

Republique Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Education et de l'Enseignement

Ecole Nationale Polytechnique
El-Harrach

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electronique

THEME

**ETUDE D'UN SYSTEME DE
TRANSMISSION
PAR FIBRES OPTIQUES**

Proposé par :
Mr . Z.TERRA

Présenté par :
Mlle . BARKAT Rafia
Mlle . SAYAD Dalila

PROMOTION : JUILLET 1994

DEDICATIONS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Je dedie ce travail : à

Mes Chers Parents
Mes Chers Soeurs
Mon Cher Frere
Mes Neveux et Nieces

Toute ma famille
Tous mes Amies



RAFIA.BARKAT

A la Memoire de mon très cher Père
A ma Tres chère Mère
A ma soeur et son Mari
A mes Frères
A mes Belles-soeurs
A Tous mes Neveux et Nieces
A tous mes Amis (es)

je dedie ce Memoire



DALILA.SAYAD

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier notre promoteur , Monsieur Z. TERRA pour son encadrement et ses conseils.

Nous tenons également à remercier chaleureusement -

- Monsieur Djamel LEKEHAL (Chef de Bureau Equipements Câbles)
- Monsieur Omar CHERIFI (Du Bureau Equipements des Centres)
- Monsieur Azouaou MEHMEL (Du Bureau Equipement Câble)

Pour leur disponibilité, leur précieux conseil, leur bonne humeur, et pour la sympathie et la confiance qu'ils nous ont témoigné en mettant à notre disposition et le matériel et la documentation nécessaire à la réalisation de notre projet.

Nos remerciements vont également aux personnels de la SONATITE , pour l'intérêt qui ont porté à notre travail et la documentation qui nous ont fournie.

Notre reconnaissance s'adresse également à :

- Melle SABOUR Fatïha (Université de Blida)
- Melle DAHMANI Rabia
- Monsieur SARI Ali

Pour leur aide matériel et morale. Nous exprimons sincèrement notre gratitude à toute les personne qui ont contribuer à la réalisation de ce mémoire.

Nous pensons particulièrement à : Monsieur OUSSADI, Melle ALLAL, Mlle KERAOUNI, Mme MELLAH, Mr CHERRAGUI, Melle ZOUGOUARI, Melle FIALA .

Et en fin a tous nos amis (es) qui nous ont, de près ou de loin, apporte leur soutien moral et à tous nos enseignants qui ont contribue à notre formation.

ملخص

يتناول هذا الموضوع دراسة نظام إرسال بواسطة الألياف البصرية .

وهو مقسم إلى قسمين :

القسم الأول : يتناول الجانب النظري . أما الثاني فهو متعلق بالجانب التطبيقي .

يغالج القسم النظري العناصر الأساسية المكوّنة للنظام وخصائصها .

ويختتم بدراسة نظام إرسال عددي ذو (565 Mbit/s) مستعملاً

الألياف البصرية .

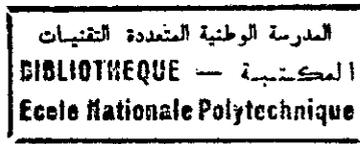
القسم الثاني : يتطرق إلى الجانب التطبيقي للألياف البصرية وحنيدة الطرق

حيث أجريت عليها سلسلة من القياسات على الضيق . وقد تمت هذه

التجارب بمقر وزارة البريد والمواصلات (P.T.T) . تدعيماً لذلك ، فقد

قمنا بإنجاز رابطة PWM بواسطة الليف الضوئي متعدد

الطرق .



Notre projet est consacré à l'étude d'un Système de Transmission par Fibres Optiques.

Il est divisé en deux grandes parties : Une partie Théorique et une partie Pratique

La Partie Théorique traite l'Etude des Eléments constituant un Système suivie d'une Application, où il est question d'étudier un Système de Transmission Numérique par Fibres Optiques à 565 Mbit/s.

La Deuxième partie est consacrée à l'aspect pratique de la Fibre Monomode, où une série de mesure d'affaiblissement a été effectuée au niveau du Ministère des Postes et Télécommunications (P.T.T) et une réalisation d'une ligne PWM par Fibre Multimode est mise en pratique

Our subject dealt with the study of the Transmission System by Optical Fibers.

It is divided into two main parts :

One in Théorical and the other is Practical .

The Théorical part is dealt with the study of elements witch constitute a System followed by the application of the digital system with optical fibers of 565 Mbit/s.

The second part is dealt with the practical study of single Fibers where the loss measures where done Ministrie of P.T.T. A realization of PWM line with the Multimode Fibers is under practical study.

Age

1

2

5

7

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

14

Correction

et de composants opto-électroniques.
La lumière est une onde.

formule (1.5)

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx (n_1 - n_2)/n_1 \approx (n_1 - n_2)/n_2$$

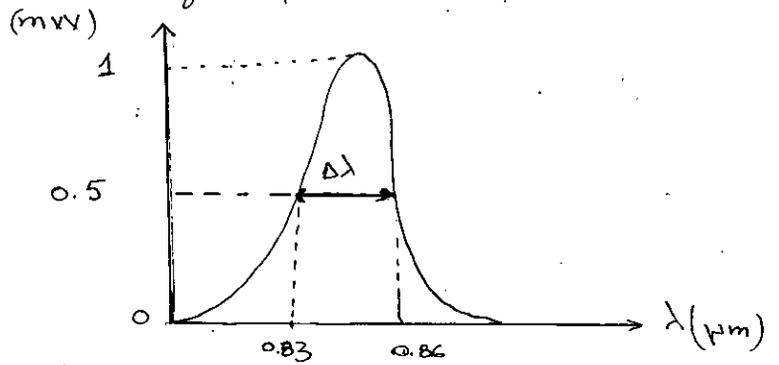
$$\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$$

[10]

fig 2.3 ① $F = \frac{1}{2\pi \epsilon_n}$

② $F = \frac{0.276}{\epsilon_n}$

fig 2.4



au lieu de L_0 on a λ_0 .

15

Fig 2.5 Caractéristique directe d'une DEL.

- proportionnelle.
- La puissance de sortie d'une DEL est d'environ 5 mW mais la puissance...

P.I.N au lieu de P.I.S

(2.4) \propto au lieu de a et ϕ_0 au lieu de F .

- Le rendement quantique η .

$$(2.5) \eta = \frac{I_{ph}/q}{\phi/R_f}$$

fig 2.14 $S_d = f(\lambda)$

$$\langle I_s^2 \rangle, \langle I_{th}^2 \rangle, \langle I_0^2 \rangle, \langle I_{ph}^2 \rangle, \langle I_{tot}^2 \rangle$$

20

22

23

25



27 bis

31

36

38

40

43

45

52

36

Correction

Des transducteurs électro-optiques à l'émission et opto-électroniques à la réception

axe horizontal de la fig 3.2 est le courant I (mA)

$y \propto x$

4.4.2 30 $\text{MHz} \cdot \text{Km}$

coefficient d'atténuation α connu

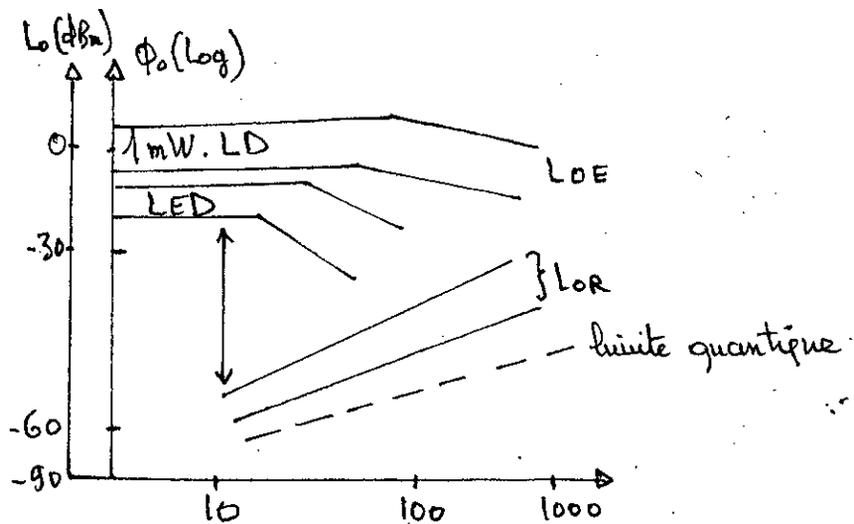
Fig 4.8 l'axe vertical représente l'espace entre répéteurs (Km)

$F \in [300, 3400] \text{ Hz}$

Tableau 5.1

E: 4 signaux à 140 Mbit/s

D_m définit une trame de 2688 bits



SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

		1
Chapitre 1	<i>Généralités sur les Fibres Optiques.</i>	2
1.1	Introduction.	
1.2	Principe de la Transmission Optique de l'Information.	
1.3	Structure des Fibres Optiques.	
1.4	Caractéristiques des Fibres Optiques.	
1.5	Les Principaux Types de Fibres Optiques.	
1.6	Avantages et Inconvénients des Télécommunications par Fibres Optiques.	
1.7	Structure d'un Système de Transmission sur Fibres Optiques.	
Chapitre 2	<i>Transducteurs Optiques</i>	13
2.1	Introduction.	
2.2	Transducteurs Electro-Optiques.	
2.3	Transducteurs Opto-Electroniques.	
2.4	Influence du Bruit à la Réception.	
2.5	Rapport Signal sur Bruit S/N.	
Chapitre 3	<i>Mode de Transmission sur Fibre Optique</i>	27
3.1	Modulation Optique.	
3.2	Transmission Analogique.	
3.3	Transmission Numérique.	
3.4	Conclusion.	
Chapitre 4	<i>Planification d'une Liaison Numérique par Fibres Optiques</i>	35
4.1	Définition.	
4.2	Paramètres.	
4.3	Méthode.	

- 4.4 **Bilan Energétique.**
- 4.5 **Effet de la Dispersion.**
- 4.6 **Diagramme en Oeil.**
- 4.7 **Largeur de Bande Optique.**
- 4.8 **Bilan de Bande Passante.**
- 4.9 **Espacement entre les Régénérateur**
- 4.10 **Bilan Economique**
- 4.11 **Résultats**

Chapitre 5 ***Système de Transmission Numérique
par Fibre Optique : PDH à 565 Mbit/s***

42

- 5.1 **Introduction.**
- 5.2 **Structure d'un Système Numérique.**
- 5.3 **Multiplexage Temporel.**
- 5.4 **Principe de Transmission d'un Système
Numérique sue Câble à Fibres Optiques.**

Application 1 :

- 5.5 **Multiplexeur Primaire PCM 30G (SIEMENS).**
- 5.6 **Passage à un Système d'Ordre Supérieur :
(le niveau 5).**

Application 2 :

- 5.7 **Présentation de l'Equipement Terminal de
Multiplexage démultiplexage
DSMX 34/140 Mbit/s.**

Application 3 :

- 5.8 **Présentation de l'Equipement de Ligne Optique
à 565 Mbit/s**

Chapitre 6 ***Mesures et Réalisation***

59

- 6.1 **Introduction.**
- 6.2 **Manipulation et Mesure**
- 6.3 **Réalisation d'un Emetteur - Récepteur par Fibre
Optique.**

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES :

ANNEXE 1	Codeur 5B/6B.
ANNEXE 2	Structure des Trames détaillées.
ANNEXE 3	Appareil de Fusion.
ANNEXE 4	Analyseur de Fibres Optiques.
ANNEXE 5	Nomenclature et Caractéristiques des Emetteurs- Recepteurs.

INTRODUCTION

Les problèmes posés par la transmission en atmosphère libre et la nécessité de l'Homme à l'acquisition d'une quantité considérable d'informations en un temps court, a conduit à envisager le guidage de l'information sous forme de signaux lumineux, puis à remplacer l'atmosphère libre par un milieu protégé.

En effet, la lumière peut servir de vecteur de transmission; elle se distingue des porteuses électriques par son domaine de fréquence plus élevé, et qui exige une technologie particulière.

Les progrès récents dans la fabrication de fibres optiques de faible atténuation et de composants électroniques très rapides (diode électroluminescente et diode laser pour les émetteurs, photodiode à avalanche pour les récepteurs), permettent de développer des systèmes de transmission par fibres optiques à haut débit et à longue portée.

Le but de notre projet est de dégager les principales caractéristiques des éléments constituant un système et leurs influences sur un système de transmission numérique par fibres optiques, orienté vers une application particulière qu'est la téléphonie.

Etudier un système implique un choix qui est basé sur les critères suivants:

- Le débit maximal existant actuellement
- Sa mise en exploitation récente en ALGERIE.

Ce travail est réparti en six chapitres:

D'abord un exposé consacré :

- aux notions fondamentales sur le principe de la transmission optique de l'information.
- à la présentation de la fibre optique sous un aspect théorique.

Le chapitre deux est consacré aux transducteurs optiques dans le but de dégager les notions fondamentales sur les émetteurs et les détecteurs de lumière.

Mais il faut pouvoir moduler la lumière. Ce principe sera traité dans le chapitre trois, où il sera question des deux modes de transmission compatibles avec la transmission sur fibres optiques à savoir: la transmission analogique et la transmission numérique.

Le chapitre quatre abordera le problème de la planification d'une liaison numérique par fibres optiques, qui consiste à concevoir le système et à déterminer tous ses paramètres.

Une application d'un système numérique sera donnée au chapitre cinq. Il s'agit du système plésiochrone (PDH) à 565 Mbit/s.

Pour mettre en évidence les caractéristiques de la fibre monomode utilisée par le système à 565 Mbit/s, une série de mesures sur cette dernière a été effectuée au niveau du ministère des postes et télécommunications (bureau équipement câble).

Et comme application de la fibre multimode (utilisée pour de courtes distances), une réalisation d'une simple liaison émetteur-récepteur a été effectuée dans le seul but, est de mettre en évidence la transmission de la lumière par une fibre optique. Ces deux manipulations sont traitées au niveau du chapitre six.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES FIBRES OPTIQUES

1.1 INTRODUCTION

L'idée d'utiliser la lumière comme support véhiculant des informations n'est pas récente, dès la plus haute antiquité, les hommes ont utilisé des sources optiques (soleil - feux et nuages de fumée) pour transmettre des messages.

Cependant, les débits d'informations transmis étaient faibles et les portées courtes.

L'invention du Laser, en 1960, modifia la mauvaise opinion qu'on avait sur l'optique. Au début, on a utilisé cette source pour des transmissions directes en espace libre, malheureusement, l'atmosphère s'avéra être un milieu de transmission dispersif et absorbant (brouillard, pollutions) et ces projets furent assez vite abandonnés.

Vers 1966, l'idée est naturellement venue de protéger la lumière des atteintes extérieures en la confinant dans un milieu qui la guiderait sans l'affaiblir : la Fibre Optique.

Grâce à une publication scientifique de K.C.KAO et G.A HOCKHAM que la possibilité d'utiliser des fibres optiques comme canal de transmission en télécommunication a été sérieusement considérée.

1.2 PRINCIPE DE LA TRANSMISSION OPTIQUE DE L'INFORMATION :

La lumière est une forme d'onde électromagnétique. On peut lui appliquer le principe de l'optique géométrique.

La réflexion et la réfraction de la lumière constituent les bases de la transmission de l'information.

A la surface de séparation entre 2 milieux diélectriques ayant des indices de réfraction différents, la lumière peut être transmise, réfléchie ou réfractée suivant les lois de Snell - Descartes [1]

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1)$$

Où : n_1 , n_2 sont les indices de réfraction des milieu 1 et 2 respectivement.

θ_1 : l'angle du rayon incident dans le milieu 1.

θ_2 : l'angle du rayon réfracté dans le milieu 2.

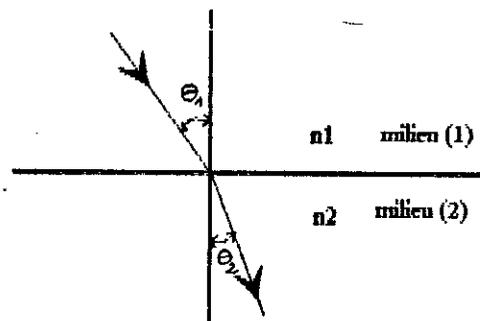


fig 1.1 Réfraction de la lumière

Si $n_1 > n_2$, il existe un angle critique θ_c ou angle minimal de réflexion correspondant à un angle de réfraction θ_2 égal à 90° tel que :

$$\sin \theta_{1c} = \frac{n_2}{n_1}$$

Donc :

$$\theta_{1c} = \text{Arc sin}(n_2/n_1) \quad (1.2)$$

Pour des angles d'incidence plus grand que θ_{1c} , nous observons le phénomène appelé réflexion totale signifiant que toute l'énergie lumineuse est réfléchi. (Fig 1.2)

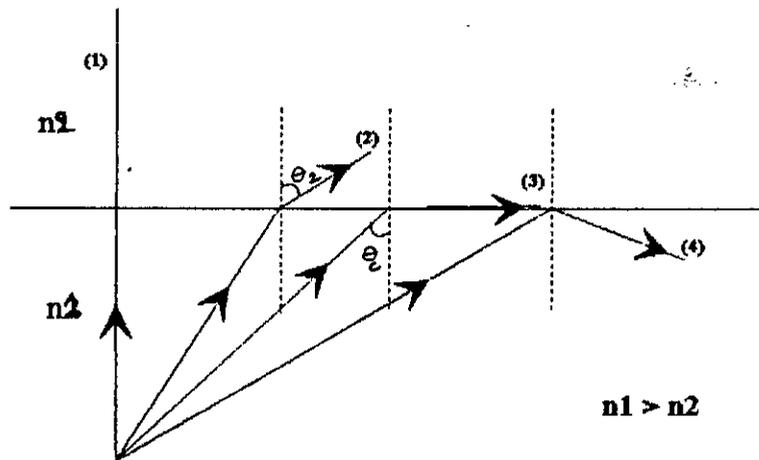


fig 1.2 Réflexion interne totale

1.3 STRUCTURE DES FIBRES OPTIQUES :

Une fibre optique est constituée d'un milieu diélectrique intérieur appelé coeur, d'indice de réfraction n_1 , entouré d'un matériau appelé gaine, d'indice de réfraction plus faible n_2 .

Les fibres reçoivent un revêtement en acrylate (deux couches) pour les protéger contre les effets extérieurs.

Le coeur est de diamètre allant de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres et le diamètre extérieur de la gaine est de 125 micromètres.

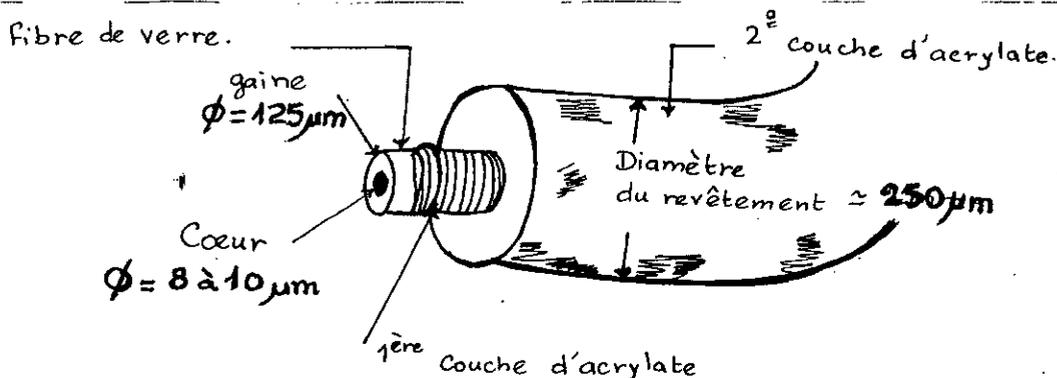


Fig 1.3 Schéma d'une Fibre Optique avec revêtement .

Les fibres utilisées en communication possèdent généralement un coeur et une gaine de verre. Les matériaux de base sont la Silice dopée et un composé du verre.

La plus grande partie de l'énergie lumineuse peut être confinée dans la région du coeur et être transmise par des réflexions totales internes se produisant à la surface de séparation coeur - gaine.(fig 1.4).

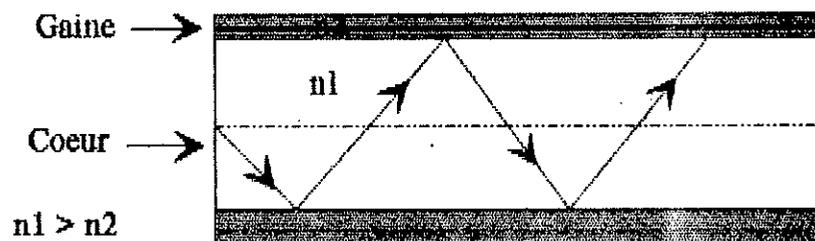


fig 1.4 Réflexion totale dans une fibre optique

1.4 CARACTERISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES :

1.4.1 CONDITION DE GUIDAGE :

Les rayons lumineux à l'intérieur du coeur de la fibre attaquent l'interface coeur - gaine à des angles différents et le phénomène de réflexion totale permet à ceux; avec un angle d'incidence plus grand que θ_c de se propager tout le long du guide. Les rayons avec un angle d'incidence plus petit que θ_c ne sont pas guidés mais transmis dans la gaine et seront atténués.

1.4.2 L'OUVERTURE NUMERIQUE : [2]

L'ouverture numérique caractérise l'angle maximum que doit faire le faisceau incident pour assurer sa propagation dans la fibre (fig 1.5).

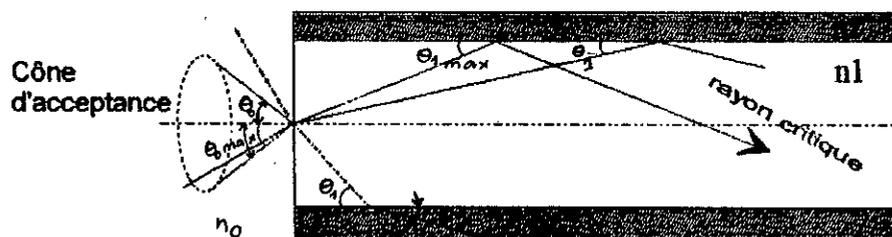


fig 1.5 Conditions à l'extrémité d'une fibre à saut d'indice.

L'ouverture numérique ON d'une fibre à saut d'indice est définie par :

$$ON = n_0 \sin \theta_{\max} \quad (1.3)$$

Par les lois de l'optique géométrique, on aura :

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_0 &= n_1 \sin \theta_1 \\ n_1 \cos \theta_1 &= n_2 \cos \theta_2 \end{aligned}$$

A la limite de la réflexion totale θ_2 vaut 0° . on a alors :

$$\cos \theta_1 \text{ max} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin \theta_0 \text{ max.} = [n_1^2 - n_2^2]^{1/2} (1/n_0)$$

Si le milieu d'indice n_0 est l'air ($n_0 = 1$), ON devient :

$$ON = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} < 1 \quad (1.4)$$

En conclusion, tout rayon incident extérieur au cône de demi-angle $\theta_0 \text{ max.}$ ne se propage pas.

1.4.3 L'ECART RELATIF : [3]

Si la différence d'indice entre le coeur et la gaine est faible, on utilise un paramètre Δ défini par :

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1 \approx (n_1 - n_2) / n_2 \quad (1.5)$$

d'où :

$$ON = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.6)$$

Δ : est appelé écart relatif d'indice de réfraction.

1.4.4 LE PROFIL D'INDICE :

L'indice de réfraction du milieu caractérise la propagation de la lumière dans le guide d'onde. En réalité, c'est l'allure de l'indice du coeur n_1 par rapport à celui de la gaine n_2 . On distingue deux familles de profil, celle à saut d'indice (fig 1.6.a) et celle à gradient d'indice (fig 1.6.b).

Les fig 1.7.a et 1.7.b montrent la propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique à saut d'indice et une fibre à gradient d'indice respectivement.

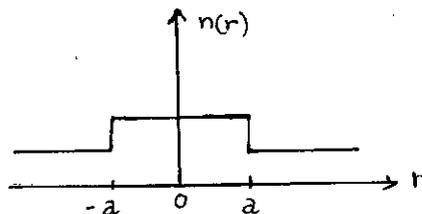


Fig 1.6.a Profil en saut d'indice

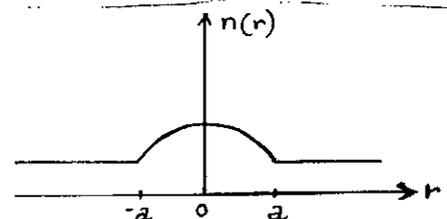


Fig 1.6.b Profil en gradient d'indice

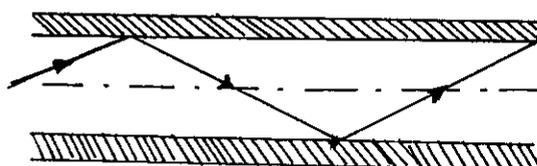


Fig 1.7.a Propagation dans une Fibre à saut d'indice

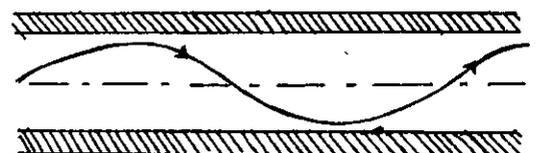


Fig 1.7.b Propagation dans une Fibre à gradient d'indice

1.4.5 MODES DE PROPAGATION : [4]

Chaque rayon lumineux entrant dans la fibre à différents angles de propagation est un mode différent .

Les modes sont des distributions périodiques du champ qui, ensemble, permettant d'établir dans la fibre n'importe quelle distribution souhaitée pour le champ .

Le nombre N des modes pouvant se propager dans la fibre est donné par :

Pour une fibre à saut d'indice :

$$N = k^2 (n^2_1 - n^2_2) a^2/2 \quad (1.7)$$

Pour une fibre à gradient d'indice :

$$N = k^2 (n^2_1 - n^2_2) a^2/4 \quad (1.8)$$

où : k : module du vecteur d'onde
a : diamètre du coeur de la fibre

1.4.6 DISPERSION :

L'information se traduit par des séquences d'impulsions lumineuses. Cependant, s'il se produit un élargissement dans le temps des impulsions lumineuses, il pourra y être un mélange d'impulsions à la sortie, et ainsi, on aura perte d'informations. Cet élargissement est dit dispersion temporelle. On distingue deux types de dispersion :

- * dispersion modale
- * dispersion chromatique

A-DISPERSION MODALE : [5]

Elle intervient seulement dans les fibres multimodes. Elle est causée par la différence de trajectoire de divers modes pour parcourir une longueur L de la fibre. Il en résulte une différence entre les temps de propagation des divers modes qui est donné par :

$$\Delta t_m = (n_1/c) \cdot L \cdot \Delta = (L/2cn_1) \cdot (\Delta n)^2 \quad (1.9)$$

où : c : la vitesse de la lumière dans le vide.

B-DISPERSION CHROMATIQUE : [5]

La dispersion chromatique d'un matériau est sa propriété consistant à ralentir différemment les rayons lumineux de divers longueurs d'onde même s'ils ont été injectés en même temps Il en résulte donc un délai au bout de la fibre entre les différentes longueurs d'onde calculé par :

$$\Delta t_c = -(\lambda_0 / C) \Delta \lambda \left[\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right] \lambda_0 \cdot L \quad (1.10)$$

où

λ_0 : longueur d'onde centrale de la source
 $\Delta \lambda$: la largeur spectrale centrale de la source

$\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$: la dérivée seconde de l'indice du coeur par rapport à λ .

Le délai total de la dispersion Δt est défini comme suit : [5]

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_m)^2 + (\Delta t_c)^2} \quad (1.11)$$

1.4.7 ATTENUATION DES FIBRES OPTIQUES :

L'atténuation d'une fibre optique est définie à partir de la puissance lumineuse à l'entrée ϕ_1 et à la sortie ϕ_2 d'un tronçon de la fibre de longueur L (Km) au moyen du coefficient d'atténuation α (db/Km).

Les facteurs contribuant à l'atténuation d'une fibre sont : l'absorption, la diffusion de Rayleigh, les diffusions dues aux irrégularités de l'interface coeur-gaine, les pertes dues aux courbures et aux jonctions des fibres et les pertes par couplage aux extrémités d'entrée et de sortie (fig 1.8).

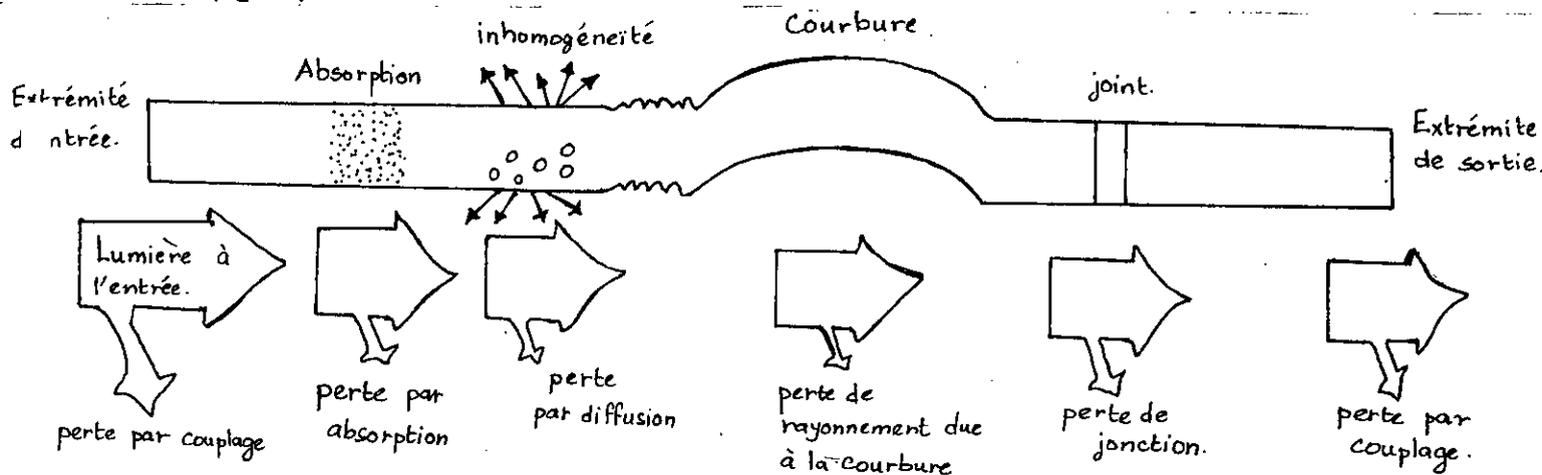


Fig 1.8 Processus d'atténuation dans une Fibre Optique.

A- PERTES DUES A L'ABSORPTION ET A LA DIFFUSION :

La principale cause des pertes par absorption est la présence de métaux de transition et à la présence des ions OH.

Outre la perte de la lumière par absorption, il faut aussi considérer la diffusion chaque fois que la lumière en traversant la fibre, rencontre une irrégularité de dimension inférieure à sa longueur d'onde elle est diffusée c'est à dire qu'elle est réémise dans toutes les directions. Ceci est dit diffusion de Rayleigh.

Ces affaiblissements varient avec la longueur d'onde comme le montre la fig.1.9.

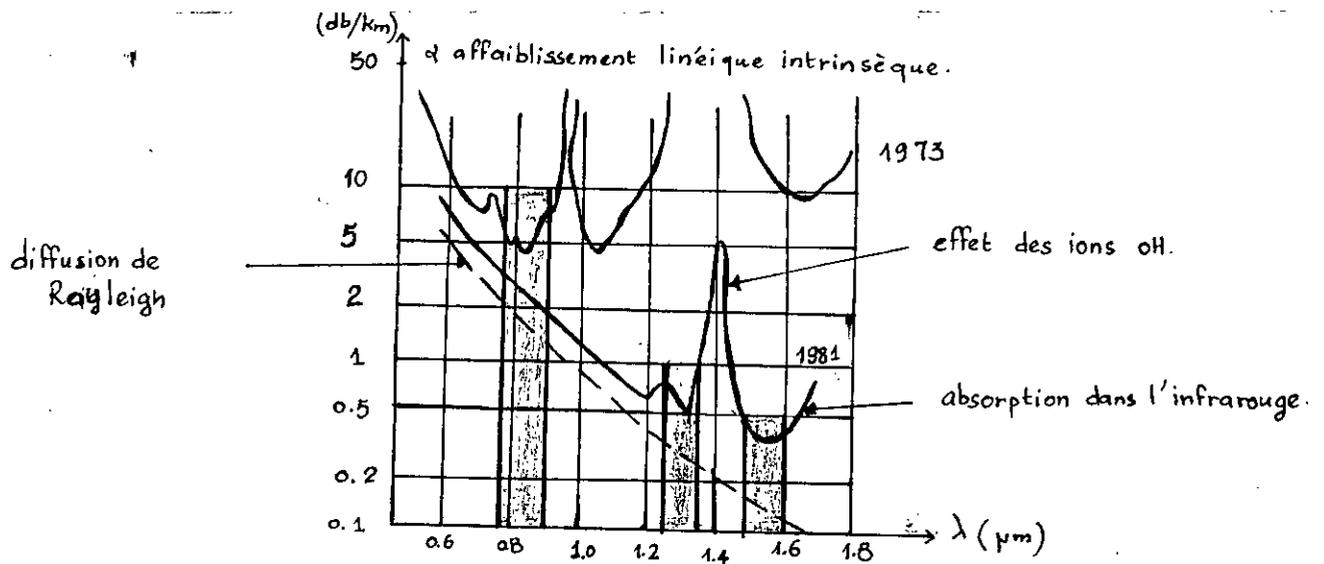


Fig 1.9 Variation de l'affaiblissement intrinsèque en fonction de la longueur d'onde.

On remarque l'existence de trois fenêtres région où l'atténuation est minimale. Actuellement, pour les systèmes de transmissions terrestres ou sous-marines à grandes distances c'est la troisième fenêtre ($\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$) qui est utilisée. La deuxième fenêtre ($\lambda \approx 1.3 \mu\text{m}$) est utilisée pour des systèmes à moyenne distance.

La fig 1.10 situe ces domaines dans leur contexte physique.

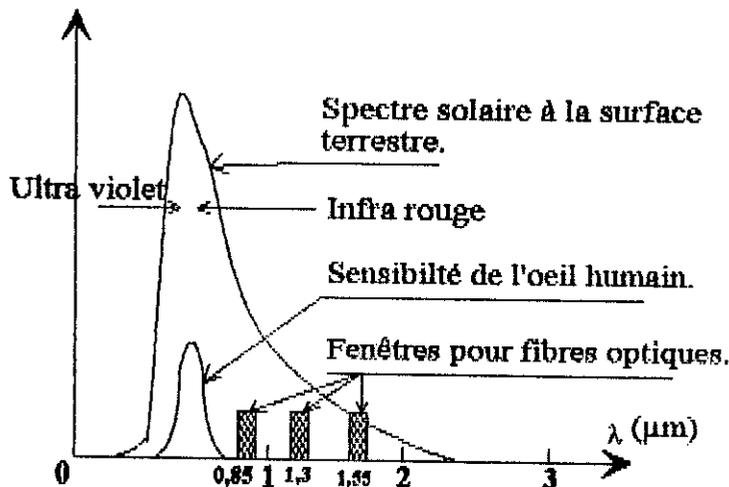


Fig 1.10 Gamme d'ondes utilisées dans les fibres optiques.

B- PERTES DUES AUX COURBURES ET A LA DIFFUSION A L'INTERFACE COEUR - GAINÉ :

Il se produit une perte de conversion de mode, et une perte due aux rayonnement si la fibre a de petites irrégularités ou défauts à l'interface coeur-gaine.

C- PERTES DUES AUX RACCORDEMENTS (EPISSURES) :

Lors du raccordement de deux fibres, il peut y avoir de mauvais alignements axiaux et angulaires, les rayons lumineux de sortie de la fibre 1 ne sont pas tous acceptés par la fibre 2 et ceux qui sont acceptés se propagent à des angles qui sont différents de ceux de la fibre 1, donnant naissance à une conversion de mode.

D- PERTES PAR COUPLAGES :

Ce sont les pertes aux extrémités de la fibre qui sont :

*- Pertes à l'interface émetteur - fibre :

Elles englobent :

- Pertes liées à l'adaptation d'ouverture numérique.
- Pertes liées aux rapport des surfaces de la source et de la fibre.
- Pertes liées à la désadaptation entre les gradients d'indice.
- Pertes de Fresnel liées à l'interface air-Silice.

* Pertes à l'interface fibre - récepteur .

1.5 LES PRINCIPAUX TYPES DE FIBRES OPTIQUES :

En fonction des dimensions relatives du coeur et de la gaine, ainsi que la fonction $n(r)$ décrivant le profil d'indice, nous distinguons trois types de fibres qui se différencient principalement par la propagation des ondes dans le noyau de la fibre.

1.5.1 FIBRE MULTIMODE A SAUT D'INDICE :

La fibre multimode à saut d'indice est obtenue en réalisant une franche discontinuité physique à l'interface coeur - gaine. Elle est utilisée pour des liaisons courtes .

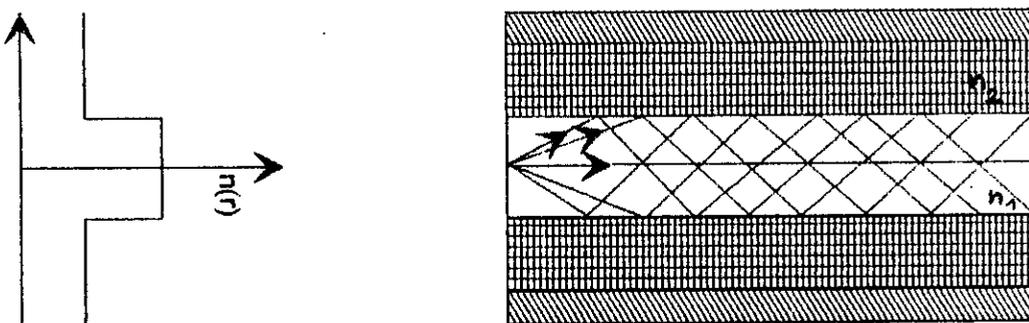


Fig 1.11 Fibre multimode à saut d'indice

1.5.2 FIBRE MULTIMODE A GRADIENT D'INDICE :

La fibre multimode à gradient d'indice est plus difficile à fabriquer. Elle est obtenue en réalisant une variation progressive entre l'indice de réfraction du coeur et de la gaine. Elle est utilisée dans les liaisons à plus haute capacité d'information.

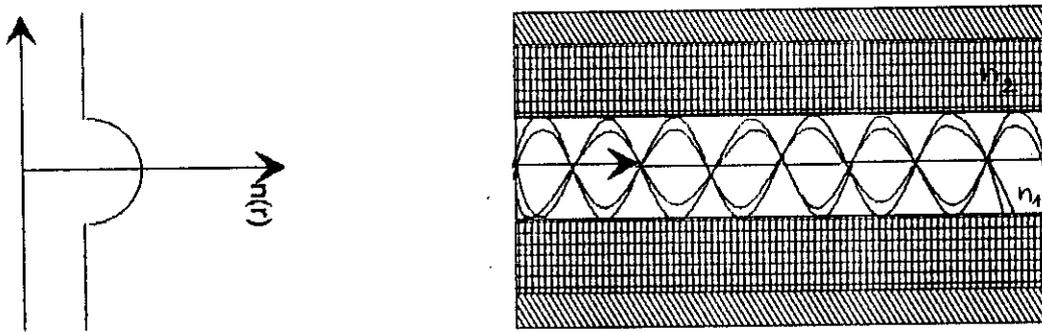


Fig 1.12 Fibre multimode à gradient d'indice

1.5.3 FIBRE MONOMODE :

C'est une fibre à saut d'indice possédant un diamètre de coeur suffisamment petit pour qu'il n'y ait qu'un seul mode guidé.

Ce type de fibre, est pour le moment le support idéal dans le domaine des télécommunications à grande distance et à très grands débits, car elle a une grande bande passante et une faible atténuation.

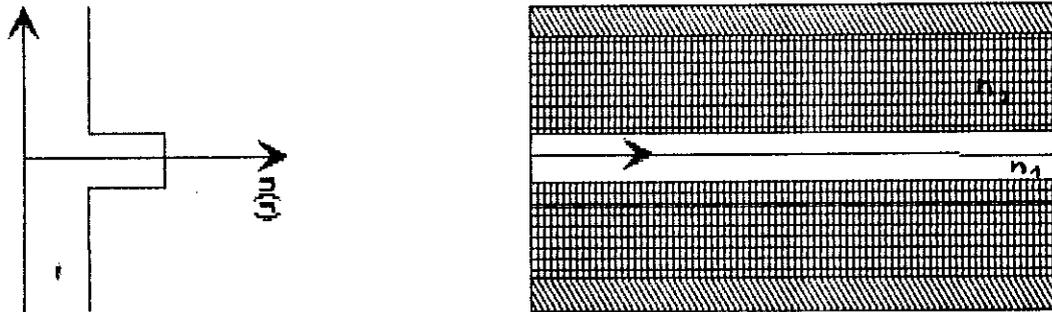


Fig 1.13 Fibre monomode

Tableau 1.1 : Caractéristiques typiques des fibres optiques : [6]

TYPE DE FIBRE	DIAMETRE (μm) coeur/gaine	O.N	ATTENUATION (db/Km)			Bande de passante Mhz Km
			$\lambda=850 \text{ nm}$	$\lambda=1300 \text{ nm}$	$\lambda=1550 \text{ nm}$	
Monomode	9/125	0.1		0.36	0.2	
Multimode à gradient d'indice (Silice)	50/125	0.2		0.7		200 à 1000
	85/125	0.25		2		100 à 500
	100/140	0.3				100 à 400
Multimode à saut d'indice Silice/Silicone	Diamètre du coeur : 200 à 600	0.35	5 à 20 à $\lambda =$ 850 nm			10 à 20

1.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES TELECOMMUNICATIONS PAR FIBRES OPTIQUES :

Comparativement à d'autre supports de transmission, la fibre optique présente un certain nombre d'avantages :

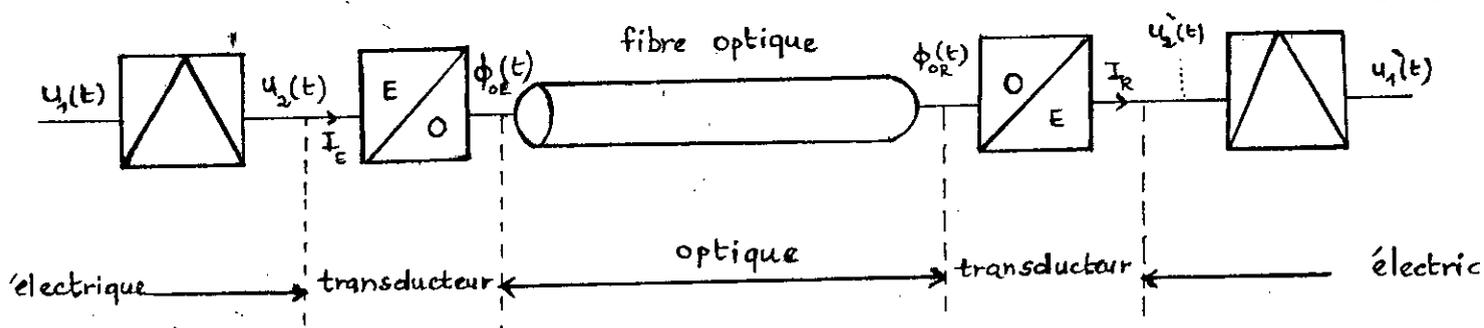
- * Bande passante énorme (quelques GHZ sur quelques Km) .
- * Petites dimensions et faible poids .
- * Isolation électromagnétique .
- * Immunité aux interférences et à la diaphonie .
- * Sécurité du signal (pas de rayonnement) d'où leur utilité pour les applications militaires, bancaires et en transmission de données .
- * Faibles pertes de transmission .
- * Flexibilité : permettant de fabriquer de la fibre sur de très grandes distances .
- * Systèmes fiables et faciles à entretenir .
- * Matière première disponible et faible coût .
- * Grande résistance aux attaques chimiques et aux variations de température .

Les seuls inconvénients spécifiques au système optique sont la présence de bruit optique qui dépend du signal à transmettre, en plus les fibres ne permettant pas le transport d'énergie. La puissance transmise par fibre optique ne dépasse pas en général le milliwatt, par contre, la puissance d'un câble coaxial peut atteindre plusieurs watt [7]. Ceci nécessite d'alimenter le système à fibres optiques à chaque répéteur.

1.7. STRUCTURE D'UN SYSTEME DE TRANSMISSION SUR FIBRES OPTIQUES :

Les éléments principaux suivants interviennent dans une liaison par fibre optique (fig 1.15).

- * Des transducteurs électro-optique à l'émission optoélectronique à la réception. Ils transforment le signal électrique en un signal optique et inversement. De plus, ils sont complétés par un dispositif d'adaptation optique à la fibre.
- * Un modulateur électrique pour mettre l'information à transmettre sous une forme adéquate, avant de l'offrir au transducteur électro-optique.
- * Un démodulateur électrique pour effectuer l'opération inverse à la réception et restituer l'information transmise.
- * La fibre optique utilisée comme support de transmission
- * Un ou des répéteurs - régénérateurs - ayant pour fonction d'amplifier le signal optique lors de sa propagation.



- $u(t)$: Signal électrique
- ϕ_{oe} : Puissance Optique à l'émission
- ϕ_{or} : Puissance Optique à la réception

Fig 1.15 Structure d'une liaison par Fibre Optique .

CHAPITRE 2

TRANSDUCTEURS OPTIQUES

2-1 INTRODUCTION

Le domaine des transducteurs opto-électroniques et électro-optiques, fondamental pour les liaisons par fibre optique, est caractérisé par une évolution technologique récente et non stabilisée. En conséquence, une description surtout qualitative et comparative de certaines de leurs propriétés fera l'objet du présent chapitre.

2-2 TRANSDUCTEURS ELECTRO-OPTIQUES.

2-2-1 GENERALITES

La source de rayonnement d'un système optique de transmission d'informations doit émettre une lumière monochromatique puissante, avec une efficacité d'injection aussi bonne que possible. Les sources que l'on peut utiliser dans le domaine des ondes optiques peuvent être classées en deux catégories:

a- Les sources à large spectre (lampe incandescentes).

b- Les sources à spectre réduit (diode électroluminescente et diode laser):

En télécommunication optique, la nécessité d'obtenir une bande passante maximale nous impose de choisir des sources à spectre réduit [4].

2-2-2 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES SOURCES OPTIQUES.

PROPRIETES	CONDITIONS NECESSAIRES
-Longueur d'Onde	la source doit fonctionner à une longueur d'onde donnant faible atténuation et faible dispersion dans la fibre optique. Les longueurs d'onde exploitables sont 0,85; 1,3 et 1,5 μm .
-Fiabilité	il faut que la source ait une longue durée de vie, un fonctionnement bien stable et une bonne reproductibilité des caractéristiques de sortie. la durée de vie atteinte actuellement est de 10^6 heures
-Puissance de Sortie	il faut répondre aux demandes du système généralement supérieure à 1mw.
-Largeur Spectrale	la source doit avoir une largeur spectrale permettant d'obtenir une bande passante maximale. L'ordre souhaité de la largeur spectrale est de dizaines de nm.
-Effet de Focallisation	il doit être possible de focaliser la sortie dans la fibre et d'obtenir un rendement de couplage élevé.
-Dimension et Poids	Une surface émissive petite et un poids léger est souhaitable pour une source optique.

2-2-3 DIODE ELECTROLUMINESCENTE DEL:

A- DESCRIPTION

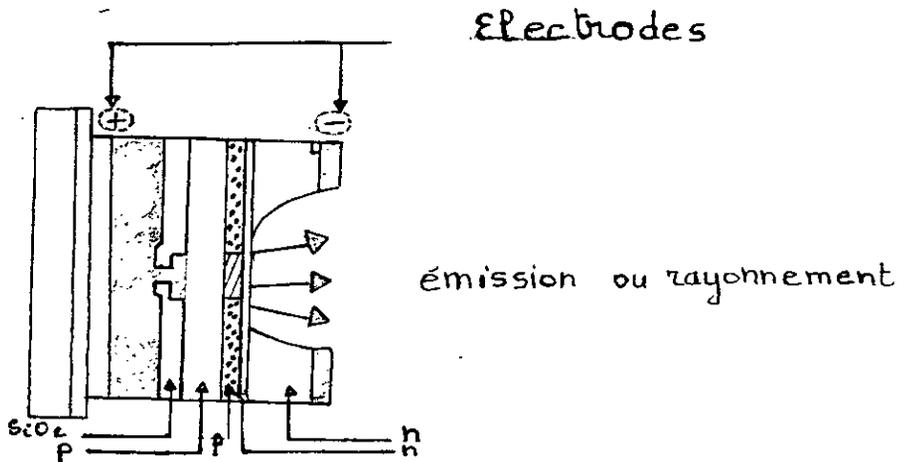


Fig 2.1 Diode électroluminescente type BURRUS

La diode électroluminescente utilisée en télécommunication optique est constituée d'une jonction PN au GaAlAs. Elle est réalisée à partir de semi-conducteur, dans lequel les recombinaisons de porteurs excédentaires sont essentiellement radiatives. Le principe de fonctionnement de ces sources repose sur le phénomène d'émission spontanée.

B- PRINCIPE DE L'EMISSION SPONTANEE.

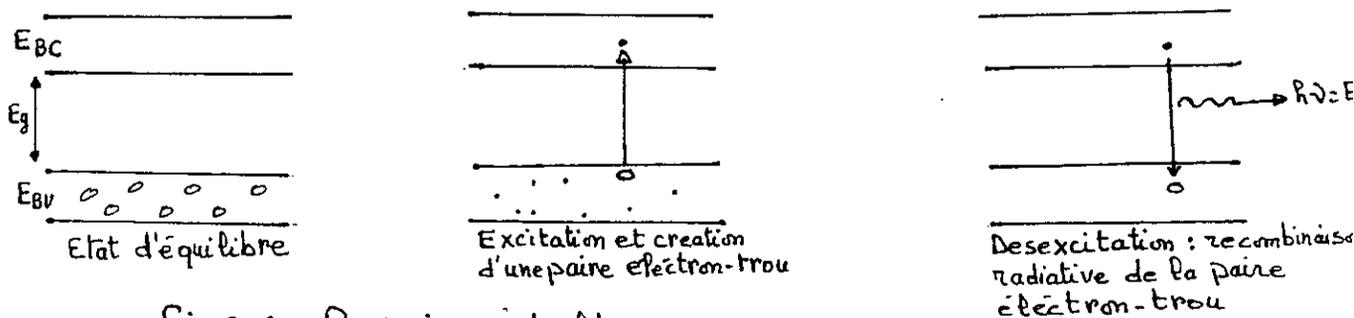


Fig 2.2 Principe de l'émission spontanée.

Dans un isolant, la bande de conduction BC est vide et la bande de valence BV est remplie.

Soit E_g la différence de niveau d'énergie entre ces deux bandes. Si on fournit une énergie supérieure à E_g à un électron de BV, il monte dans BC en libérant un trou. Le semi-conducteur aura alors tendance à retrouver son état d'équilibre par recombinaison radiative ou non radiative.

Le photon est alors émis lors de la recombinaison radiative. L'émission spontanée est

indépendante du rayonnement présent [4].

C- PRINCIPALES CARACTERISTIQUES D'UNE DEL.

-TEMPS DE REPOSE D'UNE DEL:

La puissance émise à une fréquence f est donnée par (2.1):

$$P_e(f) = P_e [1 + (2\pi f \tau_r)^2]^{-1/2} \quad (2.1)$$

P_e : c'est la puissance émise pour un courant continu I .

τ_r : c'est la durée de vie de l'électron donnant une recombinaison radiative.

La caractéristique est donnée par la figure 2.3 d'après [10].

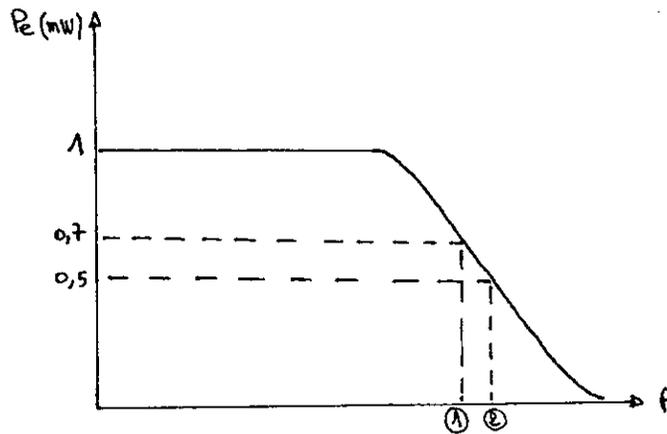


Fig 2.3 caractéristique de la puissance en fonction de la fréquence

La transmission des signaux à des fréquences allant jusqu'à quelques dizaines de megahertz nécessite l'utilisation d'émetteurs ayant un temps de réponse très court d'environ 7 à 8 ns.

- LARGEUR SPECTRALE

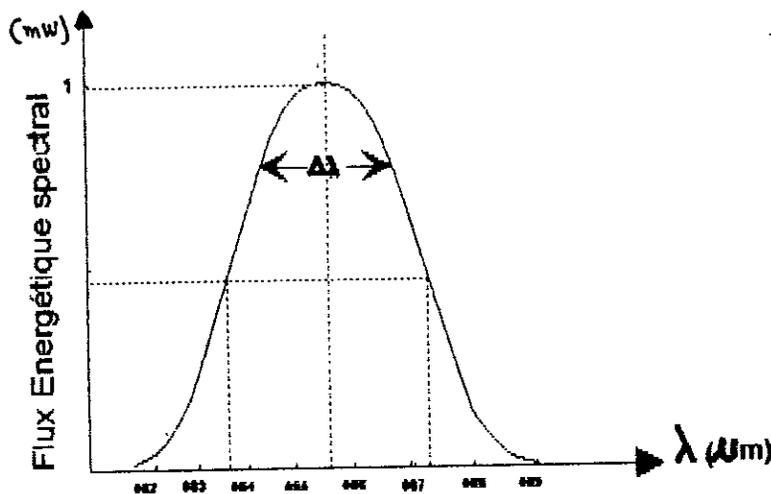


Fig.2.4 CARACTERISTIQUE SPECTRALE D'UNE L.E.D.

Une DEL n'émet pas de spectre monochromatique à cause de l'agitation thermique. Les photons émis ont une énergie qui varie autour de E_g . A cette variation d'énergie correspond une variation de longueur d'onde. Donc la largeur spectrale s'exprime par: $\Delta E/E = \Delta \lambda / \lambda_0$ λ_0 étant la longueur d'onde au maximum de la puissance lumineuse. Pour une DEL $\Delta \lambda = 50\text{nm}$ [2].

Les DEL sont habituellement utilisées dans la bande de fréquence allant jusqu'à 50 MHz environ. Il existe des diodes fonctionnant jusqu'à 100 MHz, mais leur linéarité est assez médiocre.

Au delà de 100 MHz, il faut faire appel aux diodes lasers.

- LONGUEUR D'ONDE D'EMISSION

La longueur d'onde d'émission doit se situer dans la fenêtre de propagation des fibres, elle est comprise entre 780nm et 890nm et ceci quelque soit la diode.

- CARACTERISTIQUE DE TRANSFERT

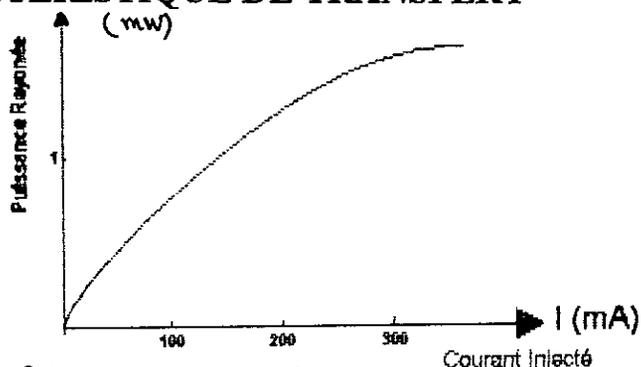


Fig 2.5 caractéristique de transfert d'une DEL

La puissance émise est essentiellement proportionnelle au courant de modulation. La puissance de sortie d'une DEL est d'environ 5mw mais la puissance injectée dans la fibre n'est que de 0,3 mw.

- RENDEMENT D'UNE DEL

Le rendement externe d'une DEL est défini par le rapport de la puissance optique émise, à la puissance électrique fournie. La puissance optique est proportionnelle au nombre de photons émis par unité de temps.

Le courant est proportionnel au nombre d'électrons traversant la jonction par unité de temps. L'état actuel de la technologie permet la fabrication de DEL ayant un rendement de

l'ordre de 10 à 20 nm/A à 850 nm [40].

D-LES DIFFERENTS TYPES DE DEL

Une DEL doit avoir une surface émissive égale ou inférieure à celle du cœur de la fibre sinon, la lumière n'est pas couplée à la fibre. Il faut donc confiner la partie émissive sur une surface faible. Deux types de DEL sont réalisés:

-DIODES EMETTRICES PAR LA SURFACE (BURRUS)

Dans ce type de diodes (fig 2.1), la surface active est un disque de 15 à 100 μm de diamètre. Le rayonnement est lambertien, il est caractérisé par un angle d'ouverture d'environ 120°.

-DIODES A EMISSION LATÉRALE

Ce sont des diodes à double hétéro-jonction. La zone active, où est créé le rayonnement, a une épaisseur comprise entre 50 et 100 μm . Comparée à une diode émettant par la surface, cette diode émet une puissance plus faible mais un rendement de couplage avec la fibre meilleur.

2-2-4 DIODES LASERS

A- GENERALITES

Les lasers à semi-conducteurs sont des émetteurs de lumière cohérente pouvant fonctionner dans tout le domaine optique, utilisant le principe de l'émission stimulée.

Il sont constitués:-d'un milieu amplificateur optique.

- d'un moyen de pompage puissant pour exciter le milieu et réaliser l'inversion de population.

- d'un résonateur optique constitué de deux miroirs transformant l'amplification en oscillation.

B- PRINCIPE DE L'EMISSION STIMULEE [4]

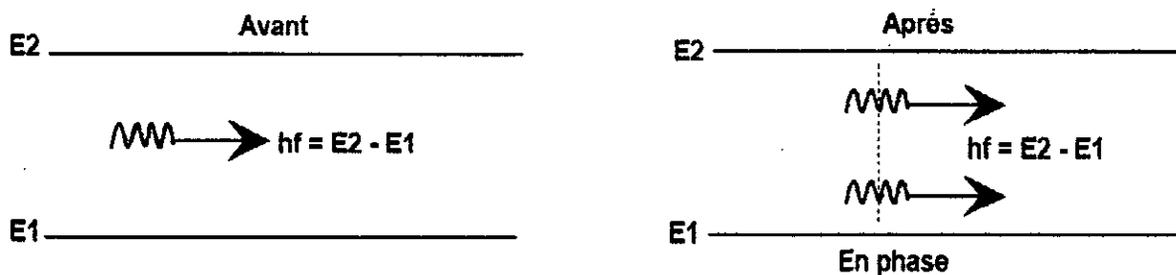


Fig.2.6. PRINCIPE DE L'EMISSION STIMULEE

L'émission stimulée ne se fait que si un photon incident de fréquence ν tombe sur l'atome excité. La phase du photon émis est alors la même que celle du photon incident et sa direction de propagation aussi. Il y'a donc création d'un second photon indiscernable du premier :c'est le principe de l'émission stimulée.

C- CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES DIODES LASERS DL

-TEMPS DE REPONSE D'UNE DL

Le temps de réponse d'une diode laser à un échelon de courant électrique peut être inférieur à 1ns.

- LARGEUR SPECTRALE

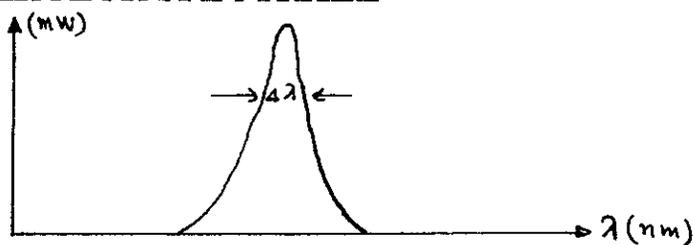


Fig 2.7 Caractéristique spectrale d'une DL à 820 nm

Le spectre d'une diode laser est très étroit ce qui lui confère une largeur de bande élevée (fig 2.7).

$\Delta\lambda$ est évalué à 1nm.A noter que le laser émet une lumière monochromatique.

-CARACTERISTIQUE DE TRANSFERT

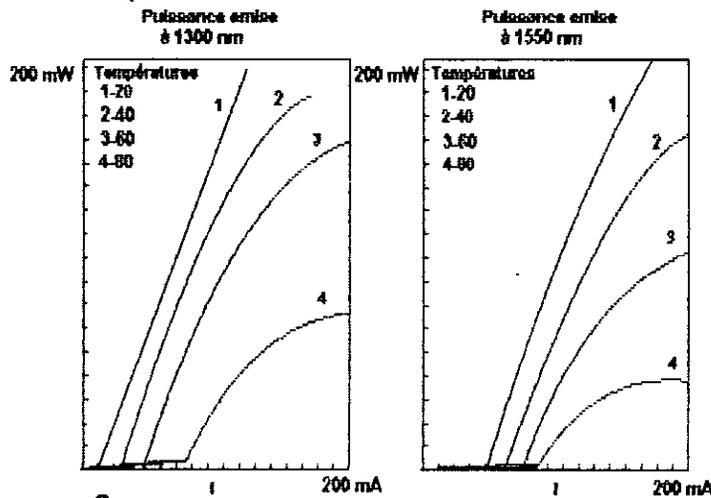


Fig 2.8 caractéristique de transfert pour quatre températures

Quand le courant d'injection I est inférieur au courant de seuil I_s , le laser fonctionne comme une DEL. Pour un courant supérieur au courant I_s , le flux énergétique émis croît linéairement avec le courant.

Deux graphes nous montrent l'évolution du flux énergétique en fonction du courant pour deux fenêtres d'émission (fig 2.8).

- DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

Le diagramme de rayonnement d'une DL dépend des dimensions de la région émissive. La diode laser présente un diagramme très directif ($10^\circ < \theta // < 15^\circ$ et $30^\circ < \theta p < 45^\circ$) d'où la facilité de son couplage à une fibre optique monomode.

$\theta //$: étant l'angle défini dans le plan de la jonction .

θp : étant l'angle défini dans le plan perpendiculaire .

-DOMAINE D'APPLICATION

Le laser est une source à très haute radiance et permet d'injecter une grande partie de la puissance dans tous les types de fibres ,c'est-à-dire plusieurs milliwatts dans une fibre télécom classique ($ON=0,18$ et de diamètre de coeur= $50\mu\text{m}$).

2-2-5 TABLEAU COMPARATIF DES DEUX TYPES DE SOURCES

Matériaux	AlGAs		GaInAsP	
	DEL	DL	DEL	DL
Longueur d'Onde (μm)	0,75-0,9	0,75-0,9	0,9-1,7	0,9-1,7
Largeur Spectrale (nm)	35 à 40	3	120	3
Puissance de Sortie (mw)	1	5	1	5

Le laser convient mieux aux liaisons haut gamme et les DEL pour les liaisons à courte distance et faible débit. En outre, il est nécessaire, lorsqu'on choisit le type de matériaux pour la transmission par fibres optiques, de tenir compte de la spécificité de chacun, à savoir: la largeur spectrale, la longueur d'émission et la possibilité de modulation du rayonnement émis [2].

2-3 TRANSDUCTEURS OPTO-ELECTRONIQUES

Les transducteurs opto-électroniques appelés souvent détecteurs optiques, assurent la conversion du signal optique en un signal électrique. Ces détecteurs doivent répondre à certaines exigences pour qu'ils puissent être utilisés en réception dans les systèmes de transmission.

Il existe deux types de photodiodes:

- photodiode PIN
- photodiode à avalanche PDA

2-3-1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT : [8]

La photodiode en polarisation inverse comprend, quelque soit son type, une zone désertée (ZD) des porteurs électriques libres, soumise à un champ électrique élevé entre les deux régions P et N, où la charge électrique est nulle et le champ électrique très faible.

Les photons d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite du semi-conducteur sont absorbés par création de paires électron-trou, il en résulte :

- toute paire créée dans ZD est séparée par le champ électrique et participe au courant par le passage d'un électron dans le circuit extérieur.
- un électron créé dans la zone P(N) est un porteur minoritaire qui diffuse jusqu'à la

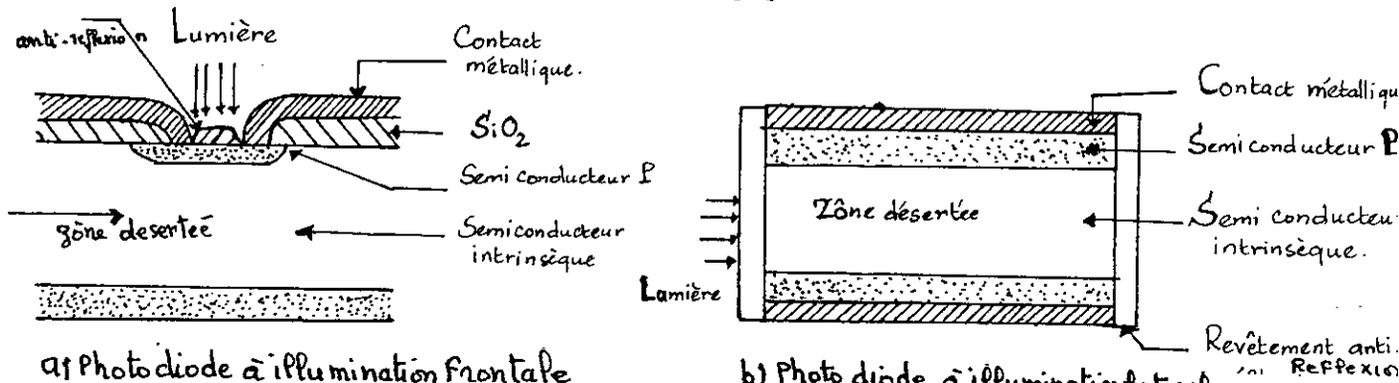
zone ZD, entraîné par le champ, sauf s'il se recombine avec un trou (électron) majoritaire. Dans ce cas, le photon n'aura pas contribué de façon utile au courant.

2-3-2 LA PHOTODIODE PIN

A - STRUCTURE DE LA PHOTODIODE PIN

La structure de la photodiode PIN est caractérisée par la diminution de dopage. Les parties dopées (P) et (N) sont séparées par une zone non dopée dite intrinsèque.

La fig 2.9.a représente une photodiode PIN à illumination frontale tandis que la fig 2.9.b représente celle dont l'illumination est latérale [9].



a) Photodiode à illumination frontale

b) Photodiode à illumination latérale

Fig 2.9 Structure de la photodiode PIN

B-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Dans la photodiode PIN, la zone de transition occupe toute la région intrinsèque et la région P est étroite afin qu'il y ait le moins possible de porteurs créés dans cette zone. Quand on polarise en inverse la PIN, le champ E varie comme c'est indiqué en (fig 2.10).

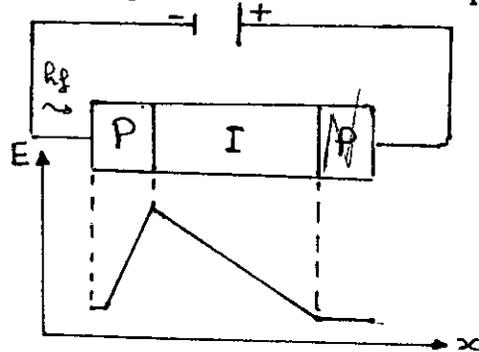


Fig 2.10 Polarisation inverse de la PIN et champ électrique correspondant

Lorsque une paire électron-trou est formée dans la région intrinsèque, le champ électrique existant dirige l'électron vers N et le trou vers P. Comme les zones P et N sont respectivement dépeuplées d'électrons et de trous, il ne peut y avoir recombinaison. Ces charges ainsi récupérées donnent naissance à un courant dans le circuit extérieur, de polarisation

inverse de la diode, appelé photo-courant I_{ph} . Pour une photodiode polarisée en inverse, les paires électron-trou créés dans la zone ZD produisent un courant de fuite appelé courant d'obscurité I_0 qui s'ajoute au photo-courant.

2-3-3 PHOTODIODE A AVALANCHE PDA

A- STRUCTURE DE LA PHOTODIODE PDA

La structure utilisée est dite P. π . P.N. Cette structure s'obtient en partant d'un substrat de Silicium très dopé (P) sur lequel est déposée une couche de Silicium intrinsèque (couche π), on dépose ensuite sur cette couche une zone très mince dopée P suivie d'une autre très dopée (N) pour avoir une jonction P-N.

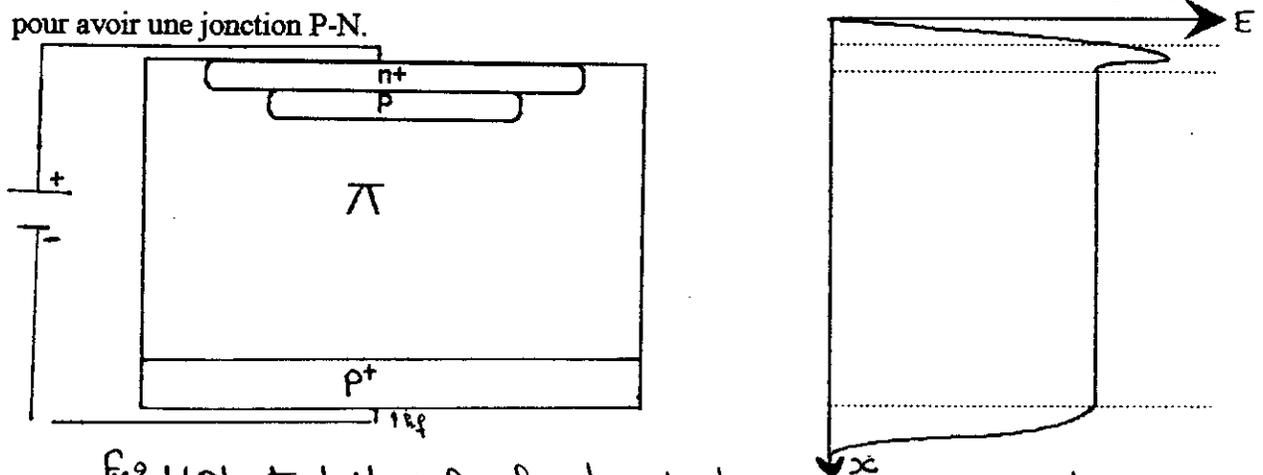


Fig 2.11 Photodiode à Avalanche et champ correspondant

B-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Sous l'action d'un champ électrique suffisamment fort, un porteur pour atteindre le seuil d'ionisation du matériau, et crée, par collision avec un atome du réseau, une paire électron-trou. Si celle-ci à son tour atteint le seuil, elle crée d'autres porteurs et ainsi de suite. Le phénomène devient cumulatif. Il en résulte de cette production de paires électron-trou une multiplication des porteurs collectés, donc du courant par avalanche. Le facteur de multiplication M ou le taux d'amplification est donné par (2.3) d'après [3]:

$$M = 1 / [1 - (V/V_b)^n] \quad (2.3)$$

Avec n allant de 3 à 6

où

V est la tension de polarisation inverse.

V_b est la tension de claquage dans la direction inverse.

$V < V_b$ car si V excède, la diode peut être endommagée d'une façon irréversible.

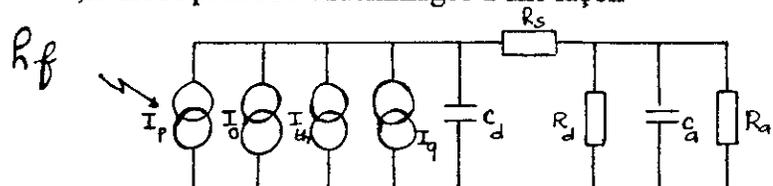


Fig 2.12. Schéma équivalent de la PDA

R_s : Résistance série.
 R_d : Résistance de jonction.
 C_d : Capacité de jonction.

I_{th} : Courant thermique.
 I_q : Courant quantique.
 I_o : Courant d'obscurité.

La fig 2.12 montre le schéma électrique équivalent de la PDA.

2-4 PARAMETRES CARACTERISTIQUES OPTO-ELECTRONIQUES

2-4-1 ABSORPTION [1]

L'absorption d'un flux lumineux dans un matériau suit une loi exponentielle (2.4).

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.4)$$

où : α : le coefficient d'absorption.

x : la distance parcourue dans le matériau.

f : le flux initial.

Le coefficient d'absorption dépend fortement de la longueur d'onde et du matériau utilisé (Fig 2.13)

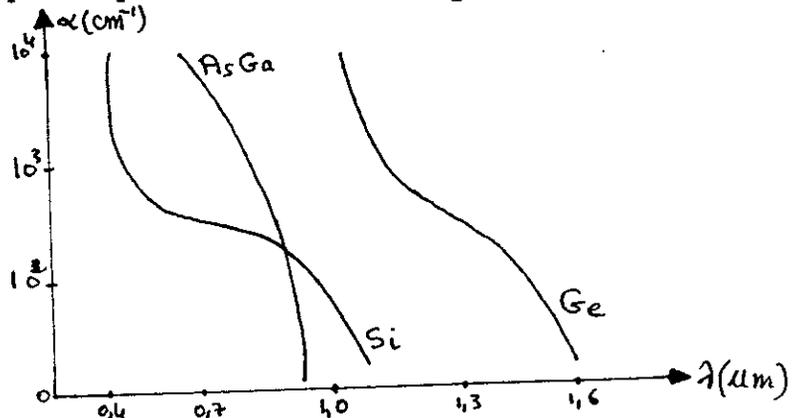


Fig.2.13. coefficient d'absorption en fonction de λ

2.4.2 RENDEMENT QUANTIQUE

Le rendement quantique h donne le nombre moyen de paires électron-trou engendrées par le photon incident. Il est donné par (2.5) : [1]

$$h = (I_{ph}/q) / (f/hf) \quad (2.5)$$

avec $h < 1$ où q est la charge de l'électron.

f est le flux incident.

2.4.3 SENSIBILITE

La sensibilité caractérise le rendement global de conversion de la puissance optique en courant électrique. Elle est définie comme étant le courant fournit par la photodiode pour une puissance optique recue de $1w [E]$:

$$S_d(A/w) = I_{ph}/\phi_0 \quad (2.6)$$

Où ϕ_0 est la puissance optique reçue.

2.4.4 REPONSE SPECTRALE

La réponse spectrale caractérise la sensibilité du détecteur en fonction de la longueur d'onde utilisée (Fig 2.14).

La sensibilité du détecteur doit être plus élevée que possible aux longueurs d'ondes d'émission.

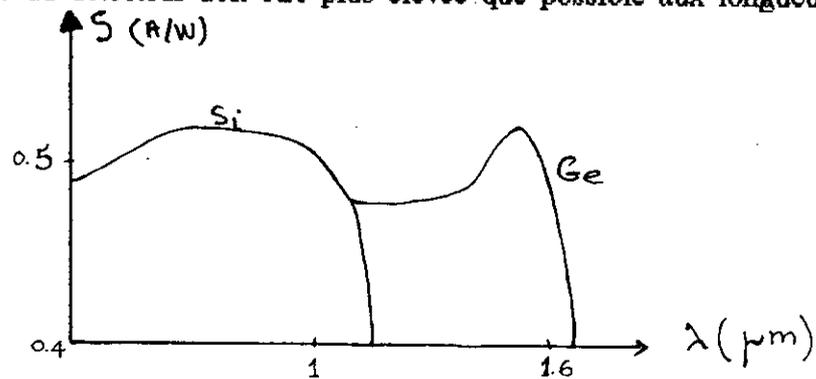


Fig 2.14 Réponse spectrale des détecteurs

2.4.5 RAPIDITE

On peut caractériser la rapidité d'un détecteur par son temps de réponse qui dépend de trois paramètres importants [1]:

A-LA DIFFUSION : Lorsque les photons sont absorbés dans les zones neutres, la vitesse de réponse est limitée par le temps de diffusion des porteurs minoritaires vers la zone ZD, donnée par (2.7)

$$T_{diff} = 1/V_{diff} \quad (2.7)$$

B-LE TEMPS DE TRANSIT: Le temps de transit des porteurs créés dans la zone ZD est donnée par (2.8) :

$$T_1 = W / V \quad (2.8)$$

où W est la largeur de ZD.

V est la vitesse d'entraînement des porteurs.

C -LA CAPACITE DE JONCTION : La capacité de jonction est donnée par:

$$C = \epsilon(A / W) \quad (2.9)$$

où ϵ : est la permittivité diélectrique du semi-conducteur

A : est la surface du détecteur.

Les faibles valeurs de la capacité permettent à la photodiode de détecter les impulsions de quelques centaines de pico-secondes de largeur.

2.4.5 COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS

Le tableau suivant donne quelques valeurs pratiques des caractéristiques des deux types de photodiode [5].

structure	silisium Si		germanium Ge	GaInAsP	
	PIN	PDA	PDA	PIN	PDA
Surface Active (mm ²)	0.2-5	0.2-5	0.1-5	10 ⁻²	10 ⁻²
tension (v)	50-200	250-400	50-100	20	50-100
gain M		100	50		10-50
sensibilité Sd(A/w)	0.5-0.6	20-75	10-30	0,5-0,7	
temps de montée(ns)	0.1-10	0.2-5	0.5	<1	0.2
bruit		M ^{2,3}	M ³		M ^{2,7}
courant d'obscurité(nA)	0.2-10	0.02-10	20-1000	15-50	100

2.6 INFLUENCE DU BRUIT A LA RECEPTION

Le seul inconvénient qui spécifie le système optique est la présence du bruit ,ce qui limite la portée du système et dégrade l'information .Il existe plusieurs sources de bruit,on distingue:

2.6.1 BRUIT DE LA PHOTODIODE

Ce bruit découle de trois origines:

A- BRUIT QUANTIQUE OU DE SHOTTKY : Ce bruit ,dont les effets sont les plus importants,provient de la répartition aléatoire des photons incidents [1] Son expression pour une PIN et une PDA respectivement est donnée par (2.10) .

$$\langle I_s^2 \rangle = 2q \Delta f \quad (2.10)$$

$$\langle I_s^2 \rangle = 2q \Delta f (I_{ph} + I_o) M^{2+x} \quad (2.10) \text{ bis}$$

où: Δf :est la bande passante équivalente de bruit du récepteur

q : est la charge élémentaire

M : est la valeur moyenne du gain de la PDA

x :est le facteur de bruit

I_s :est le courant du signal

Ce qui signifie que dans les récepteurs ,le bruit provient aussi du signal reçu.

B- BRUIT THERMIQUE [1]:Ce bruit ,lié à l'agitation thermique ,apparaît dans la résistance de charge R_c donné par (2.11)

$$\langle I_{th}^2 \rangle = 4KT\Delta f/R_c \quad (2.11)$$

où Test la température de la résistance en kelvin

K est la constante de BOLTZMANN

C-BRUIT DE GRENAILLE DU COURANT D'OBSCURITE : Il est dû à la création des porteurs minoritaires d'origine thermique et au courant de fuite I_f à la surface du semi -conducteur ,son expression simplifiée est:

$$\langle I_o^2 \rangle = \langle I_{th}^2 \rangle + \langle I_f^2 \rangle \quad (2.12)$$

2.6.2 BRUIT DU PREAMPLIFICATEUR

C'est le bruit de la source de courant et de la source de tension. Pour montrer l'influence des différentes sources de bruit, nous donnons un schéma équivalent complet de l'ensemble: photodiode + préamplificateur (fig 2.15)

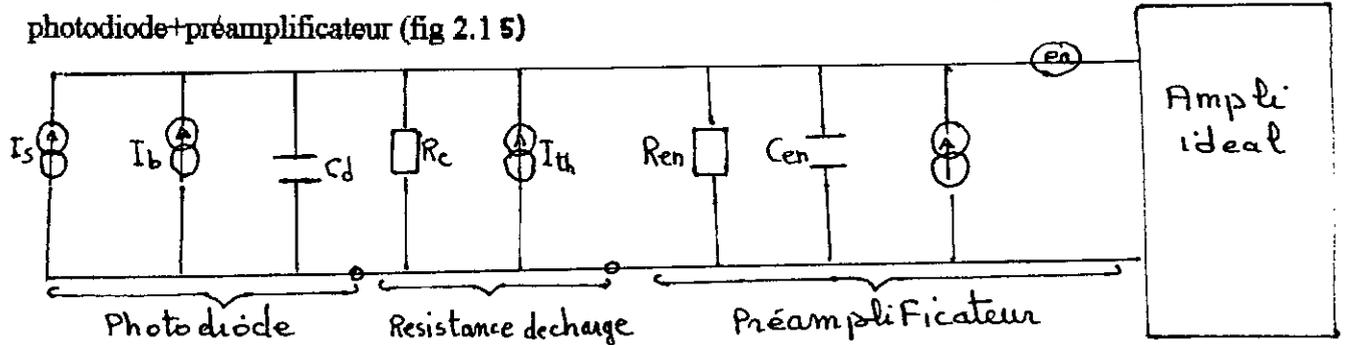


Fig 2.15 Schéma électrique équivalent du photo-récepteur - charge - préampli incluant toutes les sources du bruit

Cd:capacité de jonction +capacité parasite

Ce:capacité d'entrée.

Ib:courant de bruit.

Ith:courant de bruit thermique

Is:courant de signal.

Re:résistance d'entrée.

Rc:resistance de charge

Ea:tension de bruit

Ia:courant de bruit

2.7 RAPPORT SIGNAL /BRUIT

Ce rapport caractérise l'importance du signal par rapport au bruit. Pour assurer une bonne détection, la puissance ne doit pas être inférieure à la puissance du bruit. Le rapport signal /bruit (S/B) est défini comme étant le rapport entre la valeur moyenne du carré du courant dû à la puissance lumineuse et la puissance du bruit total [1].

$$S/N = \langle I_{ph}^2 \rangle / \langle I_{tot}^2 \rangle \quad (2.13)$$

CHAPITRE 3

MODES DE TRANSMISSION SUR FIBRES OPTIQUES

3.1 MODULATION OPTIQUE

La modulation optique consiste à modifier les paramètres de la lumière en fonction du signal de commande (courant ou tension électrique). Il existe deux méthodes distinctes pour moduler les ondes optiques [4]:

A-La modulation extérieure: un modulateur optique externe est situé dans le faisceau de sortie de la source non modulable.

B-La modulation directe: dans ce cas, la source elle-même qui fait varier sa sortie: c'est cette modulation qui fera l'objet de ce présent chapitre.

3.1.1 MODULATION OPTIQUE DIRECTE

La variation de la puissance optique suivant le signal électrique d'entrée peut se faire de deux manières:

-CONTINUE: Proportionnellement au signal électrique. En optique, ce procédé est plus souvent appelé modulation optique d'intensité IM.

-DISCRETE: généralement binaire, selon un procédé désigné ici par modulation optique "tout-ou-rien" ("OOK"). Le signal électrique est alors une suite d'impulsions d'amplitude constante et porteuses d'information analogique dans le temps ou numérique. Dans ce cas, le récepteur doit décider à chaque instant entre deux possibilités :

*Présence de la lumière à la sortie de la fibre : état binaire "1"

*Absence de la lumière à la sortie de la fibre : état binaire "0"

On distingue deux principaux modes de transmissions compatibles avec la fibre optique :

-La transmission analogique

-La transmission numérique

3.2 TRANSMISSION ANALOGIQUE

On distingue trois familles de modulation de l'onde lumineuse, permettant le transfert d'informations analogiques:

-La modulation d'intensité (IM)

-La modulation de fréquence (FM)

-La modulation d'impulsions en position (PPM)

3.2.1 MODULATION D'INTENSITE (IM)

Le signal à transmettre en bande de base module directement l'intensité lumineuse de la source. Cette modulation est directement affectée par la linéarité du composant (fig 3.1).

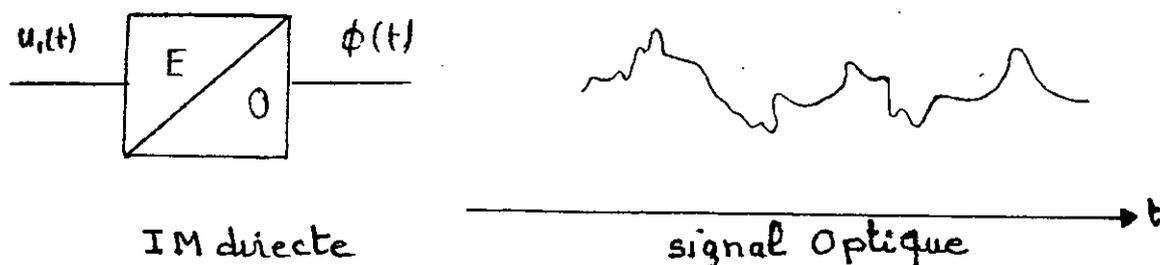


fig 3.1 Principe de la modulation d'intensité

a-distorsion non linéaire:

La fig 3.2 montre la caractéristique de transfert: puissance optique émise en fonction du courant de modulation [4].

Où M est le point moyen autour duquel s'effectue la modulation .
Le taux de modulation autour de ce point est donné par (3.1):

$$m = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (3.1)$$

b-rapport S/N et puissance optique

La fig 3.3 indique les variations des puissances optiques minimales en fonction du rapport S/N pour un signal ayant une bande passante de 6 Mhz [4].

3.2.2 MODULATION DE FREQUENCE

C'est une combinaison d'une modulation électrique FM suivie d'une modulation optique IM par le signal $U_2(t)$ à amplitude constante mais à fréquence variable (fig 3.4).

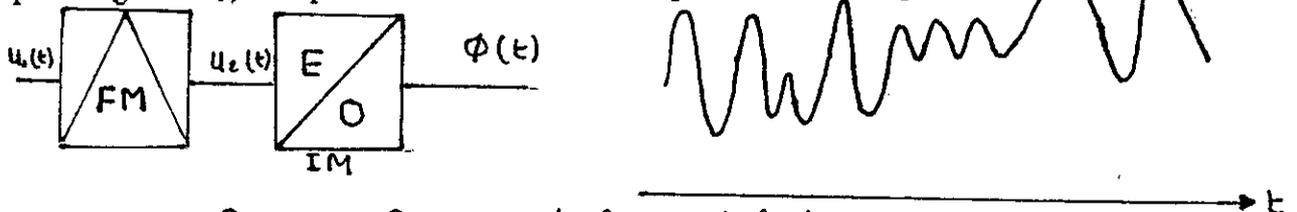


Fig 3.4 Principe de la modulation de fréquence

3.2.3 MODULATION DES IMPULSIONS EN POSITION

C'est une modulation électrique d'impulsions sous forme temporelle PPM ou PFM. Le signal $U_2(t)$ ne prend alors que deux valeurs d'amplitude (U_p et 0). Ce qui permet une modulation optique "tout-ou-rien".

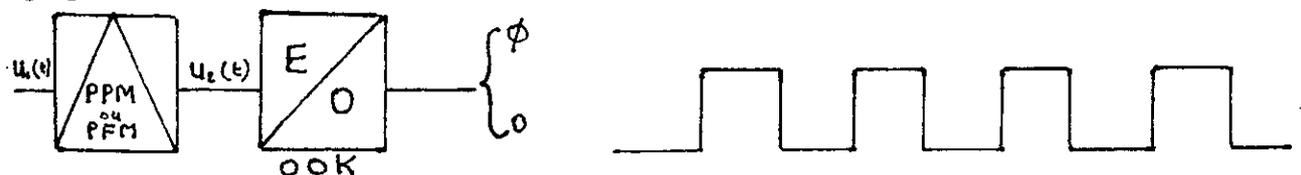


Fig 3.5 Principe de la modulation des impulsions en position

3.3 COMPARAISON DES MODULATIONS

La modulation en intensité est la plus simple à réaliser. Elle est sensible aux non-linéarités de l'émetteur, ce qui impose des taux de modulation faibles et corrélativement des puissances reçues élevées.

La modulation de fréquence présente des rapports S/N plus élevés et des distorsions faibles, mais elle a l'inconvénient de nécessiter une bande passante plus large.

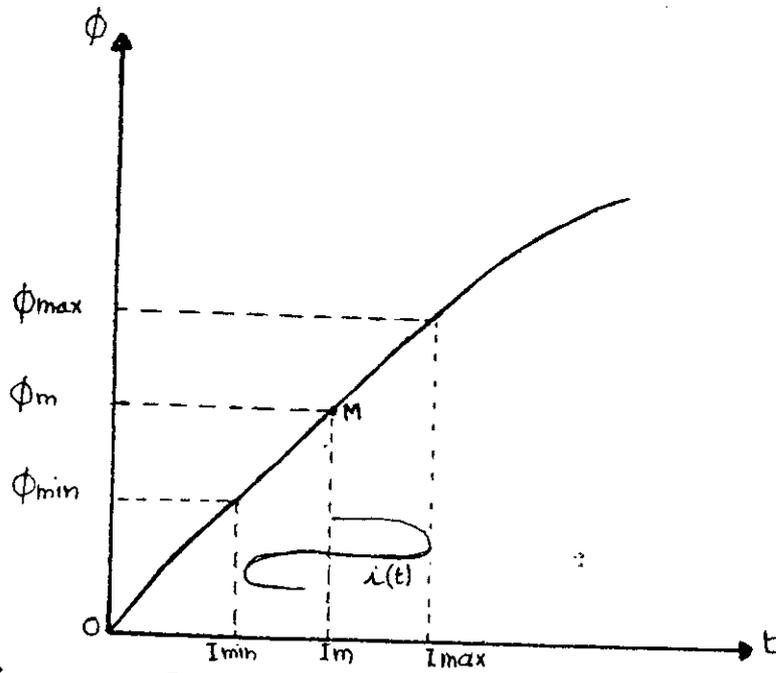


Fig 3.2 Puissance optique émise en fonction du courant de modulation

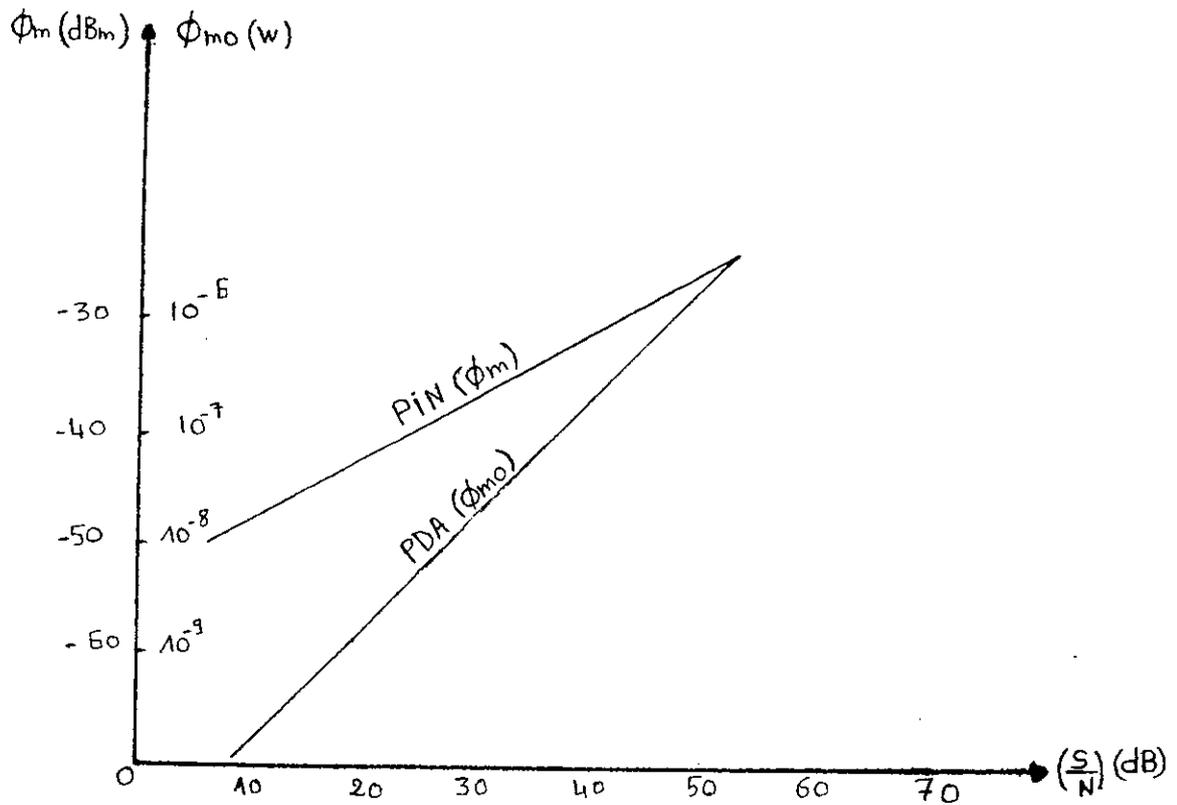


Fig 3.3 Variation de la puissance optique en fonction de S/N

La modulation des impulsions en position est la plus difficile à mettre en oeuvre. La faible largeur des impulsions nécessite une large bande passante des récepteurs, ce qui complique sa réalisation.

3.4 TRANSMISSION NUMERIQUE

3.4.1 PRINCIPE:

Toute transmission numérique se traduit par une émission/réception de signaux binaires scandés par une horloge. A la réception, on doit restituer l'information d'horloge du signal qu'on adjoint directement à l'information transmise. Le mode de transmission doit être adapté aux conditions particulières des liaisons optiques [2] à savoir:

- Unipolarité du signal électrique $U_2(t)$
- De préférence, l'utilisation du mode binaire
- La puissance optique moyenne doit être constante et indépendante de la statistique des états binaires, d'où une densité spectrale de puissance très faible aux basses fréquences.
- Une bonne teneur en horloge
- Une simplicité de conversion de mode entre l'interface électrique d'entrée et le signal $U_2(t)$ appliqué au modulateur optique.
- Une possibilité de détection d'erreurs.

3.4.2 MODULATION NUMERIQUE : PROCEDE PCM

Parmi les procédés de transmission numérique, on distingue la modulation numérique, qui consiste à convertir une information analogique, portée par un signal à variation continue, en une séquence de caractères discrets, issus d'un alphabet fini.

Pour l'élaboration de signal numérique, trois opérations sont nécessaires: l'échantillonnage, la quantification et le codage: C'est le principe de la modulation PCM (ou MIC).

ECHANTILLONNAGE

Enoncé du théorème d'échantillonnage (théorème de SHANNON): Un signal analogique $x(t)$ ayant un spectre de type passe-bas s'étendant jusqu'à la fréquence f_{max} est entièrement décrit par la suite complète de ses valeurs instantanées $x_e(kT_e)$ prélevées à des intervalles réguliers de durée $T_e \leq 1/2f_{max}$.

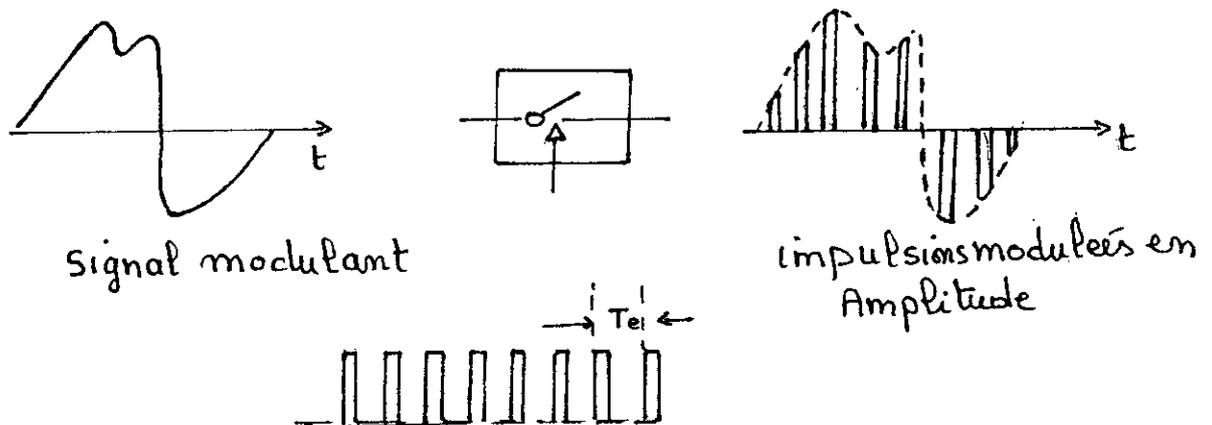


Fig 3.7 Principe de l'échantillonnage

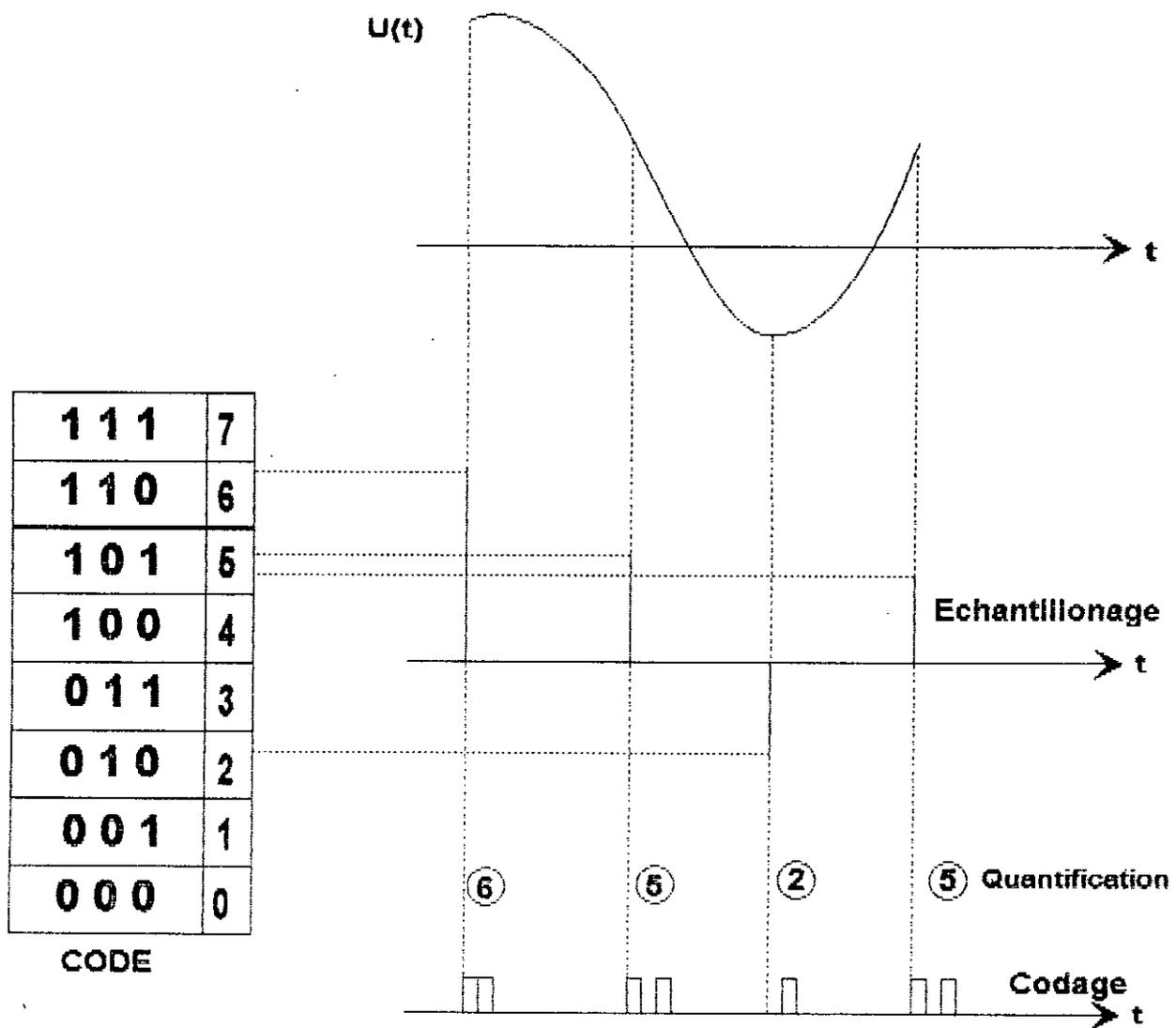


Fig.3.6. PRINCIPE DE LA MODULATION M.I.C ($q = 2^3 \cdot 8$).

Conséquence: Le théorème d'échantillonnage correspond au fait aux conditions de non chevauchement des translatsés (fig 3.8).

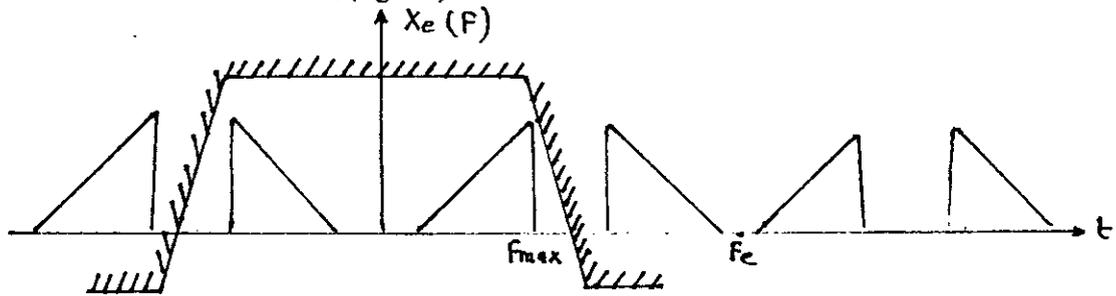
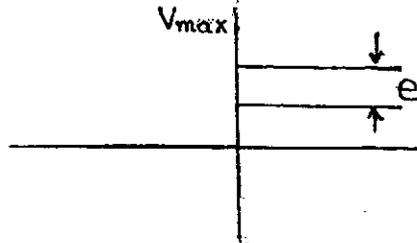


Fig 3.8 Principe de non chevauchement des translatsés
QUANTIFICATION

La quantification est l'approximation de chaque valeur du signal $x(t)$ par une multiple entier d'une quantité élémentaire q appelé pas de quantification. Si q est constant quelque soit l'amplitude du signal, la quantification est dite uniforme, sinon, la quantification est dite non uniforme. L'opération de quantification revient à faire passer le signal $x(t)$ ou $x(kT_e)$ à travers un organe ayant une caractéristique d'entrée-sortie sous forme d'une marche d'escaliers (fig 3.9) Il existe deux types de quantification :

- quantification par troncature
- quantification par arrondi

La valeur d'un échelon $e = 2V_{max}/2^N$ avec N : nombre d'éléments binaires.



CODAGE

PRINCIPE:

Chaque niveau de quantification est représenté par un nombre binaire à huit moments (soit $2^8=256$ niveau possible de quantification).

La correspondance entre l'information- sous sa forme binaire simple (0 ou 1)-à transmettre et le signal numérique modulant l'émetteur est le code de transmission ou code en ligne. L'opération de mise en oeuvre s'appelle transcodage .

CRITERES DE CHOIX DU CODE DE TRANSMISSION

Lors du choix du code de transmission, on doit tenir compte de certains points tels-que:

-Le spectre en bande de base doit être le plus étroit possible pour limiter les bruits à la détection.

-La possibilité de récupération facile du signal d'horloge

-Le code de transmission doit pouvoir représenter n'importe quelle séquence binaire

-Supervision du taux d'erreurs lors de la transmission

-Facilité de mise en oeuvre

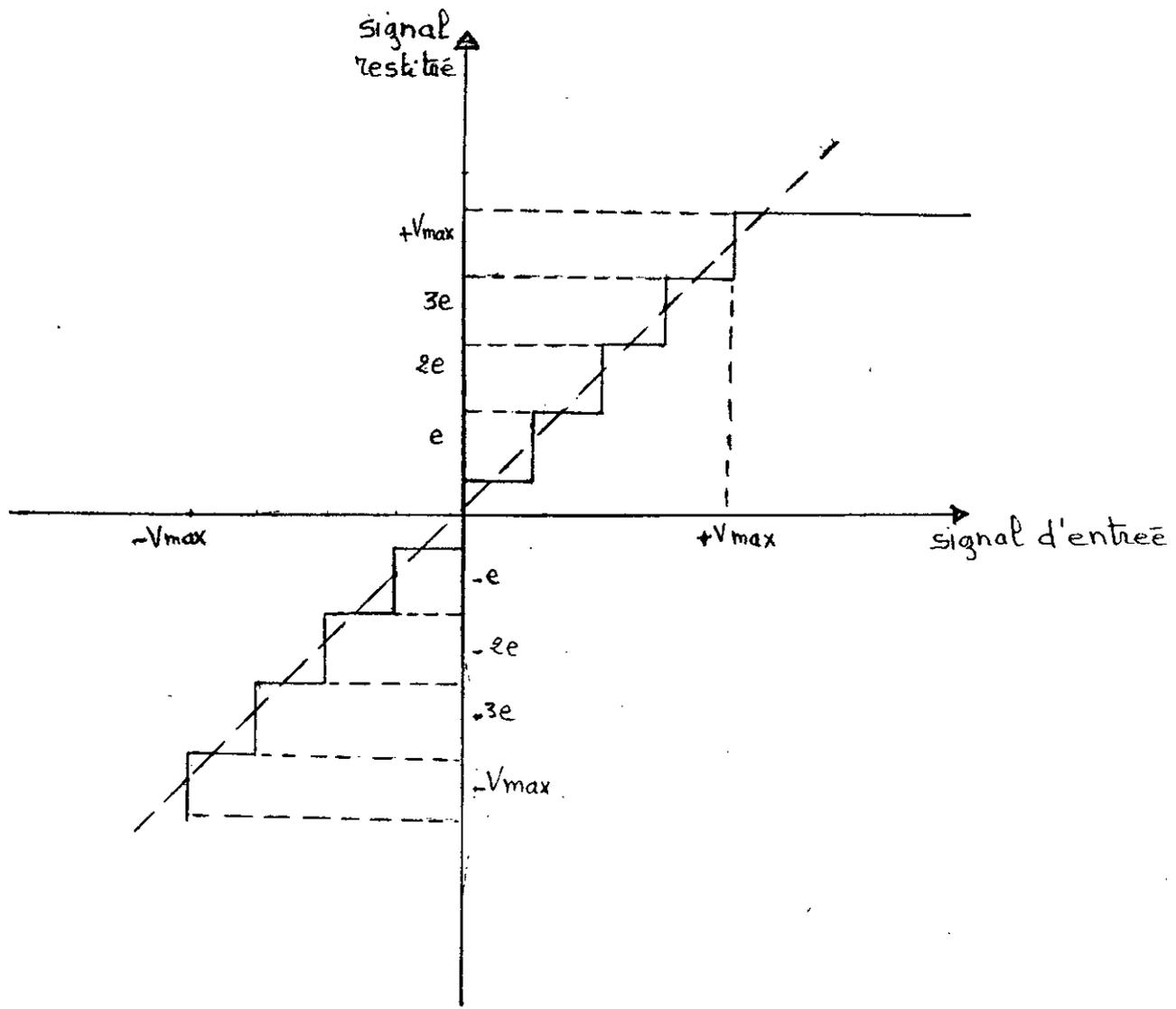


Fig 3.9 L'allure de la loi de quantification

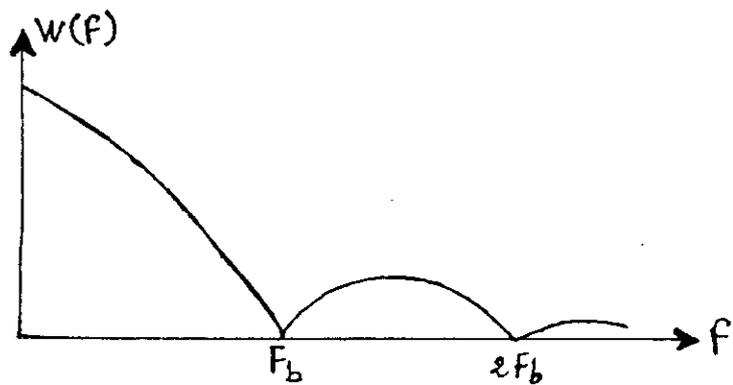


Fig 3.11 spectre du mode NRZ

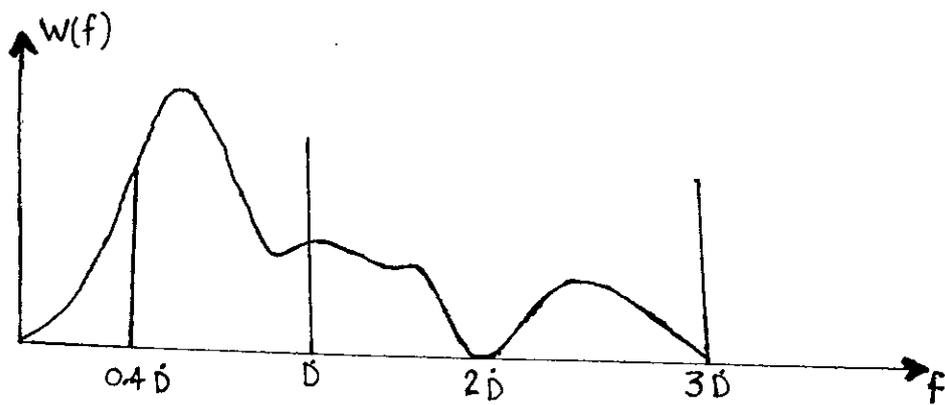


Fig 3.12.6 Spectre du mode CMI

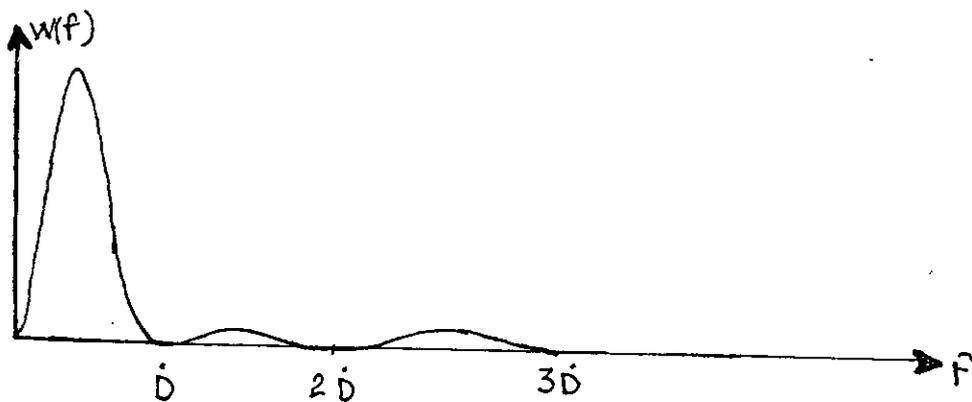


Fig 3.13 Spectre du mode AMI

LES DIFFERENTS MODES NUMERIQUES DE TRANSMISSION OPTIQUE

MODE NRZ:

Après codage, le signal numérique se présente comme une suite de "0" et de "1" appelé code NRZ (non retour à zéro) (fig 3.10)

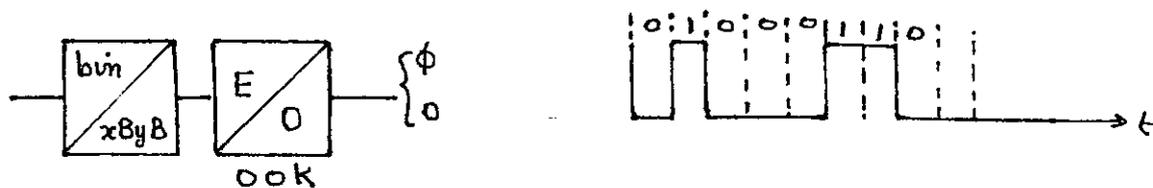


Fig 3.10 Principe du mode NRZ

D'après le spectre de puissance du NRZ (fig 3.11) on remarque:

- La présence d'énergie aux basses fréquences
- L'absence d'énergie à la fréquence f_b

D'où l'opération de transcodage qui va permettre de modifier le spectre de puissance du signal reçu codé en NRZ. Le but recherché est:

- de permettre la récupération de l'horloge nécessaire à la régénération du signal en ligne et à l'extrémité distante.
- d'éliminer l'énergie aux basses fréquences pour permettre l'utilisation de transformateurs.

En conséquence et du fait de la non présence de l'information d'horloge dans le code NRZ, on est amené à procéder par embrouillage afin de pouvoir augmenter le nombre de transitions, donc la teneur en horloge.

L'introduction du code de type $xByB$ (avec $y < x$ éléments binaires) permet à la fois de garantir une bonne teneur en horloge suffisante et surveiller le taux d'erreur grâce à l'introduction d'une légère redondance [2]. Ainsi le code 5B6B (donné en annexe) est le code de transmission le plus utilisé en ligne.

MODE CMI (coded mark inversion) dont le spectre de puissance est donné par fig 3.12.



Fig 3.12.a Principe du mode CMI

Le code CMI est le mode binaire favorable à la transmission optique vu ses caractéristiques :

- pauvreté en basse fréquence d'où constance de la puissance optique moyenne
- présence d'une raie à \dot{D}

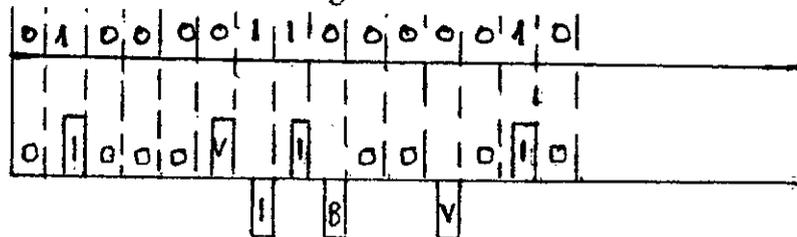
L'inconvénient de ce mode est l'occupation d'une largeur de bande supérieure aux mode binaire simple.

MODE HDB3 (code à haute densité binaire d'ordre 3)

Ce code consiste à supprimer les suites de plus de trois zéro consécutifs. Pour se faire, le quatrième zéro est remplacé par un "1". Afin de pouvoir reconnaître ce "1" à la réception, on profite de la bipolarité du code pour l'émettre en viol de polarité.

Toutefois, si on a une longue suite de zéro, on constate que tous les viols de bipolarité sont tous de même polarité. Dans ce cas, la valeur moyenne du signal n'est plus nulle. Il faut donc rajouter une deuxième règle au code HDB3, on cite:

-Il faut que deux viols successifs soient de polarités opposées, on est dans ce cas obligé de rajouter un "1" supplémentaire dit "1" de bourrage.



La règle de HDB3 devient:

-Lorsque le nombre de "1" entre deux viols successifs est impair, on émet la séquence 000V.

-Lorsque ce nombre est pair, on émet la séquence B00, ainsi le spectre se trouve très légèrement modifié.

MODE MCMI (modified coded mark inversion)

Ce mode permet d'adapter directement le mode électrique HDB3 à une émission binaire (fig. 3.13) pour une transmission à 8.448 Mbit/s.

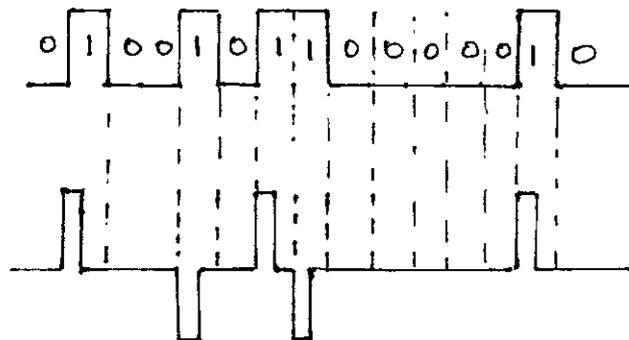


Fig 3.13 Mode MCMI

MODE AMI

C'est un mode antipolaire et ternaire dans lequel :

-L'état "0" est représenté par un signal nul .

-L'état binaire "1" est représenté ,alternativement ,par un signal positif et négatif ,de durée égale à $1/D$.

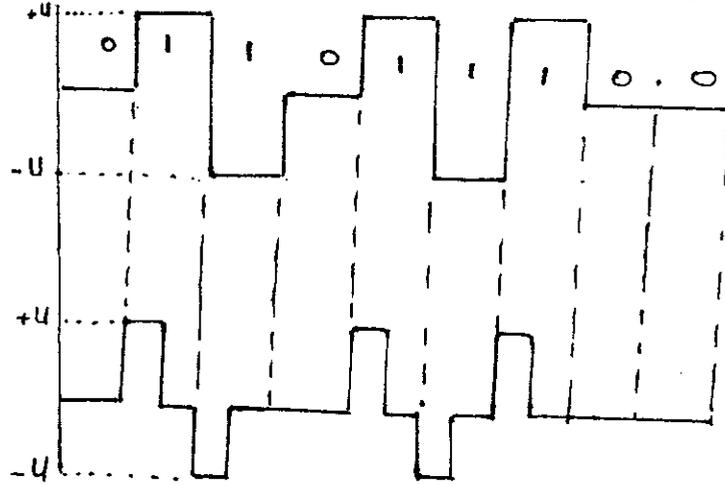


Fig 3.14 Mode AMI

U est l'amplitude du signal élémentaire de base .

Ce mode très simple à réaliser ,présente les caractéristiques suivantes

- La densité spectrale de puissance d'une séquence binaire aléatoire émise selon ce mode est faible aux basses fréquences,nulle à D et à ses multiples,maximum pour $f=0.45D$.
- Elle contient pas la fréquence correspondant à D ,mais des raies sont presentes aux multiples de $f_0 = 8 \text{ Khz}$.
- Le redressage du signal AMI-RZ ,à la réception,fournit un signal RZ binaire dont le spectre s'annule aux multiples de $2D$ et présente une raie à D .
- Présentation d'une bonne teneur en horloge.

3.4.3 DECODAGE

Le circuit de réception ,doit, pour reconstituer le signal ,assurer deux fonctions:

- Une fonction de détection de seuil qui permet de discriminer les niveaux hauts et les niveaux bas du signal reçu.
- Une fonction de reconstitution d'horloge permettant la lecture correcte des séquences binaires émises.

3.4.4 TAUX D'ERREUR

L'erreur de transmission de données ou de perturbation du signal émis dépend :

- De la limitation de la bande passante de la fibre et du récepteur provoquant l'interférence inter-symboles.
- Les impulsions parasites

On définit la qualité de transmission par son taux d'erreur TEB

$TEB = \text{nombre de bit faut} / \text{nombre de bit utilisé}$

Si le taux d'erreur $<10^{-9} = 12\text{dB}$, on a une bonne transmission.
En outre, si la bande passante du bloc de traitement après la détection est supérieure à la bande passante de la fibre, on aura un taux d'erreur qui diminue.

3.4.5 CONCLUSION

Le domaine de prédilection des liaisons optiques est la transmission numérique et ceci pour les avantages qu'offre cette dernière. En effet, les transmissions analogiques sont lentes et présentent des bruits gênant telle que la diaphonie.

Par contre la transmission numérique s'adapte parfaitement aux fibres optiques constituant ainsi un moyen de transmission à large bande.

D'où l'utilité d'étudier, en particulier, des liaisons numériques par fibres optiques.

CHAPITRE 4

PLANIFICATION D'UNE LIAISON NUMERIQUE PAR FIBRES OPTIQUES

4.1 DEFINITION

On entend par planification ,la détermination de tous les paramètres d'un système en fonction des exigences du moment et de leur évolution présumé dans le temps.

4.2 PARAMETRES

La planification d'une liaison numérique par fibres optiques fait intervenir plusieurs paramètres indépendants ,à considérer en fonction de la qualité de transmission exigée et des critères économiques .Ces paramètres sont:

- Le débit binaire D à transmettre
- La longueur l de la liaison
- Le taux d'erreurs par bit (TEB) acceptable
- L'espacement L_0 des régénérateurs ,appelé aussi pas de régénération.

Pour un type de fibre donné ,les paramètres caractéristiques sont:

- L'affaiblissement A_0 de l'enveloppe du signal optique après une distance l .
- La dispersion modale et chromatique
- L'affaiblissement supplémentaire dû aux épissures ,aux connecteurs et au couplage optique imparfaits entre transducteurs et fibres.
- Le temps de réponse des transducteurs

4.3 METHODE

Le taux d'erreur exprime la qualité de transmission du système .Il dépend de deux facteurs:

- L'influence du bruit
- L'apparition d'interférence entre moments ,dûs à la dispersion modale et chromatique.

Le diagramme en oeil illustre l'effet combiné des deux facteurs .La planification d'une liaison numérique par fibre optique considère ces deux effets séparément:

- Le bilan énergétique:Il permet de s'assurer que le rapport S/B optique à la réception est suffisant pour donner un taux d'erreur minimum.
- L'évaluation de la dispersion (largeur de bande):Elle donne une idée de l'empiètement des impulsions sur les autres,donc de l'interférence entre moments.

4.4 BILAN ENERGETIQUE

Le bilan énergétique consiste à évaluer tous les affaiblissements optiques entre émetteur et récepteur,dont la somme reste inférieur à A_{\max} ,compte tenu d'une marge de sécurité [2].

L'affaiblissement max tolérable pour la liaison est donné par (4.1).

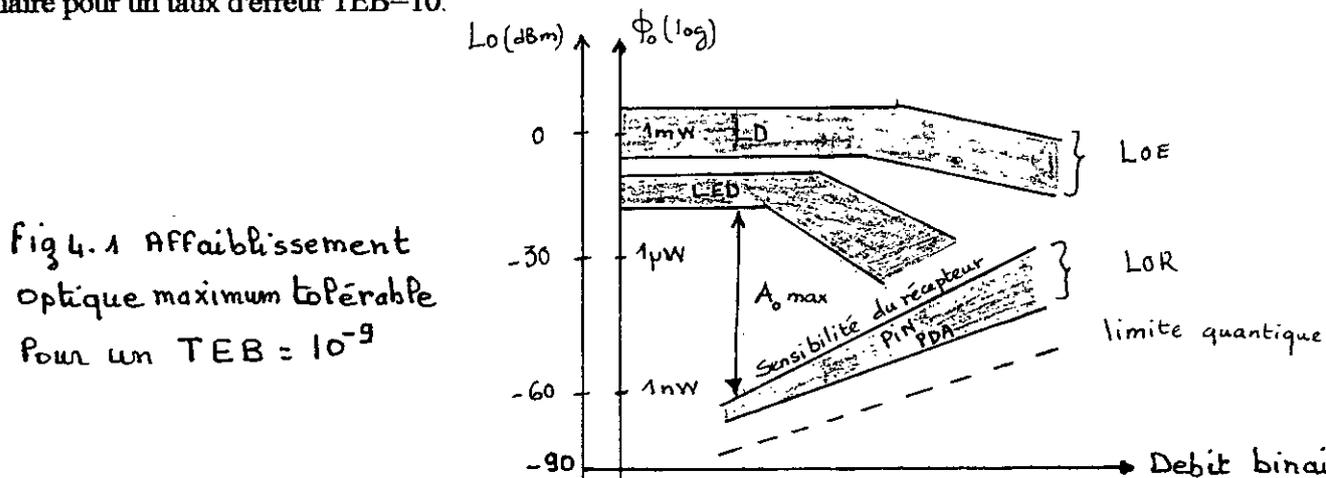
$$A_{\max} = 10 \log \phi_0 / \phi_0 \text{ rmin} = L_{oe} - L_{ormin} \quad (4.1)$$

où L_{oe} est le niveau de puissance optique de l'émetteur

L_{ormin} est le niveau absolu minimal de puissance optique du récepteur qui représente le seuil de détection .Il dépend du rapport S/B requis ou TEB selon l'utilisation que l'on veut faire du signal récupéré.

Il faut donc que la puissance optique arrivant au détecteur soit au moins égale au seuil de détection.

La fig 4.1 donne les ordres de grandeurs de L_{OE} et de L_{OR} en fonction du débit binaire pour un taux d'erreur $TEB=10^{-9}$.



Le bilan énergétique peut estimer le débit max possible sur une liaison dont tous les paramètres sont connus, ainsi que la longueur maximale possible de la liaison pour une fibre de coefficient d'atténuation α .

4.4.1 MARGE DE SECURITE

C'est une perte supplémentaire que l'on rajoute fictivement et qui permet d'avoir une tolérance d'erreur dans la liaison. Elle doit en plus tenir compte du vieillissement de l'émetteur et être suffisante pour compenser cette dégradation.

4.4.2 PORTEE MAXIMALE

La portée maximale des systèmes de transmission sur fibres optiques est la longueur maximale possible de la liaison sans introduire les répéteurs.

Le tableau suivant donne quelques valeurs des portées pour une fibre multimode à gradient d'indice à 2.5dB/km, avec $B=1\text{Ghz.km}$ et $\lambda=850\text{nm}$

Debit Binaire Mbit/s	2	8	34	140
DEL-PIN	12*	10	≤ 8	
DEL-PDA	16*	14	≤ 12	
LD-PIN	20*	18	16	14
LD-PDA	25*	23	21	≤ 19

*On peut utiliser une fibre à saut d'indice de 30 Mhz.0 km de bande passante.

4.5 EFFET DE LA DISPERSION

La réponse impulsionnelle $h(t)$ d'une fibre optique est l'enveloppe du signal optique à la sortie de la source, lorsqu'on émet à l'entrée une impulsion supposée rectangulaire de lumière extrêmement brève.

La fig 4.2 donne la forme de $h(t)$, normalisée par rapport à sa valeur maximum, en fonction de la longueur l d'une fibre à saut d'indice.

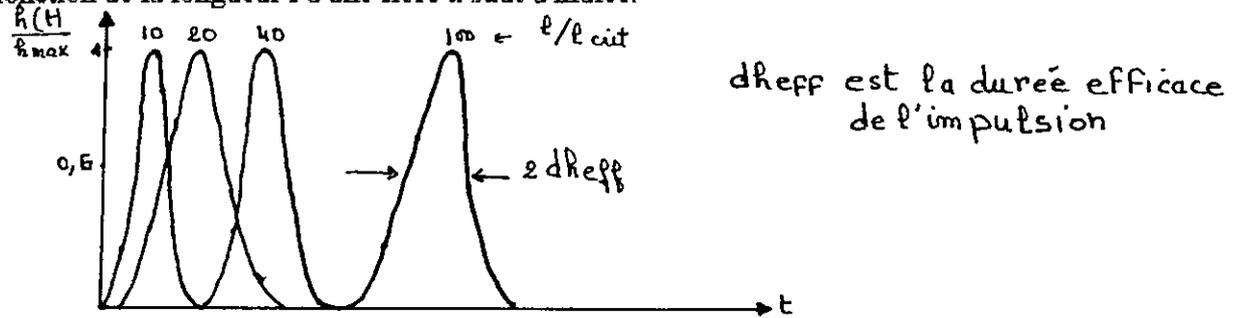


Fig 4.2 Réponse impulsionnelle d'une fibre à saut d'indice

La dispersion modale de la fibre conduit à une réponse impulsionnelle dont la durée efficace est $d h_{eff}$ à laquelle s'ajoutent les effets de la dispersion chromatique et des temps de réponse des transducteurs. D'où (4.2)

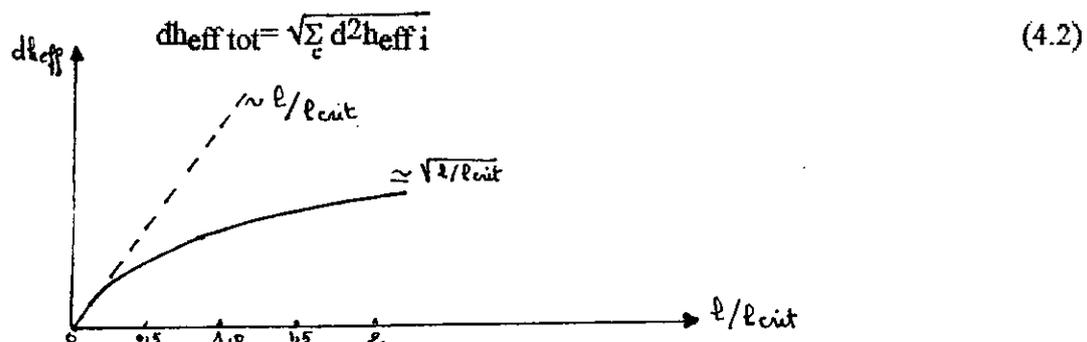


Fig 4.3 Effet de la longueur sur la durée efficace de la réponse impulsionnelle

Pour les fibres multimodes, la dispersion modale est la plus importante, car $d h_{eff}$ croît avec la longueur de la fibre linéairement pour une longueur $l < l_{crit}$, au delà de cette longueur, le couplage des modes fait croître $d h_{eff}$ proportionnellement à l .

La fig 4.3 montre l'effet de la longueur sur la durée efficace de la réponse impulsionnelle.

Il est possible de réduire au minimum les effets de la dispersion chromatique par un choix judicieux de la longueur d'onde. En pratique, on peut recourir aux fibres monomodes qui sont exemptes de la dispersion modale.

4.6 DIAGRAMME EN OEIL

Le diagramme en oeil permet de savoir, à la réception, si un signal numérique est reconnaissable; c'est à dire évaluer l'interférence des moments lorsqu'ils se succèdent à un débit D , et estimer l'immunité au bruit du récepteur.

C'est une figure périodique obtenue en superposant toutes les configurations possible d'une séquence d'éléments de signal (Fig 4.4) et (Fig 4.5).

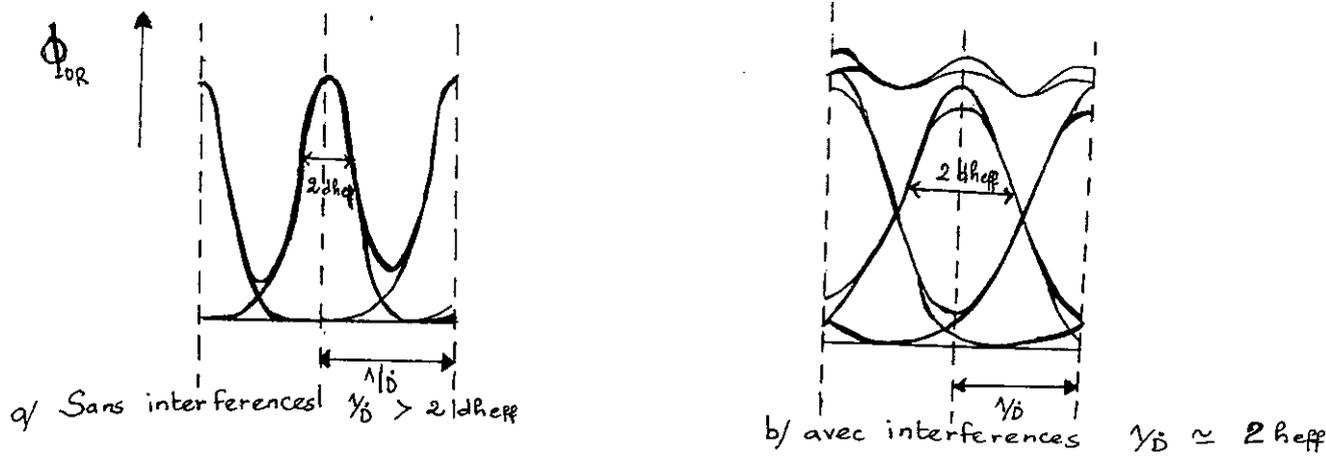


Fig 4.4 Diagramme en œil à la réception en l'absence du bruit

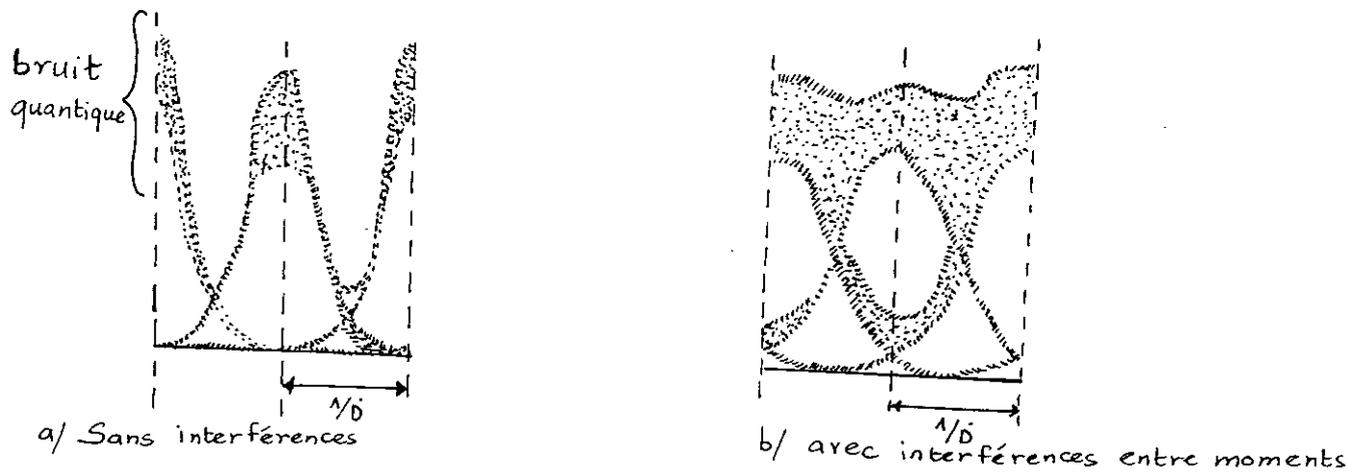


Fig 4.5 Diagramme en œil à la réception perturbé par le bruit.

4.7 LARGEUR DE BANDE OPTIQUE

Par définition, la largeur de bande optique B_o est l'intervalle spectral de la caractéristique de la fibre, en dehors duquel l'affaiblissement est plus profond que -3dB (puissance optique) [14].

Pour une fonction de transfert optique $H_o(f)$ de type gaussien, la largeur de bande optique B_o est donnée par (4.3).

$$B_o(\text{Hz}) = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2\pi} d_{\text{eff}}} = 0.19/d_{\text{eff}} \quad (4.3)$$

Elle est donc inversement proportionnelle à la durée efficace de la réponse impulsionnelle d_{eff} , qui dépend de la longueur l de la fibre [2].

La fig 4.6 montre l'évolution de la largeur de bande en fonction de cette longueur.

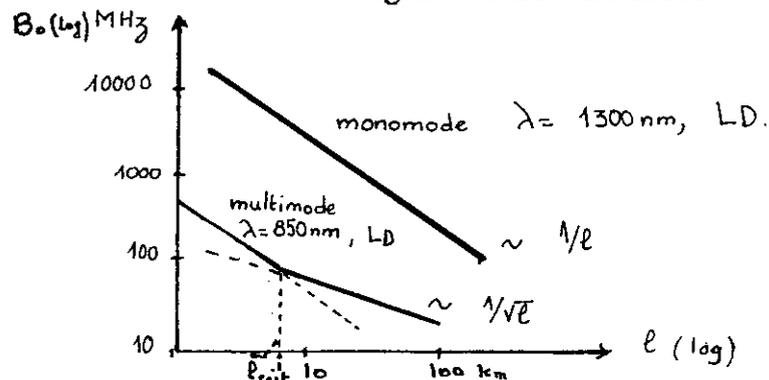


Fig 4.6 Evolution de la largeur de bande en fonction de la longueur l

Les effets de la dispersion chromatique sont des facteurs de limitation de la largeur de bande optique des fibres, en particulier, pour les sources à large raies spectrales.

Dans le cas d'une transmission optique numérique, le débit maximum possible en fonction de la largeur de bande optique est donnée par (4.4) d'après [2]

$$D_{\text{max}} = 1.25 B_o \quad (4.4)$$

4.8 BILAN DE BANDE PASSANTE

Dans un système de transmission sur fibres optiques, la source optique, la fibre et le détecteur optique sont limités en fréquence. On peut donc les considérer comme des filtres passe-bas en série qui limitent la plus haute fréquence transmissible [1].

Si le signal à transmettre est analogique, la bande passante requise B pour transmettre l'information est la plus haute fréquence à transmettre. On peut associer à la bande passante requise B , un temps de montée minimal requis pour le système T_s tel que :

$$T_s = 0.35/B \quad (4.5)$$

Une fois connu le temps de montée minimal requis, il faut vérifier si la source optique, la fibre optique et le détecteur ont des temps de montée suffisamment courts.

4.8.1 TEMPS DE MONTEE DE LA FIBRE

Si on injecte dans la fibre optique un flux énergétique $P_o(t)$ sous forme d'échelon unité, à l'extrémité de la fibre, le flux énergétique passe progressivement de zéro à sa valeur maximale à cause de la dispersion (fig 4.7).

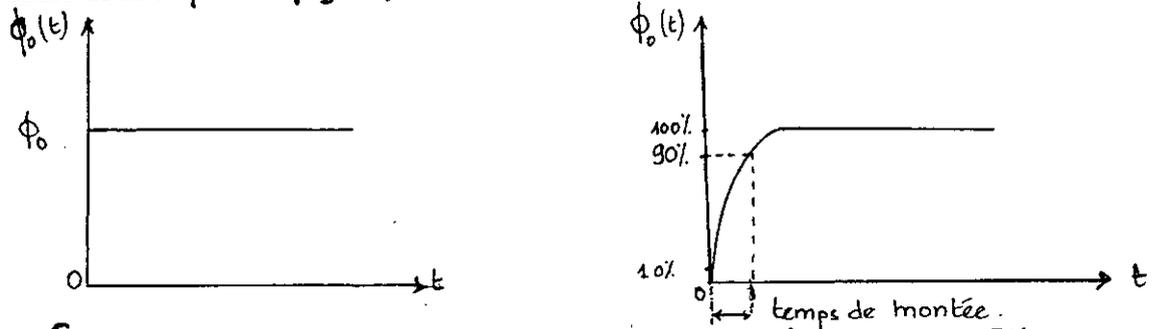


Fig 4.7 Puissance optique avant et après injection dans la fibre

On peut associer à cette montée progressive un temps de montée donnée par (4.6) pour une fibre optique de longueur l km.

$$\Delta t_{\tau}(\text{ns/km}) = 1.1 (\Delta t_m^2 + \Delta t_c^2)^{1/2} \quad (4.6)$$

où : Δt_m : délai dû à la dispersion modale
 Δt_c : délai dû à la dispersion chromatique

Le temps de montée d'une fibre de longueur l est donc (4.7):

$$T_{f.o}(\text{ns}) = \Delta t_{\tau} \cdot l \quad (4.7)$$

Le temps de montée minimal requis pour le système est T_s .

Le temps de montée total T_t du système (source, fibre, récepteur) est:

$$T_{\tau} = 1.1 [T_{s0}^2 + T_{fo}^2 + T_{do}^2]^{1/2} \quad (4.8)$$

où T_{s0} : temps de montée de la source
 T_{do} : temps de montée du détecteur

On doit avoir $T_{\tau} < T_s$: condition fondamentale dans l'étude du système car elle détermine le choix des composants, ainsi que la longueur maximale de la liaison.

4.9 ESPACEMENT ENTRE LES REGENERATEURS

Le choix de l'espacement des régénérateurs dépendra de deux facteurs:

- L'affaiblissement de l'enveloppe du signal optique.
- La dispersion

Pour les systèmes fonctionnant aux débits faibles et moyens, l'affaiblissement est généralement le facteur limitatif.

Aux débits élevés, la dispersion constitue le principal facteur de limitation, et l'espacement entre les régénérateurs se réduit considérablement.

L'utilisation des fibres multimodes à gradient d'indice impose une limite à l'espacement entre les régénérateurs aux vitesses élevées, cela provient de ce que la largeur de bande des fibres que l'on peut atteindre est limitée par l'étalement des impulsions. La fig 4.8 donne l'espacement max entre les régénérateurs en fonction du débit binaire dans les systèmes utilisant des fibres à gradient d'indice [10].

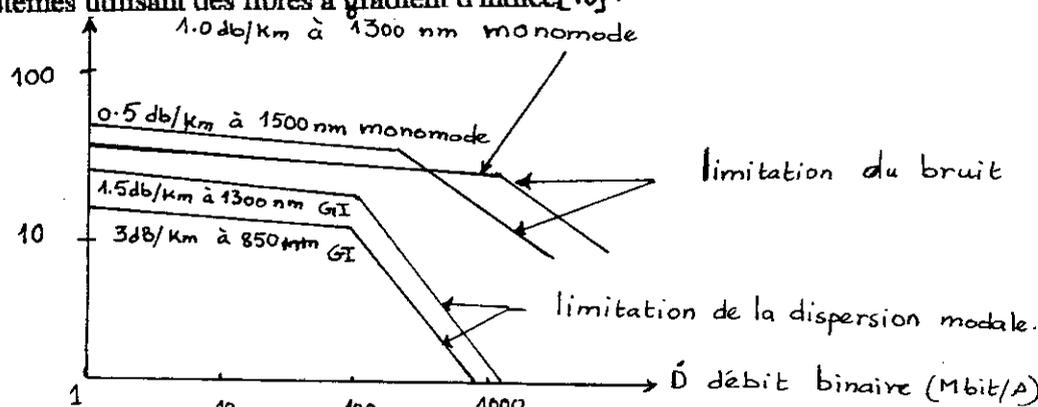


Fig 4.8 Espacement entre répéteurs en fonction du débit binaire

4.10 BILAN ECONOMIQUE

Lorsque plusieurs solutions techniques satisfont aux exigences de l'utilisateur, il est évident que c'est la moins onéreuse qui doit être retenue.

Une comparaison économique entre les systèmes sur fibres optiques et les paires de cuivres est illustrée sur la fig 4.9, en supposant que le prix de pose du câble, des répéteurs et des équipement d'extrémité est le même pour les deux systèmes.

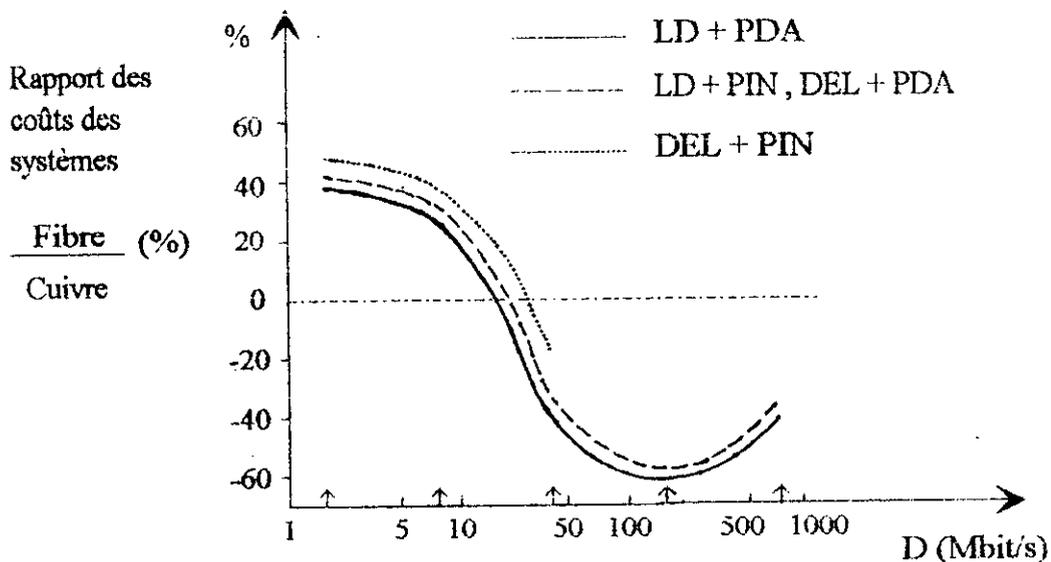


Fig 4.9 Comparaison des coûts.

4.11 RESULTATS

Quelques résultats pratiques typiques obtenus avec des systèmes à débit binaire hiérarchique de 2 Mbit/s sont fournis dans le tableau 4.2 d'après [10]:

Type de Système à fibre		multimode à GI			monomode
Debit Binaire (Mbit/s)		34		140	140
Caractéristiques des Sources	- longueur d'onde (nm)	850	1300	1300	1300
	- type dispositif	LD	LD	LD	LD
	- largeur spectrale (nm)	≤5	≤10	≤10	≤10
	- puissance d'injection moyenne (dbm)	-1	-3	-3	-6
Caractéristiques des Fibres	- coefficient d'affaiblissement (db/Km)	≤3.5	≤1	≤1	≤0.7
	- largeur de bande (Mhz.Km)	≥400	≥800	≥800	
Caractéristiques des Détecteurs	- type d'appareil	APD	PIN - FET	PIN - FET	PIN - FET
	- sensibilité du détecteur pour un TEB= 10	-48			
Paramètres du Système	- rapport de puissance disponible (dB)	47	42	38	35
	- largeur de bande globale du système (Mhz)	≥40	≥40	≥100	≥100
	- espacement entre répéteurs (km)	10	22	18	≥30

CHAPITRE 5

ETUDE DU SYSTEME PDH SIEMENS A 565 MBIT/S

5-1- Introduction

Les systèmes de transmission à fibres optiques peuvent être conçus pour fonctionner selon des techniques numériques. Ils sont utilisés dans les réseaux urbains et interurbains.

Des études ont été faites sur des systèmes de niveaux hiérarchiques plus faibles (8 et 140 Mbit/s) dans certaines universités en collaboration avec les P.T.T. Celles-ci nous ont amenées à nous orienter vers l'étude d'un système d'ordre plus élevé : c'est le PDH (hiérarchie digitale plésiochrone) à 565 Mbit/s qui présente une très grande capacité de transmission pour de très grandes distances.

5-2- Structure d'un système numérique [2]

Un système numérique installé sur une ligne se compose des éléments principaux suivants (fig. 5.1) :

Équipements terminaux aux deux extrémités de la liaison, dont la fonction essentielle est de constituer le multiplex temporel des z voies et de convertir les informations analogiques en messages numériques et inversement. Toutes les fonctions d'interface (signalisation, adaptation de niveau et d'impédance, surveillance, synchronisation, etc...) sont aussi prises en charge par les équipements terminaux .

Équipements de ligne (régénérateurs), répartis le long de la ligne à intervalles réguliers. Ils opèrent une régénération des signaux porteurs d'information numérique.

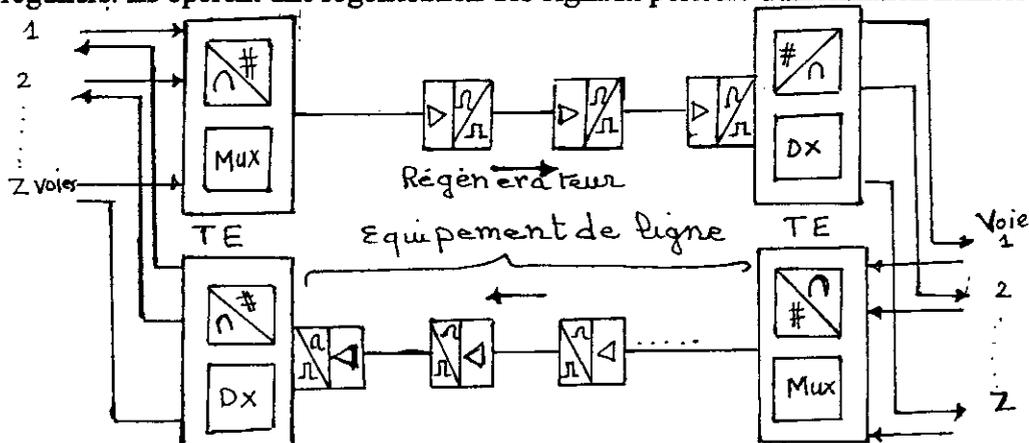


Fig. 5.1 : Structure d'un système numérique.

5-3- Multiplexage temporel

5-3-1- Introduction et définition

La transmission numérique à base du système MIC à 30 voies normalisé par le CCITT (comité consultatif international télégraphique et téléphonique), s'effectue par (fig. 5.2) :

- filtrage de chacune des voies,
- échantillonnage de chacune des voies,
- codage des échantillons,
- multiplexage temporel des échantillons codés,
- transformation du signal codé en un signal bipolaire.

Cela nécessite une organisation en :

- trame pour les voies,
- multitrame pour les signalisations.

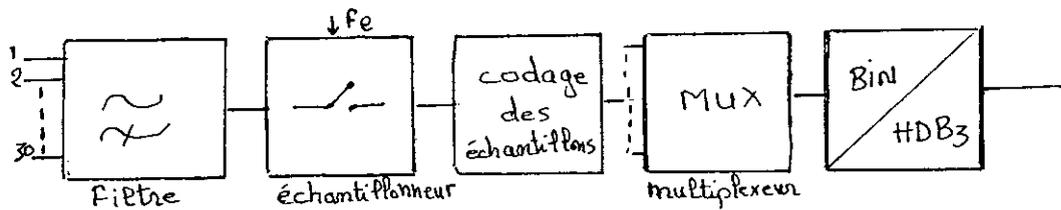


Fig. 5.2 : Schéma de principe de la transmission numérique à base du MIC à 30 voies.

Le multiplexage est l'opération qui consiste à grouper plusieurs voies attribuées chacune à une communication, de façon à les transmettre simultanément sur le même support sans qu'elles se mélangent ou se perturbent mutuellement .

5-3-2- Principe de multiplexage

Sachant que la fréquence d'échantillonnage F_e doit satisfaire la condition $F_e > 2F_{max}$ d'après le théorème de Schannon avec $F_e \in [300,3 400]$ Hz : bande vocale téléphonique où $F_{max} = 3400$ Hz, la fréquence 4 000 hz a été choisie, ce qui donne une fréquence d'échantillonnage $F_e = 2 \times 4 000 = 8$ khz, soit $T_e = 1/F_e = 125 \mu s$.

Donc la période entre deux échantillons d'une même voie est $T_e = 125 \mu s$.

Si chaque bit dure $1 \mu s$, pour transmettre un échantillon, il faut une durée de $8 \mu s$. Ainsi, le canal est libre ou inutilisé pendant $117 \mu s$. On exploite ce temps libre pour transmettre les échantillons de quatorze autres signaux téléphoniques différents ; c'est le principe de multiplexage par répartition dans le temps.

Le comité consultatif international télégraphique et téléphonique (CCITT) a défini les règles de multiplexage des trains numériques et les ordres de la hiérarchie de la manière suivante :

Dans $125 \mu s$, on insère 32 voies soient 256 bits :

- 30 voies pour la communication,
- une voie pour la signalisation,
- une voie pour la synchronisation.

La parole étant codée à 64 kbit/s d'où dans chaque groupe de 32 voies, on arrive à un débit binaire total

$$D = 32 \times 64 = 2,048 \text{ Mbit/s.}$$

Des hiérarchies de systèmes numériques ont été définies et fondées sur le débit binaire primaire de 2,08 Mbit/s.

En fonction de l'importance du trafic et de la disponibilité de la transmission, on peut transmettre directement ce train comme on peut le combiner par multiplexage et constituer ainsi un nouveau train, lequel peut être combiné à d'autres.

5-3-3- Structure de la trame de base à 2 Mbit/s

A- Définition

Lorsque un certain nombre de voies sont assemblées en un multiplex temporel, l'ensemble de mots d'un certain nombre de bits (et des bits auxiliaires qui leurs sont ajoutés) à l'intérieur d'une période T_e constitue une trame.

B- Cas du MIC à 30 voies [12]

- La trame (fig. 5.3) est divisée en 32 intervalles de temps (IT) numérotés de 0 à 31 : $IT_0, IT_1, \dots, IT_{31}$.
- Les informations, constituées par des impulsions à 8 khz, sont codées sous forme de nombre binaire de 8 bits et multiplexées.
- Les intervalles IT_1 à IT_{15} et IT_{17} à IT_{31} sont destinés à la transmission des informations des 30 voies de parole.
- L'intervalle IT_0 est réservé à la transmission en alternance de l'information de verrouillage de trame (Vt) pour permettre la synchronisation, et du mot de service qui sert à annoncer la perte de verrouillage dans l'autre sens.
- L'intervalle IT_{16} est réservé à la transmission de l'information de signalisation de deux voies téléphoniques codées sur quatre bits.

* Verrouillage trame

Le mot de verrouillage trame est émis à IT_0 d'une trame sur deux donc le mot sera émis aux trames paires. Le mot est émis toutes les 250 μs .

5-3-4- Structure de la multiframe [12]

On a vu qu'un intervalle de temps est nécessaire pour transmettre l'information de signalisation de 2 voies téléphoniques. Comme l'intervalle de temps ne contient que 8 bits par trame (un $IT = 125/32 = 3,9 \mu s$ et $1 \text{ bit} = 3,9/8 = 488 \text{ ns}$), il est naturellement impossible d'affecter, à l'intérieur d'une trame, une position binaire pour chaque voie ; il faudrait un intervalle de temps plus long. L'intervalle choisi comprend 16 trames d'où le nom de multiframe (fig. 5.4).

* Verrouillage multiframe

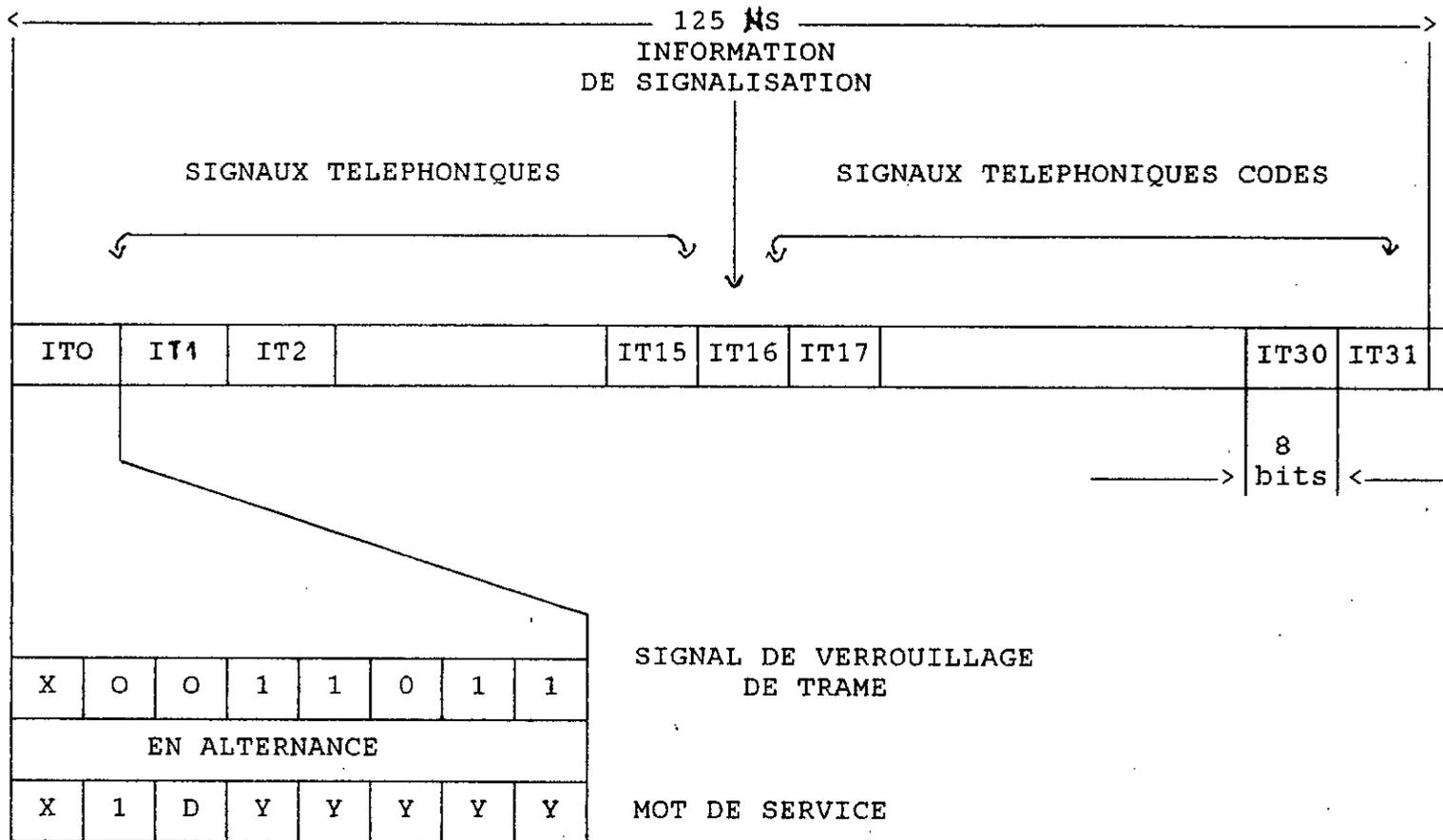
Le mot de verrouillage multiframe est transmis à l' IT_{16} de la trame 0 soit toutes les 2 ms. La signalisation est transmise aux IT_{16} des trames 1 à 15.

5-3-5- Hiérarchie des systèmes d'ordre supérieur : (fig. 5.5)

Des hiérarchies de systèmes numériques ont été définies, et fondées sur le débit binaire primaire de 2.048 Mbit/s.

Les débits de transmission correspondant à la hiérarchie normalisée par la CEPT/CCITT sont indiqués dans le tableau 5.1

CT

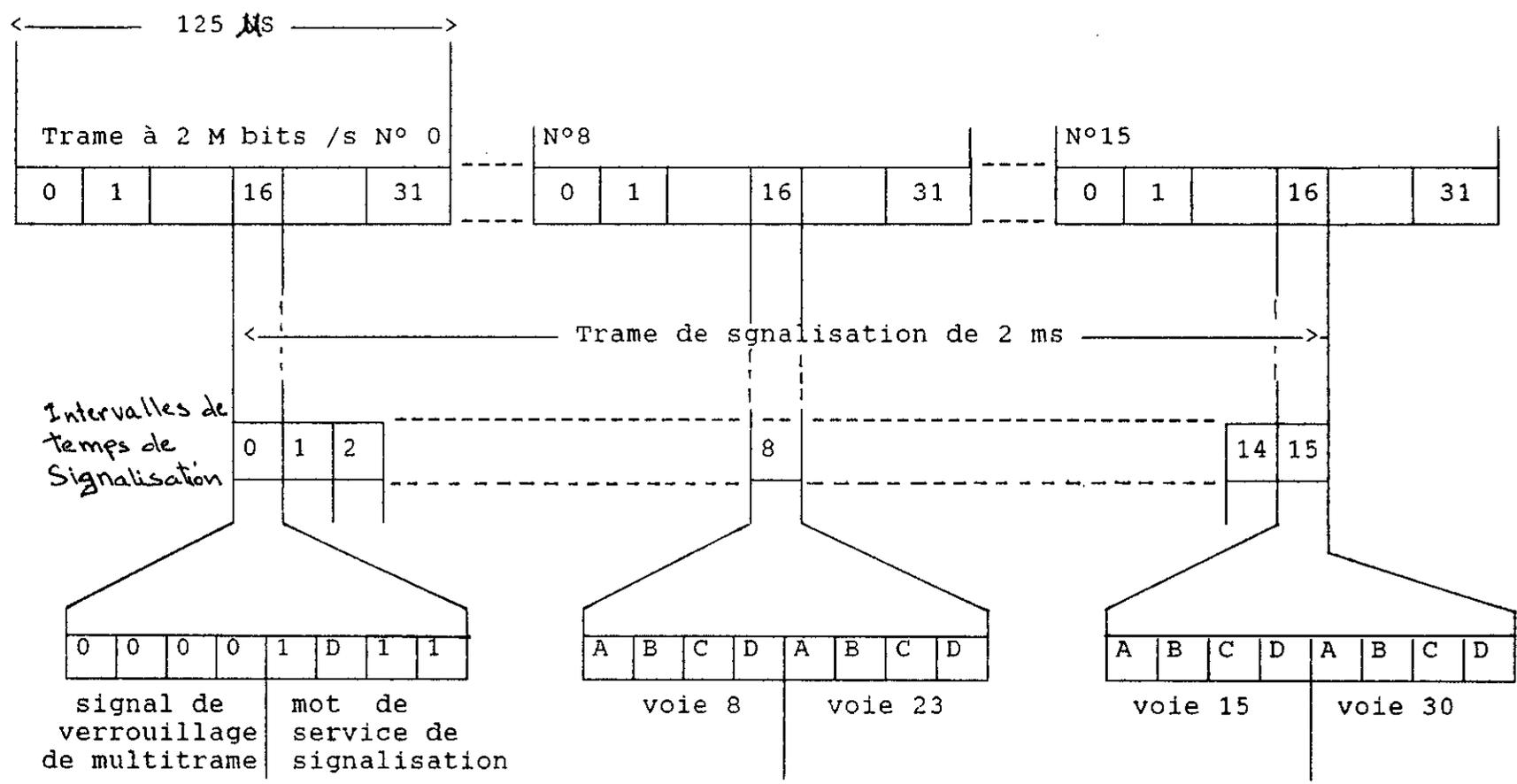


- IT : Intervalle de temps
- D : Bit de service pour alarme majeure (d = 1 pour alarme)
- X : Bits réservés pour l'usage international
- Y : Bits réservés pour l'usage national

fig 5.3 STRUCTURE DE LA TRAME A 2 M BITS / S CONFORMEMENT A LA RECOMMANDATION G.704 DU CCITT

6/

CT



Dk : Bit de service pour alarme
 a,b,c,d : Bits du mot de signalisation

Fig 5.4 STRUCTURE DE LA TRAME DE SIGNALISATION CONFORMEMENT A LA RECOMMANDATION DU CCITT

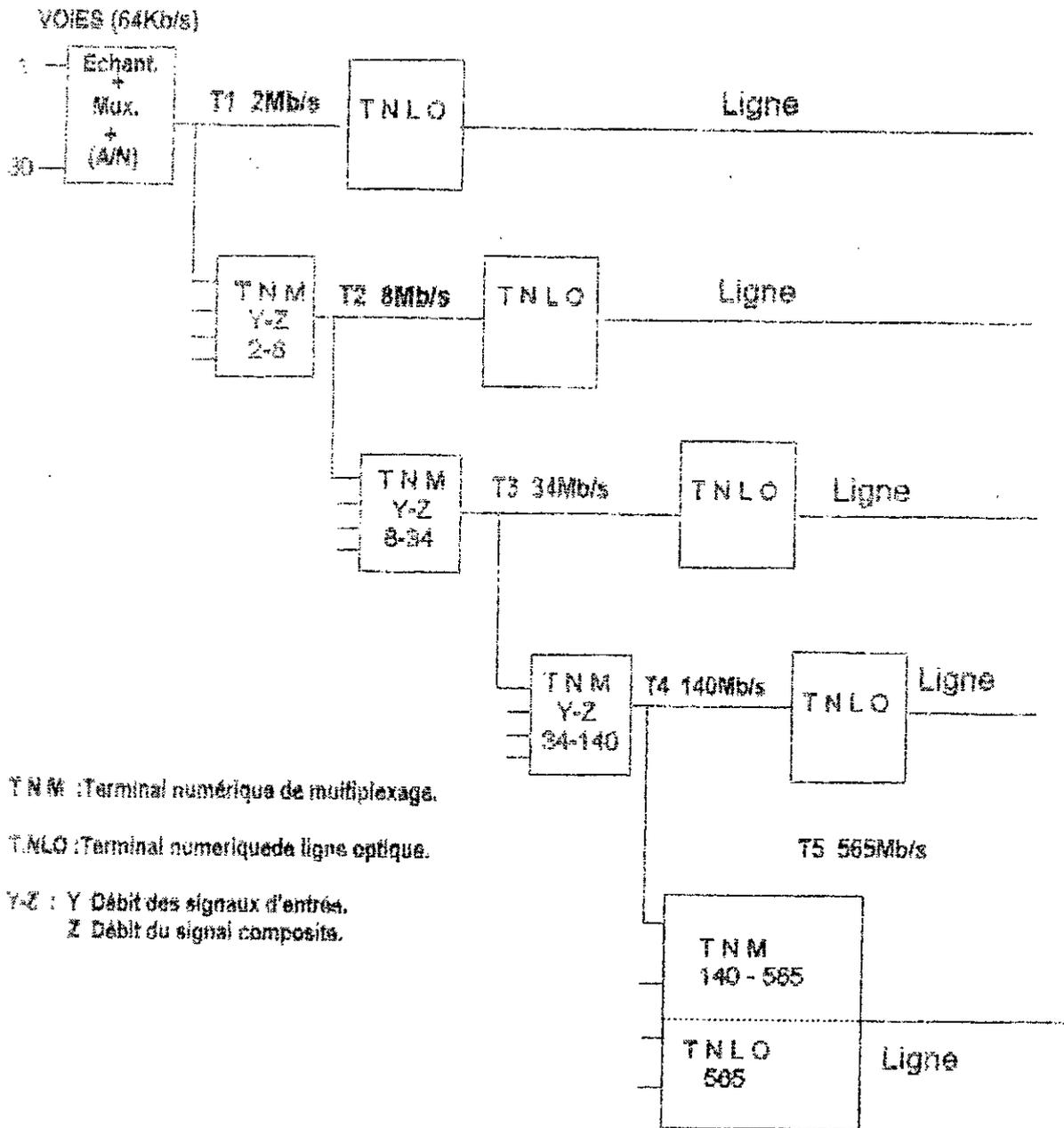


Fig.5.5. SCHEMA CLASSIQUE DE L'ELABORATION ET DE LA TRANSMISSION DE SIGNAUX NUMERIQUES PAR FIBRES OPTIQUES.

Débits binaires (Mbit/s)	Nombre de voies utilisées	Ordre de la hiérarchie
2.048 (2)	30	1
8.448 (8)	120	2
34.368 (34)	480	3
139.264 (140)	1 920	4
564.992 (565)	7 680	5

5-4- Principe de transmission d'un système numérique sur câble à fibres optiques

Selon l'importance et la capacité du trafic entre 2 centraux téléphoniques, on peut réaliser des liaisons point à point basées sur des systèmes de transmission au débit de 2, 8, 34, 140 et 565 Mbit/s.

Ces systèmes sont constitués d'une partie de multiplexage et d'une partie de transmission sur ligne optique (câble à fibres optiques).

5-5- Multiplexeur primaire PCM 30G [12]

5-5-1- Généralités sur le PCM 30G

Le multiplexeur primaire PCM 30G appartenant à la firme allemande Siemens se présente sous la forme d'un équipement se composant de l'unité de multiplexage MIC et des adaptateurs de signalisation pour 30 signaux téléphoniques analogiques.

Au lieu des unités de voies à fréquence vocale, il permet d'exploiter 30 unités de voies numériques avec une jonction à 64 kbit/s codirectionnelle.

Ce multiplexeur peut être équipé d'un équipement terminal de ligne pour la transmission des signaux à 2 Mbit/s.

5-5-2- Caractéristiques techniques ou paramètres du système

Les renvois G.7.. se rapportent aux recommandations correspondantes du CCITT [13]

a- Généralités sur la transmission téléphonique

Nombre de circuits téléphoniques	30
Bande de fréquence vocale	300 Hz à 3 400 Hz

b- Modulation par impulsion et codage :

Fréquence d'échantillonnage (G.711/2)	8kHz + 50.10 ⁻⁶ kHz.
Loi de codage (G.711/3)	loi A.
Capacité de charge (G.711/4)	+ 3,14 dBmo

c- Trame à 2 Mbit/s (G.704,3.3) :

Durée entre deux échantillonnages d'un signal téléphonique (= période d'une trame)	125 μ s
Nombre d'intervalles de temps par trame	32 (0 à 31)
Durée d'un intervalle de temps	3,906 μ s
Nombre de bits par trame	256
Nombre de bits par intervalle de temps	8
Durée d'un bit	488 ns
Transmission des signaux téléphoniques	dans les intervalles de temps 1 à 15 et 17 à 31
Transmission des informations de signalisation	dans l'intervalle de temps 16
Transmission du mot de verrouillage de trame et du mot de service	en alternance dans l'intervalle de temps 0
Transmission de l'instruction " boucle distante"	par les bits du mot de service

d- Trame de signalisation (G.704) :

Période d'une trame de signalisation	2 ms
Nombre d'intervalles de temps de signalisation par trame de signalisation	16 (0 à 15)
Nombre de bits par intervalle de temps de signalisation	8
Nombre de bits de signalisation affectés à un signal téléphonique	4 (a, b, c, d)
Transmission des bits de signalisation pour les signaux téléphoniques 1/16 à 15/30	dans les intervalles de temps de signalisation 1 à 15

e- Mot de verrouillage de multitrame et mot de service de signalisation :

Nombre de bit	4 chacun
Transmission	ensemble dans l'intervalle de temps de signalisation 0

f- Débits binaires :

Débit binaire du signal multiplex MIC	2,048 kbit/s \pm 50.10 ⁻⁶
Débit binaire des signaux téléphoniques codés	64 kbit/s \pm 50.10 ⁻⁶ chacun
Débit binaire du signal avec les informations de signalisation	64 kbit/s \pm 50.10 ⁻⁶

5-5-3- Description des blocs fonctionnels du PCM 30 G

A- Présentation des différents blocs fonctionnels

Le multiplexeur primaire PCM 30G comprend les blocs fonctionnels présentés en fig. 5.6

Les blocs fonctionnels comprennent l'unité centrale, l'unité périphérique et l'équipement d'extrémité de ligne (si nécessaire).

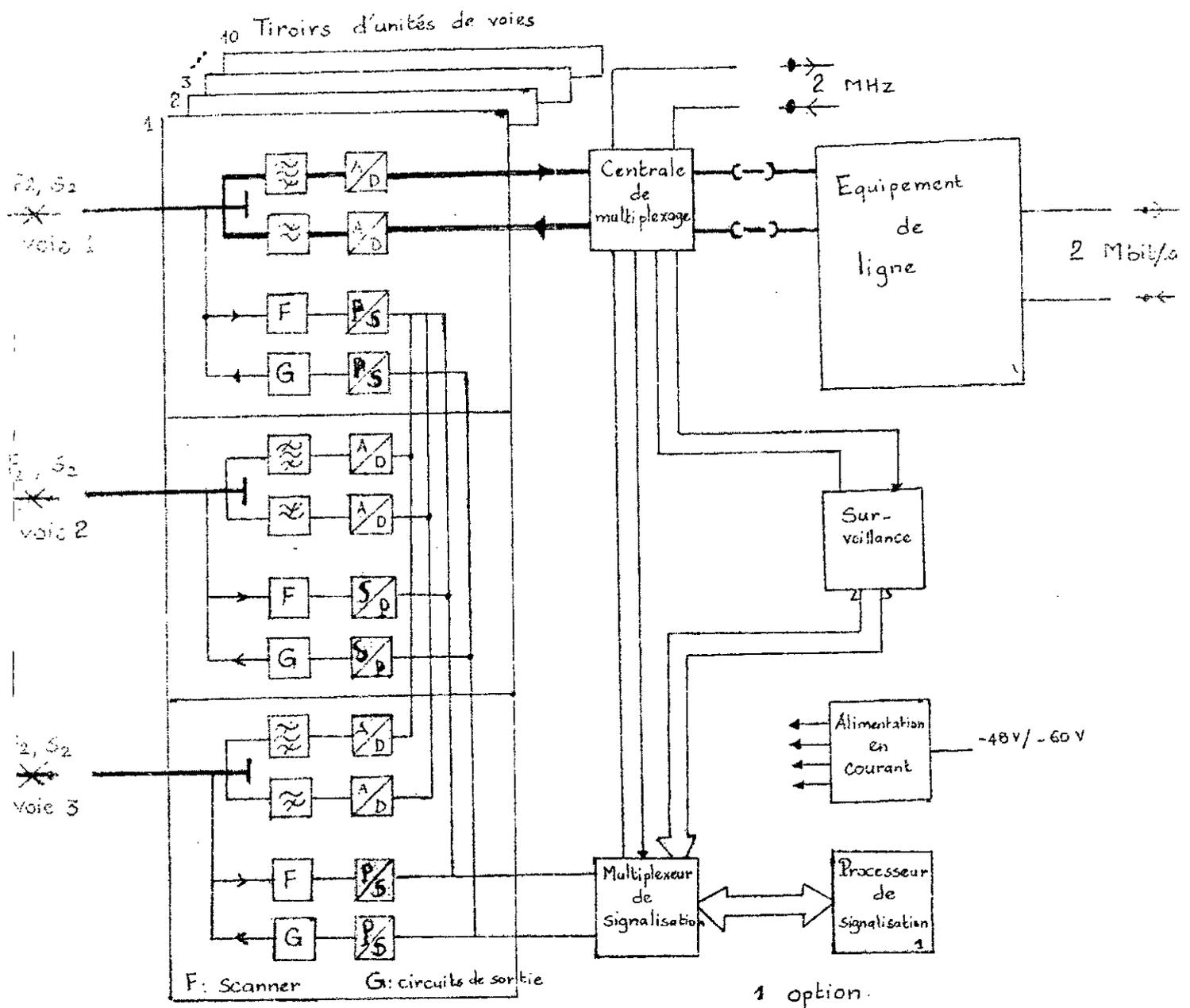


Fig 5.6 Les différentes unités fonctionnelles du multiplexeur primaire PCM 30G

L'unité centrale est subdivisée en centrale de multiplexage, unité de surveillance, centrale de signalisation (elle même répartie en multiplexeur de signalisation et en processeur de signalisation) et alimentation en courant.

Les unités périphériques sont les unités de voies qui comprennent chacune 3 circuits de voies à fonctions identiques.

Un châssis peut contenir au maximum 10 unités de voies.

Si nécessaire, il est possible d'utiliser l'équipement l'extrémité de ligne et d'un tiroir de télé alimentation.

Dans la présente description on s'intéressera surtout à l'unité centrale dont le rôle est primordial. Quant aux deux autres, on citera brièvement leurs rôles spécifiques.

A-1- Unité périphérique

Les tiroirs de voie représentent l'unité périphérique du multiplexeur primaire PCM 30G. C'est un équipement qui repose sur une structure à trois voies, c'est à dire que chaque tiroir de voies renferme trois circuits adaptateurs de signalisation aux fonctions identiques. L'équipement comprend dix emplacements d'enfichage pour tiroirs de voies. Les adaptateurs de signalisation permettent le branchement direct d'un équipement téléphonique analogique aux sélecteurs ou aux systèmes de transmission en ligne.

A-2- Alimentation en courant

Le tiroir d'alimentation en courant délivre les tensions continues nécessaires au multiplexeur primaire PCM 30G.

A-3- Equipement d'extrémité de ligne

Cet équipement est utilisé pour transmettre un train à 2 Mbit/s sur une paire métallique, ou le pas de régénération ne dépasse pas 2 km.

A-4- Unité centrale

Cette unité est composée de :

- Une centrale de multiplexage,
- Une unité de surveillance,
- Une centrale de signalisation.

A-4-1- Centrale de multiplexage : Fig 5.7

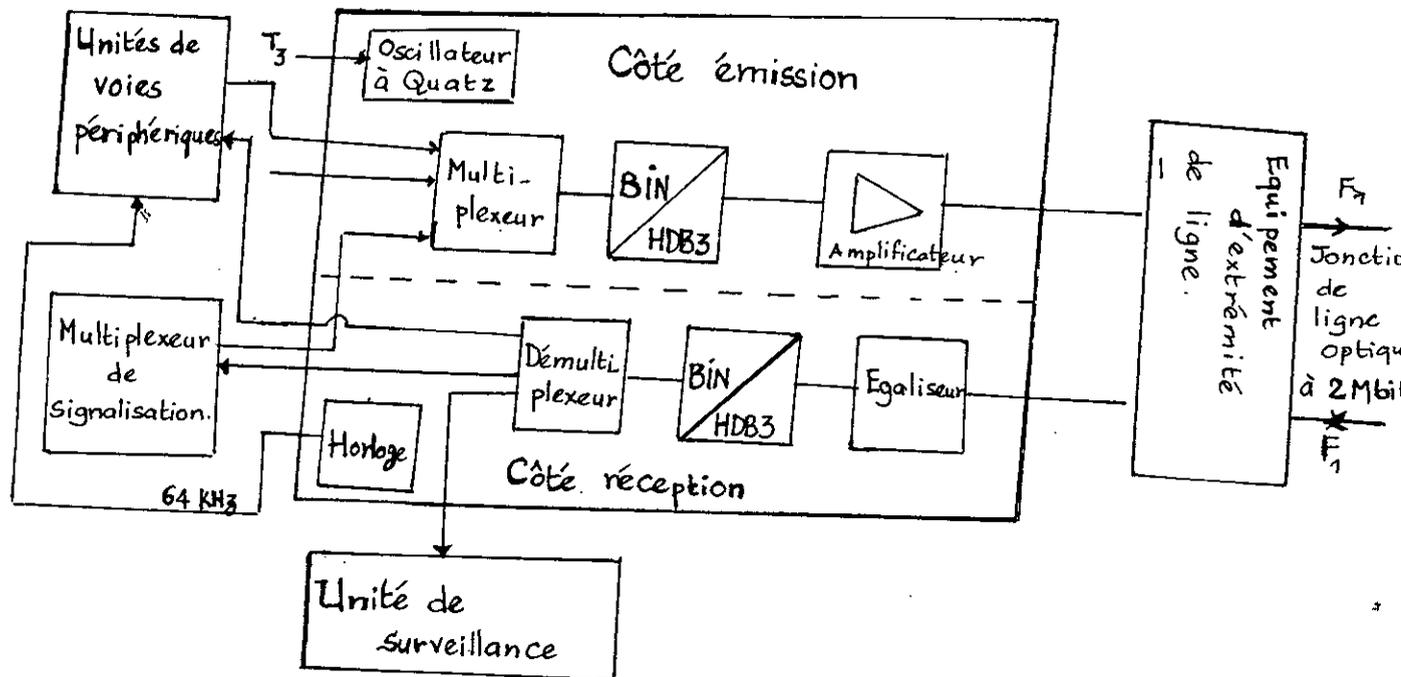


Fig. 5.7 : Schéma synoptique de la centrale de multiplexage.

Le multiplexeur central sert à réunir les mots de code de 8 bits délivrés par les unités de voies périphériques via les lignes de bus dans le sens émission et à les insérer, avec le signal de verrouillage de trame et le mot de service, ainsi qu'avec l'information destinée à l'intervalle de temps 16 délivrée par le multiplexeur de signalisation, dans la trame à 2 Mbit/s. Le signal à 2 Mbit/s est converti en un signal HDB3. Le niveau et la forme du signal sont adaptés aux conditions de jonction, selon la recommandation G.703 du CCITT, dans un amplificateur d'émission en aval.

L'oscillateur à quartz est commandé par une horloge externe T_3 ou par un rythme extrait d'un signal d'arrivée ou bien il est utilisé comme auto-oscillateur. Tous les signaux d'horloge, nécessaires pour commander les processus d'émission dans le multiplexeur central et dans les unités de voies, sont délivrés par le générateur d'horloge sur le côté émission.

Côté réception, le signal codé HDB3 est converti en signal binaire par un transcodeur en aval.

Le multiplexeur détecte le signal de verrouillage de trame de signalisation entrant toutes les 2 ms. La réception de ces signaux indique le début de la trame et de la trame de signalisation et provoque l'alignement du générateur d'horloge de réception et du côté réception du multiplexeur de signalisation.

Le signal à 2 Mbit/s sortant du circuit de démultiplexage est envoyé aux unités de voies et au multiplexeur de signalisation par un bus de ligne. Ces unités, qui sont commandées par le générateur d'horloge de réception, prélèvent les mots de 8 bits qui leurs sont affectés sur le signal multiplex.

A-4-2- Unité de surveillance

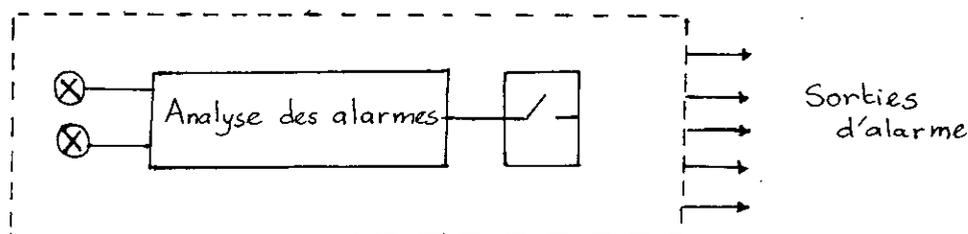


Fig.5.8 : Module de surveillance

Le rôle de l'unité de surveillance est de collecter les erreurs apparaissant dans l'équipement, les dérangements dans le signal à 2 Mbit/s reçus ainsi que les messages émis par une station opposée.

La surveillance combine ces critères entre eux conformément à un tableau d'alarme/réaction, les analyse et déclenche les réactions correspondantes. La surveillance est dotée d'un microcontrôleur et d'une mémoire de programme externe (EPROM). Cette dernière renferme essentiellement le tableau d'alarme/réaction.

Principaux critères d'alarme

- Perte du signal à 2 Mbit/s,
- Perte de verrouillage de trame ou de multitrame,
- Réception d'un signal d'alarme dans la trame et dans la multitrame,
- Taux d'erreur sur les bits $> 10^{-5}$ et $> 10^{-3}$ dans le signal à 2 Mbit/s entrant,
- Informations de signalisation émises par la station opposée,
- Défaillance des diviseurs d'horloge interne,
- Défaillance du multiplexeur de signalisation,
- Erreur sur l'un des bus reliant les adaptateurs de signalisation,
- Erreur dans l'échange de données entre le multiplexeur de signalisation et le processeur de signalisation.

Ces alarmes sont renvoyées sur des voyants (LED) lumineux pour faciliter l'exploitation et la maintenance du système.

A-4-3- Centrale de signalisation

La centrale de signalisation travaille en liaison avec le multiplexeur central via l'interface de bus à 2 Mbit/s.

Deux bus série, servant au transfert de l'information de signalisation de chaque adaptateur, sont prévus pour l'échange des données avec les adaptateurs de signalisation. L'information de signalisation est traitée dans la centrale de signalisation. Cette centrale est composée :

- d'un multiplexeur de signalisation SMUX recherche le mot de verrouillage de multitrame parmi les données reçues dans le 16ème intervalle de temps de l'interface de bus à 2 Mbit/s et surveille le synchronisme une fois que celui-ci est atteint,
- d'un processeur de signalisation (SPROZ) se chargeant du traitement des signaux destinés aux adaptateurs de signalisation.

Les modules SMUX et SPROZ fonctionnent tous deux en autonome. La communication la plus rapide est obtenue en inscrivant les données à échanger dans la RAM externe de l'autre microcontrôleur.

5-6- Passage à un système d'ordre supérieur : le niveau 5

Le passage d'un système d'ordre 1 à un système d'ordre 2, se fait en combinant par multiplexage temporel, de 4 trains d'impulsions à 2,048 Mbit/s provenant de quatre systèmes MIC pour constituer un train d'impulsions à 8,448 Mbit/s.

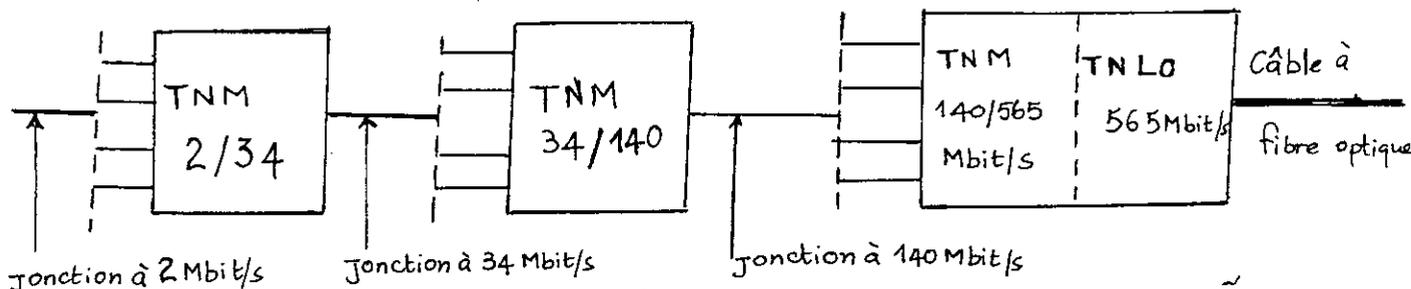


Fig. 5.9- Schéma de l'élaboration du débit 565 Mbit/s dans le cas Siemens.

Mais on remarque que, dans le cas d'un système Siemens, ce passage n'apparaît pas (fig. 5.9), en effet il est intégré au niveau du TNM 2/34 : c'est la particularité du système Siemens.

Quant aux autres niveaux, c'est le même principe qui est appliqué que celui de la Fig 5.5

On notera aussi une autre particularité, mais celle-ci est commune à tous les systèmes à 565 Mbit/s à savoir l'incorporation des deux blocs terminaux - de multiplexage et de ligne optique - dans un même bloc du fait que cet ordre de multiplexage n'est pas normalisé par le CCITT au niveau de la jonction 565 Mbit/s. La seule différence, dans ce type de système à 565 Mbit/s, d'un fournisseur à un autre réside dans sa mise en oeuvre.

5-6-1 Structure des trames des différents niveaux hiérarchiques

A partir du deuxième ordre, les équipements n'ont plus à faire qu'à des trames numériques.

Ils jouent le rôle de multiplexeurs combinant en une nouvelle trame, les trames de quatre systèmes de l'ordre précédent, appelés affluents. Mais pour réaliser cette combinaison, il faut une synchronisation parfaite entre les affluents : c'est le but du procédé de justification décrit dans le paragraphe suivant :

A- Procédé de justification :

Le multiplexage temporel des 4 affluents exige un isochronisme parfait des moments entre eux.

Les différences en débit des symboles entre les affluents entrant sont éliminées en insérant des impulsions fictives "bits non porteurs d'information" avant de procéder au multiplexage. Ceci est appelé "justification positive" ou "bourrage". Elle doit être signalée par une indication de justification.

L'intervalle de temps séparant 2 indications de justification est appelé "groupe" ou "secteur".

A la réception, les impulsions fictives insérées à l'extrémité éloignée sont enlevées (débourrées).

B- Structure de trame à 8 Mbit/s : [12]

Quatre signaux à 2 Mbit/s entrant sont entrelacés en une trame à 8 Mbit/s qui contient également les informations de synchronisation, de surveillance et d'adaptation de rythme.

Le mot de verrouillage de trame sert à sa synchronisation dans l'équipement de réception de la station opposée, suivi d'un mot de service employé pour la transmission des signaux d'alarme majeure ($TEB = 10^{-3}$) et mineure ($TEB = 10^{-6}$). Les bits affectés aux 4 signaux à 2 Mbit/s sont entrelacés élément binaire par élément binaire et répartis sur 4 groupes. Il s'agit ici des bits d'information utile NI, des bits d'indication de justification FI et des quatre bits FN qui, selon le contenu des bits d'indication de justification précédents, sont des bits de justification ou d'information utile.

L'indication de justification est formée par un mot de 3 bits contrôlé dans la station opposée. Le signal 000 est suivi d'un bit d'information utile. Le signal 111 d'un bit de justification (fig 5.10). La structure détaillée est donnée en annexe.2

C- Structure de trame à 34 Mbit/s : [12]

Quatre signaux à 8 Mbit/s sont entrelacés en une trame à 34 Mbit/s (fig. 5.11).

Les bits affectés aux 4 signaux à 8 Mbit/s sont entrelacés bit par bit, répartis sur 4 groupes. Le principe d'indication de justification est le même avec celui de la trame à 8 Mbit/s.

La structure détaillée est donnée en annexe 2.

D- Structure de trame à 140 Mbit/s

Pour l'entrelacement temporel des signaux à 34 Mbit/s, on définit une trame qui contient 2 928 bits et qui a une période de 21.03 μ s (fig. 5.12).

Les bits affectés aux 4 signaux à 34 Mbit/s entrelacés bit par bit sont divisés en 6 groupes de 488 bits chacun.

L'indication de justification est formée d'un mot de 5 bits.

Le signal 00000 est suivi d'un bit d'information utile et le signal 11111 d'un bit de justification.

E- Structure de trame à 565 Mbit/s

Pour l'entrelacement temporel des signaux à 140 Mbit/s, on définit une trame de 2 688 bits ayant une période de 4.76 μ s.

Elle contient également les informations de synchronisation, de surveillance et d'adaptation de rythme. Les débits affectés aux 4 signaux à 34 Mbit/s entrelacés bit par bit, sont divisés en 7 secteurs de 384 bits chacun (fig. 5.13).

5-7- Présentation de l'équipement terminal de multiplexage - démultiplexage DSMX 34/140 Mbit/s [12]

5-7-1- Description générale de l'équipement terminal de DSMX 34/140 Mbit/s:

L'équipement terminal de multiplexage numérique DSMX 34/140 réunit, côté émission, en multiplexage temporel 4 trains d'éléments binaires au débit nominal de 34 Mbit/s en un signal numérique résultant au débit de 140 Mbit/s. Sa partie réception reconstitue à partir du signal à 140 Mbit/s les 4 trains à 34 Mbit/s.

L'équipement (le châssis) DSMX 34/140 permet le multiplexage numérique plésiochrone. Il comprend en outre, côtés émission et réception, les circuits de jonctions.

Le multiplexeur DSMX 34/140 est raccordé à un panneau de signalisation qui collecte, affiche et répercute à un autre dispositif les signaux de défaut. Un châssis d'alimentation en courant affecté au multiplexeur délivre toutes les tensions continues de service nécessaires.(Fig.5.14).

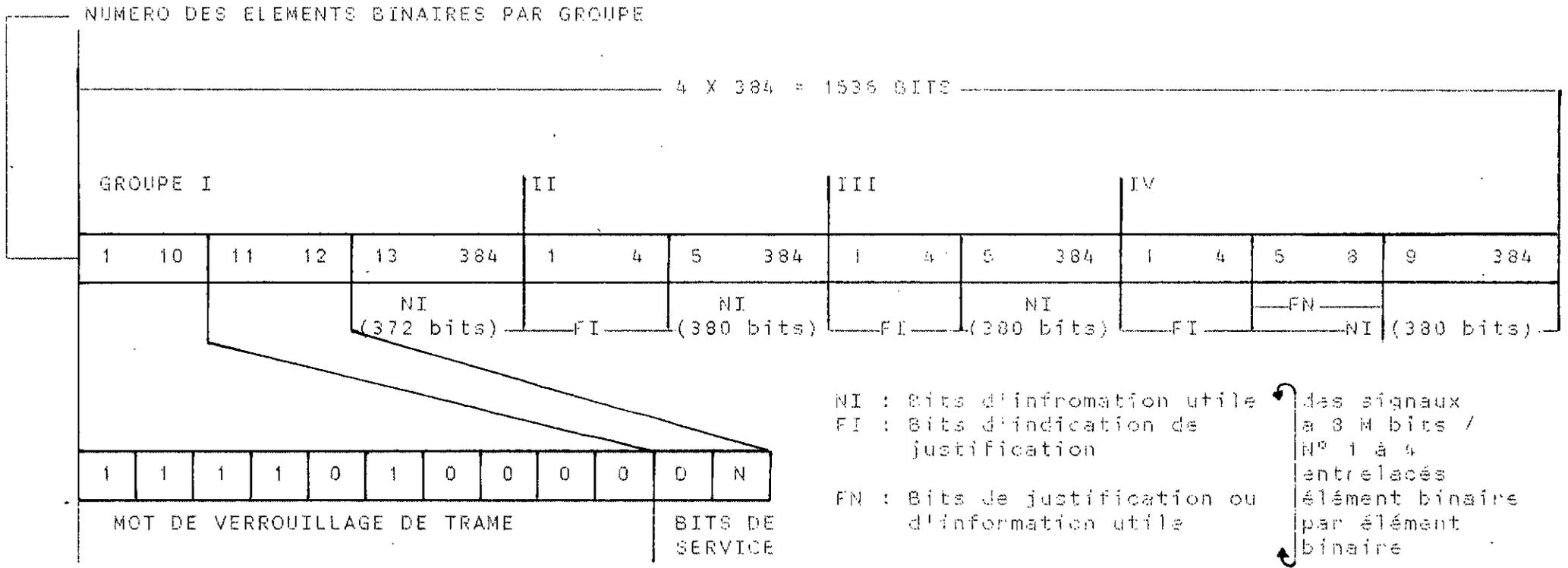
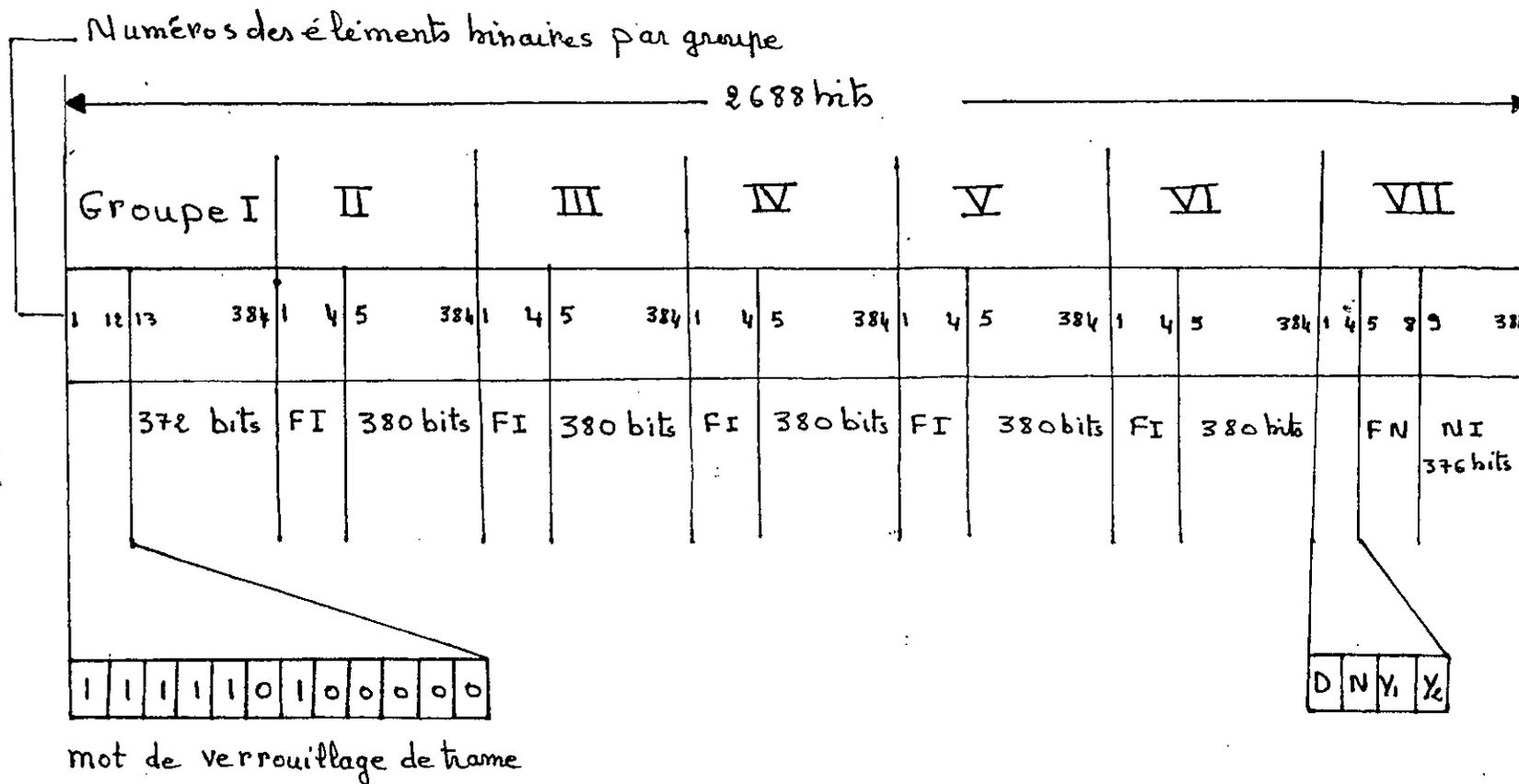


fig5.1) STRUCTURE DE LA TRAME A 34 M Bits / s



NI: Information utile

FI: Indication de justification

FN: Bits de justification ou d'information

Fig 5.13 Structure de la Trame à 5657 bit/s

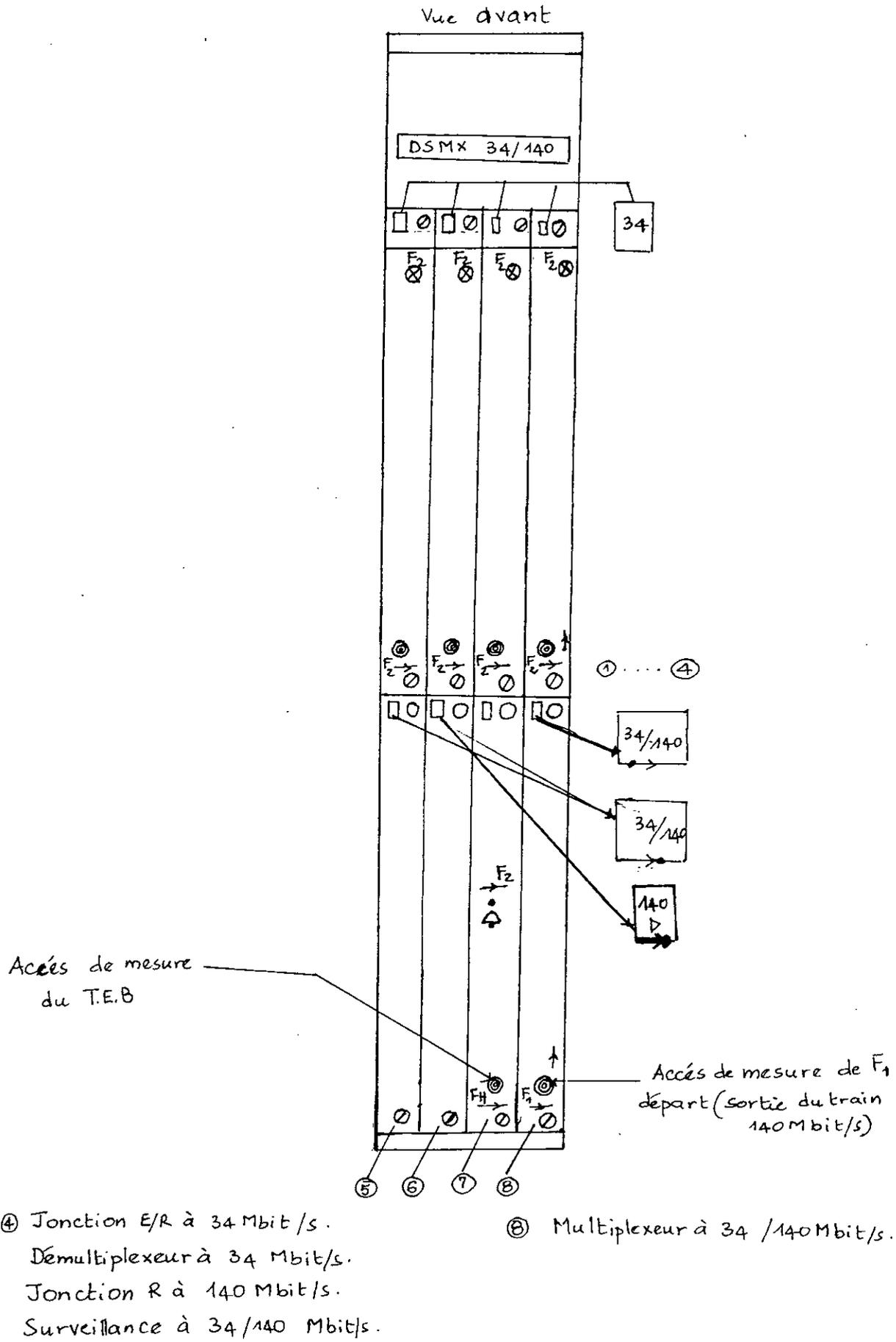


Fig 5. 14 Châssis DSMx 34 / 140 Mbit/s.

A- Fonctionnement des différentes unités (fig. 5.15)

A-1 Partie émission

Les 4 signaux à 34 Mbit/s arrivant traversent les éléments de circuit F2-arrivée des 4 tiroirs de la jonction E/R à 34 Mbit/s.

Un tel élément de circuit F2-arrivée comprend pour l'essentiel les unités fonctionnelles suivantes : égaliseur, régénérateur, décodeur, circuit de récupération de rythme et circuit d'adaptation du rythme. Après cet étage le signal à 34 Mbit/s est converti du code HDB3 en code binaire. Dans l'unité d'adaptation de rythme qui suit, le signal à 34 Mbit/s est inscrit avec le rythme récupéré dans une mémoire tampon de 16 bits. Les différences de phases entre les rythmes d'inscription et de lecture sont contrôlées dans un comparateur de phase.

Le tiroir multiplexeur renferme 2 unités fonctionnelles qui sont : l'amplificateur CMI et l'oscillateur à 139.264 Mhz.

Des informations complémentaires sont injectées dans les 4 voies à 34 Mbit/s au niveau du module du multiplexage. Ce sont le signal de verrouillage de trame, les bits de justification et le mot de service. Les signaux à 34 Mbit/s sont ensuite soumis dans le module de multiplexage à une conversion parallèle-série pour composer le signal à 140 Mbit/s puis sont codés en CMI. L'amplificateur CMI adapte le signal à 140 Mbit/s aux conditions de la jonction pour F1-départ.

A-2- Partie réception

Le tiroir de la jonction R à 140 Mbit/s renferme un égaliseur, un amplificateur, un décodeur CMI et un convertisseur série-parallèle qui décompose le signal à 140 Mbit/s en 4 signaux à 34 Mbit/s. Ce tiroir contient en outre le circuit de récupération d'horloge de réception de 139. 264 Mhz et un diviseur 4:1 qui délivre le rythme de 34.816 Mhz.

Le démultiplexeur contient 2 modules, un de synchronisation et l'autre de génération de rythme. Le module de synchronisation analyse le signal de verrouillage de trame et répartit les signaux à 34 sur les 4 voies. Le module de génération de rythme commande toutes les séquences d'horloge du côté réception. Il extrait également les bits de service des signaux à 34 Mbit/s.

Le bloc de démultiplexeur contient en outre des circuits d'analyse des informations de justification. Ceux-ci délivrent des rythmes troués à chacune des voies en fonction de la présence ou de l'absence de bits de justification.

Les signaux à 34 Mbit/s et les rythmes troués sont envoyés aux éléments de circuit F2-départ des 4 tiroirs de la jonction E/R à 34 Mbit/s. Dans chaque tiroir, le signal à 34 Mbit/s est inscrit avec le rythme troué dans une mémoire tampon, puis codé en HDB3 et adapté aux conditions de la jonction à 34 Mbit/s.

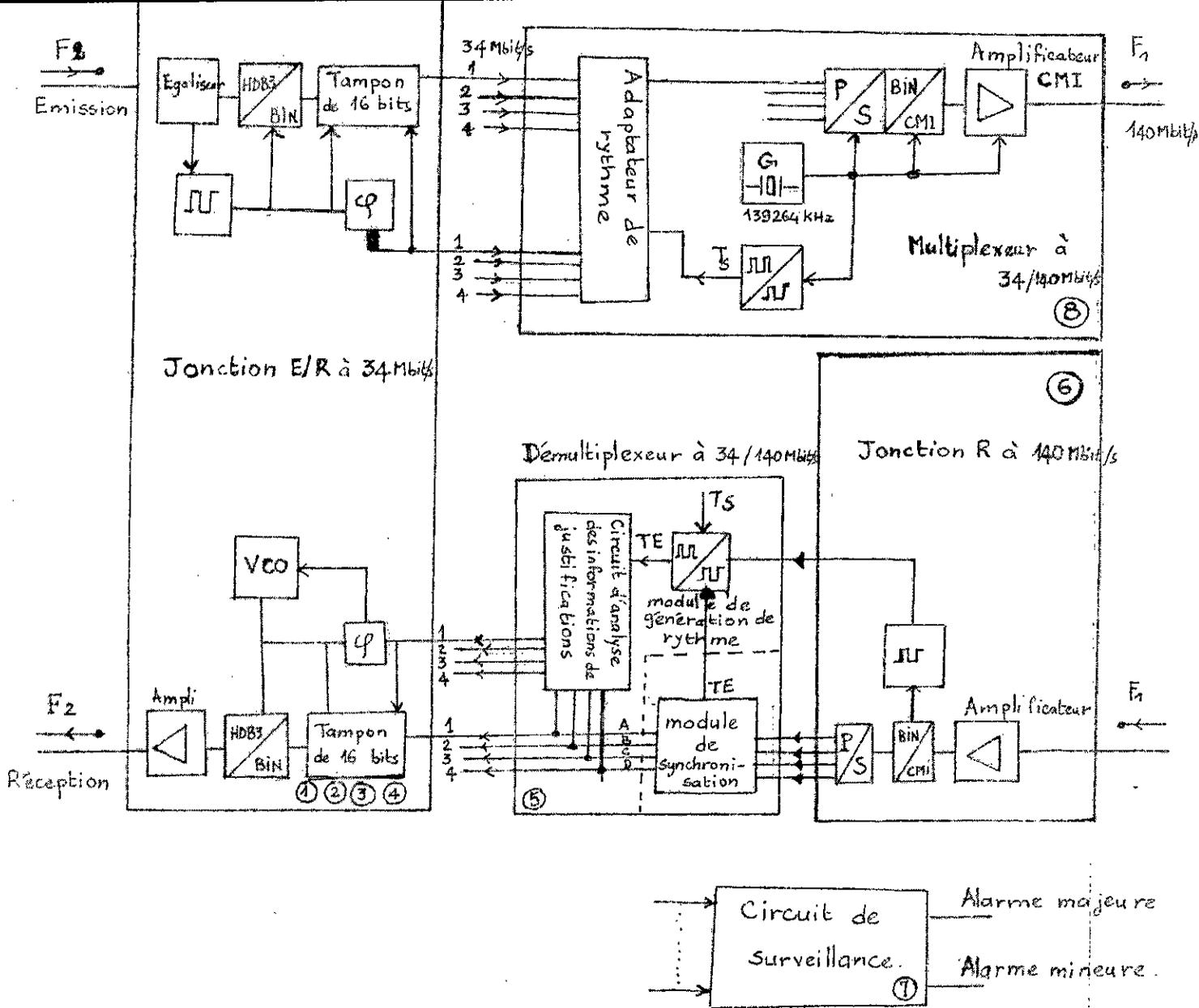


Fig 5.1.5 Schéma fonctionnel du terminal numérique de multiplexage, démultiplexage 34/140 Mbit/s

T_s : rythme de lecture.

T_E : rythme d'écriture.

5-8- Présentation de l'équipement de ligne optique [12]

5-8-1- Généralités sur l'équipement de ligne et caractéristiques

L'équipement de ligne LA 565 LWL sert à la transmission simultanée de 4 signaux numériques du quatrième ordre hiérarchique de 140 Mbit/s sur des fibres optiques monomodes à $\lambda_0 = 1\,300\text{ nm}$. Il renferme l'appareil terminal de ligne LE 565 LWL qui est composé de 8 blocs fonctionnels (fig. 5.16) :

- convertisseur de tension STRV,
- surveillances 1 et 2 (UW),
- modem PSKS,
- bloc de surveillance en service ISM-S,
- jonction pour module de service,
- bloc de protection contre le laser,
- tiroir d'émission,
- tiroir de réception.

- Caractéristiques techniques [12]

Côté émission

Emetteur optique	diode laser In Ga As P
Longueur d'onde	1 310 nm \pm 20 nm
Largeur spectrale (-3 dB)	\leq 4 nm
Puissance émise Ps	-6 dBm à - 3 dBm
Commutable sur	-10 dBm à - 7 dBm

Côté réception

Récepteur optique	diode à avalanche au germanium (PDA. Ge)
Récupération du rythme	filtre à onde de surface de facteur de qualité environ 550

Jonction optique

Rapidité de modulation	677.990 M bauds
Code en ligne	5 B/ 6B, NRZ

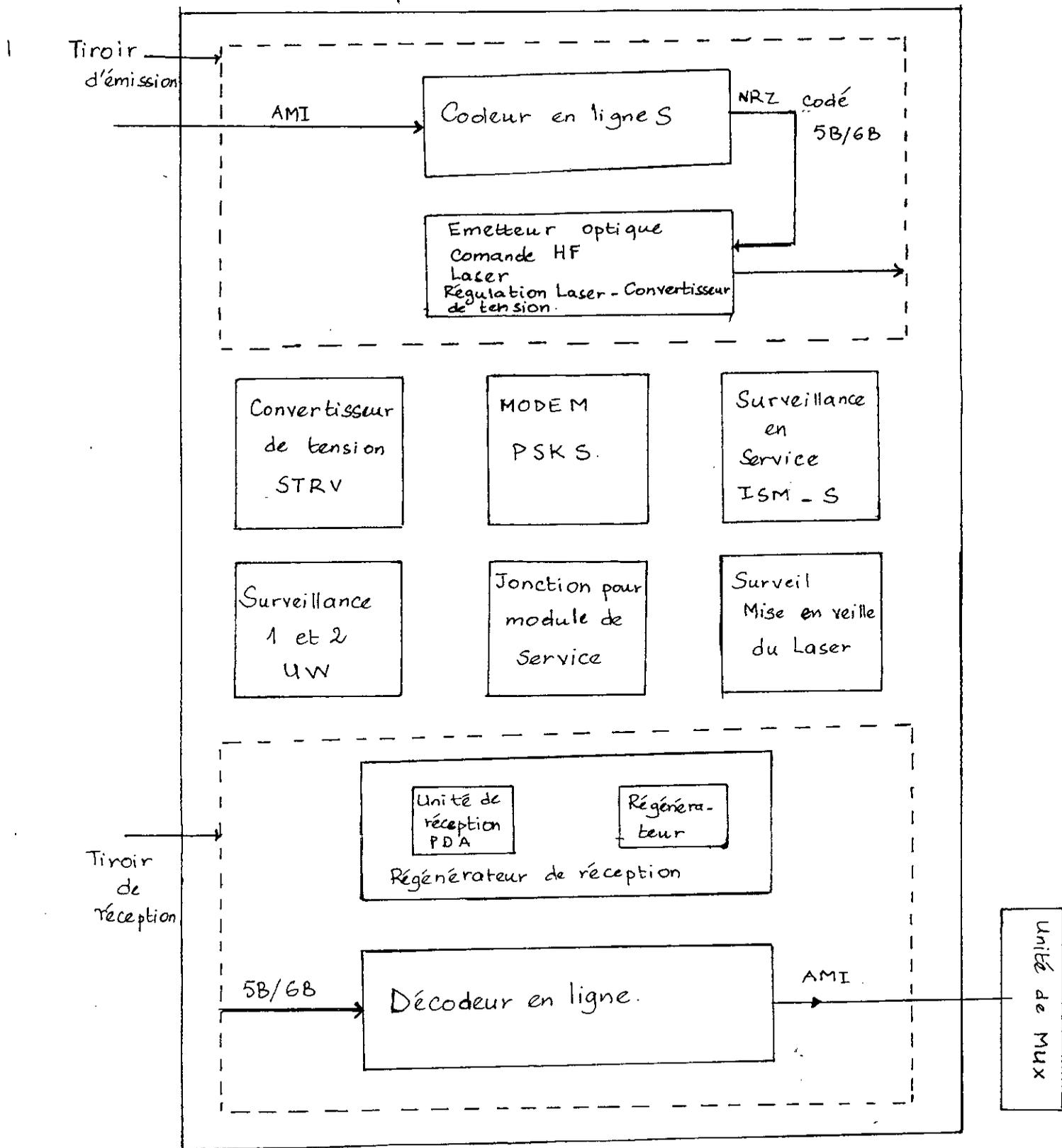
Point de jonction à 565 Mbit/s vers l'équipement de multiplexage

Rapidité de modulation	564,992 M bauds \pm 15 ppm
Code	AMI

5-8-2- Principe de fonctionnement

En association avec l'équipement de multiplexage DSMX 140/565, l'appareil terminal de ligne LE 565 LWL assure les fonctions d'extrémité d'une liaison en ligne numérique (DSGL) à ses deux bouts.

Les données sont transmises dans la fibre optique avec une rapidité de modulation de 678 M bauds. La qualité de la ligne de transmission est surveillée en permanence pendant l'exploitation.



1 Fig 3.16 Schéma synoptique du terminal de ligne optique.
LA 565 LWL (S)

A- Convertisseur de tension STRV

Le convertisseur de tension est conçu pour des tensions continues d'entrée comprises entre 36V et 75V. Il délivre six tensions de service ainsi qu'une tension de signalisation.

B- Bloc de surveillance

Ce bloc analyse les signaux d'erreur et de rappel, les visualise au moyen de DEL et les répercute au panneau de signalisation, à des équipements de surveillance externe.

C- MODEM PSK

Il est composé d'un modulateur-démodulateur, il est prévu pour chacun des sens de transmission. Son rôle est de moduler et de démoduler le signal de service transporté par le signal optique principal.

D- Tiroir de surveillance en service (ISM-S)

Ce tiroir sert à traiter et à répercuter le signal télémétrique à 2,4 Kbit/s portant l'information de localisation relative à une liaison. Il contient deux fois le même circuit, un par sens de transmission. L'essentiel de chacun de ces circuits est constitué par un régénérateur et un émetteur de télémétrie (TRS) servant avant tout à recevoir une chaîne de télégramme entrante, à générer son propre télégramme et à retransmettre la chaîne de télégrammes ainsi rallongée.

E- Tiroir pour module de service

Il contient 11 jonctions d'émission et 7 jonctions de réception servant à adapter les signaux internes (niveau TTL ou CMOS) Aux lignes symétriques conduisant au module de service ou venant de ce dernier.

F- Tiroir de mise en veille du Laser

Il sert à arrêter l'émetteur Laser en cas d'interruption de la ligne, pour garantir la sécurité des personnes.

G- Tiroir d'émission

G1- Introduction

Ce tiroir renferme deux blocs fonctionnels :

- le codeur en ligne qui convertit le signal de données codé AMI provenant de l'équipement de multiplexage à 565 Mbit/s en un signal de données NRZ codé 5B/6B à 678 M bauds destiné à l'émetteur optique. Ce dernier convertit le signal électrique en un signal optique.

G2- Codeur en ligne

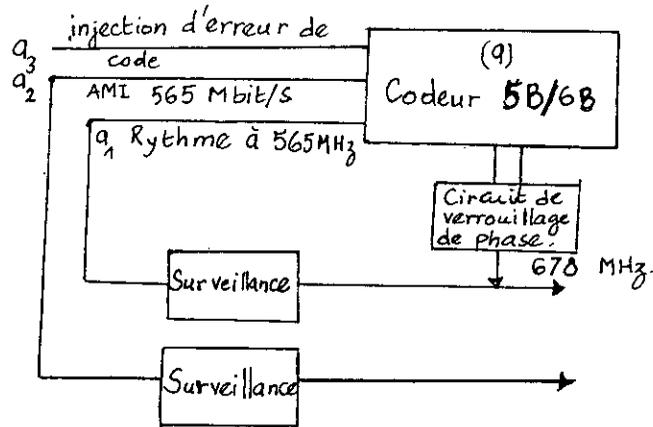


Fig. 5.17 : Schéma synoptique du codeur en ligne.

Le codeur en ligne reçoit de l'équipement de multiplexage le signal de données codé AMI à 565 Mbit/s à l'entrée a_2 et le rythme correspondant à 565 Mhz à l'entrée a_1 .

Le module (a) code en 5B/6B le signal de données et il génère ainsi le signal de données NRZ à 678 M bauds pour l'émetteur optique.

Un rythme à 678 Mhz est dérivé du rythme d'entrée à 565 Mhz par deux circuits à verrouillage de phase (PLL) servant de production de rythme. Ce codeur renferme également les circuits de surveillance pour les entrées a_1 et a_2 . En cas de reconnaissance de "l'absence du signal" en a_4 , il passe en mode de fonctionnement avec rythme de substitution.

G-3- Emetteur optique

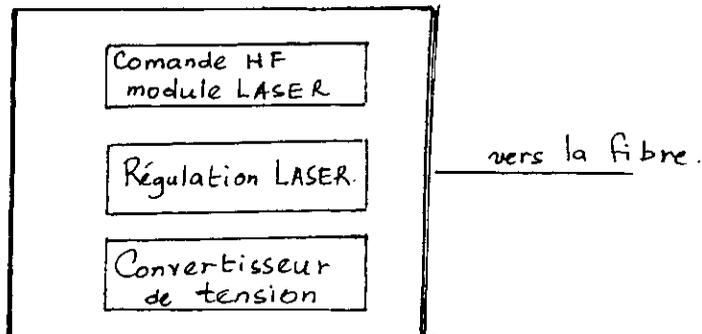


Fig. 5.18 :Schéma synoptique de l'émetteur optique.

L'émetteur optique se compose :

- d'une commande HF avec le module laser,
- d'un bloc de régulation du laser,
- d'un convertisseur de tension qui assurent respectivement les fonctions suivantes :
- conversion du signal de données électriques en un signal optique,
- régulation des paramètres de service,
- délivrance d'une source froide pour les thermoéléments à effet Feltier dans le module laser.

H- Tiroir de réception

H-1- Généralités sur le tiroir de réception

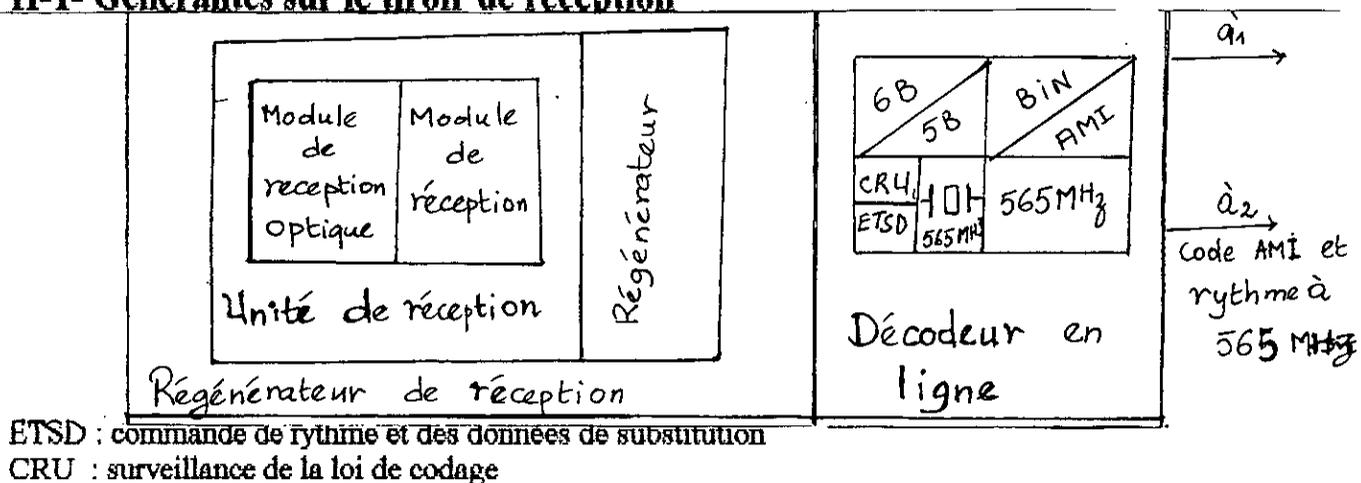


Fig. 5.19 : Schéma synoptique du tiroir de réception.

Le tiroir de réception renferme :

- le régénérateur de réception composé d'une unité de réception et d'un régénérateur,
- un décodeur en ligne.

H-2- Principe de fonctionnement

- L'unité de réception

Le signal optique reçu est transformé par une photodiode à avalanche (PDA) au germanium en un signal électrique dans le module de réception optique.

- Le régénérateur

Sert à rétablir le signal reçu dans sa forme d'origine. Pour ce faire, le rythme nécessaire à cette opération est délivré du signal reçu.

- Le décodeur en ligne

Ce bloc convertit le signal de données à 678 M bauds codé à 5B/6B en un signal de données à 565 Mbit/s codé AMI qui est ensuite injecté dans l'unité de multiplexage.

5.9 APPLICATIONS AVANTAGES ET PERSPECTIVES

Le système étudié précédemment est basé sur le principe de multiplexage plesiochrone. Avec ce type de système, on peut réaliser soit des liaisons point à point entre deux centrales téléphoniques, soit des liaisons multipoints constituées de stations intermédiaires pour le cas de liaisons à grande distance.

L'introduction de la fibre comme moyen de transmission a amélioré la qualité de transmission et a apporté une solution économique quand au nombre de répéteurs utilisés sans oublier la quantité considérable d'informations pouvant être véhiculée.

Concernant le débit à 565 Mbit/s, quoiqu'il ne soit pas normalisé par le CCITT présente des avantages tels que la souplesse du système et la transmission sur de longues distances, chose qui ne pouvait être réalisée par les systèmes à 140 Mbit/s.

Ce système a pour débit de base de 2 Mbit/s qui répond ainsi à la norme européenne. Le débit nominal de la norme nord-américaine est de 1,5 Mbit/s; ce qui pose un problème d'un point de vue technique et économique.

Dans le but de rendre universel les systèmes de transmission et de résoudre un certain nombre de problèmes, un nouveau système a vu son apparition: c'est le système numérique synchrone SDH qui permet ainsi d'acheminer des signaux aux normes nord-américaine en Europe et vice-versa.

CHAPITRE 6

MESURES ET REALISATION

6-1- Introduction

Le côté pratique de notre travail est divisé en 2 grandes parties, la première partie consiste en

- une série de manipulations portant sur le raccordement de 2 fibres optiques monomodes,
- une série de mesures d'affaiblissement sur les câbles à fibres optiques monomodes.

Ces expériences nous ont permis de localiser les éventuels défauts présents dans un câble à fibre optique et de minimiser les pertes résultantes.

La deuxième partie consiste en une réalisation d'une liaison (émetteur - récepteur) utilisant comme support de transmission une fibre multimode, pour transmettre un train d'impulsions lumineuses en largeurs variables (PWM). Les résultats obtenus avec leurs interprétations sont présentés à la fin du chapitre.

6-2- Manipulation et mesure

Cette partie traite les différentes étapes que nous avons suivies pour effectuer le raccordement de deux fibres optiques monomodes. Une fois que le raccordement est fait, nous avons mesuré les pertes du câble raccordé et plus précisément les pertes au niveau de la jonction fibre - fibre.

6-2-1- Réalisation pratique des raccordements de 2 fibres optiques monomodes

D'une façon générale, les fibres optiques, en sortie de fabrication, ont des longueurs déterminées (longueur de liaison : 2 à 6 Km).

La réalisation d'une liaison par câble à Fibres Optiques nécessite la pose d'une à plusieurs longueurs afin de couvrir la distance des centres à relier. Ces longueurs de câbles doivent donc être raccordées.

A- Matériels utilisés

- Un outil de coupe.
- Un appareil de fusion SUMITOMO type 35 dont une brève description est donnée en annexe 3.
- Des fibres optiques monomodes travaillant dans la deuxième fenêtre ($\lambda = 1\ 300$ (nm)).

B- Opérations préalables au raccordement

- 1- Dénuder complètement la fibre. La longueur à dénuder est fonction de l'appareil utilisé.
- 2- Nettoyer la fibre de ses impuretés au moyen d'alcool.
- 3- Couper le bout de la fibre en section droite afin d'éviter les irrégularités de surface qui provoquent la perte de la lumière.
- 4- On fait rentrer la fibre à travers un manchon thermorétractable en plastique. Ce manchon est pourvu d'une deuxième cavité dans laquelle est placée une tige en acier (fig. 6.1). Cette tige assure la protection du point de soudure contre les flexions causant la cassure.

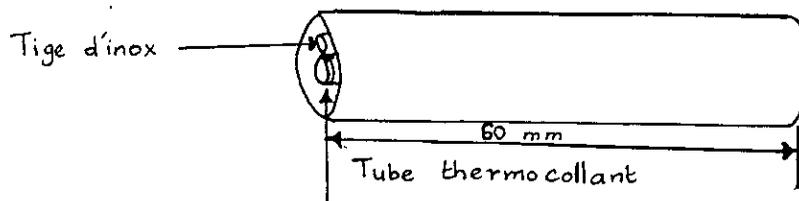


Fig.6.1 : Manchon de protection de la Fibre

- 5- On effectue les mêmes opérations qu'en 1, 2 et 3 à la deuxième fibre.
- 6- On procède à l'alignement des deux fibres. L'alignement doit être parfait suivant les trois axes x, y et z.

C- Opération de fusion

- 1- On procède d'abord à une préfusion (fig. 6.2-a et b). Cette préfusion permet :
 - le nettoyage complet de la fibre,
 - préparer la fibre à la fusion,
 - l'arc électrique fera brûler toutes les impuretés existant au niveau des sections d'où une facilité d'une fusion à travers toute la section.

2- On lance l'opération de fusion (fig. 6.2 c et d). Un fois la fusion achevée, une valeur est affichée sur l'écran. C'est l'affaiblissement dû à la jonction (épissure).

Cet appareil permet d'effectuer un raccordement optimal des fibres et donne une estimation de l'affaiblissement de l'épissure.

Pour le raccordement effectué aux deux fibres monomodes, la valeur indiquée de l'atténuation de l'épissure est de 0,2 dB.

D- Opérations après fusion

D-1- Une fois le raccordement achevé, on ramène le manchon (fig. 6.1), placé précédemment autour de la fibre, au niveau de la jonction (fig. 6.3). On le fait passer ensuite dans un four intégré à l'appareil ce qui permet de serrer la fibre contre la tige existant dans le manchon, pour lui donner une meilleure tenue mécanique (fig. 6.4).

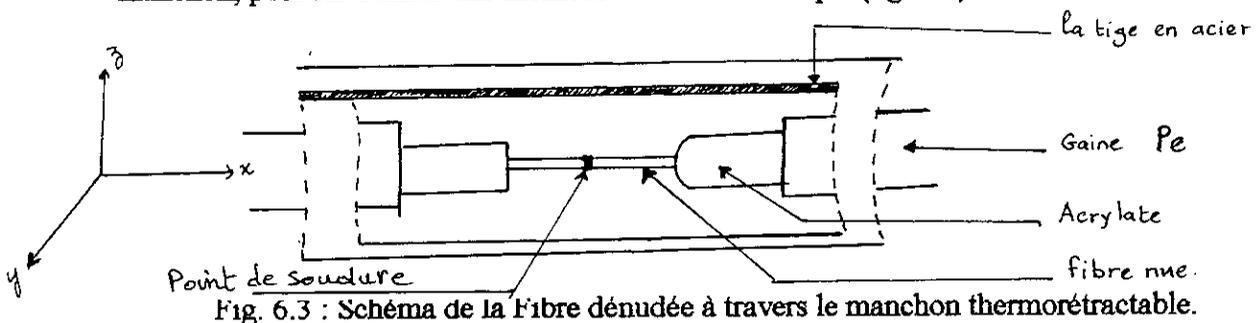


Fig. 6.3 : Schéma de la Fibre dénudée à travers le manchon thermorétractable.

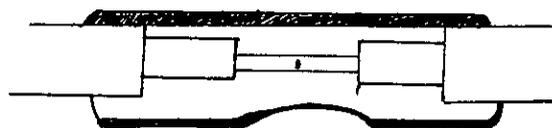


Fig 6.4 Schéma de la fibre après serrage.

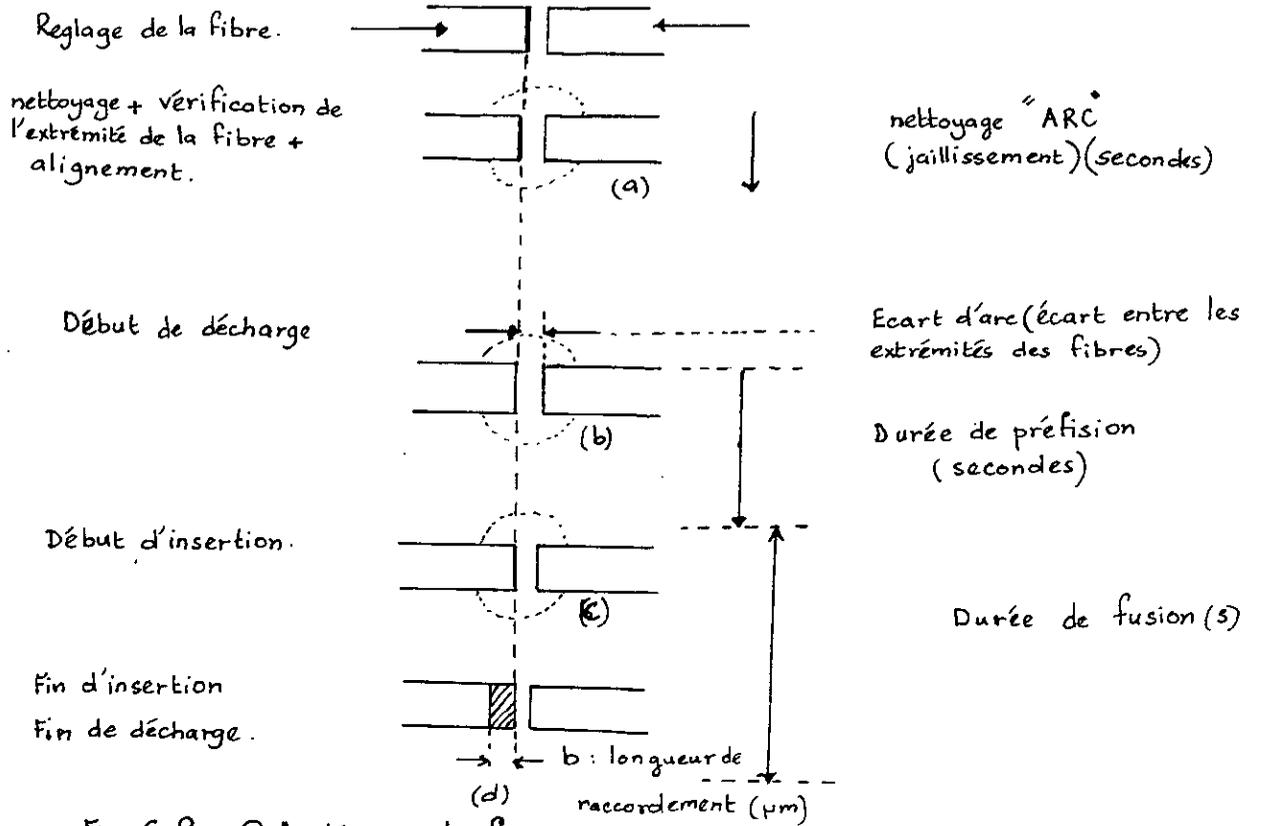


Fig 6.2 Opérations de fusion

B-2- On peut procéder d'une autre façon :

On dispose d'une plaquette appelée aussi peigne à plusieurs rainures, on place ensuite la fibre dans l'une des rainures. On mettra dessus de la résine de Silicone (fig. 6.5). Cette colle protège la partie dénudée, présentant la soudure, contre l'humidité et l'hydrogène.

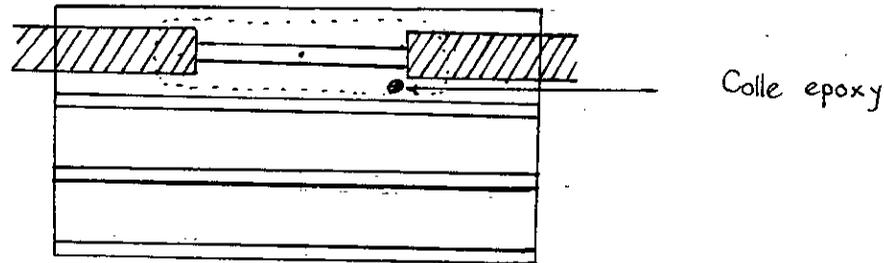


Fig 6.5 Plaquette à rainure

A noter que cette peigne étant placée dans une cassette (fig. 6.6) présentant aux 4 coins des entrées pour les fibres.

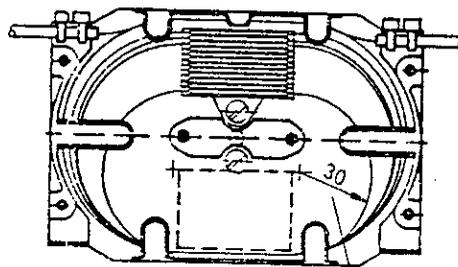


Fig 6.6 Schéma d'une cassette

6-2-2- Mesure d'affaiblissement

A- Matériel utilisé

L'analyseur de fibre optique AQ-7110C ou réflectomètre est un appareil qui localise les défauts de la fibre optique et mesure les pertes d'épissure et de puissance optique (voir annexe 4).

B- Principe de mesure

Une méthode pour effectuer une détection de défauts du câble de fibre est la méthode de rétrodiffusion.

La lumière qui se propage le long de la fibre optique s'atténue graduellement à cause de la diffusion de Rayleigh.

Les défauts sont détectés en surveillant la variation d'une partie de la lumière rétrodiffusée. La caractéristique d'atténuation est représentée sous forme de ligne dont la pente indique la perte de puissance optique (dB/km). Si l'inclinaison est raide, ceci signifie que la perte de puissance optique est sévère. Si elle est faible, ceci signifie que la fibre optique présente une caractéristique de perte satisfaisante (fig. 6.7).

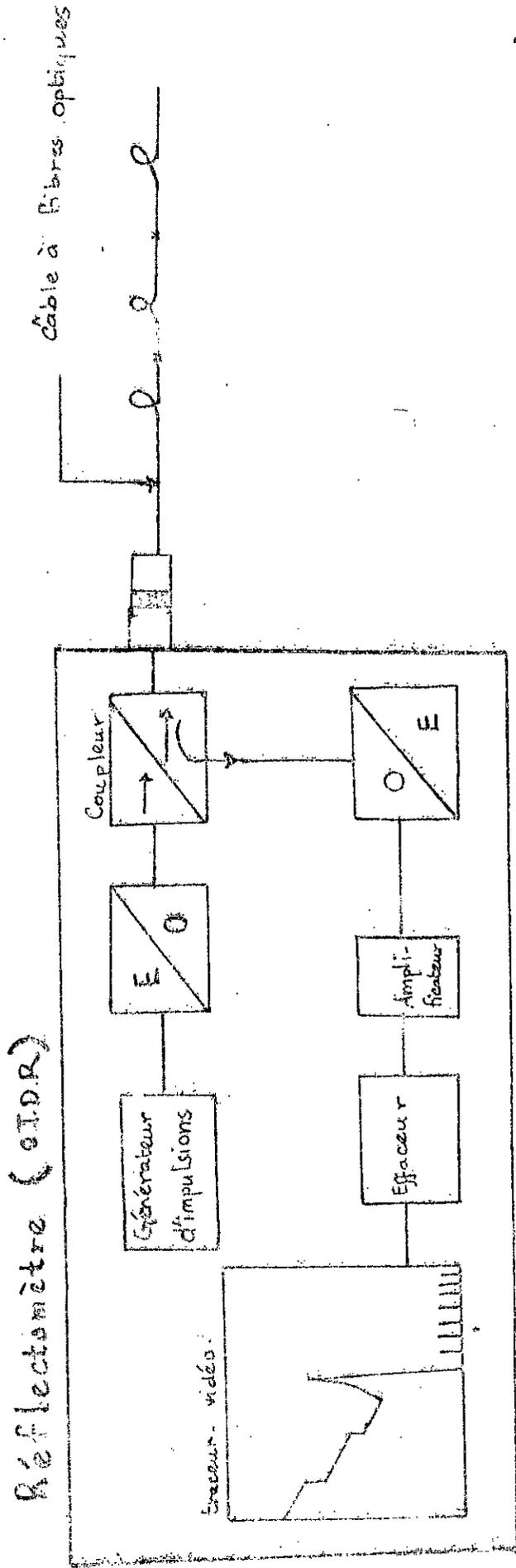


Fig 6.7 Mesure d'affaiblissement par le réflectomètre.

C- Paramètres affichés sur l'écran

Les affichages sur l'écran avec leurs descriptions sont donnés ci-dessous:

- les formes d'ondes rétrodiffusées et les formes d'ondes réfléchies de Fresnel, le curseur et les échelles sont affichés,
- l'axe horizontal représente la distance (km) tandis que l'axe vertical représente les niveaux énergétiques (dB),
- le type d'unité optique utilisée est affichée : SM (single mode) 1,3 μm : fibre monomode fonctionnant à la longueur d'onde = 1,3 μm ,
- la largeur de l'impulsion optique transmise PW,
- la portée DR (km) qui doit être sélectionnée au moins égale à 2 fois la longueur du câble de fibre optique utilisé,
- la valeur de l'indice de réfraction de coeur I_{OR} donné par le constructeur du câble,
- l'atténuation causée par l'ajustement de la gamme est affichée en terme de perte de fibre optique unidirectionnelle (dB),
- la méthode d'approximation utilisée pour le calcul numérique soit :
 - TPA : signifie l'approximation en 2 points ,
 - LSA : signifie l'approximation des moindres carrés,
- le point de départ de l'affichage de la forme d'onde (la position de l'extrémité gauche de l'écran) est donnée en (km)
- la position du curseur (km),
- les pertes d'épissure (SPLICE LOSS (dB)),
- la perte entre 2 points spécifiés par les repères (+,*) donnée en (dB) avec la distance qui les sépare (km),
- la perte linéique totale du câble (db/km),
- l'atténuation de l'appareil qui peut être ajusté automatiquement suivant le signal d'entrée (elle représente le degré d'amplification du récepteur existant dans l'appareil),
- des options donnant la date, le numéro de fibre et la station de mesure.

D- Interprétation des courbes affichées

On a effectué les mesures sur les différents câbles optiques, on aboutit aux résultats suivants :

l'allure générale de l'onde rétrodiffusée est donnée par la fig. 6.8 :

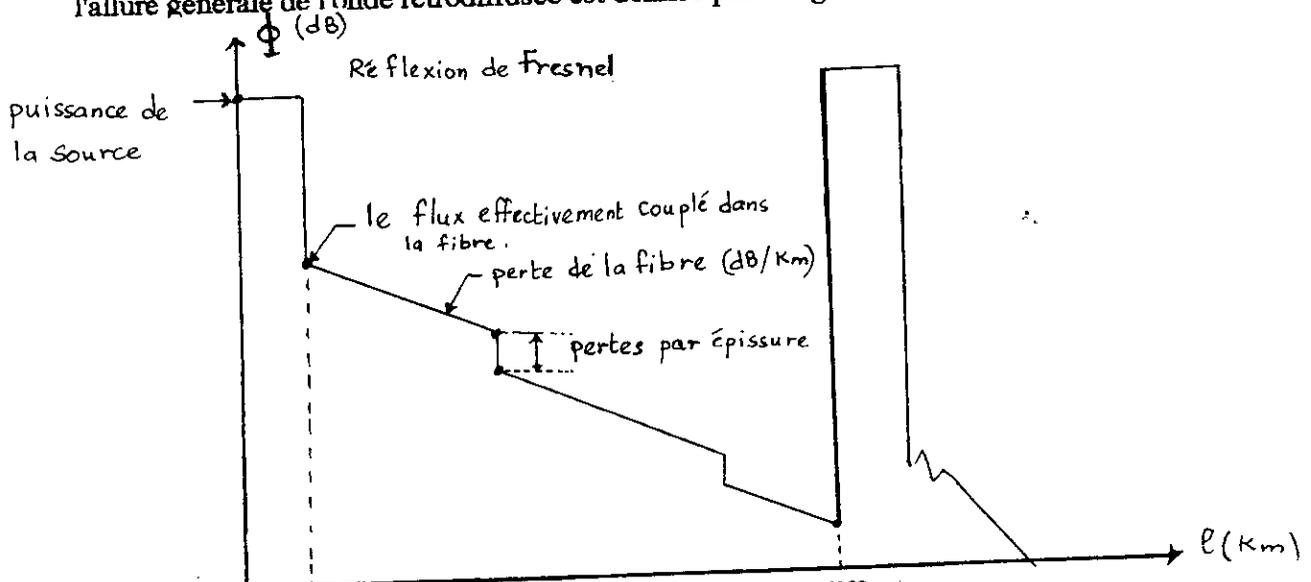


Fig. 6.8 : Représentation graphique de l'onde rétrodiffusée.

6-2-2- Mesures d'affaiblissements

A- Introduction

Nous avons effectué les mesures d'affaiblissement sur des câbles à fibres optiques monomodes. Ces mesures effectuées se font dans les deux sens, le sens choisi pour l'émission est celui qui présente l'affaiblissement le plus faible.

B- Interprétations et commentaires

B-1- Expérience n°1

Nous avons disposé d'un câble formé de plusieurs fibres optiques raccordées. Notre but était de mesurer les pertes le long de la fibre optique. Les mesures ont été faites. Elles sont données par la courbe 1.

Comme le montre la courbe 1, avec une largeur de l'impulsion optique transmise de 100 ns et un indice de réfraction du coeur de 1.5, la longueur du câble sur lequel on a effectué la mesure est

$L = 1.524$ km, l'affaiblissement du tronçon du câble est égal à 0.41 dB et l'affaiblissement linéique total du câble est égal à 0.27 dB/km.

B-2- Expérience n°2

Avec les mêmes données que précédemment, mais cette fois on a disposé d'un autre câble présentant une coupure à une certaine distance L de l'autre extrémité, chose qui peut être détectée par l'appareil. On obtient la courbe 2.

On observe une chute progressive du signal puis apparition du bruit, à partir du point de coupure, marquant une perte totale du signal. Pour ce cas, la coupure se trouve à une distance de 0,046 km.

B-3- Expérience n°3

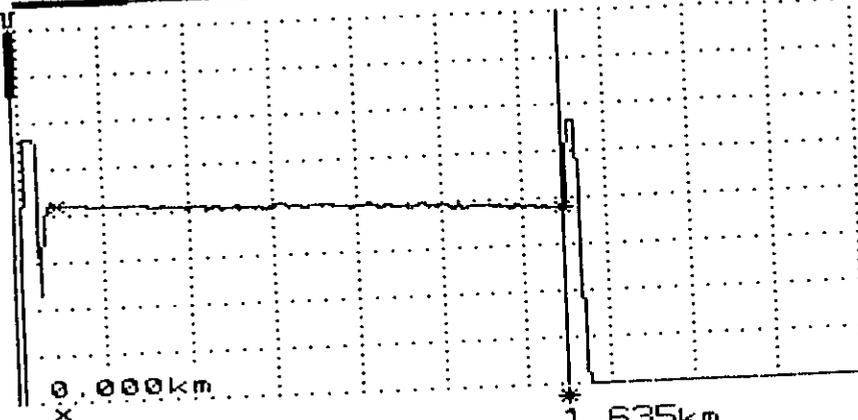
On change la largeur des impulsions et on voit quel est son effet sur la mesure. Pour une largeur d'impulsion $PW = 1 \mu s$, on obtient les courbes 3 et 4.

La courbe 4 présente une descente du signal puis une brusque montée, la valeur de l'affaiblissement à ce niveau est donnée dans la courbe 5.

On constate que si la largeur d'impulsion optique est élargie le niveau de lumière rétrodiffusée augmente et l'affaiblissement du câble devient plus faible, par contre si elle se rétrécit, on aura les résultats contraires. Il est donc nécessaire de sélectionner le réglage de la largeur d'impulsion suivant l'application de mesure désirée.

25-JUN-94 09:31
FIBRE-***
OPTIQUE***

D R= 18km
252m/div
1.0dB/div



LOSSx-
(2PA)

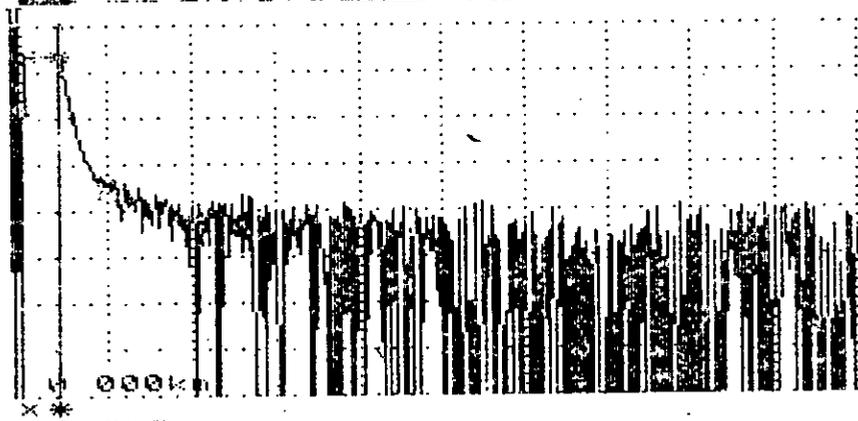
0.41 dB
1.524km
0.27 dB/km

*
1.635km
 $\lambda = 1.31 \text{ SM}$
P W=100ns
ATT= 0.0dB(AUTO)
IOR=1.4860

courbe 1

18 MAY-94 11:26
FIBRE.
FD 3

D R= 18km
100m/div
4.0dB/div



LOSSx-
(2PA)

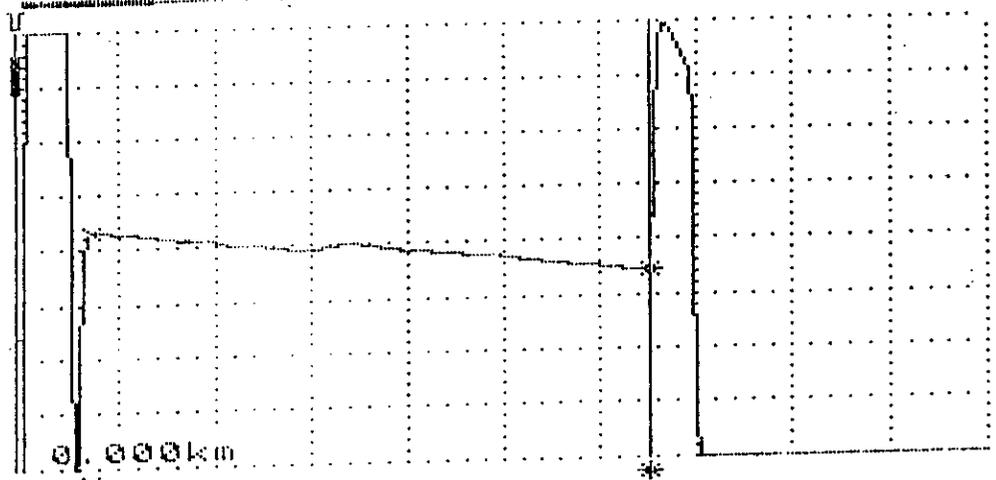
0.10 dB
0.038km
2.53 dB/km

*
 $\lambda = 1.31 \text{ SM}$
P W=100ns
ATT= 0.0dB(AUTO)
IOR=1.5000

courbe 2

01-JUN-94 10:42
FIBRE.
FO 3

D R = 18km
255m/div
0.5dB/div



~~WAVELENGTH~~
(LSA)

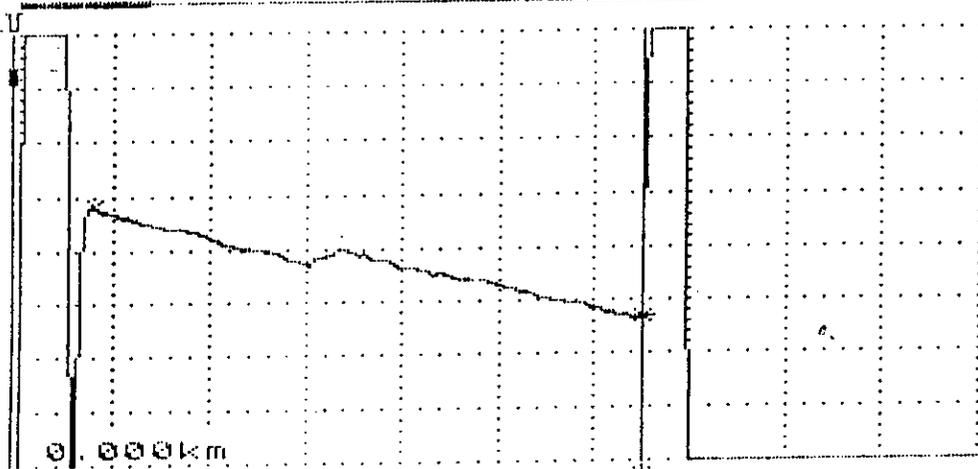
0.40 dB
1.480km
0.27 dB/km

1.663km
 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$
P W = 1 μs
ATT = 5.0dB(AUTO)
IOR = 1.4700

courbe 3

01-JUN-94 11:16
FIBRE.
FO 3

D R = 18km
256m/div
0.2dB/div



~~WAVELENGTH~~
(2PA)

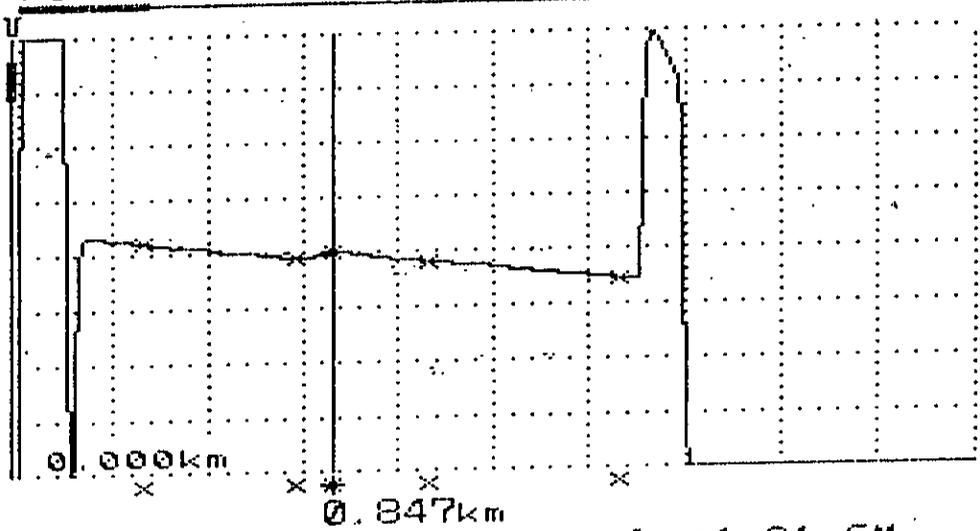
0.42 dB
1.464km
0.29 dB/km

1.669km
 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$
P W = 1 μs
ATT = 5.0dB(AUTO)
IOR = 1.4650

courbe 4

01-JUN-94 10:43
FIBRE.
FO 3

D R = 18km
255m/div
0.5dB/div



~~SPINCE LOSS~~ : -0.09dB
(LSA)

$\lambda = 1.31 \mu\text{m}$
P W = 1 μs
ATT = 5.0dB(AUTO)
IOR = 1.4700

courbe 5

6-3- Réalisation d'un émetteur - récepteur par fibre optique [15]

6-3-1- Schéma synoptique de la liaison

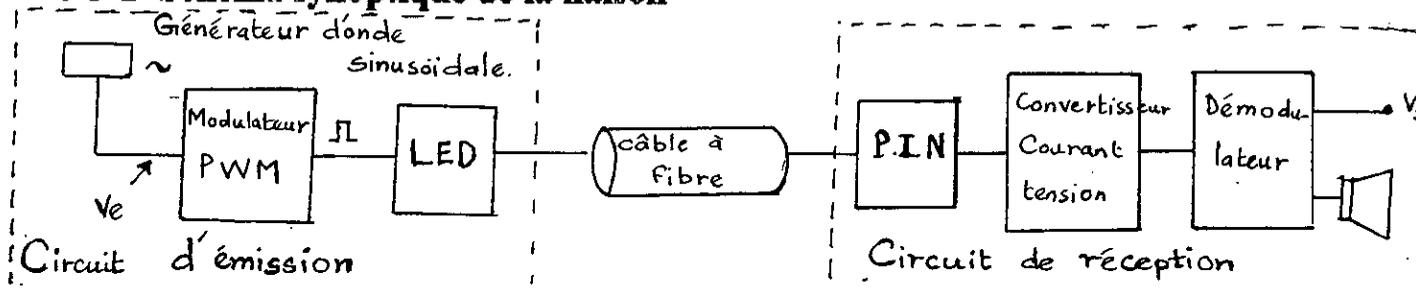


Fig 6.9 Schéma synoptique d'une liaison par Fibre Optique

La fig. 6.9 illustre de façon schématique le dispositif électrique utilisé. Le module de transmission comprend un générateur d'onde sinusoïdale ou un microphone relié à un modulateur qui fournit un train d'impulsions électriques de largeur variable.

La largeur des impulsions est proportionnelle au niveau électrique V_e présent à l'entrée du modulateur. Par suite, ces impulsions sont converties en impulsions lumineuses par la diode électroluminescente. Le train d'impulsions optiques est injecté dans la fibre et détecté par un photodétecteur à l'autre extrémité de la liaison.

Le signal électrique fourni par le photodétecteur alimente un convertisseur courant-tension et la sortie est envoyée dans un démodulateur. La sortie du démodulateur est tel que le niveau électrique V_s est proportionnel à la largeur des impulsions et par conséquent proportionnel au niveau V_e appliquée à l'entrée du module de transmission. La sortie du démodulateur peut être également relié à un haut parleur ou à un circuit d'affichage pour compléter la chaîne de transmission d'information.

6-3-2- Circuit d'émission

Le schéma détaillé du circuit d'émission est montré en figure 6.14.

A- Message à transmettre

Pour l'information transmise, on dispose d'un générateur d'onde sinusoïdale et éventuellement d'une voix humaine d'abord à travers d'un microphone puis à travers la chaîne de transmission présente en figure 6.9.

B- Modulateur PWM

Le circuit 556 sert d'abord d'horloge de base à fréquence fixe.

La fréquence est déterminée par R_8 et C_4 . La largeur de l'impulsion est déterminée par R_7 . Cette impulsion qui apparaît aux broches 5, 8 et 10 déclenche un monostable dont la durée est définie par la tension du préamplificateur CI_1 à la broche 11 du 556. Ce monostable est commandé par une source de courant, formé par l'ensemble T_1 , R_5 , D_5 , D_6 , D_7 , débitant dans le condensateur C_3 . Ainsi, à la sortie 9 du 556, on obtient des impulsions à fréquence fixe et de largeur proportionnelle au signal présent à l'entrée 11 du 556.

B-1- Fréquence de l'astable

- Schéma électrique

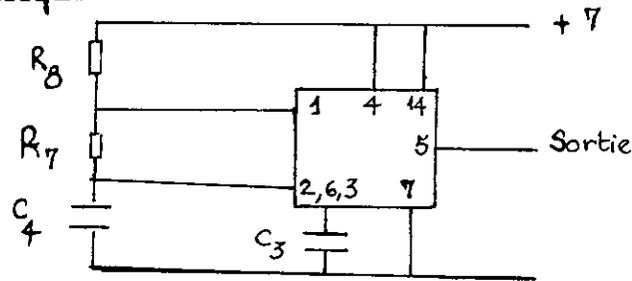


Fig 6.10 Schéma électrique de l'astable

La période du signal de sortie (patte 5) attaquant le second NE 555 (patte 8) monté en monostable est :

$$T = T_1 + T_2$$

avec T_1 et T_2 temps de charge et de décharge respectifs du condensateur. Elles obéissent à la loi suivante :

$$V_c(t) = V_f - (V_f - V_i) e^{-t/\tau}$$

- Calcul de T_1 et T_2

$$\begin{aligned} T_1 = ? \quad V_f &= V_{cc} \\ V_i &= 1/3 V_{cc} \\ V_c(T_1) &= 2/3 V_{cc} \\ \tau &= (R_8 + R_7) \cdot C_4 \end{aligned}$$

$$\text{D'où : } T_1 = (R_8 + R_7) \cdot C_4 \cdot \ln 2 \quad (1)$$

De la même manière on détermine T_2 :

$$\begin{aligned} V_f &= 0 \\ V_i &= 2/3 V_{cc} \\ V_c(T_2) &= 1/3 V_{cc} \end{aligned}$$

$$T_2 = R_7 \cdot C_4 \cdot \ln 2 \quad (2)$$

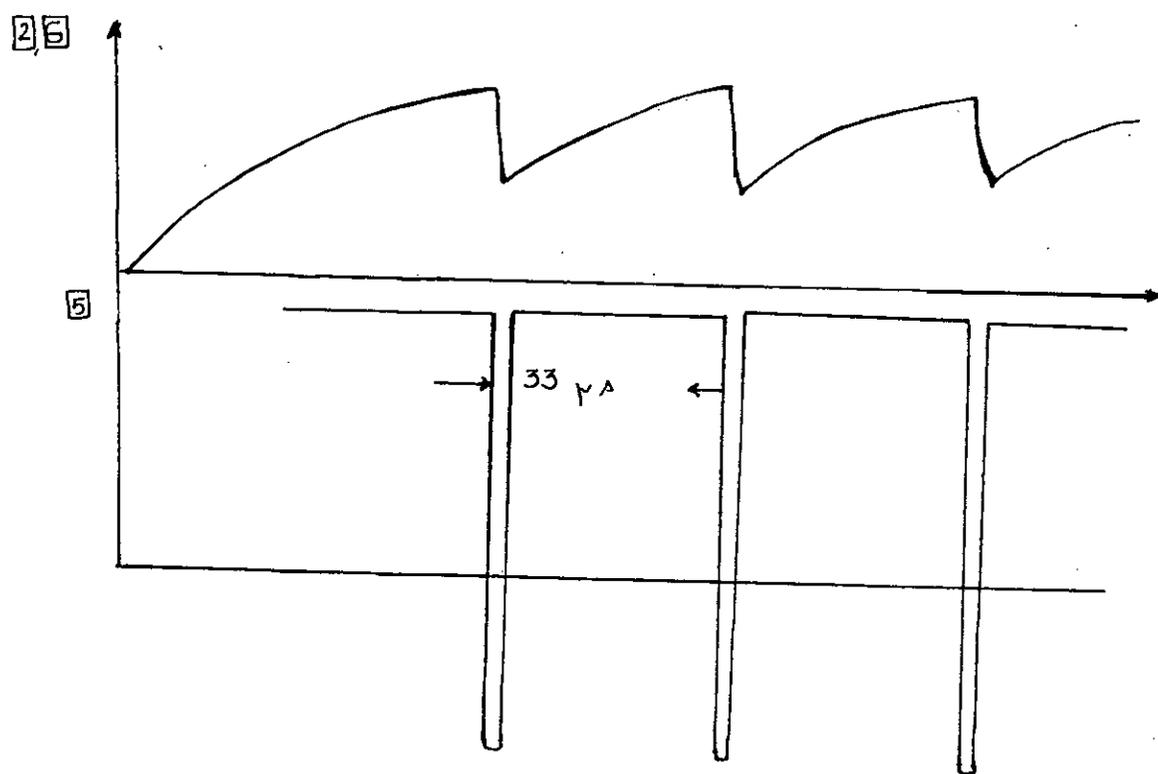
Des 2 relations (1) et (2) nous en déduisons la période :

$$T = T_1 + T_2 = \ln 2 \cdot C_4 (R_8 + 2 \cdot R_7)$$

$$F = 1/T$$

$$\text{A.N : } F = 1,44 / (4,3 \times 10 + 2 \times 220) \cdot 10 \times 10 = 30 \text{ Khz}$$

Chronogrammes



B-2- Générateur de courant

Schéma électrique

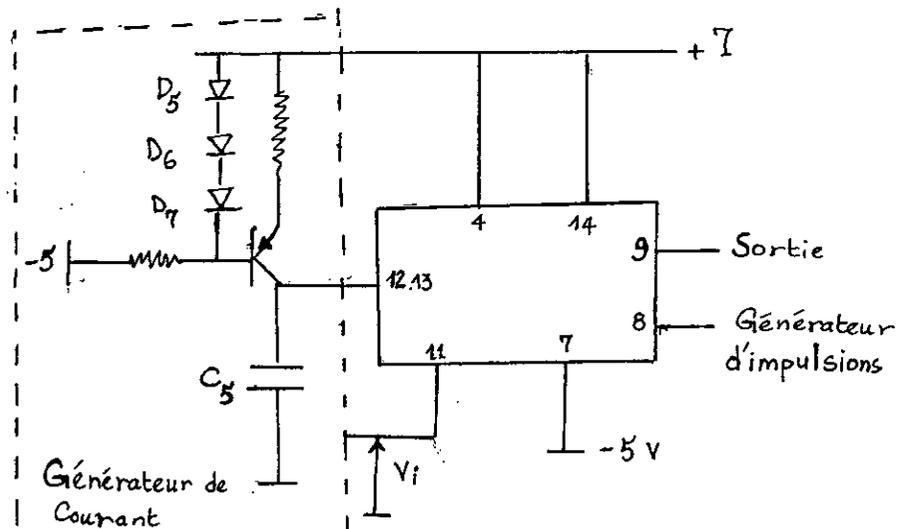


Fig 6.11 : Convertisseur tension-largeur d'impulsion.

- Principe de fonctionnement

Un générateur de courant est un générateur délivrant un courant constant.

Dans la figure on remarque dans le circuit de générateur de courant le condensateur C_5 qui se charge par l'intermédiaire d'un courant I_C constant ce qui lui confère la linéarité dans la charge.

B-3- Convertisseur tension-largeur d'impulsion

- Schéma électrique (fig. 6.11)

- Principe de fonctionnement

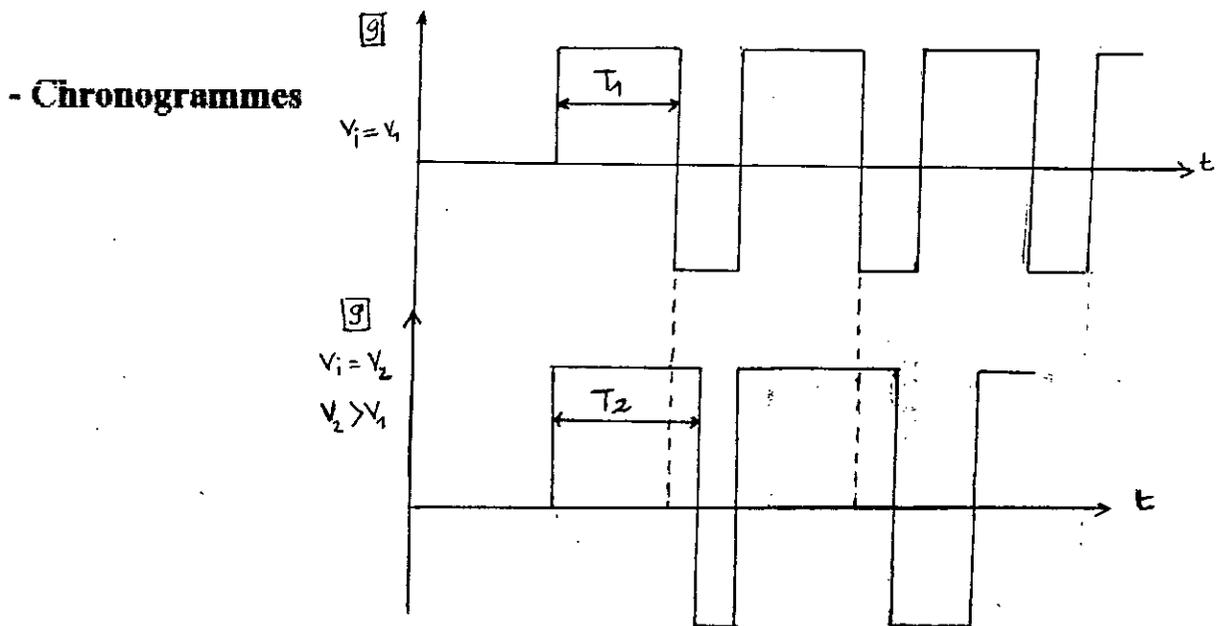
Lorsque on n'attaque pas la borne 11 du NE 556, la fréquence d'oscillation est imposée par R_5 et C_5 .

Une fois qu'on lui applique une tension de commande (signal audio par exemple) on pourra contrôler la fréquence du signal de sortie.

En effet, si on applique une tension V_1 à la borne 11 et après déclenchement du monostable, le condensateur C_5 se charge linéairement à travers R_5 . Quand la tension au borne C_5 atteint V_1 , la sortie 9 bascule et le transistor de décharge court circuité le condensateur C_5 . La sortie gardera son état stable jusqu'à l'arrivée d'une deuxième impulsion et le cycle décrit auparavant recommence.

En appliquant sur la borne 11 une tension $V_2 > V_1$, le condensateur se chargera alors jusqu'à V_2 pendant une durée T_2 puis se déchargera.

Ainsi l'application d'une tension variable sur l'entrée commande permet l'obtention d'un signal de sortie dont la largeur varie en fonction de la tension appliquée.



B4- Convertisseur tension - courant

Un convertisseur tension - courant rapide permet de transférer les impulsions de tension du signal à transmettre en impulsions de courant qui module la puissance lumineuse émise par la LED. Ainsi la branche R_{14} et C_6 ainsi que T_2 y sont pour accomplir ce rôle. La conversion électrooptique est réalisée par une LED.

6.2.3- Circuit de réception

Le schéma détaillé est donné en figure 6.15.

A- Photodétecteur

La photodiode dont on dispose étant intégrée, elle est présentée en annexe 5.

Elle permet de détecter la lumière émise par la LED à travers la fibre et ensuite transformer cette lumière en un courant I .

- Convertisseur courant - tension

Le circuit C_{13} est un préamplificateur faisant une conversion courant - tension de $1V/\mu A$ avec R_{17} .

B- Circuit de mise en forme

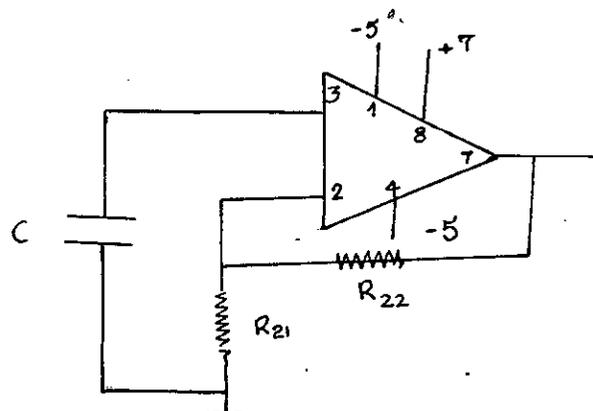


Fig. 6.12 : Circuit de mise en forme.

Le LM 311 est un comparateur à hystérésis (fig. 6.12). Sa fonction principale est la mise en forme du signal détecté. Sa caractéristique de transfert est donnée par fig. 6.13.

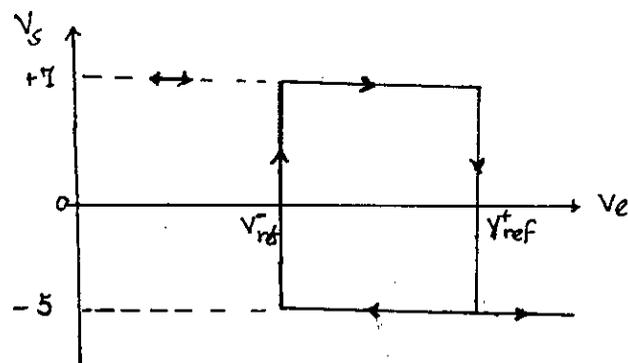


Fig. 6.13 : Caractéristiques de transfert.

Le LMC 311 fera une mise en forme du signal avec un point de comparaison à 0 V. La composante continue du signal est enlevée par C10. Une légère hystérésis est appliquée à ce circuit par R21 et R22 mettant le comparateur hors d'usage en cas de signaux trop faibles (et bruyants).

C- Démodulation

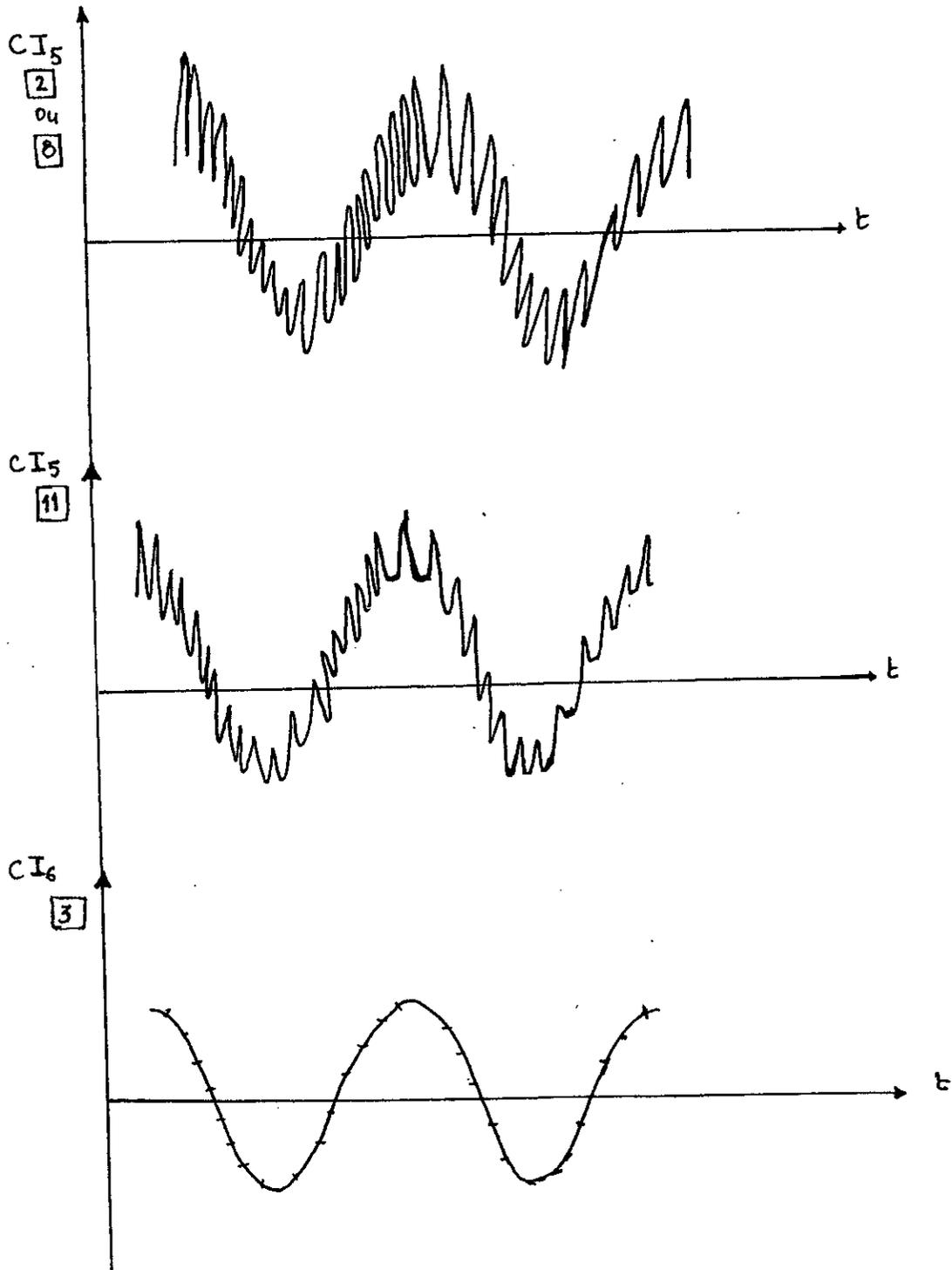
La démodulation PWM consiste à restituer en sortie le signal présent à l'entrée.

- Principe de fonctionnement

La sortie du comparateur contrôle une source de courant. Cette source de courant est ajustable par P2 et intégré dans C12.

Le circuit de portes analogiques ouvertes et fermées par C15 permet d'aller faire une remise à zéro sur C12 et de transférer cette charge sur C13 et ensuite sur C14 et ainsi d'aller chercher la valeur maximale de la tension sur C12. Les signaux qui décrivent le fonctionnement du démodulateur sont données sur le graphique suivant.

Chronogrammes:



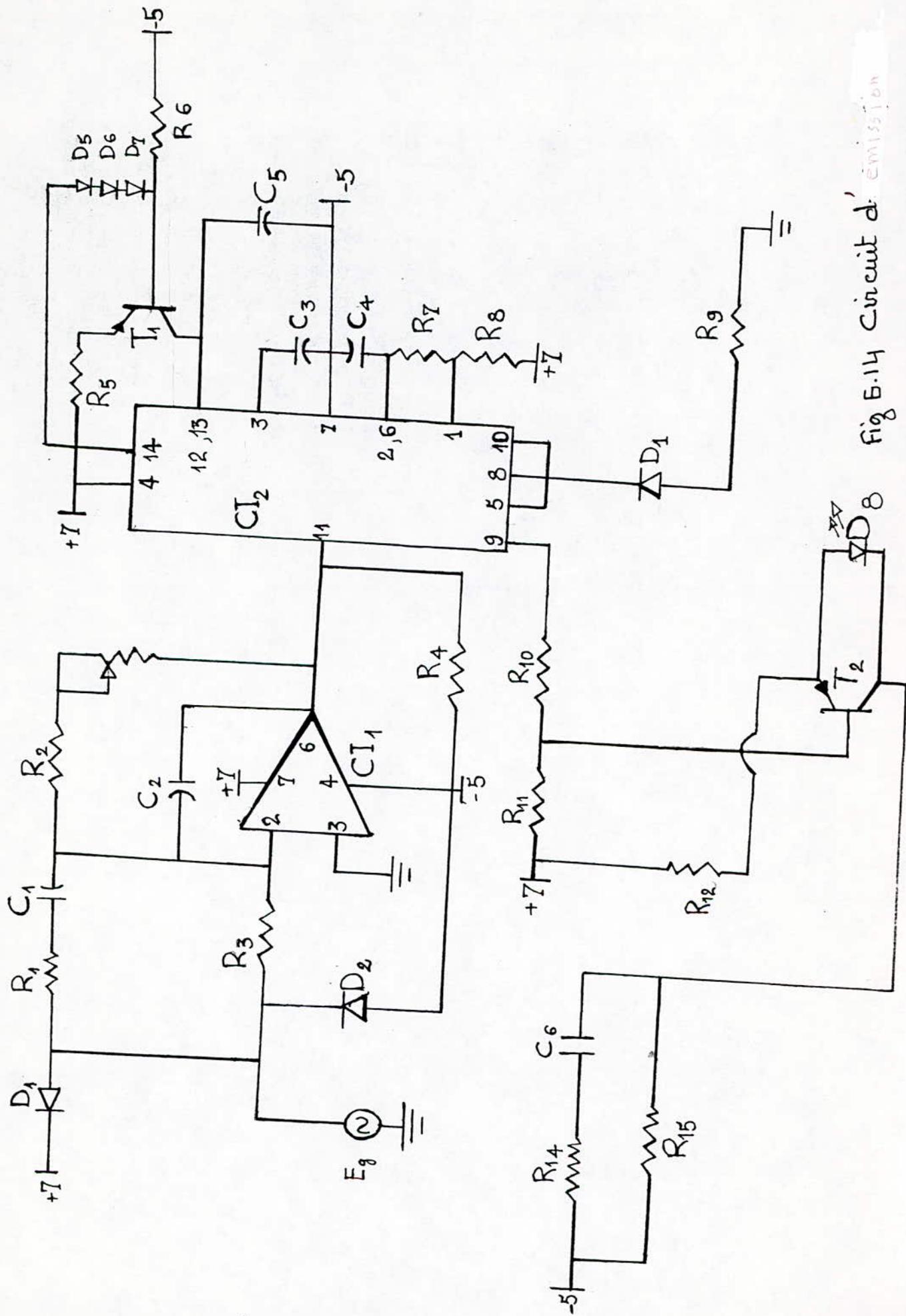


Fig E.14 Circuit d' emission

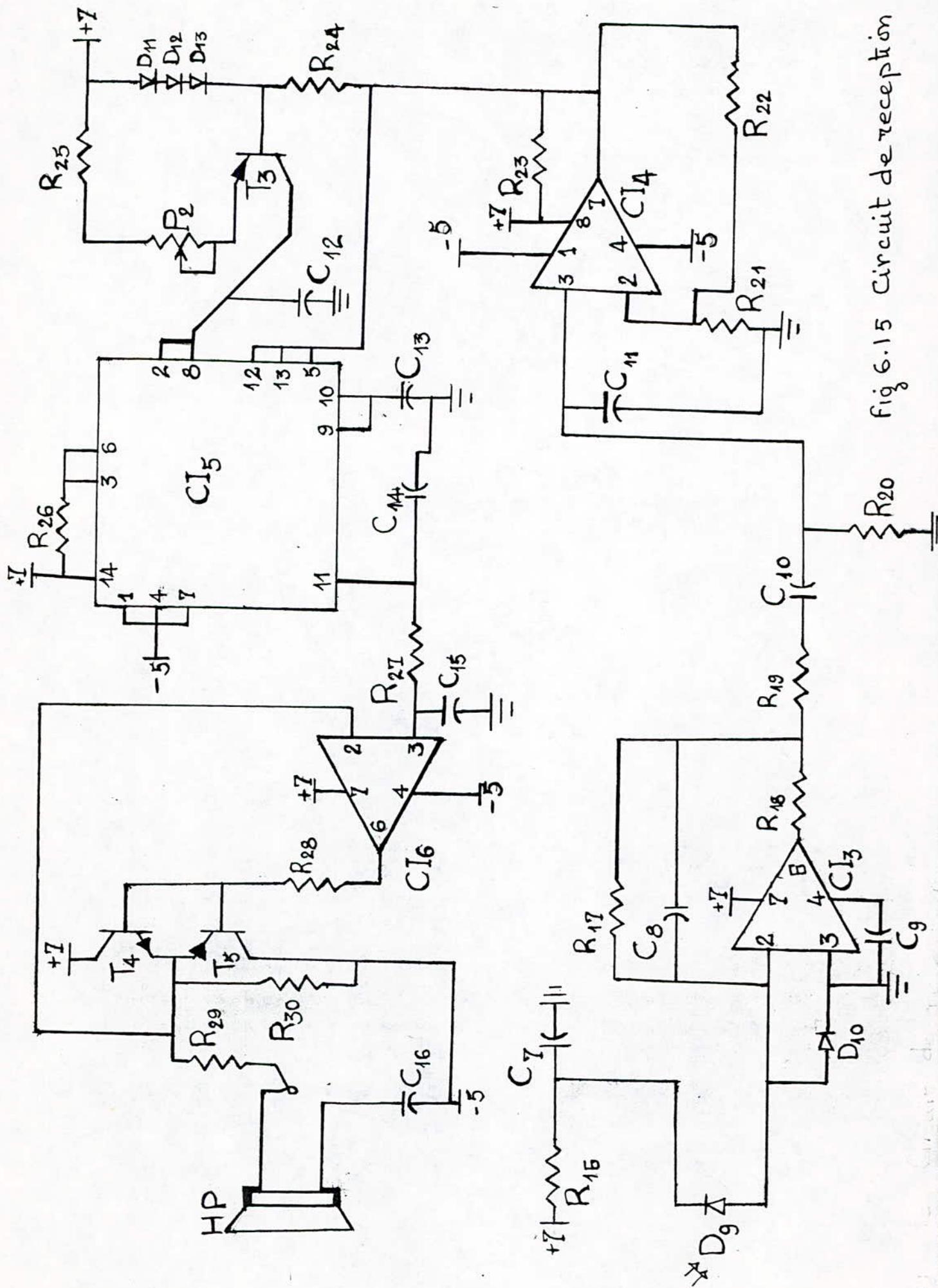


Fig 6.15 Circuit de reception

CONCLUSION

La réalisation de systèmes de communications par fibres optiques était subordonnée à la réalisation de fibres optiques à faible atténuation. Un développement fantastique de recherches fût engagé dans ce sens, et à l'heure actuelle, tous les grands laboratoires s'intéressent à ce problème.

A travers ce projet, nous avons dégagé la théorie de base nécessaire à l'étude de ces systèmes et à nous familiariser avec les dispositifs et les appareils opto-électroniques.

Nous pouvons conclure qu'un système de transmission, en général, est conçu essentiellement de deux parties: l'une assurant le regroupement de voix et l'autre assurant leurs transport.

Les inconvénients de ce type de systèmes sont compensés par la création d'un nouveau système de transmission: c'est le système numérique synchrone.

Les mesures d'affaiblissement effectuées sur la fibre optique monomode nous ont montrés le progrès réalisé dans les appareils de mesures, dans la fabrication et les techniques de raccordement.

La réalisation de la ligne PWM nous a permis de situer nos limites en matière de moyens techniques et économiques.

L'utilisation de la fibre optique comme moyen de transmission commence à se généraliser dans notre pays, surtout dans le domaine de télécommunications, où l'exploitation des systèmes à 565 Mbit/s a commencé cette année. Quand au nouveau système (SDH), il est en cours d'étude pour son éventuel mise en service.

Nous espérons que notre travail constituera une base pour d'autres études, pour une meilleure maîtrise et un développement éventuel, et qu'une meilleure considération puisse être donnée à ce domaine très vaste dans d'autres applications.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ungar, S, *Fibres Optiques*, BORDAS, Paris, 1989.
- [2] FONTOLLIET,P-G, *Système de Télécommunications*, le GRIFFON d'Argil, 1983.
- [3] IGA, K.I, SUEMATSU, *Transmission sur Fibres Optiques, Technologie générale* MASSON, Paris, 1984
- [4] COZANNET, A, FLEURET,J, MAITRE,H, ROUSSEAU, M, *Optique et Télécommunications*, CNET-ENST, EYROLLE, Paris, 1983.
- [5] NEROU, J.P, *Introduction aux Télécommunications par Fibres Optiques*, le GRIFFON d'Argil 1983.
- [6] BOUILLIE,R, HUIBONHO,D, "Système de Transmission Numerique", "Transmission d'Information utilisant des Fibres Optiques", *Techniques de l'ingenieur*, N°12, 1990
- [7] RASCHEN, R, "qualité et defaut des Systèmes de Transmission à Fibres Optiques", *le haut parleur*, N° 1723, Decembre 1985 PP90-98
- [8] HALLEY, Pierre, *les Systemes à Fibres Optiques* EY.ROLLES, Paris 1985.
- [9] HAI-VO-HO, RALPH MULLEN, *Electronique Industrielle*, GRIFFON d'Argile Quebec, Decembre 1983
- [10] CAR BALLEs, J.C, *Revue des Telecommunications*
- [11] BUZIOT, ANDRE, *Transmission Numerique*, Institut des Télécommunications ORAN 1985
- [12] SIEMENS, *Manuel complet du systéme de transmission numerique par Fibres Optiques jusqu'à l'ordre 5 (565 Mbit/s)*, MAI 1990.
- [13] CCITT, *systémes de transmission et equipement de multiplexage, recommandation G700 à G956. Tome III. Fascicule III.3. Geneve* 1985

- [14] NEC Corporation, systemes de transmission numerique par Fibre Optique, TOKYO, JAPAN, FEVRIER 1993.
- [15] POCATEC, travaux pratiques sur les Fibres Optiques, LTE, QUE.GORIZO
- [16] SUMITOMO Electric Industrie, Manuel complet d'installation du cable à Fibres Optiques, LTD, SEPTEMBRE 1992
- [17] ANDO ELECTRIC CO, AQ7110C Optical Fiber Analyser, manuel operatoire, AS-61885.1, LTD TOKYO.
- [18] HEWLETT, PAKARD, catalogue optoelectronique, imprimerie JARACH la Ruche, Paris 1988
- [19] Y.BERNIER, S.CALU, P, LE BROZEC,B. Le Nouel, C.PACCAUD, "Systeme de transmission numerique à 140 Mbit/s sur câbles à paires coaxiales CT 140", commutation et transmission, vol 2, P 15-30, JUILLET 1984
- [20] Y.BERNIER, S.CALU, P, LE BROZEC,B. Le Nouel, C.PACCAUD, "Systeme de transmission numerique à 140 Mbit/s sur Fibres Optiques à 1,3 μm (TF 140)" commutation et transmission, vol2, N°2, P31-46, JUILLET 1984

A N N E X E 1

LE CODEUR 5B / 6B

Le codeur 5B / 6B convertit un mot de 5 bits en un mot de 6 bits ce qui entraîne une augmentation du débit binaire d'un rapport 6/5 [139,26 - 167,117] bit /s [41].

Ce code permet : - d'annuler la composante continue du signal transmis en ligne.

- la détection des erreurs de transmission en mesurant la violation de la règle de codage grâce à la caractéristique de redondance que présente ce code.
- de prévenir la transmission permanente des signaux zéro ce qui maintient l'indépendance à l'égard de la séquence des bits des signaux de transmission d'où la facilité de récupérer le signal rythme.

Les règles de conversion du code 5B/6B sont les suivantes :

- . s'il ya deux bits " 1 " et trois bits " 0 " dans le signal d'origine à 5 bits, le sixième bit du signal 5B/6B est un " 1 ".
- . s'il ya trois bits " 1 " et deux bits " 0 " , le sixième bit est un " 0 "
- . s'il ya cinq, quatre, un ou zéro bits " 1 " et quatre bits " 0 " la seconde fois voir tableau suivant :

Signal d'origine
(5 bits)

Code 5B 6B

1 1 0 0 0
1 0 1 0 0
1 0 0 1 0
1 0 0 0 1
0 1 1 0 0
0 1 0 1 0
0 1 0 0 1
0 0 1 1 0
0 0 1 0 1
0 0 0 1 1

x x x x x 1

0 0 1 1 1
0 1 0 1 1
0 1 1 0 1
0 1 1 1 0
1 0 0 1 1
1 0 1 0 1
1 0 1 1 0
1 1 0 0 1
1 1 0 1 0
1 1 1 0 0

x x x x x 0

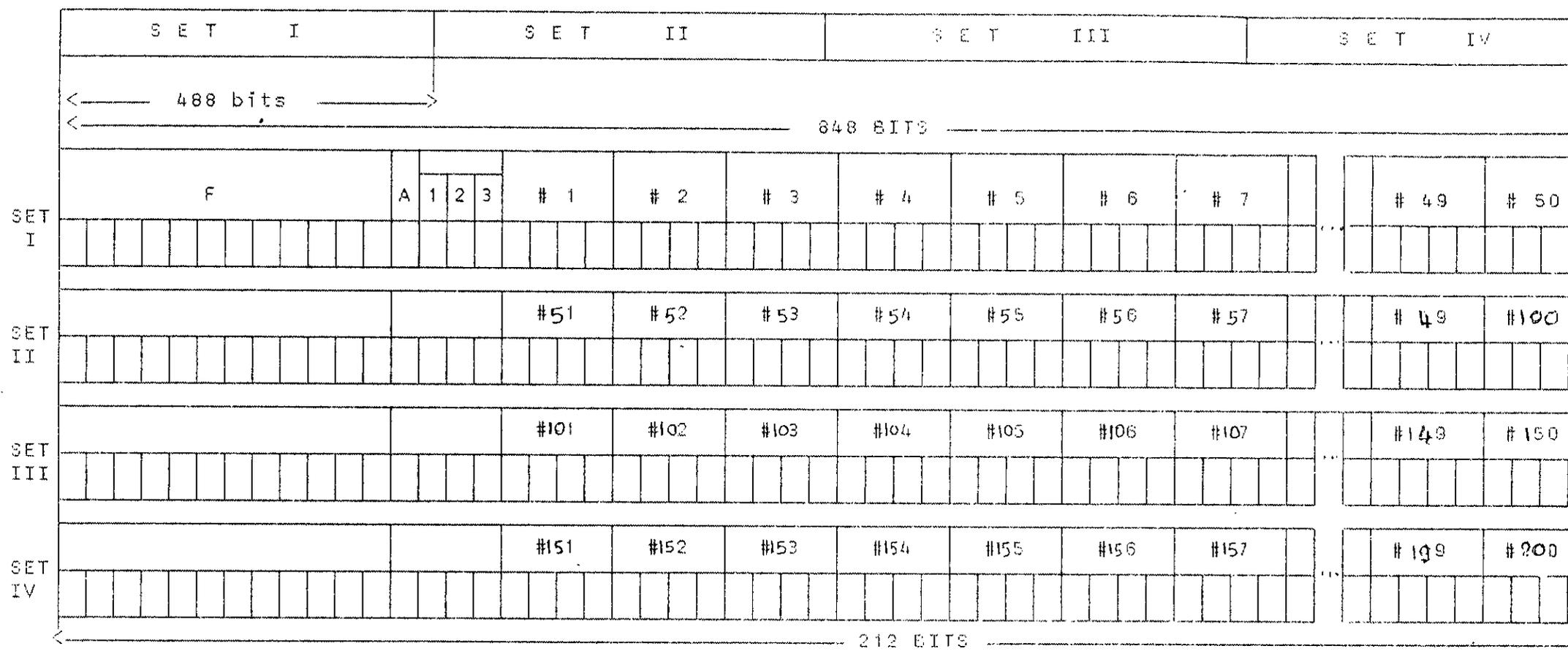
1 1 1 1 1
1 1 1 1 0
1 1 1 0 1
1 1 0 1 1
1 0 1 1 1
0 1 1 1 1
1 0 0 0 0
0 1 0 0 0
0 0 1 0 0
0 0 0 1 0
0 0 0 0 1
0 0 0 0 0

1 1 1 0 1 0
1 1 0 1 1 0
1 0 1 1 1 0
1 1 1 0 0 1
1 1 0 1 0 1
1 0 1 1 0 1
0 1 1 1 0 1
1 1 0 0 1 1
1 0 1 0 1 1
0 1 1 0 1 1
1 0 0 1 1 1
0 1 0 1 1 1

0 0 0 1 0 1
0 0 1 0 0 1
0 1 0 0 0 1
0 0 0 1 1 0
0 0 1 0 1 0
0 1 0 0 1 0
1 0 0 0 1 0
0 0 1 1 0 0
0 1 0 1 0 0
1 0 0 1 0 0
0 1 1 0 0 0
1 0 1 0 0 0

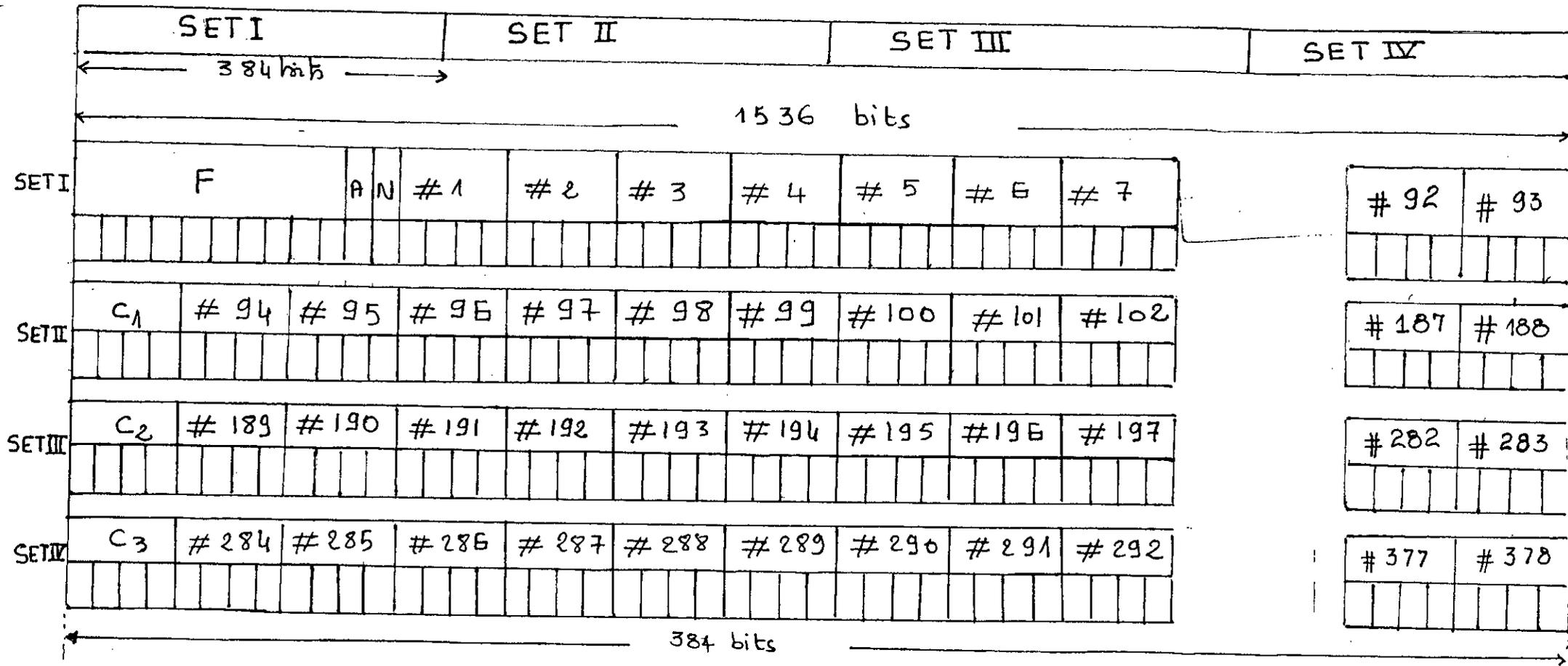
N. EX. 2.

X1 VERROUILLAGE DE TRAME



- F : Signal de verrouillage de trame (11110100001)
- A : Pour transmission d'alarme (ALM ... 1, NORM ... 0)
- N : Pour usage future (fixé à 1)
- # 1 à # 206 : Intervalles de temps pour bits vers / provenant des affluents
- C1 à C3 : Bits de commande de la justification
(Etat de Bourrage...111, Etat de Bourrage ... 000)
- # 155 : Bits provenant des affluents disponibles pour la justification
- Note : Les 1er, 2ème, 3ème et 4ème bits dans chaque groupe de # 1 à 206 et C1 à C3 sont attribués aux 1er, 2ème, 3ème et 4ème affluents, respectivement.

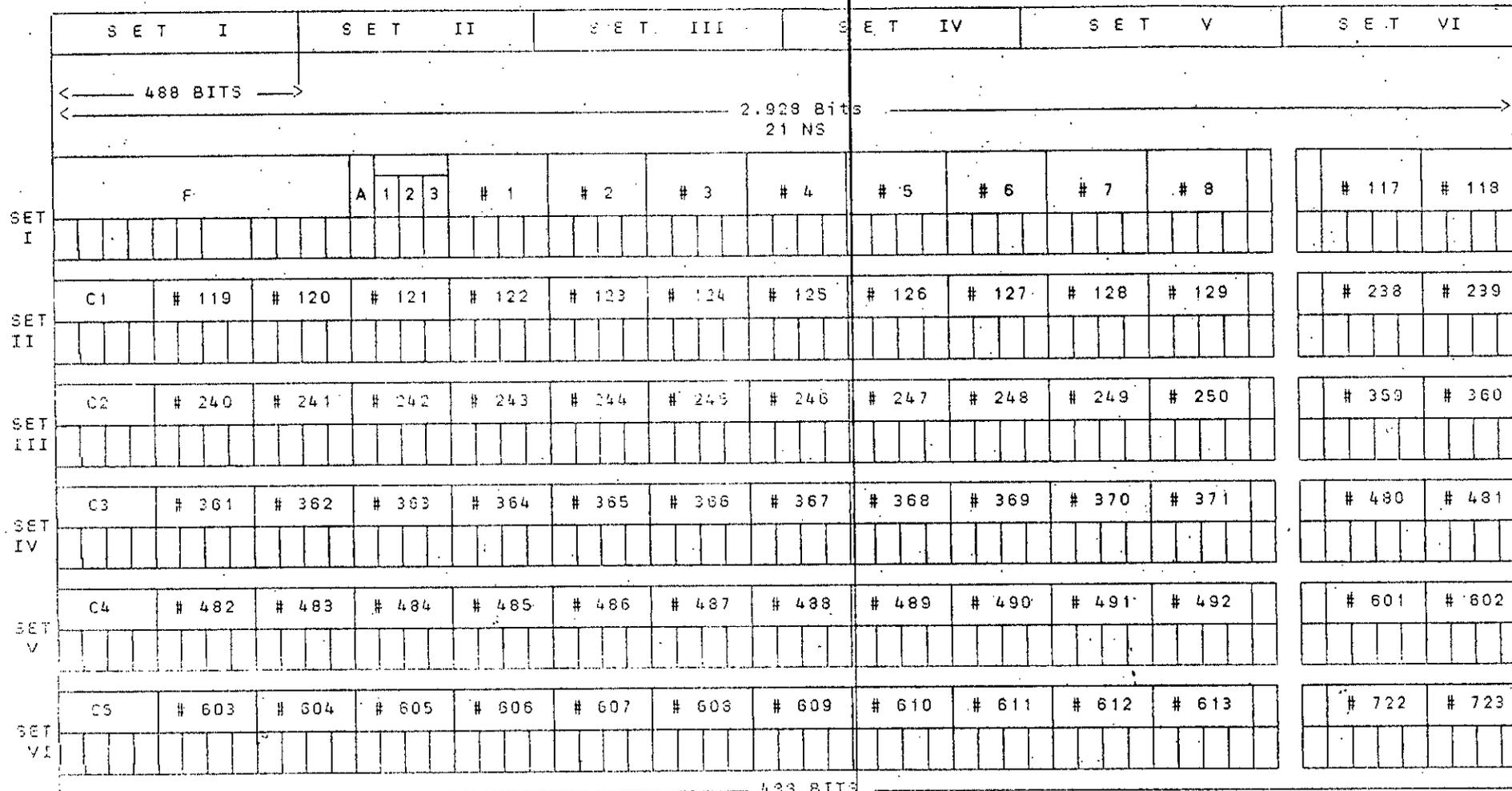
STRUCTURE DE TRAME A 8 N BITS / S (8 M N E 6020)



Note: Les 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} bits dans chaque groupe de # 1 à # 378 et C₁ et C₃ sont attribués aux 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} affluents, respectivement

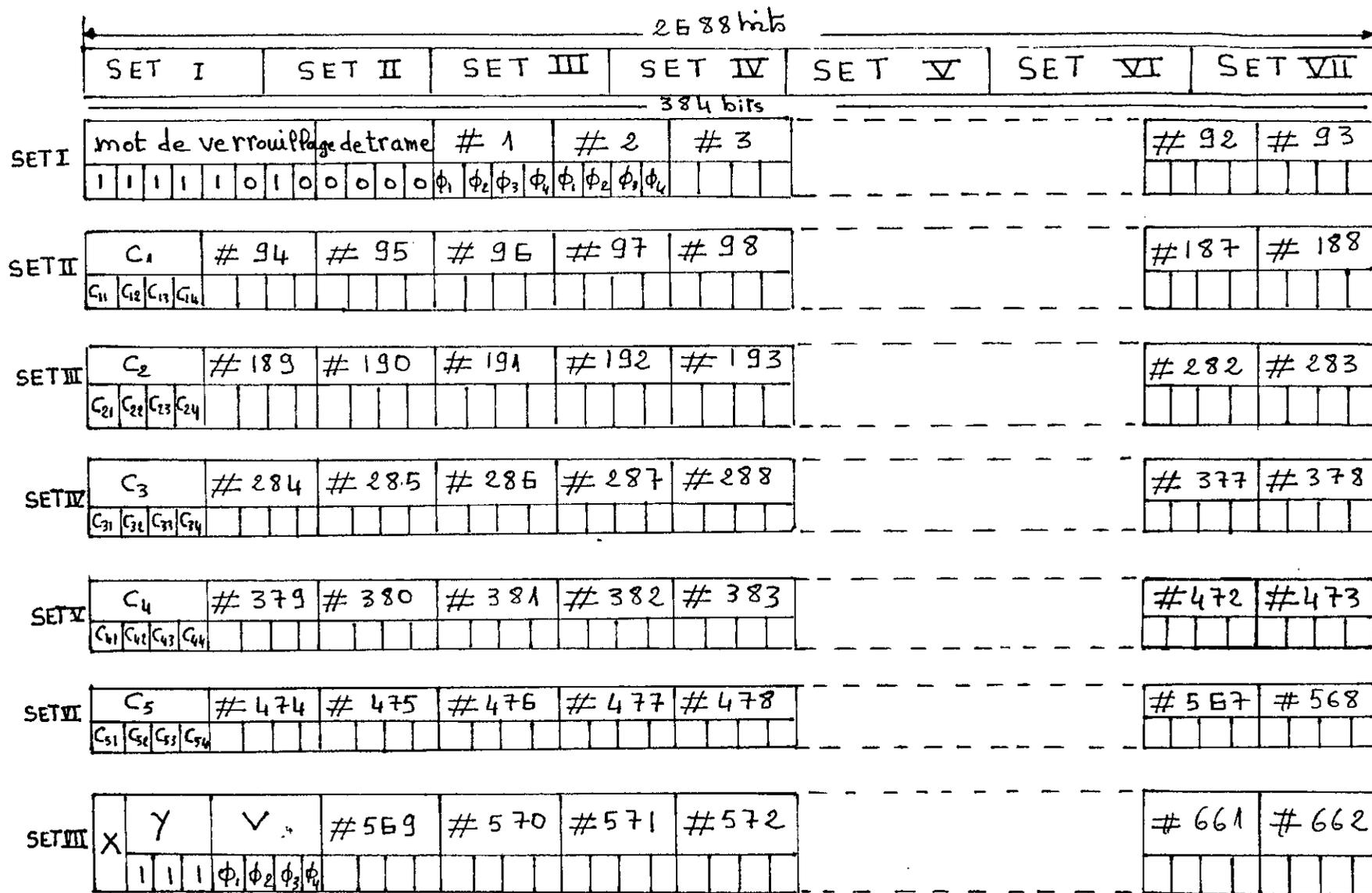
Structure de trame du Multiplexeur Numérique 34 Mbit/s.

CT VERROUILLAGE DE TRAME



- F : Signal de verrouillage de trame (111110100000)
- A : Pour transmission d'alarme (ALM...1,NORM...0)
- 1, 2, 3 : Pour transmission du bit de parité (0/1/0/0)
- #1 et #117 : Pour usage future (fixe à 1)
- #1 à # 723 : Intervalles de temps vers / provenant des affluents
- C1 à C5 : Bits de commande de la justification (Etat de justification...11111, état de non justification ...00000)
- # 603 : Bits provenant des affluents disponibles pour la justification
- Note : Les 1er, 2ème, 3ème et 4ème bis dans chaque groupe de # 1 à # 723 et C1 à C5 sont attribués aux 1er, 2ème, 3ème et 4ème affluents, respectivement

FIG 5.1 STRUCTURE DE TRAME DU MULTIPLEXEUR NUMERIQUE à 140M NE 6041



X : Pour transmission d'alarme (ALM='1', NORM='0') ; C₁ à C₅ : Bits d'indication de justification
 Y : Pour usage futur "fixé à 1"
 # 1 ≠ 173 : NI

Structure de trame à 565 Mbit/s

A N N E X E 3

DESCRIPTION DE L'APPAREIL DE FUSION DU TYPE 35

PRESENTATION : [16]

Le type 35 fusion splicer (appareil d'epissurage) est utilisé pour épisser des fibres optiques de verre de silice (diamètre extérieur : (80 a 150 µm). Il est muni d'un écran a travers lequel on peut suivre les différentes opérations aboutissant au raccordement final.

Le tableau ci dessous indique les exigences des fibres pour le type 35.

ARTICLES	DESCRIPTION
Matériaux	verre de silice
Diamètre de la gaine (µm)	80 a 150
Diamètre du coeur d'une fibre a mode unique (µm)	7 a 12
Diamètre de revêtement	0,1 a 1,5 mm
longueur de la division (mm)	16 + 1*

* 12 + 0,5 mm
9 + 0,5 mm] (optionnel)

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Cet appareil fonctionne selon le procédé DCM

PRINCIPE DU D C M (SURVEILLANCE DIRECTE DU COEUR)

1 - Quand la fibre est éclairée par une lumière collimatée provenant du côté, les limites entre le coeur et la gaine et entre la gaine et l'air peuvent être observées sous forme de lignes noires causées par la réfraction de la lumière.

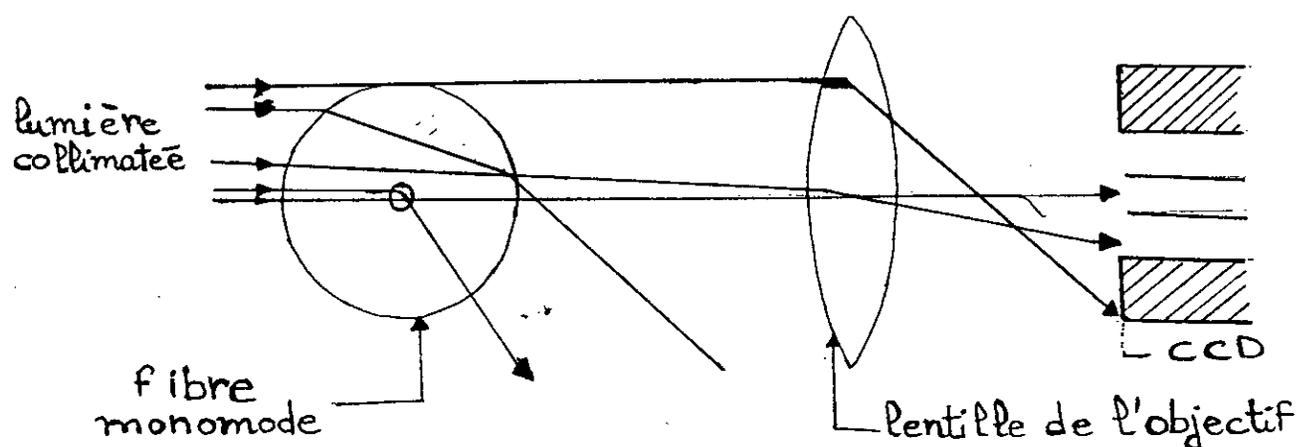


Fig 3.1 Principe du principe du D.C.M

2 - L'Image latérale de la fibre est mise au point par la lentille de l'objectif sur le CCD (Dispositif à Couplage de Charge). La caméra CCD produit les signaux vidéo analogiques (format NTSC) qui sont convertis en signaux numériques par un circuit électrique placé sur la caméra CCD. Les limites entre l'âme et la gaine et la gaine et l'air peuvent être reconnues par le micro-ordinateur placé dans le corps principal qui traite les signaux numériques.

3 - Les vues verticales et horizontales de la fibre sont observées en déplaçant le microscope suivant les axes verticales et horizontales.

L'ANALYSEUR DE fibre optique AQ 711 OC [17]

La perspective extérieure du AQ 711 OC Optical - Fiber - Analyseur (analyseur de fibre optique) appartenant a la Firme Japonaise, de type ADS - 61885 - 1 - 1/3 a 3/3 est donnée par la fig (4-4) : []

CARACTERISTIQUES :

Le réflectomètre lance des impulsions optiques dans une fibre optique a une extrémité et détecte leur lumière rétrodiffusée et réfléchi de Fresnel. Il présente les caractéristiques suivantes :

- . Importantes gamme dynamique (30 db max pour la lumière rétrodiffusée)
- . Résolution maximum : 0.25 m.
- . Imprimante intégrée grande vitesse.
- . Module de mémoire (option).

Avec ces caractéristiques, le AQ 711 OC est un appareil de mesure idéal.

SPECIFICATIONS :

Les spécifications principales pour le AQ 711 OC sont données dans le tableau suivant :

Résolution de lecture	25 cm max (50 cm sur la gamme 256 Km)	
Affichage sur écran	Contenu	formes d'ondes mesurées (données unidirectionnelles). conditions des mesures (type de l'unité utilisée, portée, ...) résultats des mesures (pertes entre 2 points, distance, perte d'épissure , perte par longueur d'unité).
	Echelle axe x	distance (Km)
	Déplacement axe x	0 à vraie grandeur
	Echelle axe y Résolution axe y	5 db / div - atténuation / div y : 0.01 db max
Réglage de l'indice de réfraction		L'indice de réfraction de f.0 est réglable par étapes de 0.00001 sur une gamme de 1,00000 à 1,99999.
Précision de mesure	$\pm (5 \times 10^{-5} \times$	distance de mesure (m) + 1,5 m) à une résolution de 25 cm.
Durée de mesure	17 sec ou	moins
Fonction mémoire		Les conditions de mesure, les conditions d'affichage et les conditions de calcul sont mémorisées ou lues grâce à la mémoire.

Imprimante		Impression de la forme d'onde, environ 7 s
Dimensions et masse		Environ: 152 (H) x 320 (L) x 450 (P) mm, environ : 13 Kg

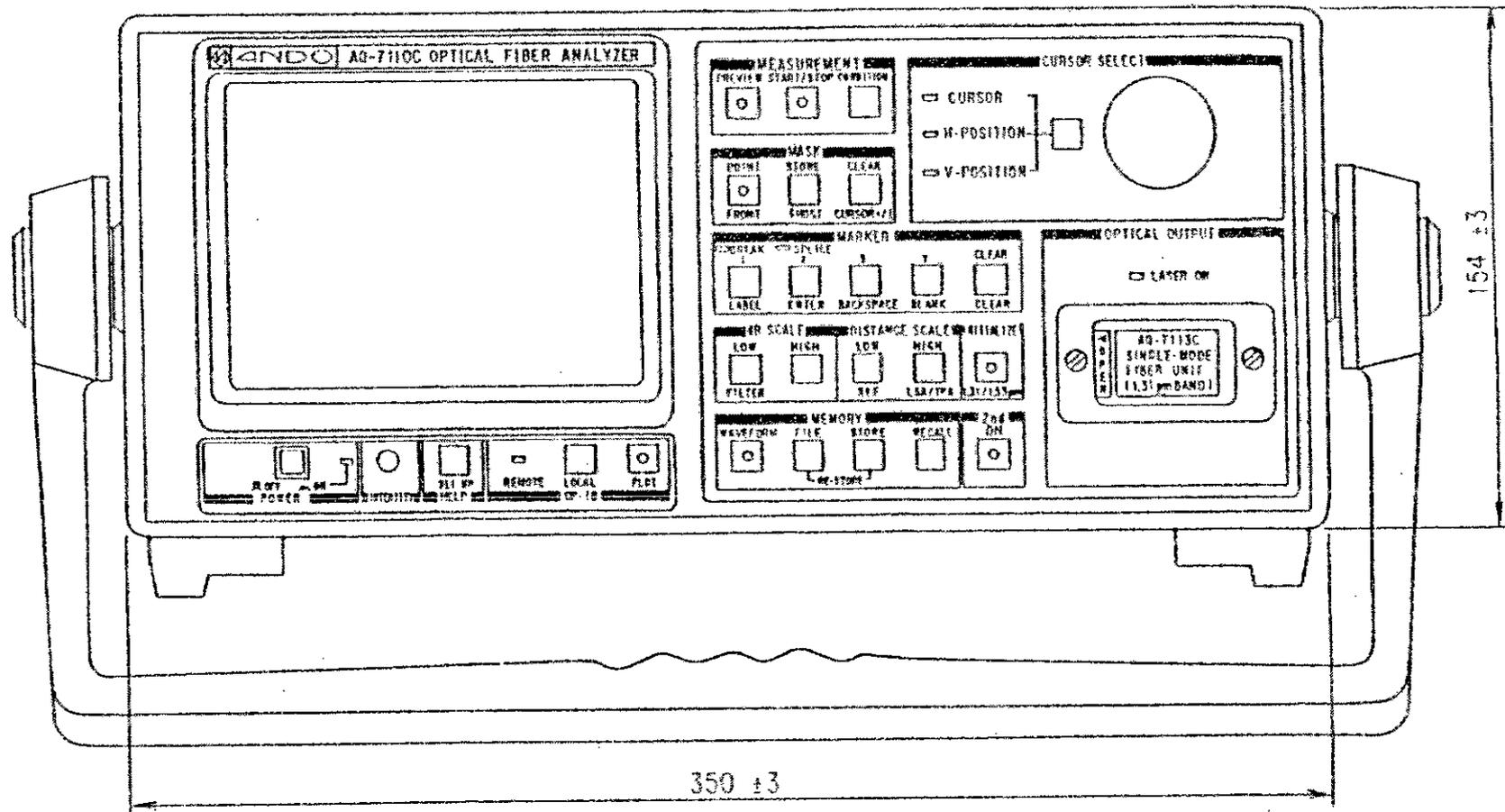
Unités Optiques :

Une unité optique en fichable appropriée doit être sélectionnée suivant l'application, le tableau suivant donne les unités optiques disponibles.

Fibre Optique Utilisée	Longueur d'onde	Unité Optique Utilisée
Fibre à mode multiple (50 - 125)	0.85 μ m	AQ 7111 Unité de longueur d'onde courte.
Fibre à mode multiple (50 - 125)	1.3 μ m	AQ 7112 AQ 7 112 C] Unité de fibre à mode multiple.
Fibre à mode unique (10 - 125)	1.3 μ m	AQ 7103 - AQ 7115 AQ 7113 - AQ 7115 C] Unité de fibre à mode unique AQ 7113 C
Fibre à mode unique (10 - 125)	1.55 μ m	AQ 7114 AQ 7114 C AQ 7115 - AQ 7115 C] Unité de fibre à mode unique

Mesure :

Cet appareil dispose de 2 fonctions de calcul pour les mesures de perte et de perte par longueur d'unité.



Dimensions en mm

**PERSPECTIVE EXTERIEURE DU AQ-7110C OPTICAL FIBER ANALYZER
(VUE DU DEVANT)**

Annexe 5

Nomenclature.

EMETTEUR

$R_1 = 16 \text{ k}\Omega$
$R_2 = 240 \text{ k}\Omega$
$R_3 = 300 \text{ k}\Omega$
$R_4 = 2.4 \text{ k}\Omega$
$R_5 = 510 \Omega$
$R_6 = 5.1 \text{ k}\Omega$
$R_7 = 220 \Omega$
$R_8 = 4.3 \text{ k}\Omega$
$R_9 = 3.3 \text{ k}\Omega$
$R_{10} = 8.2 \text{ k}\Omega$
$R_{11} = 620 \Omega$
$R_{12} = 27 \Omega$
$R_{13} = 1 \text{ k}\Omega$
$R_{14} = 22 \Omega$
$R_{15} = 43 \Omega$

$C_1 = 0.1 \mu\text{F}$
$C_2 = 39 \mu\text{F}$
$C_3 = 0.01 \mu\text{F}$
$C_4 = 0.01 \mu\text{F}$
$C_5 = 0.01 \mu\text{F}$
$C_6 = 8200 \mu\text{F}$
$C_{17} = 22 \text{ nF}$
$C_{18} = 10 \mu\text{F}$

$D_1, D_2, D_4, D_5, D_6, D_7 = 1\text{N}414\text{B}$
 $D_8 \text{ LED (DHP 9102 - HFBR1524)}$

$CI_1 = \text{CA } 3140$
 $CI_2 = \text{NE } 556$

$T_1 = \text{BC } 327$
 $T_2 = \text{BC } 546$

RECEPTEUR

$R_{16} = 270 \Omega$
$R_{17} = 100 \text{ k}\Omega$
$R_{18} = 1 \text{ k}\Omega$
$R_{19} = 1.3 \text{ k}\Omega$
$R_{20} = 10 \text{ k}\Omega$
$R_{21} = 620 \Omega$
$R_{22} = 130 \text{ k}\Omega$
$R_{23} = 10 \text{ k}\Omega$
$R_{24} = 10 \text{ k}\Omega$
$R_{25} = 220 \Omega$
$R_{26} = 30 \Omega$
$R_{27} = 100 \text{ k}\Omega$
$R_{28} = 270 \Omega$
$R_{29} = 6.2 \Omega$
$R_{30} = 1 \text{ k}\Omega$

$C_7 = 0.68 \mu\text{F}$
$C_8 = 5.6 \mu\text{F}$
$C_9 = 0.1 \mu\text{F}$
$C_{10} = 0.1 \mu\text{F}$
$C_{11} = 1 \text{ nF}$
$C_{12} = 0.01 \mu\text{F}$
$C_{13} = 2 \text{ nF}$
$C_{14} = 470 \mu\text{F}$
$C_{15} = 270 \mu\text{F}$

$D_9 = (\text{HP } 9103 \text{ - R. HFBR } 2524)$

$D_{10}, D_{11}, D_{12}, D_{13} = 1\text{N } 414\text{B}$

$T_3, T_5 = \text{BC } 327$
 $T_4 = \text{BC } 546$

$CI_3, CI_6 = \text{CA } 3140$
 $CI_4 = \text{LM } 311$
 $CI_5 = \text{CD } 4016$

HP (haut parleur) 8Ω .

2- Caracteristiques des Emetteurs et Récepteurs utilisés dans la réalisation

EMETTEUR OPTIQUE : D.Hp 9102 - HFBR 1524 [18]

L'émetteur se compose d'une LED (660 nm) logée dans un boîtier horizontal de couleur grise.

Valeur limités absolues

Pâramètre	Symbole	Min	Max	Unité
Température de Stockage	Ts	- 40	+ 75	°C
Température de Fonctionnement	Ta	0	+ 70	°C
Courant direct crête à l'entrée	Ifpk	-	1000	mA
Courant direct continu à l'entrée	Ifdc	-	80	mA
Tension inverse à l'entrée	Vr	-	5V	
Puissance Optique en sortie	Pt	- 17.8	- 4.5	Dbm (mesuré à I=60mA 0°C à 70°C)
Puissance Optique en sortie	Pt	- 15.5	- 5.1	dBm (mesuré à If = 60mA et T = 25°C)

Tension directe Vf 1.45 2.02 V à If = 60mA
 Diamtre réel DT Typique 1mm
 Ouverture Numérique ON = 0,5
 Capacité de la diode 86pF à Vf = 0 et F = 1Mhz
 Temps de montée Tr = 80ns
 Temps descente Tf = 40ns

Branchement

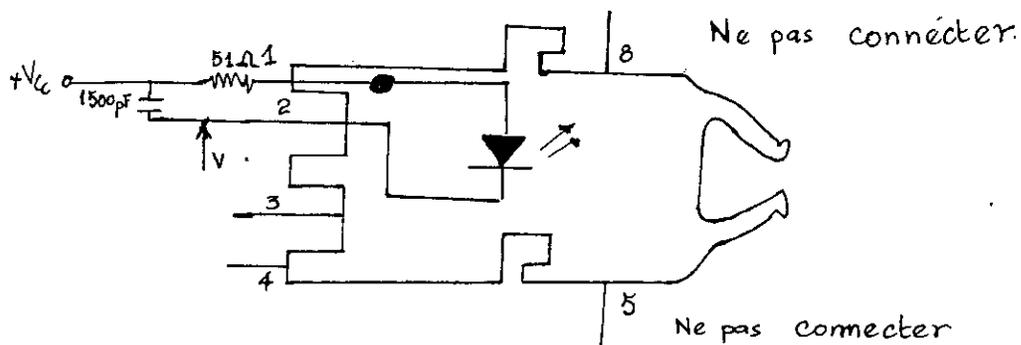


Fig 5.1 Branchement de l'émetteur optique HFBR-1524.

RECEPTEUR : Hp 9103 - R.HFBR.2524

En boîtier plastique bleu se compose d'un photodétecteur intégré et d'un amplificateur à large bande assurant une grande immunité aux perturbations électromagnétiques.

CARACTERISTIQUES

Température de stockage	: $-40^{\circ}\text{C} < T_s < 75^{\circ}\text{C}$
Température de fonctionnement	: $0 < T_a < 70^{\circ}\text{C}$
Tension d'alimentation	: $-0,5\text{V} < V < 18\text{V}$
Tension de sortie	: $-0,5\text{V} < V < 18\text{V}$
diamètre reel	: $D_r = 1\text{mm}$
Ouverture numérique	: $ON = 0,5$
Resistance de charge reel	: $R_l \quad 680 < R_l < 1700$

BRANCHEMENT

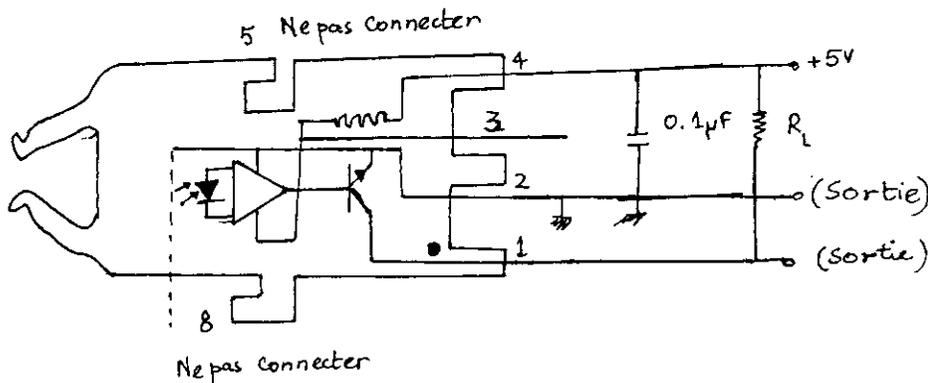


Fig 5.2 Branchement du récepteur optique HFBR - 2524

Il se compose d'une fibre optique plastique à saut d'indice entouré d'une gaine PVC

- Caractéristique Eléctriques et Optique	$0^{\circ}\text{C} < T < 70^{\circ}\text{C}$
- Atténuation	$0,19 < \alpha < 0,43 \text{ (dBm)}$ (à $\lambda = 660\text{m}$)
- Ouverture Numérique	$ON = 0,5$
- Diamètre du coeur	1mm
- Diamètre de la gaine	2,2 mm
- Dispersion	5ns/m
- Longueur du câble	5m
- Masse par unité de longueur	4,6 g/m (sans connecteurs)
- Courant de fuite de câble I2	12na