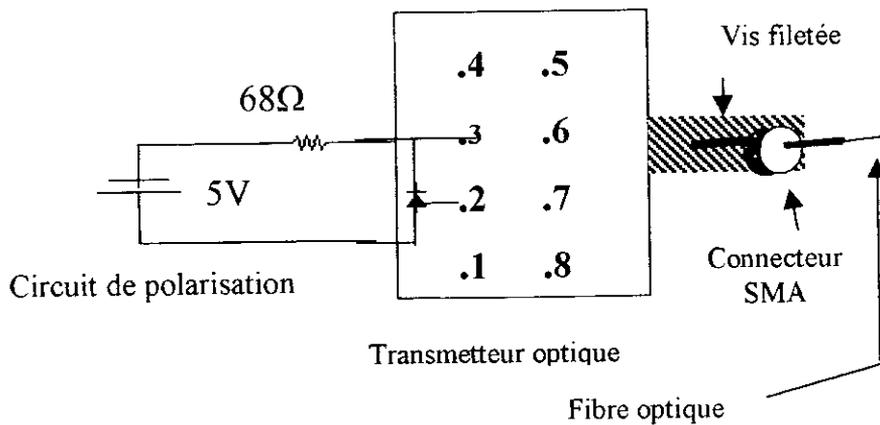


Figure II.5 : Schéma du transmetteur optique Honeywell HFE 4401-016

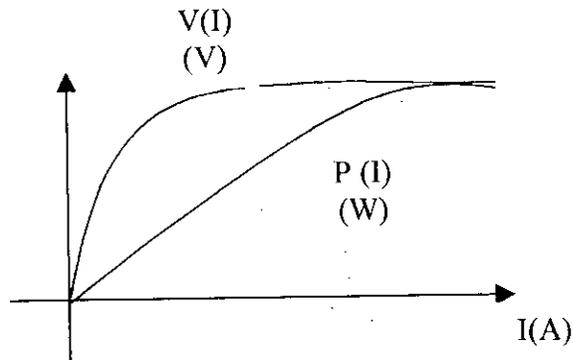
V.4.1.1.Principe d'une diode électroluminescente (D.E.L)

La diode électroluminescente met en œuvre le principe de recombinaison radiative des porteurs minoritaires dans une jonction PN polarisée en direct pour obtenir un bon rendement.

V.4.1.2 Caractéristiques des D.E.L

1.) Caractéristiques électriques de D.E.L

Caractéristique puissance - courant: P (I) présente une bonne linéarité (figII.6)[2].



FigureII.6: Caractéristique des diodes électroluminescentes

Caractéristique courant- tension :Elle s'exprime avec la relation suivante[2]: (figII.6)

$$I = I_s \left(\exp \frac{qV}{n'kT} - 1 \right) \quad (39)$$

Avec n' facteur d'idéalité $1 < n' < 2$,

K : constante de BOLTZMAN $= 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ j/}^\circ\text{K}$,

T : température absolue,

I_s : le courant de saturation,

$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$: charge d'électron.

Bande passante: elle est limitée à cause du temps de transition des porteurs, elle est comprise entre 30 et 100MHZ .

Largeur spectrale ou cohérence temporelle: La source doit avoir une largeur spectrale permettant d'obtenir la bande passante maximale de la fibre optique.

$$\Delta\lambda = A \frac{10}{L\Delta f} \quad (40)$$

L: distance de transmission en km,

Δf : bande passante en Ghz,

A: constante de proportionnalité déterminée par la forme de l'impulsion.

Modulation: le degré d'efficacité de la modulation de lumière par les signaux électriques demeure un facteur important. On peut utiliser deux types de modulations: la modulation directe de la source elle même et la modulation extérieure de la lumière. Dans les deux cas, il est important que la modulation et la source optique puissent être facilement couplées l'une à l'autre. Toujours pour des raisons d'encombrement on utilise la modulation directe de la source.

2.) caractéristiques optiques de la diode

Les diodes utilisées dans le cas des applications avec les fibres optiques sont équipées de microlentilles qui assurent une convergence de faisceau compatible avec l'ouverture numérique de la fibre. On définit quatre paramètres importants caractérisant une diode utilisée avec une fibre optique[2]:

Le spectre d'émission: il permet de définir la longueur d'onde du pic d'émission, il faut que le pic soit le plus fin possible pour éviter la dispersion chromatique.

Le diagramme d'émission

Il caractérise le flux lumineux et définit l'angle moitié, il suit la loi de Lambert; la puissance rayonnée dans la direction θ est donnée par la relation suivante:

$$P(\theta) = P_0 \cos \theta \quad (41)$$

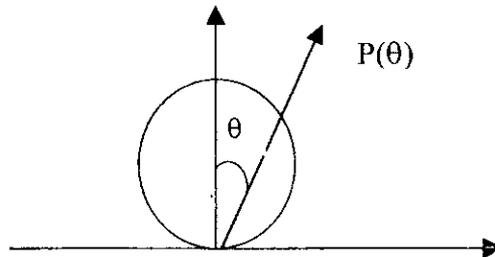


Figure II.7: Diagramme d'émission des diodes électroluminescentes.

L'ouverture numérique : elle correspond à l'angle moitié dans lequel 90% de l'énergie lumineuse de la diode est émise.

$$ON = \sin \Theta_{1/2} \quad (42)$$

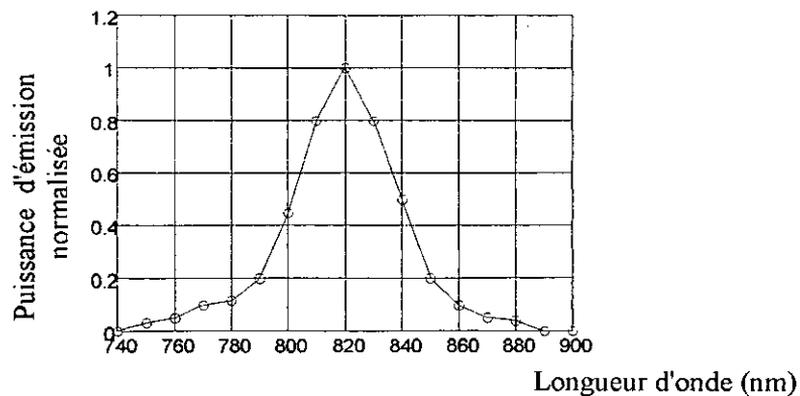


Figure II.8: Spectre de sortie de la fibre en fonction de λ

V.4.2. Récepteur optique

Le récepteur convertit le signal lumineux en signal électrique; le module récepteur optique Honeywell HFD3401-02 utilisé dans le capteur et qui est le complémentaire de l'émetteur optique, comprend la photodiode P.I.N polarisée en inverse pour convertir le signal lumineux en signal électrique, un régulateur de tension et un préamplificateur[18,19]. On a rajouté une capacité de $0.1 \mu F$ pour éviter le bruit qui peut influencer le régulateur de tension, on a mis aussi un suiveur pour éviter toute sorte de perte à la sortie électrique du récepteur voir (l'annexe B).

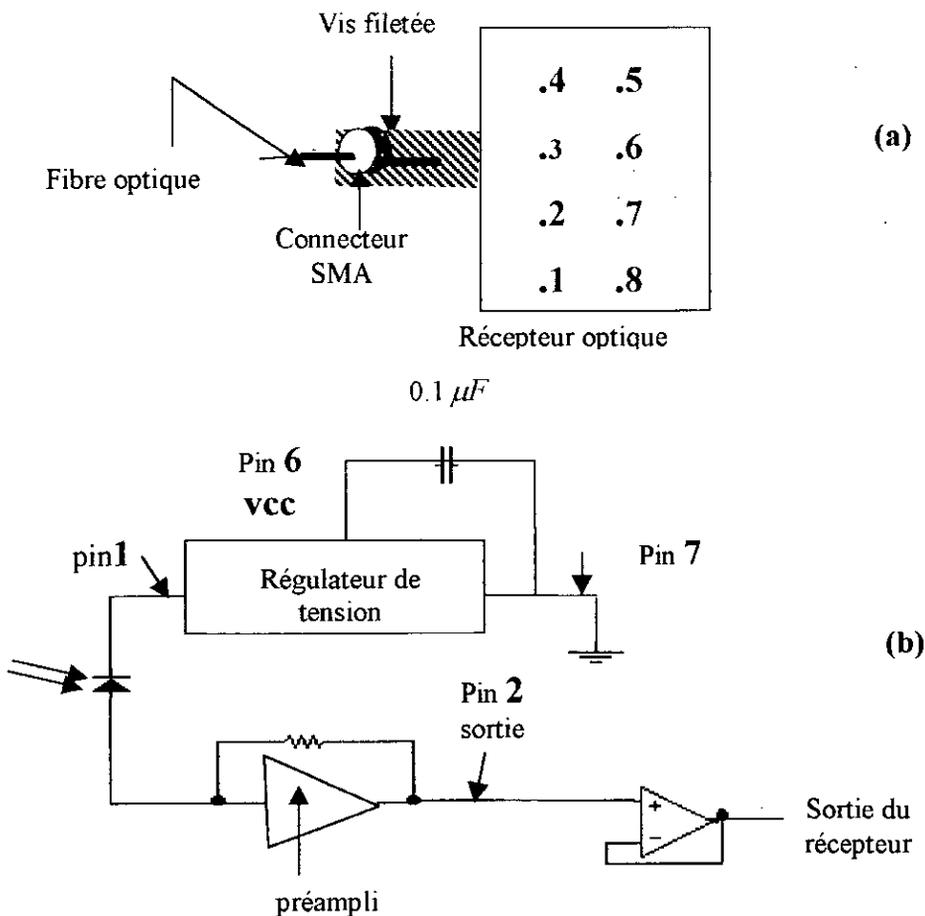


Figure II.9 : (a): schéma du récepteur optique Honeywell HFD3401-02
 (b): schéma électronique interne du récepteur optique

V.4.2.1. Caractérisation d'un récepteur optique

La structure PIN est très répandue, sa sensibilité est très grande et son rendement est élevé [1,2,4]. Elle fonctionne en réception comme un générateur de courant. Un récepteur doit avoir les qualités suivantes :

- une grande sensibilité adaptée à la longueur d'onde,
- un faible bruit et pas d'influence des conditions extérieurs sur ses caractéristiques,
- alimentation faible exigée,
- temps de réponse: on l'améliore en pratique en augmentant la tension inverse ce qui réduit la capacité et le temps de transition des porteurs.

Principe de conversion photon- électron

Le principe de base de la réception d'un flux lumineux par un système électronique est la conversion de photons en électrons.

L'énergie d'un photon en pénétrant dans le solide se transfère à un électron de la bande de valence qui passera dans la bande de conduction en produisant une paire de porteurs libres. Ces paires électrons- trous seront dirigées vers les zones où ils sont majoritaires grâce au champ électrique de la polarisation ; cela générera le photocourant. Ce dernier qui est créé par absorption de photons, est proportionnel au nombre de photons reçus, il faut évidemment que l'énergie apportée par le photon soit suffisante pour permettre le passage de la bande de valence à la bande de conduction d'où la nécessité de réaliser des bandes interdites les plus étroites possibles:

$$hf \geq E_c - E_v = E_g \quad (43)$$

Où hf est l'énergie d'un photon,

h est la constante de Plank ($h=6.626.10^{-34}$ j/s),

f est la fréquence de rayonnement:

La longueur d'onde critique est définie par la relation suivante:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (44)$$

CHAPITRE III

LE BANC DE TESTS AUTOMATISE

I. Introduction

Afin de tester le capteur angulaire et les limites de son utilisation, on a conçu et réalisé un banc de tests automatisé simulant une articulation humaine ainsi que son mouvement.

Le but principal de cette réalisation est de mesurer l'angle entre les deux axes de l'articulation simulée par le capteur à fibre optique.

II. Description du banc de tests réalisé

L'articulation simulée dans ce banc est caractérisée par deux paramètres essentiels dans l'étude de l'atténuation par courbure qui sont: le rayon de courbure et le déplacement angulaire. La fibre optique constituant le capteur, longe le bras en passant par l'articulation épousant la forme de cette dernière. Etant donné que la fibre subit une courbure suite au déplacement de l'axe mobile, on a un effet cumulatif d'atténuation en fonction de l'angle de courbure; ce qui nous a permis de déduire l'angle effectué par l'articulation.

Le banc de tests automatisé (fig.III.1) est constitué des éléments suivants:

- le système mécanique simulant l'articulation et son mouvement,
- le capteur angulaire constitué de la fibre optique et ses éléments optoélectroniques,
- le module de puissance pour le moteur pas à pas,
- la carte numérique EVB 68HC11 émulant le microcontrôleur 68HC11,
- le micro ordinateur de type PC.

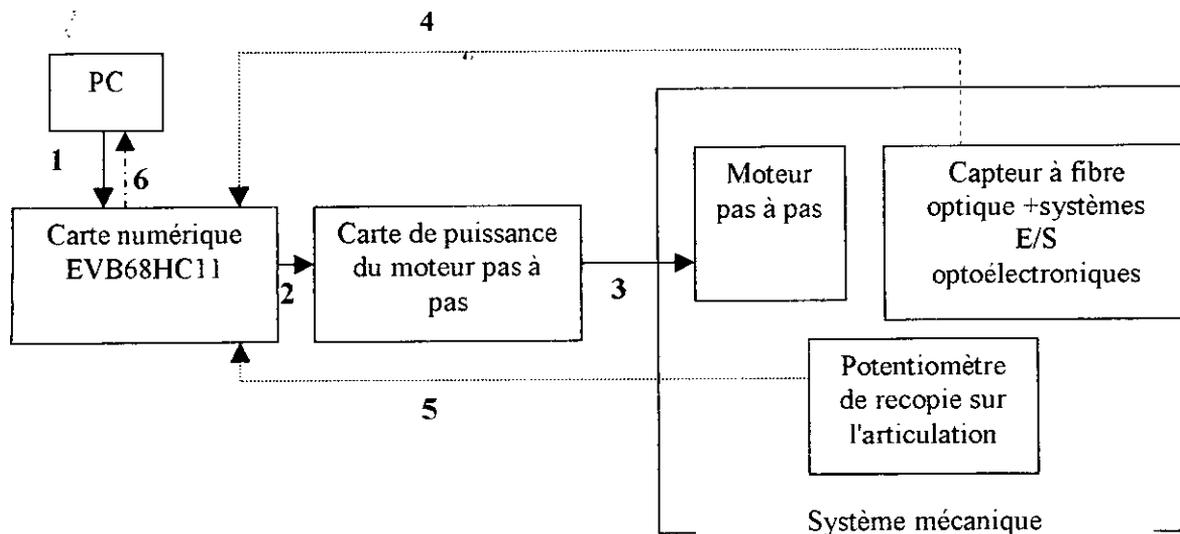


Figure III.1 : Synoptique du banc de test automatisé

(1): Edition du programme du protocole de déplacement du moteur pas à pas.

(2) : Conversion du programme en code assembleur par le micro contrôleur de la carte pour générer les signaux de commande du moteur pas à pas

(3): Les signaux générés amplifiés en courant pour pouvoir alimenter le moteur pas à pas

(4) , (5): Acquisition de la réponse du capteur et potentiomètre après chaque consigne de pas du moteur.

(6): Transfert des données acquises dans la carte vers le PC par la liaison RS232.

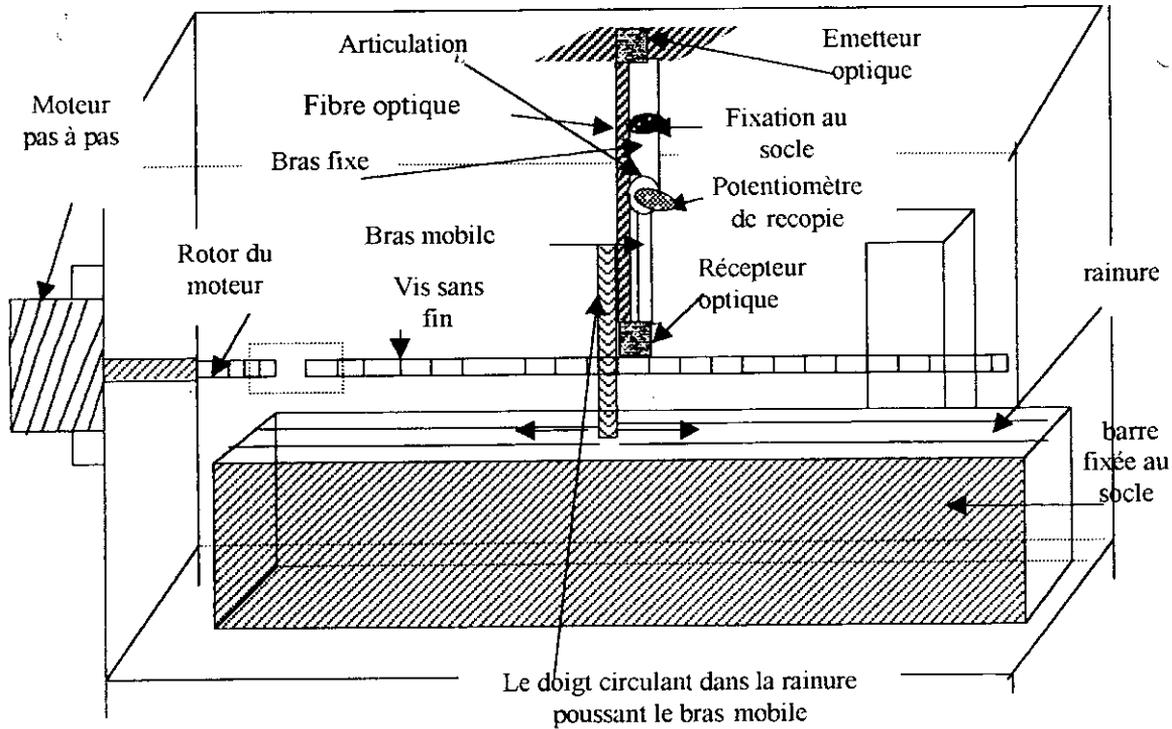


Figure III.2: Le système mécanique réalisé pour le banc de test automatisé

III. Description du système mécanique

Ce dispositif mécanique simule une articulation d'un petit bras ou celle d'un doigt et son mouvement flexion - extension. On a deux éléments constituant l'articulation: la partie fixe et la partie mobile. La mobilité est assurée par un procédé mécanique constitué d'une vis sans fin sur laquelle on a un petit doigt qui circule dans une rainure effectuée sur un élément fixé à la base du socle.

L'élément important de ce banc de test est le moteur pas à pas qui a permis la transmission de mouvement rotationnel à la vis sans fin grâce à un manchon au fur et à mesure qu'il reçoit des impulsions d'excitation précises. Comme c'est montré dans fig III.2, le petit doigt circulant sur une rainure sert à transformer le mouvement rotationnel de la vis sans fin en un mouvement rectiligne et ainsi le doigt glisse à travers cette rainure en

poussant le bras mobile pour effectuer des déplacements angulaires par rapport à l'axe de l'articulation.

IV. Le capteur à fibre optique et ses éléments optoélectroniques

Le deuxième élément constituant le banc de test est le capteur contenant la fibre optique qui est l'élément sensible à la courbure et les modules optoélectroniques, comme cela a été vu au chapitre II. Ainsi à l'aide du récepteur optoélectronique, on détecte la tension pour chaque déplacement angulaire suite à la courbure de la fibre optique mise sur l'articulation des deux bras.

V. Le moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est très utilisé comme actionneur pour le réglage discret en position [13]. Ce type de moteur sous l'action d'une impulsion au niveau du stator se traduit par un déplacement très précis appelé pas; son grand avantage comparativement au moteur à courant continu c'est qu'il peut fonctionner en boucle ouverte.

Vu les caractéristiques citées précédemment, on a utilisé le moteur pas à pas assurant le rôle d'interface entre le système de traitement numérique (microcontrôleur) et son environnement mécanique.

Le moteur pas à pas reçoit l'information du sens de rotation et une impulsion pour le déplacement d'un pas. La génération d'un nombre fini d'impulsions est assurée par le microcontrôleur; elle constitue une commande de position alors que la fréquence de ces mêmes impulsions contrôle la vitesse du moteur.

V.1. Principe du moteur pas à pas

Il est constitué essentiellement d'un rotor (bobine) et d'un stator comme l'indique la fig III.3 [12,15]:

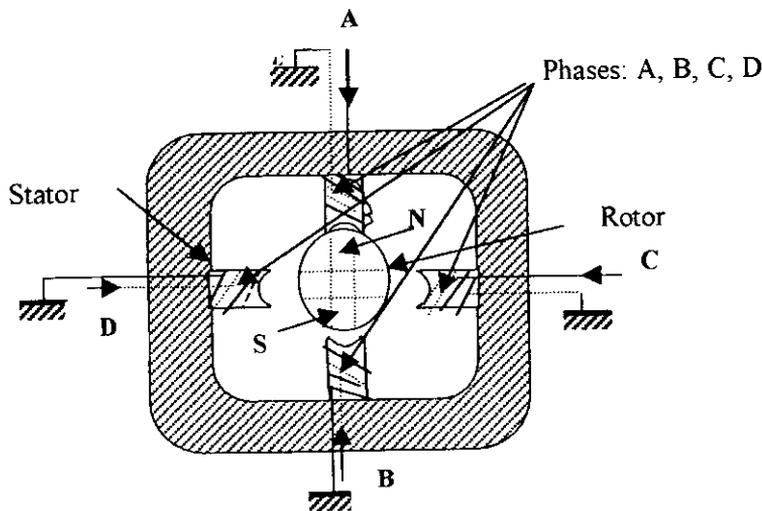


Figure III.3: Schéma théorique d'un moteur unipolaire

Il existe plusieurs types de moteurs pas à pas qui diffèrent par leur principe de fonctionnement, les performances et les avantages qu'ils apportent aux applications. Il y a les moteurs à aimant permanent, à réluctance variable et hybride.

V.2. Moteur pas à pas utilisé

Le moteur pas à pas utilisé dans notre application est un moteur hybride de pas 1.8° ayant une très bonne résolution jusqu'à 200 pas par tour. Il possède un couple moteur élevé dû à l'aimantation du rotor et qui est proportionnel au courant. Le sens de rotation de ce moteur dépend de l'ordre d'alimentation des bobines et du sens du courant.

Les moteurs pas à pas hybrides comme tout autre type de moteurs se subdivisent en deux types: le bipolaire et l'unipolaire; notre moteur est un unipolaire à quatre phases. La fig III.4 représente symboliquement le schéma équivalent du moteur avec ses bobines ainsi que les différents commutateurs permettant de connecter l'enroulement dans un ordre bien précis.

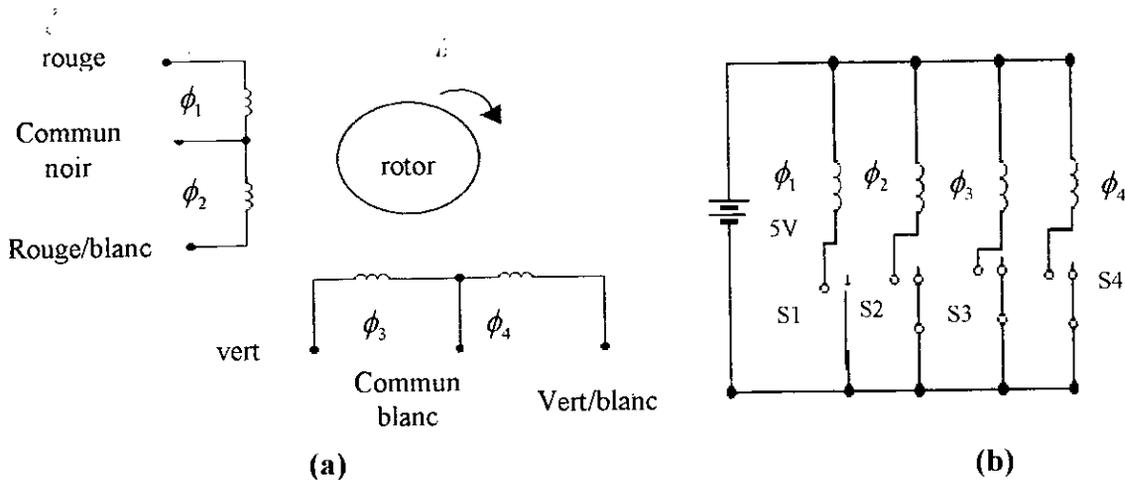


Figure III.4: (a) Schéma de principe du moteur pas à pas hybride unipolaire à 4 phases

(b) Ordre d'alimentation des bobines du moteur

V.3. Caractéristiques statiques et dynamiques du moteur pas à pas

V.3.1. Caractéristiques statiques

Courant par phase: c'est l'intensité par phase à fréquence nulle (moteur à l'arrêt) qui provoque l'échauffement maximal admissible en fonctionnement.

Couple maintien statique: c'est le couple qu'il faut appliquer au moteur pour effectuer quatre pas quand il est alimenté (deux phases à la fois); ce couple est proche de la forme d'une sinusoïde.

Couple de détente: c'est le couple avec le moteur non alimenté.

Couple moteur: lorsque le moteur est alimenté, son rotor va s'aligner sur l'axe du flux ainsi créé. Si on essaie de l'éloigner vers une nouvelle position, cela engendrera un couple croissant avec le décalage angulaire. Ce couple passe par une valeur maximale (figIII.5) désignée sous le couple de maintien pour pouvoir passer d'un pas à un autre, le couple résistant doit être inférieur au couple de démarrage.

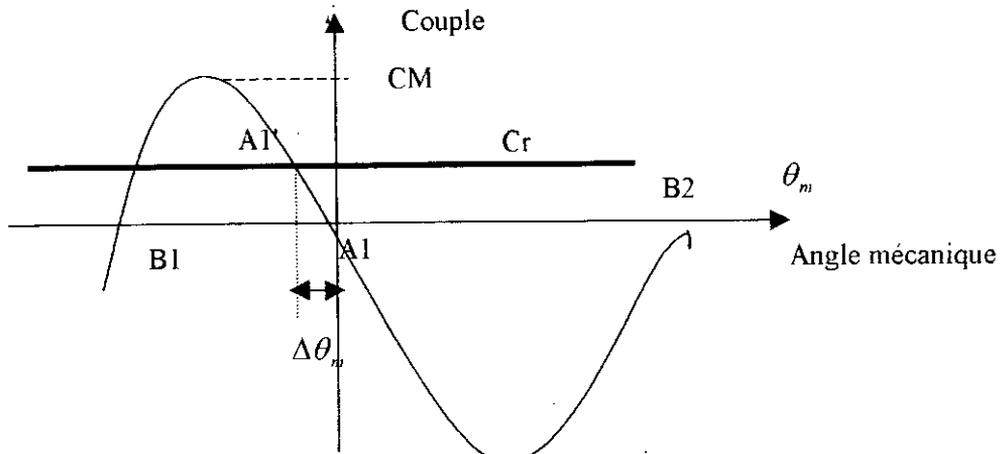


Figure III.5: Couple de démarrage en fonction de l'angle mécanique du moteur

V.3.2. Caractéristiques dynamiques

Pour un système donné, les caractéristiques dynamiques du moteur représentent la variation du couple résistant en fonction de la fréquence des impulsions[12].

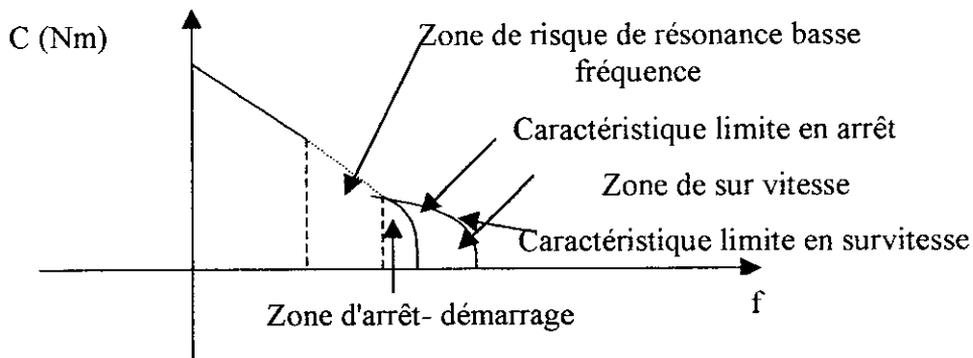


Figure III.6: Caractéristiques dynamiques du moteur

V.4. Alimentation des moteurs pas à pas

Le principe du fonctionnement des moteurs pas à pas repose sur la commutation successive des enroulements stator ou phases[15]. Il y a plusieurs modes d'alimentation. Le mode le plus utilisé donnant un bon couple moteur est le mode qui consiste à commander les deux phases en

même temps en respectant une séquence précise pour faire un tour dans le sens d'horloge ou dans le sens contraire. Dans notre application, on a opté pour ce mode en respectant le tableau donné par la figIII.7 comprenant la séquence précise pour générer les impulsions correspondantes à la commande du moteur à travers la carte EVB68HC11 émulant le microcontrôleur 68HC11.

Nombre de Pas	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
0	On	Off	On	Off
1	Off	On	On	Off
2	Off	On	Off	On
3	On	Off	Off	On
4	On	Off	On	Off

Refaire

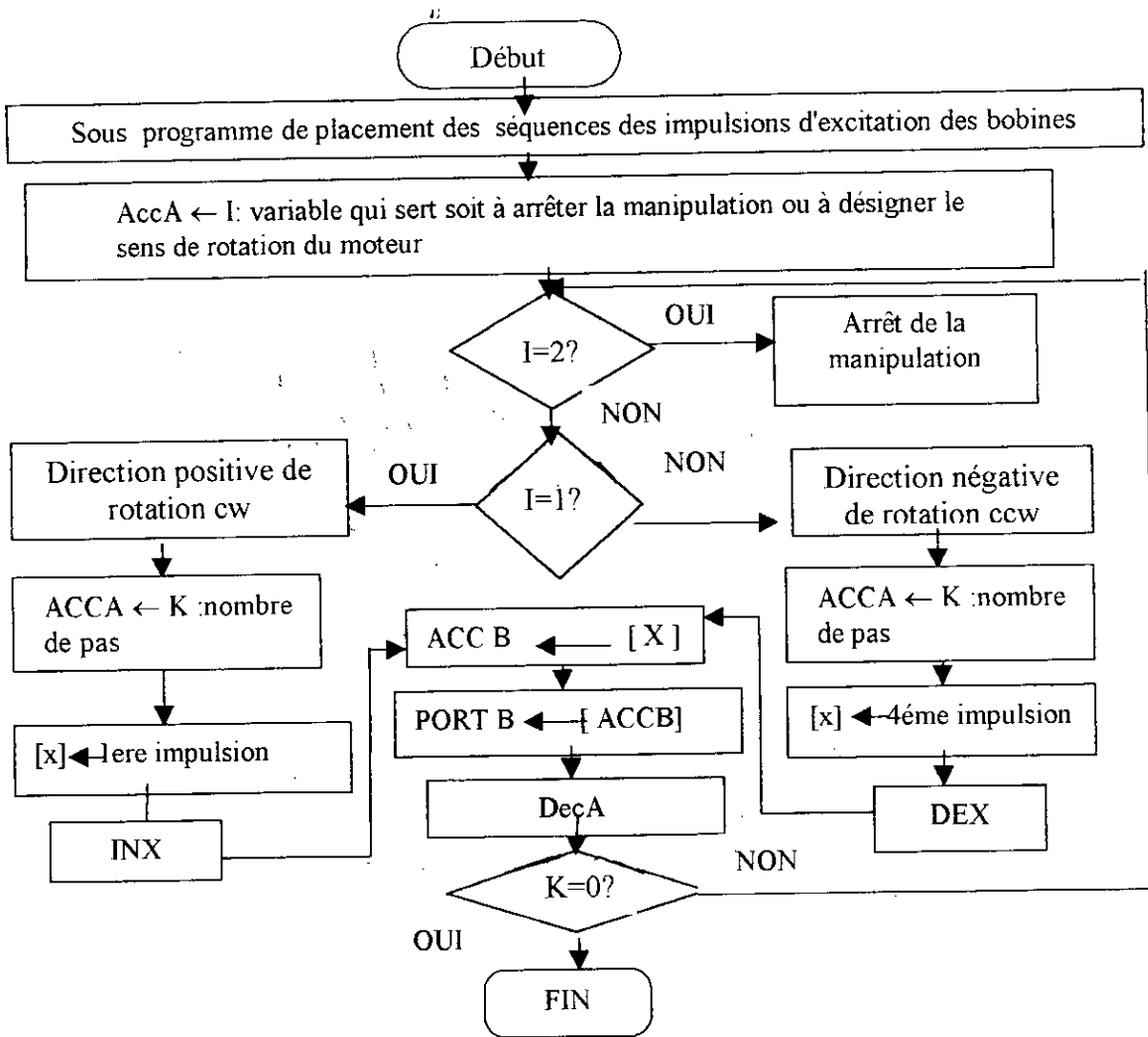
CW ↓ ↑ CCW

FigureIII.7 : Tableau des séquences d'excitation des bobines du moteur

V.5 Caractéristiques du moteur pas à pas utilisé

Référence :	RS 332-082
Pas angulaire	1.8°
Résistance de phase	5Ω
Inductance de phase	10 mH
Couple moteur max	460 mN.m
Couple de maintien	320 mN.m
Voltage	5V .dc
Courant	1A

V.6. Organigramme de commande du moteur



VI. Module de puissance pour le moteur

La carte de puissance réalisée dans cette recherche permet la commande d'un moteur pas à pas unipolaire, elle joue le rôle d'interface entre la carte EVB 68HC11 et le moteur pas à pas voir (fig III.8). Cette carte amplifie les séquences d'excitation en courant [14].

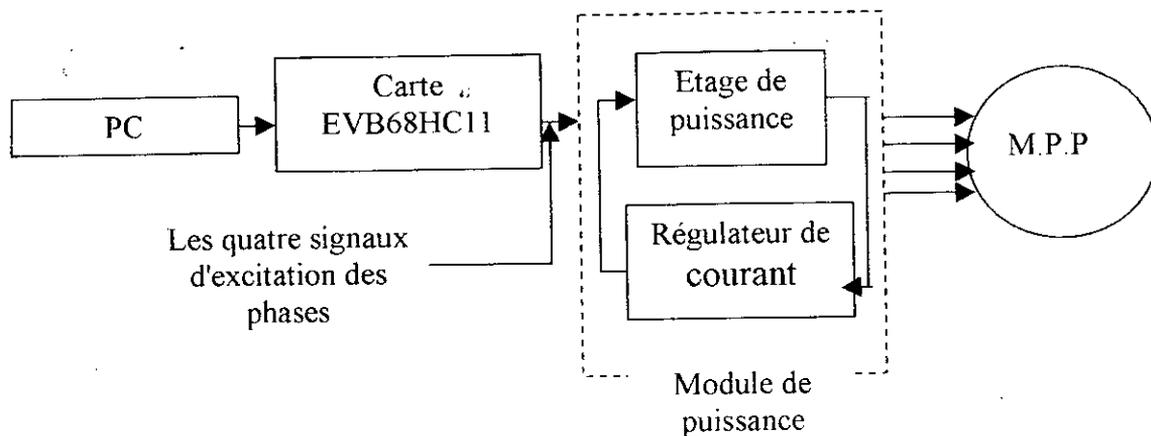


Figure III.8: schéma synoptique du module de puissance

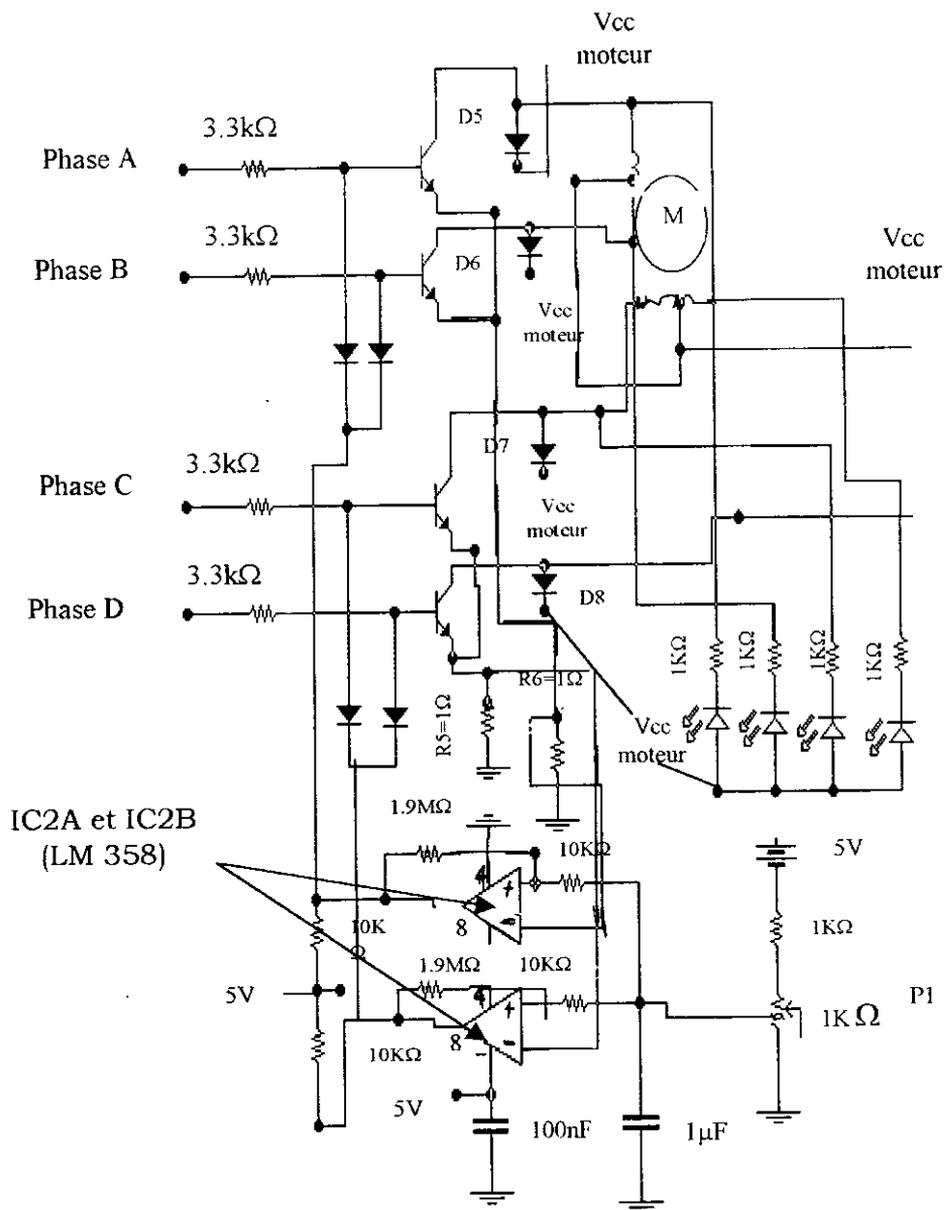


Figure III.9 : Schéma électronique du module de puissance réalisé

on a injecté les quatre signaux d'excitation des différentes phases issus du microcontrôleur dans l'ordre précis à la carte de puissance comprenant le circuit de régulation pour permettre l'alimentation à courant continu des bobines du moteur; voir figIII.9.

Le circuit dispose de quatre entrées: phase A, phase B, phase C, et phase D qui sont aux normes TTL, chaque entrée commande l'alimentation d'un des enroulements du moteur par l'intermédiaire d'un transistor Darlington.

La régulation est assurée par les amplificateurs opérationnels IC2A et IC2B (LM 358). Les transistors qui alimentent l'un des bobinages du moteur dont le point milieu est relié au +Vcc, sont groupés deux à deux; leurs émetteurs sont connectés à la même résistance (R5, R6) de telle sorte que le courant traversant les enroulements du moteur traverse également les deux résistances (R5,R6); ce qui permet leur utilisation comme capteurs de tension. Cette tension est appliquée à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel configuré en comparateur; sur l'entrée non inverseuse est appliquée une tension de référence dont la valeur est fixée par le potentiomètre P1 .

Les diodes D5 à D8 protègent les transistors contre les tensions de rupture élevées présentes aux bornes des enroulements du moteur.

VII. Microcontrôleur 68HC11

Le 68HC11 est un microcontrôleur de la famille de MOTOROLA, c'est un microcontrôleur 8bits de fréquence 2Mhz[17]. Autour de l'unité centrale du 68HC11 proprement dite, dérivée du 6801, on trouve tout d'abord la mémoire. Elle est subdivisée au maximum en trois blocs distincts dont la taille et la présence varient selon les références exactes du circuit. La ROM qui peut être présente ou absente, lorsqu'elle est présente elle peut être de types suivants:

- ROM programmable par masque (lors de la fabrication du circuit)
- EPROM: ROM programmable électriquement. Dans ce cas la ROM peut être non effaçable; elle s'appelle alors OTPROM c'est-à-dire ROM

programmable une seule fois. Elle peut être aussi du type UVPROM c'est à dire programmable électriquement et effaçable aux ultraviolets.

En plus de la ROM on trouve une EEPROM (mémoire programmable et effaçable électriquement) qui est destinée aux données sauf dans des cas rares tels que le test ou la mise au point de courts programmes.

Enfin une RAM est intégrée avec le système. Elle est réservée aux divers échanges de données.

L'unité centrale est entourée d'un certain nombre de ports parallèles comme les ports A, B, C et E qui peuvent être bidirectionnels ou unidirectionnels comme B et E. Certaines lignes de ces ports sont également partagées avec d'autres sources internes et ne sont donc pas nécessairement accessibles directement en permanence. Ainsi le port E est commun avec le convertisseur analogique numérique.

Des entrées /sorties séries sont aussi disponibles et peuvent fonctionner en mode synchrone ou asynchrone selon que l'on utilise la SPI ou la SCI.

Un timer est également disponible, il comporte plusieurs timers très évolués ainsi qu'un accumulateur d'impulsions, une horloge du temps réel et un 'chien de garde' destiné à surveiller le fonctionnement du microcontrôleur.

Un convertisseur analogique numérique à huit entrées complète cette panoplie de ressources internes.

Toute la logique nécessaire, tant au traitement des interruptions qu'à la génération de l'horloge, est intégrée dans le 68HC11 dont la mise en œuvre matérielle est ainsi très simple.

VII.1. Intérêt du microcontrôleur

Dans notre application, le 68HC11 gère la commande du moteur, réalise l'acquisition des tensions du capteur et du potentiomètre de recopie comme il assure le transfert des données vers le PC par l'intermédiaire de l'interface asynchrone série SCI.

Le microcontrôleur 68HC11 s'est imposé de lui même comme gestionnaire de données à haut niveau d'intégration volumique.

VII.2. La carte EVB

Pour l'automatisation du banc de mesure, il est préférable de travailler avec la carte d'évaluation EVB (Evaluation Bord)[16] afin d'éviter de reprogrammer la RAM du micro contrôleur 68HC11 à chaque test. Une fois que le programme est émulé on le met dans l'EEPROM du microcontrôleur pour que le système final soit autonome. Notons que le programme en langage assembleur est accessible par micro-ordinateur et la communication avec la carte est réalisée grâce au protocole de communication KERMIT. Par ailleurs, la carte comporte un port d'extension d'entrées-sorties (PRU), un port série (ACIA) et un port d'accès micro- ordinateur permettant de piloter la carte.

N°	Description	Fonctions
1	GND	Masse
20	PD0	RXD: réception RS232
21	PD1	TXD : transmission RS232
26	VDD	Alimentation 5V
38	PB4	Séquence d'excitation de phase D
39	PB3	Séquence d'excitation de phase C
40	PB2	Séquence d'excitation de phase B
41	PB1	Séquence d'excitation de phase A
45	PE2	Capteur à fibre optique
47	PE3	Potentiomètre de recopie
51	VRL	Tension basse du convertisseur
52	VRH	Tension haute du convertisseur

Le port de sortie de la carte 68HC11EVB comporte 60 broches, mais nous ne présentons ici que les fonctions qui ont été utilisées dans notre application.

VII.3. La numérisation

VII.3.1 la conversion analogique - numérique

Le convertisseur analogique numérique du microcontrôleur 68HC11 fonctionne sur le principe de l'approximation successive obtenue par répartition des charges dans des capacités. La répartition des charges se fait grâce à des commutateurs analogiques. Pour qu'ils puissent commuter des tensions jusqu'à VDD(5V), il est nécessaire de les alimenter avec une tension d'au moins 8V. Ceci est rendu possible par l'utilisation de la pompe de charge.

L'utilisateur devra donc penser à activer cette pompe de charge en plaçant le bit ADPU du registre OPTION (\$1039) à 1, il devra aussi laisser le temps (100µs) à cette pompe de charge pour atteindre le régime permanent.

VII.3.1.1. Utilisation du convertisseur

Le convertisseur possède huit entrées analogiques multiplexées. Chaque entrée peut recevoir une tension analogique ne dépassant pas 6 volts. Les entrées sont protégées contre les tensions inverses et la surtension par un dispositif de protection composé en partie d'une diode ZENER(fig.III.10). Si la tension à convertir V_x est égale à la tension de référence haute (VRH) le convertisseur donnera la valeur \$FF et inversement si elle est égale à la tension de référence basse le convertisseur donnera la valeur \$00.

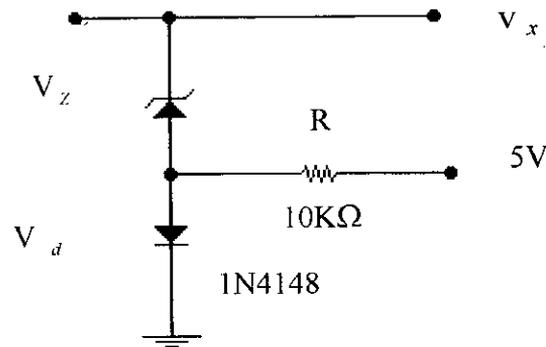


Figure III.10: Protection des entrées du convertisseur du 68HC11

VII.3.1.2. Principe de la conversion

Les conversions ont lieu successivement puis sont rangées dans les registres correspondants ADRx. Trente deux cycles sont nécessaires pour réaliser une conversion. Compte tenu du fonctionnement par transfert de charges dans des capacités, il ne faut pas descendre la fréquence d'horloge du micro contrôleur en dessous de 750khz. Le résultat de la conversion est placé dans le SAR puis est transféré dans le registre ADRx correspondant pendant le cycle FIN de la séquence de conversion analogique numérique.

L'indicateur CCF du registre de contrôle du convertisseur est mis à 1 pendant le cycle FIN. Le multiplexeur interne est capable de sélectionner seize canaux (grâce aux quatre bits du registre de contrôle CA à CD). Huit canaux sont branchés sur les entrées du port E, cinq canaux sont réservés et trois autres sont connectés sur les références internes VRH, VRL, VRH/2.

VII.4. Potentiomètre de recopie

C'est un potentiomètre à variation linéaire fixé sur l'articulation que l'on a utilisé pour avoir une information supplémentaire du déplacement angulaire par rapport à l'axe de l'articulation après chaque consigne (nombre de pas) précise du moteur pas à pas.

VIII. Automatisation du banc de tests

L'ensemble des différents éléments présentés ci-dessus sont assemblés pour réaliser une chaîne de commande et d'acquisition automatique.

VIII.1. Programmation

Ce programme a pour but de commander le moteur pas à pas dans les deux sens avec le nombre de pas désiré et après chaque consigne atteinte on effectue une acquisition de la réponse du capteur à fibre optique et celle du potentiomètre de recopie en même temps. Ces tensions acquises sont dirigées sur les entrées du convertisseur analogique numérique du microcontrôleur, ensuite elles sont converties en binaire puis stockées en RAM. En utilisant la sortie série SCI du 68HC11, ces tensions sont transférées vers le PC par la liaison RS232 pour un traitement ultérieur.

VIII.1.1. L'acquisition des données

L'acquisition des données se fait en temps réel de déplacement articulaire, ensuite elle est lue dans le registre du convertisseur. Les données sont ensuite stockées dans la RAM pour les envoyer à travers la liaison série asynchrone SCI vers le micro ordinateur afin de réaliser le traitement de ces données.

VIII.1.2. Transmission série

a.) caractéristiques de la transmission série asynchrone de 68HC11

- ◆ la ligne en attente est à l'état haut,
- ◆ le bit de 'start' est au niveau bas,
- ◆ le format de données est de huit ou de neuf bits,

- ◆ le bit de poids faible est transmis le premier,
- ◆ le bit 'stop' au niveau haut indique la fin de transmission,
- ◆ signal de 'break' sépare les trames (données),
- ◆ l'émetteur et le récepteur sont indépendants donc permettent la transmission en full duplex,
- ◆ l'interface permet le réveil automatique dès qu'elle reçoit des signaux valides

b.) Utilisation de la liaison série asynchrone (SCI: serial communication interface)

La transmission série nécessite l'accès aux quatre registres comprenant la configuration du mode de transmission, le contrôle et la vitesse de transmission. Cette transmission peut se faire en huit ou neuf bits avec un bit de start et un bit de stop à la fin du mot envoyé.

Adresses du port utilisés:

- ◆ \$102B BAUD: registre de débit,
- ◆ \$102C SCCR1: registre de contrôle 1,
- ◆ \$102D SCCR2: registre de controle2,
- ◆ \$102 E SCSR: registre d'état,
- ◆ \$102F SCDR: registre de données (DTR ou RDR).

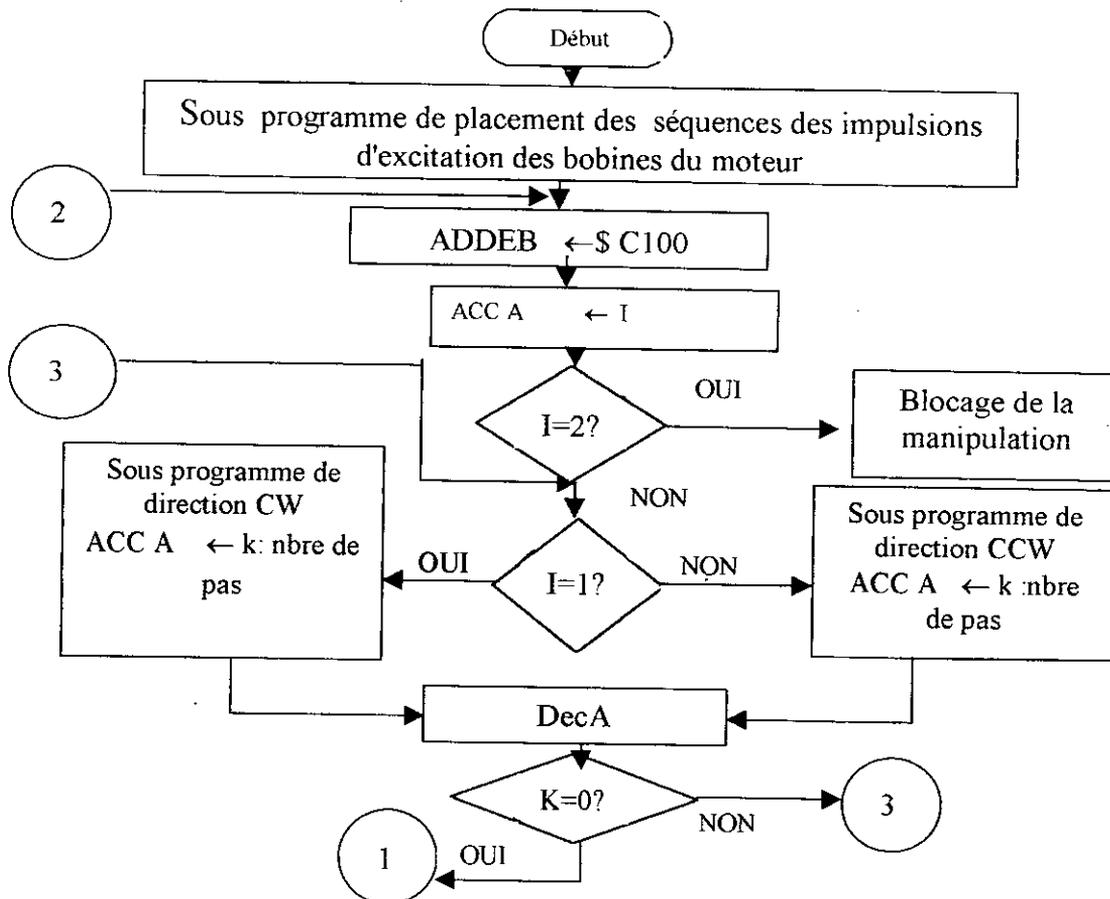
Entrées /sorties de l'interface série asynchrone utilisent la première et la deuxième ligne du port D (Rx = PD₀ et Tx = PD₁.)

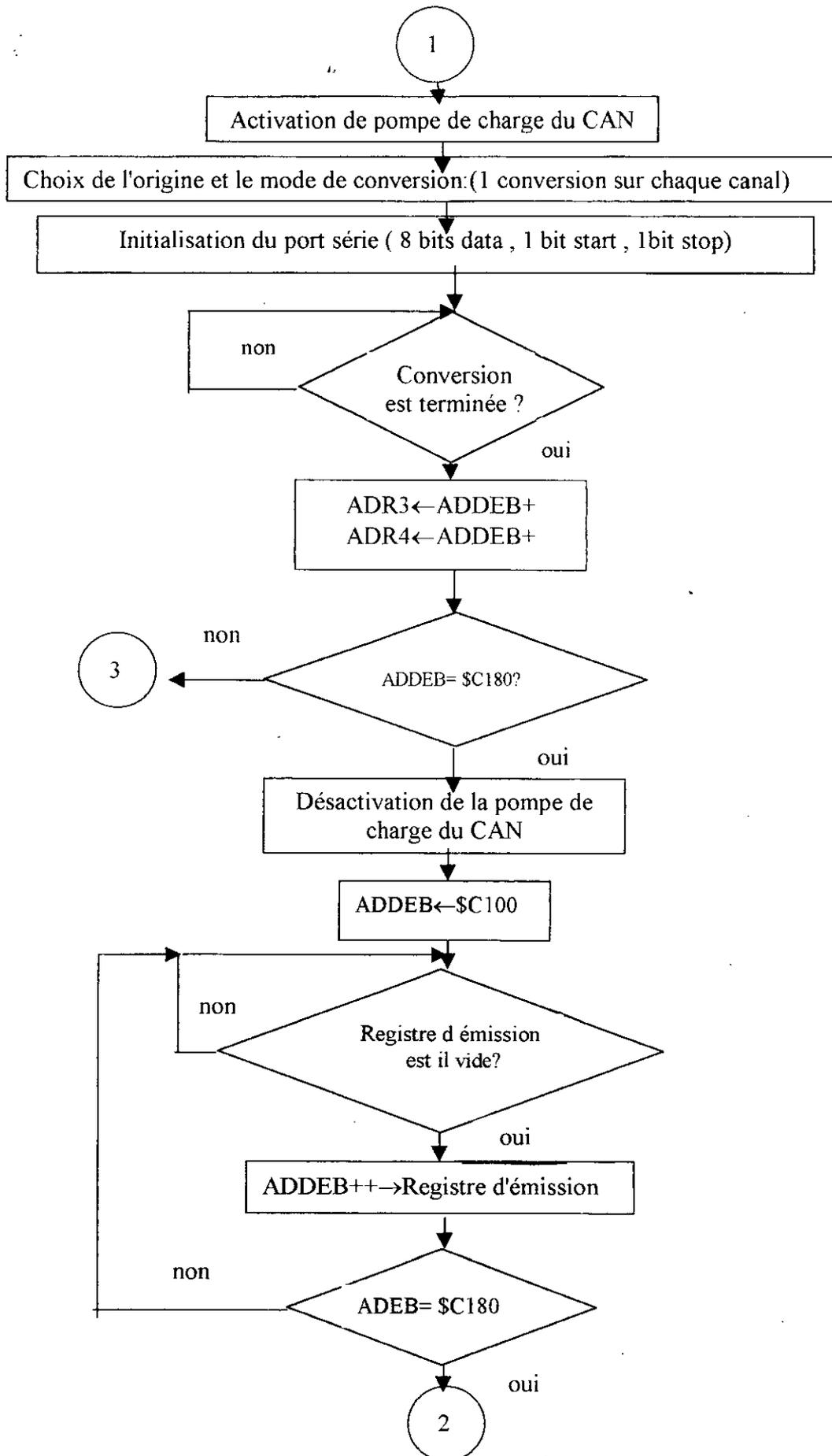
VIII.2. Réception

Pour effectuer la réception des données sur la liaison série RS232 du micro ordinateur ayant le microprocesseur 8250 comme le cœur de cette liaison, on a utilisé un programme en c++3 qui a été développé au laboratoire [21]. On a adapté ce programme à notre application pour

recevoir les tensions du capteur à fibre optique et celle du potentiomètre de recopie en code ASCII dans un fichier, ensuite on a développé un programme en c++ qui convertit ces données en valeurs réelles [8]. La vitesse de réception fixée à 1200baud, le numéro du port de communication qui est le COM2 et le nom de fichier de réception des données sont définis dans le programme qui se met en attente de réception jusqu'à l'identification d'un caractère de fin de transmission avec succès. A chaque réception de données il est créé un fichier de deux colonnes: l'une correspond à la tension du capteur et la deuxième à la tension du potentiomètre de recopie donnant l'information angulaire supplémentaire. Après avoir effectué N fois la même manipulation, les données seront stockées dans N fichiers et traitées par la suite avec MATLAB afin d'obtenir une réponse statique du capteur et tester par la même occasion la fatigue de la fibre.(Voir l'organigramme de réception d'un bloc de données dans un fichier (figIII.11) et celui de la conversion des données de ce fichier en valeurs réelles (figIII.12)).

VIII.3. Organigramme du programme principal





L'organigramme ci-dessus schématise le fonctionnement du banc de test automatisé. Après avoir mis en place les séquences d'impulsions d'excitation des bobines du moteur dans les espaces mémoire du 68HC11, la variable "I" permet soit de faire démarrer la manipulation en désignant le sens de rotation du moteur ou bien la bloquer. Cependant "K" désigne le nombre de pas (angle de courbure imposé à l'articulation), à chaque angle on a une acquisition des tensions du capteur et du potentiomètre à l'intermédiaire du CAN. Une fois la conversion est terminée, les données sont rangées dans le registre d'émission du SCI pour être envoyées au PC.

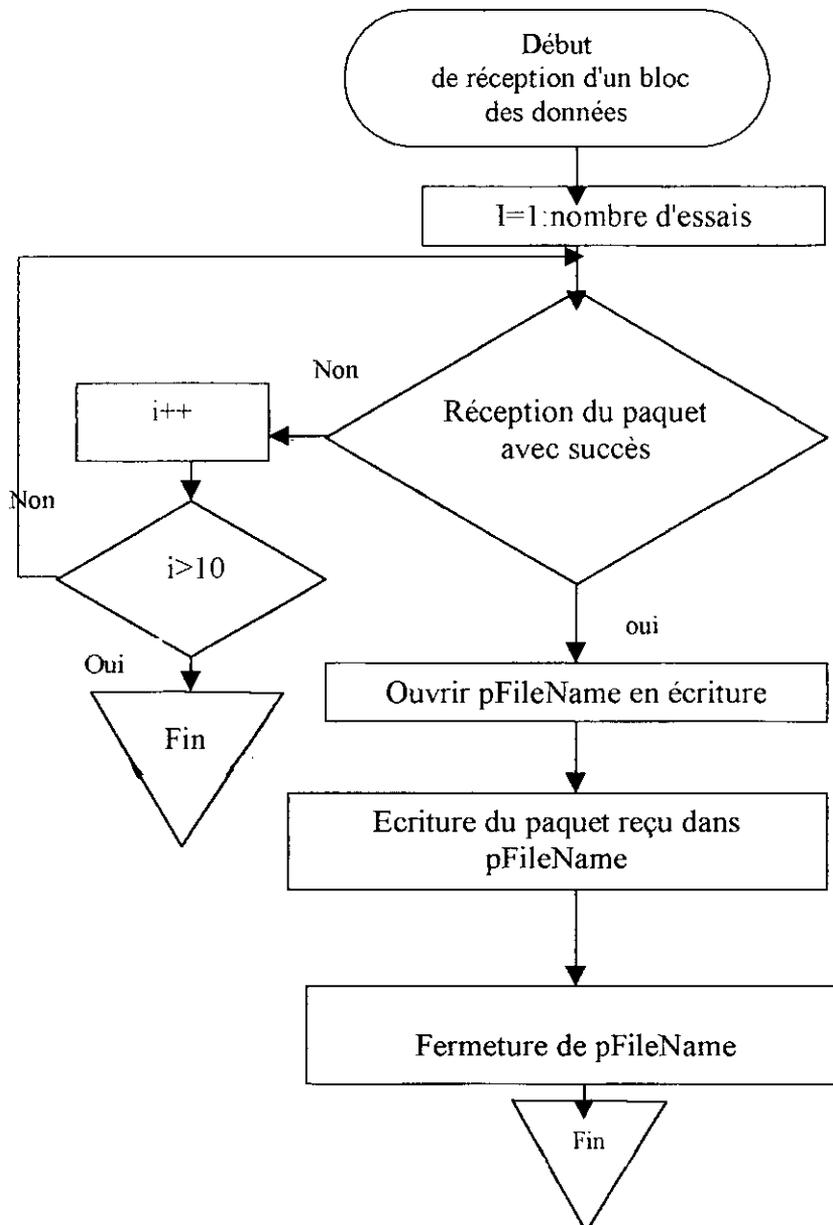


Figure III.11: Organigramme de réception d'un bloc de données dans un fichier

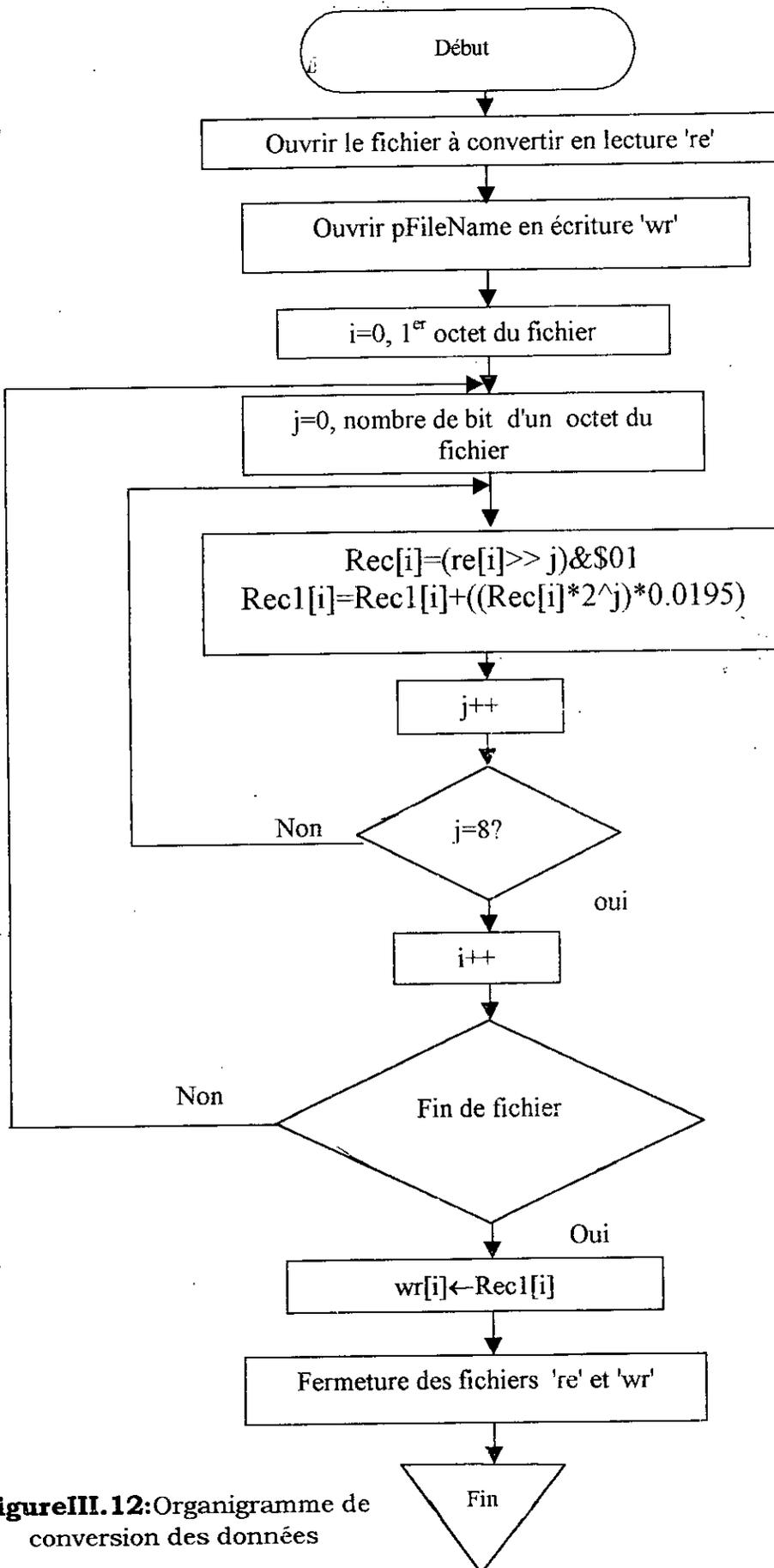


Figure III.12: Organigramme de conversion des données

CHAPITRE IV

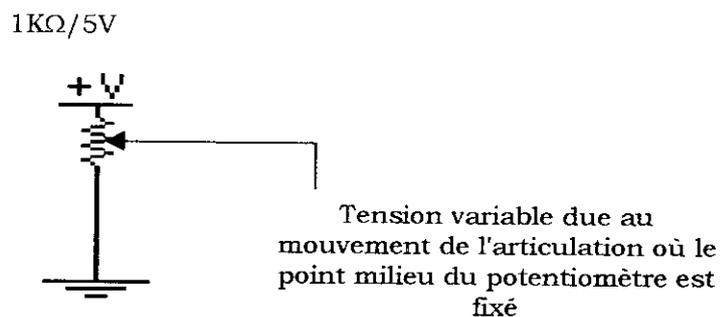
RESULTATS EXPERIMENTAUX
ET
COMMENTAIRES

I. Atténuation dans la fibre optique courbée

Afin de mettre en évidence l'atténuation et les variations de distribution modale dans la fibre optique, cette dernière a été mise sur l'articulation simulée dans le banc de tests automatisé géré par PC pour lui faire subir une courbure de rayon et d'angle de courbure précis.

I.1. Courbe d'étalonnage du potentiomètre de recopie

Pour avoir une information angulaire précise dans le cas d'un déplacement par rapport à l'articulation en mode flexion - extension, on a décidé de placer un potentiomètre de recopie sur l'articulation qu'on a polarisé avec une tension de 5V. A chaque variation angulaire on a une variation de tension qu'on relève et que l'on a appelée tension de recopie. (voir Fig.IV.1, Fig.IV.2). C'est une information supplémentaire par rapport à la tension acquise par le récepteur optique.



FigureIV.1: Représentation du potentiomètre de recopie et sa polarisation

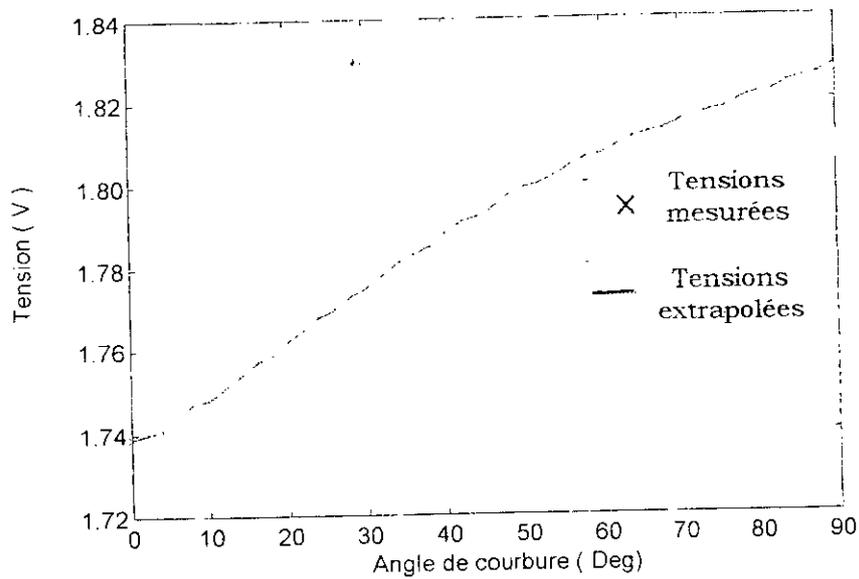


Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage du potentiomètre de recopie : tension en fonction de l'angle de courbure

I.2. Tension détectée à la sortie du capteur à fibre optique

Au fur et à mesure qu'il y a un déplacement du bras par rapport à l'articulation, la fibre optique subit une courbure. Par manque d'équipement (puissancemètre optique), on a mesuré la tension détectée pour chaque angle fixé par rapport à l'articulation. On peut exprimer la variation de la puissance en fonction de la tension détectée au niveau du récepteur optique par la relation suivante:

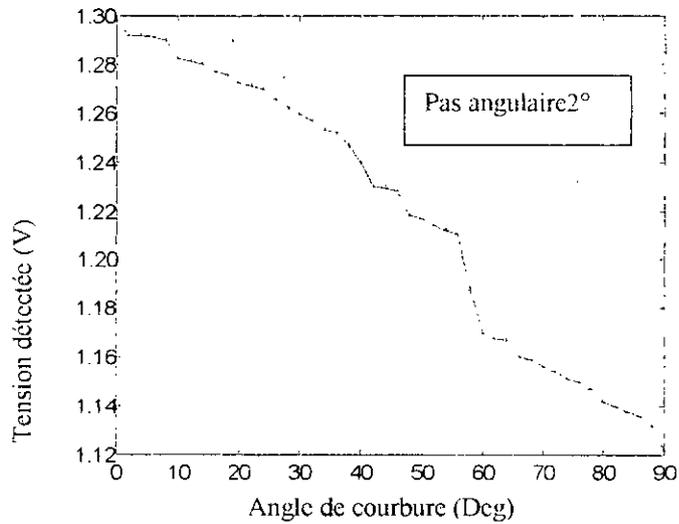
$$V = R_{ch} i_d = R_{ch} SP \quad (45)$$

Sachant que $R_{ch} S$ est une constante,

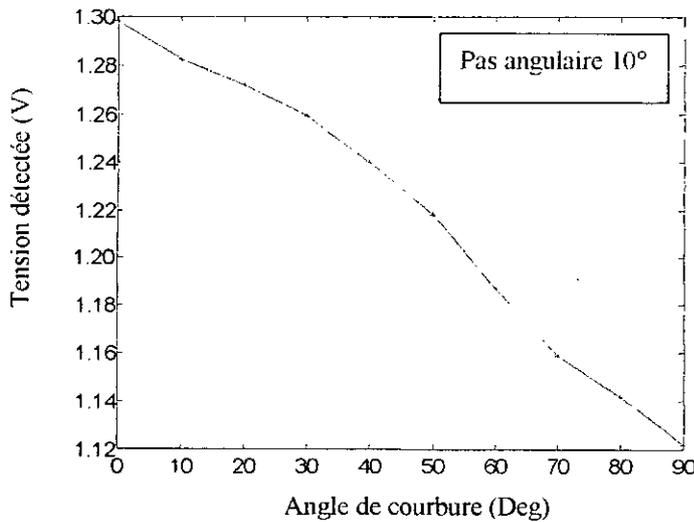
P est la puissance optique,

S est la sensibilité de la photodiode PIN utilisée et qui est donnée pour une longueur d'onde connue.

et R_{ch} est la résistance équivalente du détecteur optique puisque la photodiode est caractérisée par sa résistance série qui est très petite en général, négligeable devant sa résistance de jonction (R_d); le pré-amplificateur d'entrée peut être aussi caractérisé par son impédance d'entrée (R_a, C_a)



(a)



(b)

Figure IV.3 : Atténuation en fonction de l'angle de courbure - rayon de courbure 10mm

D'après la figure (figIV.3), on constate l'atténuation de la réponse du capteur en fonction de l'angle de courbure; cela est évident surtout quand l'angle de courbure augmente au fur et à mesure car la fibre est soumise à une courbure remarquable(Fig. IV.3.a).

II. Influence du placement de la courbure par rapport à l'émission et la réception sur l'atténuation

Nous avons effectué ce test pour savoir si l'équilibre modal influence sur les pertes par courbure. En effet, lorsque les rayons lumineux sont introduits dans la fibre, les modes de propagation ne sont pas encore établis de manière à atteindre l'équilibre modal surtout si la courbure modifie la répartition des modes.

On impose une courbure à la fibre à une distance l_n de l'émission ou de la réception optique et on suppose une longueur du capteur L constante de telle sorte que $L - l_n$ évolue de manière opposée à l_n .

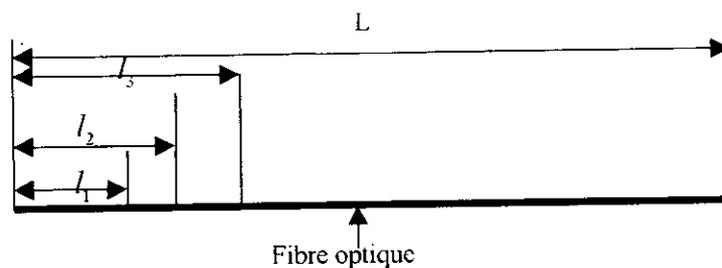


Figure IV.4 : Evolution de l_n avec L constant

II.1. Longueur émission - courbure

On a utilisé une longueur du capteur de 50 cm et les longueurs émission- courbure 10mm ,30mm et on a relevé les courbes de la figure IV.5.a où on a constaté que les deux courbes évoluent de la même manière, ces courbes montrent que la longueur émission- courbure n'influence pas sur l'atténuation dans une fibre courbée.

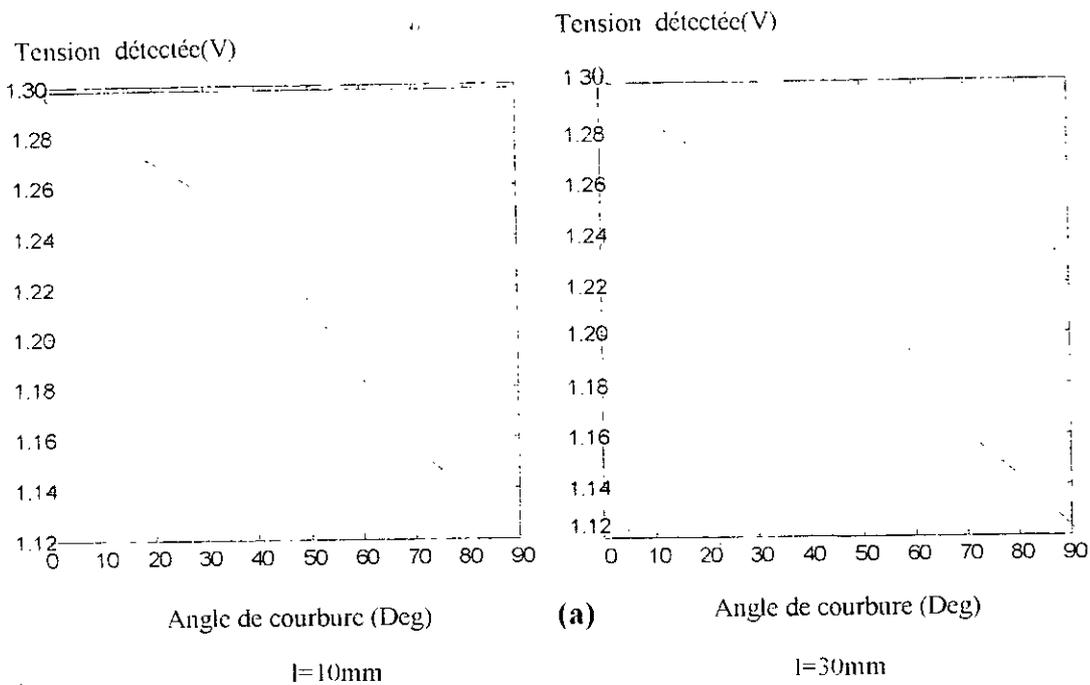


Figure IV.5.a: Représentation des différentes atténuations pour des longueurs émission - courbure $l=10\text{mm}$, 30mm

II.2. Longueur réception - courbure

On a effectué la même manipulation, on a laissé la longueur du capteur à 50 cm et les longueurs réception - courbure à 10mm, 30mm puis on a relevé les courbes de la figure IV.5.b, où on a constaté aussi que la longueur réception- courbure n'influence pas sur l'atténuation dans la fibre optique courbée.

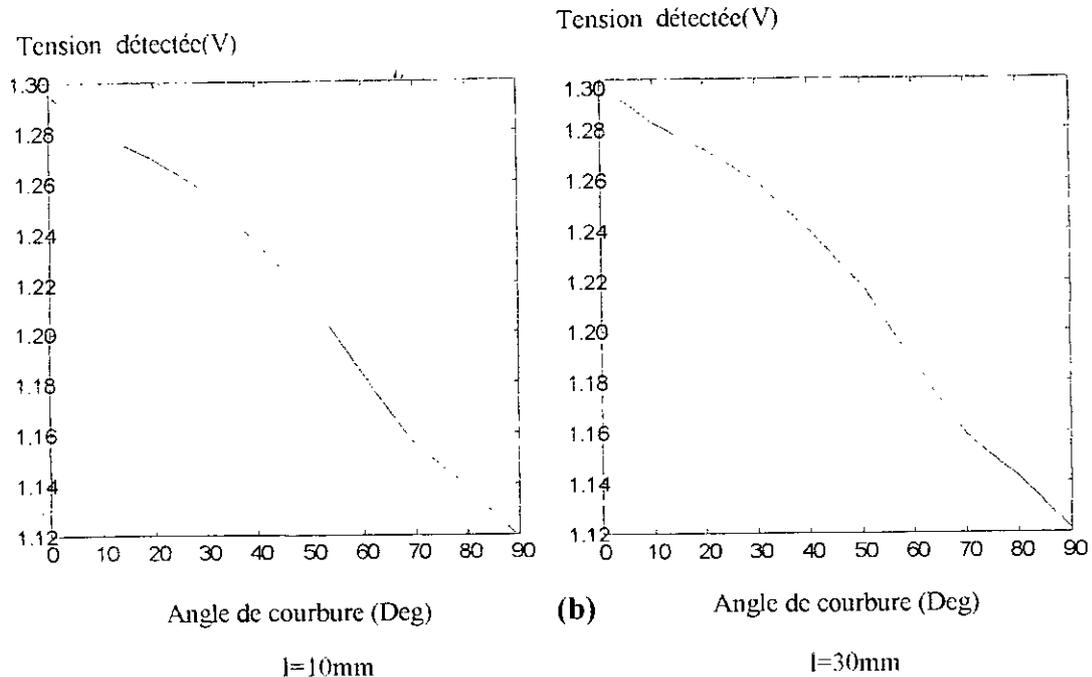


Figure IV.5. b: Représentation des différentes atténuations pour des longueurs réception- courbure $l=10\text{mm}$, 30mm

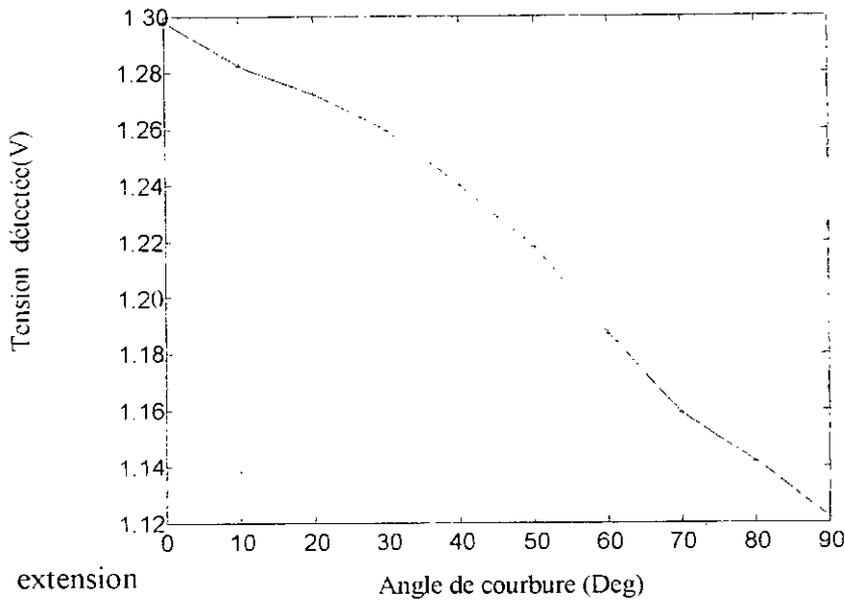
II.3. Conclusion sur l'influence longueur émission- courbure , longueur réception- courbure

D'après les courbes des figures (IV.5.a, IV.5.b), on constate que le positionnement de la zone courbée de la fibre par rapport à l'émission et à la réception optique n'engendre aucune modification des résultats; et cela montre qu'il n'y a pas de contrainte de positionnement du capteur sur l'articulation humaine, du lieu de courbure par rapport aux composants optoélectroniques.

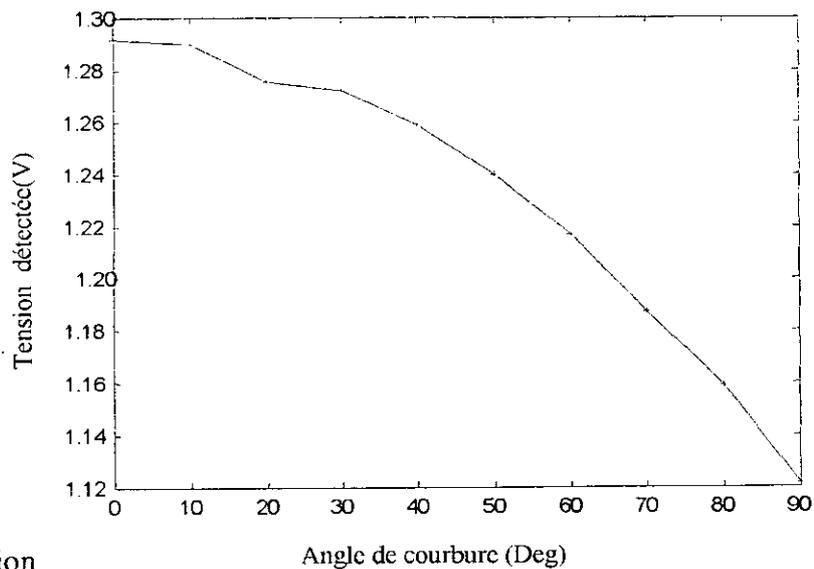
III. Mode flexion - extension

A travers cette expérience nous essayons de mettre en évidence l'existence d'une éventuelle hystérésis. En effet, lors de chaque flexion-extension, la fibre subit d'abord une élongation puis une contraction, comme le montre la figure IV.6, la caractéristique relevée à la flexion est légèrement différente de celle relevée à l'extension; cela est dû à la

mémoire mécanique du plastique, de plus le polymère possède une constante de temps $\Delta t = 5s$ pour revenir à sa position initiale; c'est pour cette raison qu'on observe de petites différences au niveau des tensions initiales détectées à la sortie de la fibre. Notons aussi que plus le rayon de courbure est petit plus ce phénomène apparaîtra. Pour éviter ce problème il faut fixer une position idéale lors de la prise d'étalonnage, ensuite elle ne doit plus être modifiée.



(a): extension



(b): flexion

Figure IV.6: Réponse du capteur en mode flexion - extension

IV. Fatigue de la fibre

Il est évident que plus le rayon de courbure est faible plus on accélère le processus de détérioration; c'est ce que l'on appelle la fatigue statique de la fibre. Dans le cas de notre expérience, nous avons un rayon de courbure assez petit et cela va favoriser la fatigue de la fibre. C'est ainsi que l'on a vérifié la répétabilité de la mesure en gardant le capteur en position rectiligne après chaque flexion - extension. La figure suivante montre qu'après un certain nombre de flexion, on a une petite variation au niveau de la tension initiale et cela est dû à la fatigue de la fibre.

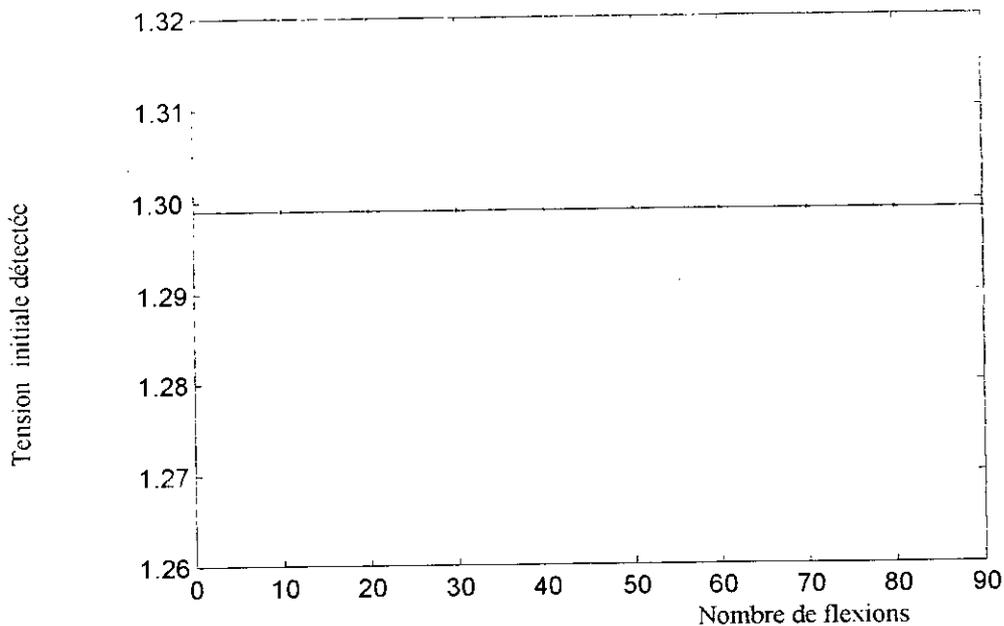


Figure IV.7: Représentation de la variation de tension initiale de l'atténuation en fonction du nombre de flexions imposées pour un rayon de courbure de 10mm

Etant donné que le rayon de courbure utilisé (10mm) est proche du rayon minimal donné par le constructeur de la fibre utilisée [24], les mesures obtenues sont représentées par la courbe de la figure (FIG.IV.7). Cette courbe illustre alors la fatigue de la fibre et du corps constituant la gaine protectrice.

Si on utilise ce capteur sur des articulations de rayon de $R=25$ et 50 mm, il sera évident d'obtenir une bonne stabilité pour les 100 premiers essais réalisés automatiquement car ces rayons sont suffisamment supérieurs au rayon minimal donné par le constructeur.

On constate que les résultats obtenus évoluent en fonction du diamètre de la fibre optique, car comme cela a été vu au chapitre I; l'élongation sur le périmètre externe et la compression en périmètre interne de la fibre augmente avec l'intensité des contraintes exercées sur le capteur. Or plus le rayon de courbure diminue plus ces contraintes deviennent importantes.

CONCLUSION

Ce travail nous a permis d'étudier la fibre optique dans un autre domaine autre que celui de la transmission. La fibre optique a été utilisée pour réaliser un capteur angulaire qui est basé sur le principe de modulation d'amplitude de l'onde lumineuse en fonction des caractéristiques de la courbure imposée à la fibre fixée sur une articulation simulée.

On a constaté aussi que la mise au point de l'atténuation de la réponse du capteur dépend du choix de la fibre, mais malheureusement, il est difficile aujourd'hui de se procurer des câbles optiques industriels qui atténuent le faisceau lumineux de façon significative en fonction de la courbure.

Ce travail nous a permis aussi de nous familiariser avec l'électronique numérique grâce au banc de tests automatisé numérique où on a utilisé le microcontrôleur 68HC11 et le moteur pas à pas. Avec ce banc composé d'une chaîne numérique complète, on peut ainsi évaluer toute sorte d'atténuation de la réponse du capteur qui sera placé sur une articulation réelle, en fonction de l'angle de courbure.

Afin de déterminer plus précisément le champ d'application de ce capteur, il est souhaitable d'effectuer des mesures en milieu clinique pour que des médecins rééducateurs puissent déterminer le domaine d'utilisation réel de ce capteur à fibre optique en rééducation fonctionnelle.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **HALLEY.P;** "*Les systèmes à fibre optique; Edition Eyrolles1985*".
- [2] **UNGAR.S;** "*Fibres optiques: Théorie et application; Edition Dunod 1989*".
- [3] **COSSING .P;**" *Câbles à fibre optique; Edition Siemens1990*".
- [4] **LECOY.P;** "*Télécommunications optiques; Edition Hermes1992*".
- [5] **BOISDE.G;** "*Les capteurs à fibre optique; systèmes optiques- Institut d'études scientifiques de Cargèse; vol I 1-3 Juillet 1991 France*".
- [6] **GOURE.J;** "*les capteurs à fibre optique; optoélectronique; Institut d'études scientifiques de Cargèse; vol I 27Juin -7 Juillet 1989 France*".
- [7] **FERDINAUD.P;** "*Capteurs à fibre optique et réseaux associés; Edition Tec-doc Londres1992*".
- [8] **LEBLANC.G;** "*Turbo C; Edition EYROLLES 1989*".
- [9] **BADAR A.H.,MACLEAN T.S.M, GHAFoori-SHIRAZ H;**" *Radiation from circular bends in multimode and single mode optical fibres; I.E.E Proceedings, vol 136 N°3, Juin89, pp147-157*".
- [10] **GAMBLING W.A, MATSUMARA H, RAGDALE C.M, SAMMUT R.A;** "*Measurement of radiation loss in curved single -mode fibres, Microwaves, Optics and Acoustics, Juin 79, Vol2, N°4, pp 134-140*".
- [11] **MARK FERETTI;**" *Capteurs à fibre optique, Technique d'Ingénieur Fasc R415, 1994*".
- [12] **KENJO TAKASHING;**" *Stepping motors and their microprocessor control; Edition Oxford Science publications1989*".

- [13] **ABIGNOLI.M;** " Moteur pas à pas; Technique d'ingénieur Fasc D3690".
- [14] *Revue électronique; "Commande des moteurs pas à pas unipolaires et bipolaires, N°208 Novembre96".*
- [15] **FILLIPINI.J;** " Asservissements numériques,1994 ".
- [16] **M68HC11EVb;** " Evaluation Bord Users manuel; Motorola -1990 ".
- [17] **TAVERNIER.C;** " Microcontrôleur 68HC11&versions UVROM et EEPROM; Edition Dunod 1997 ".
- [18] **Honeywell,** " Fiche technique des connecteurs optoélectroniques".
- [19] "Documentation honeywell.com (fichier .html)".
- [20] **WINKLER.C, LOVE J.D, GHATEK A.K;** " loss calculations in bent multimode waves guides, optical and quantum Electroniques Vol11,1979, pp173-178".
- [21] **DALI.M, HIMA.A;** " Réalisation d'une interface récepteur micro-ordinateur, Mémoire de PFE de l'école Nationale polytechnique, Année 1999".
- [22] **MARCUSE D,** " Curvature loss formula for optical fibers, J.Opt, vol 66, N°3, Mars76, pp216-220".
- [23] **KAUFMAN K.S, TERRAS R, MATHIS R.F,** " Curvature loss in multimode optical fibers, journal of optical society of America, vol 71,N°12,Déc.81, pp1513-1518"
- [24] "Fiche technique du constructeur de la fibre optique 'TORAY'
- [25] **SNYDER A.W, MITCHELLD.J,** Generalised Fresnel's law for loss due to curvature, Electronic Letters, Déc 73, vol.9, N°26, pp 609-610.

ANNEXES

Caractéristiques de la fibre optique choisie
données par son constructeur
"TORAY"

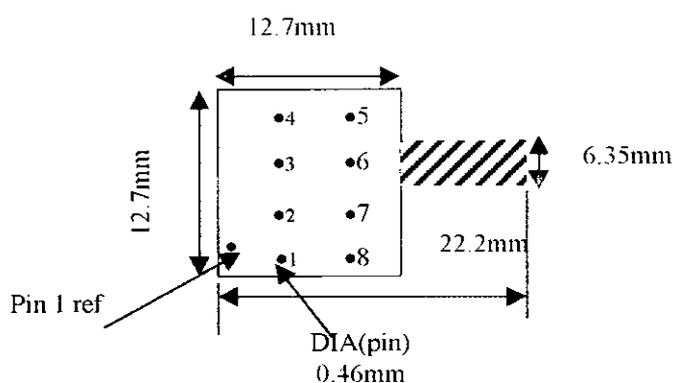
Série de la fibre	PGU-CD1001-22-E
Matière du cœur et la gaine	polymethyl methacrylate fluorinated polymer
Structure	Saut d'indice
Ouverture numérique	0.50
Angle d'acceptance (degrés)	60
Diamètre de la fibre(cœur) (mm)	1
Atténuation dB/m à 650nm	Inférieur à 0. 20
Température d'utilisation permanente (°C)	40 ~70
Rayon de courbure autorisé(mm)	>9
Domaines d'utilisation de ce type de fibre	Transmission des données Guide de lumière Capteur optique Appareils électriques Affichages

Caractéristiques des modules optoélectroniques :
données par le constructeur
"HONEYWELL"

1. Transmetteur de la série HFE 4400

Numéro de la série	Description	Puissance injectée dans la fibre				I_f (mA)	Temps de réponse typique t_r (nS)
		MIN		TYP			
		μ W	dBm	μ W	dBm		
HFE4401-016	LED	25	-16	30	-15	50	6

Information sur le boîtier et son brochage



FigureB.1: Schéma du boîtier du transmetteur HFE 4401-016

N° de pin	1	2	3	4	5	6	7	8
Description	N	A	K	N	N	A	A	N

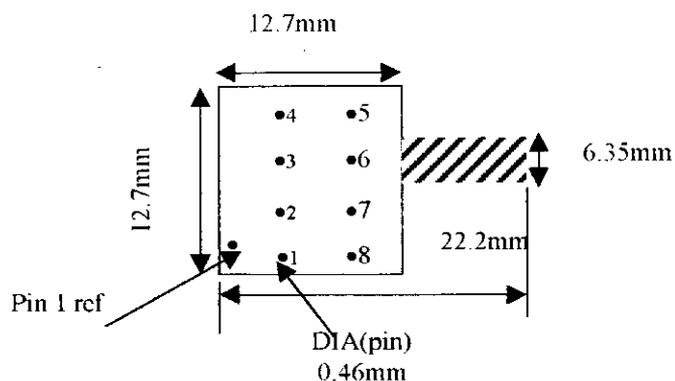
N.B. A: anode, K: cathode, N: non connectée

2. récepteur de la série HFD 3400

Les caractéristiques suivantes sont données pour une température de 25°C et pour une tension de polarisation $V_{CC} = 5V$:

Numéro de la série	Description	Sensibilité (mV/ μ W)		Largeur de Bande (MHz)	tension du bruit de sortie (mV)	Temps de réponse typique t_r (nS)
		MIN	TYP			
HFD3401-002	35 MHz récepteur analogue	4	6	35	0.16	10

Information sur le boîtier et son brochage



FigureB.2: Schéma du boîtier du récepteur HFD 3401-002

N° de pin	1	2	3	4	5	6	7	8
Description	N	O	N	N	N	V	G	N

N.B. O: sortie, V: V_{CC} , N: non connectée, G: masse.