

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

39/87

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

Text

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

d'electronique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

... ETUDE „ d'une „ UNITE „ ...
„ de „
... PRODUCTION et D'ESSAIS ...
„ de „
FIBRES OPTIQUES

Proposé par :

Mr. A. Zerguerras

Etudié par :

M^{elle}. H. Salah

Dirigé par :

Mr. A. Zerguerras

PROMOTION **Juin / 87**

A tous les passionnés de projets, nouvelles technologies, recherches et développement,

Qu'ils trouvent dans ce polycopié la trace d'une marche branlante, qui permettra d'approximation en approximation de progresser dans la connaissance du monde optique .

INTRODUCTION.....I

PREMIERE PARTIE

I- Introduction3
 II- Principes de transmission sur fibres optiques.....5
 III- Les parametres fondamentaux des fibres optiques.....8
 III-1- profil d'indice.....8
 III-2- ouverture numerique.....9
 III-3- modes de propagation.....9
 III-4- bande passante.....9
 III-5- la dispersion dans les fibres optiques.....10
 III-6- attenuation.....12
 III-7- sources de bruits.....15
 Conclusion16

CHAPITRE-II-

I- Mecanisme de l'emission lumineuse.....17
 II- Les sources lumineuses.....18
 II-1- les caracteristiques des sources lumineuses.....18
 II-2- Modulation.....20
 II-3- La diode laser.....20
 II-4- La diode electroluminescente.....22
 II-5- Utilisation des sources optiques dans les
 telecommunications optiques.....24
 III- Les detecteurs de lumiere.....25
 IV - Conclusion.....26

CHAPITRE-III-

I- Fabrication des fibres optiques.....28
 II- Les cables optiques.....33
 III- Le clivage des fibres optiques.....41
 IV - Epissures.....42
 V - Connexions.....43
 VI - Les coupleurs passifs.....44

DEUXIEME PARTIE



I- introduction.....	49
II- les grandes etapes historiques de l'evolution des fibres optiques.....	49
III- la situation des fibres optiques dans le monde.....	52
IV - application au cas de l'Algerie.....	54
IV-I- comparaison des cables optiques et des cables en cuivre.....	54
IV-2- evolution de l'offre et de la demande.....	66
IV-2-I- evolution de l'offre.....	66
IV-2-2- evolution de la demande.....	69
V - conclusion.....	72

TROISIEME PARTIE

Introduction	
I- Le local.....	73
I-1- Laboratoire de production.....	74
I-2- Laboratoire de mesures.....	76
I-3- Alimentation.....	78
I-4- Chauffage.....	79
I-5- Le lieu de travail.....	79
II- Les equipements de production et d'essais de fibres optiques.....	80
II-I- Equipements de production.....	80
II-2- Tetes et emetteurs optiques.....	86
II-3- Connecteurs.....	88
II-4- Materiels de clivage de la fibre optique.....	88
II-5- Appareils d'epissage et de mesures des caracteristiques de la fibre optique.....	89
II-6- Appareils pour tests mecaniques.....	89
III- Methodes de mesures des caracteristiques de la fibre optique.....	90
III-I- methode de la mesure de la distribution de l'indice de refraction.....	90
III-2- mesure du diametre de la fibre par la methode de projection de l'image de la fibre.....	93
III-3- mesure de la dispersion intermodale par la methode de l'excitation selective.....	94
III-4- caracterisation des fibres optiques par retrodiffusion.....	96

III-5- mesure du defaut de perpendicularite entre
l'axe de la fibre et sa face de sortie.....I01

CONCLUSION.....I02

ANNEXESI03

ANNEXE(1) Utilisation de la methode des moments.....I03

ANNEXE(2) Principe de la methode du R.N.F.....I05

ANNEXE(3) Principe de la methode de retrodiffusion.....I07

ANNEXE(4) Circuits electroniques:

-commande de l'emission. I09

-detection.....I10

-controle de temperature..I11

BIBLIOGRAPHIE.....I12

I.N.T.R.O.D.U.C.T.I.O.N

L'utilisation de la lumière comme support de transmission remonte très loin dans le temps. En 1870, Tyndall démontrait, que la lumière pouvait être guidée par un jet d'eau. Dix ans après, Alexandre Graham Bell étudiait la possibilité de transmettre de la parole sur un rayon lumineux .

La première étude théorique des guides d'ondes diélectriques a été apporté par Hondros et Debye en 1910 et des résultats expérimentaux ont été publiés dix ans plus tard . Mais, ce n'est qu'en 1954 qu'apparut un guide d'onde diélectrique gainé; La fibre optique qui, à l'époque, était encore au berceau. L'atténuation qu'elle présentait dépassait les 20dB/Km. Depuis, plusieurs études et expériences suivirent afin d'obtenir un système de transmission acheminant une grande quantité d'informations à très grandes distances et avec une vitesse avoisinant celle de la lumière : Un rêve qui se réalisa en moins de 20 ans .

Actuellement, l'importance des guides d'ondes à fibres optiques et leurs avantages ne sont plus à discuter. Ils offrent :

- de faibles pertes dans une gamme étendue de longueurs d'onde (moins de 0,1dB/Km).
- une grande bande passante (pouvant dépasser les 100GHZ.Km).
- une souplesse incontestable .
- de faibles dimensions et poids .
- absence d'interférences électromagnétiques .
- faible diaphonie et grande sécurité .
- abondance naturelle des matériaux pour la fabrication .
- grande résistance aux attaques chimiques et aux variations de température.

Des recherches se poursuivent actuellement en direction de l'amélioration de la durée de vie, de la résistance mécanique et de l'insensibilité aux bruits.

Le but de ce projet n'est pas seulement de souligner l'intérêt des fibres optiques et de leurs applications, il consiste également en une contribution (aussi modeste soit elle) éclairant sur les moyens à mettre en oeuvre pour introduire cette technologie dans le pays .

.....

I - INTRODUCTION

Un système de transmission optique exige trois éléments essentiels :

- Un transducteur qui convertit les signaux électriques d'entrée en lumière injectée dans la fibre .
- Un câble guide d'onde en matériau diélectrique .
- Un détecteur qui convertit les signaux lumineux reçus en signaux électriques .

Pour la transmission sur de longues distances, les répéteurs sont indispensables.

La forme adoptée pour un système de transmission par fibres optiques, quelque soit sa complexité, est donnée par la fig (I) .

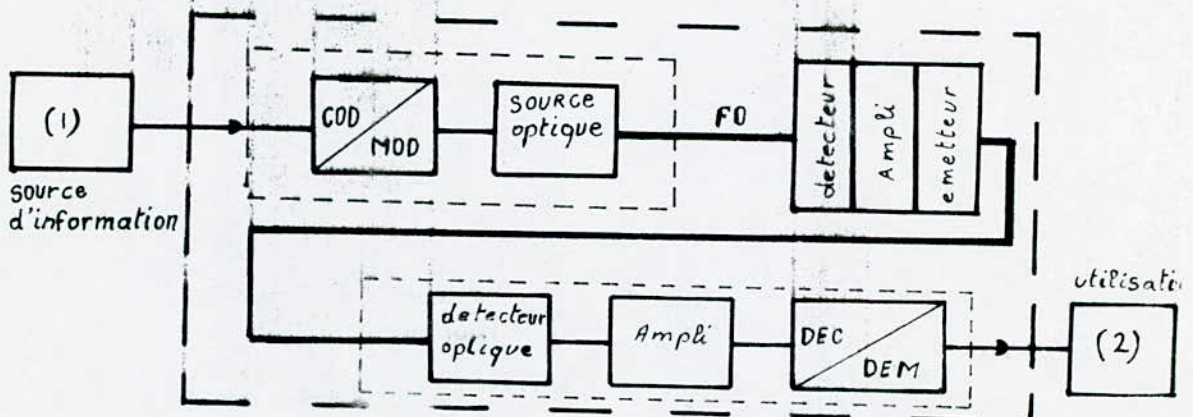


fig-I- Schéma général d'un système de transmission optique .

Il s'agit de restituer en point (2), le signal électrique présent en (1). On distingue alors :

- Un codeur ou un modulateur qui transforme le signal électrique émis par la source d'informations en un signal mieux adapté à la transmission sur fibre optique .
- Une source optique qui convertit le signal électrique en un signal optique .
- La fibre optique : Milieu de transmission .
- Un répéteur, si nécessaire, pour compenser les pertes du signal pendant la transmission .
- Un détecteur optique transformant le signal optique en son équivalent électrique .
- Un circuit de mise en forme du signal (ampli, décodeur / démodulateur) .

.....

II - PRINCIPES DES TRANSMISSIONS SUR FIBRES OPTIQUES

La lumière est une onde électromagnétique régie à la fois par les équations de MAXWELL et l'optique géométrique .
Les solutions adoptées sont, en général, représentées par le tableau (I) suivant :

Lois appliquées	Variation lente de l'indice de refraction $n(r)$	Variation brusque de l'indice à une frontière
Onde Optique	Equation d'onde contenant $n(r)$	Solution de l'équation d'onde
Rayon Lumineux	Equation de rayon contenant $n(r)$	Loi de SNELL et la réflexion totale

Tableau - I -

La transmission dans un guide d'onde optique se base principalement sur la réflexion totale de la lumière dans un milieu d'indice n_1 , à la frontière avec un milieu d'indice différent n_2 tel que $n_1 > n_2$.

Généralement, une fibre optique est constituée d'un cœur circulaire de rayon (a) et d'indice n_1 , et d'une gaine d'indice n_2 (Voir fig-2-) .

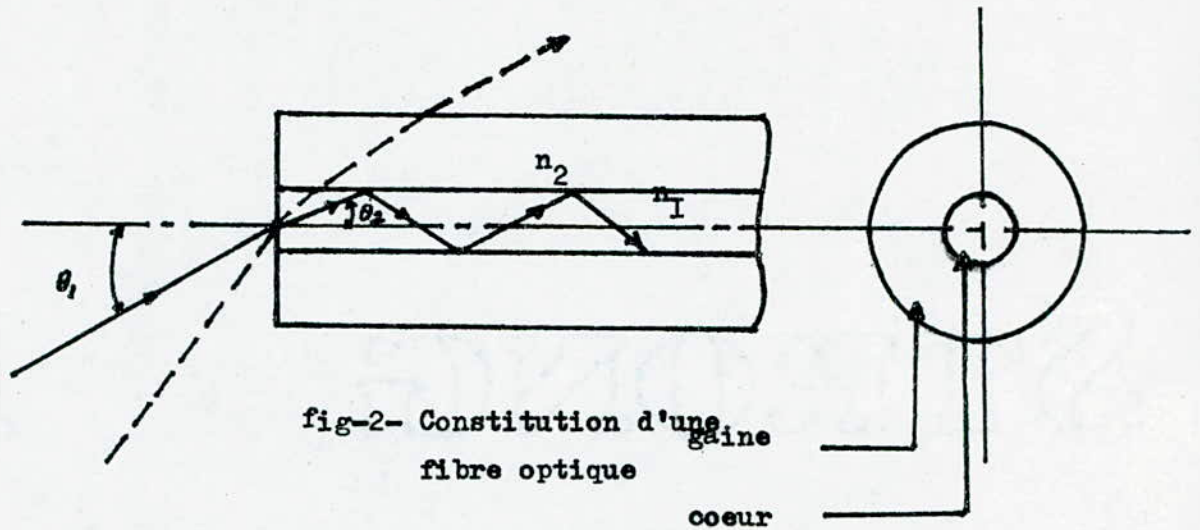


fig-2- Constitution d'une gaine fibre optique

coeur

La propagation dans le coeur dépend de l'ouverture numérique NA (Numerical Aperture) de la fibre tel que :

$$(NA) = (n_1^2 - n_2^2)^{1/4} = \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 .$$

- Si l'angle d'injection est inférieur à l'angle θ_1 , l'onde se propage dans le coeur sous un angle critique θ_2 avec l'axe de la fibre .

- Si l'angle d'injection est supérieur à θ_1 alors, la lumière injectée ne subit pas de réflexions totales et est réfractée dans la gaine ou même, dans l'air .

Les différents types de fibres optiques ainsi que leurs principales applications sont donnés au tableau II .

type de fibres	matériau cœur/gaine	principales applications
multimode à saut d'indice	silice fusion- ne/silice fisionnee	- systèmes de mesures - transmission d'images
"	silice/ fluoropolymer	- guides de lumiere UV .
	silice/sili- cone polymer	- transmission d'images - transmission à moyenne portée .
	verres multi- composants/ fluoropolymer	- guides de lumiere UV .
	polymethyl metacrylate/ fluoropolymer	- guides de lumiere - transmission a courte distance .
multimode à gradient d'indi- ce .	silice dopee/ silice fusion- nee .	- télécommunications .
	par modifica- tion d'ions de verres mu- lticomposants	- systèmes optiques .
monomodes	silice fusion- nee/ meme	communication à longues portées .

tableau(II)

III - LES PARAMETRES FONDAMENTAUX DES FIBRES OPTIQUES

III - I - Profil d'indice

Il doit être conservé pendant tout le processus industriel aboutissant à la réalisation de la fibre afin de ne pas altérer les performances de la fibre.

Il est constant dans le cas des fibres monomodes et multimodes à saut d'indice; $n_1 =$ constante dans le cœur et $n_2 =$ constante dans la gaine tel que $n_1 > n_2$.

Dans le cas des fibres multimodes à gradient d'indice, le profil est variable et est donné par :

$$(*) \quad n^2(R) = \begin{cases} n_1^2 (1 - 2 R^\alpha \Delta) & \text{pour } R \leq 1 \\ n_1^2 (1 - 2 \Delta) = n_2^2 & \text{pour } R > 1 \end{cases}$$

α étant le paramètre du profil d'indice, Δ la différence relative d'indice tel que :

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1,$$

et $R = r/a$ représente la position radiale normalisée au rayon de cœur de la fibre.

La variation du profil d'indice suivant la loi (*) permet de traiter tous les gradients d'indice allant du profil triangulaire ($\alpha = 1$) au profil en échelon ($\alpha = \infty$) (voir fig-3-).

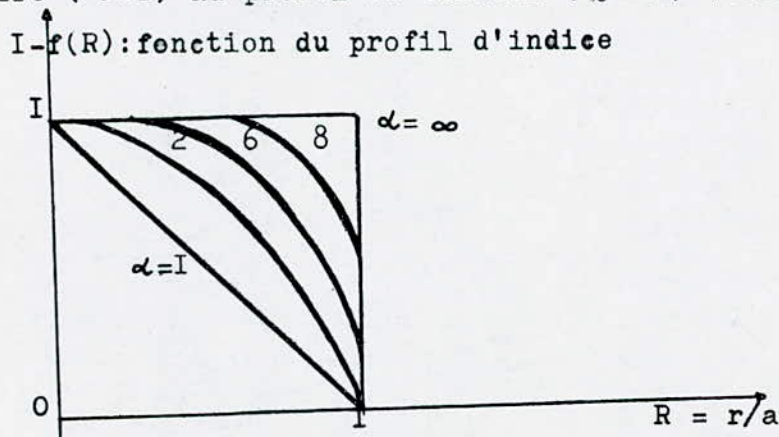


fig-3- Représentation analytique décrivant divers profils d'indice .

III - 2 - OUVERTURE NUMERIQUE

C'est l'angle maximal de lumière pouvant être introduit dans une fibre. Quand l'ouverture numérique $(NA) = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ augmente, les pertes de couplage entre la fibre et la source de lumière diminue, mais exige une grande différence de composition chimique entre le coeur et la gaine d'où augmentation des pertes introduites dans la transmission.

III - 3 - MODES DE PROPAGATION

Le nombre (N) de modes pouvant se propager dans la fibre est donné par :

$$N = (\pi d (NA))^2 / 2\lambda .$$

ou λ représente la longueur d'onde du rayonnement et d le diamètre du coeur de la fibre.

N varie en fonction du diamètre du coeur d, quand d devient du même ordre que la longueur d'onde, un seul mode peut alors se propager.

III - 4 - BANDE PASSANTE

Elle est liée au profil d'indice et au couplage de modes. La fréquence de base B est donnée par:

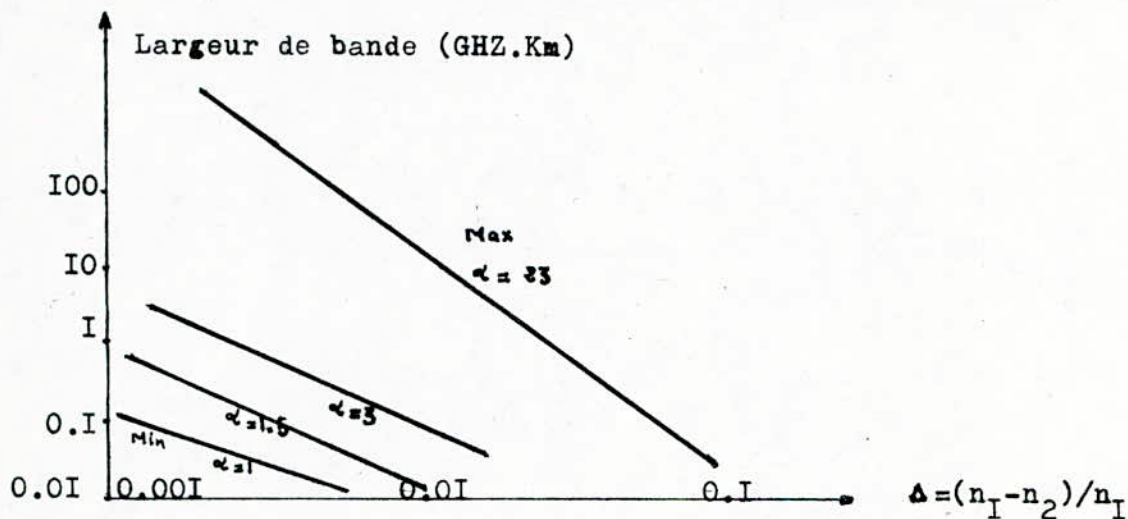
$\Delta\tau^{(n)}$ représentant le temps de retard de groupe dû à la dispersion intramodale.

$$B = A / \left| \Delta\tau^{(n)} \right| , \text{ avec}$$

Pour les fibres monomodes, la bande passante est limitée, essentiellement, par la dispersion chromatique et intramodale.

Dans le cas des fibres multimodes, elle est causée par la différence des vitesses de groupes des modes de propagation.

La variation de la bande passante en fonction de Δ des différences d'indices de refraction est donnée à la figure-4-.



(2)
fig-4-

Le produit bande passante x distance BL est tel que :

$$BL = A(\lambda/c |d^2n/d\lambda^2| \Delta\lambda_s)^{-1} = \text{constante pour les fibres multimodes.}$$

et $B\sqrt{L} = \sqrt{A}(\lambda/c |d^2n/d\lambda^2|)^{-1/2}$ pour les fibres monomodes .

Ceci signifie que, pour les fibres monomodes, la bande passante décroît avec la distance, uniquement, comme $(L^{1/2})$, avec $\Delta\lambda_s$: la largeur spectrale de la source, $dn/d\lambda$; la variation de l'indice de refraction avec la longueur d'onde ;

A, une constante qui relie l'étendue de retard de groupe à la largeur de bande .

III - 5 - LA DISPERSION DANS LES FIBRES OPTIQUES

Elle résulte de la composition de :

- la dispersion chromatique
- la dispersion intramodale
- la dispersion intermodale .

III-5-I- Dispersion chromatique

Elle est due à la largeur de la densité spectrale $s(\lambda)$ des sources optiques utilisées.

L'expression du facteur de dispersion chromatique donné par un calcul statistique utilisant le développement de SELLMIEIER particulier pour la silice $n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 (A_i \lambda^2) / (\lambda^2 - B_i^2)$ est tel que :

$$\begin{aligned} \tau(\lambda, x) = & - \lambda_0 L / c (\lambda - \lambda_0) \left(4 \lambda^2 \sum_{i=1}^3 A_i B_i^2 / (\lambda^2 - B_i^2)^3 + \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^3 A_i B_i^2 / (\lambda^2 - B_i^2)^2 + \lambda^2 / n^2 \left(\sum_{i=1}^3 A_i B_i^2 / (\lambda^2 - B_i^2)^2 \right)^2 \right). \end{aligned}$$

Où, λ_0 est la longueur d'onde du mode fondamental de propagation, A_i, B_i des constantes statistiques liées aux trois bandes principales d'absorption du matériau (ici le calcul est fait pour le cas, le plus utilisé, la silice).

III-5-2- Dispersion intramodale

Elle est due à la dispersion de chaque mode de propagation dans la fibre, et constitue le seul terme dispersif dans une fibre monomode. Elle est due :

- Aux propriétés dispersives du matériau.
- A la structure du guide et du mode.

L'application de la méthode des moments nous donne :

$$\tau_{\text{intramodale}} = (\sigma_s / \lambda_0) \cdot (L/c) (\lambda_0^2 \cdot d^2 n_1 / d \lambda^2)$$

avec $\sigma_s = \left(\int_0^\infty (\lambda - \lambda_0)^2 s(\lambda) d\lambda \right)^{1/2}$ représente l'écart-type de la distribution spectrale $s(\lambda)$, et L, la distance de la fibre parcourue par une impulsion intermodale.

III-5-3- DISPERSION INTERMODALE

Elle est liée au profil d'indice et se détermine à partir de la relation définissant le temps de groupe :

$$\tau(\beta) = (L \cdot d\beta/d\omega).$$

L'équation de dispersion du temps de groupe est donnée par :

$$\tau(\beta) = (LN_I/c)(Kn_I/\beta) \cdot (1 - ((2-p)/(\alpha+2)) (1 - \beta^2/K^2 n_I^2)) .$$

où β représente la constante de propagation, c la vitesse de la lumière dans le vide, (Kn_I) le vecteur d'onde associé à l'onde plane se propageant dans le cœur d'indice n_I , α un paramètre du profil d'indice et p le paramètre de dispersion normalisée du profil d'indice.

La caractérisation des propriétés dispersives des fibres optiques peut se faire à partir de l'observation d'une déformation subie par une impulsion lumineuse se propageant dans la fibre .

III-6- ATTENUATION DANS LES FIBRES OPTIQUES

L'atténuation dans les fibres optiques est due à plusieurs paramètres :

III-6-1- Diffusion intrinsèque de Rayleigh

Elle est due à des fluctuations de densité. Elle est pratiquement proportionnelle à λ^{-4} . Ce type de pertes est inévitable mais peut être négligé aux grandes longueurs d'onde .

III-6-2- Absorption dans les matériaux

Elle est due à :

- L'absorption UV intrinsèque
- L'absorption IR intrinsèque
- L'absorption des impuretés telles que

- les métaux
- les ions OH^- .

Elle est réduite par l'emploi de la technique des semi-conducteurs dans la fabrication des fibres optiques. Il faudra donc empêcher une concentration de métaux de transition supérieure à 1 pour 10^9 et une concentration d'ions OH^- supérieure à 1 pour 10^6 .

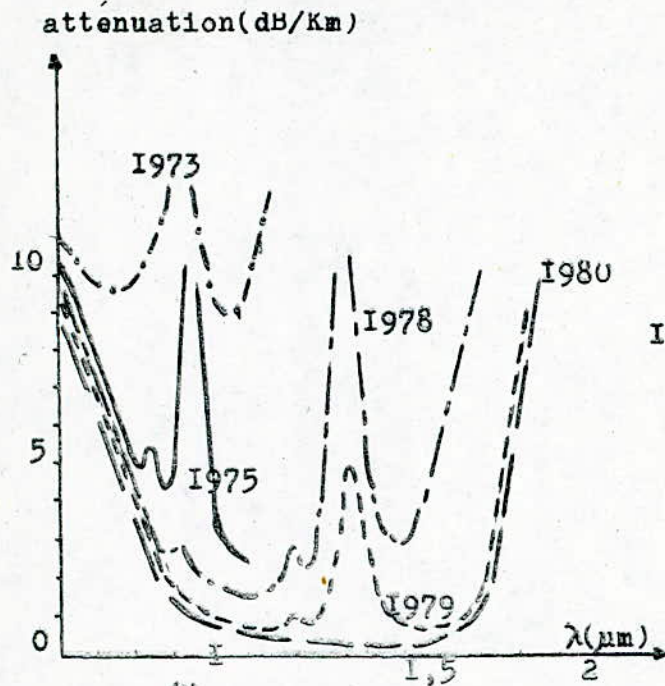
III-6-3- Pertes dues aux courbures et aux irrégularités de ----- l'interface coeur/gaine . -----

Les pertes aux courbures sont, surtout, dues aux conversions de modes et dépendent de la dimension de coeur et du rayon de courbure . Les irrégularités à la surface coeur/gaine introduisent, en plus, des pertes de rayonnement qui peuvent être limitées en augmentant le rayon de coeur ainsi que le gradient d'indice dans la gaine .

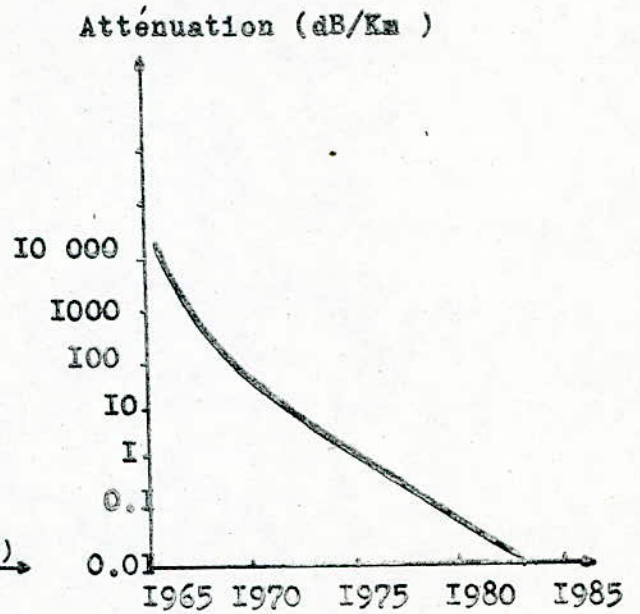
III-6-4- Pertes dues aux raccordements -----

Elles sont produites à la suite de mauvais alignements axiaux et angulaires ou à des décalages des axes des fibres à raccorder . Ces pertes sont prépondérantes dans les fibres monomodes mais peuvent être négligées pour les déplacements axiaux inférieurs à 10 % du rayon du coeur .

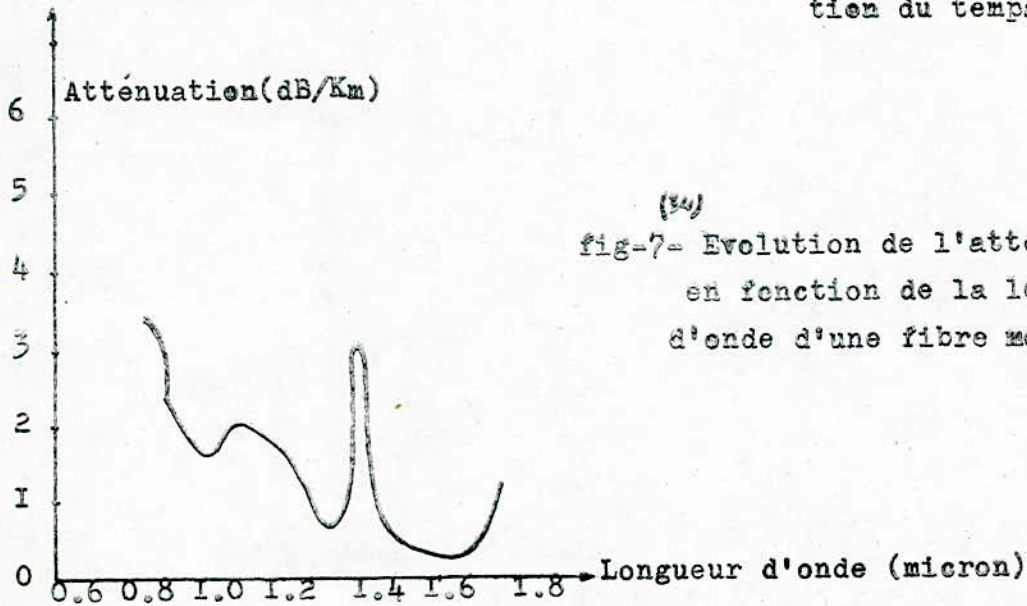
L'évolution de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde, depuis 1973 à 1980 est donnée à la figure-5-. Les progrès obtenus dans la réduction des pertes de transmissions sont visualisés par la figure-6-. La variation de l'atténuation d'une fibre monomode en fonction de la longueur d'onde est représentée à la figure-7-, résultat obtenu en 1985 aux laboratoires de la STC (Angleterre).



(2)
fig-5- Atténuation des fibres optiques en fonction de λ obtenues depuis 1973 a 1980.



(34)
fig-6- Evolution de l'atténuation en fonction du temps .



(34)
fig-7- Evolution de l'atténuation en fonction de la longueur d'onde d'une fibre monomode.

III - 7 - LES SOURCES DE BRUITS DANS LES TRANSMISSIONS PAR FIBRES OPTIQUES

L'un des principaux paramètres déterminant la portée d'un système est la présence de bruit qui dégrade l'information à transmettre.

Dans un système de transmission par fibres optiques, on distingue les sources de bruits suivantes :

III-7-1- Le bruit modal

C'est une source de bruit très particulière aux systèmes optiques. Elle est liée aux sources de lumière et due aux interférences des modes de propagation qui produisent une répartition granuleuse de l'énergie dans la fibre (Effet Speckle).

III-7-2- Le bruit quantique

Egalement spécifique aux systèmes optiques. Le bruit quantique est constitué par l'ensemble des fluctuations temporelles autour de la moyenne de nombres d'électrons émis par le détecteur optique. Il est donc lié au signal de transmission (différent du cas des systèmes classiques) et est inévitable. Sa répartition est décrite par une loi gaussienne et est donnée par :

$I_{SN}^2 = 2qIB$: Moyenne quadratique du courant de bruit, avec I le courant moyen du signal, B la bande passante et q la charge de l'électron émis .

III-7-3- Le bruit thermique

C'est le bruit des résistances. Il est donné par :

$\bar{I}_{th}^2 = 4KTB/R$: Moyenne quadratique du bruit thermique.

R : résistance considérée

K : constante de Boltzmann

T : température absolue

Ce bruit peut être négligé aux basses températures.

III-7-4- Le bruit d'avalanche

Il est spécifique au détecteur PDA et est donné par :

$$\bar{I}_a^2 = 2qIB.\bar{M}^{(2+x)} .$$

\bar{M} étant la valeur moyenne du gain de la photodiode et x son facteur de bruit .

CONCLUSION

Le système de transmission par fibres optiques a la structure classique de tout autre système de transmission. Cependant, il permet des transmissions à larges bandes passantes avec un grand débit d'informations (pouvant atteindre plusieurs dizaines de Gbits/s) à grandes distances sans être perturbé par les interférences électromagnétiques du milieu extérieur et avec de très faibles pertes. Le seul inconvénient spécifique au système optique est la présence de bruits optiques qui dépendent du signal à transmettre .

.....

IRA STRONG

*
*
* oo E.E.M.E.N.T.S oo A.C.T.I.F.S oo *
*
*
*

I - MECANISME DE L'EMISSION DE LA LUMIERE

Dans le cas général, les atomes, les molécules et les cristaux semi-conducteurs absorbent et émettent des ondes électromagnétiques sous forme de lumière de longueur d'onde caractéristique. D'après les résultats de la mécanique quantique, les particules constituant la matière ne peuvent exister que dans certains états d'énergie appelés niveaux de quanta. Quand un électron subit une transition d'énergie d'un niveau E_2 à un autre E_1 , une lumière ayant une fréquence proportionnelle à la différence d'énergie ($E_2 - E_1$) peut être absorbée ou émise (ou échangée). Cette fréquence est donnée par la condition de Bhor:

$$f_0 = (E_2 - E_1)/h$$

h étant la constante de Planck ($h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).

Plusieurs cas peuvent être envisagés :

- émission spontanée
- absorption résonnante
- émission stimulée .

Dans un semi-conducteur, les états d'énergie active forment des bandes de niveaux. Entre ces bandes permises pour les électrons, il existe des bandes interdites dont les énergies ne peuvent être prises par les électrons d'un cristal parfait. Les électrons de la bande de conduction d'un semi-conducteur peuvent former une transition vers la bande de valence où ils se recombinent avec des trous provoquant ainsi sous forme de lumière, l'émission d'une énergie correspondant à la différence entre les deux bandes. Une telle transition peut être directe ou indirecte, suivant l'état du moment de l'électron. Les photons engendrant des transitions directes ont un coefficient d'absorption^(*) plus grand que celui

(*) On appelle coefficient d'absorption, le coefficient de proportionnalité α entre le taux de génération optique g_{op} et le flux de photons $\varphi(x)$ tel que : $\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\alpha x}$ et $g_{op} = -d\varphi/dx = \alpha \varphi_0 e^{-\alpha x} = \alpha \varphi(x)$.

des photons qui engendrent des transitions indirectes. Pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, il faut lui communiquer une énergie :

$$\Delta W = h\nu \text{ où } \nu = c/\lambda .$$

La longueur d'onde λ doit être au minimum égale à la longueur d'onde λ_c correspondant au seuil d'absorption fondamental $\lambda_c = hc/\Delta W$.

Et donc, pour avoir une transmission d'un grand nombre de photons, il faut leur communiquer une énergie correspondant à $\lambda > \lambda_c$. Il en résulte de ceci que les transitions entre la bande de valence et la bande de conduction sont beaucoup plus probables pour les matériaux à bande interdite directe qu'à indirecte et que les premiers permettent de faire des émetteurs de rayonnements plus efficaces que les seconds.

Les matériaux les plus utilisés à bande interdite directe sont : GaAs, InP et les alliages GaInAs et GaAl_{1-x}Al_xAs avec $x < 0.4$ représente la quantité de l'élément correspondant dans l'alliage.

II - LES SOURCES LUMINEUSES

Les sources de lumière universellement employées dans les systèmes de transmission par fibres optiques sont les diodes laser (DL) et les diodes électroluminescentes (DEL).

II-I- LES CARACTERISTIQUES DES SOURCES OPTIQUES

II-I-I- La longueur d'onde de fonctionnement

La fibre optique doit fonctionner à une longueur d'onde où l'atténuation et la dispersion sont minimales, ce qui correspond aux longueurs d'onde avoisinant : 0.85 μ m ou 1.05 μ m et 1.3 μ m.

II-I-2- Fiabilité

Les sources optiques doivent avoir une longue durée de vie, un fonctionnement stable et une bonne reproductibilité des caractéristiques de sortie. Le but actuel est d'obtenir une durée de 10^6 heures.

II-I-3- Puissance de sortie

La puissance minimale demandée à la source est déterminée par la perte de transmission α de la fibre et la puissance détectable minimale du détecteur pour répondre aux exigences du système. Le but à atteindre est d'obtenir 1mW .

II-I-4- Rendement de puissance

Le rendement du dispositif optique est donné par :

$$\eta_d = (P_o/P_d) \cdot 100 \quad (\%)$$

où P_o est la puissance de sortie, et

P_d , la puissance d'entrée en courant continu nécessaire pour produire P_o à la sortie. Ce rendement est optimisé à 10 % .

II-I-5- Largeur spectrale

Elle doit permettre l'obtention d'une bande passante maximale. La largeur spectrale d'une source est donnée par :

$$\Delta\lambda = A \cdot 10 / L \Delta f$$

L : distance de transmission

Δf : bande passante

A est une constante déterminée par la forme de l'impulsion elle-même et du circuit de restauration.

II-I-6- Effet de focalisation

Il doit être possible de focaliser la sortie dans la fibre et d'obtenir un rendement de couplage élevé.

II-I-7- Forme, Poids et Coût

Les fibres optiques doivent être conformes aux normes exigées. Leurs dimensions, leurs poids et coût doivent être faibles.

II-2- MODULATION

L'onde optique destinée aux communications peut être modulée de deux manières différentes:

i) Par modulation directe : Dans ce cas c'est la source elle-même qui fait varier sa sortie. Comme la puissance lumineuse de sortie de la source (DEL ou DL) est proportionnelle au courant injecté, la modulation directe est simple à mettre en oeuvre. Cependant, pour la DL, cette méthode est affectée par quelques paramètres:

- résonance de cavité
- impulsions erratiques
- oscillation de relaxation
- effet de l'accumulation des porteurs sur la modulation d'impulsion.

ii) Par modulation externe :

- par modulation de phase
- par modulation guides d'onde .

II-3- LA DIODE LASER

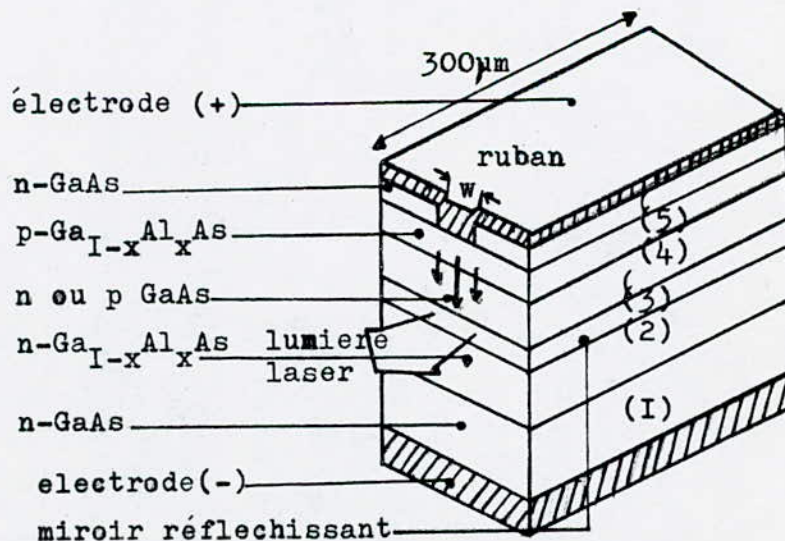
Les lasers sont des dispositifs capables d'émettre un étroit faisceau de lumière cohérente . Leur principe de fonctionnement est basé sur l'amplification de lumière par émission stimulée de radiations: LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Il est décrit pour la première fois sur le plan théorique par Albert Einstein en 1917. Actuellement, il existe plusieurs types de lasers. On distingue :

- Les lasers à gaz (exp.laser pulse TEA-CO2)
- " à region active en ruban.
- " semi-conducteurs .
- " à cristaux à état solide .
- " à semi-conducteurs améliorés .

Seuls nous interessent, les lasers à semi-conducteurs. Ils sont moins parfaits que les autres types, leurs caracteristiques sont fortement influencées par la température et leur directivité est relativement faible, ils presentent des ouvertures de faisceau de l'ordre de 20 degrés contre une fraction de degré pour certains autres types. Cependant, leurs avantages resident dans leurs faibles dimensions, la simplicité de leur dispositif d'alimentation et leur faible prix de revient.

Une structure de laser semi-conducteur à $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$ est representée à la figure-I-.

La couche (I) represente la plaquette en GaAs de type n , (2) une couche de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ de type n, (3) une couche de GaAs de type p ou n, (4) une couche de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ de type p et la couche (5) du GaAs de type p .



(5)
fig-I- structure de laser sc.

La croissance de la plaquette $Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs$ permet d'obtenir un bord plat, comme un miroir perpendiculaire au plan de la jonction en clivant la plaquette avec un outil pointu. La couche active du système est représentée par la couche (3): C'est le milieu de l'oscillation laser. Les jonctions 2-3 et 3-4 peuvent permuter les rôles de la jonction à hétérostructure pn et la jonction isolante. La couche (5) sert à la fixation de l'électrode.

Un courant direct est fourni en connectant l'électrode positive au côté p et l'électrode négative au côté n. Lorsqu'on applique une tension V correspondant au gap de la couche GaAs de la région active, de nombreux porteurs (électrons ou trous) sont injectés dans la couche active et l'oscillation laser commence.

Les diodes lasers sont utilisées, généralement, sur de longues distances .

II-4- LA DIODE ELECTROLUMINESCENTE (DEL)

Si dans une jonction pn, on fait circuler du courant dans le sens direct, de sorte que les électrons ou les trous qui constituent les porteurs majoritaires soient injectés dans le voisinage de la jonction, grâce à la recombinaison de ces porteurs, une énergie est libérée sous forme de photons (voir fig-2-).

Un exemple de diodes électroluminescentes est donné à la figure-3-. La jonction est composée de $Ga_{1-x}Al_xAs$ de type p et de $Ga_{1-y}Al_yAs$ de type n avec du GaAs de type p entre eux. Les électrons injectés dans la jonction pn à partir de la couche de type n se recombinent avec des trous dans la couche GaAs ; la longueur d'onde de la lumière rayonnée correspond à la bande interdite du GaAs. La luminescence n'a lieu que dans la couche GaAs, à cause de la barrière hétérojonction les électrons injectés ne peuvent pas se diffuser dans la couche $Ga_{1-x}Al_xAs$.

La longueur d'onde du rayonnement émis par une diode élec-

l'émission lumineuse est directement liée à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur considéré, donc le choix de la structure de diode à utiliser doit correspondre à la longueur d'onde du fonctionnement. L'évolution de la longueur d'onde en fonction de la largeur de la bande interdite pour les différentes structures est donnée à la figure-4-.

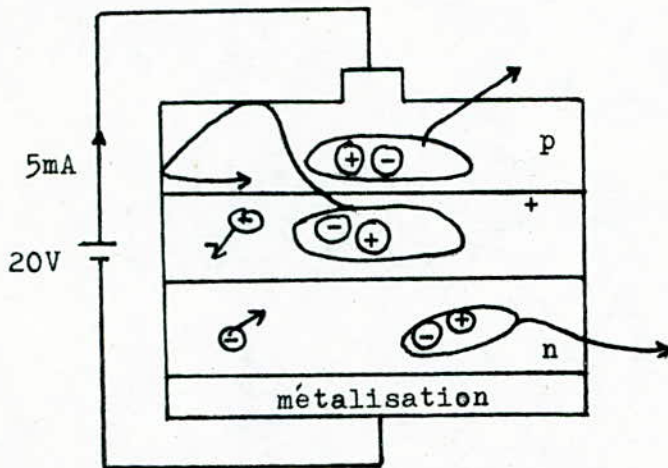


fig-2- la recombinaison des porteurs de charges au niveau d'une jonction polarisée en direct: émission de photons

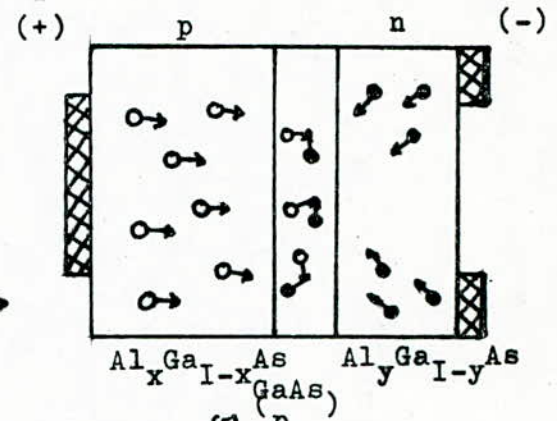


fig-3- structure d'une DEL.

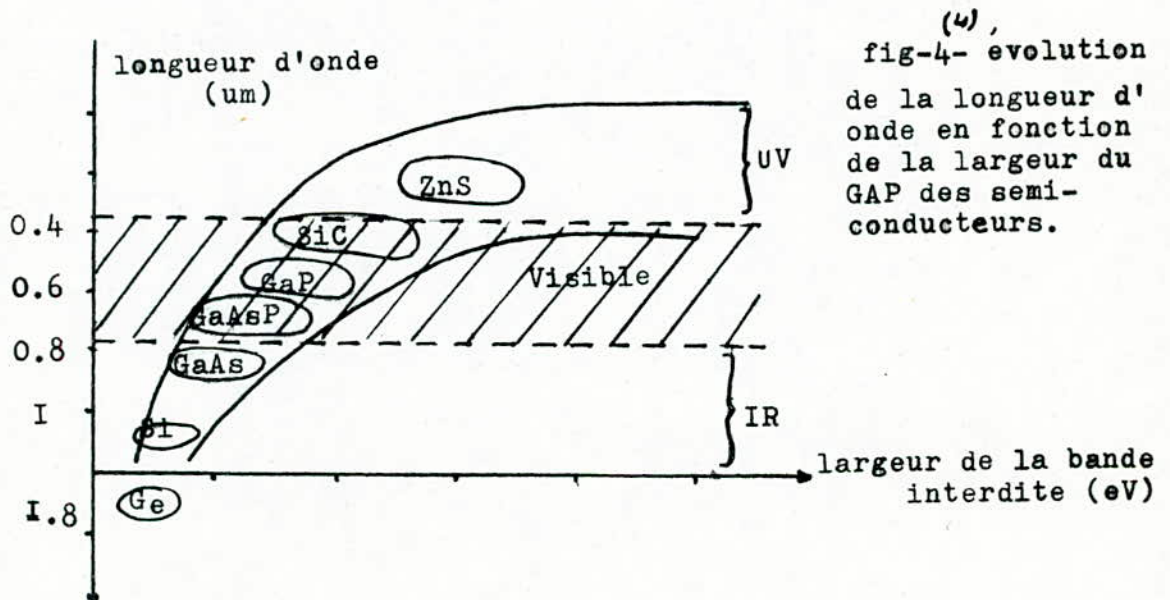


fig-4- evolution de la longueur d'onde en fonction de la largeur du GAP des semi-conducteurs.

II-5- UTILISATION DES SOURCES OPTIQUES DANS LES TELECOMMUNICATIONS

Le choix d'une source optique est entièrement déterminé par le système : distance, débit d'informations à transmettre, puissance, courant d'injection, durée de vie et milieu d'utilisation. L'ensemble est résumé dans le tableau I-suivant :

Sources	DEL de forte puissance. (latérale)	DEL de faible puissance. (a) émission latérale). (latérale).	DL à ru- ban iso- le par oxyde	DL à ru- ban iso- le par oxyde
Matériaux	GAAS/GAIALS	GAAS/GAIALS	IMP /	GAINASP /
Courant d'injection (ma)	100 (150)	20 (40)	70-150	30- 60
Puissance (mW)	1000 (3000 a 5000)	50 (140)	10000	10000
Longueur d'onde (µm)	0.85	0.8 - 0.9	0.85 a 1.3	1.3
Largeur spectrale (nm)	20 (16-17)	30 - 35	/	/
Durée de vie (h)	1000 a 70°C	1000 a 40°C	400000 a 25°C	10000 a 70°C
Portée sans répéteurs (Km)	7	1.5	30	60

fibres utilisées	à faible diamètre de cœur	de silice à revêtement plastique	quelconque	quelconque
exemple d'applications	Réseau de télédistribution de British télécom.	systèmes de transmission à faibles portées	transmission sur de grandes distances	aux laboratoires
Debit d'informations	70	45 (60)	plus de 390	/
Systèmes d'applications	Analogiques (télédistribution)	transmission de données de plusieurs centaines de long.	applications PTT à haut débit	numériques

Tableau-I-

III - LES DETECTEURS DE LUMIERE

Un détecteur optique est un élément chargé de convertir les variations de puissance lumineuse en variations d'une grandeur électrique. Principalement, un détecteur doit répondre aux exigences suivantes :

- coefficient de réponse élevé aux longueurs d'onde de fonctionnement.
- temps de réponse compatible avec les débits d'informations envisagés.
- le bruit propre du détecteur doit être aussi faible que possible.
- dimensions permettant l'intégration avec

d'autres composants électroniques : facilité du couplage fibre-détecteur .

Les détecteurs utilisés dans les communications optiques se classent en deux catégories suivant la longueur d'onde du signal :

- détecteurs (Si) pour le domaine 0.8-0.9 μ m correspondant à l'émission de sources GaAs/GaAsAl .
- détecteurs à composés III-V pour le domaine 1.2-1.7 μ m.

Les détecteurs les plus utilisés sont les diodes PIN (ou PD ; photodiode) et les photodiodes à avalanche (APD).

Il n'est pas de grande utilité de décrire leurs principes de fonctionnement ici, cependant, pour plus de détail on conseillera le lecteur à se référer à la bibliographie; (1,2,3,4,5,6,7,34)

Actuellement, on développe un système PIN/FET où le détecteur est intégré avec un amplificateur FET rapide et à faible bruit pour améliorer la stabilité thermique des photodiodes.

Pour la détection des signaux à des longueurs d'onde de 1.2 à 1.7 μ m, de nouveaux types de détecteurs à hétérojonctions tels que GaInPAs ou AlGaAsSb ont été développés. Ces structures permettent d'ajuster le maximum de la courbe de réponse du détecteur à la longueur d'onde du signal et d'atteindre des vitesses de réponse très élevées .

CONCLUSION

Pour répondre aux besoins relatifs aux télécommunications sous-marines et terrestres à longues distances, des systèmes fonctionnant à grande bande passante et à pas de régénération plus longs seront utilisés. Ceci dirige les recherches vers le développement de l'optique intégrée. L'intégration sur un même substrat du composant optique et de quelques étages électroniques peut diminuer le prix de revient et permettre la réalisation de

composants optiques à hautes performances adaptés à tous les débits d'informations.

La prochaine decennie manipulera donc un produit distance-
largeur de bande 40 fois plus important que celui des fibres
optiques actuelles et 200 fois celui du fil de cuivre .

.....

I - FABRICATION DES FIBRES OPTIQUES

I-I- INTRODUCTION

Le choix de la méthode à adopter pour la fabrication dépend des caractéristiques de la fibre à fabriquer;

Deux points principaux sont à souligner :

- La recherche de matériaux les plus purs possibles.
- Le choix d'une méthode de fabrication n'altérant pas la pureté des matériaux de départ.

Deux techniques principales sont utilisées:

- La fusion du verre par chauffage à induction, suivie par l'étirage de la fibre à l'aide d'un double creuset (utilisée pour les verres à bas point de fusion).
- Le dépôt chimique de vapeur et l'étirage d'une préforme pour l'obtention d'une fibre (méthode utilisée pour avoir des fibres à forte proportion de silice, supérieure à 85%).

On peut distinguer plusieurs variantes de ce procédé :

- Dépôts extérieurs : procédé OVPO (Outside Vapor Phase Oxidation).
- Dépôts intérieurs: procédé IVPO (Inside Vapor Phase Oxidation).
- Dépôts intérieurs transversaux à modification de la composition de la phase vapeur : MCVD .

Des fibres à cœur de silice et gainées de polymères font actuellement appel à un autre procédé de fabrication pour les applications particulières. Mais le problème de production de verres hyperpurs, de qualité requise pour les conducteurs photoniques a trouvé des solutions basées sur l'oxydation de composés halogénés en phase vapeur, ce qui a valu au procédé MCVD son expansion dans le monde .

I-2- LA PREPARATION DU TUBE DE VERRE

La composition du verre et sa méthode de préparation ont une grande influence sur l'état d'oxydation (ou valence) d'un ion métallique étranger et, par conséquent, sur sa contribution aux pertes. Le tableau(I) donne des exemples de contributions mesurées, dues aux impuretés les plus caractéristiques présentes dans les principaux verres utilisés.

Le matériau constitutif de la fibre est la silice. Il s'agit de modifier légèrement l'indice de la silice pour fournir les verres utilisables respectivement pour le coeur et la gaine. On peut associer un coeur en SiO_2 pure ou pratiquement pure à une gaine en verre $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ dont l'indice peut être réglé de façon à être très légèrement inférieur à celui du coeur. Une autre solution consiste à élever l'indice du coeur en utilisant par exemple des verres $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ pour le coeur et $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ pour la gaine. L'adjonction de P_2O_5 permet de minimiser les effets de dispersion d'indice.

Type d'ions constituant l'impureté	Absorption en dB/Km produite à $0.85\mu\text{m}$ pour une concentration de 10^{-6}		
	Silicate doux : -ble de sodium et de calcium : $\text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}$ SiO_2	Borosilicate de sodium : $\text{Na}_2\text{O}, \text{B}_2\text{O}_3,$ $\text{TiO}_2, \text{SiO}_2$	Silice fondue : SiO_2
Fe	125	15	130
Cu	600	500	22
Cr	10	25	1300
Co	10	10	24
Ni	260	200	27
Mn	40	11	60
V	/	40	2500

Tableau-I- Contribution des impuretés ioniques aux pertes (pour une concentration de 10^{-6}) par absorption des différents verres.

I-3- DESCRIPTION DU PROCEDE MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition).

Ce procédé est avantageux pour la fabrication industriel
-le des fibres optiques. Il permet d'obtenir :

- une bonne reproductibilité générale
- des atténuations très faibles : 2 à 3 dB/Km à 840nm
0.5 à 1 dB/Km à 1300nm.
- des bandes passantes élevées : 300 à 800 MHz.Km à 840nm.
800 à 1500MHz.Km à 1300nm.
- des résistances mécaniques élevées.

L'élaboration de fibres optiques par le procédé MCVD com-
porte deux étapes essentielles :

I- La fabrication d'une préforme: étape conditionnant la qualité
des caractéristiques optiques de la fibre (atténuation, bande
passante), l'uniformité du rapport coeur/gaine et la circu-
larité de la fibre.

2- Le fibrage de cette préforme : étape dont dépendent l'unifo-
rmité du diamètre extérieur et la résistance mécanique de la
fibre .

I-3-I- Fabrication des preformes

Une préforme est fabriquée en deux étapes successives et
continues pour éviter tout choc thermique .

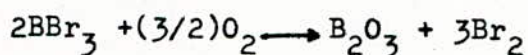
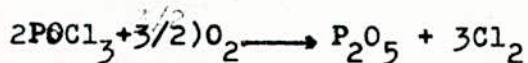
I-3-I-a- Phase de dépôt (fig-Ia-)

Un tube de silice de diamètre extérieur 16mm et intérieur
14mm et d'une longueur d'environ 1m, est monté sur un tour verrier
et chauffé à une température de 1400 à 1600°C au moyen d'un cha-
lumeau oxydrique se déplaçant parallèlement au tube et sur toute
sa longueur. A une extrémité du tube, on injecte un mélange gazeux
constitué d'oxygène et d'halogénures, qui réagit pour donner un
mélange d'oxydes qui se dépose sur la paroi interne du tube et

sera vitrifié au passage du chalumeau. Le mélange gazeux est constitué, principalement, par du tétrachlorure de silicium qui réagit sous la forme :



Des réactions d'équilibre s'établissent alors:



La couche déposée peut avoir une épaisseur de 10 à 20 μm (par plusieurs passages du chalumeau). La variation contrôlée de l'indice de réfraction de chaque couche peut être obtenue par modification de la composition de la phase gazeuse injectée dans le tube .

I-3-I-b- Phase de collapsage (fig-Ib-)

Cette phase consiste en l'obtention d'une baguette de verre par augmentation de la température, après coupure de l'injection des gaz .

A la température de 2000 $^{\circ}\text{C}$, la silice se ramolit et les forces dues à la tension superficielle produisent un rétreint homogène du tube. Après trois à cinq passes du chalumeau, ce rétreint est total et la préforme de 10 à 12 mm de diamètre est prête au fibrage.

I-3-2- Fibrage de la préforme

L'étirage de la préforme est obtenu par descente de celle-ci, à vitesse constante, dans un four à température supérieure à 2000 $^{\circ}\text{C}$.

Le diamètre de la fibre est donné par :

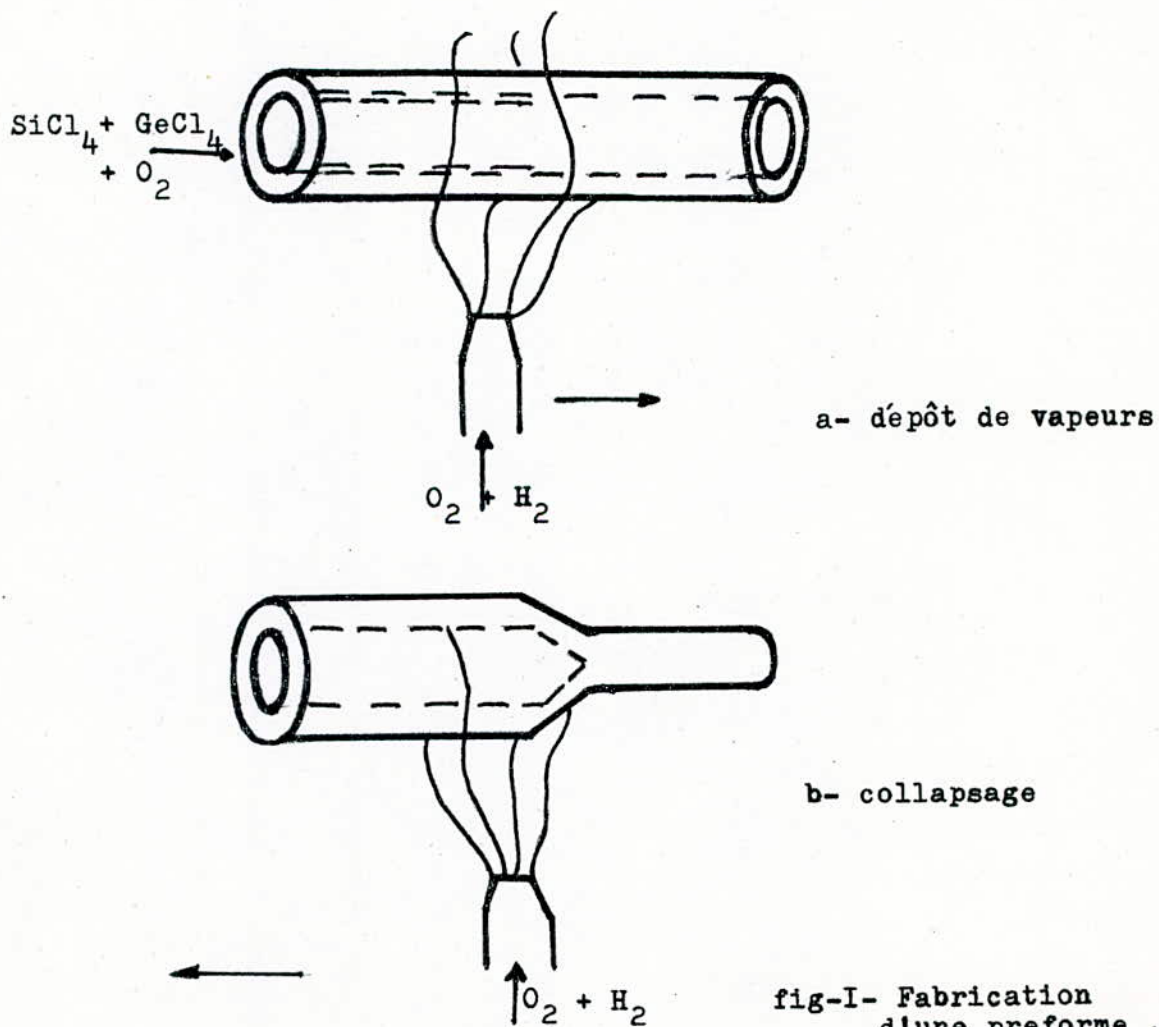
$$\varnothing_{\text{fibre}} = \varnothing_{\text{pref}} \sqrt{v_p / v_f}$$

avec v_p : la vitesse de descente de la préforme,

v_f : " de fibrage ,

et est contrôlée par la vitesse du cabestan de tirage .

La mesure du diamètre de la fibre se fait par voie optique juste à la sortie du four afin d'éviter tout contact de la fibre avec des matériaux durs avant qu'elle ne soit protégée par une enduction plastique (silicone ou résine époxyacrylate). Après contrôle du diamètre et de la résistance mécanique de la fibre, celle-ci est enroulée sur une bobine de réception .



II - LES CABLES OPTIQUES

II-I- Critères de définition d'une structure de câble optique

La principale caractéristique recherchée dans la réalisation d'un câble est l'absence de pertes ajoutées par les opérations de câblage. Les paramètres de câblage utilisés sont à base de :

- minimiser les courbures
- obtenir une surface la plus parfaite possible pour le support de la fibre .
- diminuer les contacts entre la fibre et son support.

II-2- Matériaux utilisés pour la réalisation des câbles optiques

Tout câble optique comprend un ou plusieurs éléments de renfort. Les matériaux utilisés sont : L'acier, la fibre de verre, les fibres synthétiques, les fibres de carbone et les fibres de Bore .

Les caractéristiques mécaniques ainsi que les principaux avantages et inconvénients de ces matériaux sont resumés dans le tableau(II).

Matériaux	Resistance à la rupture (N/mm ² .10 ²)	allonge- ment à la rupture(%)	Avantages	Inconvénients
Fil d'acier	30	2	resistant peu coûteux.	lourd conducteur
Kevlar 29	27	4	resistant	
Kevlar 49	27	2	léger	support instable
fibre de carbone	20	0.5	"	et coût élevé
Fibre de verre(E)	17	2.4	"	"

Tableau-II-

II-3- Matériaux de gainage

Ils sont semblables à ceux utilisés pour les câbles en cuivre. Pour les gaines extérieures, les matériaux les plus utilisés sont les polyéthylènes, les PVC, les polyamides et les polyuréthanes.

Pour le maintien des assemblages et les protections thermiques des âmes de câble, on utilise le polyéthylène, le polypropylène, papier, mylar,.....

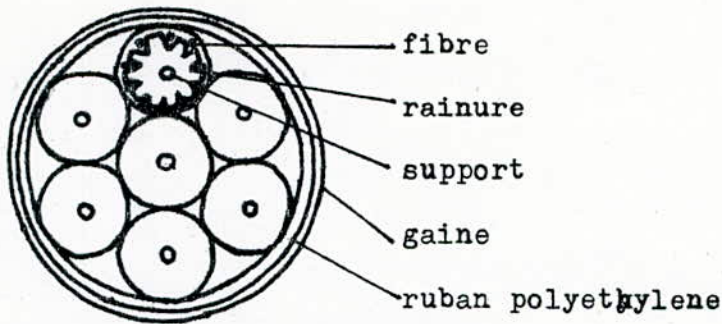
II-4- Les différentes structures de câbles optiques

Les câbles optiques peuvent être classés en trois grandes familles:

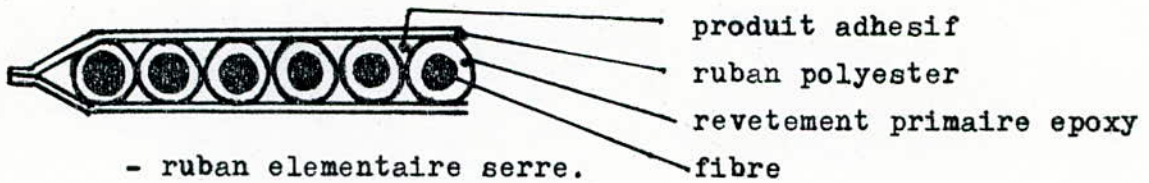
- les câbles à structure classique
- les câbles à structure en nappe (en ruban)
- les câbles cylindriques rainurés.

Il n'y a pas de grandes différences entre les assemblages dans les câbles en cuivre et dans les câbles optiques. Les différentes structures rencontrées sont données par la figure-2-. Les caractéristiques mécaniques des câbles tirables en conduites sont données par le tableau-III-.

Une comparaison entre les différentes structures du point de vue coefficient de remplissage est donnée par le tableau-IV-. Le coefficient de remplissage permet de classer les câbles en fonction de leur encombrement. Des études statistiques sur les différents résultats obtenus jusqu'ici ont montré que les structures lâches permettent d'avoir une plus faible atténuation et une meilleure tenue aux tests de cyclages thermiques.



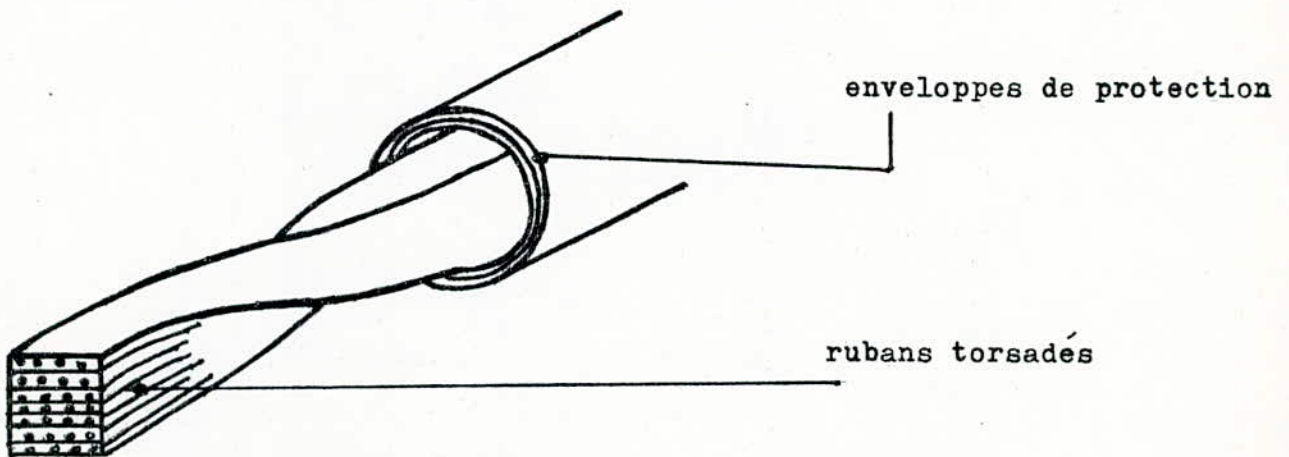
- cable a structure cylindrique
rainure a 70 fibres (LTT)



- ruban elementaire serre.



- ruban elementaire type lache



- câble multi-rubans .

(2)
fig-2- quelques structures
de câbles optiques .

nombre de fibres	\varnothing_{max} du câble (mm)	poids du câble (Kg/Km)	résistance à l'écrasement	rayon de courbure statique	variation d'affaiblissement
10	11	120	25 daN/cm	250	-10°C à +40°C
20	18	210	impliquent une atténuation	250	$\Delta\alpha < 0.3$ dB/Km
30	18	230		250	et
50	20	320	$\Delta\alpha < 0.1$ dB/Km	250	-30°C à
70	21	450		250	+60°C :
90	27	500	310	290	$\Delta\alpha < 0.5$ dB/Km
120	30	720		310	
150	30	720		320	
210	33	900		350	

tableau-III- caractéristiques mécaniques des câbles
(d'après SUTELEC)

structures	$\varnothing_{\text{exterieur}}$	nombre N de fibres	coefficient de remplissage en N/mm^2
classique	18	19	0.07
rubans serres	12	144	1.12
rubans a fibres libres	15	50	0.28
cylindrique rainurée	20	70	0.22

tableau-IV- comparaison des principales structures de câbles optiques (d'après LTT)

II-5- CONCEPTION DU CABLE OPTIQUE

La conception diffère peu d'une structure à l'autre. Dans le cas du FOK-79 (fig-3-), le câble est construit concentriquement autour d'un élément de renforcement central, un fil d'acier d'un diamètre de 1.6mm, revêtu de polyéthène jusqu'à un diamètre de 3.1mm. Le fil d'acier non seulement absorbe les contraintes, mais aussi compense la dilatation linéaire en fonction de la température des parties plastiques, Chaque fibre avec son revêtement primaire est en outre protégée par un revêtement secondaire sous la forme d'un tube plastique lâche .

Les fibres enveloppées dans leur revêtement secondaire sont câblées en spirale autour du fil d'acier . Le nombre maximal possible de fibres d'une couche est déterminé par la relation entre les diamètres extérieurs de l'élément de renforcement et les revêtements secondaires. Des rubans en polyester sont enroulés autour de la couche de fibres et le câble est recouvert d'une enveloppe en polyéthène. Cette enveloppe qui contient aussi une mince feuille d'aluminium constitue une barrière contre l'humidité et contribue en outre à stabiliser la température dans le câble.

Un revêtement secondaire est choisi pour :

- protéger la fibre pendant la fabrication du câble.
- ménager un espace pour une longueur de fibre supplémentaire dans le câble sans que la fibre présente de courbures brusques.

II-6- FABRICATION DU CABLE OPTIQUE

Le câble de la figure-3- est fabriqué en trois phases:

- revêtement secondaire des fibres
- câblage
- application de l'enveloppe.

Le revêtement secondaire des fibres consiste en un recouvrement lâche de polypropylène (pp).

Le revêtement est appliqué dans une extrudeuse qui produit un revêtement tubulaire. La température du plastique dans l'extrudeuse est de 200°C. Le tube plastique se retrecit longitudinalement lors du traitement de refroidissement ultérieur.

La résistance à la traction de la fibre est testée sur toute sa longueur au cours de la fabrication. L'accroissement admissible d'atténuation provoquée par la fabrication du câble est de moins de 0.5dB/Km .

Un exemple d'une chaîne de câblage pour câbles à fibres optiques est représentée à la fig-4- (conçue par Sieverts Kabel Verk).

L'agencement est celui d'une chaîne classique pour câbles concentriques. Les problèmes posés par l'assemblage des fibres optiques sont résolus par l'utilisation d'une machine à câbles spéciale.

II-7- POSE DE CABLES A FIBRES OPTIQUES

En general les câbles optiques peuvent être posés de la même manière que les câbles téléphoniques classiques. Les outils, les équipements et les méthodes de pose des câbles en cuivre classiques peuvent être utilisés et appliqués directement aux câbles à fibres optiques dans la plupart des cas. On distingue :

- des câbles posés en conduites (dans le cas où des déplacements ultérieurs ne sont pas envisagés).
- des câbles aériens; Ils sont repartis en deux groupes:
 - câbles en forme de 8 avec suspension incorporée.
 - câbles conçus pour être fixés à des câbles de suspension extérieures.
- des câbles enterrés;
Ordinairement, ce type de câbles est protégé au moyen d'une armure contre les forces d'écrasement et les attaques des rongeurs.

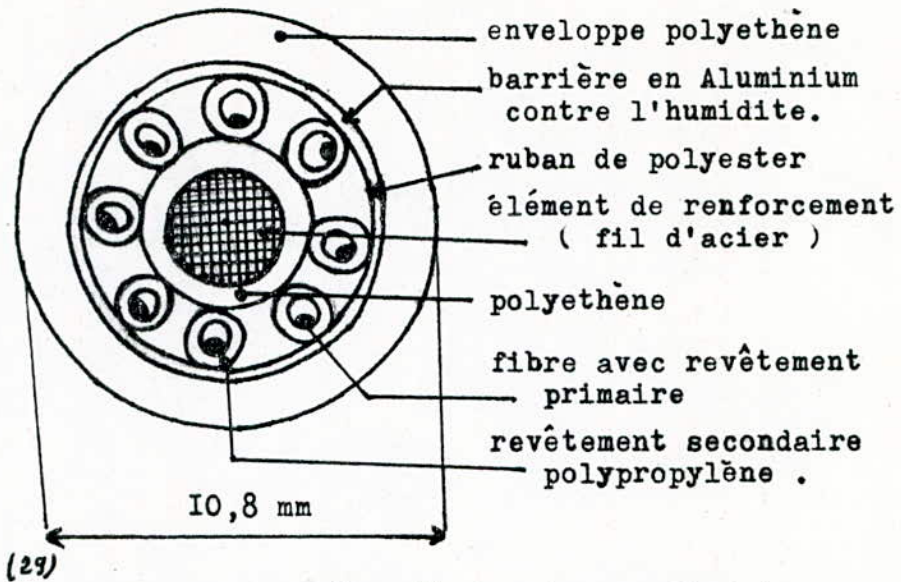


fig-3- une coupe d'un câble à structure cylindrique à 8 fibres(FOK-79).

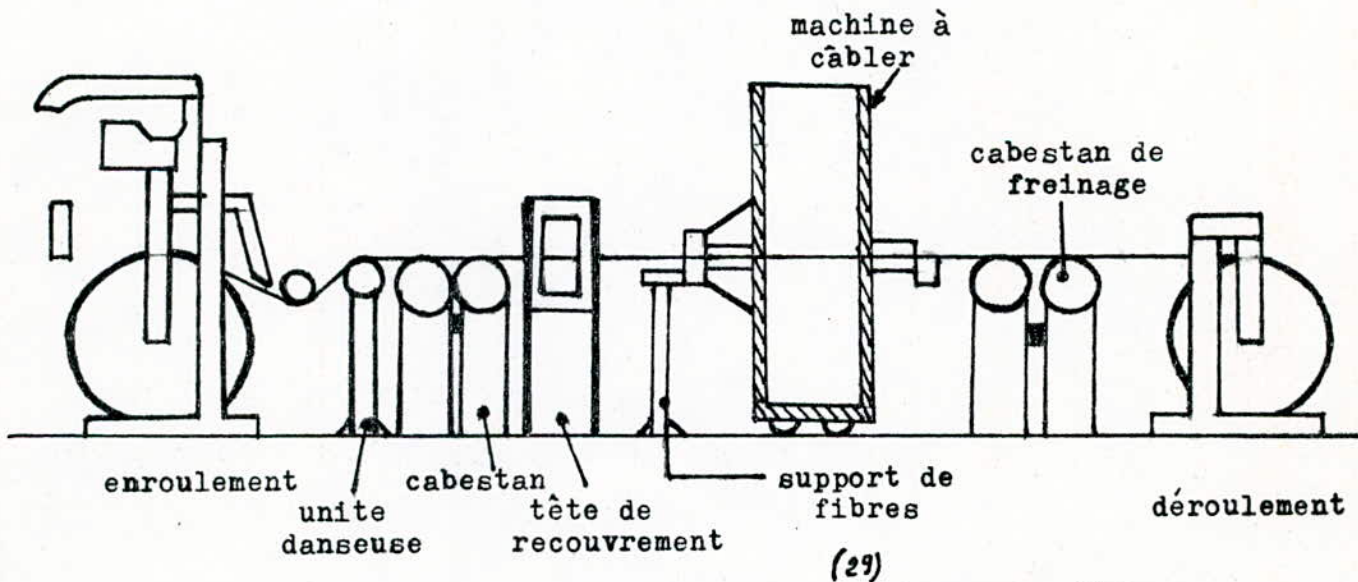


fig-4- chaîne de câblage pour câbles à fibres optiques .

- des câbles posés intérieurement ; Ils doivent avoir une enveloppe extérieure en matériau ignifuge pour éviter la propagation du feu .

II-7-1- Emplacement des raccordements -----

Le raccordement doit se faire le plutôt possible après sa mise en place. Il peut se faire soit audessus du sol, soit dans les chambres souterraines sur systèmes de conduites .

II-7-2- Boite de jonction -----

Elle est en acier inoxydable résistant aux acides. Elle contient des "cassettes" individuelles pour les fibres en vue de faciliter la pose, l'identification et la maintenance future.

II-7-3- Boites de terminaisons de câbles -----

Elles sont utilisées pour épissurer les fibres du câble de ligne principale et les fibres amorces souples de la baie de l'équipement de ligne. Ces boites sont conçues pour raccordement de câbles arrivants et pour un maximum de douze fibres .

.....

III- LE CLIVAGE DES FIBRES OPTIQUES

Il consiste à préparer les extrémités de la fibre pour l'épissurage ou la connexion. Il peut se faire par plusieurs méthodes :

- Polissage
- Meulage
- Fracture

Le but à atteindre est l'obtention d'une extrémité présentant une surface "miroir"; plane, sans irrégularités et aussi perpendiculaire que possible à l'axe de la fibre. La technique qui répond le mieux à ces exigences, est la technique de cassure de la fibre par fracture.

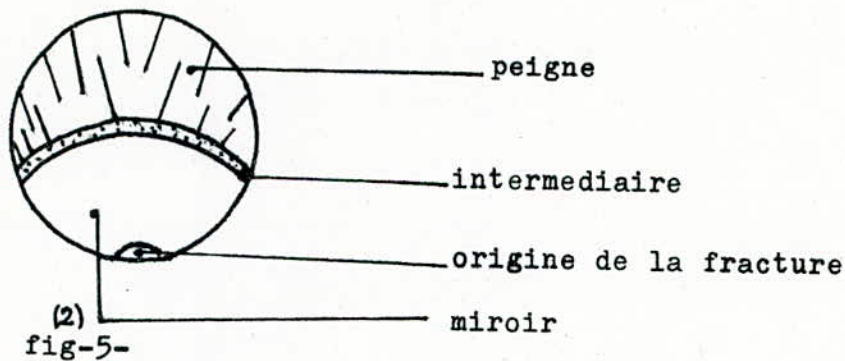
Une fracture correcte de la fibre est, essentiellement, basée sur le contrôle des paramètres suivants :

- la force exercée par le diamant sur la fibre
- le rayon de courbure de la fibre
- la traction exercée sur la fibre .

Ces paramètres sont optimisés par approches successives par observation systématique au microscope optique classique, puis au microscope électronique à balayage, après chaque cassure d'une fibre .

Lors de la cassure d'une fibre, la face fracturée se présente telle qu'à la figure -5- : Trois zones sont distinguées:

- zone miroir
- zone intermédiaire
- zone peigne



Pour avoir une cassure de bonne qualité, il faut étaler la zone miroir sur toute la section de la fibre. Ceci peut être obtenu en optimisant les paramètres mécaniques de la fracture avec vérification de la relation :

$$Z_M \cdot r^2 = \text{constante} .$$

où Z_M est la composante normale en un point M, au plan de la fracture, de la contrainte locale qui existe avant la propagation de la fracture, et r est la distance qui sépare l'origine de la fracture et la frontière zone miroir/zône peigne .

IV - EPISSURES

L'épissurage des fibres optiques peut se faire, soit par :

- un procédé global : pour les applications à grand nombre de fibres .
- par épissure individuelle par fusion; pour les applications à nombre limité de fibres (inférieur à 10 fibres) .
- un procédé d'épissure collectif à plat; plus facile à mettre en oeuvre et moins encombrant.
- L'épissage se déroule en quatre phases :

- fracture de la fibre.

- alignement de la fibre.
- préfusion (décharge de courant faible pour nettoyer et arrondir les extrémités de la fibre).
- soudure par fusion

V - CONNEXIONS DES FIBRES OPTIQUES

Les connecteurs ont pour rôle de raccorder les fibres de façon détachable et avec un minimum de pertes .
Les pertes en ligne sont régies par plusieurs paramètres :

V-I- Les paramètres intrinsèques

Dépendent de la qualité des fibres à raccorder. Principalement, on distingue :

- le diamètre du cœur "a".
- l'ouverture numérique "NA" .
- le profil d'indice .

Dans le cas de deux fibres à saut d'indice, une fibre émettrice (indice e) et une autre réceptrice (indice r), et pour le cas

$$\begin{cases} a_e > a_r \\ (NA)_e > (NA)_r \end{cases}$$

, les pertes à la connexion s'expriment par: $A(\text{dB}) = 10 \cdot \log(a_r / a_e)^2$, de même pour l'ouverture numérique: $A(\text{dB}) = 10 \cdot \log((NA)_e / (NA)_r)$.

Des pertes de 1dB sont engendrées pour une tolérance de fabrication de $\pm 5\%$ sur (a) ou (NA).

Pour le cas des fibres à gradient d'indice, les couplages de modes sont pris en compte, et la distribution de puissance est supposée être gaussienne. Pour une tolérance de $\pm 4\%$ sur (a) et $\pm 5\%$ sur (NA), les pertes générées peuvent atteindre 0.25dB au point de connexions .

V-2- Les paramètres extrinsèques

Ces paramètres sont relatifs à la technique de raccordement, soit à :

- l'alignement des axes des coeurs des fibres.
- la distance entre les faces des fibres .
- la qualité des faces des fibres .

Pour une fibre I25/25 μm , fabriquée avec une tolérance de $\pm 1,6\%$, les pertes sont évaluées à 0.4 dB à la connexion .

V-3- Les paramètres systèmes

Ils dépendent des caractéristiques du système lui-même ;
de :

- la nature de la source utilisée.
- la longueur de fibre : source-connecteur .
- présence d'autres points de raccordement .
- de la longueur de fibre en aval du connecteur.

La qualification des connecteurs, ainsi que quelques exemples pour les différents types de fibres sont donnés au chp.II de la troisième partie (utilisation du matériels).

VI- LA DISTRIBUTION PAR FIBRES OPTIQUES : LES COUPLEURS PASSIFS

Les deux principales configurations des systèmes de transmission de données par fibres optiques sont :

- la distribution série
- " étoile

VI-I- La distribution série

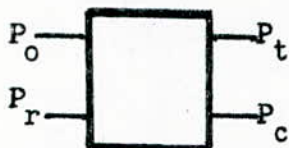
Elle se fait au moyen d'une boucle de "N" terminaux reliés par des coupleurs (fig-6-).

Le coupleur utilisé est de type sériel à deux voies d'entrées /sorties :

- 2 voies reliées à la fibre de transmission
- 1 voie reliée à un émetteur
- 1 voie reliée à un récepteur .

Il permet de coupler l'information issue d'un des N émetteurs de la boucle à la ligne de transmission (câble optique) qui se chargera de la distribuer sur les différents récepteurs des N terminaux .

Le coupleur serie se présente comme :



P_o : puissance optique d'entrée
 P_r : " " réfléchié
 P_t : " " transmise
 P_c : " " couplée .

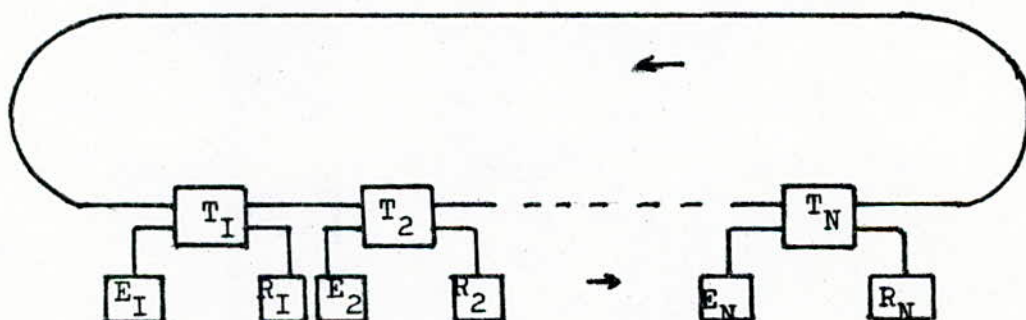


fig-6- distribution serie .

Les caracteristiques d'un coupleur serie sont resumées dans le tableau-V- suivant :

perdes en transmission	$A_T = 10 \cdot \log(P_o/P_t)$
coefficient de couplage	$C = 10 \cdot \log(P_o/P_t)$
directivite	$D = 10 \cdot \log(P_o/P_r)$
perdes d'insertion totales	$A_i = 10 \cdot \log(P_o/(P_t+P_r+P_c))$

tableau - V - caracteristiques d'un coupleur serie .

L'atténuation A_S entre les puissances optiques émises par l'émetteur E_I et recueillies par le détecteur R_N est :

$$A_S = (2A_C + A_T) \cdot N + 2(C - A_T) + (A_{E/F} + A_F + A_{F/D}) \cdot$$

N étant supérieur ou égal à 2 ,

$A_{E/F}$: pertes au couplage émetteur/fibre .

A_C : " à la connexion fibre/fibre .

A_F : " dans la fibre de transmission .

$A_{F/D}$: " au couplage fibre/détecteur .

Dans ce type de distribution, l'atténuation varie comme " N ". Le coupleur serie est utilisé dans les applications de faible nombre de terminaux et dans des liaisons bidirectionnelles simultanées sur une même fibre .

VI-2- La distribution étoile

Ce type de distribution peut fonctionner :

- par transmission (fig-7a-) ou
- par réflexion (fig-7b-) .

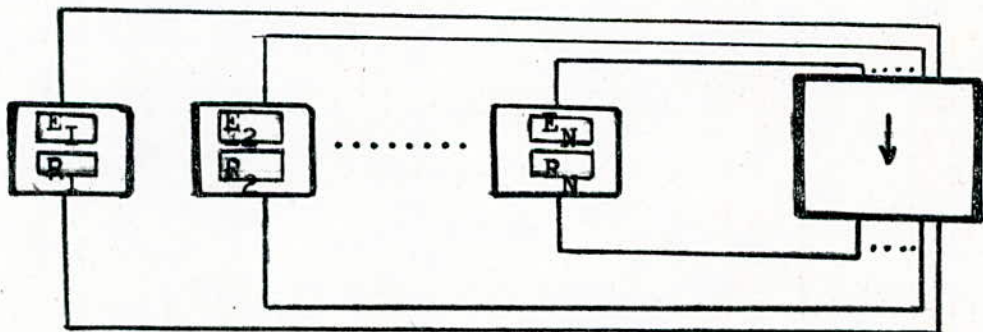
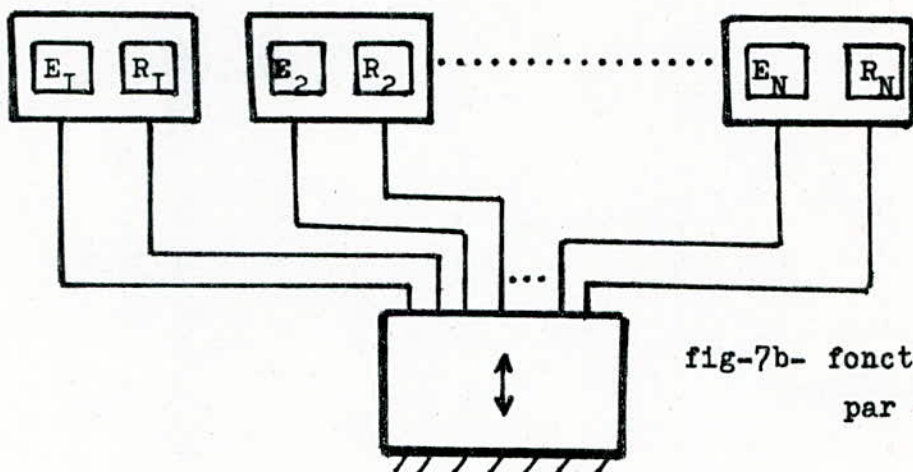


fig-7a- fonctionnement par transmission .



La distribution parallèle se fait grâce à un coupleur central étoile auquel sont reliés tous les émetteurs et tous les récepteurs.

Les grandeurs caractéristiques d'un tel coupleur sont définies tel qu'au tableau-VI-.

Avec ; P_o : la puissance optique d'entrée sur une voie du coupleur.

P_t : la puissance optique sur une voie de sortie (coupleur par transmission).

P_r : puissance optique issue d'une voie d'entrée (coupleur par transmission) .

P_R : puissance optique de sortie d'une voie (coupleur par réflexion) .

Dans ce cas, l'atténuation est donnée par :

- cas du coupleur par transmission:

$$A_{et} = 10 \cdot \log(N) + (4A_c + A_{ic}^*) + (A_{E/F} + A_F + A_{F/D}) .$$

- cas du coupleur par réflexion :

$$A_{er} = 10 \cdot \log(N) + (4A_c + A_{ic}^{**} + 3) + (A_{E/F} + A_F + A_{F/D}) .$$

Il résulte de ces deux expressions que l'atténuation varie comme $(\log N)$, donc plus faible que dans le cas de la distribution serielle, ce qui constitue l'avantage de ce type de distribution.

	coupleur étoile par transmission	coupleur étoile par réflexion
pertes en transmission .	$A_T^* = 10 \cdot \log(P_0/P_t)$	$A_T^{**} = 10 \cdot \log(P_0/P_t)$
pertes d'insertion	$A_{ic}^* = 10 \cdot \log\left(\frac{P_0}{\sum_t + \sum_r}\right)$	$A_{ic}^{**} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_0}{\sum R}\right)$
séparation	$A_S^* = 10 \cdot \log(N)$	$A_S^{**} = 10 \cdot \log(2N)$
directivité	$D^* = 10 \cdot \log(P_0/P_r)$	$D^{**} = 10 \cdot \log(P_0/P_r)$
uniformité	$U^* = 10 \cdot \log\left(\frac{\max(P_t)}{\min(P_t)}\right)$	$U^{**} = 10 \cdot \log\left(\frac{\max(P_r)}{\min(P_r)}\right)$

(2)
Tableau-VI- définitions des grandeurs caractéristiques du coupleur étoile .

I- INTRODUCTION

La production de câbles optiques nécessite la maîtrise de la technique aux niveaux des laboratoires avant de passer au stade de l'industrialisation. ; D'où notre objectif d'étudier une unité de production et d'essais de fibres optiques. Une étude préparatoire de l'aspect économique du projet doit alors, être menée . Il s'agit d'étudier la faisabilité de la substitution du câble en cuivre par le câble optique dans le cas propre de l'Algérie .

Il importera surtout d'identifier les tendances d'évolution susceptibles de guider les actions préparatoires et de fournir, le moment venu, une référence dans le choix des solutions à développer effectivement .

II- LES GRANDES ETAPES HISTORIQUES DE L'EVOLUTION DES FIBRES OPTIQUES

L'arrivée des câbles à fibres optiques annonce la fin des câbles coaxiaux dont ils viennent prendre la relève chaque fois qu'ils offrent des avantages de coût et de performance. L'évolution accélérée du savoir-faire en matière de fibres optiques a commencé au début des années cinquantes, où on s'avisa de rechercher un moyen amélioré pour la transmission de l'information. Il s'avéra alors intéressant d'utiliser la gamme des longueurs d'ondes optiques du spectre électromagnétique pour les télécommunications.

Les grandes étapes historiques de l'évolution de la fibre optique sont résumées dans le tableau(I) suivant :

Année	nouveautés
1959	Invention d'un générateur radiofréquence: Le LASER
1960	Apparition d'un guide d'onde diélectrique : La Fibre Optique .
1966	Des études théoriques et expérimentales conduisent à une solution qu'est la fibre de matière vitreuse sous gaine .
1970	<p>Mise au point d'un procédé de fabrication pouvant améliorer l'atténuation des fibres .</p> <p>Réalisation d'hétérojonctions permettant d'améliorer l'effet LASER .</p> <p>Un système typique de laboratoire pouvait transmettre un train de 2Mbits/s sur une distance de 3Km.</p>
1974-75	L'industrie des systèmes à fibres optiques commence à développer la première génération de produits viables avec une atténuation inférieure à 1dB/Km .
1976	Des câbles à FO sont mis sur le marché par la STG.
1978	<p>Réalisation de fibres monomodes avec des bandes passantes de l'ordre d'une centaine de GHz.Km .</p> <p>Apparition de composants optoelectroniques .</p>
1981	<p>Transmission de 2 Gbits/s sur 40 Km sans répéteurs</p> <p>Installation de plusieurs systèmes à 8 Mbits/s et 140 Mbits/s dans plusieurs villes du monde .</p>
1984	Installation d'une liaison optique ferroviaire assurant un transfert de données de 2 Mbits/s et une liaison téléphonique à 34 Mbits/s .

1985	<p>Amélioration du procédé de fabrication des F.O monomodes : La C A O .</p> <p>Application des réseaux optiques de vidéocommunication à intégration de services .</p>
1986	<p>Applications de la fibre optique dans plusieurs domaines (médecine, microinformatique,...) .</p>
1987	<p>Amélioration des qualités des têtes optiques pour différentes longueurs d'onde .</p> <p>Amélioration des instruments de mesure pour les fibres optiques .</p>

Actuellement, les propriétés spécifiques des fibres optiques (transparence, flexibilité, vitesse de propagation, sensibilité,..) ont permis de les appliquer dans plusieurs domaines à part celui de la transmission.

Trois grandes périodes d'évolution des fibres apparaissent:

- 1) 1959-68 : Naissance d'une grande idée et études théoriques et expérimentales pour l'exploiter.
- 2) 1968-78 : Des systèmes de transmission sont réalisés et font preuve de l'intérêt de la fibre optique .
- 3) 1978-87 : Amélioration des caractéristiques des F.O et leurs applications dans les différents domaines de la science .

II - LA SITUATION DES FIBRES OPTIQUES DANS LE MONDE

Le marché mondial des câbles de télécommunication est estimé en 1985 à 28 milliards de dollars. Montant dans lequel les câbles proprement dit représentent 40% environ. Ceci prouve que la conception et la fabrication des câbles figurent parmi les techniques les plus importantes de notre époque. Le besoin de remplacer des réseaux entiers pour accueillir les nouveaux services (telle que la transmission des données) rendent l'installation des câbles optiques indispensable. Plusieurs systèmes sont installés depuis que la fibre optique a fait preuve de ses performances et son intérêt économique.

III - I - AUX ETATS UNIS

- Installation de 72 systèmes à fibres optiques entre Washington et Boston : Projet devant être réalisé en 83.
- Liaison de Los Angeles à San Francisco par des systèmes à fibres optiques comportant chacun initialement 672 voies téléphoniques au débit de 44,7 Mbit/s .
- Mise en service d'une liaison trans-atlantique par l'ATT : Projet devant être achevé en 1990 .
- Développement des systèmes à F.O pour les applications militaires :
 - Guidage d'engins
 - Déploiement rapide
 - Déport d'informations radar
 - Liaisons tactiques

III - 2 - AU CANADA

- Des systèmes à F.O ont été installés en 1980 pour la distribution de signaux de télévision numérisés.

- Des travaux sont en cours pour la mise en place d'un réseau de télédistribution .
- Realisation de réseaux multiservices experimentaux utilisant des systemes de transmission sur F.O au débit de 90 Mbit/s à Elie,Manitoba,Toronto et a Ontario .

II - 3- EN EUROPE

- Des systèmes experimentaux acheminant du trafic réel ont été installé dans plusieurs pays(France,Allemagne,Angleterre.....) .
- Production de 52 systèmes de transmission sur F.O destinés à être utilisés sur 19 liaisons différentes fonctionnant à la longueur d'onde de $0,85\mu\text{m}$ avec des fibres multimodales à gradient d'indice .
- Une liaison à grande longueur d'onde ($1,3\mu\text{m}$) sans répéteurs entre deux villes distantes de 27 Km avec des F.O unimodales .
- En Allemagne,deux projets Bigfern et Bigfon permettront d'employer des systèmes de transmission sur F.O pour les liaisons interurbaines et pour le raccordement d'abonnés .
- En Espagne,une liaison téléphonique privée a été réalisée et une possibilite de transmettre des mesures de niveau d'eau dans un environnement sévère a été démontré.

III- 4- AU JAPON

- De nombreux systèmes operationnels sont déjà en place.
- Des applications industrielles porteront sur les réseaux de transport d'electricite et autres secteurs souffrant de parasites electroma gnetiques.

- Des systèmes de télécommunication par câble sous-marin à grande distance sont en cours de développement .

En Bresil, Argentine, Singapour, la Chine et le Mexique, les fibres optiques sont déjà employées pour les liaisons intercentraux .

En algerie, des liaisons experimentales débuteront le mois de juin 1987 pour lier :

- Bir Mourad Rais----Alger
- Dar El Beida -----Bordj El Kiffan(BEK)
- Rouiba -----BEK
- BEK -----Alger
- Blida -----Boufarik .

La liaison EST-OUEST Maroc-Algerie-Egypte-Liban est prévue en câbles optiques .

Cette vue globale sur la situation de la fibre optique sur tout le globe terrestre permet de dire que les systèmes de transmission sur F.O ont fait leurs preuves en exploitation réelle et sont déjà largement employés.

IV - APPLICATION AU CAS PARTICULIER DE L'ALGERIE

IV-I- COMPARAISON DU CABLE OPTIQUE ET LE CABLE EN CUIVRE

IV-I-I- Matière première

IV-I-I-a-Evolution du produit existant:Le CUIVRE

Le cuivre constitue la matière première pour la fabrication des câbles de communication ; téléphoniques ou d'énergie .

En Algerie, il n'existe pas de minerais de cuivre exploitables. Pour répondre aux besoins nationaux en matière de câbles de communication, la totalité du cuivre est importée. Les statistiques relevées au niveau du service des statistiques du commerce extérieur de l'Algerie (voir tableau II) ont permis de tracer l'

l'histoire du produit pendant ces dix dernières années pour, uniquement, le cuivre utilisé dans la fabrication de câbles de télécommunications (fig-I-).

Années	Quantités de cuivre importées (tonnes)	Valeurs correspondantes (MDA)	Prix unitaire (DA/Tonn) 10^5
1976	7323	46.40	0.063
1977	8537	73.55	0.086
1978	5466	46.12	0.084
1980	5571	67.60	0.120
1981	17839	189.80	0.110
1982	18101	162.21	0.090
1983	12236	156.89	0.130
1984	15802	148.69	0.090
1986	15918	142.24	0.090

tableau-II-

On remarque une importation de quantités de mêmes grandeurs :

- de 1976 à 1980 ; Soit en moyenne 6724,25 Tonnes/an.
- de 1981 à 1986 ; avec une moyenne de 15979,2 t/an .

Ce qui donne un taux de croissance annuel de 1851 t/an permettant de faire les prévisions sur les importations du cuivre sur les dix prochaines années (fig-2-).

L'évolution du prix unitaire en DA/tonne du cuivre importé en fonction du temps est donné à la figure -3- .

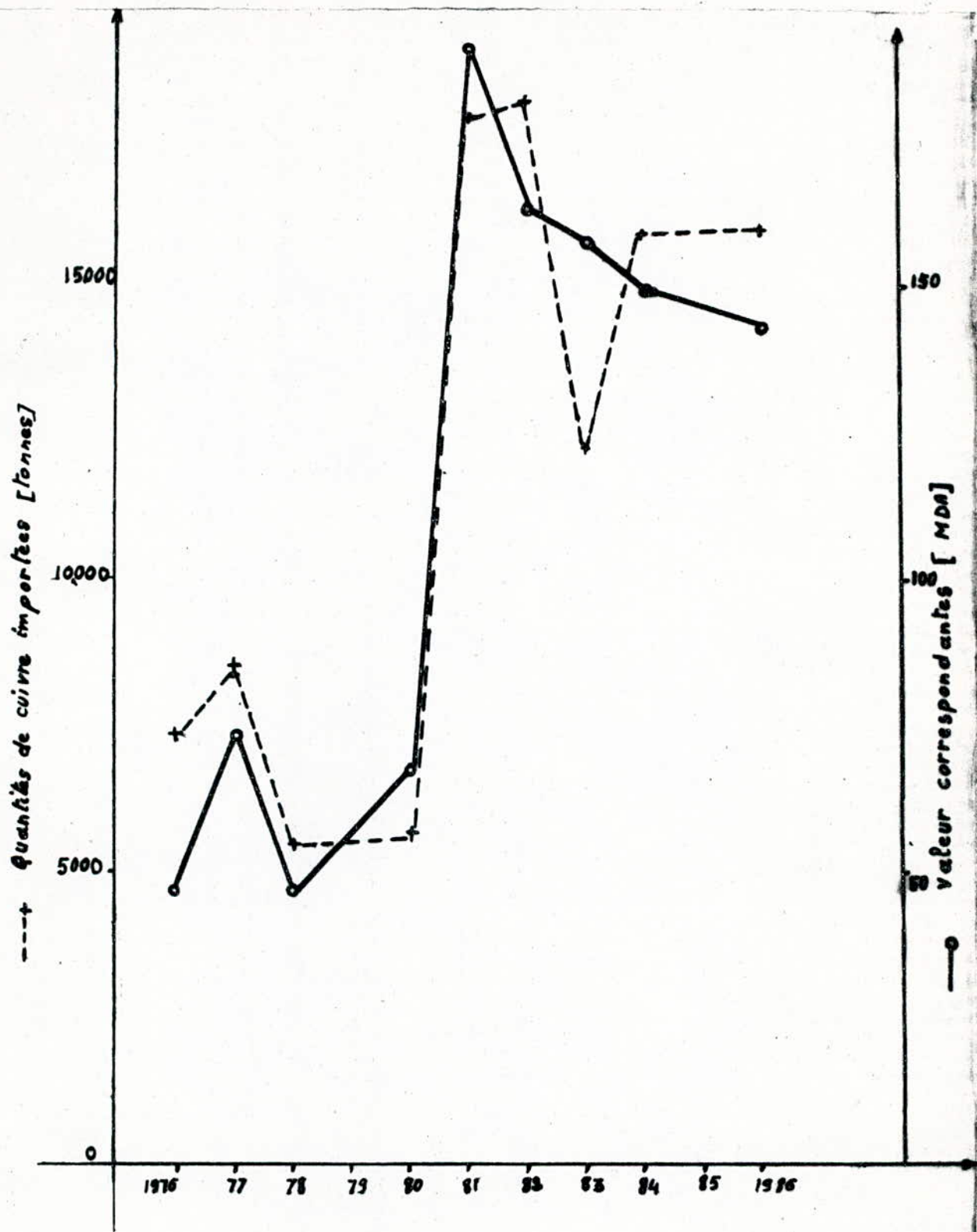


fig-I- evolution des quantites de cuivre importees dans les dix dernieres annees .

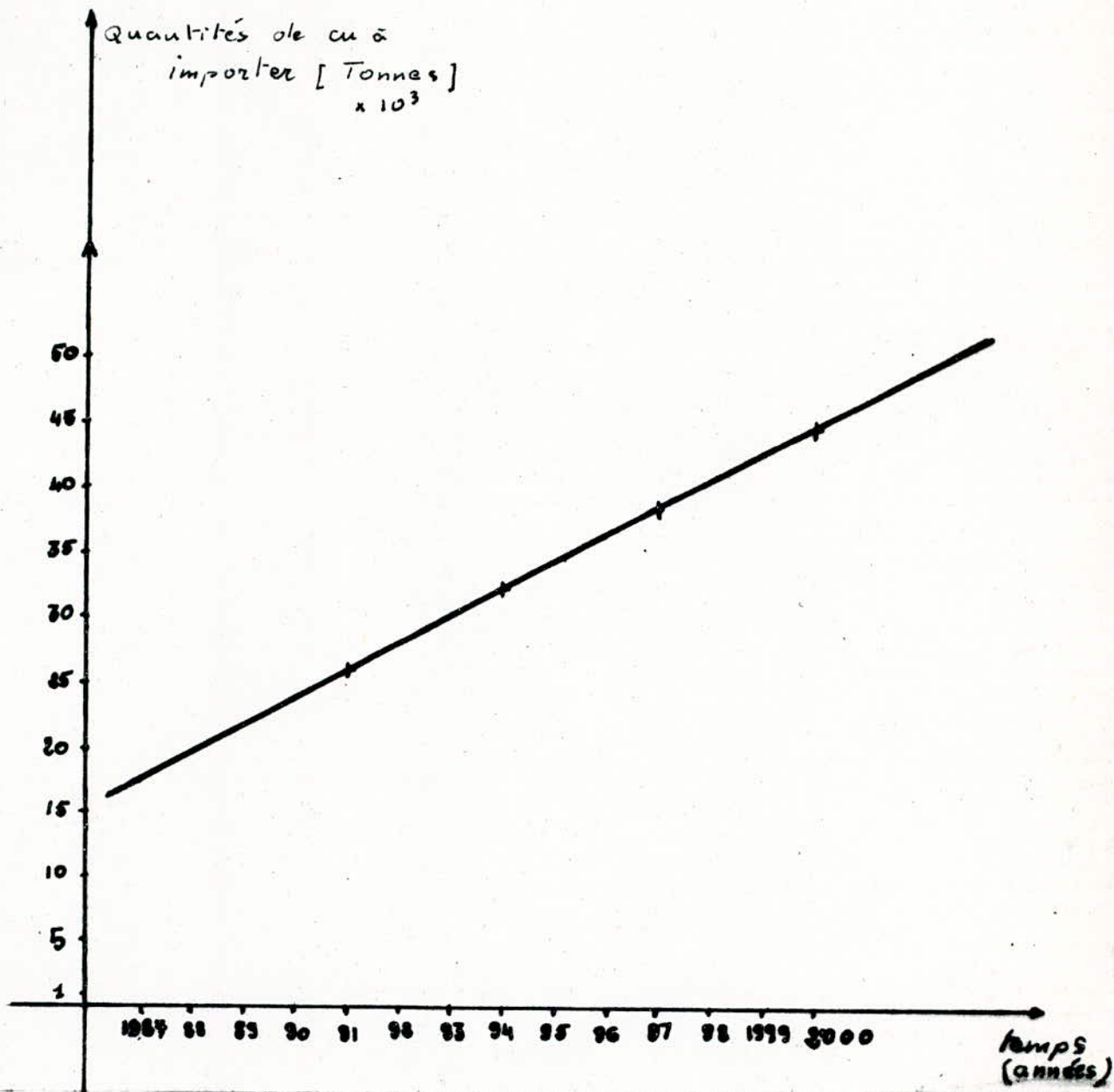


fig-2- previsions sur les importations du cuivre pour la prochaine decennie .

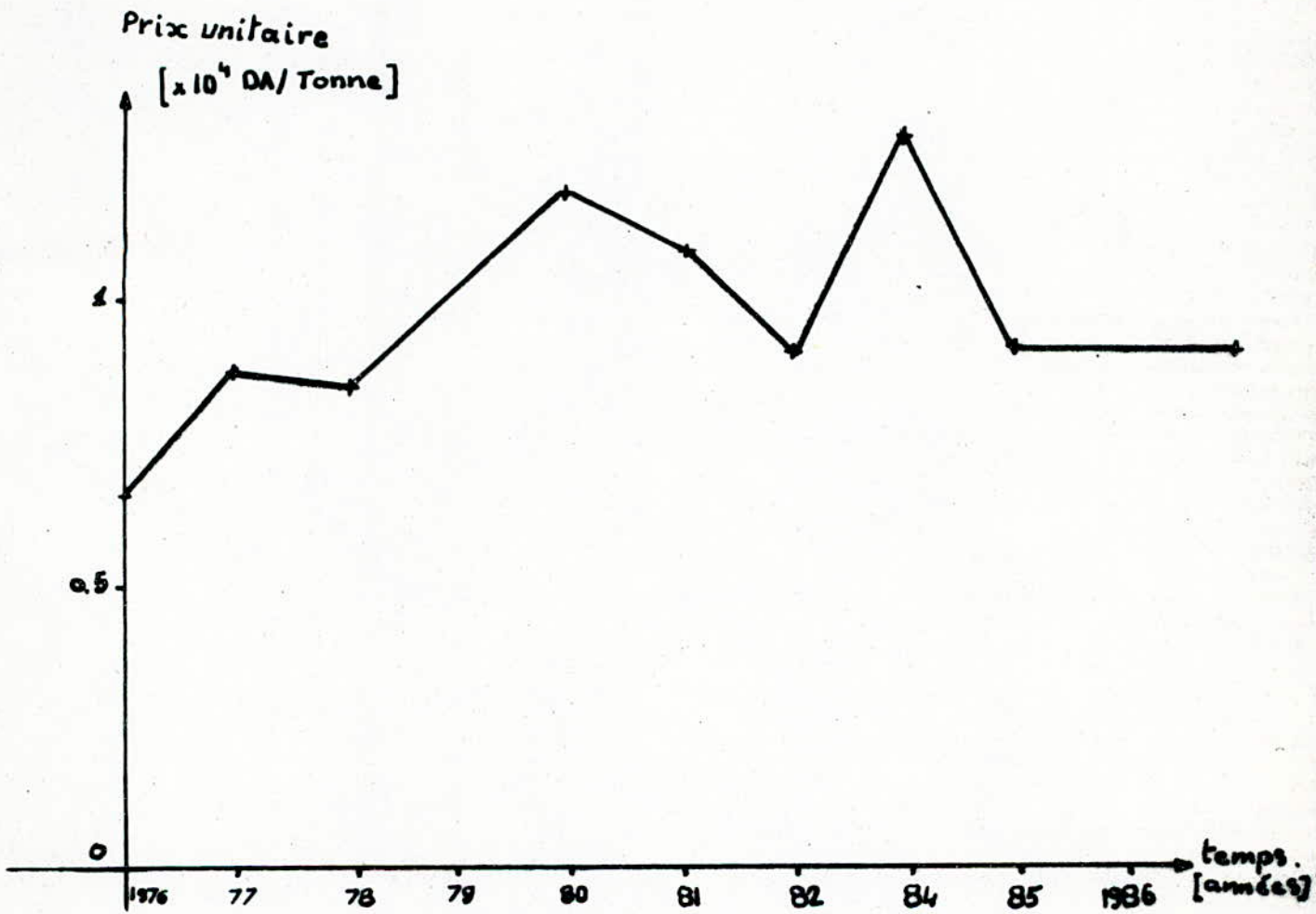


fig-3- evolution du prix unitaire du cuivre importe .

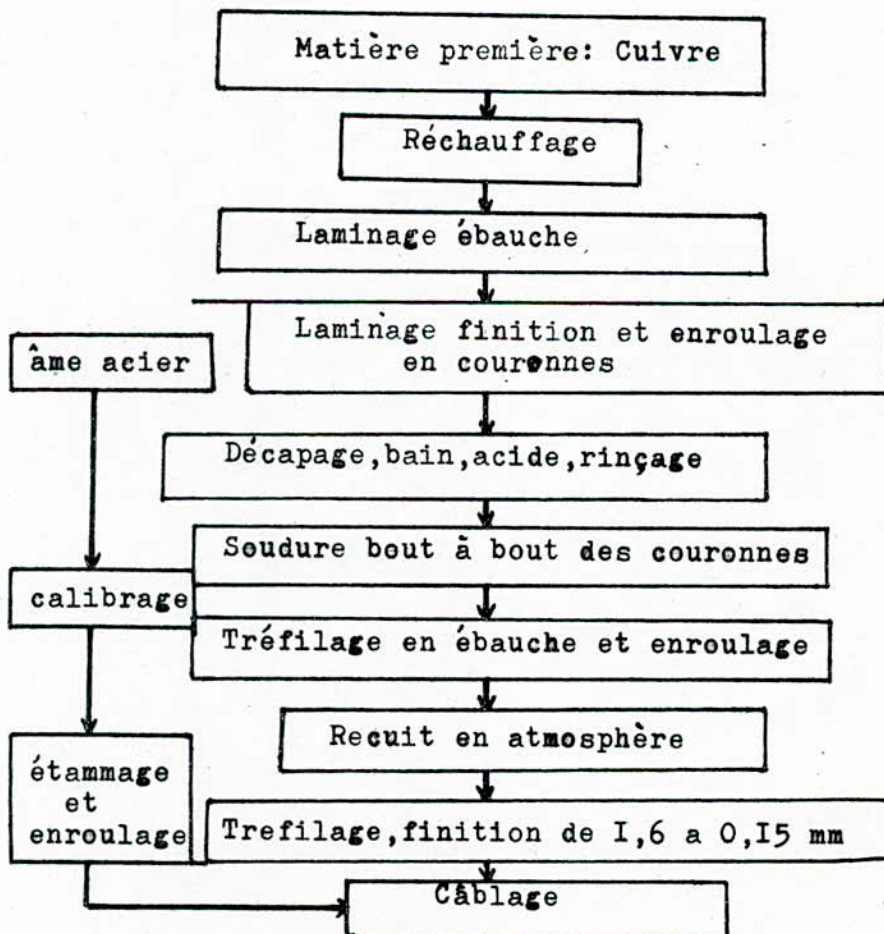
IV-I-I-b-Matière première pour la fabrication du câble optique

La fibre optique est à base de silice à 85%(sauf dans le cas des fibres à verres multicomposants). La silice est un mélange de silicium et d'oxygène, très répandue dans la nature, et l'Algérie n'en manque pas. Son traitement est connu depuis des siècles. Une production intégrée de fibres optiques ne nécessite donc pas d'importations de matières premières.

IV-I-2-Technique de fabrication

IV-I-2-a- Cas des câbles en cuivre

Le bloc diagramme de fabrication des câbles en cuivre est donné comme suit :



Nature de la fabrication

Actuellement, cette branche de fabrication ne comporte qu'une seule usine* dont la gamme de produits est la suivante :

- câbles isolés en papier
- câbles à isolation plastique
- câbles coaxiaux
- câbles de signalisation
- câbles de téléphonie privée

Dans le cas le plus intéressant des câbles coaxiaux (2.6/9.5mm et 2.6/10mm), on donne les caractéristiques suivantes (comparées à celles des câbles optiques plus loin) :

i) Nature du conducteur central

- câble 2.6/9.5 : fil de cuivre recuit nu de 2.6mm de diamètre nominal.
- câble 2.6/10 : mêmes caractéristiques avec un diamètre de 2.61mm .

ii) Nature de l'isolant

- câble 2.6/9.5 : polyéthylène
- câble 2.6/10 : même .

iii) Nature du conducteur extérieur

- câble 2.6/9.5 : bande de cuivre de 0.25mm d'épaisseur cintrée longitudinalement formant un cylindre .
- câble 2.6/10 : bande de cuivre de 0.25 mm d'épaisseur ondulée par emboutissage puis repliée en forme de tube .

(*) Une seule usine de fabrication de câbles téléphoniques : UNICAB (Oued-Smar).

iv) Nature ^{de} la frette

- câble 2.6/9.5 : deux rubans d'acier cuivres enroulés en helice .
- câble 2.6/10 : deux rubans d'acier cuivrés d'épaisseur 0.13mm enroulés en hélice dans le même sens à intervalles mutuellement recouverts.

v) Caracteristiques électriques

Caracteristiques	Câbles 2.6/9.5	Câbles 2.6/10
Resistance d'isole- ment	Supérieure à 10^4 Mhoms/Km a 10°C .	Supérieure à 10^4 Mhoms/Km .
Régidité dielectri- que	2000 V/50 HZ	2000 V/50 HZ
Régularité d'impe- dance	inférieure ou égale à 0.45ohms.	inférieure à 0.90ohms(ou égale
Capacite linéique	47 nf /Km	50 nf /Km
Impédance caracte- ristique moyenne		
- à 1 MHZ	75 ohms+0.75ohm	75 ohms
- à l'infini	74.05+ 0.75ohms	73 - 75 ohms
Affaiblissement linéique à 1MHZ	$27\text{I} + 5 \text{ mNp/Km}$ à 10degre C	inférieur à 0.280 Np/Km
Mode de livraison	Sur touret de 463.23I ou 150m	1000m sur tourets

tableau-III-

vi) Utilisation

- Câble 2.6/9.5mm : En Algérie, il est en general, utilisé dans le type desert et aux fins de surveillance et d'exploitation des reseaux ferroviaires. Pour une frequence de 1.3MHZ, sa capacite est de 300 voies.
- Câble 2.6/10mm : Destiné à assurer la transmission d'information entre centres importants et éloignés de région à faible densite de population. Il est aussi utilisé pour la surveillance et l'exploitation des ouvrages d'acheminement et d'écoulement des hydrocarbures.

IV-1-2-b- CAS DES CABLES OPTIQUES

Les grandes étapes de fabrication diffèrent peu de celles des câbles en cuivre. Cependant, une grande precision et un contrôle rigoureux et continu sont exigés (voir chpIII de la première partie).

Le domaine d'application des câbles optiques est nettement plus vaste que celui des câbles existants (voir § II).

IV-I-3- INSTALLATION

La pose et l'installation des deux types de câbles sont basées sur les mêmes techniques. Cependant, les câbles optiques, vue leurs faibles dimensions et poids, sont plus faciles à manipuler et peuvent être déposés dans des conduites étroites, de plus, ils permettent de plus grandes distances entre les répéteurs.

IV-I-4- CÔUT

Cas des câbles en cuivre

Les prix à l'importation de quatre types de câbles coaxiaux (en coût et frais) sont donnés par le tableau suivant :

Câbles	2PC.2.6/9.5 + 6QEO.9S/Pe + 2FO.9S/Pap	4PC + 6QEO.9S/Pe + IQEI.2S/Pe + 2FO.9S/Pap	4PC + I2QE 0.9 S/Pe + 2QEI.2S/Pe + 2FO.9S/Pap	8PC + I2 QE 0.9 S/Pe + 2 QE I.2 S/Pe + 2FO.9S/Pap
Coût (DA/Km)	42.504	49.951	56.232	75.138

tableau-IV-

Pour les câbles fabriqués localement, le prix = prix des importations + 70 % .

Le coût total de l'installation d'une liaison à grande distance (jusqu'au sud Algerien) est d'environ 10 MDA .

IV-1-4-b- Cas du câble Optique

Pour une longueur de 5 mètres et pour différents diamètres actifs du guide de lumière, on donne les prix suivants :

diamètre actif(mm)	longueur (m)	prix de vente (£)	prix équivalent en DA .
1.5	5	41.70	323.59
3.0	5	51.05	396.15
4.5	5	151.50	1175.64
6.0	5	161.55	1253.63
9.0	5	390.65	3031.44

tableau-V-

Pour un câble à 4 fibres optiques, le prix en kilomètre est de 28000 FRF/Km (21560 DA), soit le 1/3 d'un câble en cuivre ayant les mêmes caractéristiques.

Le prix total d'une opération d'installation d'une liaison de 13 Km environ est de 364000 FRF, soit 280280 DA .

Des études comparatives entre le câble coaxial et le câble optique à grande capacité ont abouti aux tracés des courbes de la fig-5-. Ces courbes montrent que l'utilisation des fibres optiques à une longueur d'onde supérieure ou égale à 1,3um permet une réduction des prix de 50% par rapport aux câbles coaxiaux .

IV-I-5- Durée de vie

Les câbles en cuivre aériens ont une durée de vie comprise entre 34 et 40ans. Les plus anciens câbles posés en Algérie datent de 1957(environ) et sont actuellement en bon état et peuvent fonctionner encore pendant dix ans sans problèmes .

Un câble sous-marin peut fonctionner pendant 25 ans et aucun, actuellement, ne nécessite des réarrangements .

Pour le cas des câbles optiques, les plus anciens, datent de au plus, dix ans et fonctionnent normalement dans des conditions très sévères (type militaire). Leur immunité aux parasites électromagnétiques et aux problèmes de rebouclage par la terre, leur souplesse physique avec possibilités de courbures à faibles rayons sans affecter la transmission, leurs permettent une durée de vie non limitée (sauf par les sources optiques dont la durée de vie est, au plus, égale à 50 ans) .

C

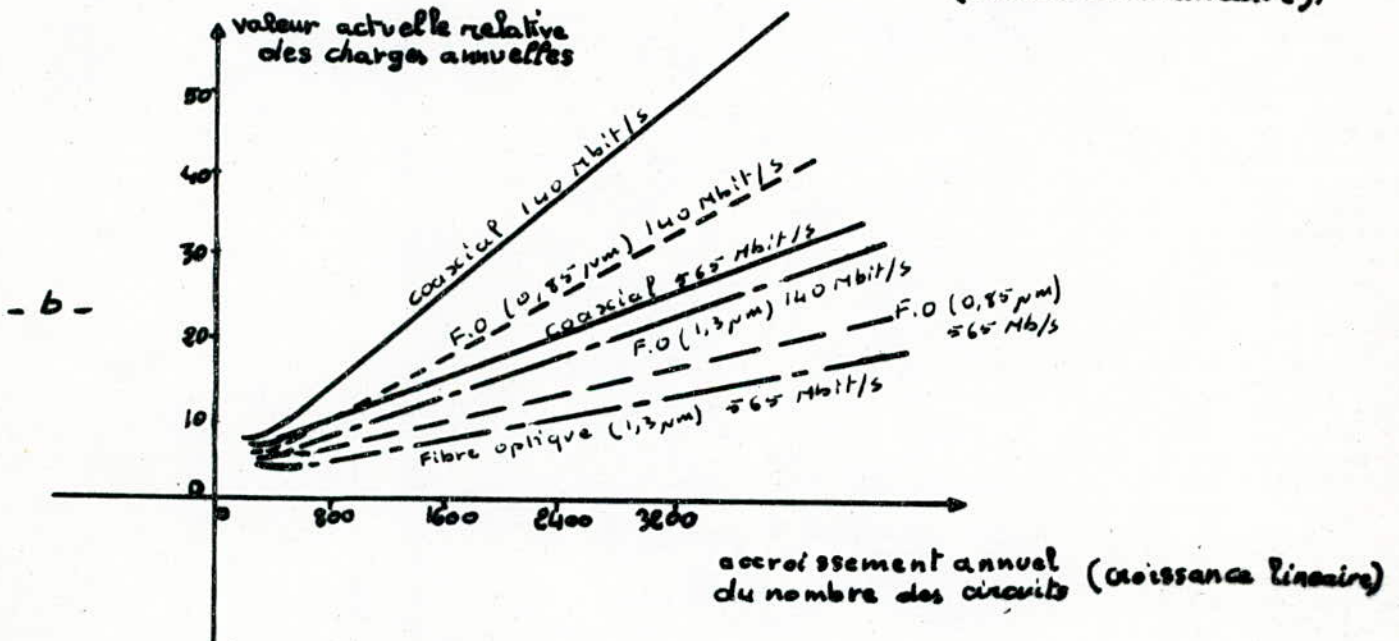
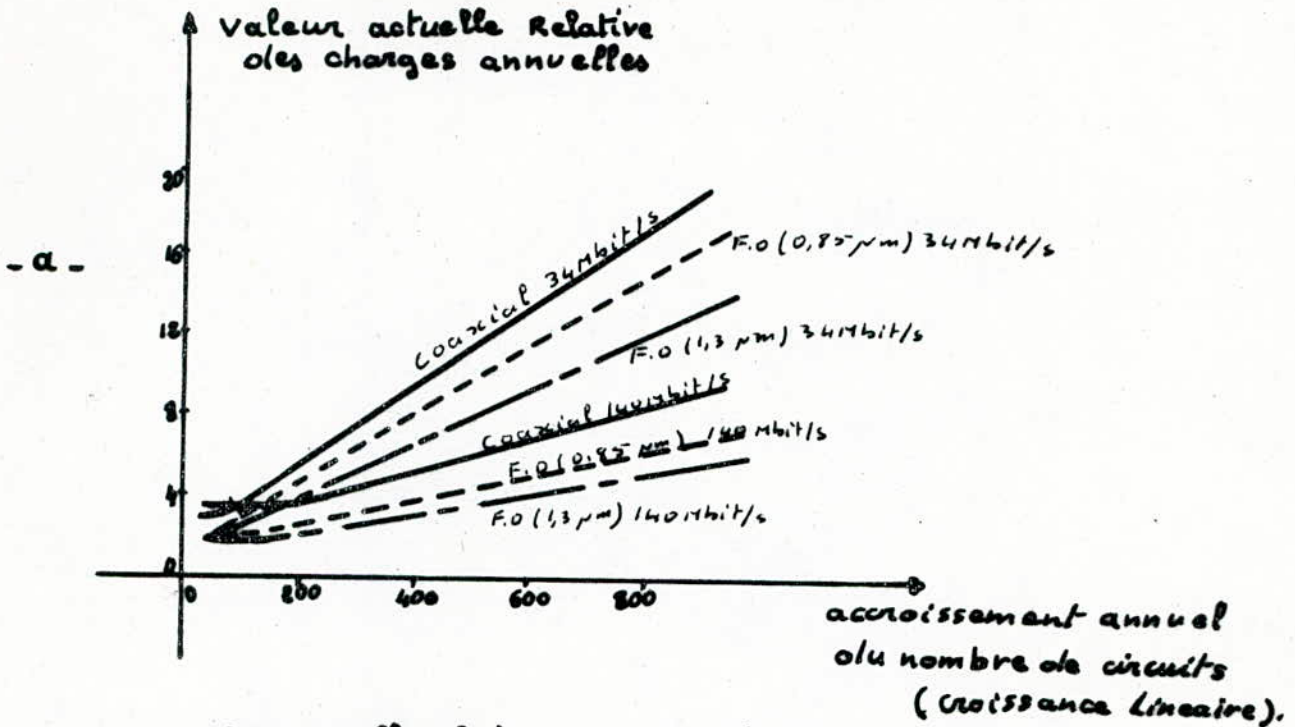


fig-5-⁽³⁴⁾ couts relatifs de transmission :

- a- a 34Mbits/s par cable coaxial de 4.4mm et par deux cables a fibres optiques(pour des longueurs d'onde de 0.85 et 1.3 μm) .
- b- a 140 et 565Mbits/s par cable coaxial de 9.5mm et par deux cables a fibres optiques(a 0.85 et 1.3 μm).

IV-2- EVOLUTION DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN CABLES EXISTANTS

IV-2-I- Evolution de l'offre

L'ENICAB représente la seule cablerie téléphonique produisant les câbles de télécommunication. Sa production pour différents isolants, dans les dix dernières années, est donnée par les tableaux -VI-a, b et c .

a- cas des câbles isolés en papier

temps (années)	1976	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
quantités (tonne)	864	806	338	495	1038	1020	1060	1169	929	929	929

tableau-VI-a-

Les variations subites par la production sont visualisées à la fig-4- . On constate alors une variation de 831 tonnes de l'année 78 à 83 pour palier à 929 tonne/an dans les trois dernières années. Cette chute dans la production a conduit le MPTT à envisager une importation d'une grande quantité de ce type de câbles pour répondre aux exigences de certaines liaisons .

b- cas des câbles isolés en plastique

temps (année)	1976	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
quantités (tonnes)	628	600	1046	1138	925	925	11295	1550	2014	2347	2617

tableau-VI-b-

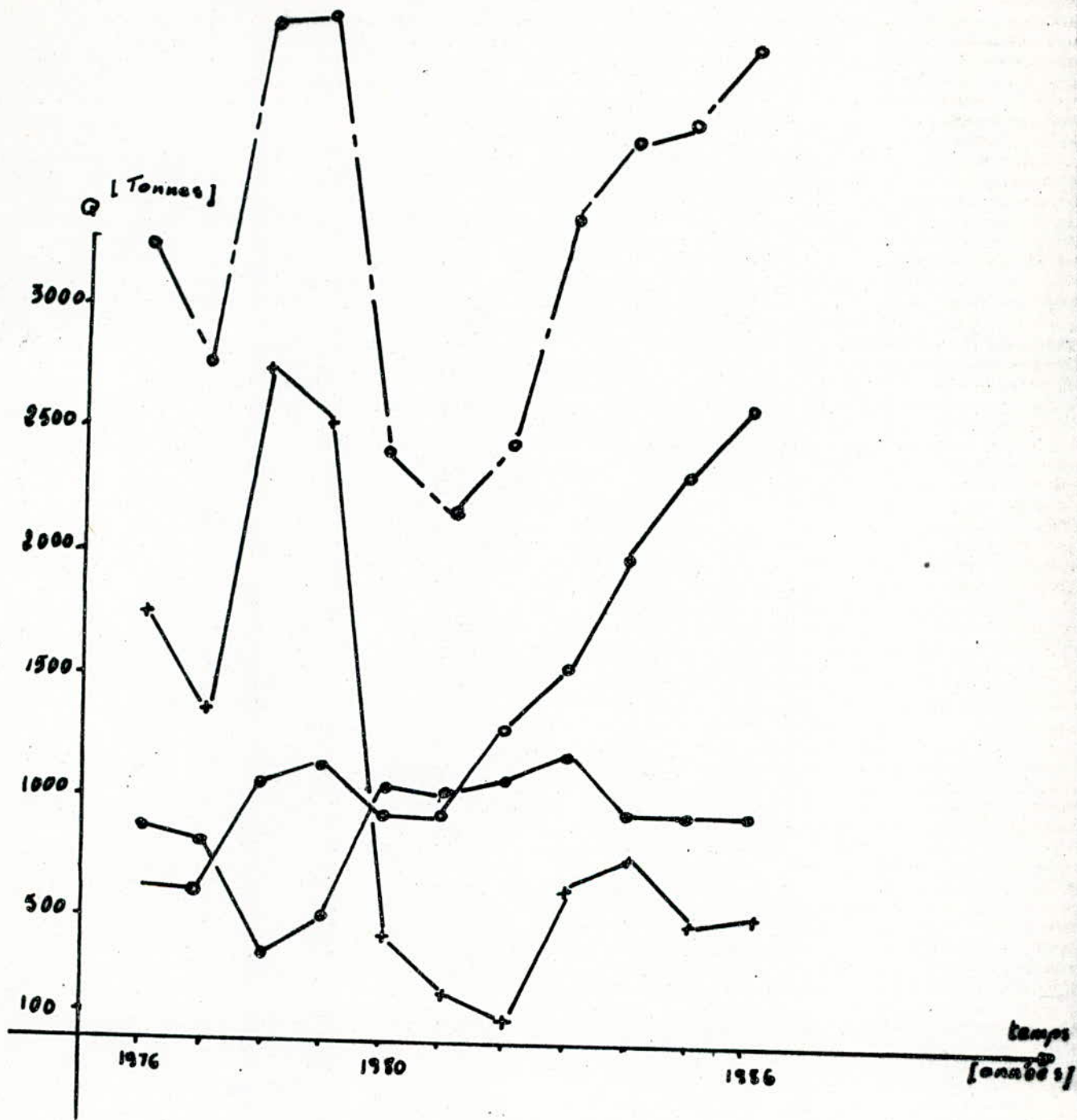


fig-5-évolution de la production de câbles au niveau de l'ENICAB .

● — câble isolé en parier
 ○ — " " en plastique
 + — " " avec d'autres matières.
 ○ — — — total

Contrairement aux câbles sous papier, les câbles à isolation en plastique voient leur production croître continuellement dans le temps depuis 1980 (voir fig-4-). Ceci donne des résultats incompatibles avec les types d'isolants employés :

- le papier : matière première abondante et sa fabrication est maîtrisée .
- le plastique : existence de la matière première en Algérie mais, son traitement est ignoré par les unités de production, ce qui impose son importation .
- c- Cas des câbles isolés avec d'autres matières

temps (années)	1976	1977	78	79	80	81	82	83	84	85	86
quantités (tonnes)	1735	1340	2720	2526	419	175	65	585	722	475	494

tableau-VI-c-

Ce type de câbles a connu une forte variation entre les années 78 et 82 . La production est passée de 2720 tonnes/78 à 65 tonnes/82, pour fluctuer autour de 475 tonnes/an ces quatre dernières années .

La totalité de la production (fig-4-) varie approximativement dans le même sens que ces derniers jusqu'en 1984 où les câbles sous plastique compensent le manque des autres types de câbles et permettent une continuelle croissance de la production, sans toutefois, satisfaire les besoins en câbles de télécommunication. En janvier 87, la production est évaluée à 183 tonnes de câbles S/PP contre 350 tonnes prévues initialement, soit un taux de réalisation des objectifs valorisés de 69% uniquement .

IV-2-2- EVOLUTION DE LA DEMANDE

La plus forte concentration de la demande en matière de câbles de communication se situe au niveau du MPTT avec un taux de 80% de la production nationale contre 10% pour le ministère de la défense, 5% pour la SNTF et 5% pour l'ensemble des entreprises nationales .

L'évolution de la demande du MPTT en câbles à paires et en coaxial est représentée à la fig-6-. Cette demande dépasse les capacités de production de l'ENICAB. Pour l'année 88, la demande en coaxial est estimée à 4000 Km/P alors que la capacité de l'ENICAB est uniquement de 800Km/P . Donc, une évolution offre/demande dans un rapport de 0.20 (voir tableau-VII-).

Plusieurs études ont été menées pour remédier aux problèmes du déséquilibre qui existe entre l'offre et la demande en câbles de TELECOM .

- évaluer l'offre de l'ENICAB avec la situation actuelle .
- étudier l'offre avec un petit IVPE ; avec une importation de certaines machines de production (chariots) évaluées à 4MDA .
- étudier l'offre avec une installation d'un nouvel atelier évalué à 68 MDA .

Les résultats obtenus sont donnés au tableau-VII-suivant :

années rubriques	1987	88	89	90	91	92	93	94	95
demande du MPTT (Km/P)	2960	3980	-	-	-	-	-	-	-
offre(1) (Km/P)	800	800	800	800	800	800	800	800	540
offre(2) (Km/P)	800	1000	1000	1000	1000	1000	1000	140	-
offre(3) (Km/P)	800	800	4000	1340	-	-	-	-	-

tableau-VII-

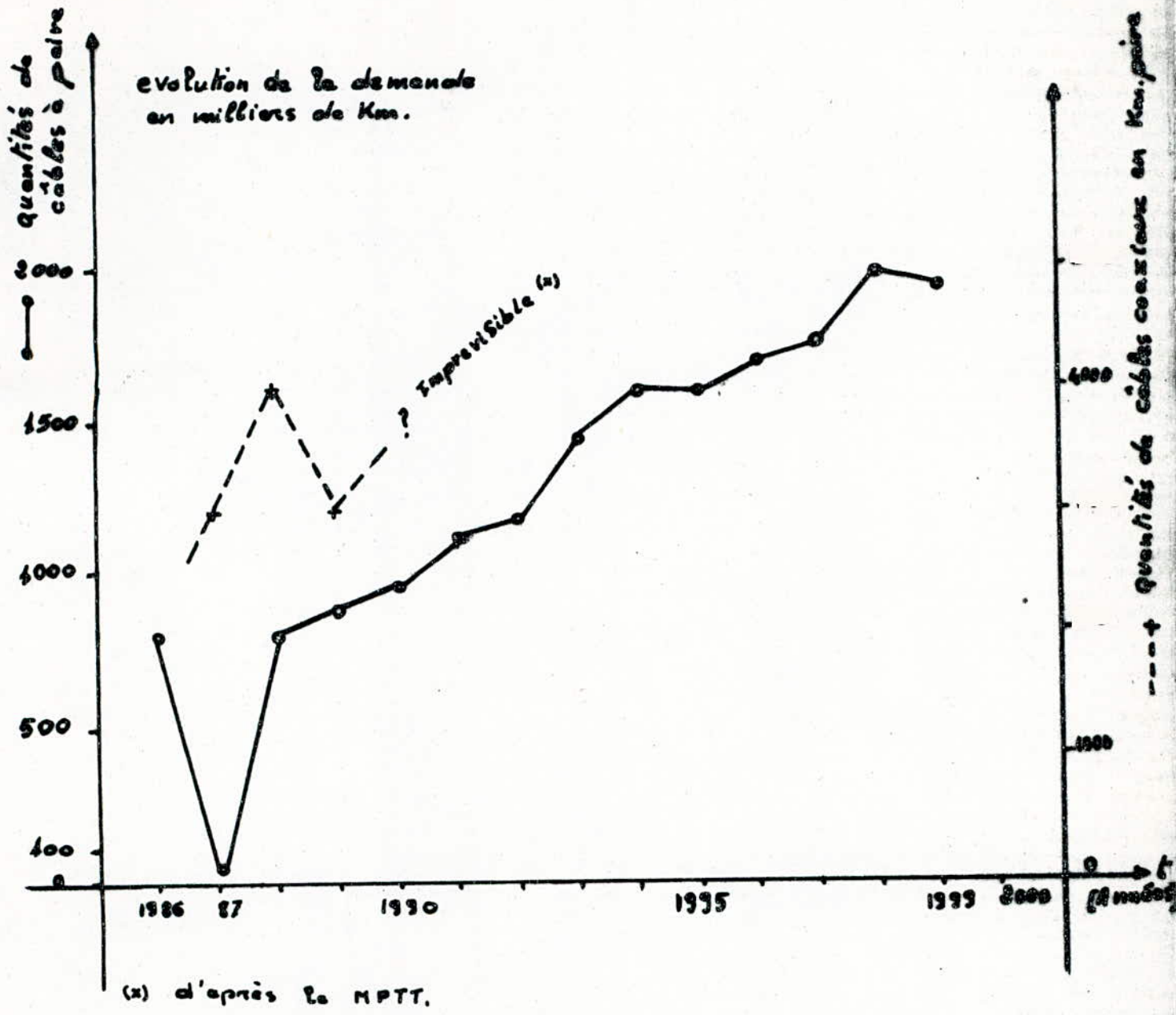


fig-6- evolution de la demande du MPTT en cables de telecommunication .

Ces résultats conduisent aux décisions suivantes :

- (1) arrêt de la production à partir de 1994 .
- (2) " " " " de 1990 .
- (3) installation d'un nouvel atelier de production de câbles (pouvant être optiques) .

Avec ces différentes hypothèses, les importations prévues pour satisfaire la demande sont données dans le tableau-VIII-suivant :

années									
importations (MDA)									
avec hyp (I)	32.35	39.70	-	-	-	-	-	-	-
avec l'hyp (2)	32.35	37.20	-	-	-	-	-	-	-
cout de l'atelier avec l'hyp (3)	9.36	9.36	31.33	9.6	-	-	-	-	-

tableau-VIII-

Le total des importations sera donc de :

- 72.05 MDA pour le cas (I).
- 69.55 MDA " " (2).
- 59.65 MDA " " (3), dont 4IMDA pour le nouvel atelier.

Entre ces trois solutions, celle qui donne le meilleur gain économique est l'installation d'un nouvel atelier de production de câbles de télécommunication .

CONCLUSION

Le choix entre câble métallique et câble optique dépendra de deux facteurs :

- les performances
- le coût total par voie; Deux conditions qui avantagent, dans une large gamme d'utilisation, les câbles à fibres optiques .

.....

INTRODUCTION

L'organisation d'un laboratoire de recherches dépend essentiellement des objectifs à atteindre. Cependant, pour une ligne de production de fibres optiques, les éléments clés sont le contrôle de la pureté et le maintien d'une haute précision.

I - LE LOCAL

D'après la technique de production décrite au chapitre III de la première partie, on mettra en oeuvre des gros appareils (appareils de production) et des matériels aisés à disposer (microscope optique classique, circuits de montage électroniques, ...) des paillasses et des tables seront alors prévues.

Vu l'inexistence d'atelier pouvant préparer la qualité de verres requise, il est nécessaire d'équiper un local spécialisé dans la préparation et le soufflage du verre. Pour les travaux de recherches, un démarrage peut se faire à partir d'un produit semi-fini: Le tube de verre servant à la fabrication de la préforme; une importation de tubes de verre est alors à prévoir.

La surface de l'ensemble du laboratoire est donnée au tableau-I- suivant :

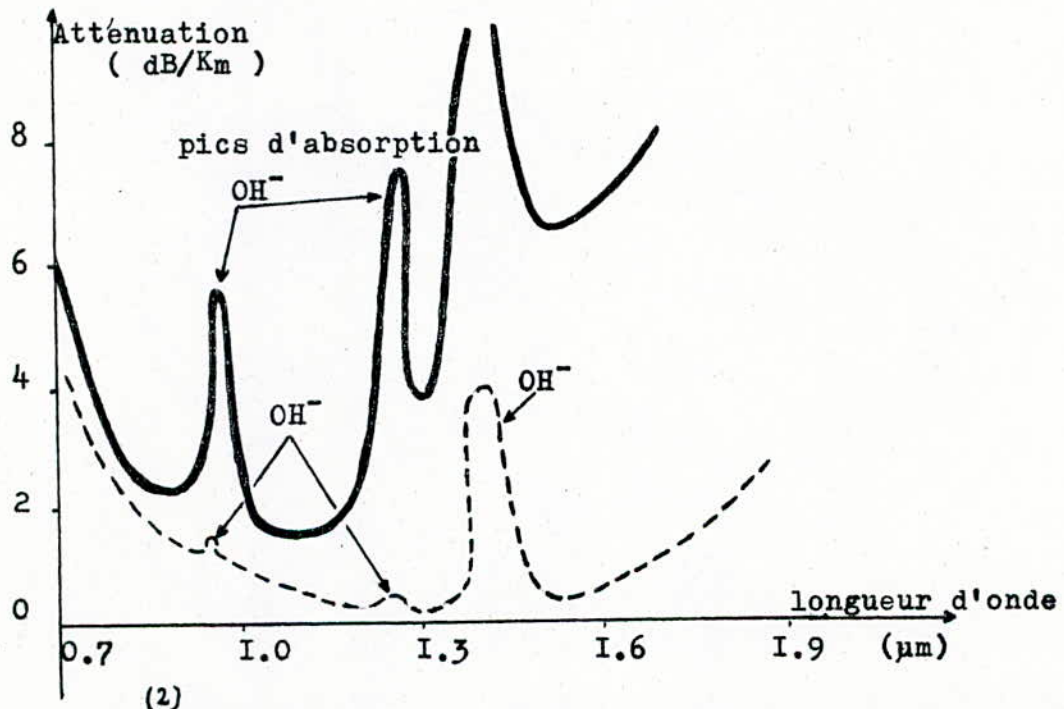
Désignation	Surface (m ²)
salle de production	30
salle de mesures	25
lieu de travail	5

tableau-I-

I - I - LABORATOIRE DE PRODUCTION

Le principal paramètre dispersif affectant la transmission sur fibres optiques est l'absorption, dans le matériau, des impuretés dûes aux métaux tels que le cuivre, le phosphore, ... (voir) tableau-I- du chap-I- de la première partie) et aux ions OH^- .

L'influence de la teneur en OH^- sur l'atténuation du signal optique est donnée à la figure-2- suivante :



(2)
fig-2- Influence des OH^- sur l'atténuation des fibres optiques .

— représente l'influence des ions OH^- sur une fibre contenant $5 \cdot 10^{-6}$ OH^- .

----- représente l'atténuation d'une fibre contenant $0.1 \cdot 10^{-6}$ OH^- .

(d'après la revue technique Thomson-CSF vol 13, N°4 /Decb1981).

Le signal est fortement atténué pour un ordre d'impuretés dépassant 10^{-7} ions OH^- , ce qui ne peut être évité que par l'utilisation d'enceintes dépoussiérées. Ainsi toutes les étapes technologiques seront réalisées soit dans des salles entièrement maintenues propres (salles blanches), soit dans des salles "grises" dans lesquelles les postes de travail sont constamment balayés par un flux laminaire ou turbulent.

La figure-3- schématise les effets de ces deux types de flux.

Le régime turbulent assure la protection contre la pollution extérieure mais, l'élimination des particules introduites pendant les manipulations n'est pas assurée. Par contre, un régime laminaire (écoulement sans tourbillon et à vitesse constante de l'air) chasse vers l'extérieur toutes les particules émises dans la zone de manipulation.

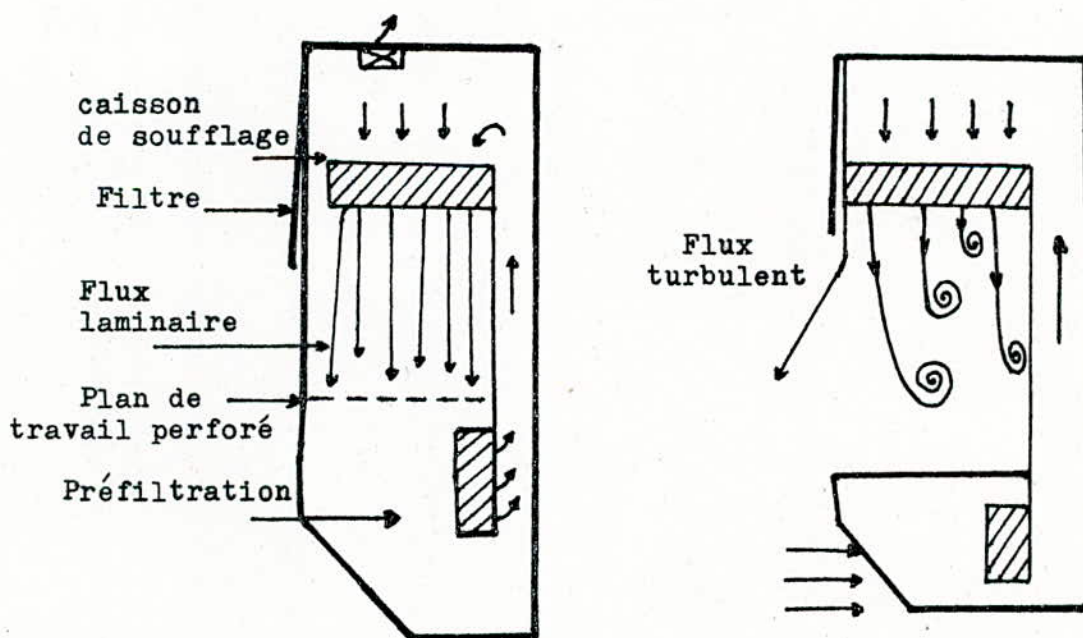


fig-3- (a) Enceinte à flux laminaire .

(b) Enceinte à flux turbulent .

Les classes d'empoussierage sont choisies suivant le nombre et la dimension des particules de l'air à chasser. Les normes des salles blanches ainsi définies sont données au tableau (II) suivant :

Classe		Concentration maximale de particules par m ³ d'air .
Norme US	Norme Française	
100	4000	4000 particules
10.000	400.000	400.000 "
100.000	4000.000	4 000.000 "

Tableau-II-

I-2- LABORATOIRE DE MESURES

Les éléments nécessaires pour les mesures sont donnés au chapitre-III- de cette partie.

Apart le microscope électronique à balayage qui doit, à lui seul, occuper toute une salle, les équipements de mesures sont de faibles dimensions et leur utilisation nécessite des paillasses et des tables pour les manipulations .

Cette salle ne nécessite pas un entretien aussi poussé que celui de la salle de production. Cependant, il faut choisir des revêtements de murs, plafond et sol spéciaux.

I- Revêtement des murs

Des panneaux de fibres spéciaux. Ils se présentent sous forme de panneaux perforés ou rainurés, revêtus en surface d'une feuille d'amiante ou d'une couche de papier ou de peinture. Ils permettent une bonne résistance mécanique et et une bonne isolation contre :

- l'humidité
- les bruits
- la chaleur

2- Revêtement du plafond

Pour assurer une bonne isolation

- phonique
- thermique

et une bonne hygiène, on utilise un enduit plâtre sur lattis, malgré sa médiocre résistance mécanique et chimique.

3- Revêtement du sol

Pour un bon compromis efficacité/coût, on utilise des dalles thermoplastiques semi-conductrices équipées d'un système d'absorption de poussières.

Ce revêtement est collé sur un lissage fin à l'aide d'une solution de Néoprène, additionnée de soie d'acétyle. L'interposition d'un ruhan de cuivre établit le contact avec chaque dalle et assure une mise à la terre efficace.

I-3- ALIMENTATION

Différents courants peuvent être proposés aux utilisateurs; L'énumération n'est pas limitative :

I- Nature

- courant alternatif (triphase + neutre,....)
- " redressé (tension 24,48,120,380 V,...)
- " continu .

2- Tension

Les plus couramment utilisées sont 110,220 et 380V . Les tensions des émetteurs et récepteurs optiques sont, en général, intégrées dans le boîtier.

Afin d'éviter les problèmes d'éclairage en cas de fausses manoeuvres pendant les manipulation, il serait prudent de séparer les circuits d'éclairage des laboratoires avec ceux utilisés sur les paillasses ou tables de travail.

Pour la mise à la terre, on prévoit des réseaux :

- de terre de masse (pour la sécurite)
- " de référence (pour les montages électriques) .

I- 4- CHAUFFAGE

Le système de chauffage utilisé est un chalumeau oxydrique intégré au système du tour verrier pour la production de la préforme et un chauffage à induction intégré dans la tour d'etirage de la fibre .

I-5- LE LIEU DU TRAVAIL

L'organisation des espaces de travail exige de plus en plus de flexibilité dans la distribution et l'adaptation des équipements. Ainsi, la forme des objets, les sièges, ont développé des arguments physiologiques de confort, de positionnement du corps, du dos, des genoux de sorte à permettre d'avoir le maximum de rendement .

Un système pouvant répondre sur le plan formel et spacial à l'évolution de l'aménagement des espaces de bureau est le système MISURA. Ce système de 9cm d'épaisseur est composé d'une structure métallique de cadres porteurs dans laquelle circulent les réseaux (électriques, téléphoniques, électroniques). Sur cette structure se fixent des éléments modulaires tous compatibles de 40x60 cm. Ces briques présentent une large gamme de matières et de revêtements et des systèmes d'accrochage capables de supporter des équipements (rangements, éclairage,).

Comme matériels de travail, on peut utiliser des installations groupées, de formes continues et réglables en hauteur. Ce type d'installation s'adapte parfaitement pour des organisations de travail en groupe avec une optimisation des espaces .

II - LES EQUIPEMENTS DE PRODUCTION ET D'ESSAIS DE FIBRES OPTIQUES

II-I- EQUIPEMENTS DE PRODUCTION

L'équipement de production doit répondre à certaines exigences :

- satisfaire aux conditions strictes de pureté et de contrôle .
- présenter une grande souplesse pour le développement de nouvelles fibres optiques .
- servir au transfert technologique de la phase de développement à celle de la fabrication .
- permettre l'automatisation du processus .

Les équipements nécessaires à la production de la fibre sont:

- un tour verrier
- une armoire de distribution de gaz
- " de contrôle
- une tour d'étirage .

II-I-I- Tour verrier

C'est un tour horizontal, comportant :

- un tube en silice qu'il entraîne en rotation .
- une source de chaleur mobile le long de l'axe du tube.
- un raccord tournant qui injecte les gaz réactifs à l'intérieur du tube de verre .
- un servomoteur qui assure le déplacement du chariot.
- des fins de course permettant l'inversion du sens de déplacement du chariot .

- un pyromètre à IR qui assure la mesure de la température de la zone chaude du tube .

DIMENSIONS

Base : 3500mm x 1400mm .

Hauteur max : 1790 mm .

La vitesse de la traversée de la préforme est de 0 à 5mm/s.

Schéma

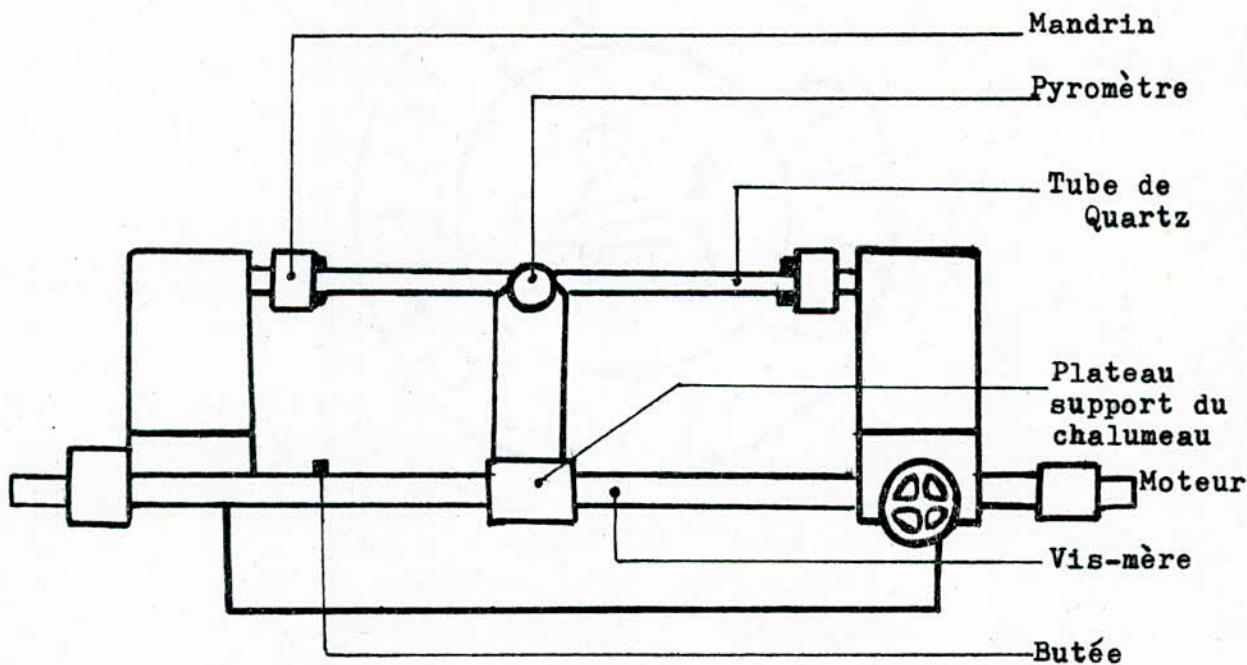


fig-4- Schéma du tour de verrier dans le procédé MCVD.

II-I-2- Armoire de distribution de gaz

Elle assure l'alimentation du tube de silice en oxygène et halogénures. Elle contrôle :

- quatre saturateurs alimentés en liquide
- deux sources de gaz actifs
- deux générateurs de gaz porteurs.

Et dispose de :

- une ligne d'injection de chlore
- des régulateurs de débit de masse et des vannes à commande automatique pour le contrôle du flux de gaz .
- des électrovannes qui contrôlent l'admission des gaz .
- des dispositifs à tamis moléculaire pour dessécher les gaz (à un taux inférieur à 5/1000000).
- des filtres
- un système d'aiguillage du mélange gazeux vers le tour .
- un système d'extraction pour l'évacuation
- un capteur de pression pour surveiller le retrait de la preforme .

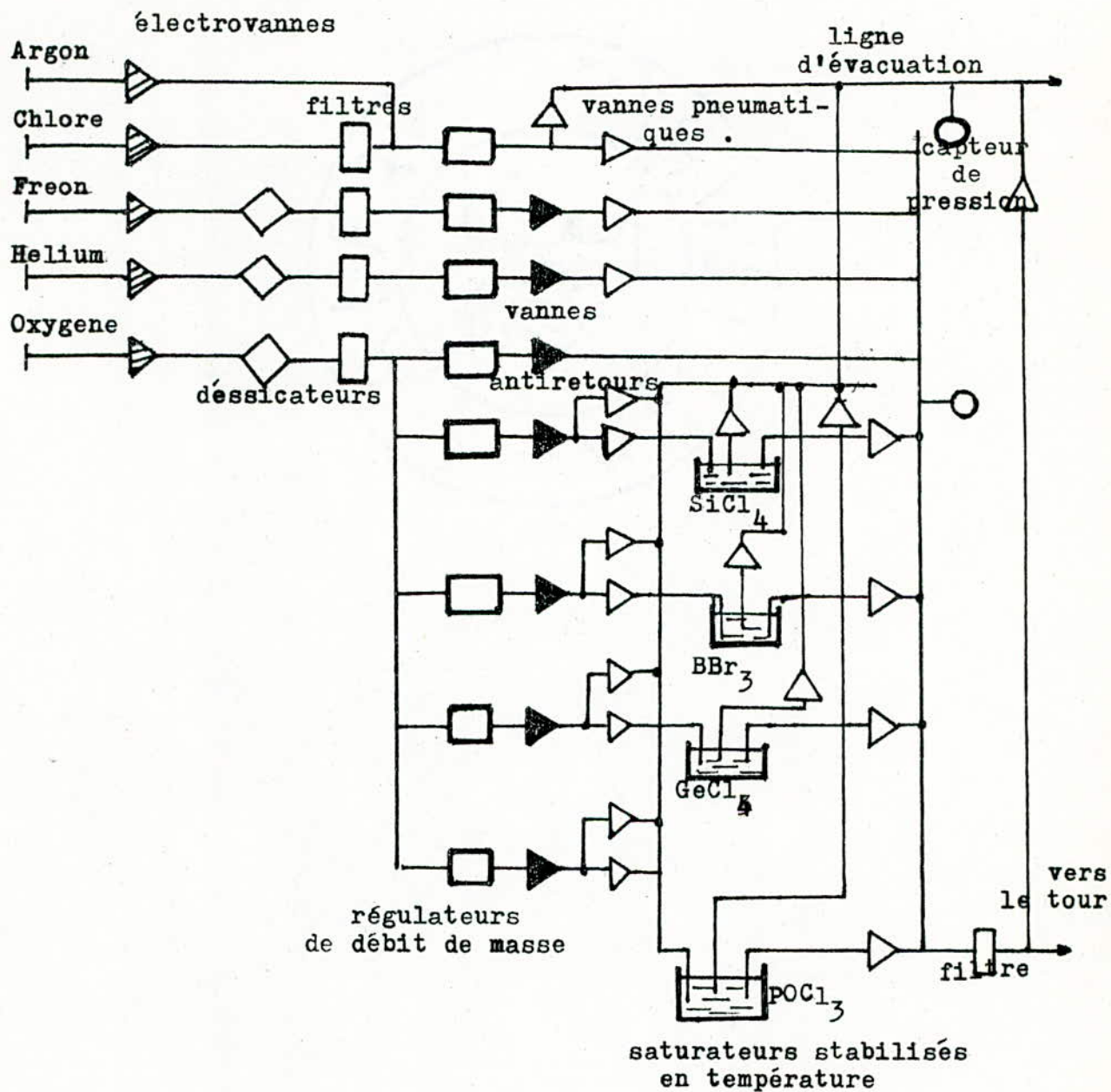
Caracteristiques

- pour les débitmètres de masse : - stabilité de 0.1%
- reproductibilité 0.5%
- pour les sources : - stabilité 0.25%
- reproductibilité 0.5% .

Dimensions

base : 1125mm × 1350mm .

hauteur : 1755 mm .



(39)
schéma de principe d'une armoire de distribution de gaz .

II-I-3- Armoire de contrôle

Cette armoire comprend tous les éléments nécessaires au contrôle du processus de fabrication de la préforme.

L'automatisation du processus est assuré par un programme établi suivant les caractéristiques de la fibre à produire.

Le coeur du système de contrôle est un microprocesseur (pouvant être le motorola 6800) qui définit pour chaque passe du chalumeau :

- la température externe du tube de silice
- la vitesse de translation du chalumeau
- les débits des gaz à injecter
- la fermeture ou l'ouverture des vannes .

Des systèmes d'alarme sont prévus pour prévenir l'opérateur en cas de fonctionnement anormal .

Dimensions

Base : 600mm x 800mm .

Hauteur : 2108 mm .

II-I-4- La tour d'étirage de la préforme

Cette tour comporte :

- un module d'entraînement de la préforme
- " de gainage
- " d'entraînement du cabestan .

La préforme est entraînée à vitesse constante dans un four d'étirage de température avoisinant les 2200°C .

A la sortie du four, un système à rayons laser contrôle le diamètre de la fibre et permet une mesure à 0.2% près .

La fibre est ensuite revêtue en polymères à une température de 100°C . Après un second revêtement, la fibre passe dans un cabestan d'étirage par tensiomètre qui contrôle la tension de la fibre .

Une bobine de réception de 1 m de diamètre permet d'enrouler 3 à 4 Km de fibre qui, après mesure de ses caractéristiques sera prête au câblage .

Dimensions

Il existe plusieurs modèles de tours dont la hauteur varie entre 8 et 14m et dont le contrôle est manuel ou automatique .

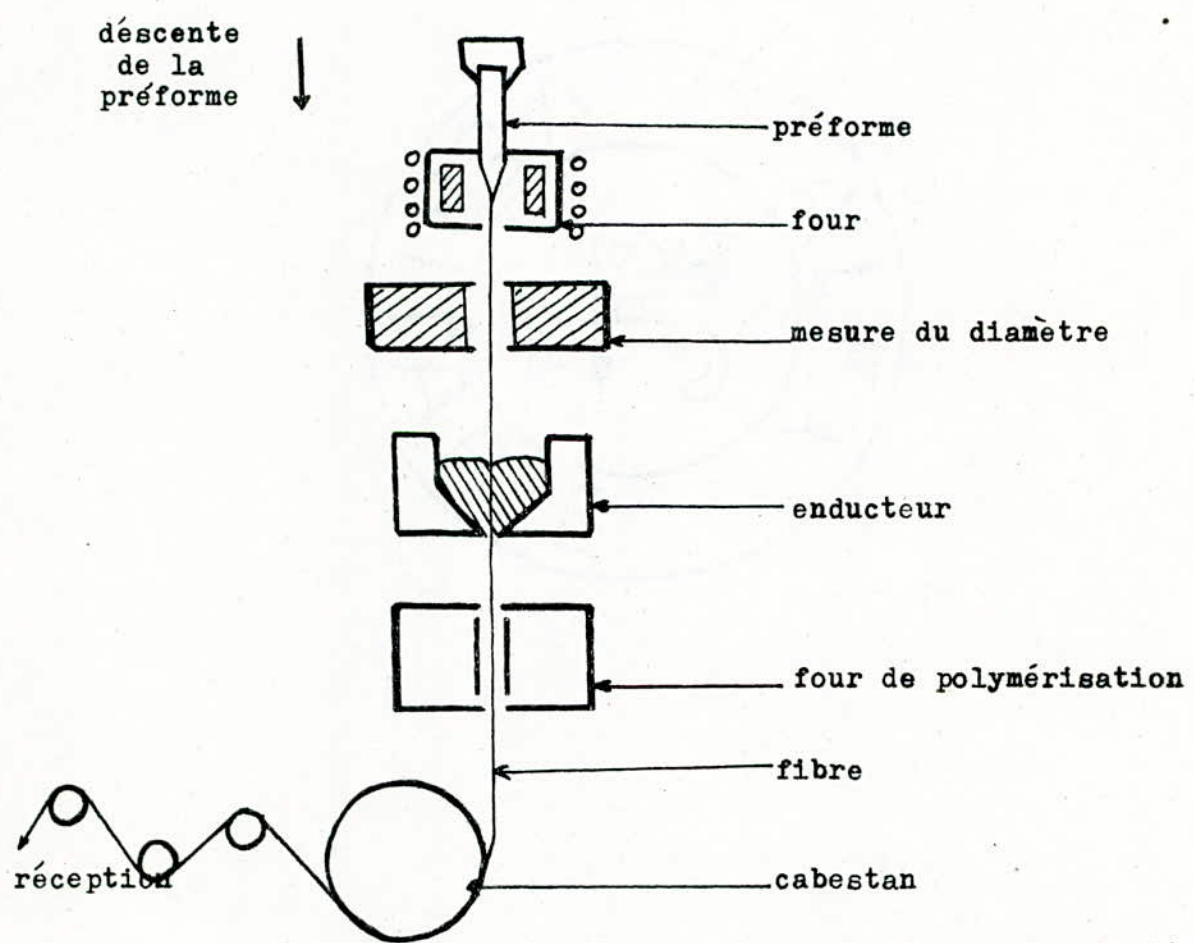


schéma de principe d'une tour d'étirage ⁽²⁾ .

II-2- TETES ET EMETTEURS OPTIQUES

Les emetteurs optiques sont choisis suivant les domaines d'applications :

- pour les applications à forte puissance et bande passante étendue, on utilise les emetteurs à DL.
- pour les applications nécessitant des puissances et bandes passantes relativement faibles, on utilise les emetteurs à DEL .

II-2-1- TETE ET EMETTEUR OPTIQUE A DL

l'élément actif de l'emetteur est une diode laser à semi-conducteur dont la longueur d'onde est déterminée par le matériau de la DL et de caractéristiques :

- surface d'émission : $5 \times 0.2 \mu\text{m}^2$.
- angles " : $40 \times 50^\circ$.

Il est constitué de :

- a- une tête optique, elle-même constituée de :
 - i- la DL : générateur optique
 - ii- une fibre amorce : pour améliorer le couplage laser-fibre.
 - iii- un connecteur optique .
 - iv - un système de contrôle de la puissance optique .
 - v - un élément de régulation de température .
- b- un circuit de protection de la DL .
- c- " de stabilisation de la puissance optique .
- d- " de modulation du courant laser avec contrôle .

CARACTERISTIQUES

- puissance optique en sortie : 3.5 mW .
- " " couplée : 3 mW .
- tension d'alimentation : -8V .
- consommation : 60 mA .
- stabilisation de la puissance: 5% .
- bande passante : I - 1000 MHZ.

II-2-2- EMETTEUR A DEL

Les caractéristiques des têtes optiques à DEL sont resumées dans le tableau suivant :

température paramètres	température de fonctionnement	
	à 25°C	de -25°C à +125°C
λ d'émission (nm)	820 à 860	780 à 890
puissance (typique) (μ W)	160	40
courant de modula- tion (mA)	\pm 100	\pm 100
linéarité	2.5%	3%
temps de montée et de descente pour une variation de courant de 100 à 160mA. (ns)	8	10

CARACTERISTIQUES

- alimentation : 220 V \pm 10% .
- consommation : 10 W .
- température de fonctionnement : -20°C à +70°C .

II-2-3- EXEMPLES D'EMETTEURS OPTIQUES

- ↳ OPT-1C LTE (Fujitsu)
- OPT-4C LTE (")
- 720I SOCAPEX
- TAO 200I LTT (THOMSON)
- TAO 1003 LTT (")
- HP 8154B et HP 8152B .

DIMENSIONS

Coffrets métalliques de 45 x 135 x 260 (en mm) .

Châssis : 135 x 450 x 300 (") .

II-3- CONNECTEURS

Les connecteurs sont spécifiques au type de fibres à utiliser :

- pour les fibres de diamètre de coeur supérieur à 200µm, on peut utiliser:

- la serie 722SMA, connecteurs destinés aux secteurs informatique, vidéo,
 - la serie 723 Norme MIL C38999, pour les applications en environnements sévères.
 - la serie 720I, connecteurs miniaturisés destinés au câblage interne d'équipements .
- pour les fibres à faibles diamètres de coeur (50 à 60µm), on a :
- la serie 724 des connecteurs monovoies destinés au domaine des télécommunications .
 - la serie 725 issue de la 724 .
 - connecteurs multivoies type CDEO-8 .
 - HMS-IO/HP ; connecteur de hautes performances destiné aux tests et instrumentation .

Le montage sur site de ces connecteurs peut se faire entre 3 et 30 mn suivant les cas .

Les pertes introduites sont inférieures à 1dB (0,5dB pour les plus récents).

DIMENSIONS

Dans le cas général, le diamètre d'un connecteur n'exède pas 18mm et sa longueur 60mm .

II-4- MATERIELS DE CLIVAGE DE LA FIBRE OPTIQUE

- 1- un porte-fibre et un élément pour la fracture (diamant) .
- 2- un microscope optique : utilisé pour visualiser les défauts géométriques de la fibre en :

- vue de la section en transmission
- " " en reflexion
- vue du profil en transmission .

III- METHODES DE MESURES DES CARACTERISTIQUES DE LA
FIBRE OPTIQUE

III-I- Mesure de la distribution de l'indice de refraction

III-I-I- Sur préforme

Le montage utilisé est donné sur la figure-I-. Il s'agit d'analyser les rayons déviés par la préforme plongée dans un liquide d'indice de refraction n_L égal à celui de la gaine afin d'éviter toute refraction . Le faisceau lumineux est émis par un laser He-Ne, puis élargi et focalisé sur la préforme par un système optique: miroir tournant-lentille L_1 . Les rayons déviés sont collectés par la lentille L_2 , puis analysés par un senseur de position et traités par un système de traitement numérique.

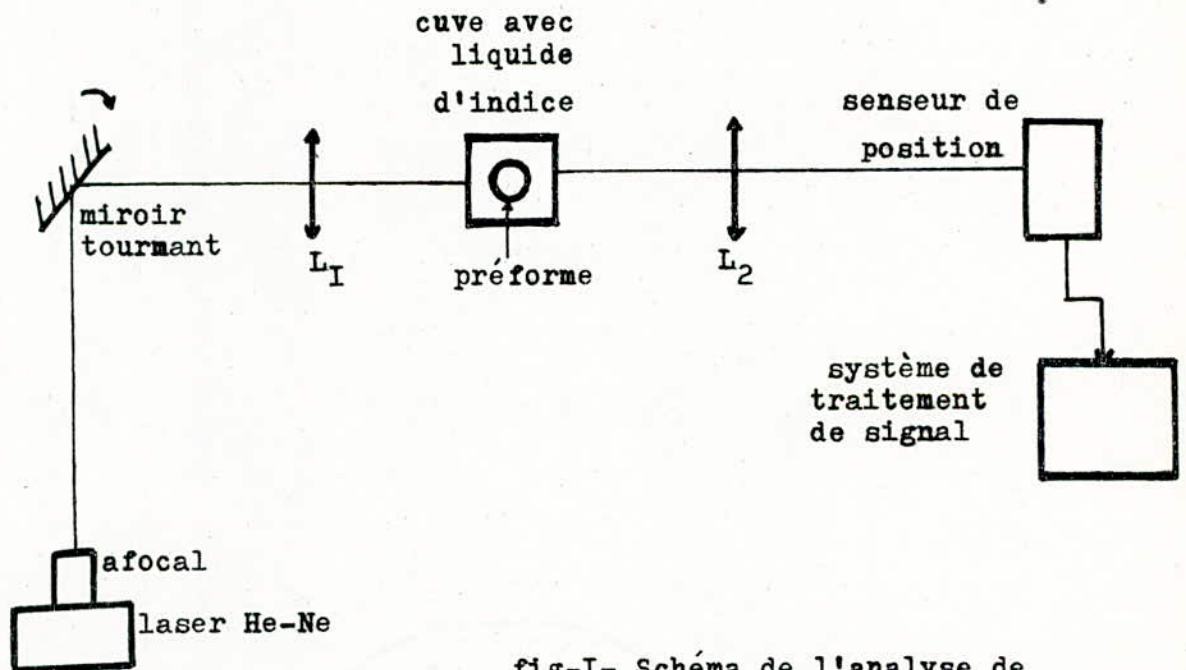


fig-I- Schéma de l'analyse de préforme par la méthode de déviation .

La deviation du faisceau est mesurée directement par :

$$\psi(t) = -(t-y(t))/L$$

$\psi(t), t, L$ correspondent a la notation de la figure-2- .

Le profil d'indice est calculé par :

$$n(r)-n_2 = (n_L/\pi L) \int_r^\infty ((t-y(t))/\sqrt{t^2-r^2}) dt .$$

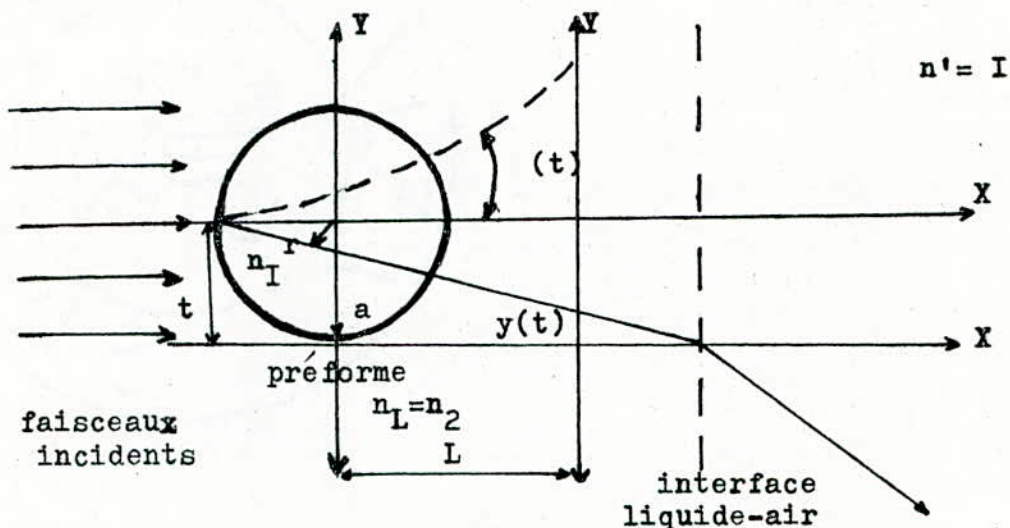


fig-2- Schéma de la deviation d'un rayon par le coeur de la préforme .

III-1-2- Sur la fibre

La distribution de l'indice de réfraction est un paramètre important pour la prediction des performances de la fibre optique.

L'emploi de la méthode du champ proche réfracté RNF (Refracted Near Field) (voir principe à l'ANNEXE-1-), permet d'obtenir directement la distribution de l'indice de réfraction sur une table traçante.

Le schéma du montage utilisé est donné sur la fig-3- .

MATERIELS UTILISES

- une source lumineuse : Laser He-Ne de puissance 5mW et de longueur d'onde 0.6328um .
- un objectif de microscope de grandissement $\times 32$; focalise le faisceau laser élargi sur la fibre .

- une cuve d'indice de réfraction peu différent de celui de la gaine, est utilisée pour piéger les rayons réfractés.
- un cube séparateur et un objectif ($\times 32$) sont utilisés pour former l'image de la section de la fibre.
- le déplacement de la cuve avec la fibre est assuré par un moteur pas à pas qui permet un déplacement de $1\mu\text{m}$ devant le point de focalisation.
- un disque opaque permet le blocage des modes de fuite.
- les rayons réfractés sont concentrés sur le photodétecteur grâce à un "condenseur" de lumière.
- une détection synchrone permet l'obtention de meilleurs résultats.
- une table traçante permet une visualisation directe de la distribution de l'indice de réfraction.

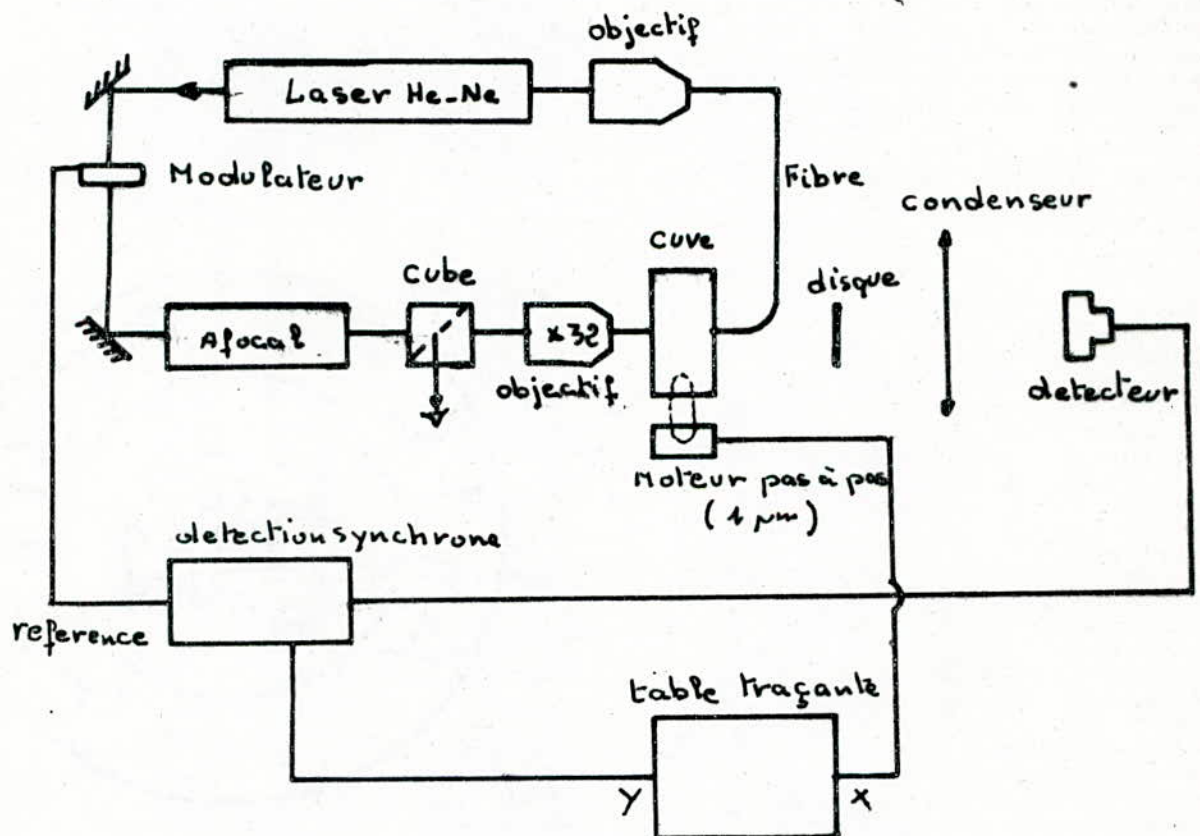


fig-3- Schema du RNF .

III-2- MESURE DU DIAMETRE DE LA FIBRE PAR LA METHODE DE PROJECTION DE L'IMAGE DE LA FIBRE(SHADOW METHOD).

Le principe de la méthode est basé sur le balayage du faisceau lumineux issu d'un dispositif LASER He-Ne sur toute la longueur de la fibre à vitesse constante. La mesure se fait dans un intervalle de temps, pendant lequel la fibre intercepte le faisceau et projette une ombre sur le photodétecteur .
Le schéma du montage est donné à la figure-4- .

Le faisceau émis par le laser est collimaté par deux lentilles (G_1 et G_2) et réfracté par deux miroirs (M_1 et M_2). Le second miroir M_2 est relié à un galvanomètre qui le met en rotation à vitesse angulaire constante . Le faisceau lumineux est ensuite focalisé sur le plan horizontal de la fibre par la lentille G_3 et balayé le long de la fibre par le miroir oscillateur et détecté par le photodétecteur .

La vitesse dS/dt de l'ombre de la fibre, ainsi créée par le photodétecteur, est directement proportionnelle à la vitesse du miroir tournant $d\varphi/dt$, telle que

$$dS/dt = l \cdot d\varphi/dt .$$

où l représente la distance séparant le miroir M_2 du photodétecteur .

Le diamètre de la fibre d_0 est donné par :

$$d_0 = W_e \cdot dS/dt ,$$

avec W_e la largeur de l'impulsion électrique délivrée par le générateur d'impulsions .

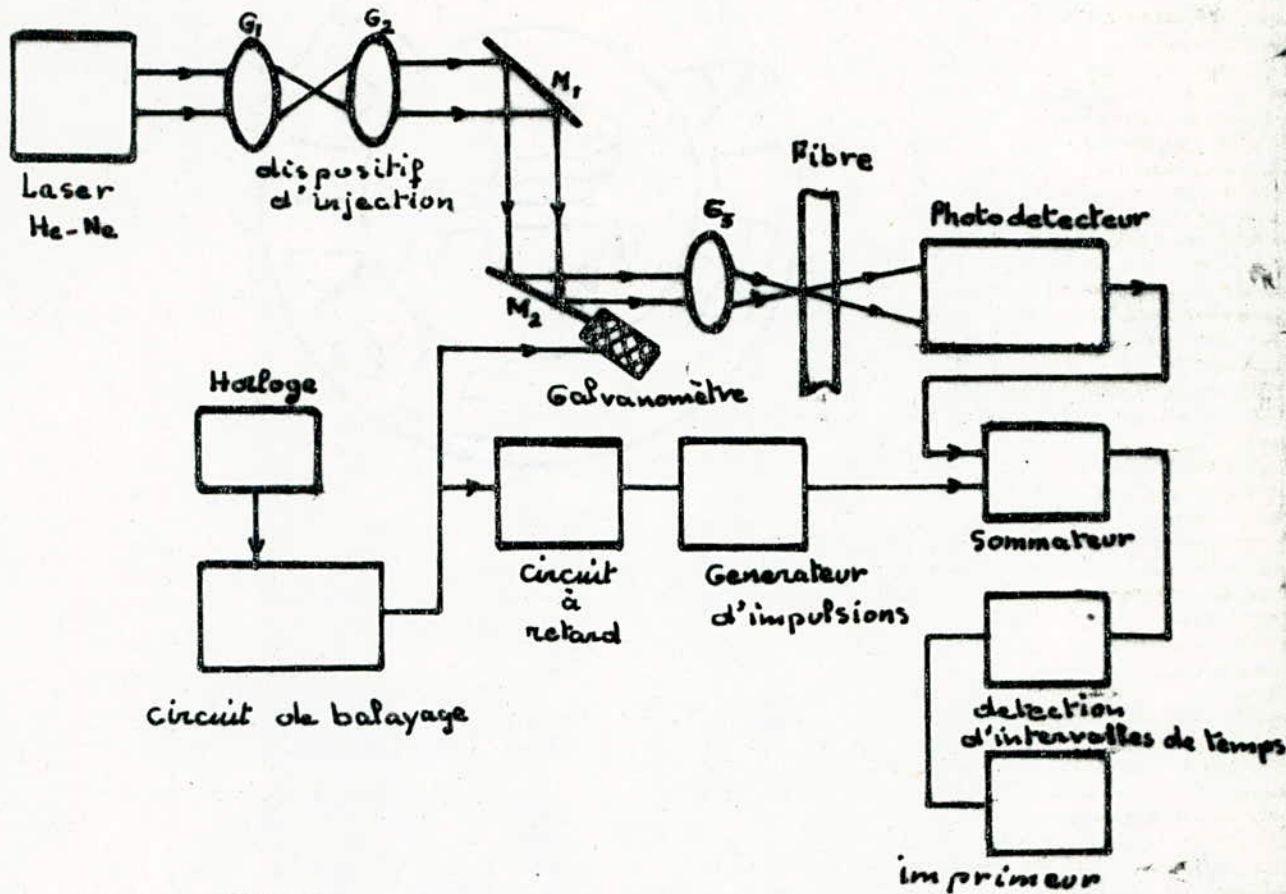


fig-4- Schéma du montage de la mesure du diamètre de la fibre par la méthode "Shadow" .

III-3- MESURE DE LA DISPERSION INTERMODALE PAR LA METHODE DE L'EXCITATION SELECTIVE DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL

La dispersion intermodale est donnée par la variation du temps de groupe ΔZ tel que :

$$\Delta \varphi = 2 \pi f_0 \Delta Z, \text{ avec } f_0 \text{ la fréquence}$$

de modulation .

Cette méthode permet de mesurer les variations de la phase du signal détecté.

Le schéma du montage est donné par la figure-5- .

La source utilisée est une diode laser GaAlAs émettant à $0.85 \mu\text{m}$ ou une diode laser InGaAsP émettant à $1.267 \mu\text{m}$.

Pour améliorer les conditions d'injection, une fibre unimodale est insérée entre la source et le système de conjugaison des deux fibres, excitatrice et testée (objectifs O_1 et O_2).

Le signal de sortie de la fibre multimode sous-test est détecté par une photodiode à avalanche (au Si pour $\lambda = 0.84\mu\text{m}$ et au Ga pour $\lambda = 1.27\mu\text{m}$).

Le déplacement de la fibre par rapport au spot d'excitation se fait par pas de $1\mu\text{m}$, assuré par un moteur pas à pas commandé par un ordinateur.

La position du spot excitateur ainsi que la phase d'entrée de la fibre sont visualisés sur un tube IR par l'intermédiaire du cube de LUMMER.

La mesure de la variation de phase en fonction de la position radiale d'excitation de la fibre est assurée par un voltmètre vectoriel qui réalise la multiplication de deux signaux :

- le signal de sortie issu du photodétecteur;

$$V_S = V_M \cos(\omega_0 t + \varphi) + V_0$$

- le signal de référence :

$$V_R = V_{R_0} \cos((\omega_0 + \omega_I)t)$$

avec $\omega_I = 2\pi f_I$, la fréquence porteuse du signal et V_0 , une composante continue éliminée par un filtre.

$$V = V_S \cdot V_R = (V_M V_{R_0} / 2) (\cos((2\omega_0 + \omega_I)t + \varphi) + \cos(\omega_I t + \varphi)).$$

Par un filtrage approprié, on exploite la composante $(V_M V_{R_0} / 2) \cos(\omega_I t + \varphi)$, nous informant sur l'amplitude et la phase du signal détecté.

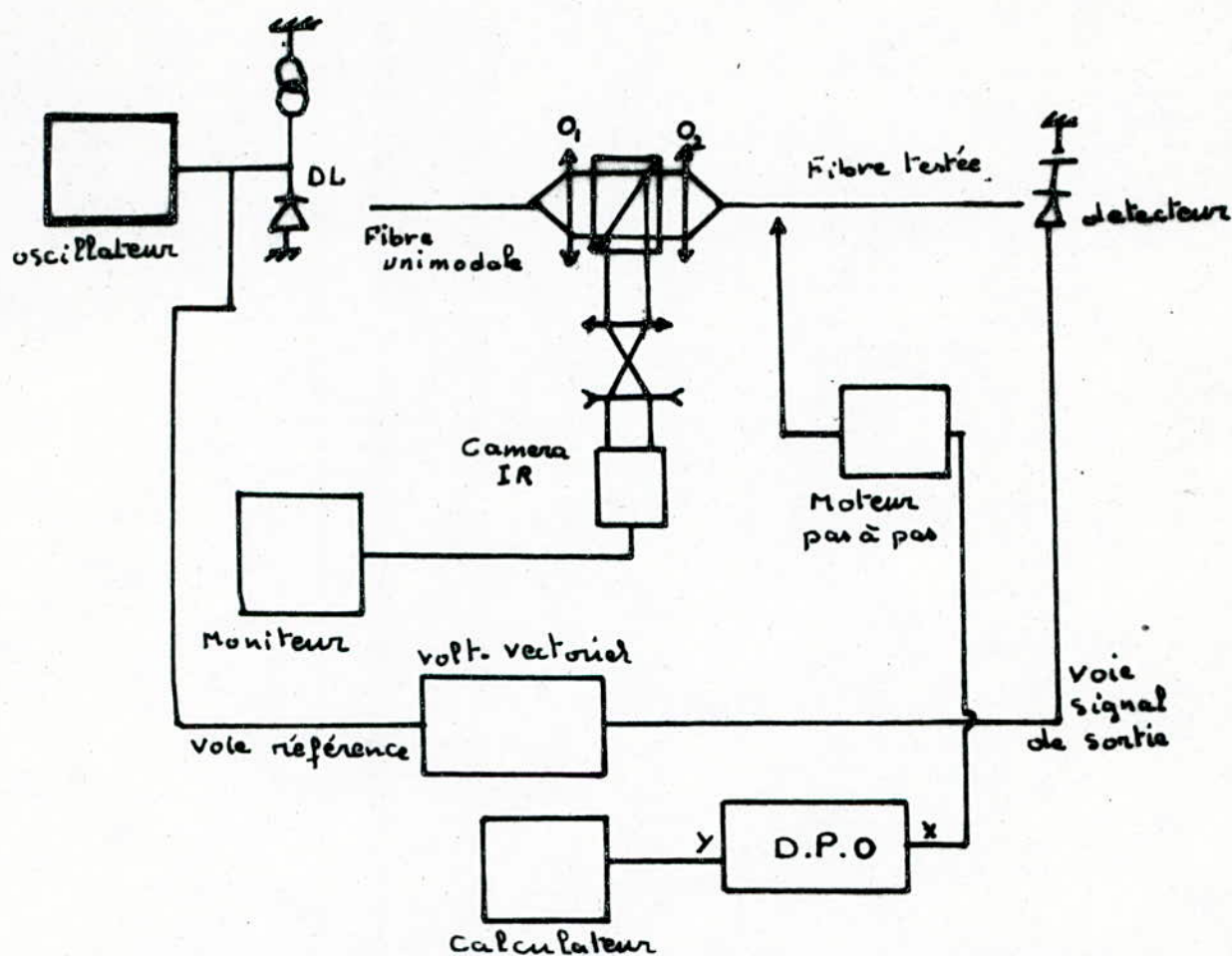


fig-5- Schéma de montage de mesure de la variation du temps de groupe via la variation de phase .

III-4- CARACTERISATION DES FIBRES OPTIQUES PAR RETRODIFFUSION

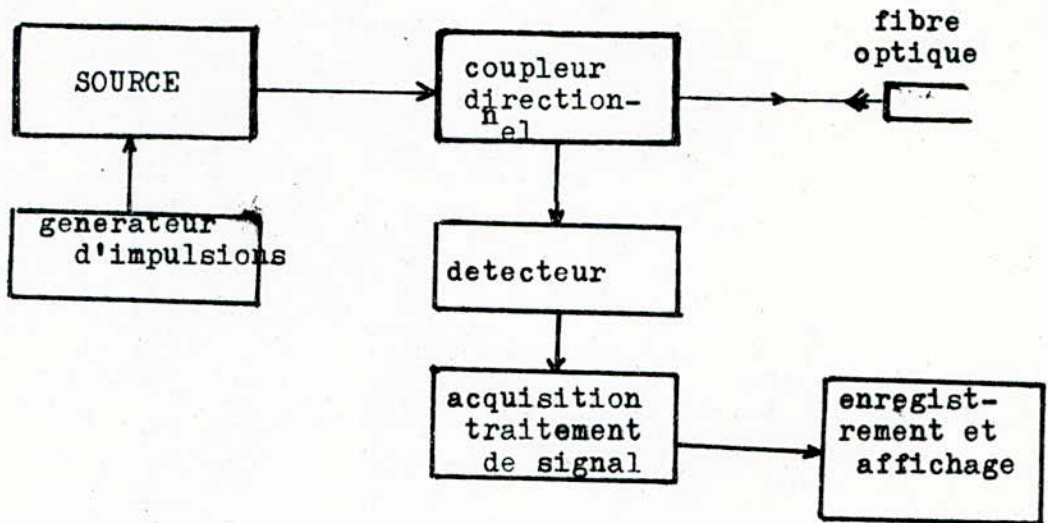
Objectifs de la méthode de rétrodiffusion

- mesure de l'atténuation
- détection d'une cassure
- étude des connexions

Principe

L'analyse de la lumière rétrodiffusée consiste à injecter une impulsion lumineuse dans une fibre et à observer l'intensité optique parcourant la fibre en sens inverse du sens de la propagation de l'impulsion .

MONTAGE GENERAL



Matériels utilisés

- fibre optique à tester
- sources optiques
- détecteurs de lumière
- un système optique
- circuits électroniques pour:
 - la commande de l'émission
 - " de la température
 - la détection .
- un système de traitement du signal .

Utilisation du matériels

La méthode de retrodiffusion pose des problèmes de reflexion sur la face d'entrée de la fibre, ce qui peut perturber les mesures. Cette reflexion peut être supprimée par le choix de composants actifs, de la largeur de l'impulsion lumineuse injectée et par le type de traitement du signal utilisé. Plusieurs montages sont adoptés :

- coupleur directif à fibre optique
- dispositif à liquide adaptateur d'indice
- circuit de commande électrique du détecteur
- dispositif à polarisation .

Le dispositif qui réalise le mieux, le compromis facilité d'emploi/performances est le système optique donc, on l'adoptera pour notre banc de mesures.

Le schéma général du système est présenté comme suit :

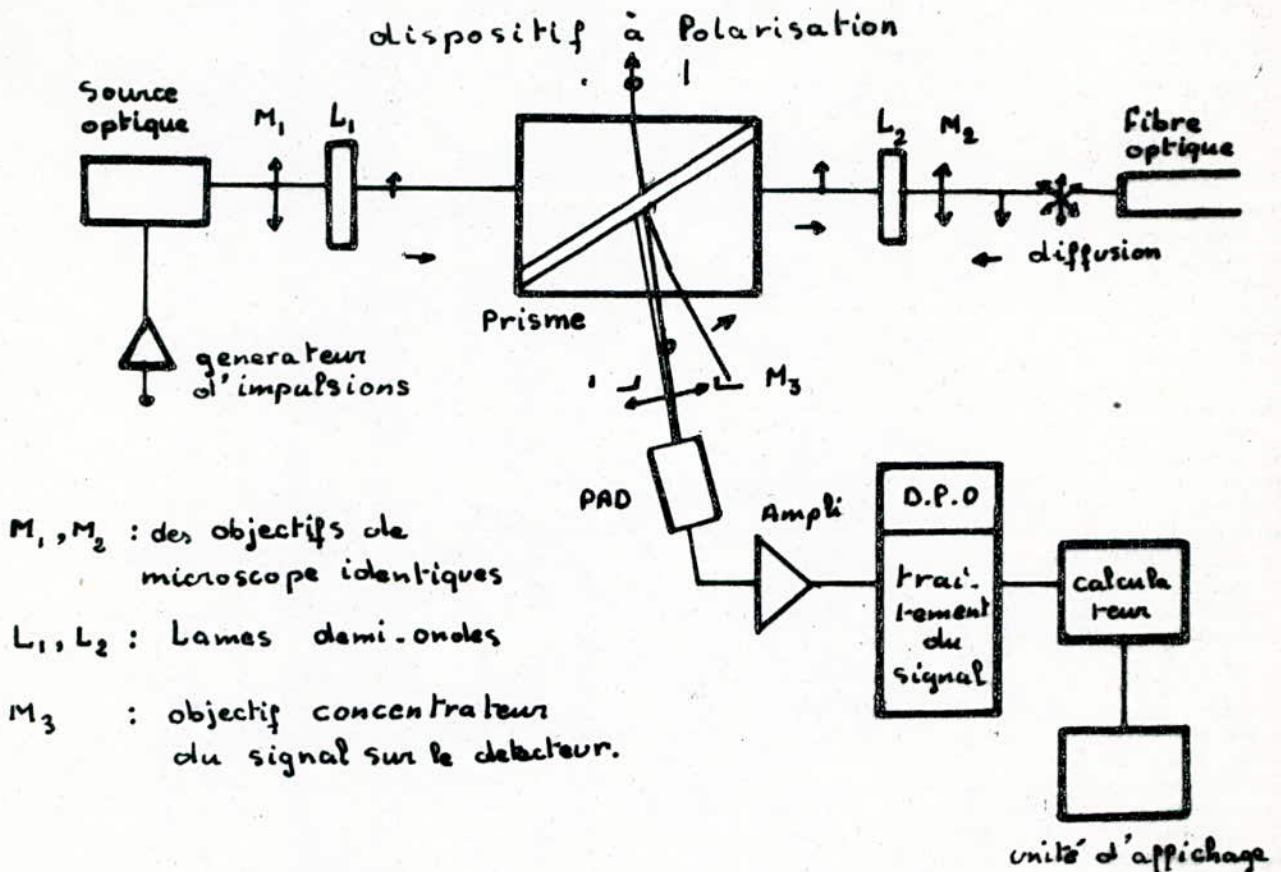


fig-6- schéma général du banc de mesure.

Composants optoelectroniques

Source optique : La source utilisée est la DL GaAlAs RCA C300I2 dont les caractéristiques sont :

- longueur d'onde d'émission : $0,840 \pm 0,010 \mu\text{m}$.
- courant de seuil : 10A .
- puissance optique émise : 3W crête .

Détecteur : est une photodiode à avalanche SiRCAC 309I7E. Ses caractéristiques sont :

- rendement quantique : 77% à 830 nm .
- gain interne : 150 (varie en fonction de la température)
- réponse : 77A/W .
- sensibilité : $4 \cdot 10^5$ V/W à 22°C .
- bande passante : 50 MHz .

La photodiode est associée à un préamplificateur hybride.

Circuits électroniques (ANNEXE IV)

Les fonctions électroniques sont assurées par trois circuits de :

- commande de l'émission
- contrôle de température
- détection

Commande de l'émission

Le laser est commandé par un courant de 25A par un oscillateur(LM555) fonctionnant à la fréquence de recurrence de 800HZ et declanchant deux monostables .

Le 74LS/23 fournit une impulsion de synchronisation à l'oscilloscope, et le deuxième monostable(74LS123) retarde l'impulsion fournie au circuit de commande de la DL pour centrer la courbe de retrodiffusion sur l'écran de l'oscilloscope .

Détention

Le circuit de détection possède deux sorties possibles pour le signal ; l'une sur l'amplificateur μ A733 avec une bande passante de 30MHZ. L'autre sur un amplificateur de gain 10 permettant l'obtention d'une grande dynamique(BB3554), de bande passante 6MHZ .

Contrôle de température

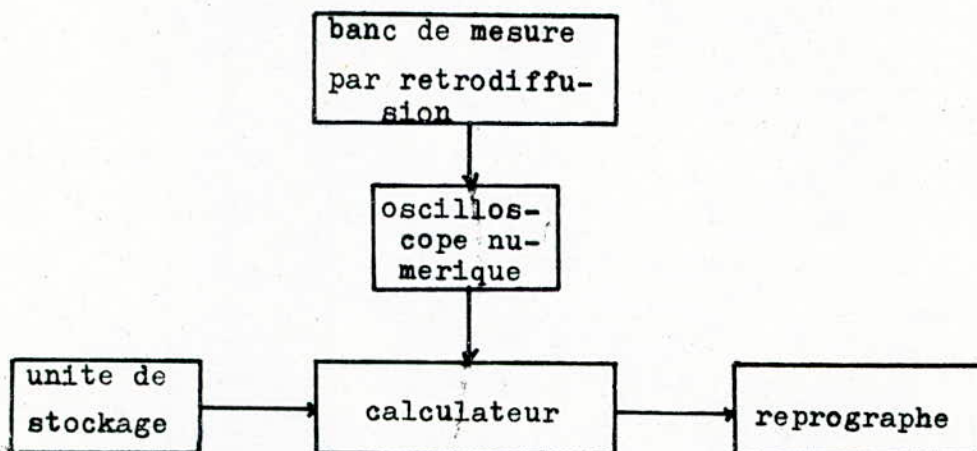
La température est stabilisée à l'aide d'un thermoélément à effet Peltier dont le courant est commandé par la différence de tensions entre la tension fournie par la sonde de température (LMI35) et la tension de référence .

Le système optique

Ce dispositif assure la conjugaison entre la source lumineuse et la face d'entrée de la fibre, et la séparation entre l'onde incidente et l'onde retrodiffusée. La polarisation est réalisée par le prisme de Glan .

Système de traitement du signal

Pour la caractérisation des fibres optiques, le système utilisé est schématisé comme suit :



On distingue principalement:

- une unité d'acquisition de signaux
- un calculateur
- une unité de stockage (disques souples)
- un terminal graphique .

Le calcul et le contrôle du système sont assurés par un logiciel moniteur-interpreteur BASIC.

Les opérations réalisées par ce système pour obtenir l'atténuation d'une fibre sont :

- Acquisition du signal d'entrée
- Moyennage " "
- calcul du logarithme du signal moyenné
- calcul de la pente par la méthode des moindres carrés.
- Affichage du résultat .

L'acquisition des signaux est effectuée par un oscilloscope numérique (DPO) permettant la conversion du signal visualisé sur l'écran en une succession de 512 valeurs numériques. Les signaux sont numérisés par une technique d'échantillonnage aléatoire. Le signal mémorisé est stocké dans une mémoire locale, visualisé sur l'écran et transmis ensuite au ordinateur.

Le ordinateur pouvant être utilisé dans notre cas est soit :

- un micro-ordinateur OLIVETTI
- ou le mini-ordinateur VAX 750 avec une visue et la possibilité d'utiliser la table traçante .

III-5- Mesure du défaut de perpendicularité entre l'axe de la fibre et sa face de sortie

On utilise une méthode de mesure interférométrique consistant à créer des interférences entre la face de la fibre et un plan de référence. Le schéma du montage est représenté à la fig-7-.

L'angle défaut de perpendicularité θ est proportionnel au nombre de franges visualisées sur un dépoli et est donné par :

$$\theta = \lambda / 2i$$

λ étant la longueur d'onde de la source (laser He-Ne) et i , interfrange enregistrée par un appareil photo .

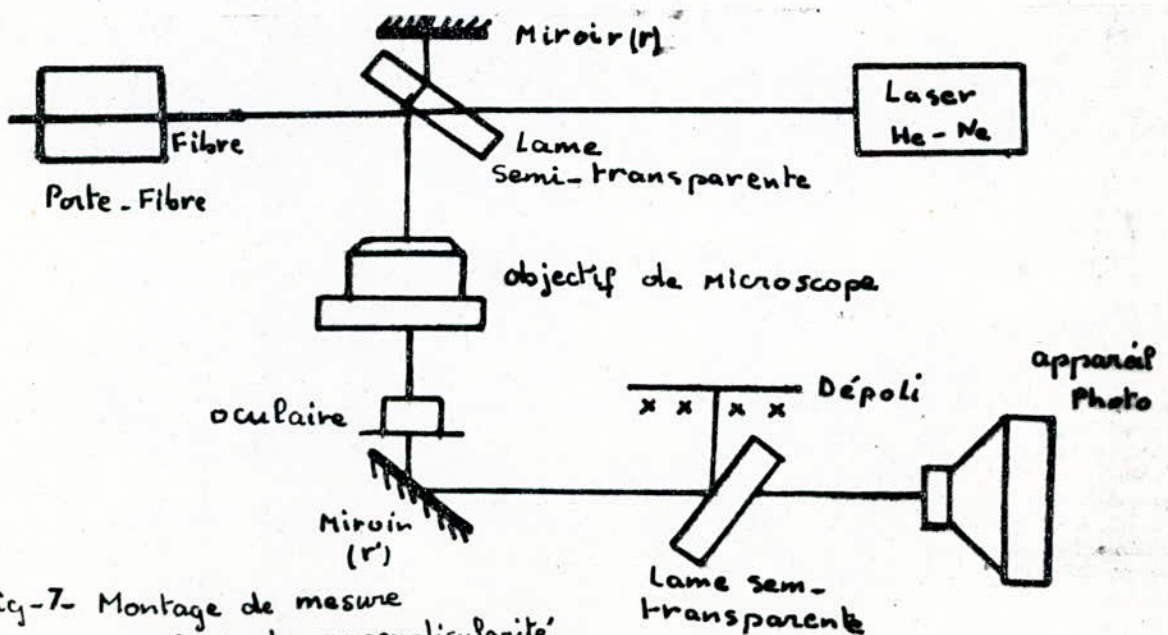


fig-7- Montage de mesure du défaut de perpendicularité .

C.O.N.C.L.U.S.I.O.N

Les avantages des fibres optiques ont ouvert un grand domaine d'application pour les câbles optiques et pourront même représenter la solution la plus économique et la plus souple et évolutive pour la plupart des jonctions et liaisons à grandes distances. Cependant, chaque administration des télécommunications impose ses propres spécifications. Ce qui rend extrêmement difficile, sur le plan économique, la production de câbles pour plusieurs administrations et ce qui exige la production locale de câbles pour chaque administration.

Dans le cas propre de l'Algérie, plusieurs points peuvent aider à l'industrialisation des câbles optiques :

- Inscription du projet dans la stratégie nationale du développement.
- Abondance de la matière première .
- Déséquilibre existant entre l'offre et la demande en matières de câbles de télécommunication .
- Projet de réalisation de laboratoires de recherches en opto-electronique pour l'étude et la réalisation de diodes lasers à semi-conducteurs .
- Projet de réalisation d'unités de fabrication et traitement de verres .
- Projet d'extension de la cablerie téléphonique ENICAB .

Mais, il ne suffira pas d'exploiter les avantages de la fibre optique, il faudra également maîtriser la technologie de sa production dans le pays, ce qui ne peut être réalisé sans la participation de toutes les unités concernées dans un cadre bien déterminé et organisé .

.....

ANNEXE-I-

UTILISATION DE LA METHODE DES MOMENTS

Soit $P(t,Z)$ la distribution en puissance du signal optique se propageant dans la fibre; son moment d'ordre n est donné par :

$$M_n(Z) = \int_0^{\infty} P(t,Z) t^n dt \quad (1)$$

Z étant la longueur de la fibre parcourue par une impulsion donnée .

Pour une impulsion dont la fenêtre temporelle est définie par une distribution Dirac δ (par exemple), la réponse impulsionnelle de composante spectrale λ est donnée par :

$$P(t,Z,\lambda) = \sum_m P_m(\lambda,Z) \delta(t - \tau_m(\lambda)) \quad (2)$$

$\tau_m(\lambda)$ étant le temps de groupe par unité de longueur du mode considéré et $P_m(\lambda,Z)$, la puissance optique véhiculée par le mode (m), reliée aux conditions initiales d'excitation par :

$$P_m(\lambda,Z) = P_m(\lambda,0) e^{-\alpha_m(\lambda)Z} \quad (3)$$

où $\alpha_m(\lambda)$ représente le coefficient d'atténuation linéique moyen de chaque mode .

Le signal recueilli à la sortie est proportionnel à :

$$P(t,Z) = \int_0^{\infty} P(t,Z,\lambda) d\lambda \quad (4)$$

En utilisant les relations (1), (2) et (4), le moment de la puissance $P(t,Z)$ sera donnée par :

$$M_n(Z) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \sum_m P_m(\lambda,Z) \delta(t - \tau_m(\lambda)) t^n d\lambda . dt$$

Soit,
$$M_n(Z) = Z^n \int_0^{\infty} \sum_m P_m(\lambda,Z) \tau_m^n(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$\tau_m^n(\lambda)$ est donné par un développement limité en série de Taylor au voisinage de la longueur d'onde centrale λ_0 , soit, en négligeant les pertes différentielles et conservant la distribution spatiale pour les composantes λ et λ_0 ;

$$M_n(Z) = Z^n \sum_m P(Z).A \quad (*)$$

$$A = Z_m^n + (\sqrt{s}^2/2\lambda_0^2)(nZ_m^{n-1}(\lambda_0)\lambda_0^2 Z_m''(\lambda_0) + m(n-1)Z_m^{n-2}(\lambda_0))(Z_m'(\lambda_0)\lambda_0)^2 .$$

avec $\sqrt{s}^2 = \int_0^\infty (\lambda - \lambda_0)^2 S(\lambda) d\lambda$, où \sqrt{s} représente l'écart-type et $S(\lambda)$ une distribution quelconque de λ .

Pour $n=0$, on définit l'énergie contenue dans l'impulsion, soit;

$$M_0(Z) = \int_0^\infty P(t,Z) dt = \sum_m P_m(Z) .$$

Pour $n=1$, on définit le temps de propagation moyen de l'impulsion ;

$$U(Z) = M_1(Z)/M_0(Z) .$$

(*) les termes du 3^{eme} ordre sont négligés .

ANNEXE - II-

PRINCIPE DE LA METHODE DU R.N.F

Cette méthode est basée sur le fait que la lumière non guidée issue d'un faisceau monochromatique d'ouverture numérique supérieure à celle de la fibre, focalisé sur une section de fibre, est directement liée à l'indice de réfraction local $n(r)$. Ceci permet d'utiliser une cuve pleine d'un liquide d'indice de réfraction légèrement supérieure à celui de la gaine pour piéger les rayons non guidés .

La fibre à tester, une fois correctement cassée, est placée dans la cuve . Le trajet d'un rayon traversant l'ensemble des trois milieux, coeur-gaine-liquide est donné sur la figure-A-.

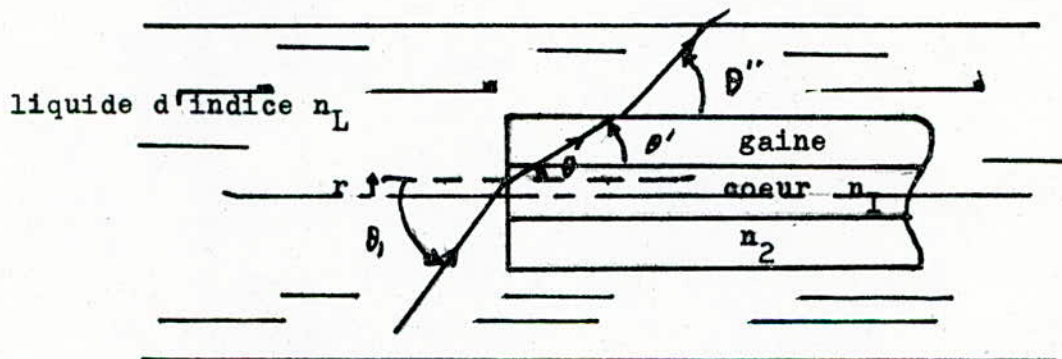


fig-A- Schéma d'un rayon réfracté par une fibre à deux milieux dans un liquide d'indice n_L .

D'après les lois de Snell-Descartes de l'optique géométrique, on a :

$$n(r)\cos\theta = n_2\cos\theta' = n_L\cos\theta'' \quad (1)$$

Au point d'incidence, on a :

$$n(r)\sin\theta = n_L\sin\theta_I \quad (2)$$

$$n^2(r)\cos^2\theta = n_L^2\cos^2\theta'' \quad (3)$$

$$n^2(r) \sin^2 \theta = n_L^2 \sin^2 \theta' \quad (4)$$

$$(3) + (4) \text{ donne : } n^2(r) = n_L^2 (\sin^2 \theta_I + \cos^2 \theta'') \\ = n_L^2 + n_L^2 (\sin^2 \theta_I - \sin^2 \theta'') \quad (5)$$

$$\text{d'où : } n_L^2 \sin^2 \theta_I = n^2(r) - n_L^2 \sin^2 \theta''$$

$$\text{et donc } n_L \sin \theta_I = \sqrt{n^2(r) - n_L^2 - n_L^2 \sin^2 \theta''} \quad (6)$$

Pour θ_I supérieur à un angle limite θ_{Imin} , les rayons sortant de la fibre sont totalement réfractés (fig-B-).

Pour une intensité I_0 , uniformément répartie (angulairement), la puissance détectée est donnée par :

$$P(r) = 2 \pi I_0 (\cos \theta_{Imin} - \cos \theta_{Imax}) ,$$

θ_{Imin} et θ_{Imax} sont les angles limites de réfraction .

Avec la relation (6), la puissance devient :

$$P(r) = 2 \pi I_0 (\cos \theta_{Imin}'' - \cos \theta_{Imax}'' - (n(r) - n_L) / n_L \cos \theta_{Imin}'')$$

Ce qui donne :

$$n(r) - n_L = n_L \cos \theta_{Imin}'' (\cos \theta_{Imin}'' - \cos \theta_{Imax}'') ((P_L - n_L) / P_L) .$$

avec $P_L = 2 \pi I_0 (\cos \theta_{Imin}'' - \cos \theta_{Imax}'')$; puissance maximale détectée .

La variation de la puissance enregistrée permet de donner directement la variation de l'indice de réfraction en fonction de la position radiale du spot .

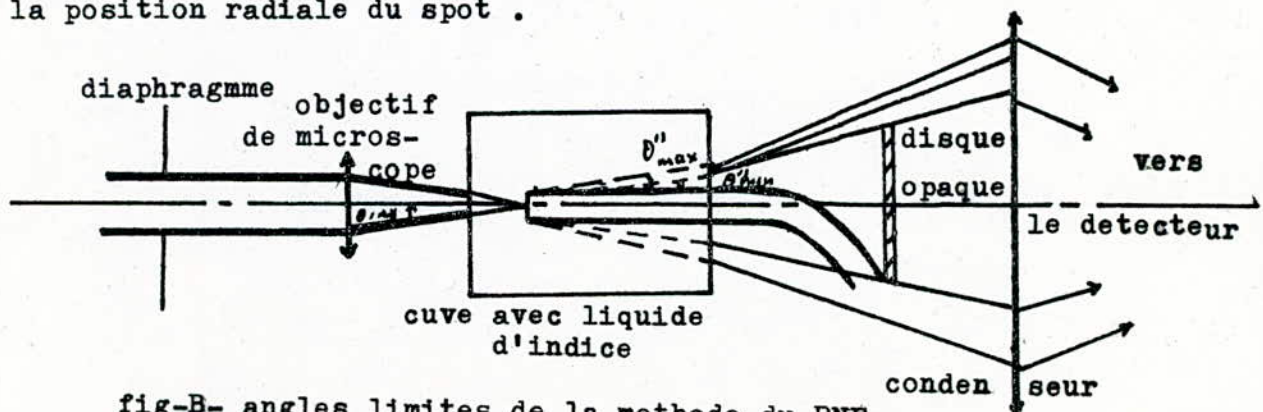


fig-B- angles limites de la methode du RNF.

ANNEXE-III-

PRINCIPE DE LA METHODE DE RETRODIFFUSION

On injecte une impulsion lumineuse dans la fibre et on observe le signal retrodiffusé en fonction du temps. A une distance Z de l'entrée de la fibre, l'énergie de l'impulsion est telle que :

$$E(Z) = E_0 \exp\left(-\int_0^Z \alpha'(l) dl\right), \text{ où } (-\alpha'(l) \text{ représente}$$

l'atténuation locale à l'abscisse l pour le trajet aller et E_0 l'énergie au temps $t=0$ et $Z=0$.

Pour $Z \in (Z, Z+dZ)$, une partie de l'énergie $E(Z)$ est diffusée dans toutes les directions tel que :

$$dE_d = \alpha_d(Z) E_0 \exp\left(-\int_0^Z \alpha'(l) dl\right)$$

α_d étant le coefficient de l'atténuation par diffusion. Seule une fraction $S(Z)$ de cette énergie est diffusée vers l'arrière dans l'angle d'acceptance de la fibre, tel que :

$$S(Z) = \frac{1}{4} \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right)$$

L'impulsion lumineuse subit une nouvelle atténuation $(-\int_0^Z \alpha''(l) dl)$ lors du retour vers l'entrée de la fibre.

L'énergie due à la diffusion à l'entrée de la fibre est donnée par :

$$dE = S(Z) \alpha_d(Z) E_0 \exp\left(-\int_0^Z \alpha'(l) dl - \int_0^Z \alpha''(l) dl\right) dZ$$

La puissance détectée à l'entrée de la fibre est :

$$P(t) = dE(t)/dt = \frac{1}{2} P_0 \zeta S(Z(t)) \alpha_d(Z(t)) v_g \exp\left(-\int_0^{Z(t)} (\alpha'(l) + \alpha''(l)) dl\right)$$

avec $\zeta = \frac{1}{2} v_g t$ où, v_g représente la vitesse de groupe et,

P_0 est telle que $E_0 = P_0 T$, P_0 étant la puissance crête de l'impulsion injectée et T sa largeur temporelle.

Le signal rétrodiffusé $P(Z)$ est mesuré expérimentalement et la détermination de l'atténuation ($\alpha'(Z) + \alpha''(Z)$) se fait par calcul différentiel si la quantité $S(Z)\alpha_d(Z)$ ne varie pas avec Z . Dans le cas contraire, la détermination du coefficient d'atténuation se fait par mesure par les deux extrémités de la fibre.

Pour la détermination d'une cassure ou d'une connexion, on exploite la caractérisation de la discontinuité par les deux paramètres de transmission \vec{T}_c et \overleftarrow{T}_c correspondants à chaque sens de propagation.

Leurs valeurs en décibels sont données par :

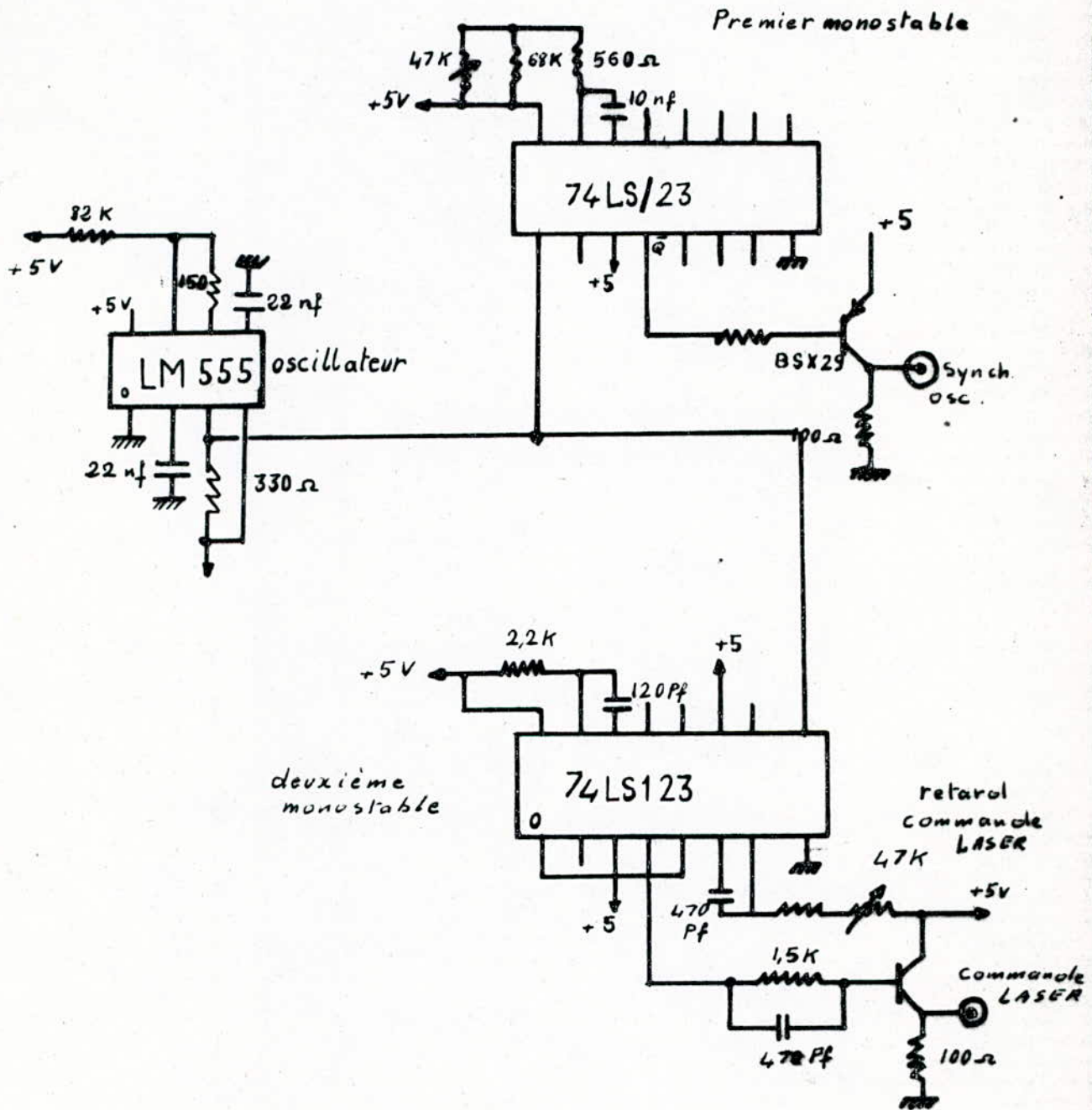
$$\begin{cases} \vec{\alpha}_c = -10 \log_{10} \vec{T}_c \\ \overleftarrow{\alpha}_c = -10 \log_{10} \overleftarrow{T}_c \end{cases} .$$

La discontinuité introduite par la connexion de deux fibres (1) et (2) est caractérisée par un signal rétrodiffusé juste avant et juste après la connexion, soit P_1 et P_2 tel que :

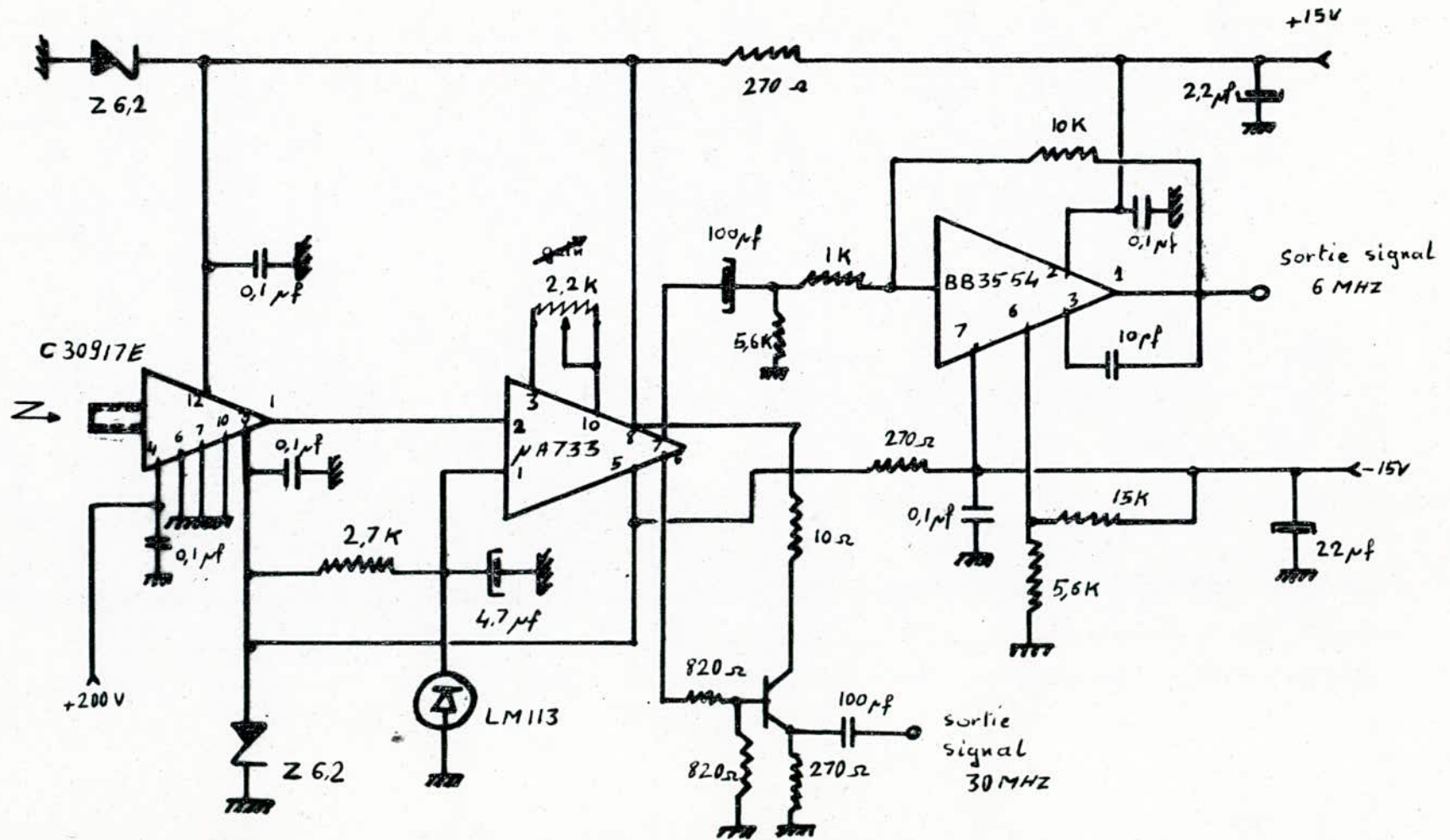
$P_1/P_2 = (S_{1d1} \alpha_{d1}) / (S_{2d2} \alpha_{d2} \cdot \vec{T}_c \overleftarrow{T}_c)$; exprimés en décibels, on aura :

$$10 \log_{10} (P_1/P_2) = 10 \log_{10} (S_{1d1} \alpha_{d1} / S_{2d2} \alpha_{d2}) + (\vec{\alpha}_c + \overleftarrow{\alpha}_c) .$$

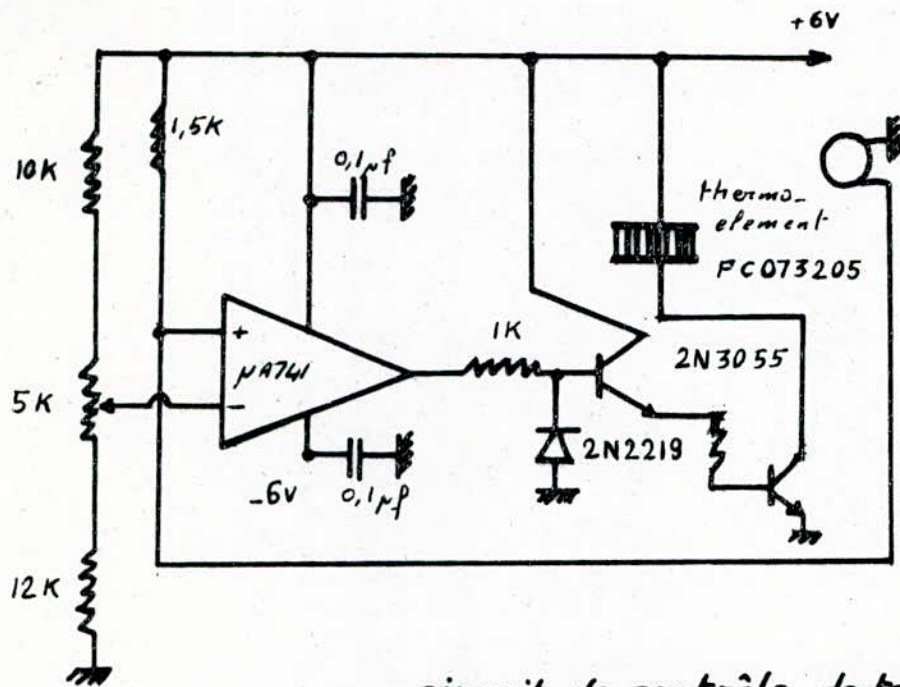
ANNEXE - II -



circuit de commande de l'émission



circuit de detection



circuit de contrôle de température

B.I.B.L.I.O.G.R.A.P.H.I.E

O.U.V.R.A.G.E.S

- (I) John M.Senior . Optical Fiber communications,principles and practice. Prentice-Hall international series in optoelectronics. Series Editor:P.J.Dean . 1985 .
- (2) J.P.Pocholle, L.Jeunhomme,L.D'auria, M.Wehr, S.Blaison, A.Ottenheimer, F.Gauthier, J.Auge, C.Dubois, J.Y.Regeffe, D.Gallou, Y.Lumineau, M.Faure, A.Jouanin, A.Galais,.... Telecommunications optiques, fibres multimodes, composants actifs-systemes. Ed.Masson 1982 .
- (3) Ecole polytechnique federale de Lausanne:departement d'electricite;opto-electronique en telecommunications et en metrologie. Ed.Presses poly.Romandes .1982 .
- (4) R.Demaye. Optoelectronique.Bases theoriques et applications pratiques. Ed. Radio 1971 .
- (5) Y.Suematsu et K.I.Iga; transmissions sur fibres optiques Ed. Masson . 1984 .
- (6) J.D.Chatelin ; dispositifs a semi-conducteurs. Ed.Dunod.1979.
- (7) A.Bijaoui : Image et information. Ed.Masson .1984 .
- (8) B.E.Jones, fibre optics for imaging inspection and sensing University of Manchester institute of science & technology.
- (9) M.Chown. A Systems engineer's view of the technology, stand telecommunication laboratories LTD.England .
- (IO) W.B.Allan, fiber optics engineering design. University library Hull .
- (II) P.Robert, Von W.A.Steffen, J.M.Chauveau, D.Benoit, F.Forned et G.Thomas, applications electroniques cortailloed cabloptic SA. 1980 .
- (I2) Z.Kyuma, S.Tai and M.Nunushita, developpement of fiber optic sensing systems-A.Review. Central research laboratory Mitsubishi electric corporation, Amagasaki, JAPAN.1982 .

R.E.V.U.E.S

- (13) D.Gloy. Optical fibers for communication, applied optics vol 13, N°2 february 1974 .
- (14) Giallorenzi, Bucaro, Dandridge, Coleoptical fiber sensors challenge the competition, IEEE spectrum sept 1986 .
- (15) W.Smith, Fellow, P.J.Malowey, electro-optic nonlinear Fabry-Perot Devis, IEEE journal of quatum electronics, vol QE I4, N°3 March 1978 .
- (16) W.Bart, Bielawski, low-loss optical waveguides, electronic engeneering 1974 .
- (17) R.B.Reedy, F.A.Schumacher, fiber optic components ; three newdesigns optical engeneering, vol25 N°4 april 1986 .
- (18) M.Flischer, Revmam, A new family of prise , reliable and versatile fiber optic measurement instruments .
Hanshuning, E.Muller, S.Schmidt and M.F.Reumann, precision optical heads for 850 to 1700 and 450 to 1020 nanometers, Hewleh, PACKARD journal february 1987 vol 38 N°2 .
- (19) W.T.Masselinkerd, H.Morkos, modulation-doped GaAs/(Al,Ga)As heterojonction proceedings of the IEEE june 1986 .
- (20) A.Azema, J.Botineal, T.Brossai, C.Paparo Diti, J.Saulnier caracterisation de HgCdTe. Telemat 1985 .
- (21) J.D.Kanellopoulos, S.Wentouras, estimation of the rain attenuation for a multirelay link at millimeter wavelengths Annales des teleccmunications , nob/dec 1986 .
- (22) C.Brehm, P.Dupon, S.Landais, P.Ledoux, R.Jocteur, Accroissement d'attenuation previsible sur des fibres unimodales placees en atmosphere d'hydrogene, annales des telecom. ERA. tome 4I, N°II/I2 / 1986 .
- (23) C.Liegeois, R.Piel, P.Meyroois, un nouveau materiau pour le multiplexage holographique sur reseau de fibres optiques, annales des telecom. FRA. tome 4I, N°I/2 janvier/fevrier 1986 .
- (24) Fujitsu optical fiber cable, transmission systems.
- (25) Standard elektrik lorenzag (SEL), fiber optics Germany .
- (26) Uiflindborg. fibres optiques, Ericsson review N°3 1980 .

- (27) Ericsson JTC 83/22 fiber optics (MET/67) .
- (28) Telecommunications cables Nuova, Fulgor CAVI .
- (29) Sieverts, cable documentation, Ericsson N°june 1984 .
- (30) Master catalog 885, belden electronic wire and cable .
- (31) Revue trimestrielle publiee par SOTELEC communication et transmission; les reseaux cables de video communication.
- (32) J.M.Rowell, les materiaux de l'optoelectronique, pour la science dec/ 1986 .
- (33) C.K.Kao, evolution rapide des fibres optiques, revue des telecom ITT.vol 58 N°1/2 83/84 .
- (34) I.G.A.Davies, A.R.Goodwin, P.A.Kirkby et R.F.Murison, fibres optiques; emetteurs et detecteurs de lumiere ITT vol 56 N°4 1981 .
- (35) M.M.Ramsay, G.A.Hockham, K.C.Kao, propagation dans les guides d'ondes a fibres optiques, revue des telecom ITT vol 50 N°3 1975 .
- (36) C.P.Sandbank, les telecommunications sur fibres optiques, 6 revue des telecom ITT vol 50 N°I 1975 .
- (37) revue des telecom.ITT.vol 54 N°I 1979 .
- (38) revue des telecom.ITT.vol 51 N°I 1976 .
- (39) revue des telecom.ITT.vol 59 N°4 1985 .
- (40) J.Burnett, microcontamination, contamination analysis and controle for semi-conductor, electronic and other micro-manufacturing industries, vol 4 N°5 May 1986 .
- (41) J.Burnett, trends in micro electronic plants : planning for the 1990S,electronics and other manufacturing industries, microcontamination,vol4 N°7 july 1986 .
- (42) Direction generale des douanes,bureau des statistiques, Statistiques du commerce exterieur de l'Algerie,1976/77/78/79/80/81/82/83/84/85 et 1986 .
- (43) Centre national d'information et de documentation economique,microficheIOI,centre national CNID .
ooooo FINooooo