

24/78

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

2ex

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
— المكتبة —
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

FILIERE INGENIEUR OPTION ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

TELECOMMUNICATIONS PAR FIBRES OPTIQUES

Projet d'une Liaison Urbaine 34 Mbits
et d'une Liaison Interurbaine 140 Mbits

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

Proposé par : M. BEN-MERIEM
Etudié par : Mlles. KHELIL Fadéla
et AMAROUAYACHE Anissa

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

FILIERE INGENIEUR OPTION ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

TELECOMMUNICATIONS PAR FIBRES OPTIQUES

Projet d'une Liaison Urbaine 34 Mbits
et d'une Liaison Interurbaine 140 Mbits

Proposé par : M. BEN-MERIEM
Etudié par : Mlles. KHELIL Fadéla
et AMAROUAYACH E Anissa

Année 1978

TABLE DES MATIERES.

A. HISTORIQUE

I - GENERALITES.....	Page	1
1° Introduction		1
2° Définition		1
II - DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSMISSION.....		1
1° Support matériel.....		2
2° Atmosphère.....		2
III - SUPPORTS MATERIELS DE TRANSMISSION.....		2
1° Le fil nu.....		2
2° Les paires symétriques et quartes en câble.....		3
3° La paire coaxiale, et quartes en câbles.....		3
4° Les guides d'ondes.....		4
5° Les fibres optiques.....		5

B. ETUDE THEORIQUE

I - LES FIBRES OPTIQUES.....		6
1° Généralités.....		7
2° Composants primaires et caractérisation des fibres optiques.-		10
3° Technologie des fibres optiques.....		13
II - AFFAIBLISSEMENTS DANS LES FIBRES OPTIQUES.		
1° Introduction.....		16
2° Mesure d'affaiblissement total.....		16
3° Pertes par absorption et méthode de mesure.....		17
4° Pertes par diffusion et méthode de mesure.....		19
III - THEORIE DU FILTRAGE APPLIQUEE AUX FIBRES OPTIQUES.		25
1° Introduction.....		25
2° Réponse impulsionnelle des fibres multimodes...		26
3° Elargissement à mi-hauteur d'une impulsion de DIRAC		31
4° Fonction de transfert d'une fibre multimode.....		34
5° Conclusions théoriques.....		34
6° Aspects expérimentaux.....		35
7° Conclusion.....		36
IV - SOURCES DE LUMIERES A S CONDUCTEURS POUR TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES.		
1° Introduction.....		37
2° Emission spontanée et stimulée dans les S Conducteurs		38
3° Matériaux S Conducteurs émetteurs de rayonnement		39
4° Durée de Vie photon, condition de seuil.....		40
5° Emetteur électroluminescent.....		41
6° Structure des émetteurs électroluminescents.....		43
7° Caractéristiques électriques.....		44.

8°	Caractéristiques de Optiques	45
9°	Caractéristiques de transfert.....	45
10°	Fiabilité.....	46
11°	Conclusion.....	46

V - PHOTODETECTEURS POUR TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES

1°	Introduction.....	
2°	Analyse du comportement de la diode photoélectriquePIN	47
3°	Diode de détection à avalanche.....	50
4°	Choix d'une photodiode pour télécommunications optiques	50
5°	Conclusion.....	

C CONCEPTION : PROJET DE LIAISON

I -	Transmission numérique	51
1°	Choix du numérique.....	51
2°	Câbles optiques.....	52
II -	Projet de liaison.	
1°	Introduction.....	56
2°	Liaison urbaine (34 M Bits)	57
3°	Liaison interurbaine (140 M bits).....	63

D CONCLUSION

.....	66
-------	----

A - HISTORIQUE

I - GENERALITES :

1°) Introduction

Aujourd'hui téléphoner ne suffit plus, il faut pouvoir transmettre des données, des graphes, des images animées; interconnecter entre eux des ordinateurs, dialoguer par l'intermédiaire d'un visiophone et bientôt utiliser d'autres moyens.

Le 20 ième siècle est donc celui des télécommunications.

Dans les pays industrialisés comme dans les pays en voie de développement qu'il s'agisse de l'industrie, du commerce des relations sociales les télécommunications sont là et elles constituent l'organe moteur de la collectivité.-

Partout dans le monde on veut communiquer de plus en plus, de mieux en mieux, de plus en plus vite et se transmettre des messages de plus en plus riches et divers .

L'on assiste actuellement à un encombrement progressif du spectre radioélectrique.

L'apparition de la télévision, dont un canal occupe à lui seul des centaines de voies téléphoniques a augmenté les besoins.

L'homme a contribué à l'engorgement du spectre des fréquences jusqu'alors utilisées ce qui explique l'évolution des systèmes de télécommunications, en quelque sorte leur historique.

2°) Définition

Tout système de transmission est composé de deux parties

- support de transmission
- Deux entretités : l'émetteur et le récepteur.

II - Différents systèmes de transmission :

Les supports de transmission constituant les réseaux de télécommunications sont essentiellement l'atmosphère terrestre et les câbles (bifilaires et coaxiaux).

Mais le besoin de transmettre toujours plus d'informations conduit à utiliser des fréquences élevées.

Pour résoudre les problèmes de saturation rencontrés dans fréquences plus basses, de nouveaux supports de transmission vont sans aucun doute renforcer les systèmes existants :.

- C'est le cas des guides d'ondes pour les transmissions de grandes capacités.
- Et les fibres optiques dans un avenir très proche.

On voit donc qu'il existe deux grandes classes de **systèmes** de transmission. :

1°) Systèmes de transmission sur support matériels .

Ces systèmes utilisent :

- Les paires symétriques
- Les paires coaxiales
- Les guides d'ondes
- Les fibres optiques. -

2°) Système de transmission utilisant l'atmosphère.

L'atmosphère terrestre est utilisée dans les liaisons radioélectriques conventionnelles, et les faisceaux hertziens.

Avec l'introduction massive des guides d'ondes, les prévisions relatives au progrès des communications radioélectriques se verront limitées. -

A partir de 30 GHZ, l'atmosphère ne s'adapte plus car plus les gammes de fréquences s'élèvent plus la propagation des ondes est gênée par, le brouillard, les brusques changements de températures et la diversité des couches stratifiées de l'atmosphère, en conséquence le développement de ces supports de transmission ne sera probablement pas spectaculaire.

Il n'en reste pas moins que les faisceaux hertziens, continueront à être utilisés du fait de leur commodité et économie, et les efforts dans la bande 20- 30 GHZ ne cessent d'augmenter.

Le but du sujet étant l'étude des transmissions par fibres optiques, on ne s'étendra donc pas sur les transmissions utilisant l'atmosphère, seuls les supports matériels de transmission seront développés dans l'ordre chronologique de leur apparition. -

III - Supports matériels de transmission .

1°) Le fil nu

Le fil nu est le premier support de transmission qui a été mis en oeuvre. Il pose de sérieux problèmes entre autres, difficulté de pose, frais de maintenance et surtout variations de ses caractéristiques électriques en fonction du climat . Du fait de ces nombreux inconvénients et de sa faible capacité, aucun perfectionnement appréciable n'a été noté en ce qui le concerne. -

2°) Les paires symétriques et quartes en câbles.

Les paires symétriques sont formées de deux (2) fils identiques de même diamètre et de même longueur.

Les quartes en câbles sont constituées de quatre fils ou de deux paires. Les fils conducteurs sont fabriqués à partir d'aluminium ou en cuivre, tandis que les diélectriques sont en papier ou en plastique. Les diélectriques en papier et cellulose sont dépassés actuellement. -

L'évolution dans le domaine des quartes en câble sera particulièrement importante du fait de l'utilisation massive de l'aluminium moitié moins cher que le cuivre environ.

D'autre part, les diélectriques actuellement utilisés vont être remplacés par des matériaux à base de nouvelles matières plastiques qui présentent de nombreux avantages; économie, facilité de fabrication, résistance mécanique et diminution notable de la diaphonie entre les paires. Ceci permettra de réaliser des liaisons hautes fréquences ayant la même largeur de bande que les anciennes, alors qu'on est actuellement limité en fréquence à 500 KHZ pour les paires symétriques par exemplar.

3°) La paire coaxiale, le câble coaxial

Les paires coaxiales sont utilisées dans les liaisons à grande distance et forte capacité. Leur atténuation est de l'ordre de 5 dB/Km (cinq décibels par Km).

Dans certains pays par exemple aux Etats-Unis et en Angleterre on installe des câbles dont l'enveloppe peut contenir jusqu'à quarante huit (48) paires coaxiales.

Ces câbles équipés des systèmes à soixante MHZ (60 MHZ) ont une capacité de cent mille (100 000) voies téléphoniques sur paires coaxiales.

Il faut toutefois noter que le câble coaxial ne constitue pas à lui seul le moyen de transmission proprement dit. En effet les répéteurs utilisés conjointement posent une série de problèmes.-

Pour compenser les affaiblissements linéiques, il faut installer de nombreux répéteurs moins espacés les uns des autres, ce qui reviendrait plus cher et poserait des difficultés de maintenance et de fiabilité.

Mais la nouvelle technique des circuits intégrés permet d'imaginer la possibilité de fabrication de câbles comportant des répéteurs incorporés.

Un avantage certain des câbles coaxiaux est que, contrairement aux liaisons radioélectriques, ils ne posent pas le problème de l'attribution des fréquences.-

On cherche actuellement à utiliser des fréquences de transmission de l'ordre du deux cent MHz (200) .

Ces systèmes à deux cent MHz (200) renforcent les systèmes à 60 MHz.

On commence à présent à fabriquer des câbles microcoaxiaux de diamètre plus restreint que celui des câbles classiques. Ils sont essentiellement conçus pour les transmissions numériques. En raison de leur technologie et structure moins complexes, ils sont économiquement plus avantageux, même par rapport aux paires coaxiales ordinaires.

Quoique l'on puisse dire, le câble est et restera un support de transmission fondamental dans les liaisons de télécommunications. -

4°) Les Guides d'ondes

Les guides d'ondes couvrent une gamme de fréquences de trente GMZ (30) à trois cent GMZ (300).

On utilise en général des guides d'ondes rectangulaires pour alimenter les antennes des faisceaux hertziens hyperfréquences.

Mais les recherches actuelles permettent d'espérer que l'on pourra transmettre sur des grandes distances à l'aide de guides d'ondes circulaires. En effet dans un guide d'ondes circulaire, le mode TE_{01} se propage avec un affaiblissement d'autant plus réduit que l'on monte en fréquence ($\propto \frac{1}{\lambda}$). Mais un tel guide n'est utilisable que si l'on filtre les modes parasites. D'autre part la construction et l'installation sont très délicates étant donné l'extrême exactitude requise, en ce qui concerne le diamètre et la rectitude du guide d'ondes. C'est la raison pour laquelle les rayons de courbure, admissibles pour le montage sont très grands concernant la technologie particulière du guide circulaire hélicoïdal et ceci est la source de sérieux inconvénients.

Les premiers essais (en septembre 1973) de la liaison expérimentale sur quinze Km (15) Lannion - Pleurneur - Bodon (CNET) ont permis de vérifier que les seules distorsions apportées par le guide dans une transmission étaient :

- une distorsion d'amplitude pouvant atteindre trois dB(3) dans trois cent MHz (300)
- une distorsion linéaire du temps de propagation de groupe de l'ordre de quatorze secondes (14) dans trois cent MHz (300) à quarante (40) GHz.

3

D'après les études économiques menées au C N E T une liaison numérique par guide d'ondes serait moins coûteuse qu'une liaison analogiques soixante (MHZ) (60) par coaxial dès que le nombre de voies à transmettre est supérieur à vingt mille (20.000) dans un réseau numérisé au moins à trente pour cent (30 %). -

5°) Les fibres optiques :

On développe actuellement la technique des fibres optiques pour essayer de remédier aux inconvénients que présentent la propagation du faisceau laser par l'atmosphère et de donner ainsi à ce faisceau un support physique.

En effet, très vite il apparut que les divers facteurs d'absorption de l'atmosphère ne permettaient pas d'envisager les télécommunications optiques à l'air libre, la vapeur d'eau, le gaz carbonique, l'azote, les brumes et brouillard atténuant trop fortement le rayon lumineux.

Les ondes lumineuses sont caractérisées par une capacité de transmission extrêmement grande. Les moyens optiques devraient donc satisfaire les besoins les plus vastes des civilisations à venir. Quoique 'il en soit les télécommunications optiques sont à leur début et la transmission des fréquences optiques soulève encore quelques problèmes mais les dernières réalisations permettent d'espérer que le développement sera rapide. -

B - ETUDE

THEORIQUE

// ES FIBRES OPTIQUES.

- 1° -- GENERALITES
- 2° -- COMPOSANTS PRIMAIRES ET CARACTERISATION DES FIBRES OPTIQUES.
- 3° -- THECOLOGIE DES FIBES OPTIQUES. -

1° - // GENERALITES

Les efforts des chercheurs n'ont pas cessé de se multiplier quant à l'exploitation des bandes de fréquence, vierges à savoir les fréquences très élevées. Ces recherches ont pour but d'améliorer les qualités de transmissions à tous les niveaux : capacité de transmission, fidélité, rapidité etc...

L'étude du domaine des fréquences élevées ne s'est concrétisée qu'avec l'apparition du laser vers 1960. La lumière peut dorénavant être utilisée comme fréquence porteuse. A cette date, il n'apparaissait pas encore ce que serait le milieu de transmission. La caractéristique de cette onde porteuse, à savoir sa fréquence très élevée, va orienter les recherches. Différentes possibilités sont alors analysées. -

- Atmosphère :

Cette première possibilité a été vite écartée, malgré la présence dans l'atmosphère terrestre de fenêtres de transmissions dans le domaine du visible. L'atmosphère étant un milieu perturbateur (présence d'hydrométéores etc...), on aboutit alors à la conclusion suivante: la lumière doit être guidée.

- Guidage par tuyaux :

Des lentilles qui refocalisent le faisceau lumineux après chaque passage sont placés périodiquement dans le tuyau.

C'est un système qui peut donner de bonnes performances en ce qui concerne l'atténuation du signal. Mais de nombreuses difficultés apparaissent pour situer les lentilles avec précision. D'autre part la présence de coudes dans le système fait augmenter d'une manière considérable l'atténuation. Il faut alors rapprocher les lentilles et par conséquent tenir compte de l'imperfection de leurs surfaces;.

- Guidage continu par tuyaux diélectriques ou métalliques :

Dans cette possibilité, l'atténuation du signal est augmentée d'une façon très importante, par la présence *du moindre* coude.

D'ores et déjà cet inconvénient impose d'autres recherches.

- Guidage par fibre optique :

On commença alors à offrir à l'onde lumineuse un véritable guide sous forme de fibre optique que l'on définit ainsi : (Voir fig n° 1).

La fibre optique est un guide d'ondes optiques où l'on, distingue en général deux parties : la gaine et le coeur, l'indice de réfraction de la gaine étant toujours plus faible que celui du coeur pour assurer le guidage de la lumière.

Les fibres de silice ou de verre, étant envisagés, les chercheurs se souciaient alors de minimiser au maximum les atténuations et obtenir une large bande passante (augmentation des capacités).

./.

Les premières fibres mises au point donnèrent quelques 500 DB/Km d'affaiblissement .

L'examen minutieux des constituants primaires réduisit cette considérable atténuation et en 1972 on a réussi à obtenir 4dB/Km(firme Corning).

Ces nouvelles valeurs d'affaiblissement nous permettent d'envisager sérieusement de nouveaux systèmes de télécommunications.

* REMARQUE :

La notion de très fort débit de transmission liée à la fréquence élevée de l'onde porteuse a longtemps été le souci majeur des chercheurs. Mais les nombreuses difficultés techniques de réalisation et de mise en oeuvre des fibres ont amené dans un premier temps à faire des réalisations à faible débit qui viennent concurrencer sérieusement les paires symétriques et les câbles coaxiaux . Ces caractéristiques sont déterminantes sur le plan pratique et économique, car elles permettent de résoudre les énormes problèmes quant à la pose de nouvelles canalisations, problème d'encombrement, de diaphonie ~~est...~~ dans les milieux urbains surtout.

* Classification des fibres.

De même qu'il y a une grande variété de guides d'ondes (cylindriques, coaxiaux, rectangulaires), on peut concevoir une variété de fibres optiques. On ne s'intéressera qu'aux fibres à section circulaire, leur utilisation étant la plus répandue.

Dans ce type de fibre on distinguera les possibilités suivantes :

** Fibre monomode : fig n° 2. -

C'est un guide dielectrique formé de deux milieux d'indices différents:
 un coeur d'indice n_1 et une gaine d'indice n_2 ($n_2 < n_1$)
 Le coeur a le même diamètre que la longueur d'onde utiliser, la gaine
 a un diamètre plus grand.

Une telle fibre ne laisse qu'un seul mode. Mais elle présente des
 difficultés au niveau de la réalisation : la longueur d'onde étant
 trop petite. -

** Fibre multimode : fig n° 3.

./.

Pour ces fibres le coeur a un diamètre, supérieur à celui de la longueur d'onde. La réalisation et l'exploitation d'une telle fibre sont ainsi facilitées.

** Fibre Selfoc ou à gradient d'indice : fig n°4)

La fibre est formée par un seul verre dont l'indice varie en fonction de la distance à l'axe réalisant ainsi un gradient d'indice.

2°/- Composants Primaires et caractérisation des fibres Optiques.

a) Introduction

Le choix des matériaux qui serviront à l'élaboration des fibres optiques est lié à plusieurs données.

- domaine spectral utilisé.
- possibilité de variation d'indice dans le guide
- pertes extrêmement faibles dans la bande de transmission choisie
- facilité en ce qui concerne l'élaboration de la fibre.

La distance séparant les répéteurs dans la chaîne de transmissions étant élevée, on se trouve orientés inévitablement vers le choix de matériaux isotrope, en particulier les verres et les liquides. -

b) Les verres

On s'intéresse aux verres composés d'un formateur et d'un ou plusieurs modificateurs.

Les meilleurs verres composés *commerciaux* connus ont une *atténuation* comprise entre 200 et 300 dB/Km pour 0,9 μm

Mais si nous soignons le travail en partant de matières premières pures, nous pouvons obtenir des verres présentant une atténuation d'environ 4 dB/Km pour 1,06 μm

ex : Bell laboratoires : verres silicosodocalciques :
30 dB/Km.

verre au thallium : fibres à gradient d'indices 20 dB/Km.

alors quels sont les critères de choix pour l'élaboration de nos fibres à partir de cet élément.

- bonne transmission entre 0,8 et 1 μm
- faible tendance à devitrifier
- faible affinité vis à vis de l'eau
- faible teneur en OH
- T° de fusion peu élevée.

./.

On peut donc éliminer les formateurs suivants :

- * a cause de la mauvaise transmission dans le visible et le proche infrarouge.
- Chalcogénures
- Tellurates.

- à cause de la tendance à dévitrifier
- aluminates, bismuthates, antimoniates
- * a cause de l'affinité de l'eau
- halogénures, phosphates

En conclusion, les silicates, les fluorophosphates et les germanates, sont les verres qui semblent répondre le mieux aux critères énoncés précédemment.

b) Fibre de verre.

- * Fibre de verre à deux indices

On utilise pour cela deux verres d'indices différent, le procédé de fabrication sera exposé dans le chapitre suivant :

- * fibre à gradient d'indice.

La fibre comporte un seul verre, dans lequel on produira un gradient d'indice, qui nous permettra de passer progressivement de l'indice le plus élevé (au centre), à l'indice le plus faible (à la périphérie).

c) Les liquides :

Les liquides doivent présenter une faible atténuation vers $1 \mu m$, en pourra alors préciser une caractéristique fondamentale de ces liquides.

Le liquide ne doit posséder aucune bande d'absorption dans cette région du spectre, d'où élimination des substances donnant des groupements OH et d'autres liaisons par exemple :

- liaisons - C H ; $\equiv C - H$; NH_2 ; $= N - H$; $= CH_2$
- groupements aromatiques
- double liaison (sauf si il y a conjugaison avec les halogènes).

Les restrictions étant faites, notons les produits couramment utilisés :

- Tetrachlorure de carbone
- Tetrachlorethylène
- Trichlorobromothane et l'hexachlorobutadiène.

REMARQUE :

Il existe d'autres produits susceptibles d'être utilisés avec succès.

- Solvants fluorés
- Composés organiques du silicium et du germanium
- Recherches sur les polymères.-

c) Fibres à coeur liquide :

Le type de fibre présente de nombreux avantages liés au coeur liquide. -

En effet de bonnes performances en ce qui concerne les atténuations sont atteintes, par exemple :

à $0,9 \mu\text{m}$ on a pu relever des atténuations $< 8 \text{ dB/Km}$.

La présence des impuretés dans les liquides, ne joue pas le même rôle que dans les solides. Il y a aussi possibilité de mélange des liquides, afin d'ajuster l'indice à la valeur désirée. Toutefois, il existe des inconvénients, tel que :

- Une trop grande pression est nécessaire pour introduire dans le coeur.
- Problème posé par les connexions.
- Ennuis engendrés par la dilation des liquides etc...

d) La silice.

On a préféré étudier à part ce type de verre, car il présente des qualités inégalables.

On a pu aboutir à des atténuations de l'ordre de 4 dB/Km à $0,9 \mu\text{m}$

Malgré son point de ramollissement élevé (2000°C), sa brutale variation de la viscosité avec la température, et la difficulté de faire varier l'indice, la silice se trouve être la base de tout système aspirant à des atténuations inférieures à 6 dB/Km

d' Les fibres à base de silice

Ce type de fibre joue un rôle privilégié dans l'histoire des télécommunications optiques vu les hautes performances qu'elles offrent.

Si on utilise la silice comme coeur, il faut trouver une gaine d'indice plus faible, ceci peut se faire en modifiant le degré de coordination d'un formateur ajouté à la silice.

Par exemple : étude du couple ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$)

Si on utilise la silice comme gaine, il faudra trouver un coeur d'indice supérieur sans pour cela altérer la transmission.

3° - TECHNOLOGIE DES FIBRES OPTIQUES :

a) Introduction

Les performances des fibres optiques ne cessent d'augmenter, en même temps, différentes méthodes d'élaboration des conducteurs optiques apparaissent.

On ne peut pas discerner de façon définitive une méthode préférable à toutes les autres, chacune d'elle résoud de façon convenable un problème bien précis.

b) Méthode de tirage.

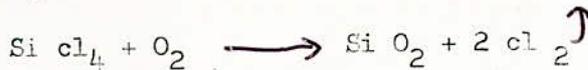
La plus grande difficulté rencontrée lors de la fabrication des fibres, est la nécessité d'avoir deux matériaux d'indices différents.

Le fibrage s'effectue généralement en filant la masse vitreuse chauffée. Les matériaux qui constitueront le coeur et la gaine sont mis en contact à haute température et refroidis simultanément lors de l'étirage. Cela impose alors le choix de matériaux de caractéristiques mécaniques très voisines. -

* Tirage de la fibre de silice.

Dans ce paragraphe sur la technologie des fibres optiques, on consacrera à la fibre de silice une place privilégiée vu les faibles pertes qu'elle introduit.

L'obtention de la silice à partir du cracking du tetrachlorure de silicium en présence d'oxygène, est régie par la réaction chimique suivante. :



On a ainsi de la silice dont l'indice est $\approx 1,458$. Le tirage nécessite le dopage de cette silice pour avoir un matériau qui lui soit compatible.

Il existe plusieurs procédés de dopage de la silice :

- dopage par les borosilicates très riches en silice (type Vycor)
- dopage par fusion du rutile Ti O_2
- depos , par craking en phase vapeur à l'intérieur d'un cylindre de Si O_2 pur, d'une mince couche de Si O_2 - Ti O_2 .

* Méthode dite "Tube et barre" et méthodes dérivées :
(fig n° 5)

Une "preforme" comprend un tube en matériau d'indice faible, dont les surfaces sont polies optiquement, et une barre en matériaux d'indice plus élevée constituant le coeur la barre est ajusté à l'intérieur du tube. Cet ajustement doit être fait avec les plus grandes précautions, car il peut engendré des pertes. La soudure de la barre et du tube peut se faire de deux façons différentes, soit au four avant étirage; soit au four pendant l'étirage.

L'expérience montre que la fibre est exactement homothétique de la preforme,.-

* Méthode du double creuset : (fig n° 6)

Deux creusets coaxiaux contiennent, l'un le verre de coeur, l'autre le verre de gaine. les deux creusets sont placés dans un four. Le verre est filé par les buses dont le diamètre et la distance conditionent les dimensions finales de la fibre .

La longueur de fibre titirée de cette manière est illimitée.

* Méthode du tirage depuis le creuset (fig n° 7)

On utilise un seul creuset, dans lequel on a préparé le verre de coeur, d'autre part, on prépare le verre de la gaine. On verse alors celui-ci sur le verre de coeur maintenu à une température convenable. On tire alors de bas en haut (voir fig n° 7) une préforme.

L'expérience a prouvé qu'il est relativement aisé d'obtenir des préformes de quelques millimètres de diamètre, on pourra par la suite les étirer comme des préformes barre tube.

* Gainage en plastique.

L'expérience a prouvé le grand intérêt de ce type de fibre. On choisit alors pour le coeur de ces fibres, de la silice pure.-

* Conclusions :

- La méthode barre tube fait intervenir des moyens classiques de fabrication, donc cela ne nécessite pas des équipements spéciaux. Les problèmes d'impuretés peuvent être évités par une préparation soignée des préformes, on peut obtenir une variété de dimensions des sections des fibres. Mais il existe toutefois de inconvénients, l'usinage des préformes est très délicat.

./.

- Le double creuset permet d'obtenir une longueur illimitée de fibre; la possibilité de contrôle de nombreux paramètres donne des sections de fibres variées. Les sources de pertes sont augmentées à cause du contact direct de la surface extérieure du coeur avec le creuset.

- Le tirage de fibre non gainée en un seul matériau, verre ou silice, qui est ensuite gainé de plastique n'est pas suffisamment étudié, mais cette méthode est pleine de promesses, car elle annulerait les problèmes de compatibilité mécanique.

D
- Le tirage depuis le creuset réunit de nombreux avantages. Les dimensions géométriques du creuset initial permettent de couvrir un large domaine de rapport gaine coeur. Les risques de pollution sont diminués, car les verres utilisés subissent moins de variations thermiques que dans toute autre méthode. Ils sont mis en préforme, directement après leur affinage, dans le même creuset.

On a ainsi mis en évidence l'intérêt de chaque méthode, on constate bien que chacune d'elles possède un domaine d'application bien précis.

./.

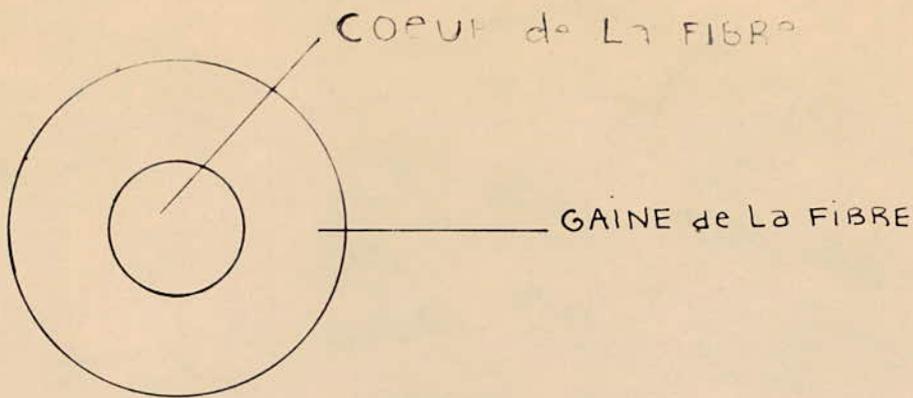
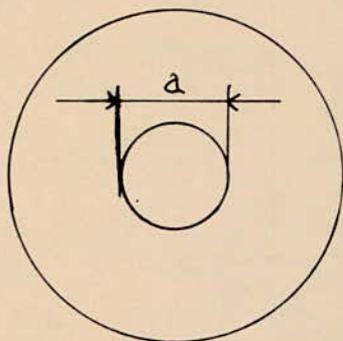
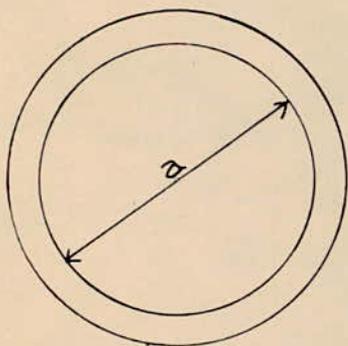


Fig n° 1 : la fibre optique



$a \approx \lambda$ typiquement $1 \text{ à } 2 \mu$

Fig n° 2 : la fibre monomode



$a \gg \lambda$ typiquement $a = 100 \mu$

Fig n° 3 : la fibre multimode

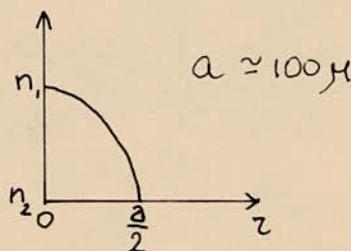
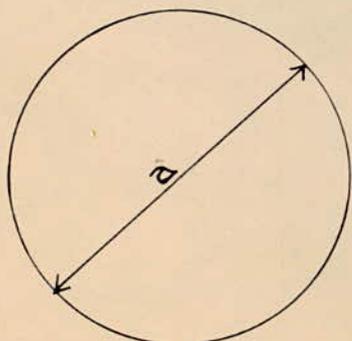


Fig n° 4 : la fibre à gradient d'indice

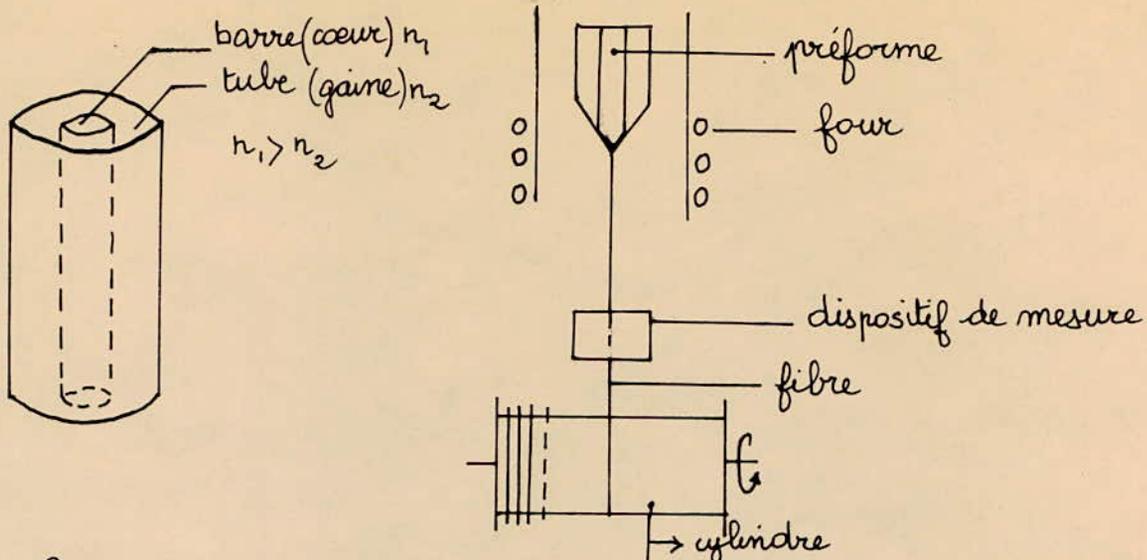


Fig n° 5 : méthode dite « tube et barre »

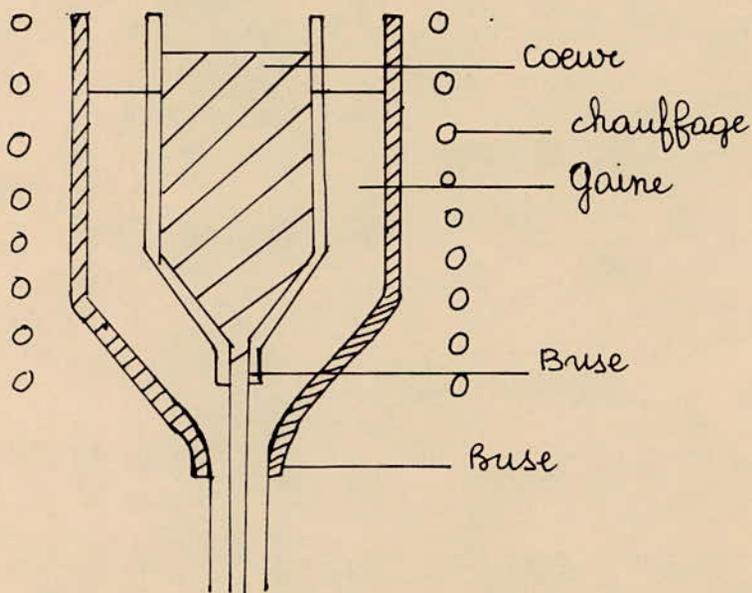


Fig n° 6 : méthode du double creuset

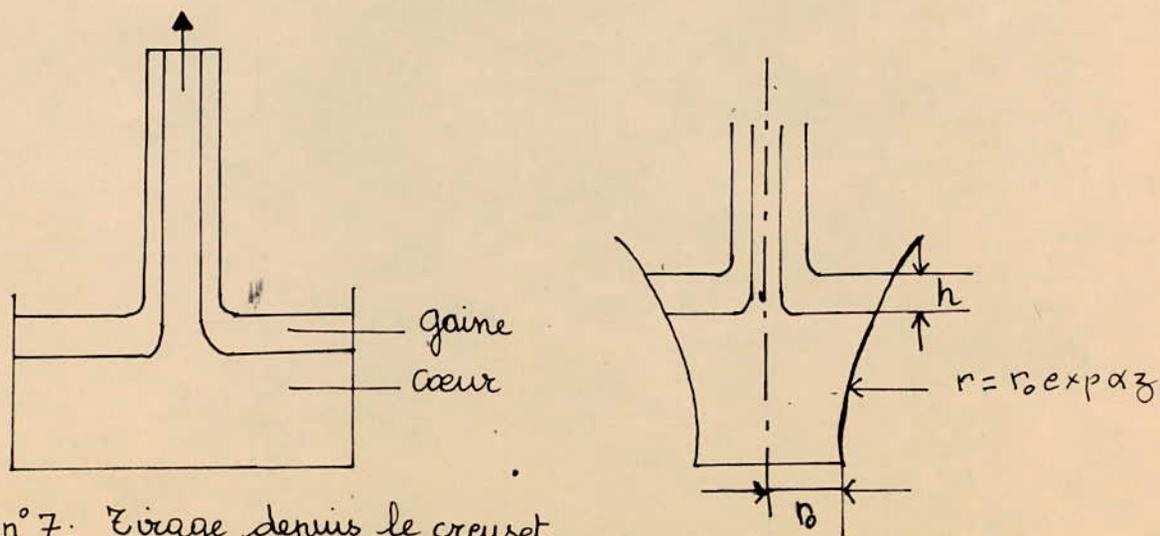


Fig n° 7 : Tirage depuis le creuset

II - AFFAIBLISSEMENT DANS LES FIBRES OPTIQUES

1° Introduction

Lors de la découverte des fibres optiques, l'attention première des chercheurs, était de minimiser l'affaiblissement optique, affaiblissement qui conditionne la mise au point d'un système viable de télécommunications optiques à grandes distances.

L'affaiblissement total est dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion présents dans la fibre. Mais on regroupe aussi dans cet affaiblissement les pertes liées à l'injection dans la fibre de la puissance optique émise par la source, et les pertes qui apparaissent au niveau des jonctions.

On ne s'intéressera qu'aux phénomènes d'absorption et de diffusion.

2° Mesure d'affaiblissement dans la fibre .

On distingue deux types principaux de mesure; les mesures spectrales qui sont faites dans une gamme étendue de longueur d'onde, et les mesures ponctuelles qui sont faites à une seule longueur d'onde.

On propose le schéma de la figure (8)

L'extrémité 1 de la fibre est réglée puis parfaitement maintenue au foyer de l'objectif qui forme sur elle l'image de la fente de sortie d'un monochromateur. La fibre passe dans un liquide dont l'indice est supérieur à l'indice de la gaine de façon à éliminer au départ, l'énergie qui se propage dans la gaine. L'énergie transmise par la fibre est mesurée par un détecteur (photomultiplicateur) placé dans un liquide d'indice supérieur à celui du coeur.

Le signal électrique délivré par le détecteur est enregistré en fonction de la longueur d'onde de 4000 à 11000 Å, enfin une imprimante et une perforatrice ou ruban collectent les signaux tous les 50, 100 ou 200 Å.

* REMARQUE :

La mesure d'atténuation totale s'effectue en prenant une longueur de fibre suffisante (50 m par exemple) et en répétant la mesure ci-dessous en coupant à chaque fois 10 m par exemple. L'extrémité 1 est fixe.

En effectuant les rapports des signaux , on élimine à chaque mesure les cotes de l'appareillage.

Si on introduit les résultats obtenus dans un calculateur qui trace directement la courbe d'atténuation totale en fonction de (λ) pour les différents tronçons, on arrive à avoir une valeur maximale, moyenne et minimale de l'atténuation. -

L'inconvénient de ce type de mesure, (mesure d'affaiblissement total) est qu'il nous renseigne sur l'atténuation totale. Il se trouve que plusieurs phénomènes, contribuent à cet affaiblissement, les deux principaux :

- pertes par absorption
- pertes par diffusion

Les phénomènes étant d'origine différente, il serait bon de les étudier séparément.-

3° Pertes par absorption

* Pertes dues au matériau

La principale cause de pertes dans un bon matériau optique est l'absorption. Dans le visible et le proche infra-rouge, cette absorption est due aux impuretés. Les éléments de transition et les ions OH- sont les plus gênants. Donc un bon verre doit être exempt de radicaux OH, de Fe, Cu, Ni, Mn, dont les bandes d'absorption conduisent à des atténuations considérables.

* Pertes dues au fibrage.

Les pertes par absorption introduites par le fibrage ne sont importantes toutefois elles existent. Ces pertes sont présentes par exemple dans la méthode du double creuset, dans laquelle la fibre passe à travers un orifice matériel (buse), apportant ainsi une augmentation sensible de l'absorption.

* Méthode de mesure.

Le but de la méthode est de mesurer l'absorption dans de petits échantillons. L'énergie lumineuse absorbée est transformée en chaleur, la température de l'échantillon se trouve élevée. Le phénomène d'échauffement nous renseignera alors sur les performances du matériaux, en ce qui concerne l'absorption.

Soit la coefficient d'absorption, la connaissance de ce coefficient est suffisante pour déterminer avec précision l'absorption.

* Principe de mesure.

Supposons la température de l'échantillon uniforme dans l'espace .

Admettons la validité de la loi de Newton en prenant les pertes de chaleur proportionnelles à $(\theta - \theta_0)$

Comme tout système où il y a échange de chaleur, un bilan énergétique s'impose. Compte tenu des hypothèses précédentes on a :

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{\alpha a l I_0}{S h}$$

- $I_0 \rightarrow$ puissance lumineuse initiale à l'intérieur de l'échantillon.
 $S \rightarrow$ surface totale
 $C \rightarrow$ chaleur spécifique
 $h \rightarrow$ coefficient d'échange superficiel entre l'échantillon et son environnement.
 $\tau \rightarrow$ ~~cte~~ de temps et m la masse de l'échantillon
 $l \rightarrow$ longueur de l'échantillon.

La condition initiale $\theta = \theta_0$ pour $t = 0$, conduit alors à

$$\theta = \left(\theta_0 - \frac{\alpha_a l I_0}{S h} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{\alpha_a l I_0}{S h}$$

Après un certain pendant lequel la température augmente, un équilibre est atteint. Supprimons alors le faisceau lumineux. la température commence alors à baisser à partir de la température d'équilibre que l'on notera θ_1 . (voir figure n° 9).

Soit l'équation de refroidissement. :

$$\theta = \theta_1 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\theta_1 \rightarrow$ température au point d'équilibre

On peut voir que le coefficient α_a est déterminé de deux façons indépendantes.

* régime transitoire.

$$\alpha_a = \frac{m c}{l I_0} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)_0$$

* régime permanent : la perte de chaleur équilibre l'apport calorifique.

donc θ_1 intervient $\alpha_a = \frac{\theta_1 m c}{l I_0 \tau}$

Comme la mesure de la température s'effectue à l'aide d'une thermopile.

- $E \rightarrow$ f.e.m. aux bornes de la sonde
 $\epsilon_0 \rightarrow$ pouvoir thermoélectrique
 $K \rightarrow$ coefficient de contact thermique entre la sonde et le verre

posons $A = \frac{m c}{n K \epsilon_0 I_0 l}$

alors $\alpha_a = A \left(\frac{dE}{dt} \right)_0$

$$\alpha_a = \frac{\Delta E}{\tau}$$

3° Pertes par diffusion et méthode de mesure.

Rappelons que l'on travaille avec des fibres multimodes, pour lesquelles il est généralement accepté que l'optique géométrique fournisse un modèle convenable. On s'intéresse alors à la diffusion .

. Comme l'absorption , la diffusion se traduit par une perte d'une fraction d'énergie transportée par le guide. On distingue la coexistence de plusieurs types de diffusion dans la fibre :

- diffusion en volume (dans le coeur)
- diffusion à la frontière (entregaine et coeur)
- diffusion due aux éventuelles courbures de la fibre .

Remarquons que cette troisième forme de diffusion, se caractérise par des cassures qui s'opèrent au niveau des courbures, ces cassures sont irréversibles, et le phénomène de diffusion s'aggrave au cours du temps.

Alors que l'absorption ne perturbe pas le système de transmission la diffusion opère à des conversions de modes.

Comment l'explique t - on ? (figure n° 10)

Le choix judicieux des indices du coeur et de la gaine, de l'angle d'injection, permet au rayon lumineux de se propager à l'intérieur du guide par réflexion totale.

Soit maintenant un centre diffusant qui vient gêner le trajet prévu au préalable.

Cette gêne se traduit par une perte d'une partie de l'énergie véhiculée par le rayon incident. Mais la partie de l'énergie, qui est comprise dans l'angle solide indiqué sur la figure, peut se propager à nouveau par réflexion totale. Mais cette propagation se fait avec des valeurs d'angle différentes. Ces valeurs d'angles, sont différentes des valeurs que faisait la lumière incidente avec l'angle de propagation. On a alors conversion de modes.

a) - Sources de pertes par diffusion

On a énoncé dans l'introduction, les différents types de diffusion pouvant exister dans la fibre optique , essayons de les préciser.

* Diffusion en volume.

La diffusion en volume est due à deux causes:

- diffusion intrinsèque
- diffusion due aux inhomogénéités

** diffusion intrinsèque

Comme son nom l'indique , elle est due au verre lui même, tout verre diffuse la lumière. Cette diffusion est liée au processus d'élaboration du verre. Les verres sont fabriqués par fusion à haute température, et la masse vitreuse une fois solidifiée contient donc des défauts thermodynamiques, fluctuations des propriétés optiques locales. - Lorsque l'extension du défaut est inférieure à la longueur d'onde, le processus est dit de Rayleigh, lorsque l'extension du défaut est de l'ordre de la longueur d'onde, le modèle mathématique est due à Mie.

On reviendra par la suite sur ces 2 phénomènes. On conclut ce paragraphe, en constatant qu'il existe une limite intrinsèque inférieure aux pertes de diffusion.

** Diffusion due aux inhomogénéités

Une autre source de diffusion dans le verre, est constituée par les impuretés qui existent à la suite d'un traitement thermique. Mais il y a altération de ces inhomogénéités lors de l'étirage des fibres à partir de ce verre. En effet, leurs formes variera. D'autre part, l'étirage lui même introduira des impuretés qui étaient inexistantes dans le verre.

* Diffusion à la frontière entre la gaine et le coeur

Les défauts, éventuels, entre la gaine et le coeur, sont la source de diffusion. En effet, les fluctuations du diamètre du coeur, modifie le trajet du rayon lumineux et perturbe ainsi sa réflexion totale interne (voir figure n° 11). Il y a modification du facteur de réflexion à chaque réflexion. On peut tout de suite dire que l'atténuation engendrée par cette diffusion, croît avec le nombre de réflexion.

- Soit l'angle d'un rayon avant la rencontre du défaut
- x longueur de la fibre.
- d diamètre du coeur.

$$N = \text{nombre de réflexions} = \frac{x \tan \theta}{d}$$

$x \nearrow \text{alors } N \nearrow$

* Quantification de la diffusion et de l'atténuation.

Après avoir passé en revue les différents types de diffusion existant dans la fibre, il serait bon de donner quelques caractéristiques quantitatives qui permettront par la suite de considérer de façon formelle la diffusion.

** Diffusion

- Soit R le facteur de diffusion
- P_0 , puissance incidente
- $d\Omega$: angle solide dans lequel est diffusée une puissance dP_d
- Δx longueur de l'élément diffusion.

Intuitivement, on comprend que la puissance dP_d diffusée dans l'angle solide $d\Omega$ par l'élément diffusant Δx soit proportionnel à la puissance incidente P_0 à un facteur près. Le facteur est naturellement le facteur de réflexion. (figure 12).

$$dP_d = P_0 R \Delta x d\Omega$$

On voit d'après la figure, que le système est de révolution autour de la direction de la puissance incidente $\Rightarrow R = f(\theta)$
 Si on s'intéresse à la puissance perdue dans tout l'espace, on définit un coefficient de perte par diffusion, et P_d est proportionnel aux quantités suivantes :

$P_2 = \alpha z \Delta x P_0$
 on peut avoir αz sous la forme

$$\alpha z = \int_0^n 2\pi R(\theta) \sin \theta d\theta$$

$\alpha z \Rightarrow$ diffusion dans le cœur

** Atténuation totale :

Si à la diffusion s'ajoute l'absorption, on définit un coefficient si on veut faire le point (comme précédemment) en ce qui concerne la puissance dissipée on a :

$P(0)$ puissance à l'origine, à l'entrée de l'échantillon

$P(x, \varphi)$ puissance se propageant suivant un angle à une distance x de l'origine.

α_t Coefficient de pertes totales.

$$P(x, \varphi) = P(0, \varphi) \exp[-(\alpha_z + \alpha_a)x] r(\varphi) \frac{x \sin \varphi}{a}$$

Par intégration sur tous les angles φ (tous les modes pouvant se propager)

$$P(x) = P_0 [\exp(-\alpha_t x)]$$

b) Mesure du coefficient de diffusion α_s

Moyennant certaines expériences, on se propose de :

- mesurer le coefficient d'atténuation α_s (coefficient total de diffusion)

- connaître la répartition de l'énergie dans l'espace.

* Mesure de α_s

- sphère d'Ulbricht.

C'est une sphère dont la paroi est recouverte d'une peinture diffusante cette peinture diffuse la lumière suivant la loi de Lambert.

Rappel de la loi de Lambert.

Une source lumineuse ponctuelle ou étendue rayonne suivant la loi de Lambert, lorsque son intensité lumineuse est la même en tous ses points et dans toutes les directions.

La fibre à examiner traverse la sphère, l'énergie émise par celle-ci est uniformément répartie sur toute la surface de la sphère.

La sphère présente un petit trou de mesure, devant lequel est placé le détecteur qui est ici un photomultiplicateur.

Expérience :

Introduisons la fibre de part en part suivant un diamètre de longueur D , on détecte alors une puissance proportionnelle à la puissance diffusée, par D cm de fibre. Il suffit de présenter l'origine ou l'extrémité de la fibre pour être renseigné sur la puissance $P(x)$ qui entre de la fibre ou qui sort de la fibre.

Ces différentes mesures , permettent de calculer le coefficient global d'atténuation α_s qui apparaît dans la relation.

$$P(x) = \alpha_s D P_0 \exp(-\alpha x)$$

Résultats.

On propose le tableau de résultat (I). Les valeurs trouvées ne permettent pas de différencier les pertes en volume, des pertes dues aux imperfections entre le coeur et la gaine. Toutefois, la différence entre les valeurs maximales et les valeurs minimales ~~de α_s~~ peuvent renseigner sur l'atténuation introduite par des centres diffusants.

c) Diagramme de diffusion

La connaissance du coefficient global de diffusion, ne suffit pas à situer les différents types de diffusion.

Un dispositif de mesure a été mis au point pour relever un diagramme de diffusion.

* Dispositif (figure n° 13)

Une cuve semi cylindrique fixe repose en son centre sur un plateau mobile sur lequel est fixé un détecteur.

La fibre est placée dans un tube noir opaque sectionné sur une longueur de 1 cm.

La cuve est pleine d'un liquide adaptateur d'indice de façon à permettre à toute la lumière qui se propage dans la gaine de sortir.

Le flux de lumière diffusé par la fibre dans la direction de mesure, est réfléchi par un miroir de façon à entrer dans un conducteur de lumière.

Mais vu l'intensité du flux lumineux , celui-ci doit être manipulé d'une autre façon. On doit utiliser un dispositif performant.

Présentation de ce nouveau système .

Le faisceau incident entrant dans la fibre est découpé à une certaine cadence grâce à un modulateur. Une lame transparente réfléchit une partie du faisceau sur une photodiode qui est reliée à un système de mise en forme qui fournit une impulsion sur A ou B suivant que la photodiode est éclairée ou pas. -

Quand la photodiode n'est pas éclairée, l'impulsion sur B ouvre le canal B où l'on enregistre un nombre d'impulsions fournies par le photomultiplicateur, cela correspond au bruit. Quand la photodiode est éclairée, l'impulsion sur A ouvre le canal A, dans lequel on enregistre un nombre d'impulsions , qui correspondent au signal + bruit. Le temps de comptage étant le même, par simple différence on déduit le nombre d'impulsions correspondant à la quantité de lumière diffusée.

N.B.

On relève d'abord le diagramme de diffusion dans l'air, l'intérêt d'une telle mesure, est de comparer les résultats obtenus avec ceux de la sphère d'Ulbricht.

* Relevé des diagrammes :

. dans l'air : figure 14.

On considère qu'entre 45° et 135° la lumière détectée provient de la diffusion dans le coeur de la fibre.

A l'intérieur de cet intervalle, on n'a pas pu déterminer, avec exactitude l'existence de ces pics. Toutefois, il semble légitime de mettre en cause la forme cylindrique de la fibre, (dioptré cylindrique constituant la surface de séparation de la gaine et le coeur), et les éventuelles irrégularités de la surface de séparation. Les irrégularités permettent aux rayons rasants de sortir.

Comparaison avec les résultats d'Ulbricht : tableau 2

Il est possible de connaître α_s à partir du diagramme de diffusion, on peut alors le comparer au résultat de la sphère d'Ulbricht.

Compte tenu de l'irrégularité des fibres, on peut dire que les deux méthodes ont donné des résultats analogues.

. En présence du liquide : figure 15

On voit que l'on retrouve la même allure entre 45° et 135° , mais à l'extérieur de cet intervalle, l'intensité est plus importante, ceci s'explique par la présence du liquide. En effet son rôle est de permettre à toute l'énergie qui traverse la gaine, de sortir, et d'être par conséquent mesurée. Ceci n'est pas possible avec l'air où une partie de l'énergie peut rester dans la gaine.

* Interpretation des résultats.

Comparons les résultats expérimentaux, aux résultats théoriques de Rayleigh par exemple :

** diffusion de Rayleigh

La théorie de Rayleigh est l'une des théories les plus couramment utilisée pour rendre compte du phénomène de diffusion dans un verre. Elle s'applique aux centres diffusants de petites dimensions devant la longueur d'onde. On trouve.

$$R(\theta) = R(90^\circ) (1 + \cos^2 \theta) \quad (1)$$

Mais avant de se prononcer, il serait convenable de tenir compte des variations qu'introduira le dioptré cylindrique dans (1) .

$$R(\theta) = A \left[1 + \left(\frac{n_2 \cos \theta}{n_1} \right)^2 \right] \times \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \sqrt{\frac{n_2^2 (1 - \cos^2 \theta)}{n_1^2 - n_2^2 \cos^2 \theta}} + \frac{\sqrt{n_2^2 (1 - \cos^2 \theta) (n_1^2 - n_2^2)}}{n_1^2 - n_2^2 \cos^2 \theta} \right)$$

On résume cela à l'aide d'un graphe : figure 16
Cette correction améliore déjà le précédent graphe, on voit apparaître des maxima à 30° et 150° , maxima qui nous rappellent les pics sans pour autant avoir leur position exacte, et leur amplitude.

** diffusion de Rayleigh dans (figure 17).

Cette théorie tient compte de la taille et de la forme des centres diffusants, on aboutit alors à l'établissement de formule pour R qui permette là aussi de tracer un graphe. Ce tracé ne renseigne pas, car plusieurs pics y figurent, mais la dissymétrie autour de 90° existe. C'est déjà une amélioration par rapport à la théorie de Rayleigh. On a alors amélioré la théorie, en introduisant une distribution statistique des tailles des centres de diffusion. Les différents pics disparaissent alors, et on garde la dissymétrie par rapport à 90° (figure 18).

En conclusion, on peut dire qu'il est possible d'établir à partir de la théorie des courbes qui se rapprochent des courbes expérimentales, uniquement dans l'intervalle. (45° 15°).-

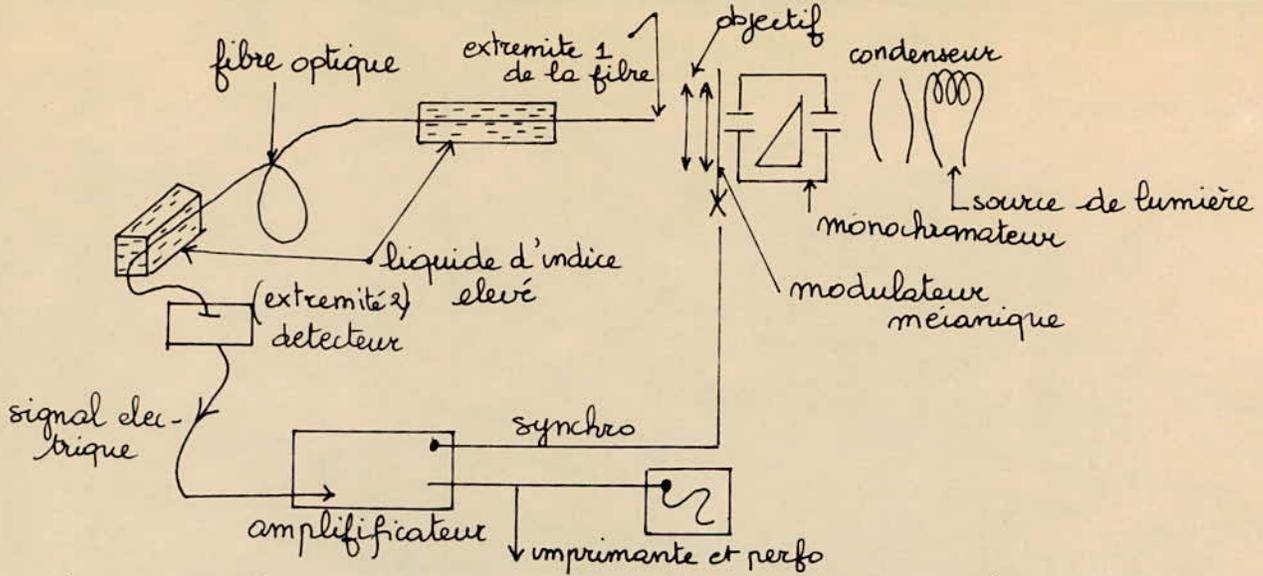


Fig n°8 : schéma d'un banc de mesure de pertes totales

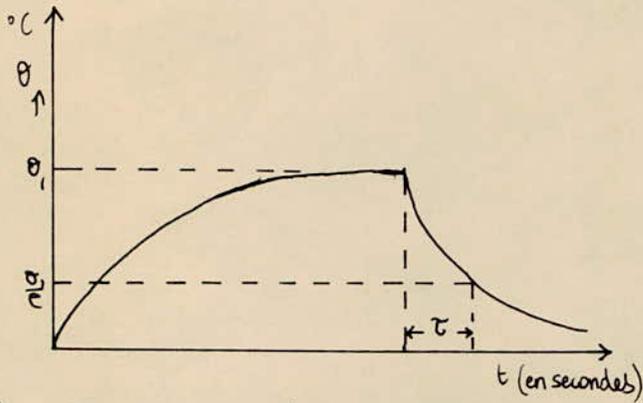


Fig n°9 : courbe d'échauffement et de refroidissement d'un échantillon de verre

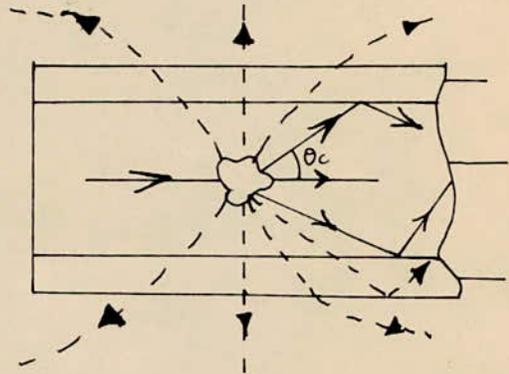


Fig n°10 : diffusion dans le coeur d'une fibre optique

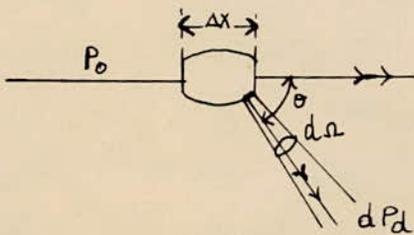


Fig n°12 : diffusion dans le verre

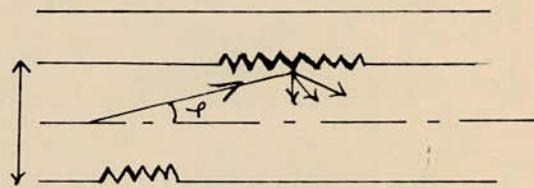


Fig n°11 : diffusion à la frontière entre la gaine et le coeur

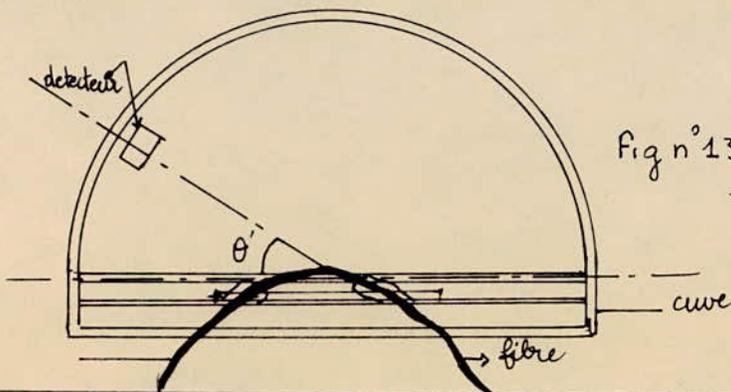


Fig n°13 : schéma de l'appareillage pour la mesure du diagramme de diffusion

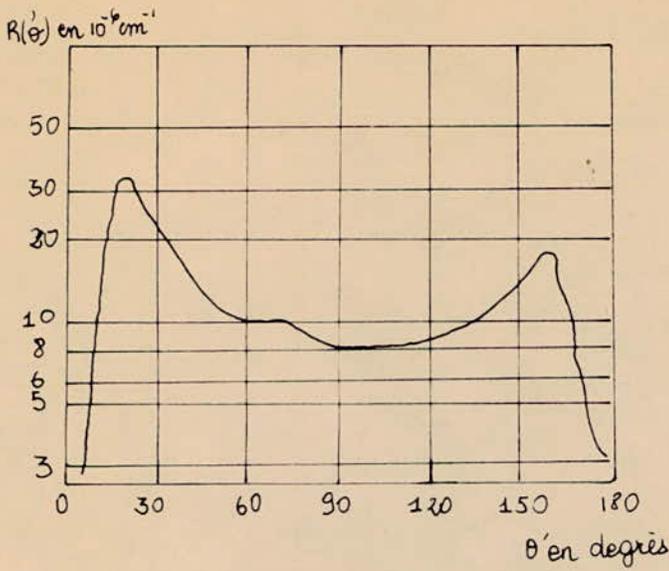


Fig 14 : Diagramme de diffusion dans l'air

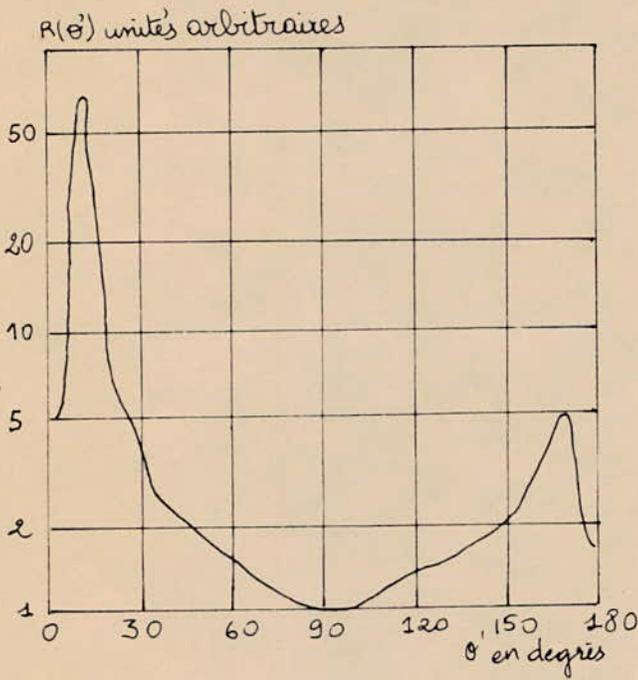


Fig 15 : Diagramme de diffusion avec liquide adaptateur d'indice

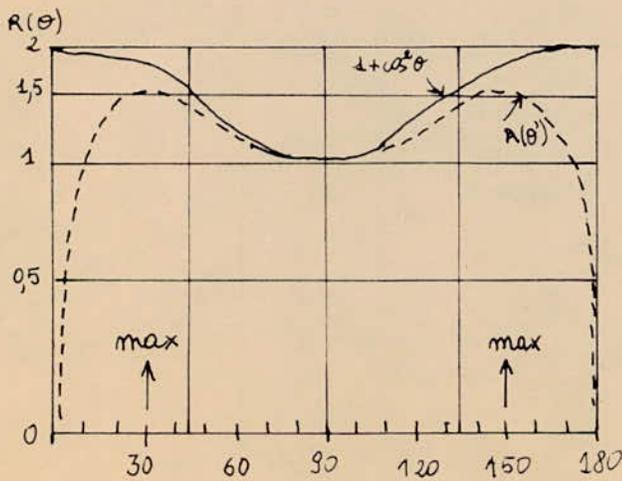


Fig 16 : correction du dioptré cylindrique

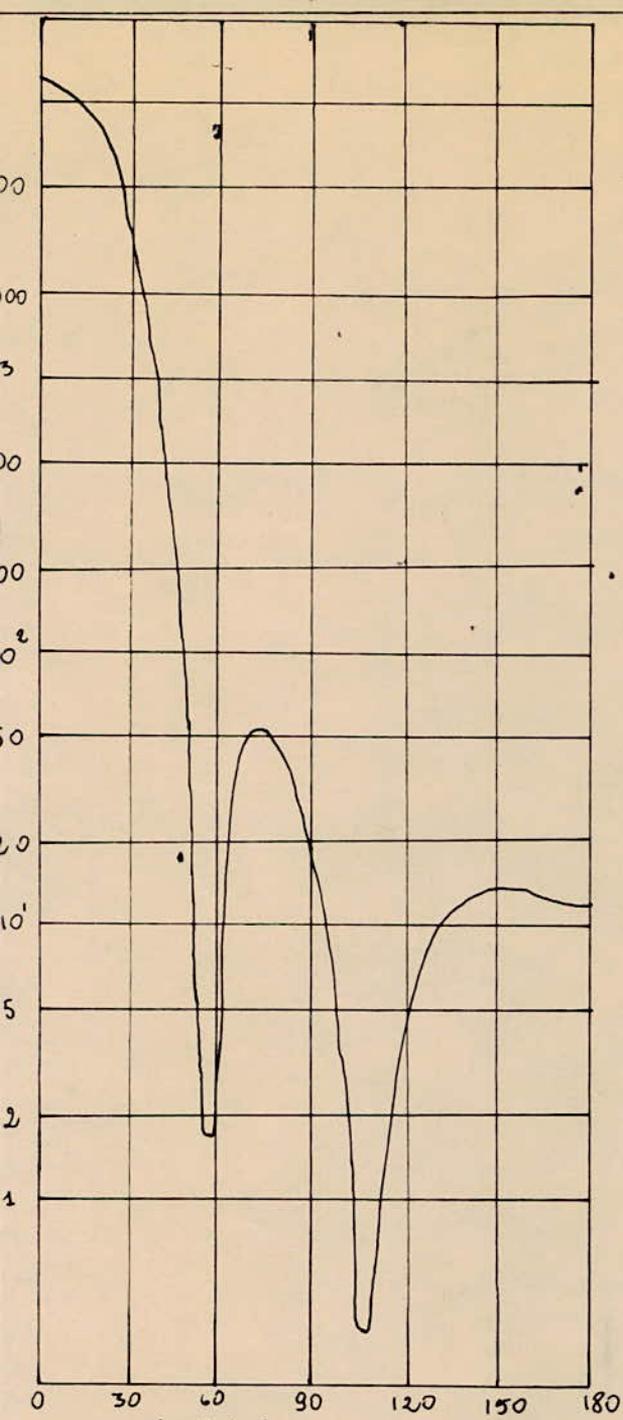


Fig n°17: Diagramme de diffusion. Théorie de Rayleigh. Gans. Centres diffusants sphériques. Rayon unique: $0,3 \mu\text{m}$, longueur d'onde 6328 \AA dans un milieu d'indice $1,620$.

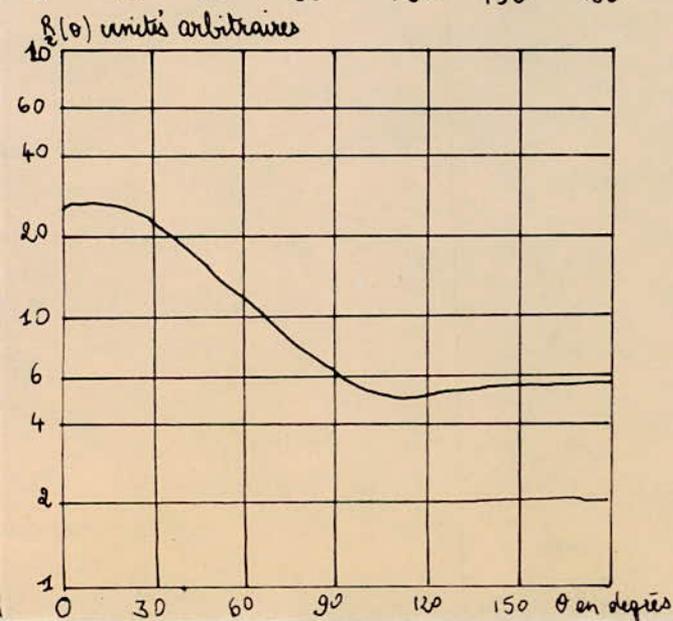


Fig n°18: Diagramme de diffusion. Théorie de Rayleigh gans: Centres diffusants sphériques. Distribution de Gauss Rayleigh. Rayon moyen: $3 \cdot 10^2 \mu\text{m}$, longueur d'onde 6328 \AA dans un milieu d'indice $1,620$.

Tableau n°1: Mesures de α_s et α_t pour différentes fibres étirées

Verre de cœur indice à 6328 Å	Verre de gaine indice à 6328 Å	Diamètre en (µm)		Atténuation totale		Atténuation par diffusion		α_s/α_t moyen
		extérieure	intérieure	α_t (en 10^{-2} km^{-1})	α_t (en dB/km)	α_s (en 10^{-4} km^{-1})	meilleure α_s en dB/k	
F7 Schott 1,620	BK7 Schott 1,516	100	80	$2,8 \pm 0,1$	1210 ± 50	$1,7 \pm 2,7$	75	10%
F2 Schott 1,615	B 16,64 Soviel 1,516	100	80	$1,9 \pm 0,2$	820 ± 80	$0,9 \pm 1,3$	39	5%
F7 Schott 1,620	BK7 Schott 1,516	60	40	$4,2 \pm 0,2$	1800 ± 90	$6,5 \pm 8$	280	15%
F2 Schott 1,615	B 16,64 Soviel 1,516	60	40	$2,2 \pm 0,2$	950 ± 80	$3,4 \pm 5,8$	150	20%
F7 Schott 1,620	BK7 Schott 1,516	38	30	$2,2 \pm 0,1$	950 ± 40	$1 \pm 1,2$	43	5%
F2 Schott 1,615	B 16,64 Soviel 1,516	38	30	$1,7 \pm 0,2$	740 ± 80	$0,9 \pm 1,2$	39	5%
F2 Schott 1,615	B 16,64 Soviel 1,516	60 ± 2	56 ± 58	$3,5 \pm 0,3$	1500 ± 100	$1,5 \pm 2,5$	110	10%
F7 Schott 1,620 fibre anglaise	ME 1 Pilkington 1,487	100	50	$1,4 \pm 0,08$	600 ± 30	$0,85 \pm 0,95$	38	6%

Tableau n°2: Mesure de α_s pour deux fibres

Verre du cœur de la fibre	Diamètre extérieure en (µm)	α_s moyen en dB/km	
		Méthode de la sphère d'Ulbricht	Méthode du diagramme
F2 Schott	100	45	55
F7 Schott	60	300	340

III - THEORIE DU FILTRAGE APPLIQUEE AUX FIBRES OPTIQUES

1° INTRODUCTION :

1 1° Généralités :

On a commencé par étudier la fibre optique comme un cas particulier de guide diélectrique, autrement dit, par l'intermédiaire des équations de Maxwell et de la notion de modes de propagation. On obtenait de cette façon, des expressions rigoureuses, mais très compliquées.

D'autre part, les paramètres caractéristiques des fibres, telle que l'injection de la puissance optique dans la fibre, les pertes à la frontière entre la gaine et le coeur, étaient très difficiles à introduire. Les difficultés ont orienté les recherches vers une théorie, reposant sur des principes géométriques simples : En effet en utilisant l'approximation géométrique de la lumière, c'est à dire la notion de rayon, on remarque que l'on peut arriver aisément à la plupart des conclusions de la théorie modale. De plus cette théorie, de rayons, permet de concevoir les fibres comme un milieu linéaire et par conséquent, la théorie du filtrage peut être appliquée.

1 2° Théorie du filtrage :

A partir des hypothèses énoncées précédemment, la fibre peut être considérée comme un milieu linéaire, la théorie du filtrage est applicable. Il serait alors bon d'explicitier ce que l'on entend par filtre, et théorie du filtrage.

- La théorie du signal ne s'intéresse pas aux composants d'un système de transmission, mais aux grandeurs qui caractérisent ses relations avec l'extérieur. On pourrait alors se poser la question suivante :

" Quel est la réponse d'un système à une action quelconque?"
Si on est sans hypothèses sur le système, la question est trop générale on ne voit guère comment dépasser son énoncé.

On est amené à définir une classe particulière de systèmes classe que l'on nommera filtres.

Définition :

Tout système, linéaire, continu, stationnaire est appelé filtre .

Explicitations brièvement chacun des 3 critères .

a) linéarité

Les systèmes linéaires satisfont au principe de superposition.

- Soient $x_1(t)$ et $x_2(t)$ deux signaux de réponses respectives $y_1(t)$ et $y_2(t)$
toute combinaison $a x_1(t) + b x_2(t)$ à coefficients constants réels
 a et b pour réponse la même combinaison linéaire. -

b) Continuité

La continuité exprime le fait que le système associe à la limite d'une suite d'actions, la limite des réponses respectives. -

c) Stationarité :

La notion de stationarité est celle de permanence dans le temps. De façon plus frappante, on peut dire que ce comportement ne dépend pas de l'instant origine.

$$x(t) \rightarrow y(t) \Rightarrow x(t-\tau) \rightarrow y(t-\tau)$$

La théorie du filtrage appliquée à la fibre (considérée évidemment comme un filtre) va permettre la détermination de la réponse impulsionnelle de celle-ci, moyennant certains résultats tels que la formule de Kapanay, que l'on exposera dans le paragraphe suivant.

2° Réponse impulsionnelle des fibres multimodes.

2. 1° Facteur influant ou la propagation.

Il est utile d'abord d'explicitier encore une fois, ce que l'on entend par qualité de transmission. Elle se traduit par les critères suivants.

- faible distorsion dans la gamme des fréquences transmises.
- Grande capacité de transmission.

Pour juger, de tous ces critères, il faut déterminer la réponse d'une fibre à un signal quelconque, cela revient à étudier dans un premier temps, les facteurs influant sur la propagation de ce signal.

Comme tout support de transmission, la fibre optique, altère le signal qu'elle reçoit, autrement dit, l'information subit des déformations. Rappelons brièvement et de façon générale, les facteurs qui entraînent des déformations. On peut faire regrouper ces facteurs de la façon suivante:

- affaiblissement total du signal
- distorsion du signal. -

a) affaiblissement total du signal.

Cette partie a été largement étudiée précédemment, Toutefois, notons, que l'affaiblissement total est dû non seulement aux pertes par diffusion et par absorption inhérente à la fibre elle-même mais encore à l'injection dans la fibre de la puissance optique émise par la source aux pertes qui apparaissent au niveau des jonctions. -

b) distorsion du signal /

La distorsion du signal provient surtout de la dispersion des impulsions, ou de la limitation de la largeur de bande.

Il est clair, que les autres sources de distorsion, telle que les effets non linéaires de la fibre, ne nous intéressent pas, de toute manière ces effets peuvent être maintenus à un niveau suffisamment faible pour pouvoir être négligés.

Explicitons le phénomène de dispersion :

- A chaque mode correspond un rayon plus au moins sineux, un trajet plus ou moins long. Une impulsion brève dont l'énergie se partage entre tous ces rayons se trouve au bout d'une certaine distance allongée de la différence de durée entre le trajet le plus long et le trajet le plus court qui suit l'axe.

REMARQUE :

L'allongement observé est beaucoup plus grand avec les fibres à saut d'indice qu'avec les fibres à gradient d'indice. En effet, si les rayons qui s'écartent de l'axe font bien les plus longs parcours, il les font aussi plus vite, puisque l'indice décroît, il y a une sorte de refocalisation continue de la lumière.

- Une seconde cause de dispersion, est la variation des indices de réfraction et par conséquent, des vitesses de propagation des modes en fonction de la fréquence.

- UN autre facteur contribuant à la dispersion des impulsions est la conversion des modes. L'énergie injectée dans un mode, peut se retrouver, à la suite d'imperfections, dans un autre mode.

La réponse impulsionnelle tient compte des différents facteurs qui influent sur la propagation du signal. Pour connaître avec précision la réponse impulsionnelle, on introduit la formule de Kapanay généralisé.

2 2° Formule de Kapanay généralisée : (fig n° 19)

Avant de présenter cette formule, précisons les hypothèses, et donnons quelques définitions. -

La fibre sera supposée rectiligne, le problème de la courbure et des rayons hélicoïdaux ne sera pas envisagé.

Soit une fibre de longueur L de diamètre d, d'indice de coeur n et d'indice de gaine n_g.

* Rappelons que le guidage de la lumière ne peut avoir lieu que si l'indice de réfraction n du coeur est supérieur à l'indice n_g de la gaine.

Un rayon de lumière à l'intérieur du coeur de la fibre est réfléchi à l'interface coeur gaine, l'angle θ est maintenu pour les réflexions suivantes.

Pour que la réflexion soit totale il faut que α soit supérieur à

$$\text{Arcc} \sin \frac{n_g}{n}$$

$$\sin \alpha = \frac{n_g}{n} \Rightarrow \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_0) = \cos \theta_0$$
$$-27^\circ \Rightarrow \cos \theta_0 = \frac{n_g}{n}$$

* Délai de propagation

Le délai de propagation est le temps mis par l'information, pour parcourir une longueur L de fibre. Ce parcours se fait dans la direction θ . Soit $\tau(\theta)$ ce délai de propagation.

$$\tau(\theta) = \frac{x}{v}$$

D'autre part, on sait que $v = \frac{c}{n}$
 c : Vitesse de la lumière
 n : Indice du milieu.

$$\Rightarrow \tau(\theta) = \frac{n x}{c}$$

$$\text{or } x = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\cos \theta} = \frac{L}{\cos \theta}$$

$$\Rightarrow \tau(\theta) = \frac{nL}{c \cos \theta} \quad \text{posons } \tau_0 = \frac{nL}{c}$$

ona $\tau(\theta) = \frac{\tau_0}{\cos \theta}$

* Evaluation des pertes.

Rappelons brièvement les résultats établis lors de l'étude de la diffusion.

- Soit α_a le coefficient d'absorption par atténuation.
- Soit α_r le coefficient de diffusion dans le coeur
- $\tau(\theta)$ est le facteur de réflexion.
- $\frac{L \tan \theta}{a}$ est le nombre de réflexions possibles.

Soit $P(x, \theta)$ la puissance qui se propage à la distance x de l'origine où la puissance est $P(0, \theta)$. Vu les différentes atténuations possibles (atténuation due à l'absorption, la diffusion dans le coeur, et celle due à imperfections de la frontière. l'expression de $P(x, \theta)$ en fonction de $P(0, \theta)$ est

$$P(x, \theta) = P(0, \theta) e^{-\alpha_a x} e^{-\alpha_r x} \tau(\theta)^{\frac{L \tan \theta}{a}}$$

Nous concluons alors que :

- Le terme $e^{-\alpha_a x}$ exprime les pertes par absorption. Dans le cas précis de la fibre de longueur L , où la propagation se fait dans la direction θ , ce terme devient: $\exp\left[-\frac{\alpha_a L}{\cos \theta}\right]$
- Le terme $\tau(\theta)^{\frac{L \tan \theta}{a}}$ exprime les pertes par réflexions entre la gaine et le coeur. On peut écrire ce terme de la façon suivante :

$$\left[1 - a(\theta)\right]^{\frac{L \tan \theta}{a}}, \quad \text{où } a(\theta) \text{ serait une moyenne statistique rendant compte des irrégularités du fibrage.}$$

- Etablissons maintenant la formule de Kapanay généralisée, formule qui exprime, que la fonction d'entrée $I(\theta, t)$ a subi les pertes par absorption et par réflexion et un retard $\tau(\theta)$. Elle mesure la fonction de sortie à l'instant par intégration sur tout l'angle solide d'entrée.

Si $I(\theta, t)$ est la répartition temporelle d'énergie dans la direction θ

$$I(\theta, t) = H(\theta) f(t)$$

La formule de Kapanay est :

$$[1] \quad F(t, \theta_0) = \int_0^{\theta} f(t-z) \times H(\theta) e^{-\frac{\alpha L}{\cos \theta}} e^{\frac{[L \theta \rho_p (1-a(\theta))]}{d \sin \theta d \theta}}$$

Pour une meilleure exploitation de la formule 1 opérons à un changement de variable.

$$* \quad \theta = A z c \cos \frac{z_0}{z}$$

posons que

$$H(A z c \cos \frac{z_0}{z}) = K(z) \\ \pi(z) = -\log e [1 - a(A z c \cos \frac{z_0}{z})]$$

La formule de Kapanay devient :

$$[2] \quad F(t, \theta_0) = \int_{z_0}^{\frac{z_0}{\cos \theta_0}} f(t-z) K(z) \frac{z_0}{z^2} \exp[-\alpha L \frac{z}{z_0}] \exp[\frac{L}{d} \pi(z) \sqrt{\frac{z^2}{z_0^2} - 1}] dz$$

2.3. Réponse impulsionnelle générale d'une fibre multimode.

Dans la formule 2 énoncée précédemment, remplaçons $f(t-z)$ par l'expression suivante : $\delta(t-z)$
On a alors

$$[3] \quad R(t, \theta_0) = \int_{z_0}^{\frac{z_0}{\cos \theta_0}} \delta(t-z) A(z) dz \\ A(z) = K(z) \frac{z_0}{z^2} \exp[-\alpha L \frac{z}{z_0}] \exp[\frac{L}{d} \pi(z) \sqrt{\frac{z^2}{z_0^2} - 1}]$$

La réponse impulsionnelle est par définition la réponse à une impulsion de dirac. $R(t, \theta_0)$ constitue alors la réponse impulsionnelle de la fibre multimode.

Essayons par le calcul de donner à $R(t, \theta_0)$ une forme explicite. Introduisons, la fonction rectangle ayant pour largeur Δz_0 et symétrique par rapport à l'origine. Soit $\eta_{\Delta z_0}(t)$ cette fonction.

Reportons cette fonction rectangle, dans la formule [3]

$$R(t, \theta_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t-z) \eta_{\Delta z_0}(\frac{z - \Delta z_0}{2}) A(z) dz$$

Cette nouvelle forme de $R(t, \theta_0)$ permet d'utiliser la définition formelle de la distribution de Dirac.

$$[4] \quad R(t, \theta_0) = \pi_{\Delta z_0} \left(t - \frac{\Delta z_0}{c} \right) A(t)$$

En supposant une symétrie totale de la fibre par rapport à l'axe, la formule 4 constitue la réponse impulsionnelle générale d'une fibre multimode dans le cas d'une injection symétrique.

La réponse de la fibre multimode à une fonction d'entrée quelconque $E(t)$ est donnée par le produit de convolution.

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t, \theta_0) E(t-\tau) d\tau$$

2.4. Evaluation des fonctions entrant dans cette réponse.

Les fonctions $K(\tau)$ et $\pi(\tau)$ figurant dans la formule 4 représentent des phénomènes physiques. -

On ne peut pas les définir de façon stricte, mais on peut les estimer, moyennant certains résultats expérimentaux.

On dégage ainsi le caractère arbitraire des lois que l'on se propose d'établir. -

a- Répartition de l'énergie à l'entrée de la fibre (fig 20).

La loi de répartition de l'énergie, dépend de la source utilisée. Cette loi peut être proche de la loi de Lambert dans le cas d'une diode, électroluminescente, d'une loi gaussienne dans le cas d'un laser classique à faible divergence. Cette loi peut être complexe dans le cas d'une diode laser.

De façon générale, l'expérience a montré qu'une loi de la forme.

$$H(\theta) = (\cos \theta)^m$$

donne une bonne approximation des diverses formes d'entrée envisagées, surtout si la source est directive. -

Compte tenu du changement de variable : $\theta = A\tau \cos \left(\frac{z_0}{c} \right)$
la loi $H(\theta) = (\cos \theta)^m$ devient.

$$K(\tau) = \left(\frac{z_0}{c} \right)^m [a]$$

REMARQUE :

$5 \leq m \leq 10$	diodes électroluminescentes
$m \approx 10$	lasers fortement directifs
$m \approx 300$	diode laser émettant sur un seul filament.

b) Pertes à la frontière entre la gaine et le coeur.

Les pertes sont introduites par les irrégularités du filtrage. Expérimentalement, on montre qu'une loi du type.

$$\log_e (1 - a(\theta)) = -a_p \theta^p$$

donne une représentation correcte des pertes p : constante arbitraire déterminée par l'expérience.

REMARQUE :

- Pour des petites valeurs de θ , cette formule représente d'une manière satisfaisante ces pertes.

- $p \approx 1$ ou 2 pour une fibre de qualité moyenne
- $p \approx 3$ ou 4 pour une fibre de bonne qualité.

Compte tenu du changement de variable : $\theta = A z c \cos\left(\frac{z_0}{z}\right)$
la loi

$$\log(1 - a(\theta)) = -a_p \theta^p \text{ devient}$$

$$K(z) = a_p \left[\sqrt{z(1 - \frac{z_0}{z})} \right]^p \quad [b]$$

2.5. Réponse impulsionnelle dans les hypothèses considérées.

Les formules [a] et [b] remplacées dans introduites dans la relation 4 donnent.

$$R(t, \theta_0) = \Pi_{\Delta z_0} \left(t - \frac{\Delta z_0}{z} \right) \times \frac{1}{z_0} \left(\frac{z_0}{t} \right)^{m+2} \exp \left[-\frac{\alpha \Delta t}{z_0} \right] \exp \left[-\frac{L_0 a_p}{a} \left(\sqrt{z(1 - \frac{z_0}{z})} \right)^p \sqrt{\frac{t^2 - z_0^2}{z_0^2}} \right]$$

L'évaluation des fonctions entrant dans la réponse impulsionnelle a permis de mettre en évidence, les divers paramètres de la fibre séparément.

La formule 5 peut conduire à diverses interprétations, nous choisirons celles qui sont les plus intéressantes :

- élargissement à mi hauteur d'une impulsion de dirac.
- recherche de la bande passante de la fibre.

3° Élargissement à mi-hauteur d'une impulsion de dirac.

La mesure de l'élargissement à mi-hauteur, renseigne sur la dispersion du signal plus exactement sur la dispersion des impulsions de dirac. C'est une technique relativement simple avec des fibres à forte dispersion, elle devient plus délicate avec des fibres dont les propriétés de propagation sont nettement meilleures.

3.1 Expression de la largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle. -

A partir de l'équation 5 calculons la valeur T_2 de t pour laquelle.

$$R(t_2, \theta_0) = \frac{R(z_0, \theta_0)}{2}$$

Posons

$$\Delta t = t_2 - z_0$$

Comme

$$R(z_0, \theta_0) = e^{-\alpha L}$$

alors T_2 est donné par l'expression :

$$[6] \quad \Pi_{\Delta z_0} \left(z_2 - \frac{\Delta z_0}{2} \right) \left(\frac{z_0}{T_2} \right)^{m+2} \exp \left[-\alpha L \frac{z_2}{z_0} - \frac{L}{d} \pi \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \sqrt{\left(\frac{z_2}{z_0} \right)^2 - 1} \right] = \frac{e^{-\alpha L}}{2}$$

Deux cas peuvent se présenter à nous (voir fig)

$$[a] \quad R(z_0 + \Delta z_0, \theta_0) \gg \frac{e^{-\alpha L}}{2}$$

L'élargissement à mi-hauteur est donné par :

$$\Delta t = \Delta z_0 = \frac{mL}{c} \left[\frac{1}{\cos \theta_0} - 1 \right]$$

Longtemps cette formule a été la seule utilisée, si elle est correcte dans le cas des sources peu directives (m petit), elle conduit à des élargissements importants dans les autres cas.

$$b) \quad R(z_0 + \Delta z_0, \theta_0) < \frac{e^{-\alpha L}}{2} \quad \text{fig 21 b}$$

L'équation 6 donne, en introduisant Δt :

$$\exp \left(-\alpha L \frac{\Delta t}{z_0} - \frac{L}{d} \pi \left(\frac{\Delta t}{z_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta t}{z_0} \left(2 + \frac{\Delta t}{z_0} \right)} \right) = \frac{1}{2} \left(2 + \frac{\Delta t}{z_0} \right)^{m+2}$$

Soit :

$$7) \quad (m+2) \log_e \left(2 + \frac{\Delta t}{z_0} \right) - \log_e 2 = -\alpha L \frac{\Delta t}{z_0} - \frac{L}{d} \pi \left(\frac{\Delta t}{z_0} \right) \sqrt{\frac{\Delta t}{z_0} \left(2 + \frac{\Delta t}{z_0} \right)}$$

Les résultats expérimentaux montrent que la valeur de Δt est nettement inférieure à z_0 . Il est donc possible alors de faire un développement limité de l'équation 7.

$$[8] \quad \left[\alpha L + m+2 \right] \frac{\Delta t}{z_0} + \frac{L}{d} \pi \left(\frac{\Delta t}{z_0} \right) \sqrt{\frac{2\Delta t}{z_0}} = \log_e 2$$

On obtient ainsi une formule qui prend en considération certains paramètres de la fibre. Par exemple, le paramètre m qui caractérise la source utilisé.

Suivant le type de source, donc suivant la valeur de m, on va essayer d'établir l'expression de l'élargissement à mi-hauteur Δt .

3.2. - Cas des Sources Laser.

La valeur de m pour ce type de source, est importante (quelques centaines). D'autre part, compte tenu des bilans de liaisons réalisables, qui sont de l'ordre de 40 dB, la valeur maximale pour laquelle on pourra réaliser la mesure, est de l'ordre de 10.

La quantité peut être négligée devant m . L'équation 8 devient.

$$[9] \quad m \frac{\Delta t}{c_0} + \frac{L}{a} \kappa(\Delta t) \sqrt{\frac{2\Delta t}{c_0}} = \log_e 2$$

Deux cas peuvent alors se présenter.

* L petit

Alors l'équation 9 devient

$$\begin{aligned} m \frac{\Delta t}{c_0} &= \log_e 2 \\ \Rightarrow \Delta t &= \frac{m}{c} (\log_e 2)^{\frac{1}{m}} L \end{aligned}$$

REMARQUE :

L'élargissement est proportionnel à la longueur. Le paramètre lié à la directivité de la source est dans ce cas prépondérant.

* L grand.

Alors l'équation 9 se simplifie de la façon suivante .

$$\frac{L}{a} \kappa(\Delta t) \sqrt{\frac{2\Delta t}{c_0}} = \log_e 2$$

En utilisant l'équation B :

$$\kappa(\tau) = a_p \left[\sqrt{2 \left(1 - \frac{c_0}{c} \right)} \right]$$

On a alors :

$$\Delta t = \frac{m}{2c} \left[\frac{d}{a_p} \log_e 2 \right]^{\frac{2}{p+1}} L^{\frac{p-1}{p+1}}$$

Suivant les valeurs de p , on a des valeurs de Δt :

$$\begin{aligned} (1) \quad p=0 &; \Delta t = \frac{1}{2} \frac{m}{c} \left[\frac{d}{a_0} \log_e 2 \right]^2 \frac{1}{L} \\ (2) \quad p=1 &; \Delta t = \frac{1}{2} \frac{m}{c} \left[\frac{d}{a_1} \log_e 2 \right] \\ (3) \quad p=2 &; \Delta t = \frac{1}{2} \frac{m}{c} \left[\frac{d}{a_2} \log_e 2 \right]^{2/3} L^{1/3} \\ (4) \quad p=3 &; \Delta t = \frac{1}{2} \frac{m}{c} \left[\frac{d}{a_3} \log_e 2 \right]^{1/2} L^{1/2} \end{aligned}$$

Compte tenu des expériences faites sur la mesure de a , les lois les plus probables, sont (3) et (4). La figure 22 synthétise les résultats que l'on a obtenu. (figure 22).

3.3° Cas des L E C.

On sait que la valeur de m pour ce type de source est relativement faible : $5, \leq m \leq 10$.

Rappelons que l'équation 8 n'est valable que si

$$R(\tau_0 + \Delta\tau_0, \theta_0) < e^{-\frac{\alpha L}{2}}$$

est vérifiée.

Essayons alors de déterminer la longueur au delà de laquelle l'équation 8 peut s'appliquer.

$$(\alpha L_0 + m + 2) \frac{\Delta\tau_0}{\tau_0} + \frac{L_0}{a} \pi (\Delta\tau_0) \sqrt{\frac{2 \Delta\tau_0}{\tau_0}} = \log_e 2$$

Compte tenu de b, cette équation se ramène pour θ_0 petit

$$(\alpha L_0 + m + 2) \frac{\theta_0^2}{2} + \left(\frac{L_0}{a}\right) a p \theta_0^{2p+1} = \log_e 2$$

Suivant la valeur de p, donnons quelques résultats. -

$$* p = 0; L_0 \approx \frac{2 \log_e 2}{\alpha p \theta_0} \quad (1)$$

$$* p > 1; L_0 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{2 \log_e 2}{\theta_0^2} - m - 2 \right) \quad (2)$$

REMARQUE :

Le produit αL_0 ne peut dépasser la valeur 10. Avec cette valeur de αL_0 on trouve pour θ_0 une valeur d'environ 15° .

cette valeur de θ_0 est devenue à partir de (2) cette équation semble être la plus vraisemblable.

- Or dans les cas pratiques la valeur de θ_0 est très inférieure à 15° .
- On arrive à la conclusion suivante, la valeur L_0 ne pourra jamais être atteinte expérimentalement.

L'équation 8 ne peut être appliquée et par conséquent.

$$\Delta\tau_0 = \Delta t \quad (3)$$

Vu, la faible valeur de m pour les diodes électroluminescente on aurait pu établir directement ce résultat. En effet l'expérience a prouvé que la formule (3) était correcte tant que m restait petit.

4° Fonction de transfert d'une fibre multimode.

Partant de la réponse impulsionnelle $R(t, \theta_0)$, on peut également calculer la fonction de transfert par la transformée de Fourier, soit :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t, \theta_0) e^{j\omega t} dt$$

On démontre que la fibre apparaît comme un filtre passe bas.

5° Conclusions théoriques.

Après l'étude théorique précédente, on note l'importance de certains paramètres sur la propagation de la lumière dans une fibre multimode.

. L'absorption dans la fibre, joue un rôle essentiel sur le niveau de l'impulsion reçue, mais elle affecte peu la forme de celle-ci.

. Sur la courbe $\Delta t = f(L)$, on remarque deux parties, l'une linéaire, l'autre à tendance asymptotique.

- la seconde partie fait apparaître l'influence des pertes à la frontière (la forme de la loi a

- la pente de la première partie détermine un angle θ , paramètre fondamental de la propagation sur les premières centaines de mètres. -

6° Aspects expérimentaux.

Essayons de vérifier la validité des hypothèses faits dans la partie théorique.

6.1° - Appareillage.

(fig 23) schéma de l'appareillage expérimental .

On n'insistera pas sur la ^Yprésentation des différentes parties du système proposé.

Une étude détaillée sera faite dans les chapitres suivants.

a La réception.

La détection des impulsions brèves, se fait à l'aide des photodiodes PIN ultrarapides. La fibre est en contact direct avec la photodiode.

b Le système d'injection.

La fibre est fixée dans un tube capillaire de diamètre intérieur suffisamment ajusté. On doit assurer que l'injection de la lumière se fait de manière axiale dans la fibre . La lentille sert à focaliser la lumière. .

c Les sources.

On a utilisé trois types de sources pour l'expérience . Ces sources se différencient par leurs diagrammes d'émission.

$n = 10^4$ * Le laser à argon donne un train d'impulsions à 100 MHz de largeur à mi-hauteur 100 ps. (ce laser fonctionne en régime de blocage de modes.

* Diodes lasers : en réglage permet d'obtenir des impulsions lumineuses de 100ps de largeur à mi-hauteur à des fréquences pouvant aller jusqu'à 10 Mhz.

*DEL : les diode, donnent des impulsions dont le temps de montée est voisin de 4ns, la largeur de l'impulsion à mi-hauteur est d'environ 6ns.

6.2 Résultats expérimentaux.

a) Vérification de l'hypothèse de l'optique géométrique (fig 24)

Soit une injection qui fait un angle x avec l'axe de la fibre, l'hypothèse de l'optique géométrique, permet d'établir le délai de propagation d'une impulsion de la façon suivante :

$$\tau = \frac{nl}{c} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \text{ avec } \sin \alpha = n \cdot \sin \theta$$

On a relevé alors la courbe donnant ce délai en fonction de θ quand l'émetteur est un laser à argon.

On note alors une concordance parfaite entre le relevé pratique et la courbe théorique.

b) Résultats.

Influence du diagramme d'émission.

Pour une fibre à coeur liquide d'ouverture numérique fixée, on a relevé l'élargissement en utilisant successivement les trois sources décrites précédemment. (voir fig n° 25).

Les pentes de ces droites sont en bon accord avec celles prévues dans la partie théorique (équations).

7° Conclusions.

L'expérimentation a permis de mettre en évidence la plupart des résultats théoriques, à l'exclusion de la non linéarité due à $a(e)$. -

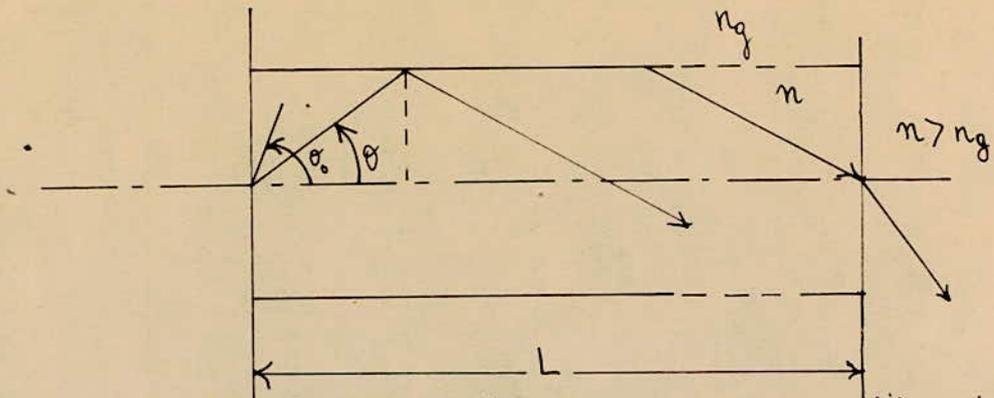


Fig 19: Modèle géométrique pour une fibre optique multimode

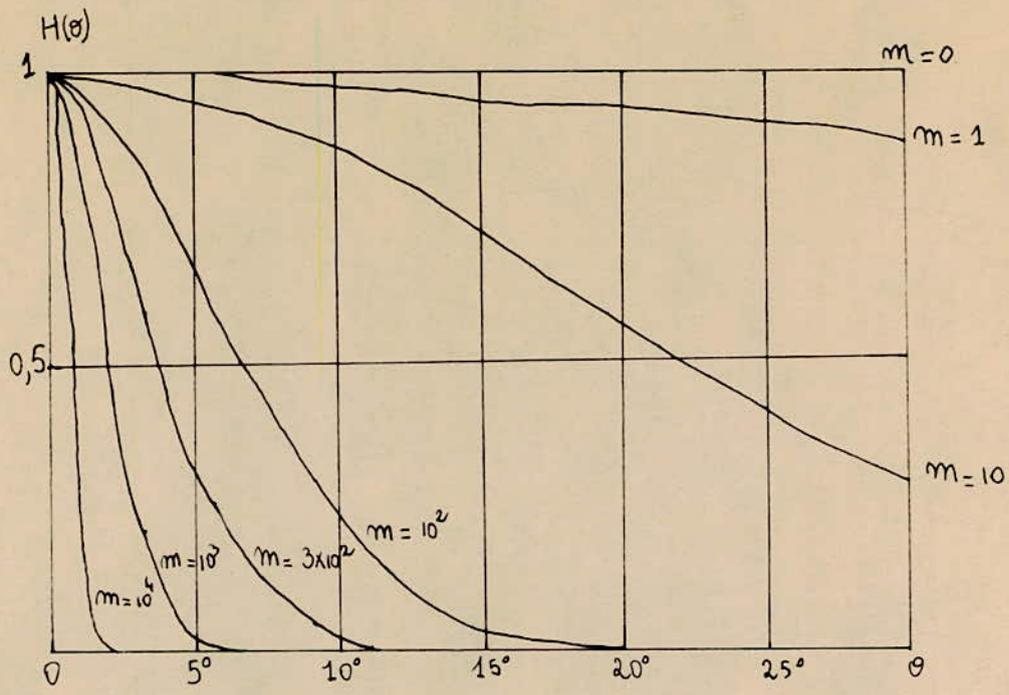


Fig n° 20: la fonction $H(\theta) = \cos^m \theta$

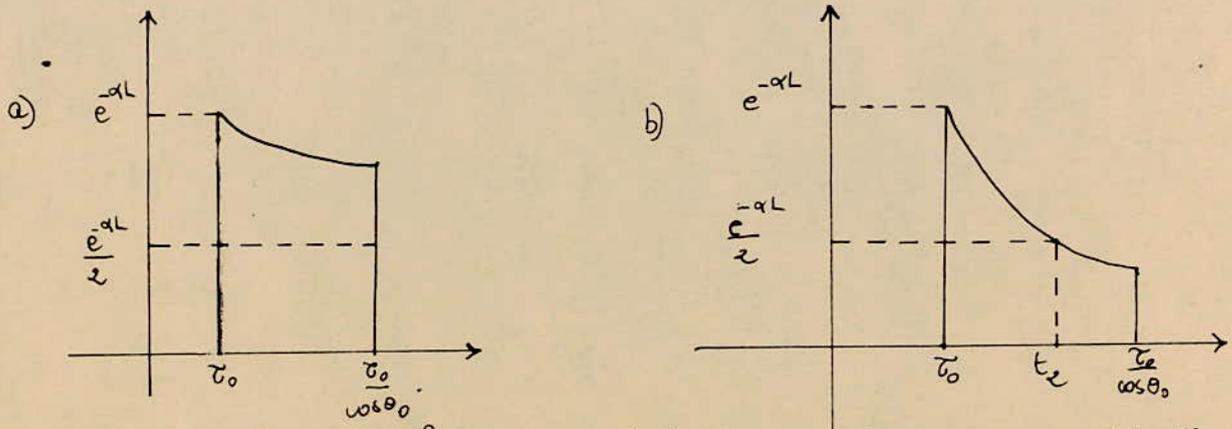
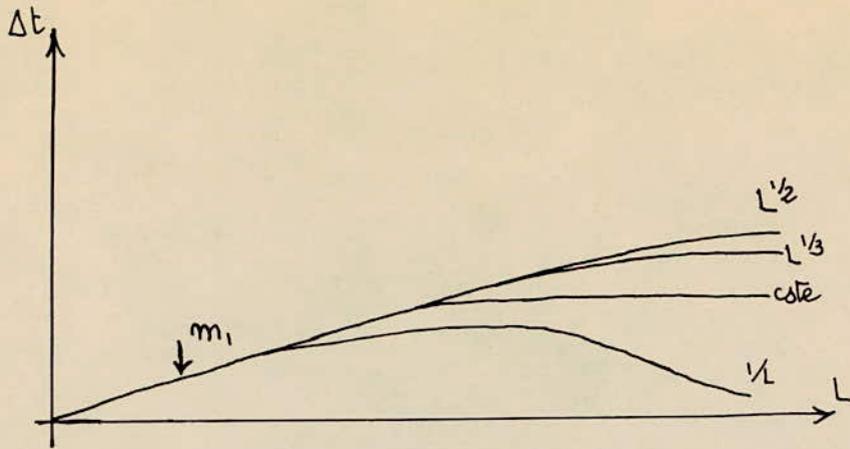
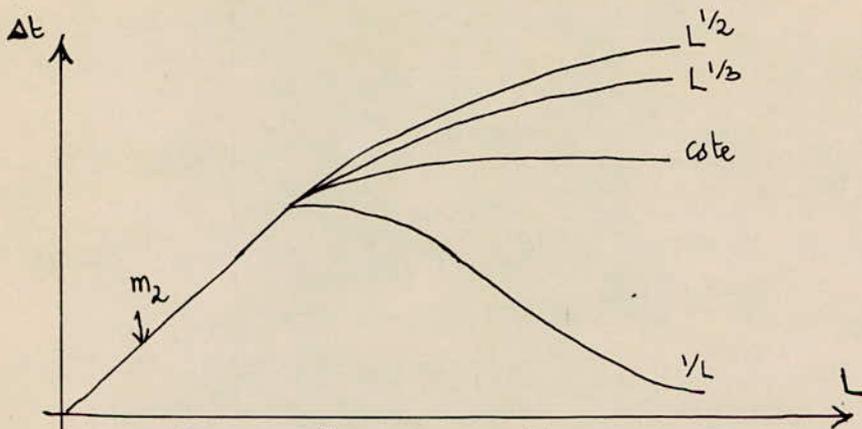


Fig 21: largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle dans les 2 cas possibles:

a) $R\left(\frac{\tau_0}{\cos \theta_0}\right) \geq \frac{1}{2} R(\tau_0)$ b) $R\left(\frac{\tau_0}{\cos \theta_0}\right) < \frac{1}{2} R(\tau_0)$



(a)



(b)

Fig 22: Élargissement d'une impulsion de dirac en fonction de la longueur pour différentes lois $\alpha(\theta)$; a) pour une valeur fixe m_1 ; b) pour une valeur fixe m_2 , $m_1 > m_2$

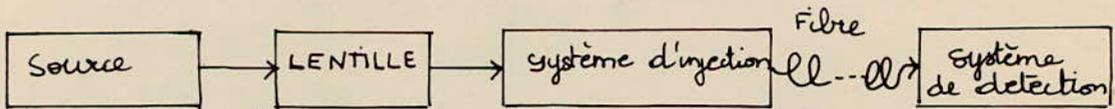


Fig 23: schéma de l'appareillage expérimental.

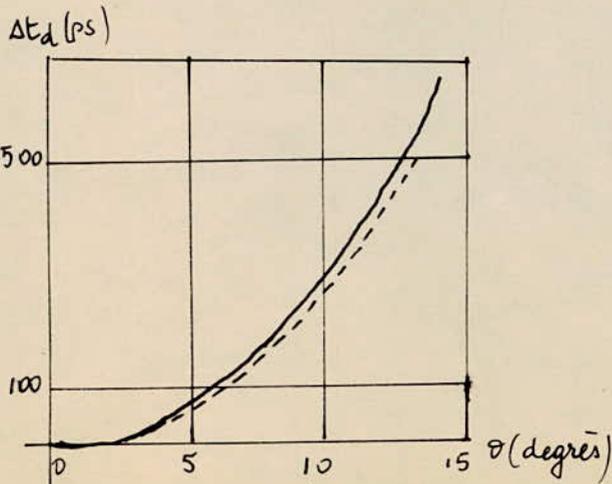


Fig 24: Délai de propagation en fonction de l'angle du laser et de la fibre
— courbe calculée; --- courbe mesurée

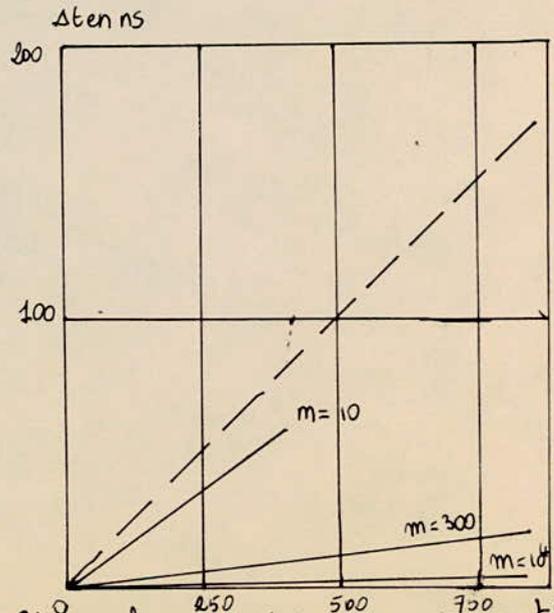


Fig 25: élargissement dans le cas d'une fibre à cœur liquide, avec 3 sources différentes

1° Introduction

On se propose d'étudier les diodes lasers et les diodes électroluminescentes en vue de leur application aux télécommunications optiques. On mènera parallèlement l'étude de ces deux sources de lumière pour mettre en évidence les caractères communs et les différences de celles-ci. Notons, qu'on s'attachera à voir, comment les propriétés de ces sources de lumière à semi-conducteurs influent sur les caractéristiques du signal lumineux à l'autre extrémité d'une fibre optique.

2° Emission spontanée et stimulée dans les semi conducteurs.

a - échange d'énergie entre matière et rayonnement.

Essayons de mettre en évidence les phénomènes susceptibles de se produire, lorsqu'un atome est soumis à un rayonnement.

* - Théorie classique du rayonnement.

La théorie classique de rayonnement se limite à deux phénomènes qui jouent les rôles les plus importants dans les conditions courantes et dont l'évidence expérimentale est la plus frappante.

- L'action de l'onde électromagnétique de fréquence est de provoquer des transitions d'absorption dans lesquelles l'atome monte du niveau inférieur E_1 au niveau supérieur E_2 .

- Les transitions d'émission dans lesquelles l'atome descend du niveau supérieur E_2 au niveau inférieur E_1 se produisent spontanément en l'absence de toute action extérieure.

* - Théorie d'Einstein

L'action de l'onde électromagnétique ne se réduit pas à ce qu'on a vu précédemment, de même les transitions d'émission ne se produisent pas uniquement selon le processus spontané. L'action de l'onde, peut aussi provoquer des transitions d'émission dans lesquelles l'atome descend du niveau supérieur au niveau inférieur.

Ces transitions d'émission sont induites par l'onde électromagnétique, c'est ce qu'on appelle le phénomène d'émission induite ou stimulée. On note alors une parfaite symétrie entre le phénomène d'émission et le phénomène d'absorption. -

Soient deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 de population respectives N_1 et N_2 . Les transitions par émission induite font diminuer la population du niveau E_2 donc N_2 diminue. Les transitions par absorption font diminuer la population du niveau E_1 donc N_1 diminue. D'autre part, dans l'émission induite, comme dans le cas de l'absorption on supposera que la probabilité de transition est proportionnelle à la densité d'énergie différentielle de l'onde électromagnétique. -

$$w_{21} = -\frac{1}{n_2} \frac{dn_2}{dt} = B_{21} U_V$$

B_{21} : caractéristique de la transition $E_2 \rightarrow E_1$ de l'atome, totalement indépendant des conditions de l'expérience.

Si nous faisons un bilan complet de l'émission, (compte-tenu de l'émission spontanée et induite).

$$w_{21} = -\frac{1}{n_2} \frac{dn_2}{dt} = B_{21} U_V + A$$

D'autre part

$$w_{12} = -\frac{1}{n_1} \frac{dn_1}{dt} = B_{12} U_V$$

Cette relation traduit l'absorption $E_1 \rightarrow E_2$.

Essayons de faire un bilan général des 3 réactions possibles entre deux niveaux distincts E_1 (1) et E_2 (2).

$$-\frac{dn_2}{dt} = \frac{dn_1}{dt} = w_{12} n_1 - A_{21} n_2 - w_{21} n_2$$

En général un équilibre entre onde incidente et milieu étudié s'établit, et les populations N_1 et N_2 restent alors stationnaires.-

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{dn_1}{dt} = 0 \Rightarrow (B_{12} \frac{n_1}{n_2} - B_{21}) U_V = A_{21}$$

Rappelons que l'équilibre thermique est différent de l'équilibre dynamique, supposons toutefois l'équilibre thermique réalisé autrement dit :

. La densité d'énergie différentielle U du rayonnement électromagnétique régnant à l'intérieur de l'enceinte est égale à la densité d'équilibre thermique de Planck.

. Les populations N_1 et N_2 sont stationnaires et obéissent à la statistique de Boltzman.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{G_1}{G_2} e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

$$\Rightarrow A_{21} = \left(B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21} \right) U_V = \left[B_{12} \frac{G_1}{G_2} e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} - B_{21} \right] U_V$$

équation valable $\forall T$ en particulier. $T \rightarrow \infty$

$$\Rightarrow G_1 B_{12} = G_2 B_{21}$$

REMARQUES :

. Si les niveaux d'énergie E_1 et E_2 présentent des poids statistiques égaux $G_1 = G_2$ alors

$$B_{12} = B_{21}$$

./.

D'après l'hypothèse d'équilibre thermique, U_V obéit aussi à la loi de Planck.

$$U_V = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

D'autre part, à partir de la relation (1) et en introduisant (2) on a

$$U_V = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$$\Rightarrow \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h^3}{\lambda^3} = \frac{A_{21}}{B_{12}} \quad (3)$$

La relation (3), peut s'écrire de la façon suivante.

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = n(r) h\nu$$

n = densité de modes de rayonnement par unité de volume et de fréquence.

$$\Rightarrow W_{21} = A_{21} \left(1 + \frac{U_V}{n(r)h\nu} \right) = A_{21} (1 + N)$$

N : Nombre de photons par mode.

Ces résultats étant rappelés, considérons le cas de deux niveaux d'énergie constitués par la bande de conduction et la bande de valence.

Evaluons la vitesse de recombinaison radiative : (nombre de photons émis par unité de temps, de volume, et d'énergie.

$$(4) \quad \begin{aligned} \tau(E) &= \tau_{sp}(E) + N^2 \tau_{stim}(E) \\ \tau_{sp} &= \sum A(E) f_c (1 - f_v) \\ \tau_{stim} &= \sum A(E) (f_c - f_v) \end{aligned}$$

$A(E)$: probabilité de transition radiative entre deux niveaux
 f_c, f_v : fonction de fermi pour la BC et la BV

\sum : Sommaton étendue à toutes les paires de niveaux dont la différence d'énergie est $E = h\nu$

Il en résulte que :

$$\tau_{stim}(E) = \tau_{sp} \left\{ 1 - \exp\left[\frac{E - F_n - F_p}{kT} \right] \right\}$$

3° Matériaux semi conducteurs émetteurs de rayonnement.

On caractérise la probabilité de recombinaison radiative par une durée de vie τ_r . Cette durée de vie τ_r est différente, suivant que le matériau est à bande interdite directe ou indirecte.

Le schéma de la figure 27 rend compte des 2 types de matériaux.

Une transition doit conserver l'énergie et la quantité de mouvement des particules mises en jeu. D'autre part vu le rapport inverse des longueurs d'ondes associées aux particules, la quantité de mouvement du photon est négligeable devant celle de l'électron. Seules les transitions radiatives à k constant sont permises. D'après les schémas (1) et (2) on constate que :

Matériau à BI directe : Ce type de transition peut être possible entre le bas de la B C et le haut de la B V.

Matériau à B I indirecte : Les ~~extremums~~ ne sont pas en vis à vis, il est nécessaire de faire intervenir une 3^{ème} particule pour enlever la différence de quantité de mouvement entre l'état initial et l'état final.

On note alors que cette transition du 2^o ordre est beaucoup moins probable qu'une transition directe.

Comme dans un matériau il existe toujours des transitions non radiatives caractérisées par une durée de vie τ_{NR} le rendement de recombinaison radiative peut s'écrire.

$$\eta = \frac{\tau_{NR}}{\tau_A + \tau_{NR}}$$

Le rendement est notable pour les matériaux à B I directe, pour les transitions bande à bande.

On propose le tableau (3) qui donne les largeurs et nature des BI des semi conducteurs III. V, les plus importants pour les télécommunications optiques. -

REMARQUES :

L'énergie des photons émis par transition bande à bande, dans les matériaux à bande interdite directe est voisine de la largeur de B I. Ainsi pour le $GaAs$ de largeur de B I = 1,4 eV, la longueur d'onde du rayonnement émis est voisine de 0,9 μ . L'utilisation de certains matériaux dont la cristallogénèse, est facile par épitaxie en phase liquide, permet de couvrir de façon continue le domaine des longueurs d'onde allant de 0,7 à 9 μ et d'adopter l'émission au maximum de transmission observé sur toutes les fibres optiques vers 0,83 μ .

4^o Durée de vie de photon : condition de *seuil*

Soit $\phi(E)$ la densité de modes par unité de volume et d'énergie.
Soit $\Gamma(E)$ le nombre de photons émis par unité de temps, de volume et d'énergie.

τ_p : Nombre de photons par mode.

L'équation qui renseigne sur le nombre de photons dans un mode, s'écrit en régime stationnaire.

$$\frac{dN}{dt} = \Gamma(E) - \frac{N}{\tau_p} = 0 \quad (5)$$

τ_p durée de vie du photon.

Les équations (4) et (5) permettent de calculer la vitesse d'émission dans un mode de durée de vie τ_p

$$(6) \quad \frac{N}{\tau_p} = \frac{\tau_p \Gamma(E)}{\phi(E)} \left[1 - \frac{\tau_p \Gamma_{stim}(E)}{\phi(E)} \right]^{-2}$$

REMARQUES:

- L'équation (6) montre que la vitesse d'émission dans un mode, résulte de l'émission spontanée dans ce mode, modulée par l'émission stimulée et les pertes.
- L'équation (6) permet de définir la condition de

$$[\tau_{stim}(E)]_{max} = \frac{\phi(E)}{\Gamma_M}$$

Γ_M durée de vie de photon maximale pour les modes du volume actif.

5° Emetteurs électroluminescents :

5.1. Pompage par injection (fig n° 28)

Le procédé le plus simple et le plus important, consiste à mettre hors d'équilibre le volume actif, ceci par injection directe moyennant des jonctions.

En effet, il suffit d'injecter du courant dans le sens direct d'une diode.

Rappelons, que lorsqu'une jonction P.N réalisée dans un même matériau (homojonction) est polarisée dans le sens direct, les trous qui sont majoritaires dans la région P, diffusent vers la région N, de même un courant d'électrons diffuse ~~de N vers P~~ ^{de N vers P*} et des trous en excès par rapport à l'équilibre, leur recombinaison radiative assure l'émission de rayonnement, c'est le phénomène utilisé dans les diodes électroluminescentes.

* Il existe au voisinage de la jonction, une région où il y a des

On dispose d'un autre moyen, à savoir, l'utilisation d'hétérojonctions. L'emploi de telles jonctions permet également l'injection de porteurs libres sans une région où ils sont hors d'équilibre, si l'interface n'est pas recombinant (voir figure n° 29).

La différence de largeur de B I des deux matériaux, se retrouve dans une discontinuité de la bande de conduction qui agit comme barrière de potentiel et prévient la diffusion des électrons au delà de l'interface.

REMARQUE :

Vu cette dernière précision, on voit que l'épaisseur du volume actif est celle de la couche en Ga As (p), alors que pour les homojonctions, elle est déterminée par la longueur de diffusion des électrons.

5.2. Courant de seuil .

Il est intéressant de définir la condition de seuil en fonction du courant injecté.

Vu les dimensions transversales de la région active par rapport aux dimensions du dispositif, il y a peu de modes à Γ_M (ceux dont la direction de propagation est dans le plan de la couche) pour le nbre total de mode.

Donc quand la condition de seuil est juste atteinte pour les modes à ΣM l'émission sommée sur tous les modes, est surtout spontanée, et le courant nécessaire est :

$$I_S = V e \frac{1}{\eta} \int \tau_{sp}(E) dE$$

V : Volume de la zone active

C : Charge de l'électron

η : Rendement quantique de recombinaison radiative.

$\tau_{sp}(E)$, vitesse d'émission spontanée, au niveau d'excitation tel que la condition de seuil soit remplie.

5.3 Diodes électroluminescentes Diodes laser.

Comme on avait précisé précédemment le phénomène des diodes électroluminescentes, rappelons brièvement le phénomène utilisé pour les lasers. On pourra alors faire une comparaison.

Structure du laser :

Pour que l'effet laser existe, il faut se trouver dans les conditions de l'émission stimulée, c'est à dire, avoir un niveau atomique E_2 (" Supérieur ") plus peuplé que le niveau (" inférieur ") E_1 . Il faut donc réaliser une inversion de population, pour ce faire, on utilise une lumière initiatrice.

Un laser est constitué de trois ensembles :

- * Un milieu actif : les atomes d'un gaz, d'un cristal, etc...
- * Une cavité résonnante : qui sera un Fabry Pérot afin d'avoir un système d'oscillation stable.
- * Un milieu excitant : pour réaliser l'inversion de population, qui sera constitué par un tube à décharge contenant des atomes d'un gaz par exemple. -

REMARQUE :

Les lasers n'ont pratiquement d'utilisation que comme oscillateurs. Ils ont révolutionné l'optique en fournissant pour la première fois aux physiciens des sources d'ondes lumineuses cohérentes. La cavité résonnante permet d'atteindre le seuil d'oscillation.

Les deux principes du laser et de la diode électroluminescente, étant exposés, on peut alors les comparer : La différence entre une diode électroluminescente et une diode laser réside dans la manière dont la lumière émise dans la zone active est utilisée et par suite, dans leur géométrie : figure n° 30.

* Soit par épitaxie en phase liquide (homojonction).

L'utilisation d'hétérojonction a augmenté les performances des diodes électroluminescentes.

Il est possible en effet, de déterminer par confinement des porteurs, l'épaisseur de la zone active, et de rendre transparente la couche de sortie de la lumière et éventuellement le substrat d'où alors amélioration du rendement total.

6.2. Diode laser

6.2.1. - Réduction de la densité de courant de seuil

Les premiers lasers à semi conducteurs à jonction p-n ont été réalisés par diffusion de zinc dans du Ga As de type N.

Ces diodes à homojonction, nécessitaient l'utilisation de fortes densités de courant de seuil, de l'ordre de 10^4 A/cm² à 300 K. Cet inconvénient posait des problèmes de dégradation et d'emploi, cela excluait leur fonctionnement en continu. Toutefois de nouvelles structures, basées sur la mise au point d'hétérojonction a permis d'abaisser J_s jusqu'à une valeur 10^3 A/cm². - Ceci a permis de faire fonctionner les diodes laser en continu à T° ambiante. (voir fig n° 33).

6.2.2. - Réduction du courant de seuil

Il est intéressant de réduire la surface active des diodes laser afin de faciliter le fonctionnement continu, et de placer le courant seuil dans une zone où les circuits électroniques de commande sont aisés à faire avec les transitions disponibles actuellement. Plusieurs structures ont été proposés " structures ruban ".

7° Caractéristiques électriques :

En alternatif et en petits signaux, un schéma équivalent possible, est donné par la figure n° 34.

R : résistance série due aux contacts électriques (en général négligeable).

C : a pour origine physique le stockage de charges dans la zone active elle est donc proportionnelle à son volume.

R : représente la recombinaison des paires électron-trou, le courant traversant cette résistance est proportionnel à l'émission du rayonnement.

En dessous du seuil le produit RC est à peu près la durée de vie des paires électron-trou, soit quelques ns. Au dessous du seuil, la vitesse de recombinaison croît très vite et RC décroît. Les valeurs de R et C dépendent fortement des conditions de pulvérisation. -

8° Caractéristiques Optiques :

8.1. Radiance - Directivité.

La radiance mesure en watts, par unité de surface et d'angle solide, la puissance émise par une source de rayonnement. Elle dépend du courant injecté dans un émetteur électroluminescent et son ordre de grandeur peut être différent suivant les types d'émetteurs électroluminescents.

Le diagramme de directivité donnant la radiance en fonction de la direction est très important pour évaluer le rendement du couplage d'un émetteur électroluminescent à une fibre optique. En effet cette dernière n'accepte que le rayonnement compris dans un angle solide défini par son ouverture numérique et le laser permet un bien meilleur rendement de couplage, que la diode électroluminescente.

8.2. Spectre : Figure 35

La longueur d'onde moyenne de l'émission dépend, du matériau émetteur, et la longueur du spectre dépend du régime d'émission. En dessous du seuil, l'émission est uniquement spontanée et la largeur du spectre est d'environ 0,03 μ à 300°K pour les émetteurs à base de GaAs. Lorsqu'une diode laser est excitée juste au-dessus du seuil, le mode le plus favorisé de la cavité peut être seul en autooscillation et la largeur du spectre devient très faible, soit 0,15 MHz de $4 \cdot 10^6$ μ . Si le courant est poussé plus au-dessus du seuil, le premier mode excité sature vers quelques mw, et le spectre total comporte plusieurs modes, dont l'enveloppe peut atteindre 0,003 μ (figure c).

REMARQUE :

La largeur du spectre d'émission des émetteurs électroluminescents est un des facteurs limitant la bande passante d'une voie de transmission, sur fibre optique par suite de la dispersion. On voit alors que de ce point de vue, la diode laser est supérieure à la diode électroluminescente, en raison de sa bande spectrale au moins des fois plus faible.

9° Caractéristiques de transfert.

9.1. - Rendements

Les caractéristiques lumière courant des émetteurs électroluminescents permettent de mesurer leur rendement. (figure n° 36). On remarque que la caractéristique d'une diode électroluminescente est linéaire dans la zone d'emploi normale. La caractéristique d'une diode laser montre un rendement très faible en dessous du seuil, au-dessus le rendement quantique atteint 30 à 60 % pour les deux faces émettrices. -

Ce type de caractéristique dépend évidemment du mode d'excitation du laser : impulsions brèves à faible récurrence ou continu. En continu, une saturation est susceptible d'apparaître due à l'échauffement de la zone active, entraînant une baisse du rendement de recombinaison radiative.

10° Fiabilité.

On caractérise la dégradation des émetteurs électroluminescents par l'apparition dans la zone active de lignes noires qui sont des régions où la recombinaison est essentiellement non radiative. On a évidemment une baisse du rendement. Essayons de dénombrer les causes.

La vitesse de dégradation, est une fonction croissante du courant traversant la diode, mais les contraintes du matériau sont aussi impliquées.

Ces contraintes sont de plusieurs origines. -

- thermiques
- métallurgiques dans le cas d'hétérojonctions avec des matériaux légèrement différents.
- dues au montage sur un support contraignant.

Notons une dégradation dite " catastrophique " liée au flux optiques sur les faces de sortie des lasers qui peut détruire ces faces au delà d'un seuil d'environ 1 MW/cm² en quelques fractions de seconde. On doit veiller à travailler au dessous de ce seuil catastrophique.

11° Conclusions.

Tout d'abord résumons quelques caractéristiques des émetteurs électroluminescents en un tableau (tableau n° 4).

Les émetteurs électroluminescents sont les éléments fondamentaux pour les systèmes de télécommunications optiques.

D'autre part, les performances des lasers sont supérieures à celles des diodes électroluminescentes sur les plans de la puissance injectable dans la fibre, et de la bande passante de liaison donc sur le débit d'informations de la voie de communication.

Mais le laser pose de gros problèmes de fiabilité, problèmes qui sont en voie de solution.

L'utilisation de matériaux très performants laisse espérer de sérieuses améliorations, en ce qui concerne les diodes électroluminescentes. -

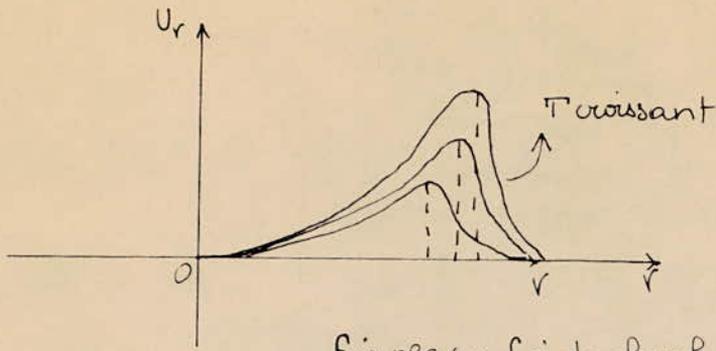
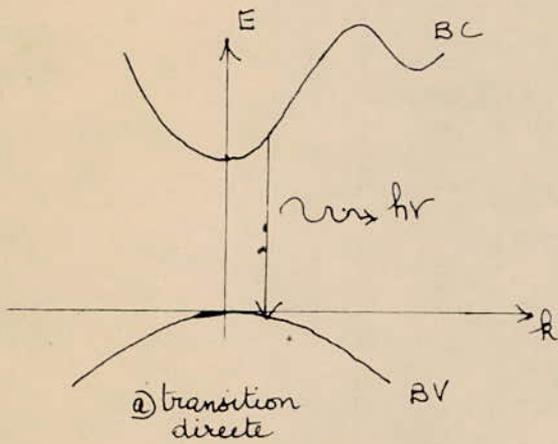
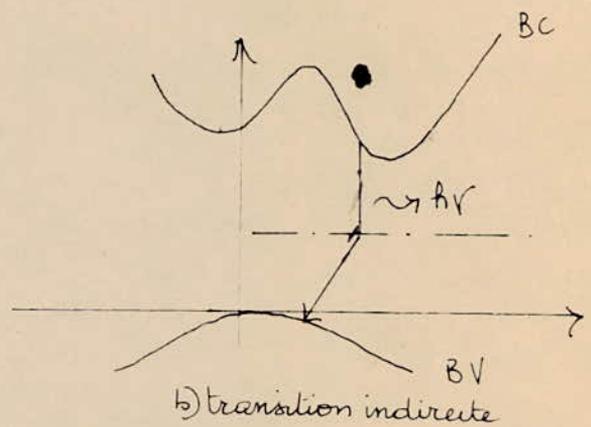


Fig n°26: loi de planck



a) transition directe



b) transition indirecte

Fig n°27: Structure de bande des semi conducteurs
a) BI directe b) BI indirecte

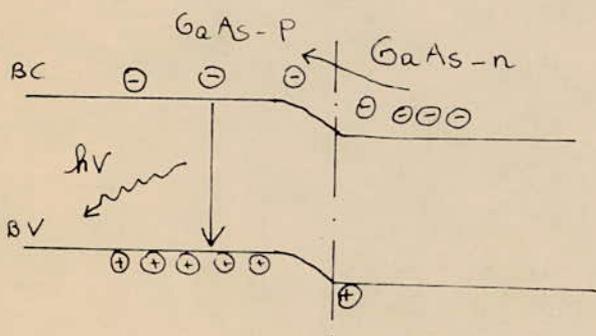


Fig n°28: Pompage au moyen d'une jonction p-n

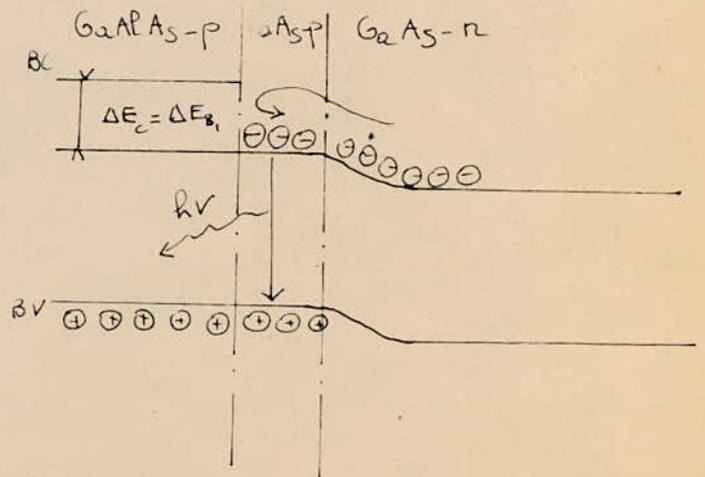


Fig n°29: Injection par une heterojonction

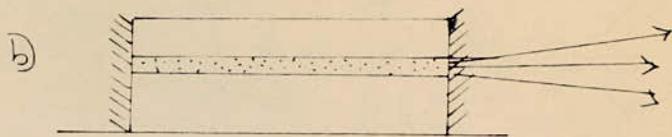
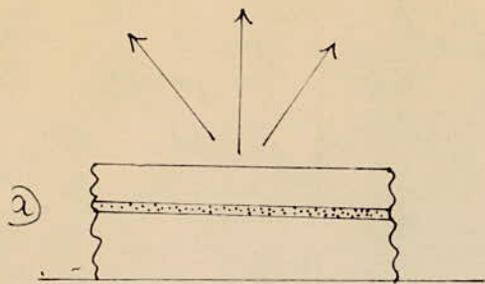


Fig n°30 : a) Diode électroluminescente ; b) Diode laser

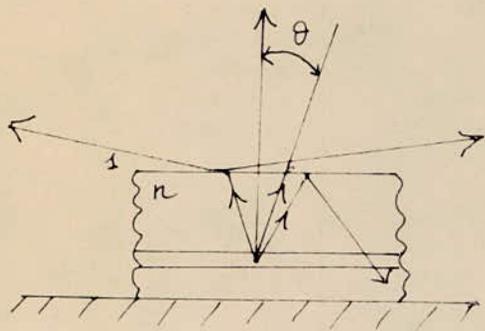


Fig n°31 : Diode électroluminescente à structure plane

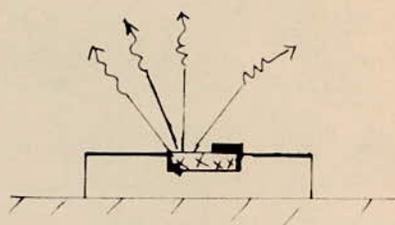


Fig n°32 : diode simple diffusée

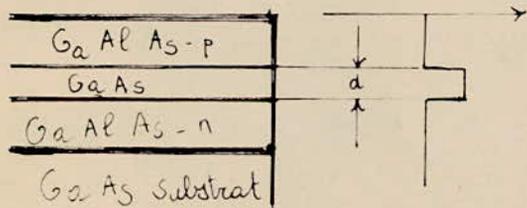


Fig n°33 : Laser à double hétérojonction

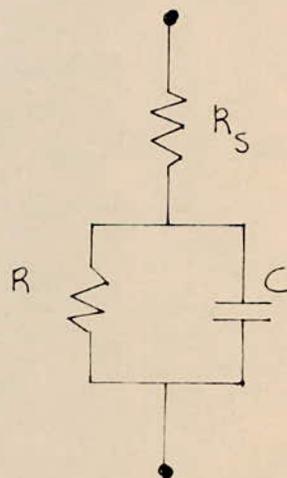


Fig 34 : schéma équivalent, d'un émetteur électroluminescent

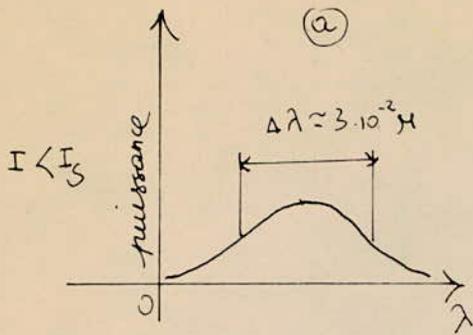


fig 35 : [a,b,c] Spectre des emetteurs electroluminescents

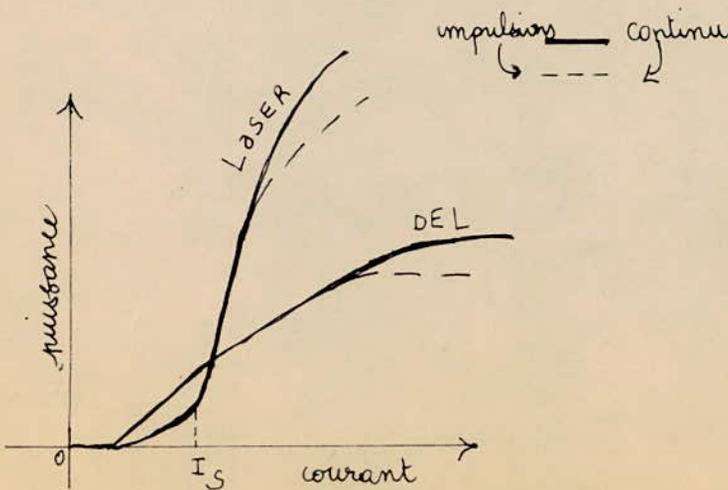
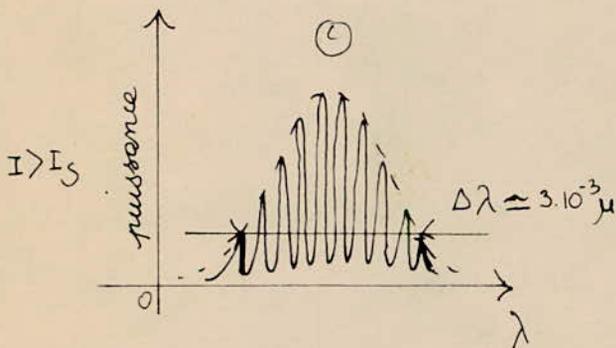
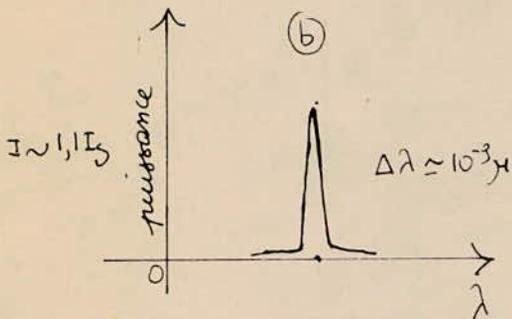


fig n°36: Caracteristiques lumiere/courants des emetteurs electroluminescents

Tableau n°3

III V.....	N	P	As	Sb
Al.....	6,2 (D)	2,4 (I)	2,2 (I)	1,6 (I)
Ga.....	3,5 (D)	2,2 (I)	1,4 (D)	0,7 (D)
In.....	1,8 (D)	1,3 (D)	0,36 (D)	0,17 (D)

Matériaux III.V pour émetteurs électroluminescents

* Énergie de BI en eV

(I). BI indirecte, (D): BI directe

Tableau n°4

	DEL «conventionnelle» homojonction	DEL «BURRUS» Double hétéro jonction	Diode laser Double hétéro jonction
Densité de courant (A.cm ⁻²)	10 ²	10 ⁴	2.10 ³
Radiance (W.cm ⁻² .sr ⁻¹)	0,1	10 ²	5.10 ⁴
Directivité	~ Lambert	?	?
Longueur spectre (nm)	3.10 ⁻²	3.10 ⁻²	3.10 ⁻³
Rendement différentiel photo/electron	1%	8%	25% (1 face)

Caractéristiques résumées de quelques émetteurs électroluminescents pour télécommunications optiques.

V - PHOTODETECTEURS POUR TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES.

1° Introduction :

Les photodétecteurs convertissent une radiation optique absorbée en un signal électrique.

Le choix d'un photodétecteur, nécessaire à la démodulation optique, est lié à plusieurs exigences, dont les plus importantes sont .

- . La bande passante doit correspondre au débit d'information de la liaison.
- . Le bruit introduit par le détecteur doit être le plus faible possible.
- . La sensibilité doit être la plus élevée possible aux longueurs d'ondes d'émission.
- . Couplage à une fibre optique ou un faisceau de fibres.
- . Encombrement du photodétecteur.
- . Des circuits électroniques associés au détecteur, et des tensions d'alimentation.

Compte tenu de ces exigences, les photodiodes semi conductrices sont habituellement préférées à cause de leur faibles tailles, de leur coût relativement peu élevé, et des tensions d'alimentation faibles nécessaires à leur fonctionnement.

2° Analyse du comportement de la diode photoélectrique : Diode PIN.

L'analyse du, mode de fonctionnement de la diode photoélectrique de réception est décrite dans ce paragraphe . Elle permet l'utilisation adéquate des ce composant en fonction de trois paramètres fondamentaux.

. Efficacité quantique η ; la diode est un compteur de photons de rendement rapport du nombre d'électrons produits au nombre de photons reçues.

. Le courant d'obscurité I_0 ; courant de fuite, fonction de la température et de la tension appliquée, mesurée en l'absence de signal;

. La capacité de jonction C_p et la résistance série M_s permettant de calculer le temps de réponse électrique à une impulsion lumineuse rapide.

2.1. Caractérisation physique.

2.1.1. La diode PIN est une jonction qui, polarisée en inverse, réalise la conversion photon électro,. Ainsi à tout flux lumineux incident correspond un courant proportionnel à ce flux. Le coefficient de proportionnalité est définie pour une radiation de fréquence ν , de la façon suivante.

$$I(t) = \frac{q}{R_V} P(t)$$

I est le courant produit, η est l'efficacité quantique du compteur de photon p (1) la puissance lumineuse à la fréquence ν , la charge de l'électron en régime dynamique, nous pouvons représenter la diode par le schéma équivalent :

R_0 : résistance de fuite : (figure n° 37).

2.1.2.

Il est intéressant de préciser le temps de réponse d'une diode, paramètre important à connaître pour l'emploi de ces composants. Le temps de réponse est lié à la technologie utilisée, et basé sur les longueurs de diffusion des porteurs. En effet, on constate que les diodes de très faibles dimensions permettent la reconversion photon électron en surface, elles sont par conséquent très rapides. Mais elles présentent un inconvénient, du à leur faibles surfaces, elles présentent une faible sensibilité.

2.2. Notion de bruit.

2.2.1.

Comme toute jonction polarisée éminverse, la diode photoélectrique non éclairée est source d'un courant de fuite, appelé effet shottky. Ce phénomène est lié au courant inverse permanent : le courant d'obscurité.

Du point de vue statistique, ce phénomène est décrit à l'aide de la loi de poisson :

La probabilité P pour qu'un paquet de N électrons apparaisse pendant un intervalle de temps Δt centré sur un instant t_0 est :

$$P(N, t_0, \Delta t) = \frac{\lambda_0^N e^{-\lambda_0}}{N!}$$

ou λ_0 est le résultat de l'intégration suivante :

$$\lambda_0 = \frac{1}{q} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} I_0 dt$$

2.2.2.

La loi précisée plus haut demeure valable, dans le cas où la diode est éclairée par une radiation quelconque. On doit ajouter un terme supplémentaire :

$$\lambda_s = \frac{1}{q} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} I_s(t) dt$$

Ces rappels statistiques vont permettre l'énoncé de la loi de la densité spectrale de bruit, donnée par la formule de schottky inhérente à la diode seule.

Le niveau de bruit dépend du signal qu'elle reçoit.

$$E(\bar{i}^2) \Delta F = (I_0 + E(I_s)) 2 q \Delta F$$

ΔF : bande de fréquence considérée

$E(I_s)$: expression mathématique du courant de signal apporté par le flux incident.

./.

./.

Soit P la puissance moyenne de la radiation qui éclaire la surface de la diode, celle-ci peut être caractérisée par son facteur de bruit .

$$F_D = \left[\frac{2}{2h\nu} \frac{P}{\Delta F} \right]^{1/2}$$

2.3. Capacité de jonction

Quand la diode est au silicim, la capacité de jonction est donnée par :

$$C_D = 2 \cdot 10^{-8} \frac{S}{\sqrt{V}}$$

ρ : résistivité du matériau intrinsèque

S Surface

V différence de potentiel appliquée.

Cette capacité joue un rôle important, lors de l'adaptation de la diode à un circuit d'amplification.

3° Diode à avalanche

D'une manière générale, tout ce qui fut défini pour la diode PIN est valable, pour la diode à avalanche. Toutefois deux paramètres supplémentaires restent à préciser .

. Gain d'avalanche M , gain intrinsèque par effet d'avalanche résultant de la multiplication des électrons. primaires, ce coefficient dépend évidemment de la tension de polarisation et de la T° .

. Tension V_{av} à appliquer aux bornes de la jonction afin d'obtenir le gain M sélectionné.

On constate alors la supériorité de ce type de détecteur, qui présente de nombreux avantages par rapport à la diode PIN. Mais l'emploi de ce composant, est délicat, Présentons alors les divers types diode à avalanche tout en précisant les précautions nécessaires.

3.1. Diode à avalanche en silicium à jonction PN

$V_{av} = 70 \text{ V}$ contient :

La technologie de ce type de diode, est maîtrisée. Toutefois le facteur de gain M dépendant de V_{av} est mal défini. D'autre part le bruit introduit (une grande stabilité de V_{av} s'impose) varie comme $M^{2.15}$ et non comme M^2 , d'où limitation du gain.

3.2. Diode à avalanche en silicium à jonction PⁿPN

La lettre n signifie que la zone située entre la région type P de la jonction PⁿPN est faiblement dopée en P, d'où faible variation du gain M pour une gamme de variation de V_{av} important.

3.3 Diode à avalanche en arseniure de Gallium

Le type de diode n'est pas encore tout à fait au point? Néanmoins il semblerait que cette découverte présenterait de sérieux avantages. -

- . Vav plus faibles que les tensions avalanche des jonctions au silicium.
- . Bruit proportionnel à $M^{2,1}$ seulement.

4° Choix d'une photodiode pour télécommunications optiques.

4.1. Choix du matériau

L'intérêt de GaAs apparaît évident, vu les avantages qu'il offre, de plus, l'utilisation d'un matériau dérivé, de GaAs_{1-x} comme Ga_{0,99}Al_{0,01}As permet d'étendre ces résultats aux longueurs d'ondes voisines de 1,06 μ m autre région d'intérêt pour les télécommunications optiques sur fibres.

4.2. Solution possible .

Maintenant que les critères auxquels doivent répondre les photodétecteurs sont précisés, on pourrait imaginer une photodiode spécialement conçue pour les télécommunications optiques à fort débit. (voir figure n° 38).

C'est une photodiode à avalanche à hétéro jonction $GaAlAs/GaAs$
La partie détectrice est la couche en $GaAs$ à faible dopage. La partie p supérieure est en $GaAlAs$ de façon à être transparente au rayonnement à détecter.

Reste alors à prouver que ce composant est technologiquement faisable.

5° CONCLUSIONS.

Si les photodiodes à l'arseniure de Gallium confirment leurs possibilités, elles pourraient s'imposer pour les télécommunications optiques. Les systèmes étudiés actuellement sont à débits relativement lents, les photodiodes au silicium (à avalanche éventuellement) sont alors très convenables. -

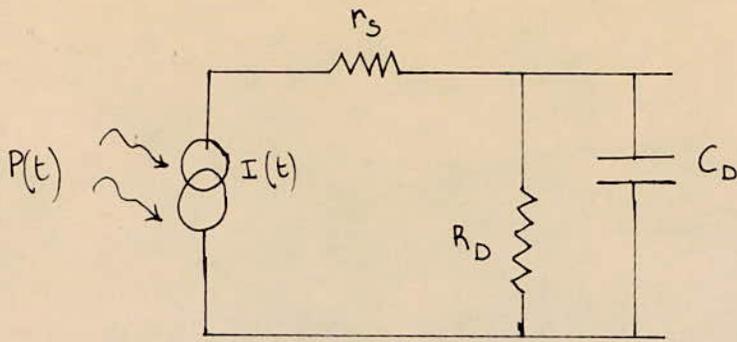


Fig n°37: Circuit equivalent de la diode PIN en régime dynamique

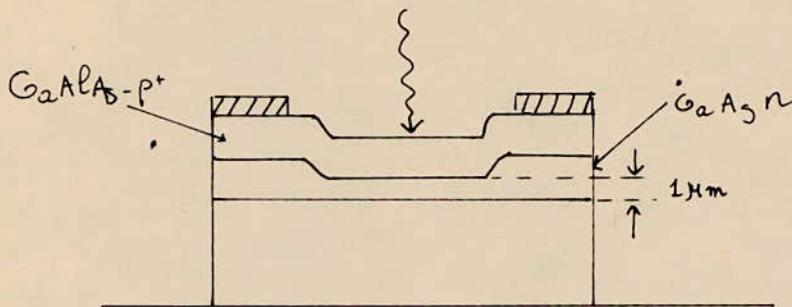


Fig n° 38: schéma d'une photodiode à avalanche hetero-jonction
GaAs - GaAlAs

C-CONCEPTION

projet de liaison

I - TRANSMISSION NUMERIQUE

1° Choix du Numérique

Le problème le plus important qui se pose présentement avec la lumière cohérente se propageant le long du coeur de la fibre est la modulation de faisceau, c'est à dire la superposition de l'information sur celui-ci selon un procédé assurant sur le plan technique et économique la rentabilité du système, c'est de la solution apportée à ce problème que dépend la disponibilité de millions de voies téléphoniques ou leur équivalent (en nombre également élevé) en canaux de télévision.

Il faut toutefois admettre que non seulement, la modulation mais aussi le moyen de propagation présentent encore des inconvénients qui ne sauraient d'ailleurs tarder à disparaître.

Les systèmes futurs mettront en oeuvre les deux types de transmission utilisés jusqu'à présent, à savoir le multiplexage par répartition en fréquence et le multiplexage par répartition dans le temps. Il est clair cependant que les systèmes numériques seront employés dans la plus grande partie du réseau en particulier donc dans les réseaux optiques et ce pour maintes raisons.

Dans sa conception la plus large la transmission est de type analogique, c'est à dire qu'elle répond à la nature même de l'information à transmettre avec la règle suivante à chaque type d'information correspond un traitement spécifique.

De ce fait les systèmes de transmission analogique sont lents et présentent des bruits gênants tels que la diaphonie.

La transmission numérique présente plusieurs avantages et s'adapte parfaitement aux fibres optiques.

On émet des échantillons discontinus du signal initial sous forme numérique en une suite de trains d'impulsions qui permettent de reconstituer le signal.

La numérisation de l'information s'accompagne généralement d'un élargissement du spectre.

Les ondes lumineuses sont caractérisés par leur fréquences porteuse extrêmement grande (trois cent mille GHZ 300 000) elles offrent donc une bande, passante très large cent mille soit : (100.000) celles des ondes radio actuellement exploitées, elles sont donc capables de véhiculer d'énormes quantités d'informations. Les fibres optiques constituent un moyen de transmission à large bande.

Ceci est un point positif pour la transmission numérique.

De plus, la technique numérique offre l'avantage de permettre l'utilisation de récepteur sensibles seulement à la présence ou l'absence de lumière et pour lesquels les états intermédiaires sont sans importance. On utilise donc moins de puissance que pour les systèmes analogiques. Les opérations de communication, de multiplexage, de traitement du signal en général s'effectuent plus,

simplement sur des signaux numériques qui sont moins sensibles, aux couplages parasites ou aux non linéarités et instabilité des caractéristiques des jonctions semi conducteurs que les signaux analogiques. -

Ainsi donc la transmission numérique présente un avantage certain par rapport à la transmission analogique, et c'est la raison pour laquelle on fera l'étude de liaisons numériques par fibres optiques, celles-ci sont difficilement utilisables en analogique.

La technique numérique s'emploie déjà avec les systèmes de modulation par impulsion et codage (MIC) qui offrent de nombreux avantages, meilleure qualité de transmission, résistance élevée aux bruits, grande fiabilité et surtout possibilité de disposer d'une ligne numérique ne dépendant pas du service à assurer mais uniquement de la vitesse de transmission. Il est alors possible d'utiliser cette ligne pour des voies de téléphone, de transmission vidéo, de visiophone, de données à grande vitesse ect...

Un système total de transmission sur fibre optique comporte essentiellement trois parties : un ensemble d'émission, un câble et un ensemble de réception. Les systèmes de transmission numérique sur fibres optiques diffèrent assez peu sur le plan théorique des systèmes classiques sur câbles, seuls leurs aspects technologiques présentent plusieurs caractères originaux.

Il n'est donc pas nécessaire d'explicitier toutes les opérations de la chaîne de transmission par fibres optiques, on insistera uniquement sur les aspects propres aux fibres optiques. -

Comme on l'a vu au début, il est possible d'imaginer deux types de transmission ayant comme support des fibres optiques.

1° - Un premier type quelque peu futuriste utilisant des fibres monomodes où un seul mode peut se propager.

On utilise actuellement pour les guides d'ondes circulaires une modulation à quatre états de phase avec démodulation différentielle (dans ce cas il est aussi difficile de réaliser une transmission analogique à cause des irrégularités de la fonction de transfert du guide). Un système analogue à celui-ci est envisageable pour les fibres monomodes. Dans ce système une même fibre véhiculerait plusieurs canaux à des fréquences différentes, modulée chacun à un débit de plusieurs GHz. En se limitant aux longueurs d'onde comprises entre 0,9 et 11 on obtient une bande passante de soixante mille GHz (60.000) soit deux mille fois (2000) plus élevée que celle - ci d'un guide d'onde circulaire.

2° - Un second type utilisant les fibres multimodes et qui sont comme on l'a vu plus facilement réalisables. Les différents modes transmis ne se propagent pas à la même vitesse, une impulsion fine de lumière émise à l'entrée de la fibre se trouve comme on l'a vu élargie à la sortie ce qui limite le débit d'information.

Cependant comme il est possible de réunir un grand nombre de fibres optiques à l'intérieur d'un même câble, comme on le verra par la suite on peut envisager à relativement court terme une application vulgarisée, à la transmission à moyenne capacité et à courte distance, en zone

2° Câbles optiques .

2.1 - Introduction.

L'aspect câble d'un système de transmission par fibres optiques, est la partie la plus originale .

On se propose alors de présenter la structure du câble optique .

2.2. Définition : fig n° 39.

* On appellera conducteur de lumière, un ensemble formé d'une ou plusieurs fibres optiques et d'une enveloppe assurant une protection mécanique et optique suffisante, véhiculant la même information lumineuse.

* On appellera câble optique un ensemble formé de plusieurs conducteurs de lumière véhiculant des informations différentes et d'un revêtement assurant une protection mécanique efficace.

. La fibre optique, ne résiste pas à une trop grande traction, on est donc amené à armer les câbles ou les faisceaux d'un support mécanique. Il sera nécessaire par ailleurs, de brosser les conducteurs pour répartir les efforts en cas de courbure du câble. -

* On appellera connecteurs, les liaisons entre deux câbles ou entre un câble et les éléments d'extrémités. -

2.3. Nombre de fibres dans un conducteur.

Les conducteurs multifibres améliorent la fiabilité d'une liaison, et diminuent fortement les pertes à l'injection. Mais , en plus de leur coût élevé par rapport aux conducteurs monofibres, ces conducteurs présentent une distorsion de propagation importante. En effet, les fibres ont des longueurs variables dans le conducteur, le temps de propagation sera alors différent dans chaque fibre, d'où une distorsion élevée. -

2.4. - Choix des fibres :

* Atténuation.

L'un des paramètres fondamentaux est l'atténuation dans la fibre on a intérêt à choisir la fibre qui présente l'atténuation la plus faible. Précisons alors un ordre de grandeur.

Pour des systèmes de télécommunications civiles, l'atténuation dans le câble, (atténuation toujours supérieure, à l'atténuation dans la fibre). devra être inférieur à 20 dB/Km pour les longueurs d'ondes existants .

* Fonction de transfert.

. C'est là, un paramètre fondamental, car il permet de déterminer la capacité de la liaison en relation avec la longueur du câble et la méthode utilisée à la détection.

Ce paramètre est fonction du type de fibre utilisée, multimode, monomode, ou à gradient d'indice.

* Pertes à l'injection : figure 40

Ces pertes correspondent à l'injection de la lumière dans la fibre. La fibre admet une partie de la puissance émise. Chaque fibre présente un angle d'acceptance défini par :

$$n_3 \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

n_1 → coeur de la fibre

n_2 → gaine de la fibre

n_3 → milieu extérieur.

Cet angle d'acceptance détermine la partie, de la puissance émise qui est admise par la fibre.

* Autres paramètres :

D'autres critères de choix peuvent être déterminants pour l'utilisation des fibres. -

- les propriétés mécaniques (résistance à la traction, torsion flexions) qui affectent directement la réalisation du câble.

- les épaisseurs relatives du coeur et de la gaine de la fibre, ainsi que la précision de l'un par rapport à l'autre.

- Possibilité de revêtements plastiques.-

2.5 Caractéristiques du câble :

* Caractéristiques mécaniques et longueur maximale.

Une fois le câble réalisé, il est important de vérifier ses performances , autrement dit, tester sa résistance à la traction, et à la pression, relever les atténuations.

Par ailleurs, des essais en milieu corrosif doivent être envisagés, ceci afin de prévenir les effets de l'humidité dans les conduites. -

Ces essais se

Les connecteurs :

Deux types de connexions sont envisagés.

- Le jointage : C'est une soudure fibre à fibre, sans intervention mécanique. Ce type de connexion permet d'espérer la réalisation de joints à très faibles pertes. -

- Le connecteur mécanique

Il s'agit de deux pièces mécaniques qui s'emboîtent ou se vissent pour amener un ou plusieurs conducteurs en vis à vis. Ce type de connecteur présente des pertes importantes vu les pertes par réflexion entre le verre de la fibre et l'air. Il est nécessaire d'assurer une quasi continuité d'indice par l'intermédiaire d'un produit liquide ou pâteux. -

II PROJET DE LIAISON

1^o Introduction

L'introduction dans un réseau P.T.T existant de systèmes nouveaux doit se faire avec le minimum de modifications. Le système nouveau ne doit pas être de nature à remplacer les structures existantes mais bien au contraire la cohabitation, doit être à caractère complémentaire. Il ne s'agit donc pas d'opposer systèmes nouveaux et systèmes anciens, mais d'oeuvrer dans une politique d'optimisation en matière d'investissement initial tout en garantissant à l'usage une bonne qualité de service.

Les guides d'ondes, artères à très forte capacité de transmission (500.000 voies téléphoniques) les fibres optiques système de transmission qui ne s'apparente à aucun des systèmes que l'on connaît vont donner une tournure nouvelle aux télécommunications.

Mais comment peut on refaire avec une onde lumineuse ce qui fut accompli avec une onde hertzienne ?

Il s'agit en effet non seulement de relier par des moyens optiques une station émettrice à une station réceptrice, mais encore de coder le signal électrique porteur de l'information, sur le rayon lumineux, qui la transmettra vers la station réceptrice où elle devra être décodée, c'est à dire reconvertie sous sa forme originale. Il faut faire plus encore, il faut d'ores et déjà imaginer tous les dispositifs de modulation, commutation, aiguillage, stockage sans lequel l'optique serait inexploitable dans le domaine des télécommunications.

Les systèmes par fibres optiques doivent en premier lieu accepter les interfaces du réseau existant et doivent opérer selon le même système de signalisations.

Il faut signaler que ces systèmes présentent un désavantage, il est en effet impossible de transmettre du courant électrique sur les fibres de verre pour téléalimenter les répéteurs intermédiaires (polarisation des composants actifs, signaux de télésurveillance, de télégestion) ce qui contribue fortement à l'augmentation de l'investissement initial dans de tels systèmes. -

La nature des signaux à transmettre, exclut toute modulation directe des émetteurs optiques par des signaux analogiques dans les systèmes de transmission actuels et surtout futurs. -

La transmission analogique par fibres optiques est possible comme on l'a déjà dit, mais la non linéarité des sources optiques, la faible stabilité de l'affaiblissement au niveau des connexions (donnée fondamentale pour une commutation obéissant à un plan de transmission) font que ces systèmes ne bénéficient d'aucun agrément.

Ainsi donc tous les objectifs se définissent autour de la transmission des différents signaux (téléphone, télévision, données) dans des systèmes numériques. Il s'agit là d'un facteur positif car les fibres optiques offrent une grande largeur de bande (16 Mz/ Km).

Pour conclure il faut constamment avoir à l'esprit qu'un système quel que il soit ne peut en aucune manière être l'incarnation de tous les avantages ou de tous les inconvénients. C'est pour cette raison que pour chaque type de liaison projetée, il faut examiner minutieusement les solutions apportées par les liaisons nouvelles envisagées et les comparer aux solutions classiques et ceci en tenant compte surtout :

- du coût initial
- du mode et du coût de la maintenance

Deux types de liaisons méritent d'être étudiées.

- liaison urbaine 34 M bits
- liaison interurbaine 140 M bits.

2° - Liaison Urbaine :

2.1. - Introduction

Bien qu'un travail considérable ait déjà été accompli la technologie des fibres optiques est à son début et les techniques de fabrication ne sont pas en mesure de permettre la réalisation d'objectifs pratiques à grande échelle. Il est donc prématuré de parler de projet de liaison, il ne s'agit en fait que de quelques orientations.

C'est une liaison entre centres de transits urbains artères de 5 000 voies téléphoniques environ. Avec ce besoin, on peut fixer la capacité de transmission, elle ne doit représenter qu'une fraction d'artère pour des raisons de sécurité.

Pour fixer les idées, il est peut être préférable de partir de données concrètes et faire l'analyse de la liaison .

Il s'agit d'une liaison fictive mais qui pourrait bien être réalisée.

On se propose les données suivantes :

- Débit numérique environ 34 M bits (480 voies) soit 1/10 de la capacité visée plus haut.
- Niveau de puissance de l'émetteur optique OdB m
- Affaiblissement lineique du câble optique 6 dB
- Perte par connecteur 0,7 dB
- La liaison comportera trois répartiteurs intermédiaires.
- Sensibilité du récepteur optique - 51 dBm. -

2.2. - Portée de la liaison.

On se reportera au diagramme des portées joint. Les courbes ont été obtenues expérimentalement partant de l'affaiblissement linéaire de 6 dB/Km que l'on s'est fixé on déduit une distance maximum (ou portée) de la liaison de 8 Km.

Il est très important de lire avec précision ces chiffres, car une erreur de 1 dB/ Km autour de l'affaiblissement se traduit par une variation de la portée de 1 Km ce qui est considérable.

Cette erreur commise sur l'affaiblissement se retrouve toujours en fin de projet et influe par conséquent sur la marge de sécurité.

Il existe un moyen de palier à cette erreur, c'est de forcer de quelques dB la puissance de l'émetteur laser à condition de ne pas porter atteinte à sa fiabilité.

A vrai dire, il faut toujours, s'opposer à toute étude de ce genre.

On doit investir sur les éléments passifs du système (fibres) et non sur les éléments actifs plus complexes donc plus chers.

2.3. Configuration de la liaison

(voir schéma n° 41

Les longueurs de fabrication sont de 600 m pour permettre le tirage en conduite, car on utilise pratiquement les mêmes principes d'installation que pour les câbles classiques.

Pour relier deux longueurs entre elles, on utilise un connecteur multifibre. Ces connecteurs seront donc placés tous les 600 m, pour la liaison de 8 Km il en faudrait.:

$$\frac{8\ 000}{600} = 13.$$

Il faut noter que ce sont des sources de pertes supplémentaires, elles s'évaluent à :

$$0,4\ \text{dB} \times 13 = 5,2\ \text{dB}.$$

L'idée, est d'utiliser des longueurs plus importantes pour le câble de réseau afin d'éviter ces connecteurs.

Les batis sont reliés aux répartiteurs par des câbles optiques de station équivalents aux jaretières que l'on connaît dans les centres d'amplification ou autres. Du fait de leur usage identique ils doivent présenter les mêmes propriétés en particulier flexibilité, montage facile des connecteurs monofibres qui les accompagnent. Leur longueur ne doit guère dépasser les 10 m.

2.4. - Bilan de la liaison, marge de sécurité

On compare la puissance mise en jeu, dans l'émetteur, à la puissance du récepteur, compte tenu bien sûr de tous les affaiblissements intervenant le long de la liaison.

Voir tableau

Soient :

Pe : la puissance de l'émetteur : 0 dB m
 Af : la somme des affaiblissements 48,2 dBm
 Pr : la puissance du récepteur. 1/4 51 dBm.

La marge de sécurité M est

$$M = Pr - (Pe - Af) \Rightarrow M : 51 - 0 + 48,2 = 2,8 \text{ dB}$$

Equipements	Caractéristiques Nominales	Quantité	Bilan Energétique.
Emetteur laser	0 dBm	1	0 dB m
Câble de station et répartiteur d'extremite.	2 dB	2	4 dB
Câble de réseau	6 dB/Km	6 Km	36 dB
Connecteur de câble de réseau	0,4 dB	13	5, 2 dB
Répartiteurs intermédiaires.	1 dB	3	3 dB
Puissance reçue			- 48, 2 dBm
Récepteur : photodiode à avalanche (sensibilité)	- 51 dBm	1	- 51 dBm
Marge de sécurité			2,8 dB

2.5 - Bande passante, type de fibres utilisées.

Le débit étant de 34 M bits, soit de 480 voies, la bande passante de la liaison est :

$$B = 480 \times 4 = 1920 \text{ KHZ.}$$

Comme pour toute liaison, la bande de fréquence constitue une des caractéristiques techniques fondamentales pour le choix du support de transmission.

Or comme on l'a dit au début, les fabricants ne maîtrisent pas encore suffisamment la technologie des composants opto électronique, il n'existe donc aucun catalogue donnant la liste des fibres avec leurs caractéristiques techniques.

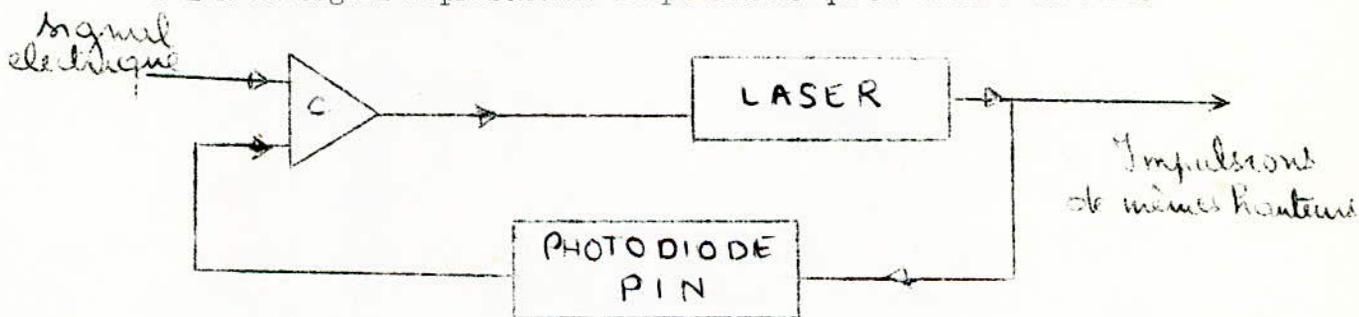
Le choix des fibres se fera donc suivant des considérations physiques (problème d'injection à l'entrée, pertes aux frontières ect...) étudiées dans la partie théorique.

Les fibres à gradient d'indice semblent mieux adaptées, pour ce genre de liaison.

2.6. - Emetteur Optique :

L'émetteur utilisé devra être d'une grande stabilité. Tous les efforts doivent donc se polariser sur le maintien de la linéarité de ce composant.

On utilisera pour tout problème de ce genre, une boucle de régulation. Il suffira d'extraire une partie du signal lumineux à la sortie du laser et de la comparer électriquement par l'intermédiaire d'une photodiode P I N au signal représentant la puissance qu'on désire émettre.



La photodiode sert uniquement à transformer la fraction du signal laser en courant électrique. On n'a donc pas besoin d'utiliser une photodiode à avalanche beaucoup plus chère que la P I N.

2.7. - Récepteur Optique

Là encore on fera appel à un composant optoélectronique de hautes performances, en l'occurrence la photodiode à avalanche. Le récepteur doit être équipé d'une commande automatique de gain, afin d'éviter d'atteindre la saturation pour l'amplification.

Si le récepteur est destiné à des liaisons de longueurs variables, il doit pouvoir s'adapter à différents systèmes? Il suffit pour cela de le faire suivre en fonction de la dynamique souhaitée, d'un amplificateur, vidéo à gain variable. Ainsi tous les affaiblissements supplémentaires engendrés par un changement de fibres, de connecteurs ou d'émetteur seront absorbés par le récepteur.

2.8. - Code en ligne :

Toutes les liaisons numériques du réseau utilisent, le Code HDB 3 et c'est cette technique qui continue à se généraliser même pour les débits les plus forts.

Le choix du code est lié à plusieurs facteurs et ce n'est qu'en fonction du résultat global que l'on veut obtenir qu'on choisira ou inventera le code . Par résultat global

On entend coût minimal, bonne qualité, ect....

Dans le cas des systèmes sur câbles métalliques le MDB3 a l'avantage de ne pas présenter de composante continue, ce qui évite le fonctionnement excessif des répéteurs régénérateurs.

D'autre part, ce code utilisé une largeur de bande relativement réduite par rapport à d'autres notamment le code binaire.

Concernant la liaison, optique le choix est tout indiqué car toujours dans un souci d'intégration, le système doit accepter le code HDB 3.

Pourtant, la séparation physique de l'alimentation des répéteurs régénérateurs et la canalisation de l'information rend le code MDB3 difficilement utilisable pour la liaison optique.

Il n'en demeure pas moins que le code de la fibre doit dériver directement du HDB3 afin qu'il puisse évoluer sur le même itinéraire.

HDB3	Code émis
+1	11
0	01
-1	00

Le Code émis sera un code binaire défini par le tableau ci-dessus.

Le code ne présente aucune difficulté que ce soit au niveau de l'émission c'est à dire sa création qu'au niveau de la réception particulièrement son décodage.

2.9 - Organisation du réseau de la maintenance.

Ce sont les difficultés de maintenance qui représentent le principal obstacle à la généralisation d'une technique, il n'est pas besoin de rappeler avec insistance, que l'indisponibilité est l'une des contraintes les plus déterminantes dont le respect est nécessaire pour l'acceptation d'un système.

Le C.C.I.R a prescrit des clauses concernant l'indisponibilité d'une liaison de référence de 2500 Km sur faisceaux hertziens.

Ces clauses figurent dans les documents suivants :

- Disponibilité CCIR Genève 1974 Volume 9
- Rapport 445 pour faisceaux hertziens. -

./.

- Clauses de disponibilité.

Document 9/42 F du 20.01.76 CCIR.

Des clauses analogues n'existent pas encore pour les liaisons optiques; les quelques liaisons existantes sont des liaisons expérimentales, et n'ont pas encore atteint le stade de la normalisation.

On se propose donc de faire en sorte que cette liaison obéisse aux recommandations du CCIR et CCITT concernant les faisceaux hertziens.

Un système nouveau tel que les liaisons optiques a certes ses possibilités, mais dans une première application, on exige une qualité de service égale à celle offerte par les systèmes classiques qui sont quand même reconnus satisfaisants.

Seuls les aspects technologiques peuvent mettre en évidence un critère nouveau à savoir la concurrence.

- Disponibilité.

On appelle disponibilité, l'aptitude du système à répondre aux objectifs compte tenu de la fiabilité estimée de ces composants laser, diode laser, photodiode ect dans ce cas.

Disponibilité et fiabilité sont synonymes dans les systèmes de transmission, ces notions sont fondées sur la durée du bon fonctionnement et fournissent donc une information utile sur la qualité.

Mathématiquement la disponibilité est définie par le rapport.

$$D = \frac{\text{temps du bon fonctionnement}}{\text{temps d'utilisation (durée de vie)}}.$$

Pour une liaison de 2500 Km par faisceau hertziens du type normal + secours, le CCIR prévoit un pourcentage d'indisponibilité de 0,3 % dont le tiers est lié aux équipements .

Calcul .

On considère une liaison de 2500 Km sur fibre optique liaison fictive de référence.

Soit $I = 0,3 \%$ l'indisponibilité imposée, l'indisponibilité liée aux équipements est $I' = 1/3 = 0,1\%$

On transforme ce calcul à la liaison urbaine de 8 Km, son indisponibilité est :

$$i = \frac{10^{-3} \times 8}{2500} = 3210^{-7} = 3,210^{-6}$$

Par définition de l'indisponibilité.

$$i = \frac{\text{temps de non fonctionnement}}{\text{Durée de vie du système}} = \frac{TN}{T}$$

et l'on voit que :

$$D + i = 1$$

- MTBF :

On appelle MTBF la moyenne du temps de bon fonctionnement du système. Mathématiquement on a

$$\text{MTBF} = \frac{\text{durée de vie du système}}{\text{Nombre de défaillance}} = \frac{T}{n}$$

Partant d'une MTBF de 100 000 heures pour l'émetteur - récepteur, on se propose de calculer le temps d'intervention et juger, sur la base de ces résultats, si une commutation automatique est nécessaire. -

$$i = \frac{T}{N} \Rightarrow T = \frac{T}{N} \times i$$

$$\text{MTBF} = \frac{T}{i \times n} = T_{im} = \frac{\text{temps d'intervention}}{\text{indisponibilité.}}$$

$$T_{im} = \text{MTBF} \times i$$

$$\begin{aligned} T_{im} &= 10^5 \times 32 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,32 \text{ heures.} \end{aligned}$$

Le temps d'intervention paraît relativement court, une commutation automatique ne semble guère nécessaire. -

- Alarme et Surveillance.

Il s'agit de transmettre des informations vers un poste de télésurveillance pour la gestion et la surveillance.

Le fait que les informations en question soient canalisées sur un support métallique en parallèle avec le câble optique rend le système de télégestion bien particulier.

Au niveau de l'émission, on surveillera par exemple le seuil de chaque diode laser. Il suffit de doter le laser d'un système de régulation de puissance émise suggère plus loin.

Ainsi toutes les dérives, les effets de vieillissement, seront mis en évidence par simple lecture du courant de prépolarisation appliqué à la boucle. L'anomalie sera visualisée sur un voyant par exemple.

Du côté réception, on vérifiera le taux d'erreur de chaque bond. On utilisera un système qui comparera la voie en service à une voie de référence et toute faute déclenchera une alarme.

3° - Liaison interurbaine de 120 Km

3.1. Introduction

Dès que l'on dépasse une distance de 8 Km entre émetteur et récepteur l'information subit des distorsions sérieuses avant d'aboutir à sa destination. Des équipements de correction de mise en forme doivent donc s'intercaler tout le long de l'itinéraire qu'empruntera l'information, et différencieront cette liaison de la liaison urbaine. Néanmoins l'étude comportera les mêmes grands axes. -

3.2. - Portée et configuration de la liaison

Le diagramme expérimental donne pour un débit de 140 M Bits et un affaiblissement de 6 dB/Km un pas de régénération d'environ 8 Km. Ce pas de régénération relativement grand est un élément très favorable qui donne une grande souplesse en matière d'établissement du trajet du câble et réduit le nombre de répéteurs - régénérateurs.

Pour une longueur de liaison de 120 Km, le nombre de répéteurs - régénérateurs est : (pour une seule fibre)

$$N = \frac{120}{8} = 15$$

Ces répéteurs régénérateurs seront placés dans des sites non habités. Mais pour la maintenance et l'intervention sur ces répéteurs, il est indispensable que ces derniers soient à accès facile, la solution qui demeure valable est leur installation au bord de la route. -

3.3. - Bilan, bande passante.

Il n'est pas nécessaire de revenir sur ce qui a été déjà dit à propos de la liaison urbaine.

Le bilan énergétique se fera de la même manière

La bande passante pour le débit de 140 M bits (1920 voies)

$$B = 1920 \times 4 = 7680 \text{ KHZ.}$$

Les fibres de silice- dopées au germanium - multimodes à gradient d'indice conviennent parfaitement à ce genre de débit. Ces fibres possèdent une bande passante jusqu'à 300 MHz/Km.

4° - Organisation de la liaison

Le débit de 140 M bits (1920 voies) est un juste milieu entre le 34 M bits ou plus faible qui ne sont pas économiques et des débits plus forts qui exigent une bande plus large difficile à obtenir avec des fibres à gradient d'indice à l'état actuel.

Des artères à 100 fibres travaillant à 34 M bits ou 25 fibres pour 140 M bits ont été fabriquées dans certains pays. Ce type de câbles vue de l'extérieur présentent les mêmes aspects que les câbles classiques. -

- Fiabilité et disponibilité de la liaison

Il s'agit de voir essentiellement dans quelle mesure les objectifs de disponibilité du C.C.I.R que l'on a déjà énumérés peuvent être retenus.

Si l'on considère un taux d'indisponibilité de 0, 1 % pour une liaison de 2500 Km, l'indisponibilité de la liaison de 120 Km est

$$i = \frac{0,1 \times 120}{2500} = 4,8 \cdot 10^{-5}$$

./.

Etant donné l'importance du débit véhiculé sur une telle artère , un dispositif de sécurité et de gestion doit être prévu , un dispositif de redondance est nécessaire.

La liaison interurbaine comporte un nombre élevé d'éléments actifs (répéteurs - régénérateur) . La notion de MTBF a plus d'importance dans ce cas que pour la liaison urbaine, pour l'étude de la fiabilité de la liaison.

Si on fixe le MTBF d'un répéteur régénérateur optique à 5000 h et le temps d'intervention de 5 h, l'indisponibilité est :

$$I = \frac{5}{5 \cdot 10^4} = 10^{-4}$$

L'indisponibilité totale de la liaison sera de :

$$J = 15 \times 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

Cette valeur correspond à un circuit.

Comme dans toute liaison de grande importance, on doit envisager un canal de secours en cas de fautes sur l'un des canaux normaux.

Avec un canal de secours la liaison aura une probabilité de coupure.

$$I = \frac{n+1}{2} J^2$$

où I : est l'indisponibilité calculée précisément plus haut.

n : nombre de canaux normaux de la liaison.

Ainsi donc on peut déterminer le nombre de canaux normaux pour un canal de secours

$$\Rightarrow n+1 = \frac{2I}{J^2} = \sqrt{\frac{2 \times 4,8 \cdot 10^{-5}}{(1,5 \cdot 10^{-3})^2}} = 41 + 1$$

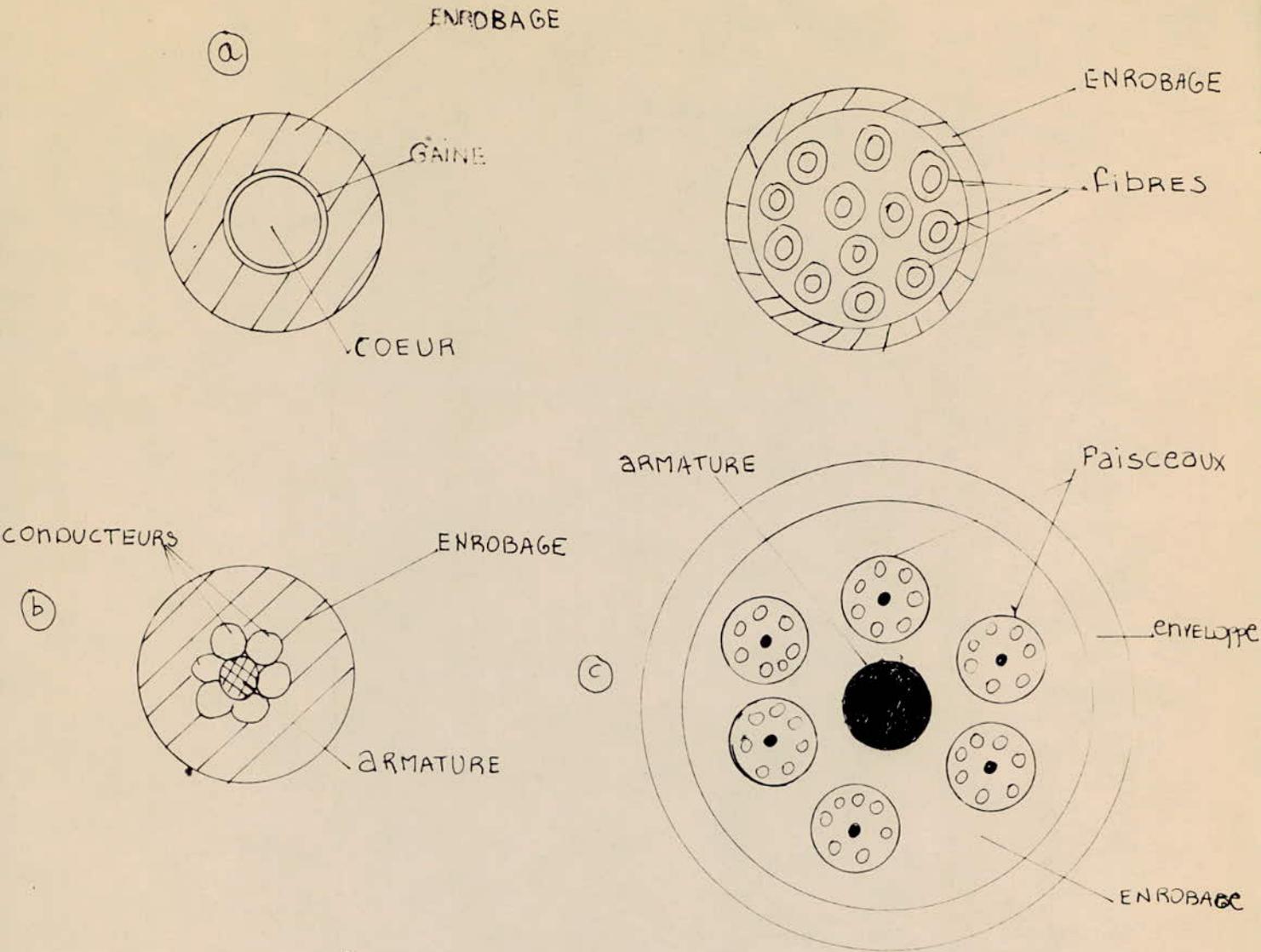


Fig n° 39 : Eléments de câblage . a) définition d'un conducteur ; b) structure d'un faisceau de conducteurs ; c) structure d'un câble

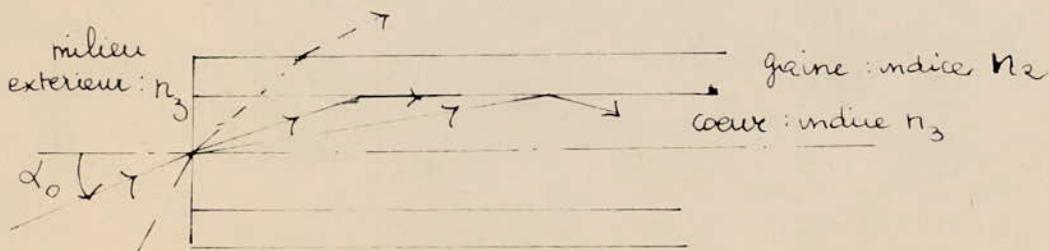
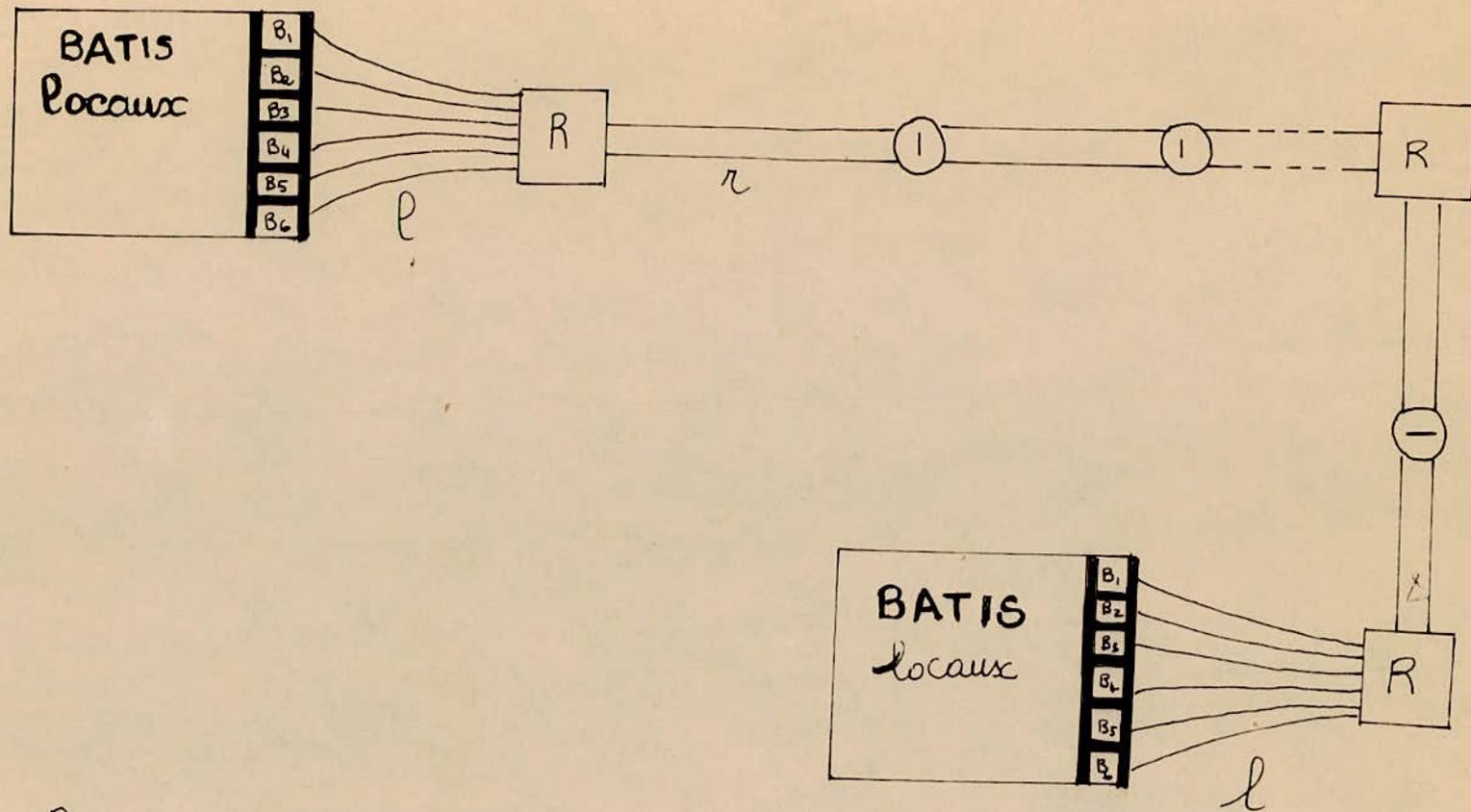
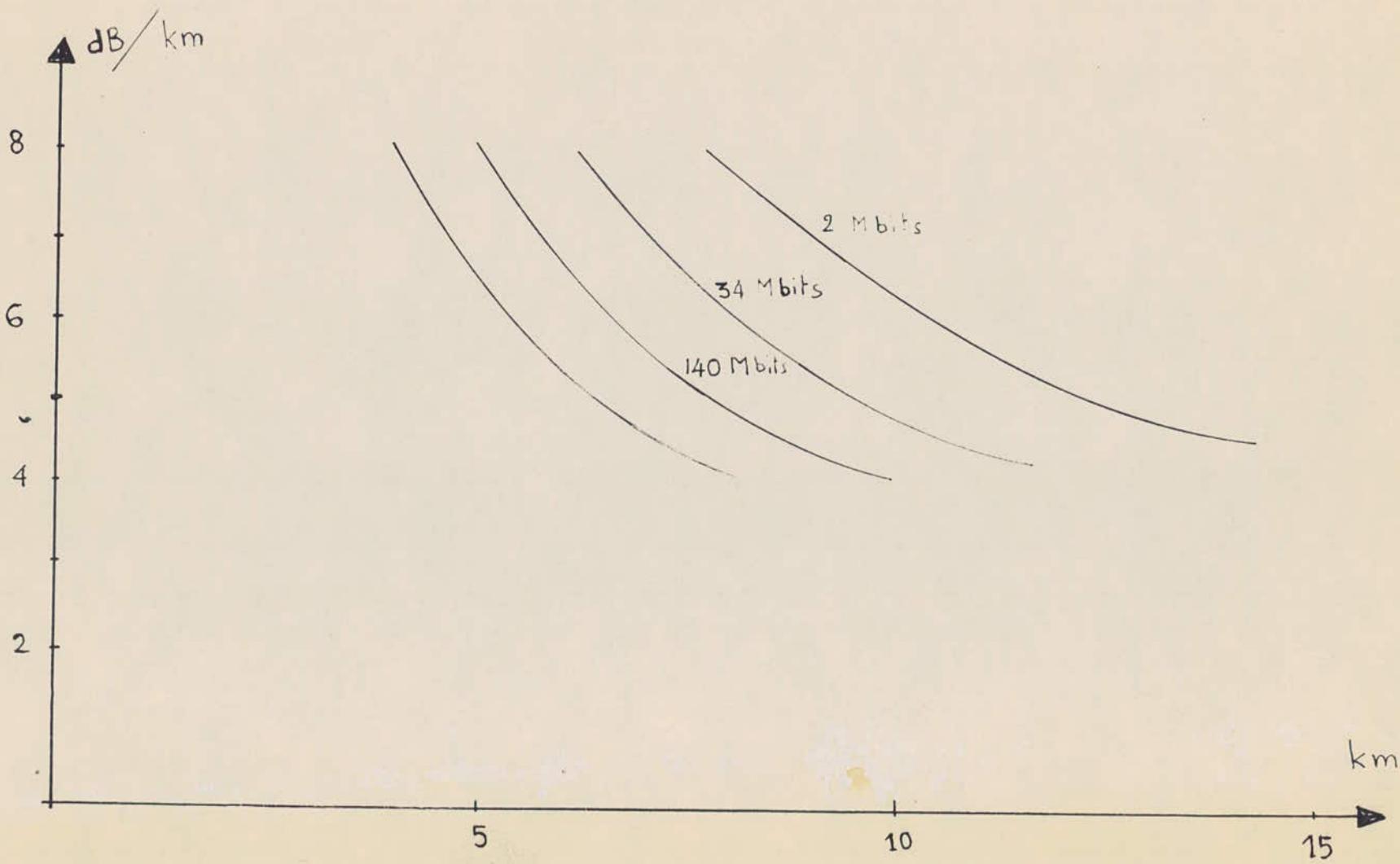


Fig n° 40 : Définition de l'angle d'acceptance de la fibre



R : repartiteurs
 I : connecteur
 l : câble de station
 r : câble de reseau

figure 41



E. CONCLUSION

Depuis quelques temps, les ondes optiques sont en voie d'acquiescir leur heures de gloire, ~~elles~~ traitées modulées et reçues à des fréquences diverses, elles vont permettre aux hommes de se communiquer à grande vitesse les informations qui leur sont nécessaires raccourcissant les distances et resserrant davantage les liens. -

Ainsi se précise l'avenir des télécommunications optiques, technique originale aux performances élevées dont les avantages devraient être nombreux, en raison des faibles dimensions des circuits qui donneront la possibilité de déposer plusieurs composants sur un même substrat, et par conséquent d'augmenter encore les capacités, en raison des techniques utilisées pour l'élaboration des circuits optiques intégrés; techniques analogues à celle des circuits intégrés électroniques permettant des fabrications de grandes séries à faible coût, en raison enfin de leur grande fiabilité. -

Cependant, bien que de nombreux problèmes aient été résolus (et les réalisations courantes le prouvent), en particulier celui des connexions entre fibres et des interfaces avec les terminance électroniques, l'optique intégrée demandera encore une dizaine d'années de recherches mise au point et développement. D'ici là l'utilisation des diodes électroluminescentes et des diodes laser trouvera des applications irrévocables dans la transmission d'informations à courte distance, par exemple à bord des avions où l'environnement magnétique perturbe les transmissions radioélectriques et oblige les constructeurs à utiliser des câbles très protégés, donc volumineux, lourds, encombrants et chers.

Insensibles à l'environnement magnétique, les transmissions optiques pourraient apporter des solutions avantageuses de légèreté, fiabilité, économie, là où s'arrêteraient les possibilités des autres moyens de transmission,

Les fibres optiques et le laser, ensemble ^{ont} modifier notre vie
quotidienne

Les communications seront plus rapides, les ordinateurs communi-
queront de mieux en mieux et plus rapidement. L'interface entre les
satellites et les micro ondes et les ordinateurs et câbles ne sera
plus un problème. La faisabilité des fibres optiques ou plus
exactement des transmissions optiques n'est plus à démontrer. -

EXTRA STRONG