



National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Canadian Theses Service

Services des thèses canadiennes

Ottawa, Canada  
K1A 0N4

## CANADIAN THESES

## THÈSES CANADIENNES

### NOTICE

The quality of this microfiche is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Previously copyrighted materials (journal articles, published tests, etc.) are not filmed.

Reproduction in full or in part of this film is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30.

**THIS DISSERTATION  
HAS BEEN MICROFILMED  
EXACTLY AS RECEIVED**

### AVIS

La qualité de cette microfiche dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

Les documents qui font déjà l'objet d'un droit d'auteur (articles de revue, examens publiés, etc.) ne sont pas microfilmés.

La reproduction, même partielle, de ce microfilm est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30.

**LA THÈSE A ÉTÉ  
MICROFILMÉE TELLE QUE  
NOUS L'AVONS REÇUE**

Démonstration d'un système de télédistribution  
numérique par fibres optiques.

par

François Bilodeau

Thèse soumise à l'école des Etudes Supérieures  
conformément aux exigences du degré de  
maîtrise ès sciences appliquées

Département de Génie Electrique  
Faculté des sciences et de génie  
Université d'Ottawa  
Ottawa, Ontario

Permission has been granted to the National Library of Canada to microfilm this thesis and to lend or sell copies of the film.

The author (copyright owner) has reserved other publication rights, and neither the thesis nor extensive extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her written permission.

L'autorisation a été accordée à la Bibliothèque nationale du Canada de microfilmer cette thèse et de prêter ou de vendre des exemplaires du film.

L'auteur (titulaire du droit d'auteur) se réserve les autres droits de publication; ni la thèse ni de longs extraits de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation écrite.

ISBN 0-315-33275-1



UNIVERSITÉ D'OTTAWA  
UNIVERSITY OF OTTAWA

## Table des matières

	Page
Remerciements.....	i
Préface.....	ii
Liste des figures.....	iii
Introduction.....	1
Chapitre I: Introduction à la télédistribution par fibres optiques.	
1.1 Introduction.....	5
1.2 Transmission analogique ou numérique.....	10
1.3 Fibre optique ou câbles coaxiaux.....	13
1.4 Justification du travail.....	18
Chapitre II: Technologies utilisées dans les systèmes de communications optiques.	
2.1 Milieu de transmission.....	23
2.2 Emetteurs optiques.....	31
2.3 Récepteurs optiques.....	37
2.4 Multiplexage en longueurs d'onde.....	41
2.5 Techniques de modulation.....	44
Chapitre III: Description du système de télédistribution par fibres optiques.	
3.1 Transmetteur.....	47
3.1.1 Description des blocs diagrammes.....	47
3.1.2 Circuits d'horloges.....	50

	Page
3.1.3 Conversion analogique-numérique du signal vidéo.....	57
3.1.4 Conversion analogique-numérique et multiplexage des trois signaux basse fréquence .....	59
3.1.5 Multiplexage haute vitesse.....	64
3.1.6 Mélangeur de bits.....	66
3.1.7 Transmetteur optique à diode laser.....	67
3.1.8 Lien de fibre optique.....	70
3.2 Récepteur.....	72
3.2.1 Bloc diagramme du récepteur.....	72
3.2.2 Circuits de recouvrement d'horloges.....	74
3.2.3 Démélangeur.....	79
3.2.4 Conversion série-parallèle et D/A du signal vidéo.....	81
3.2.5 Conversions série-parallèle et D/A des services à basse fréquence.....	83
3.2.6 Circuits de synchronisation d'horloge.....	87
3.2.7 Récepteur optique.....	91
3.3 Mesures des performances.....	94
3.3.1 Mesures de la sensibilité.....	95
3.3.2 Robustesse du circuit de recouvrement d'horloge.....	97
3.3.3 Mesures analogiques du signal vidéo.....	98
Conclusion.....	108
Bibliographie.....	111

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au Centre de Recherches sur les communications grâce au support et à la collaboration du Dr. K.O. Hill, gestionnaire du programme des communications optiques. Nous sommes également reconnaissants envers le Dr. Willem Steenaart, Directeur du département de génie électrique, pour la supervision du travail. Des remerciements également pour Mme Jeannine Henry pour sa patience lors des nombreuses modifications du manuscrit.

Finalement, je dois ce travail à mon épouse Diane qui, grâce à son support, m'a permis de mener à terme ce long travail réalisé à temps partiel.

François Bilodeau

Centre de recherches sur les  
communications et Université  
d'Ottawa,

Ottawa, mars 1986.

## Préface

La télédistribution ("Subscriber Loop"), application récente du domaine des communications, se développe rapidement avec la demande sans cesse croissante d'information. Cette application pose par contre des problèmes fondamentaux qui n'ont pas de réponses uniques. On peut mentionner les questions d'infrastructure, de topologie, de rapport qualité versus quantité d'information qui doivent être traités globalement à cause de l'imbrication qu'ont ces éléments entre eux. Par contre, la fibre optique, nouveau milieu de transmission à hautes performances, apparaît clairement comme la composante fondamentale autour de laquelle les réseaux du futur seront construits.

Le projet réalisé est une étude globale de la situation de la télédistribution. Nous introduisons d'abord le domaine de la télédistribution et exposons les options disponibles. Par la suite, une fois la fibre optique identifiée comme médium de transmission, nous présentons un aperçu des technologies des communications par fibres optiques afin de bien établir les bases du réseau de communication. Dans la troisième partie, nous décrivons le système construit avec descriptions des circuits utilisés et fabriqués. Également, nous présentons les mesures des performances qui démontrent le bon fonctionnement du système. Nous concluons finalement par une critique du système axée vers le futur.

Liste des figures

- 1.1 Bloc diagramme du système proposé. A noter que nous n'avons représenté qu'un abonné d'un réseau en étoile construit autour du central.
- 2.1 Spectre de transmission des fibres optiques.
- 2.2 Système de commande automatique par rétroaction d'une diode laser.
- 2.3 Préamplificateurs a) à transimpédance b) et à impédance d'entrée élevée.
- 2.4 Circuit équivalent de bruit pour le photodétecteur et l'amplificateur.
- 3.1 Bloc diagramme des fonctions du transmetteur.
- 3.2 Circuits de génération d'horloges par P.L.L. au transmetteur.
- 3.3 Fonctionnement du détecteur de phase et de fréquence MC 12040.
- 3.4 Circuits du convertisseur analogique-numérique du signal vidéo.
- 3.5 Circuits réalisant les conversions analogique-numérique et parallèle-série des canaux à faible débit au transmetteur.
- 3.6 Allocation temporelle des trois canaux des services à faible débit et du mot de synchronisation.
- 3.7 Génération des horloges basse fréquence et multiplexage des quatre canaux à faible débit au transmetteur.
- 3.8 Conversions TTL-ECL et parallèle-série des dix bits formant l'information série à transmettre.
- 3.9 Mélangeur de bits dérivé d'une "M-Sequence" dont la période maximale est de 31 bits.
- 3.10 Bloc diagramme du transmetteur optique à diode laser de EXXON ENTREPRISES INC.
- 3.11 Bloc diagramme des fonctions du récepteur.
- 3.12 Recouvrement d'horloge par asservissement en phase au récepteur.

- 3.13 Démélangeur de bits au récepteur.
- 3.14 Conversions série-parallèle et numérique-analogique de la composante vidéo.
- 3.15 Circuits de génération d'horloges à basse fréquence, de conversion série-parallèle des quatre canaux à faible débit et de détection du mot de synchronisation.
- 3.16 Conversion numérique-analogique des trois canaux à basse fréquence.
- 3.17 Synchronisation d'horloges au récepteur.
- 3.18 Bloc diagramme du récepteur optique à photodiode à avalanche de EXXON ENTREPRISES INC.
- 3.19 Sensibilité du récepteur (BER) en fonction de la puissance optique reçue.
- 3.20 Signaux de synchronisation couleurs a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.
- 3.21 Signal test de couleur a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.
- 3.22 Signal composite: linéarité, impulsion  $\sin^2$ ,  $\sin^2$  modulé et fenêtre a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.
- 3.23 Caractéristiques amplitude vs fréquence a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.
- 3.24 Caractéristiques amplitude vs fréquence a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.
- 3.25 Impulsion  $\sin^2$  et  $\sin^2$  modulé a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.

## Introduction

Avec les récents développements technologiques, notre société est en train de devenir une société de communications. Les moyens de transmettre et d'échanger de l'information se multiplient rapidement. La demande pour de nouveaux services et l'amélioration des performances des services déjà existants n'a jamais été aussi grande: les abonnés veulent plus de services et une meilleure qualité. Jusqu'à maintenant, tous les services acheminés à la maison ont été transmis d'une façon individuelle. Les deux principaux services représentant les deux types d'approche possibles sont le téléphone et la télévision. D'un côté on a un réseau complexe très bien développé desservant à peu près tous les foyers mais dont les performances sont très faibles: le service téléphonique. De l'autre côté, on retrouve la télévision par câble, phénomène plus récent mais presque aussi étendu en milieu urbain, et qui utilise un système de distribution moins flexible mais dont les performances sont considérées comme bonnes.

L'augmentation de la quantité de services acheminés à domicile peut, jusqu'à une certaine mesure, se développer autour de ces deux services de base. Il est en effet possible de brancher un micro-ordinateur sur une ligne téléphonique privée et d'avoir ainsi accès à un ordinateur puissant. Il est également possible de transmettre un service de télévision payante individualisé par l'entremise des câbles des câblodistributeurs. Par contre, ces deux options n'utilisent pas un milieu de transmission vraiment adapté à leurs applications.

Le réseau téléphonique offre la possibilité d'entrer en contact avec chaque client individuellement, mais la qualité du canal de communication ne permet pas de songer à des applications très sophistiquées. Le réseau de câblodistribution est composé de câbles coaxiaux, d'où la possibilité de transmettre des signaux d'une grande largeur de bande, mais le caractère individuel des liens n'est réalisable qu'au prix d'une grande complexité car le réseau est en arbre.

En fait, pour relever le défi de la société de communications, il est nécessaire de combiner la flexibilité et l'individualité du réseau téléphonique (réseau dit en étoile) et les grandes performances du réseau de câblodistribution. Il devient alors possible de transmettre une grande gamme de services avec une grande qualité de transmission de façon individualisée. Un autre problème à solutionner dans la conception d'un tel réseau est le choix du type de transmission. Il apparaît maintenant de plus en plus certain qu'il sera nécessaire d'avoir recours à la transmission numérique pour assurer une grande qualité de transmission. Le prix à payer pour obtenir une transmission numérique est l'utilisation de CODEC, d'électronique à haute vitesse et d'un canal de large bande. Le prix des composants électroniques baisse continuellement à cause de leur utilisation accrue et ne créeront donc plus de problèmes économiques. La largeur de bande des câbles coaxiaux est suffisamment grande pour la télédistribution. Par contre, les pertes de transmission de ces mêmes câbles sont trop élevées pour permettre la réalisation de liaisons de 10 km sans amplification.

La solution à ce problème complexe de télédistribution, est la fibre optique. Elle possède une largeur de bande qui peut être plus qu'adéquate, selon le type de fibre utilisé; elle permet la transmission sur de très longues distances sans amplification du signal; elle est insensible aux interférences électromagnétiques; elle est petite et permet ainsi une grande densité de câbles pour un conduit souterrain donné. A cause de son énorme largeur de bande, elle rend possible ce multiplexage en longueur d'onde de lumière qui permet la bi-directionnalité, sur une même fibre, avec deux longueurs d'onde lumineuses différentes.

Les caractéristiques étonnantes de la fibre optique sont déjà bien connues pour des liens de communications point à point. Depuis peu, une nouvelle application des fibres optiques consiste en son utilisation dans la réalisation de réseaux. Les principales contraintes apportées par les réseaux que la fibre optique ne pouvait solutionner au départ étaient la division ou combinaison de signaux optiques et la commutation optique. Il était possible d'utiliser la fibre optique dans des réseaux en l'utilisant comme s'il s'agissait de liens point à point et de réaliser toutes les "fonctions de réseaux" sur les signaux électriques. Cette approche n'étant pas élégante, c'est ainsi que les composants de réseaux par fibre optique se sont développés. Ils rendent l'utilisation de la fibre optique très intéressante, et ce, même sur les réseaux. Le travail effectué depuis quelques années pour rendre la fibre optique adaptable aux réseaux est énorme. Le jour n'est pas loin où la fibre optique remplacera presque complètement les câbles coaxiaux pour les applications à moyen et haut débit.

Ce travail se veut la démonstration qu'il est maintenant possible de réaliser un réseau de télédistribution par fibres optiques à l'aide de composants électroniques, et optiques disponibles sur le marché. L'originalité de ce travail réside au niveau de l'approche globale utilisée puisqu'il traite d'un réseau complet entièrement numérique. Nous débuterons, au chapitre I, en introduisant le domaine de la télédistribution par fibres optiques. Cette introduction se veut une présentation simple des problèmes associés à la télédistribution et des options disponibles. Le lecteur sera alors en mesure de comprendre les difficultés du système et d'apprécier les solutions apportées par la suite. Nous y présentons également une description du système proposé et du travail réalisé en vue d'atteindre l'objectif visé.

Le second chapitre traite des problèmes technologiques associés à la télédistribution par fibres optiques. Une grande partie du chapitre présente, de façon simple et concise, les composants optiques et électro-optiques pouvant être utilisés pour cette application. On y traite également du problème de la topologie du réseau et des composants optiques ayant été développés spécialement pour les réseaux. Le troisième chapitre présente en détail les circuits électroniques et électro-optiques construits et utilisés dans le système. Les circuits décrits dans ce chapitre ont été conçus et fabriqués par l'auteur. L'intérêt des solutions proposées vient du contexte imposé par le système, et du fait que très peu d'auteurs se sont penchés, jusqu'à présent, sur une telle approche globale d'un réseau entièrement numérique. Après les descriptions du transmetteur et du récepteur, une troisième section présente les mesures des performances du système.

## Chapitre I

### Introduction à la télédistribution par fibres optiques

#### 1.1 Introduction

Le mot télédistribution n'est pas un terme qui fait l'unanimité pour décrire le système que nous voulons étudier. Il n'existe pas vraiment d'expression française consacrée pour décrire exactement ce dont il s'agit. Par contre, le terme anglais "subscriber loop" [1-9] fait l'unanimité internationalement pour décrire ce lien de communication local bi-directionnel. Ainsi, la télédistribution est la façon d'acheminer à l'abonné un service personnalisé. Les services transmis sont multiples et vont changer d'un système à un autre, mais il y a une constante que l'on retrouve partout: le service téléphonique et la distribution d'émissions de télévision. La télédistribution se veut une façon intégrée de transmettre à l'abonné des services qui, traditionnellement, étaient acheminés indépendamment. On parle donc de la transmission de plusieurs services sur une ligne unique qui peut être un lien sans fil, un câble coaxial ou de la fibre optique.

Certaines contraintes d'ordre pratique imposées sur le lien de communication font que seulement deux options peuvent être considérées. A cause de la quantité d'information à acheminer, il est nécessaire d'utiliser un canal de transmission dont la largeur de bande est suffisamment grande. Les distances à parcourir, bien que de longueur moyenne (quelques kilomètres), ne doivent pas engendrer de pertes trop

grandes pour qu'il soit nécessaire d'amplifier le signal trop souvent. La simplicité du système a aussi un rôle à jouer car elle influence directement les coûts à payer. Le canal de transmission doit aussi être facile à installer et peu encombrant, surtout en milieu urbain où la densité de population est grande. La ligne de communication doit également être bi-directionnelle car le service téléphonique est toujours inclus dans un système de télédistribution.

Historiquement, le principe de la télédistribution est venu du réseau téléphonique. A peu près tous les habitants des centres urbains ont le service téléphonique à leur domicile. A partir de ce point commun, plusieurs compagnies ont eu l'idée d'offrir d'autres services que le téléphone susceptibles d'intéresser un certain pourcentage de la population. Ils désiraient le faire sans avoir à installer de nouveaux câbles entre leurs centraux et leurs clients à cause des coûts très élevés d'une telle opération. Les lignes téléphoniques offraient donc une possibilité très intéressante pour une extension de services car à peu près tous les foyers en possèdent une. Par contre, la qualité du canal disponible qu'est la ligne téléphonique est très faible et les applications possibles se limitent à des services nécessitant une largeur de bande aussi très faible. Ce type de services comprend principalement l'interconnection de modems pour communications entre ordinateurs et terminaux ou ordinateurs et micro-ordinateurs, et des services de sécurité tels systèmes d'alarmes ou de surveillance.

Les lignes téléphoniques ne représentent donc pas une option très intéressante car la distribution d'émissions de télévision constitue un des services clefs de la télédistribution et impose des contraintes trop sévères sur le canal de transmission téléphonique. Il faut donc se tourner vers deux options possibles: câbles électriques coaxiaux et fibres optiques. Ce sont les deux seules façons simples et économiques de réaliser la télédistribution. Les câbles coaxiaux ont un avantage historique du fait qu'ils sont utilisés depuis longtemps comparativement à la fibre optique qui est encore toute jeune. De plus, de nombreux réseaux de télévision par câbles coaxiaux sont déjà très bien implantés en milieux urbains, principalement en Amérique du Nord.

Pour en revenir aux types de services pouvant être inclus dans un système de télédistribution, différentes catégories ont été répertoriées [10] et les services sont divisés en quatre grandes classes en fonction de la largeur de bande qu'ils nécessitent.

Classe I: Services nécessitant 4 KHz ou moins

- télémétrie
- gestion de l'énergie
- contrôle de l'environnement
- sécurité et alarmes
- services de statistiques
- sélection de canaux de télévision ou de musique
- transfert d'information à bas taux de transmission

Classe II: Services nécessitant plus de 4 KHz et moins de  
64 Kb/s (équivalent numérique)

- téléphonie
- courrier électronique
- transfert d'information à taux moyen de transmission
- service intégré téléphone-données

Classe III: Services entre 64 Kb/s et 4.5 MHz (inférieur  
à un canal vidéo)

- enseignement particulier
- musique haute fidélité
- conférences audio
- transmission rapide de data et de graphiques
- transfert d'images fixes
- interaction sur information visuelle

Classe IV: Services vidéos, 4.5 MHz et plus

- distribution de télévision standard
- télévision payante
- librairies vidéos
- télévision haute définition
- vidéophone

Ces catégories sont arbitraires et ne signifient pas que les services des différentes classes sont transmis de façon différente. Il faut noter que bien des facteurs viennent influencer les techniques de transmission des différents signaux; le principal étant le type de transmission, c'est-à-dire analogique ou numérique.

Un autre facteur fondamental au domaine de la télédistribution est la topologie du réseau. Deux types de configuration possible peuvent interconnecter l'abonné au centre de distribution des services: les topologies en arbre et en étoile. La topologie en arbre est utilisée habituellement pour la distribution d'une même information du central vers tous les abonnés. Pour les systèmes de câblodistribution, par exemple, il n'y a pas de façon de discriminer l'information entre abonnés; tous reçoivent le même signal. Cette topologie ne semble pas très flexible et permet difficilement la bi-directionnalité. En fait, il est possible d'acheminer des services personnalisés sur un réseau en arbre, mais le prix à payer en complexité est très élevé. Chaque abonné doit être clairement identifié par une adresse et l'information individualisée transmise du central doit être étiquetée d'une adresse de destination et multiplexée avec celle d'une série d'autres abonnés. La transmission de l'abonné vers le central est aussi assez complexe à réaliser car chaque noeud du réseau recevant des signaux de différents abonnés doit pouvoir les multiplexer sur une même ligne de transmission en direction du central. Le prix à payer pour économiser sur la quantité de câble à installer est donc la complexité des noeuds qui doivent posséder une intelligence leur permettant de discriminer entre les clients.

La deuxième topologie à considérer est celle utilisée dans le domaine de la téléphonie. Le réseau en étoile, ainsi appelé car chaque client possède sa propre ligne jusqu'au central, permet l'installation d'un réseau de distribution totalement passif. Toute la commutation et tout le multiplexage sont effectués au central et chaque ligne ne fait qu'acheminer l'information du point A au point B. Il est alors possible d'obtenir un système d'un minimum de complexité mais au prix d'une très grande quantité de câble. Par contre, cette topologie offre l'avantage d'être très flexible en ce qui a trait à l'expansion du réseau du point de vue du nombre d'abonnés et de celui de la quantité de services offerts. La topologie en étoile rend très simple la bi-directionnalité d'information sur la ligne, caractéristique essentielle d'un système de télédistribution. Il ne s'agit que de penser au service téléphonique où une ligne personnalisée est connectée à un complexe système de commutation qui permet à tout abonné d'entrer en contact avec n'importe quel autre abonné. La complexité d'une telle configuration réside donc totalement au central.

## 1.2 Transmission analogique ou numérique

En ce qui concerne le type de transmission, analogique ou numérique, il n'y a pas de gagnant ni de perdant mais plutôt une série d'avantages et de désavantages pour chacun des deux types [11]. Les premiers systèmes de télédistribution installés étaient de type analogique à cause principalement du fait que les systèmes numériques étaient encore très jeunes et peu développés et, par le fait même, plus dispendieux. Il était alors logique et simple d'utiliser une

technologie bien établie où les différents services sont multipléxés en fréquences. Chaque service possède donc sa bande de fréquence propre et la bi-directionnalité est rendue possible en réservant là aussi des bandes de fréquences du spectre pour l'autre direction de transmission. La limite à ce moment, pour ce qui est de la quantité d'information transmise, est la largeur de bande du canal. Pour ce qui est de la distance maximale pour chaque lien, le rapport signal sur bruit établit une limite absolue qui ne peut être améliorée. Il est toujours possible d'amplifier le signal analogique le long du lien afin de le rendre détectable, mais le bruit causé par les amplificateurs et les interférences de toutes sortes ne peuvent jamais être annulés. Le rapport signal sur bruit diminue donc avec la longueur du lien et limite ainsi la distance maximale permise.

Le bruit est un problème important pour un système de télédistribution car on retrouve de tels systèmes surtout dans des milieux urbains où la concentration d'habitants est élevée et où le bruit électromagnétique ambiant l'est également. D'un autre côté, du fait de la grande densité de population, la longueur moyenne de chaque lien est assez courte et le rapport signal sur bruit peut donc être maintenu à des niveaux satisfaisants sans trop de problème. Le système analogique est également très facile à interfacer avec le monde extérieur, c'est-à-dire avec la plupart des services qui sont déjà disponibles individuellement. Il ne s'agit que de penser, par exemple, à la télévision, au téléphone ou à la radio AM et FM qui existent tous

sous forme analogique. De cette façon, un minimum d'équipement est nécessaire chez l'abonné pour démultiplexer les signaux et les rendre compatibles avec l'équipement qu'il possède déjà.

La transmission numérique a, par contre, évolué très rapidement ces dernières années. Elle est maintenant en mesure de concurrencer la transmission analogique. La transmission numérique comme telle est de beaucoup supérieure à la transmission analogique principalement de par son insensibilité au bruit. Il est possible de régénérer le signal au lieu de l'amplifier uniquement et les distances ne posent alors plus de problème. Il faut par contre ajouter en complexité au transmetteur et au récepteur du fait des conversions analogique-numérique et numérique-analogique. Ces convertisseurs qui, il y a quelques années, étaient très coûteux sont maintenant disponibles à des prix qui ne les pénalisent plus par rapport à l'alternative analogique pour des transmissions de haute qualité. Que ce soit au récepteur ou à une station relais, une simple décision entre deux niveaux logiques doit être réalisée. Cette simplicité de décision permet de maintenir une qualité d'information impossible à obtenir de façon analogique.

Un désavantage fondamental de la transmission numérique est la largeur de bande nécessaire qui est d'un ordre de grandeur plus grand que sa contrepartie analogique. Donc, en principe, il n'est possible de transmettre qu'un dixième de la quantité d'information d'un système analogique sur une même largeur de bande, en supposant qu'il n'y a aucune compression de l'information. La largeur de bande devient un

paramètre critique des systèmes de transmission numérique.

Le multiplexage d'un système numérique est de type temporel et la bi-directionnalité est possible en transmettant sur deux bandes de fréquences différentes.

### 1.3 Fibre optique ou câbles coaxiaux

Depuis quelques années, la fibre optique a effectué une percée extraordinaire. Elle est actuellement en train de complètement éliminer la transmission par câbles coaxiaux, surtout pour des distances moyennes et longues. Les avantages de la transmission par fibres optiques sont nombreux et en font clairement la technologie du futur. Il y a aussi des désavantages à l'utilisation de la fibre optique qui viennent contrebalancer un peu la situation par rapport aux câbles coaxiaux, mais les possibilités des fibres optiques ne sont pas encore exploitées au maximum et seuls les développements futurs en feront un choix unanime pour à peu près toutes les applications de transmission.

L'avantage principal de la transmission par fibres optiques est sans aucun doute ses faibles pertes de transmission. Il est en effet possible de transmettre de l'information sur de très grandes distances sans avoir besoin de réamplifier le signal. La distance entre les stations relais peut facilement être de deux à trois fois plus longue que celle des câbles coaxiaux pour des fibres optiques de "faible qualité" et de l'ordre de dix et même cinquante fois pour les fibres de haute performance. Il est alors possible de réaliser de grandes

économies au niveau du nombre de stations relais à installer pour un lien de communication donné. De fortes économies sont donc réalisées en ce qui concerne l'infrastructure du système et également en ce qui a trait à l'entretien des stations relais. Il en résulte un encombrement minimum, surtout en milieu urbain, de par le plus petit nombre de stations relais.

Le second avantage de la fibre optique est également très important, principalement pour des systèmes du type de la télédistribution. Cet avantage est la grande largeur de bande de la fibre optique. Une très grande quantité d'information peut être transmise sur la fibre, quantité qui peut devenir astronomique lorsqu'il est question des meilleures fibres monomodes (dont la largeur de bande peut dépasser 100 GHz-km). Bien sûr, les fibres super performantes sont assez dispendieuses à l'heure actuelle, mais le jour n'est pas loin où ces fibres ne coûteront pas plus cher que les câbles coaxiaux d'aujourd'hui, c'est-à-dire lorsqu'elles seront produites en très grandes quantités. Il faut tout de même mettre les choses en perspective en signalant que les fibres optiques s'accommodent beaucoup mieux de la transmission numérique qu'analogique. Ceci est dû, comme nous le verrons au prochain chapitre, aux non-linéarités des éléments émetteurs de lumière, les diodes laser à semi-conducteur, qui se prêtent beaucoup mieux à la transmission binaire. Par contre, la transmission numérique prend jusqu'à dix fois plus d'espace que la méthode analogique. Il est également possible de transmettre des signaux analogiques par fibres optiques, principalement à l'aide de diodes électroluminescentes, mais il en résulte une certaine perte de largeur

de bande causée par le phénomène de la dispersion chromatique. Il n'en reste pas moins que la largeur de bande de la plupart des fibres optiques est de beaucoup supérieure à celle des câbles coaxiaux.

Les petites dimensions de la fibre optique procurent aussi un autre point fort intéressant. Il est possible de diminuer considérablement l'espace utilisé par les câbles dans les conduits souterrains qui ont tendance à être encombrés en milieux urbains. Il est en effet possible d'installer sans problèmes dix fibres optiques dans un câble de la taille d'un câble coaxial de câblodistribution.

Un autre avantage vient de la très haute fréquence de la lumière transmise dans les fibres optiques. La largeur de bande effective utilisée par rapport à la fréquence de la porteuse est donc très faible, et ce, même pour une largeur de bande de l'ordre du gigahertz. Il est aussi possible de transmettre différents signaux à des longueurs d'onde lumineuses différentes sur la même fibre à l'intérieur du spectre utile de la fibre optique. Il devient par exemple possible de transmettre de l'information sur dix longueurs d'onde différentes, ce qui a pour effet de multiplier par dix la capacité du système. Cette technique se nomme le multiplexage en longueurs d'onde [12].

Un dernier avantage digne de mention est l'insensibilité des signaux optiques aux interférences ambiantes. Ainsi, de par la nature de la transmission de la lumière dans la fibre, les interférences électromagnétiques qui nous entourent n'ont aucun effet sur les signaux

lumineux dans la fibre. Cet avantage est important dans des milieux urbains où le bruit électromagnétique est appréciable. Ce dernier avantage, doublé d'une transmission numérique dont la régénération des bits d'information est possible, permet en effet de dire que, dans la majorité des cas, la fibre est un milieu de transmission sans bruit et que seul le détecteur optique suivi de l'amplification électrique génèrent du bruit.

La fibre optique n'a malheureusement pas que des points forts mais aussi des faiblesses qu'il faut considérer. Le désavantage fondamental de la transmission par fibres optiques est le fait qu'il faille interfacer le canal de transmission au monde électronique. Il est nécessaire de convertir les signaux électriques d'entrée en signaux optiques et l'inverse au détecteur. Des circuits additionnels sont nécessaires et peuvent devenir assez encombrants dans certaines situations. Les stations relais qui régénèrent le signal optique doivent aussi subir ce désavantage car il n'est pas encore possible de régénérer un signal optique directement. Il faut convertir le signal optique en signal électrique avant de le régénérer et ensuite le reconvertir en impulsions optiques pour la transmission.

Les petites dimensions de la fibre optique ne sont pas seulement un avantage qui économise de l'espace mais aussi un désavantage lorsqu'il s'agit de la manipuler. N'oublions pas que la fibre est fabriquée de verre et que le diamètre du coeur peut se situer, typiquement, entre 5 et 100  $\mu\text{m}$ . Il n'est pas simple de coupler la lumière dans le coeur de la fibre et le fait que la fibre soit composée

de verre rend particulièrement difficile la réparation de ruptures et la simple interconnection de deux fibres. Egalement, de par la façon dont la lumière se propage dans la fibre, il est difficile de réaliser des diviseurs de puissance et des combineurs de signaux. La commutation de signaux optiques est difficile à réaliser et l'on doit reconvertir les signaux optiques en signaux électriques afin d'en effectuer la commutation facilement.

La plupart de ces désavantages sont par ailleurs dus au fait que la technologie des fibres optiques est encore toute jeune et les différents appareils ou composants spécialisés nécessaires à la réalisation d'un réseau de communication par fibres optiques n'en sont encore qu'au stage de développement. Avec la croissance que cette technologie a connue depuis quelques années, il est presque assuré que ces appareils et composants spécialisés ne deviendront bientôt que d'autres composants bien connus et accessibles à tous, et ce, à des prix concurrentiels.

Il y a actuellement une tendance marquée à travers le monde [12-16] à se tourner vers la fibre optique pour la télédistribution. Ceci est particulièrement vrai pour les pays ne possédant pas d'infrastructure en câblodistribution. Le service de télévision par câble représente le coeur de la télédistribution et tout le système est souvent développé autour de ce service. C'est pourquoi les Etats-Unis n'occupent pas la place de leader qu'ils devraient occuper car ils possèdent une impressionnante infrastructure en câblodistribution par câbles coaxiaux qu'il n'est pas rentable de remplacer, même par la

fibre optique. C'est plutôt dans les pays où l'industrie de la câblodistribution était à peu près inexistante il y a quelques années qu'a été lancée la télédistribution par fibres optiques. Les trois pays les plus actifs à ce sujet sont l'Allemagne de l'Ouest, le Japon et la France. Les Etats-Unis et le Canada prendront vraisemblablement plusieurs années avant d'imiter les trois meneurs et ne les rejoindront sans doute que lorsque ce sera économiquement viable de remplacer les systèmes actuels, ou si encore les gouvernements décident d'encourager le développement de cette nouvelle technologie. Il ne fait aucun doute que la télédistribution par fibres optiques est la technologie du futur et qu'avec les développements rapides que nous connaissons depuis quelques années, les possibilités d'un tel système seront presque illimitées.

#### 1.4 Justification du travail

La contribution que nous nous proposons d'apporter par ce travail est la démonstration pratique d'un système de télédistribution par fibres optiques simple et économique. Jusqu'à présent, le Canada n'a pas été très actif dans ce domaine. Le seul système de télédistribution canadien à avoir vu le jour était un système expérimental analogique installé à Elie, au Manitoba, il y a quelques années [9]. Ce système faisait figure de pionnier à l'échelle internationale, mais ses qualités techniques n'en faisaient hélas pas le système du futur.

Ce que nous proposons est schématisé à la figure 1.1. Il s'agit d'un système en étoile totalement numérique, bi-directionnel et pouvant offrir une gamme de services standards: télévision, téléphone, radio FM, transmission de données (data), services de sécurité et d'alarmes. Nous avons voulu réaliser le système le plus simple possible avec des composants non spécialisés facilement disponibles à des coûts minimum. La gamme des services offerts n'est pas exhaustive mais couvre ce qui apparaît être l'essentiel. Le taux de transmission a été choisi arbitrairement à 100 Mb/s du central vers l'abonné. Cette vitesse de transmission n'est pas très élevée par rapport à ce qui est possible de réaliser à l'aide de la fibre optique. Evidemment, ce taux de transmission ne permet la transmission que d'un seul canal vidéo numérique à la fois vers l'abonné, mais la bi-directionnalité du système ne limite en aucune façon la sélection de l'abonné qui a ainsi accès à un nombre illimité de stations de télévision. La commutation des stations de télévision s'effectue au central sur commande de l'abonné qui sélectionne le poste désiré sur un sélecteur de canal qui achemine ~~la~~ commande sur la même fibre à l'aide d'un coupleur optique, mais à une longueur d'onde lumineuse différente de la première.

L'avantage principal accordé au système par le faible taux de transmission est la simplicité de l'électronique impliquée. Il est en effet possible de réaliser les diverses fonctions nécessaires à l'aide de circuits intégrés de la famille logique ECL série 10,000. Les fonctions logiques disponibles sur cette famille logique sont de plus en plus nombreuses et les prix décroissent.

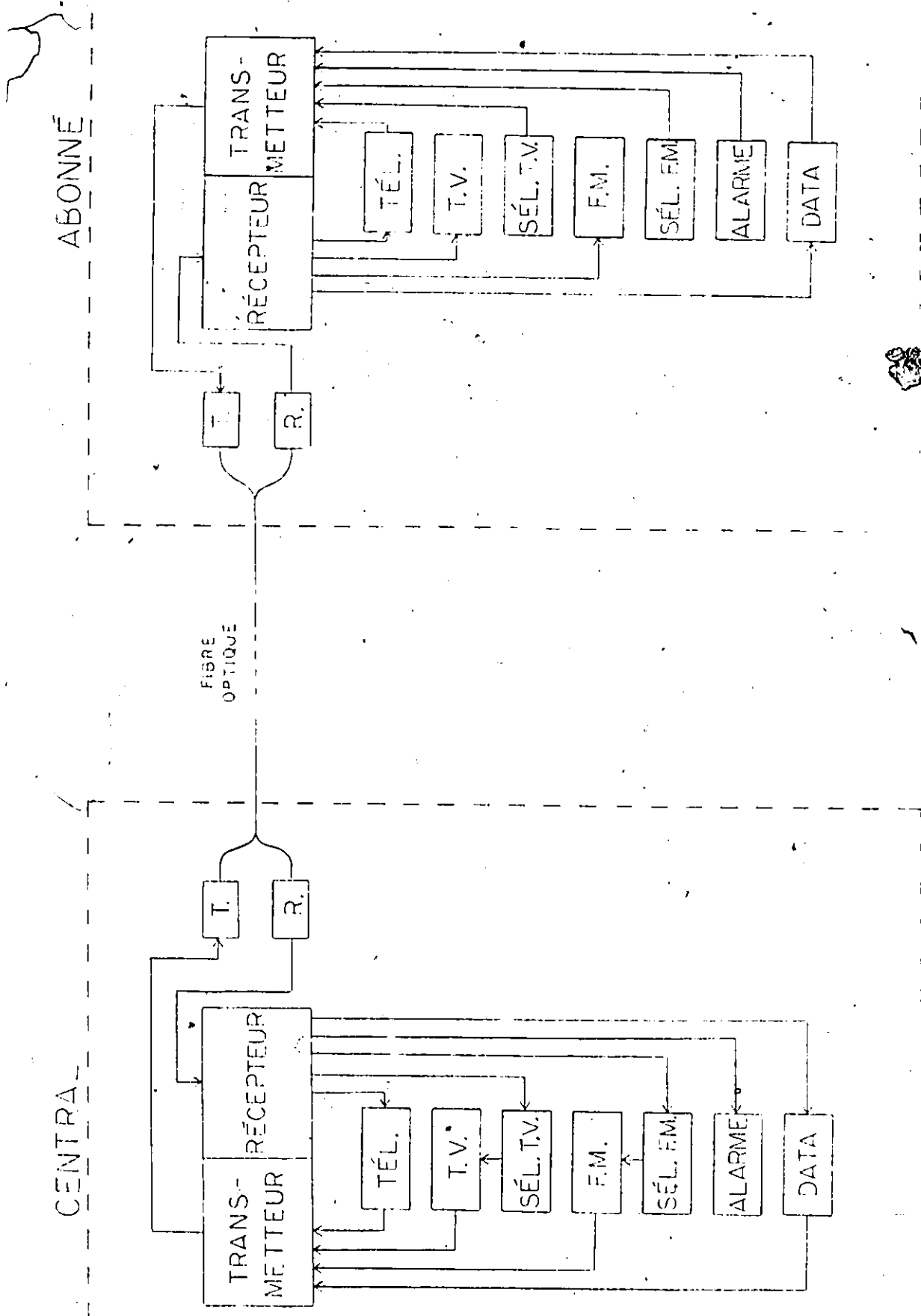


Figure 1.1 Bloc diagramme du système proposé. A noter que nous n'avons représenté qu'un abonné d'un réseau en étoile construit autour du central.

Nous avons fait le pari qu'il était possible de transmettre un canal vidéo à une vitesse de 80 Mb/s sans compression d'information avec une qualité raisonnable. Le taux d'échantillonnage est de 10 MHz et chaque échantillon comporte 8 bits. La mesure ultime de la qualité de la transmission est subjective et est fonction de l'acceptation de la qualité par la moyenne des abonnés. Il est bien compris qu'un taux d'échantillonnage de l'ordre de 13 MHz procurerait une qualité d'image supérieure, mais nous avons volontairement tenté de diminuer le taux de transmission le plus possible afin de simplifier la complexité des circuits électroniques tout en maintenant une qualité raisonnable. Cette mesure subjective de la qualité est effectuée en comparaison avec la qualité moyenne obtenue par les systèmes de câblodistribution conventionnels. La qualité de l'image désirée n'est pas celle d'un studio de production, mais elle doit satisfaire le téléspectateur moyen comme étant une très bonne image.

Le canal vidéo utilise les 4/5 de la bande disponible, alors que les services de radio FM, de téléphonie, d'alarmes et de données utilisent l'autre cinquième. Bien que ces services soient nombreux et importants, ils ne prennent donc, en proportion du canal vidéo, que très peu d'espace. Par exemple, un canal de radio FM utilisant 1 Mb/s peut atteindre un rapport signal sur bruit de 85 dB et une plage dynamique de 90 dB. Une ligne téléphonique utilise à peine 64 Kb/s. On se rend alors compte que ces services connexes ne demandent que très peu de largeur de bande comparativement à la transmission d'un canal vidéo et que la seule difficulté qu'ils posent est à savoir comment ils seront multiplexés ensemble.

A partir de cette constatation, nous nous sommes principalement concentrés sur la réalisation expérimentale d'un système de transmission d'un canal vidéo multiplexé avec un ou plusieurs canaux plus ou moins bien identifiés qui pourraient supporter divers signaux jusqu'à un débit maximal de 2.5 Mb/s chacun. Nous n'avons donc pas construit comme tel les interfaces pour le service téléphonique, les alarmes et le lien de l'abonné vers le central, mais nous avons construit les canaux de multiplexage que chacun des services pourra utiliser. Ces services comme tels ne posent pas de problème quant à leur intégration avec le reste du système car ils sont bien connus et à basse vitesse. Ce qui nous semblait important à réaliser était avant tout le lien du central vers l'abonné contenant le canal vidéo et les canaux multiplexés, le reste n'étant que l'interconnection simple du système avec des services peu compliqués à interfacer. La bi-directionnalité peut apparaître comme une réalisation difficile mais il n'en est rien, surtout avec l'utilisation de coupleurs optiques du type biconique développé au Centre de Recherches sur les Communications du Ministère des Communications [17]. Il est donc simple de réaliser le lien de l'abonné vers le central où une LED peu performante peut très bien acheminer les services à faible débit que sont la téléphonie, la sélection de canaux, les services d'alarmes ou autres services vers le central.

Ainsi, le système présenté au chapitre III se veut avant tout la démonstration de la possibilité de réaliser un système de télédistribution par fibres optiques de façon relativement simple, et ce, en ayant recours à des composants peu spécialisés, peu dispendieux et facilement disponibles.

## Chapitre II

### Technologies utilisées dans les systèmes de communications optiques

#### 2.1 Milieu de transmission

Le médium de transmission utilisé en communications optiques est la fibre optique. C'est un guide d'ondes lumineuses fabriqué de verre extrêmement pur. La fibre est composée de deux parties principales qui sont le coeur et l'enveloppe, toutes deux de verre. L'enveloppe entoure le coeur et permet à la lumière de se propager à l'intérieur du coeur par réflexion totale interne réalisée à la jonction entre le coeur et l'enveloppe qui sont caractérisés par des indices de réfraction légèrement différents.

Il existe deux principaux types de fibres optiques: les fibres multimodes et monomodes. Les fibres multimodes peuvent être soit à saut d'indice, soit à gradient d'indice. La fibre à saut d'indice, caractérisée par un indice de réfraction uniforme du coeur, n'est pas très performante et est de moins en moins utilisée. La dispersion modale de celle-ci est très grande et limite la largeur de bande à des valeurs de l'ordre de 20 MHz-km. Elle n'est utilisée que pour des applications très spécifiques où la largeur de bande n'est pas un handicap. La fibre multimode à gradient d'indice est le type de fibre le plus utilisé de nos jours, bien qu'elle cède tranquillement la place à la fibre par excellence, la fibre monomode. La fibre à gradient

d'indice se caractérise par une graduation de l'indice de réfraction du coeur qui permet de minimiser la dispersion modale. Sa largeur de bande est de l'ordre de 1 GHz-km et est idéale pour des systèmes de performance moyenne telle la télédistribution.

La fibre optique la plus performante est sans contredit la fibre monomode qui ne permet qu'à un seul mode de se propager à la fois. Elle possède un coeur très petit, de l'ordre de 3 à 10  $\mu\text{m}$ , comparativement à des coeurs de 50 à 100  $\mu\text{m}$  pour les fibres multimodes. La fibre monomode connaît une expansion formidable depuis quelques années déjà et en viendra à remplacer presque totalement toute autre fibre dans le futur. Sa largeur de bande peut atteindre 100 GHz-km. De plus, le développement récent de fibres monomodes dont la polarisation de la lumière transmise est conservée a pour effet d'augmenter encore la quantité d'information transmise.

A cause des matériaux qui composent les fibres optiques, l'on retrouve un spectre de transmission très spécifique (figure 2.1). En effet, il n'existe que trois fenêtres de transmission possible où l'atténuation intrinsèque de la fibre est suffisamment faible pour supporter une transmission. Ces trois régions du spectre sont de 0.8 à 0.9  $\mu\text{m}$ , 1.3  $\mu\text{m}$  et 1.5  $\mu\text{m}$  respectivement. Cependant, depuis quelques années, la tendance a été d'utiliser les longueurs d'onde supérieures où les pertes sont plus faibles et où, dans le cas de la région à 1.3  $\mu\text{m}$ , la dispersion chromatique est minimale.

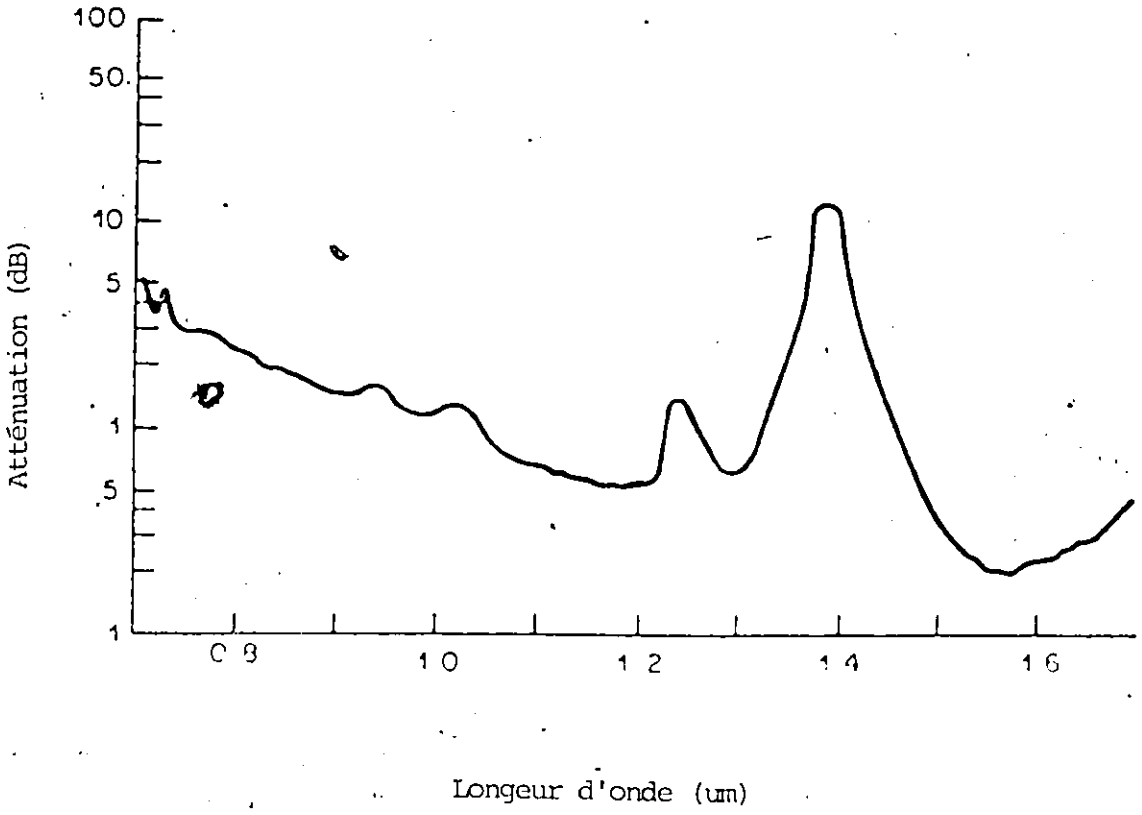



Figure 2.1 Spectre de transmission des fibres optiques.



Il faut noter un point important en ce qui a trait à la largeur de bande des fibres optiques, principalement pour les fibres multimodes: le concept de largeur de bande n'est pas très bien établi car elle dépend de nombreux facteurs indépendants de la fibre comme telle. En effet, la qualité du faisceau lumineux transmis dans la fibre influence fortement la largeur de bande par sa largeur de spectre et par les différents modes qu'elle excite dans la fibre. Egalement, la largeur de bande est toujours exprimée en Hz-km, mais la variation de la largeur de bande en fonction de la distance n'est pas linéaire et s'exprime par:

$$B_L = \frac{B_1}{L^q}$$

où  $B_L$ : largeur de bande pour L kilomètres

$B_1$ : largeur de bande pour 1 kilomètre

L: longueur de lien en kilomètres

q: facteur variant de 0.5 à 1

où q peut prendre des valeurs entre 0.5 et 1 en fonction d'une foule de paramètres [18].

Un facteur important à considérer lors du développement d'un réseau de communication par fibres optiques est le problème de la formation de joints entre les fibres. Il existe deux façons de joindre deux fibres ensemble: l'épissure et le connecteur mécanique. L'épissure est une façon permanente d'effectuer un joint: les fibres sont fusionnées ensemble à l'aide d'un arc électrique. Cette méthode a l'avantage d'être permanente et de générer de très faibles atténuations, typiquement inférieures à 0.05 dB, mais elle nécessite un équipement complexe et encombrant. Il faut garder en tête que la fibre est habituellement installée dans des conduits souterrains où il n'est pas très pratique de travailler avec un épissureur, surtout lorsqu'un microscope doit être utilisé à cause des faibles dimensions de la fibre. L'alternative à l'épissure est le connecteur. Le connecteur est un montage mécanique de haute précision qui a l'avantage de pouvoir se connecter et se déconnecter à volonté, mais il génère des pertes importantes, de l'ordre de 1 dB, et prend environ quinze minutes à installer (le même temps que l'épissure). Il n'y a donc pas de solution miracle et souvent, les deux types de joints seront utilisés dans un même réseau. Il est important d'avoir une certaine flexibilité dans la topologie du réseau à cause des modifications continues qui doivent être effectuées et de la fibre optique qui n'offre malheureusement pas la simplicité d'utilisation des câbles coaxiaux.

La fonction de diviser ou de combiner deux signaux ou plus est une autre caractéristique fondamentale d'un réseau de communication, surtout lorsqu'il est nécessaire de transmettre de l'information bi-directionnellement sur une même fibre. Il faut donc avoir la

capacité de combiner et de diviser des signaux lumineux qui se propagent à l'intérieur de la fibre optique. Cette fonction n'est pas simple à réaliser à cause de la façon dont la lumière se propage dans la fibre, et à cause des faibles dimensions de celle-ci. Il existe quelques composants qui réalisent ces fonctions et ils se regroupent sous deux grandes catégories: l'optique géométrique et l'optique ondulatoire.

La première catégorie n'est pas très pratique et est beaucoup trop encombrante pour être utilisée dans un réseau de communication. Il s'agit d'utiliser de l'équipement optique conventionnel, tels miroirs, lentilles, prismes, et de réaliser la division ou le groupement de signaux en dehors de la fibre. La deuxième méthode n'utilise rien d'autre que la fibre elle-même et le composant est appelé coupleur.

Il existe deux types de coupleurs; le premier, qui est le plus utilisé, est appelé coupleur biconique [17] et ne requiert que la fusion et l'étirement de fibres optiques. La deuxième approche [19] nécessite l'attaque chimique ou mécanique de l'enveloppe de la fibre de façon à ce que les coeurs des deux fibres utilisées se touchent ou soient très près l'un de l'autre. Le coupleur biconique est bien connu et peut réaliser plusieurs fonctions très intéressantes [20]. Il a l'avantage d'être petit, d'être fabriqué de fibres seulement, d'être insensible aux variations de température et de ne subir aucune dégradation avec le temps. Les deux types de coupleurs peuvent être réalisés à partir d'à peu près n'importe quel type de fibres optiques et le coupleur biconique peut aussi avoir un très grand nombre de ports d'entrées et de sorties.

Ils peuvent également être fabriqués à partir de fibres de dimensions différentes. Par contre, ils ne sont pas simples à réaliser et coûtent en général très cher car il y a encore très peu de fabrication en série.

Les coupleurs optiques ont un avenir très prometteur si l'on se fie aux développements récemment réalisés. Ils seront utilisés pour filtrer des signaux optiques composés de plusieurs longueurs d'onde différentes [21,22], ils maintiendront la polarisation de la lumière incidente sur plusieurs ports de sortie [22,23] et ils agiront également comme séparateurs de signaux polarisés [24]. Les coupleurs optiques représentent sans contredit un développement majeur vers l'utilisation accrue de la fibre optique à l'intérieur de réseaux de communication complexes et performants. Ils permettent maintenant de réaliser un grand nombre de fonctions essentielles à un réseau de communication. Sans les coupleurs optiques, les fibres optiques n'auraient probablement jamais été utilisées dans des réseaux mais uniquement dans des liens point à point.

La commutation de signaux optiques représente le dernier obstacle majeur à l'utilisation de la fibre optique d'une façon aussi simple que pour des câbles coaxiaux. La commutation de signaux est une fonction importante de tout système de distribution. Il est pratique de pouvoir réaliser la commutation d'un signal d'une façon simple en n'importe quel point sur un réseau sans devoir utiliser de l'équipement sophistiqué. Il est facile de commuter des signaux électriques de fréquences moyenne et élevée et l'on voudrait être capable d'en faire autant avec les signaux optiques. Malheureusement, ce n'est pas aussi

simple qu'on le voudrait. Il existe des façons de commuter des signaux optiques mais l'on est encore loin de le réaliser simplement sans équipement sophistiqué. La méthode la plus prometteuse consiste à réaliser la commutation dans un guide d'onde intégré réalisé à partir de matériaux semi-conducteurs qui peuvent modifier leurs propriétés de transmission lorsque polarisés d'une certaine façon [25]. Le type de matériaux semi-conducteurs le plus utilisé est le  $\text{LiNbO}_3$ . Le principal problème associé à cette méthode vient du fait que la commutation est effectuée hors de la fibre et qu'il faut interfacer le guide d'onde en question à la fibre optique, ce qui n'est pas simple à réaliser à cause principalement des petites dimensions des composants. Ces commutateurs peuvent par contre être fabriqués sur des circuits intégrés qui sont peu encombrants et de grande densité. Leurs performances, sans être exceptionnelles, sont prometteuses. Par exemple, un démultiplexeur fabriqué à l'aide de ce type de commutateur [25] maintient une diaphonie de -18 dB à une longueur d'onde de 633 nm et peut démultiplexer un signal jusqu'à un débit de 4 GHz/s.

Le principal concurrent du commutateur de type guide d'onde est le commutateur opto-électronique [26]. C'est une méthode hybride qui a l'avantage de la simplicité mais qui, hélas, retourne un signal commuté optique en signal électrique à la sortie. La façon dont cette commutation est effectuée, c'est-à-dire en utilisant une photodiode comme commutateur, limite l'application de ce type de commutation au récepteur uniquement. Il n'est pas pratique d'avoir à reconvertir un signal électrique provenant du commutateur opto-électronique en signal optique afin que le signal commuté puisse continuer son chemin à

l'intérieur du réseau optique. Ce commutateur opto-électronique est donc limité aux extrémités terminales d'un réseau, mais il se caractérise par d'excellentes performances qui le rendent intéressant pour certaines applications. Son isolation est de l'ordre de 90 dB à 1 GHz, sa largeur de bande de l'ordre de 4 GHz, sa vitesse de commutation de l'ordre du GHz/s et ses performances au bruit excellentes. Il est très simple d'y interfacer une fibre optique car le commutateur est un photodétecteur où l'on va simplement y coller la fibre. On peut également intégrer plusieurs détecteurs sur un circuit intégré sans problème, d'où la possibilité de réaliser des matrices de commutation à grande densité [27].

## 2.2 Emetteurs optiques

La fonction effectuée par les émetteurs optiques est de transformer le signal électrique à transmettre en signal optique qui pourra se propager à l'intérieur du guide d'onde optique. Cette source de puissance optique est contrôlée par un courant électrique. L'information concernant la phase de la lumière est perdue lors de la modulation de l'intensité lumineuse. En fait, si l'on parle de transmission numérique, l'on parle de transmission de lumière lorsqu'il s'agit d'un niveau logique haut, et de non-transmission (très faible) lorsque c'est un niveau bas. Ceci à l'avantage de simplifier beaucoup les circuits de polarisation des émetteurs optiques. Il est clair qu'il y a beaucoup à gagner à conserver l'information sur la phase du signal lumineux pour faciliter le travail du récepteur.

Le domaine des communications cohérentes optiques est devenu un sujet de recherche important depuis quelques années [28,29], mais les énormes difficultés à surmonter pour réaliser la conservation de la phase du signal font qu'il est encore lointain le temps où des systèmes cohérents à haute capacité seront économiquement viables. Les communications optiques actuelles à modulation d'intensités offrent déjà tellement de capacités que l'on n'entrevoit pas le jour où des systèmes cohérents viendront concurrencer sur des applications de moyenne performance comme la télédistribution. Le degré de complexité à atteindre est de beaucoup trop grand pour justifier les améliorations encourrues.

Il existe deux éléments transmetteurs de lumière utilisés en communications par fibres optiques. Ils sont la diode laser à semi-conducteur et la diode électroluminescente. Comme ils possèdent des caractéristiques très différentes, ils ont chacun une partie bien délimitée du marché.

La diode électroluminescente (LED) est l'émetteur optique le moins performant à plusieurs points de vue, mais elle est moins dispendieuse que la diode laser et plus simple d'utilisation. Elle se distingue en effet par une caractéristique puissance optique versus courant électrique à peu près linéaire. Il est ainsi très simple de moduler une LED car elle ne possède pas de seuil typique à toutes caractéristiques de diode. Il existe des LED qui fonctionnent à toutes les fenêtres utiles du spectre des fibres optiques. Elles sont donc très pratiques et simples d'utilisation et l'on n'a souvent même pas

besoin de se préoccuper de son comportement en température. Par contre, la largeur de son spectre optique ( $\Delta\lambda$ ) est large (de l'ordre de 50 nm) et cause donc un problème de dispersion chromatique. Son spectre lumineux est continu et il est alors impossible de parler de cohérence. Son temps de réponse est inférieur à 5 ns (typiquement) et l'exclut donc des applications à hautes vitesses. Ainsi, le domaine d'application des LEDs se limite à des systèmes à taux de transmission inférieur à 100 MHz/s. Un autre facteur négatif en ce qui a trait aux LEDs est la faible directivité des radiations émises. Il est donc difficile d'y coupler des quantités appréciables de lumière dans la fibre optique (0.05 mW typiquement dans les fibre multimodes de 50  $\mu$ m de cœur). Ainsi, on parle très peu de transmission optique d'une LED dans une fibre monomode car les deux termes sont quasi exclusifs.

La diode laser représente sans aucun doute le type de transmetteur optique des systèmes de communication à moyennes et hautes vitesses. Le champ d'application de la diode laser commence là où celui de la LED se termine. Elle offre donc un spectre de puissance discret très étroit de l'ordre de 2 nm. Les raies du spectre lumineux sont uniformément espacées et chacune d'elles correspond à un mode d'oscillation distinct de la diode laser. Habituellement, on essaie de concentrer le signal lumineux sur une seule raie à la fois qui pourra soutenir des puissances facilement supérieures à 1 mW et pouvant aller jusqu'à 100 mW dans certains cas. On désire habituellement obtenir un spectre d'émission monomode, situation qui permet l'obtention de meilleures performances sur fibre monomode. Également, les diodes laser émettent avec une certaine directivité, contrairement aux LEDs, ce qui

permet de pouvoir coupler à peu près 60% de la lumière émise dans une fibre multimode et 30% dans une fibre monomode. Le temps de réponse des diodes laser est typiquement inférieur à 500 ps.

Les diodes laser sont formées principalement de GaAs et peuvent contenir d'autres matériaux semi-conducteurs (In,P,Al) qui permettent d'obtenir des émissions de lumière dans les trois fenêtres d'utilisation. Le GaAs permet des temps de réponse très courts et des fréquences d'opération jusqu'à 10 GHz dans les meilleurs cas [30].

Il n'est cependant pas rare d'obtenir des diodes laser monomodes qui garantissent des vitesses de modulation de l'ordre du gigahertz par seconde. Il faut toutefois être prudent lorsque vient le temps de polariser une diode laser. Le type d'émission optique obtenu n'est monomode que pour une région très particulière de la caractéristique puissance vs courant. Lorsque le courant d'excitation se situe aux environs du seuil de la caractéristique de la diode, l'on obtient un spectre fortement multimode associé à une faible puissance transmise. Un courant d'excitation un peu supérieur a pour conséquence de favoriser un mode optique aux dépens des autres tout en augmentant la quantité de puissance émise. Enfin, pour un courant suffisamment élevé, on obtient l'émission optique recherchée, soit une seule raie contenant toute la puissance.

Il faut maintenant souligner que la caractéristique  $P$  vs  $I$  d'une diode laser est très sensible aux variations de température. Ainsi, à une température donnée et pour un courant de polarisation donné se situant en haut de la caractéristique  $P$  vs  $I$ , il en résulte un spectre monomode; on pourrait obtenir un spectre fortement multimode pour le même courant mais pour une température de jonction légèrement supérieure. Il est donc nécessaire de s'assurer que la diode laser fonctionne continuellement en haut de sa caractéristique, et ce, soit en contrôlant la température de la jonction, soit en établissant une boucle de commande automatique de puissance. La figure 2.2 nous montre un schéma conventionnel d'un système de commande automatique qui se compose essentiellement de deux boucles contrôlant l'une la puissance crête du signal, l'autre la puissance moyenne. Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser un photodétecteur dans le module de transmission, photodétecteur qui reçoit une très faible portion du signal généré afin de pouvoir réaliser le traitement du signal de façon électrique. Ce type de contrôle n'a aucun effet sur la température de la diode mais modifie dynamiquement les courants d'excitation et de la polarisation de façon à pouvoir suivre le déplacement de la caractéristique  $P$  vs  $I$  en fonction des variations de température.

Plusieurs problèmes peuvent survenir lorsque que l'on utilise des diodes laser. Par exemple, il peut arriver que deux modes d'oscillation optiques du laser entrent en compétition lorsque l'on est en régime monochromatique, c'est-à-dire que la puissance optique chevauche deux modes adjacents dans le temps. Egalement, il arrive que de faibles réflexions du signal contre la fibre optique à laquelle on

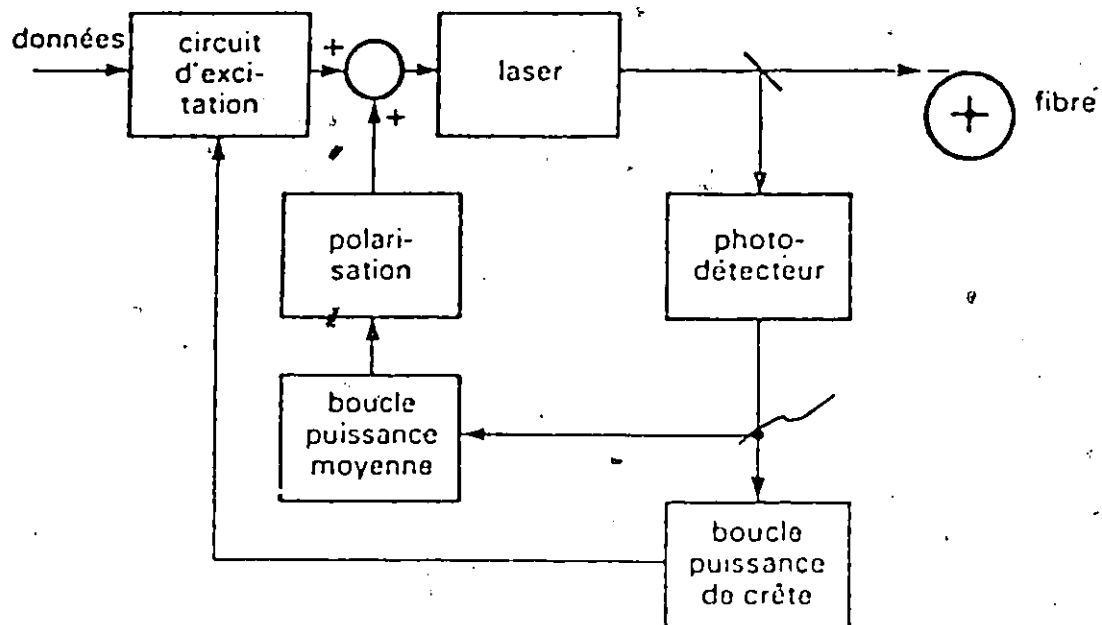


Figure 2.2 Système de commande automatique par rétroaction d'une diode laser.

veut coupler la lumière créent une seconde cavité où d'autres modes d'oscillation vont se développer. Le bruit modal [31], problème rencontré aux connecteurs et épissures de fibres multimodes, est aussi associé aux qualités du spectre transmis par les diodes laser monomodes.

### 2.3 Récepteurs optiques

Le cœur du récepteur optique est le photodétecteur. C'est lui qui réalise l'inverse du transmetteur, c'est-à-dire qu'il génère des impulsions de courant électrique lorsqu'il est excité par des impulsions optiques. Ainsi, au photodétecteur, l'on parlera de la caractéristique courant électrique versus puissance optique incidente ( $I$  vs  $P$ ) pour décrire cette composante. Il existe deux types de photodétecteur utilisés dans les systèmes de communication par fibres optiques: ce sont la photodiode PIN et la photodiode à avalanche (APD). Ces deux types de photodétecteur sont utiles pour les trois fenêtres d'opération des fibres optiques. Pour les faibles longueurs d'onde de 0.8 à 0.9  $\mu\text{m}$ , le silicium est le matériau de base utilisé pour leur fabrication. Aux longues longueurs d'onde de 1.3 et de 1.5  $\mu\text{m}$ , le germanium est utilisé.

La relation I vs P est généralement linéaire et est décrite par l'expression suivante:

$$I = \frac{G \eta q P}{h \nu}$$

où  $\eta$ : efficacité du photodétecteur

$h$ : constante de Planck

$q$ : charge de l'électron

$\nu$ : fréquence du signal

$G$ : gain du photodétecteur

Ce qui distingue les deux types de photodétecteur est le gain associé au phénomène de détection. Dans le cas de la PIN, le gain est de 1. Pour les APDs, le gain varie entre 1 et 1000 et est fonction de la tension de polarisation qui peut, dans certains cas, excéder 300 V. L'efficacité  $\eta$  varie habituellement entre 0.5 et 0.8 et est fonction de la qualité de la construction du photodétecteur.

Le photodétecteur n'est pas le seul élément composant un récepteur optique. On retrouve, suivant le photodétecteur, un préamplificateur électrique qui est le deuxième élément le plus important de tout récepteur. Le préamplificateur est très important car il doit avoir un gain très élevé tout en maintenant un très faible niveau de bruit. Afin d'obtenir la plus grande sensibilité possible, le préamplificateur doit offrir soit une impédance d'entrée très élevée, soit posséder une boucle de rétroaction (à transimpédance). Ces deux

types de préamplificateur sont montrés à la figure 2.3. Typiquement, le préamplificateur sera un transistor à effet de champ au GaAs ou un transistor bipolaire. Dans la région d'utilisation de 0.8 à 0.9  $\mu\text{m}$ , on préfère utiliser un photodétecteur APD au silicium où il est possible d'obtenir un gain d'avalanche très élevé sans générer trop de bruit. Dans ces conditions, les performances du préamplificateur ne sont pas critiques et il est possible d'obtenir un taux d'erreur de  $10^{-9}$  pour une puissance optique incidente de - 50 dBm à 100 Mb/s si l'on utilise un transistor bipolaire au silicium [32].

Dans les fenêtres des longues longueurs d'onde, les APDs au germanium souffrent beaucoup du bruit causé par le processus d'avalanche et du courant résiduel. La combinaison la plus populaire est un photodétecteur PIN couplé à un transistor à effet de champ fabriqué de GaAs dans la configuration à transimpédance. Il est alors possible d'obtenir une grande largeur de bande (quelques centaines de MHz) et une bonne plage dynamique. Il existe par contre depuis peu une nouvelle alternative à la configuration PIN - amplificateur transimpédance à 1.3 et 1.5  $\mu\text{m}$ , soient les APDs composés de InGaAs(P)/InP [33]. Ces dispositifs ne sont pas encore disponibles commercialement mais ils permettront de simplifier les récepteurs à ces longueurs d'onde élevées grâce au gain d'avalanche. Toutefois, de façon générale, le préamplificateur à impédance élevée offre une meilleure sensibilité, mais son impédance élevée limite sa largeur de bande par sa constante de temps RC qui agit comme intégrateur. Contrairement à ce dernier, le préamplificateur à transimpédance offre une meilleure largeur de bande grâce à sa rétroaction négative, ce qui lui permet de se passer de

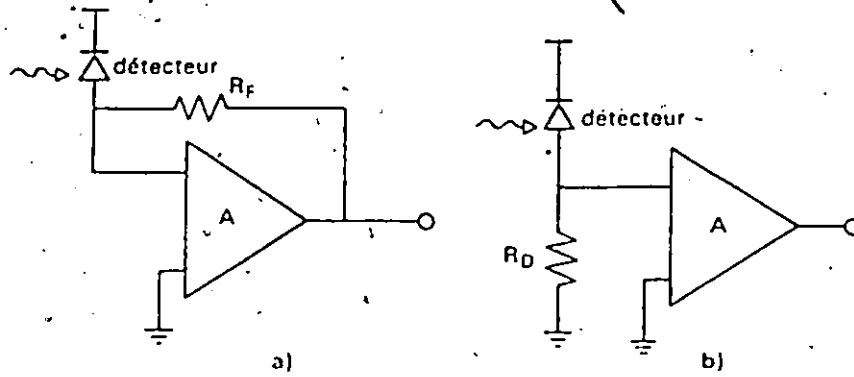


Figure 2.3 Préamplificateur a) à transimpédance et b) à impédance d'entrée élevée.

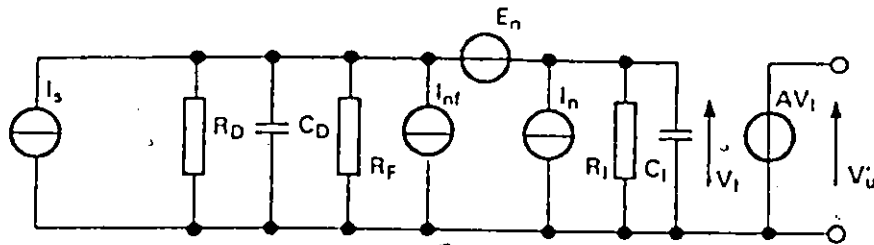


Figure 2.4 Circuit équivalent de bruit pour le photodétecteur et l'amplificateur

- $I_s$  = générateur de courant du signal optique équivalent
- $R_D$  = résistance de polarisation du photodétecteur
- $C_D$  = capacité de jonction du photodétecteur
- $E_n$  = générateur de tension de bruit équivalente de l'amplificateur
- $I_n$  = générateur de courant de bruit équivalent de l'amplificateur
- $C_I$  = capacité d'entrée de l'amplificateur
- $R_I$  = résistance d'entrée du premier étage
- $R_F$  = transimpédance de l'amplificateur
- $I_{nF}$  = générateur de courant de bruit thermique équivalent correspondant à  $R_D/R_F$
- $A$  = gain de tension de l'amplificateur en circuit ouvert

circuits d'égalisation pour améliorer sa bande passante, mais sa sensibilité est inférieure à cause du bruit thermique causé par la résistance de rétroaction.

Pour ce qui est du calcul de la sensibilité de ces récepteurs optiques, il n'est pas simple de le déterminer. On peut voir, à la figure 2.4, le modèle d'un circuit équivalent utilisé. Les différents paramètres changent d'une configuration à une autre et rendent le calcul de la sensibilité trop compliqué pour faire partie de ce bref aperçu des technologies utilisées. Il y a de nombreux chercheurs qui se sont penchés sur ce sujet qui demeure toujours populaire [34-36].

#### 2.4 Multiplexage en longueurs d'onde

Le multiplexage en longueurs d'onde (MLO) est une méthode très puissante d'augmenter les capacités d'une liaison optique. Ce type de multiplexage consiste à transmettre sur une même fibre optique des signaux optiques de diverses longueurs d'onde portant chacune des signaux d'information différents. Ces communications peuvent être soit dans la même direction, soit bi-directionnelles. Il est alors possible de voir que la capacité totale d'une fibre peut être multipliée par un facteur quelconque représentant le nombre de différentes longueurs d'onde utilisées. La façon de réaliser ce type de multiplexage est de transmettre différents signaux d'information à l'aide de différentes diodes laser émettant toutes à des longueurs d'onde différentes les unes des autres. En fait, il ne s'agit de rien d'autre que de multiplexage

en fréquence, mais à cause de la très haute fréquence de l'onde porteuse lumineuse ( $10^{14}$  Hz) comparativement à la largeur de bande du signal d'information (de l'ordre de  $10^8$  Hz), il existe énormément d'espace disponible. Ainsi, il est pratiquement possible, par exemple, de transmettre à la fois sur des longueurs d'ondes de 820, 850, 880 et 1300 nm dans une direction de la fibre et de 1200 nm dans l'autre direction [37]. Certains chercheurs vont même jusqu'à utiliser huit différentes longueurs d'onde pour une seule fibre [37]. Théoriquement, le potentiel des fibres semble à peu près infini, particulièrement lorsque certains chercheurs parlent de transmettre de 13 à 20 longueurs d'onde différentes dans la première fenêtre seulement [38].

Dans la pratique, tout n'est pas si rose. Premièrement, est-il réaliste de parler d'une quantité d'information aussi grande? Deuxièmement, la complexité des circuits de démultiplexage s'accroît rapidement avec le nombre de longueurs d'onde différentes.

Le multiplexage n'est pas très difficile à réaliser, surtout lorsque l'on utilise des coupleurs optiques biconiques fusionnés. Leur largeur de bande est excellente et leurs pertes d'insertion très faibles. De plus, on peut très facilement réaliser des coupleurs de 10, 20 ou 30 ports d'entrées. Il est possible de multiplexer avec d'autres éléments que les coupleurs, mais ceux-ci qui reposent sur l'optique conventionnelle (filtres, miroirs, lentilles), sont en général très encombrants et fragiles. D'autre part, ils occupent beaucoup plus d'espace que les coupleurs avec des taux d'efficacité bien inférieurs.

Le démultiplexage en longueur d'onde est plus difficile à réaliser que le multiplexage, car il est nécessaire d'utiliser des éléments sélectifs tels filtres à interférences, prismes ou réseaux de diffraction. Ils sont physiquement encombrants, délicats d'ajustement et peuvent devenir très complexes lorsque l'on augmente le nombre de signaux différents. Il existe par contre depuis peu un nouveau type de filtre qui promet énormément. Ces filtres, qui sont encore au stade expérimental, sont basés sur la technologie des coupleurs biconiques fusionnés et des "tapers" [21,22]. Il est en effet possible de réaliser des filtres optiques à partir de "tapers" et de coupleurs qui démontrent des variations de transmission de puissance sinusoïdales en fonction de la fréquence. En cascade quelques éléments, il devient alors possible de réaliser des filtres étroits qui ont alors l'avantage d'être fabriqués à partir de fibres optiques uniquement, donc d'être peu encombrants, stables en longueurs d'onde, insensibles aux variations de température courante et réalisables en série.

Actuellement, la principale application du multiplexage en longueurs d'onde est pour les communications bi-directionnelles. La quantité d'information transmise par une seule longueur d'onde est habituellement plus que suffisante pour la plupart des systèmes et l'apport principal du multiplexage en longueurs d'onde est la bi-directionnalité. Pour un système de télédistribution, la bi-directionnalité est un atout important car elle permet l'utilisation d'une seule fibre par abonné et ne limite pas la largeur de bande utilisable dans les deux directions. Egalement, il ne sert pas à grand chose de transmettre 10 canaux de télévision sur 10 longueurs d'onde

différentes au coût d'une grande complexité au démultiplexeur lorsque l'abonné peut sélectionner au central n'importe quelle émission par le lien optique qui le relie au centre de distribution et ce, aussi facilement que sur son propre téléviseur. Cette bi-directionnalité permet donc d'économiser sur la largeur de bande à transmettre (1 canal TV à la fois au lieu de 10 ou 20), de même que sur la vitesse de transmission, la complexité des circuits électroniques de multiplexage et de démultiplexage et la complexité du récepteur optique de chaque abonné. Elle permet aussi à l'abonné d'avoir à sa disposition une foule de services interactifs contrôlés par le central, car il bénéficie d'une largeur de bande très grande de chez lui vers le central avec une complexité de circuits minimale.

## 2.5 Techniques de modulation

A priori, la fibre optique se prête à tout type de modulation. Il est parfaitement possible de moduler une diode laser ou une LED analogiquement ou numériquement. Tous les types de modulation ont été analysés et implémentés sur des systèmes de transmissions par fibres optiques. Tous n'ont pas les mêmes caractéristiques et les mêmes performances que lorsqu'ils sont utilisés sur des câbles coaxiaux. Tout d'abord, la technique la plus simple qu'est la modulation analogique d'intensité ne se prête pas très bien aux communications par fibres optiques à cause des difficultés apportées par les non-linéarités des diodes laser et des LEDs. Bien que la caractéristique  $P$  VS  $I$  des LED soit particulièrement linéaire, le niveau de distorsion harmonique total

est trop élevé pour la distribution de la télévision par câble par exemple [39]. Il est possible d'annuler l'effet des non-linéarités en utilisant une rétroaction positive régulée [40]. Cette méthode transmet deux signaux, l'un étant la modulation directe par le signal d'information, l'autre le signal d'erreur corrigeant l'effet des non-linéarités. Il est ainsi possible d'obtenir des performances exceptionnelles même lorsque l'on utilise des diodes laser. Par contre, cette méthode souffre d'un autre problème presque aussi sérieux que celui qu'elle résout: le prix à payer pour cette amélioration de performances est l'augmentation de la complexité du transmetteur et des récepteurs.

La modulation en fréquence ne souffre pas autant des non-linéarités que la modulation d'intensité. Elle représente donc une alternative sérieuse et demeure encore populaire. Par contre, elle souffre de ne pouvoir être régénérée. Le signal peut être amplifié s'il devient trop faible, mais il ne peut jamais être régénéré par les stations relais. Egalement, la détection d'un signal FM au récepteur est moins performante que celle d'un signal binaire où il s'agit uniquement de prendre une décision entre deux niveaux de voltage. Ainsi, à cause de la grande largeur de bande disponible grâce à l'utilisation de la fibre optique, on ne se souciera pas beaucoup de l'accroissement de la largeur de bande occasionné par l'utilisation de modulations numériques car elle permet d'ignorer en quelque sorte les non-linéarités des diodes laser et de profiter des nombreux avantages de la transmission numérique.

L'avantage fondamental de l'utilisation d'un type de modulation numérique, quel qu'il soit, est la capacité qu'a le système de régénérer l'information même après qu'elle ait subi une grande atténuation et absorbé une quantité considérable de bruit .

Deuxièmement, bien que les éléments transmetteurs de lumière souffrent de non-linéarités, ils se prêtent très bien à des changements de niveau binaire extrêmement rapides. En troisième lieu, il est facile de multiplexer en temps plusieurs signaux différents une fois qu'ils ont été convertis numériquement. Ceci est particulièrement important en ce qui a trait à la télédistribution où plusieurs signaux de nature totalement différente doivent être transmis simultanément.

Quatrièmement, pour des systèmes à plusieurs canaux, il est possible d'utiliser certains circuits tels que quantificateurs et codeurs en mode de partage, où différents canaux pourront utiliser le même équipement à tour de rôle, diminuant ainsi les coûts du système.

Il y a également des désavantages à utiliser des modulations numériques. Il est facile de penser à l'augmentation de la largeur de bande, du traitement additionnel que l'on doit apporter au signal et de l'adaptation à l'équipement analogique existant. Par contre, le mariage entre la fibre optique et la modulation numérique permet aux deux partenaires d'être exploités à leur pleine valeur en permettant la transmission d'information d'une façon efficace.

## Chapitre III

### Description du système de télédistribution numérique par fibres optiques

#### 3.1 Transmetteur

##### 3.1.1 Description des blocs diagrammes

Ce système de télédistribution numérique par fibres optiques n'a pas l'ambition de révolutionner le domaine de la télédistribution par fibres optiques. Il représente plutôt la démonstration qu'un tel système peut être réalisé simplement à l'aide de composants commerciaux peu sophistiqués. Nous n'avons pas tenté non plus de réaliser un système à très hautes performances où la qualité des signaux distribués serait digne d'un studio de production. Nous avons plutôt réalisé un compromis entre une qualité satisfaisant le client et une simplicité associée à un taux de transmission raisonnable sans avoir recours à la compression de l'information.

La figure 3.1 présente schématiquement les différentes fonctions du transmetteur. Quatre convertisseurs analogiques - numériques (A/D) effectuent la conversion des signaux analogiques à transmettre sous forme numérique. Le signal le plus important est sans contredit le canal vidéo d'une largeur de bande de 4.5 MHz. Il est le coeur du système car il utilise huit des dix bits parallèles disponibles pour chaque échantillon ou mot transmis.

TRANSMETTEUR

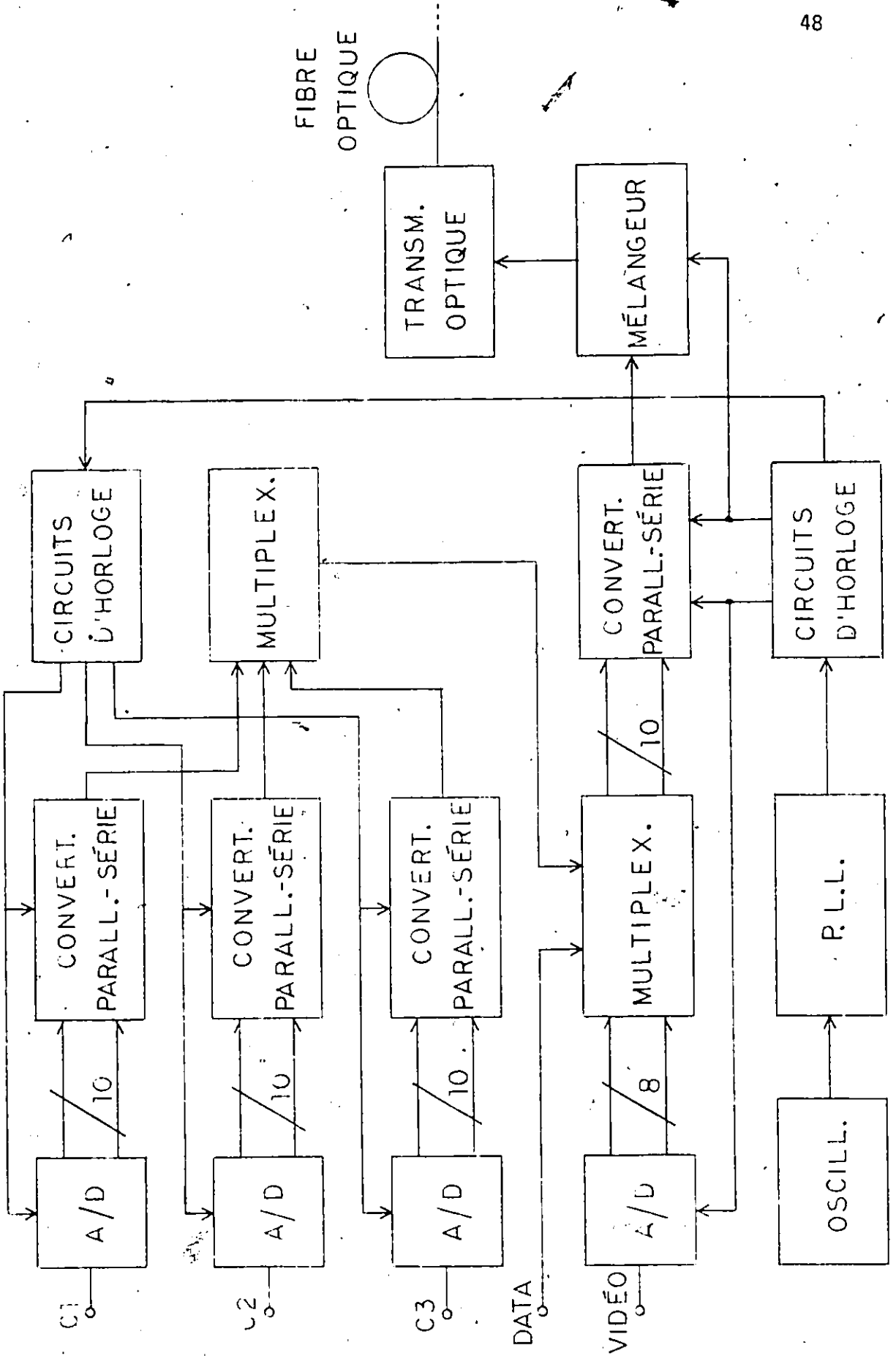


Figure 3.1. Bloc diagramme des fonctions du transmetteur.

Les trois autres signaux analogiques convertis numériquement se partagent entre eux un seul bit des dix disponibles par mot, et ne supportent donc que les services à basse vitesse. Le taux de transmission de chacun des trois canaux à basse vitesse est de 2.5 Mb/s et ils sont multiplexés entre eux avec le signal de synchronisation du récepteur. Chaque échantillon vidéo, pris au taux de 10 MHz, est composé de huit bits non compressés. Les échantillons des canaux à basse fréquence sont pris au taux de 250,000 chaque seconde et supportent dix bits chacun.

Une première série de circuits de multiplexage à basse vitesse est utilisée afin de multiplexer sur un seul bit les trois canaux à basse vitesse et le mot de synchronisation. Un second multiplexeur utilisé en tandem avec un convertisseur parallèle-série fonctionne à haute vitesse et assemble les huit bits associés au signal vidéo, le bit multiplexé et le bit de données (data) considéré comme espace disponible pour une expansion future du système. Le convertisseur parallèle-série, sans le contrôle d'horloges à 100 et 10 MHz, génère un signal série composé des dix bits parallèles qui sont transmis à tour de rôle.

Les circuits d'horloges à haute et basse fréquence qui contrôlent les conversions analogiques-numériques et parallèles-séries sont basés sur un oscillateur à quartz de 10 MHz et d'une boucle d'asservissement en phase (P.L.L.).

Le signal série de forme NRZ passe par un mélangeur de bits avant d'être transmis par le transmetteur optique. Ce mélangeur est utilisé afin de rendre le signal suffisamment aléatoire et ainsi faciliter le recouvrement de l'horloge au récepteur. Finalement, le transmetteur optique est utilisé afin de convertir les signaux électriques porteurs d'information en impulsions optiques qui seront émises dans une fibre optique. Dans notre cas, la fibre est de type multimode à gradient d'indice.

### 3.1.2 Circuits d'horloges

Passons maintenant à la description détaillée des différents circuits du transmetteur. La figure 3.2 présente les composantes utilisées dans la génération des horloges à l'aide d'une boucle de verrouillage (P.L.L.). Tout d'abord, un premier signal de référence est généré à l'aide d'un oscillateur à quartz de 10 MHz utilisant un circuit intégré de MOTOROLA (MC 12061). Cette fréquence de 10 MHz a été choisie pour deux raisons principales. Premièrement, il est impossible d'utiliser l'oscillateur à des fréquences supérieures à 20 MHz (limite d'opération de l'oscillateur), ce qui nous empêchait de générer directement l'horloge à 100 MHz puis d'en dériver les autres horloges. Deuxièmement, du fait qu'une sous-horloge de 10 MHz est nécessaire pour la conversion parallèle-série, il est très simple d'utiliser ce sous-multiple de 100 MHz comme fréquence de comparaison pour le P.L.L., sans avoir à générer un autre sous-multiple pour le P.L.L..

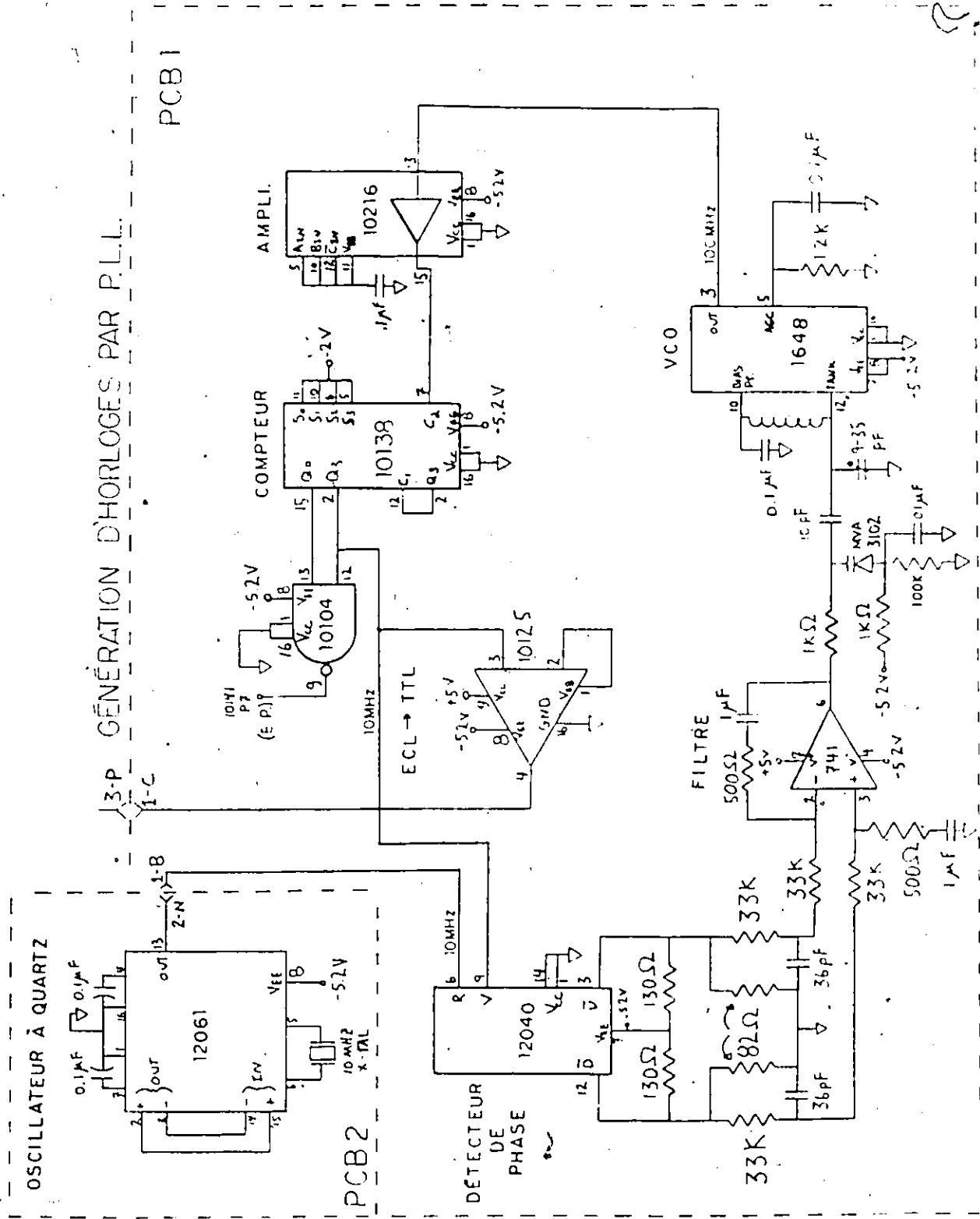


Figure 3.2 Circuits de génération d'horloges par P.L.L. au transmetteur.

L'entrée du P.L.L., composée du détecteur de phase MOTOROLA MC 12040 compare deux signaux sinusoïdaux de 10 MHz; l'un, la référence, provient de l'oscillateur à quartz, tandis que l'autre est un sous-multiple de l'horloge à 100 MHz. Ce genre de détecteur de phase et de fréquence possède des caractéristiques très intéressantes qui en font un détecteur de très hautes performances. Il faut d'abord dire que du fait que la détection de phase est numérique, l'analyse d'un tel P.L.L. est différente de celle des P.L.L. conventionnels utilisant un mélangeur comme détecteur de phase [41]. Notre détecteur de phase est définitivement le plus performant de sa catégorie. Nous pensons plus particulièrement aux détecteurs de phase numériques classiques comme la porte logique OU exclusif ou la bascule maître-esclave déclenché par transitions. La fréquence du VCO est toujours amenée vers la bonne direction par le détecteur de phase et il conserve une grande sensibilité en fréquence même lorsque les fréquences du VCO et du signal de référence sont très rapprochées. Egalement, il est à noter que, théoriquement, la plage de capture et la plage de maintien de l'asservissement sont infinies [41]. Il est aussi possible de définir le temps de capture  $T_p$ , comme nous le verrons plus tard.

Le détecteur de phase est un circuit compatible ECL qui fonctionne numériquement et qui procure à ses sorties des signaux d'erreur indiquant lequel des deux signaux est en avance ou en retard. Comme on le voit à la figure 3.3, pour un état initial donné, les deux sorties du détecteur de phase indiquent si le signal de rétroaction du P.L.L. est en avance ou en retard par rapport à la référence. Une seule des deux sorties est active à la fois et les sorties U et D ne seront

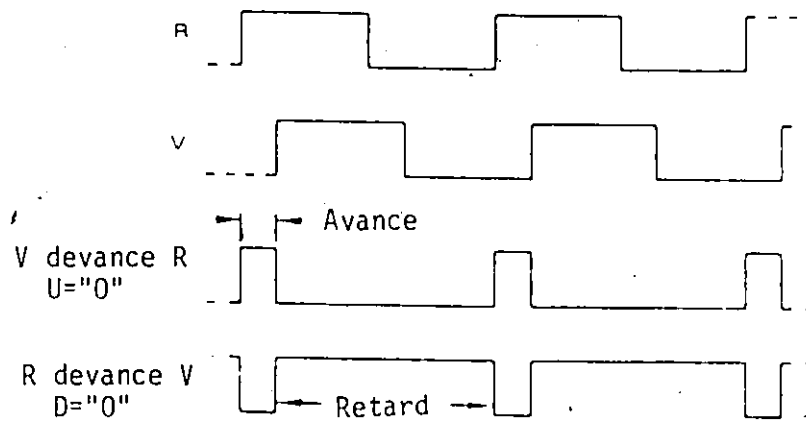
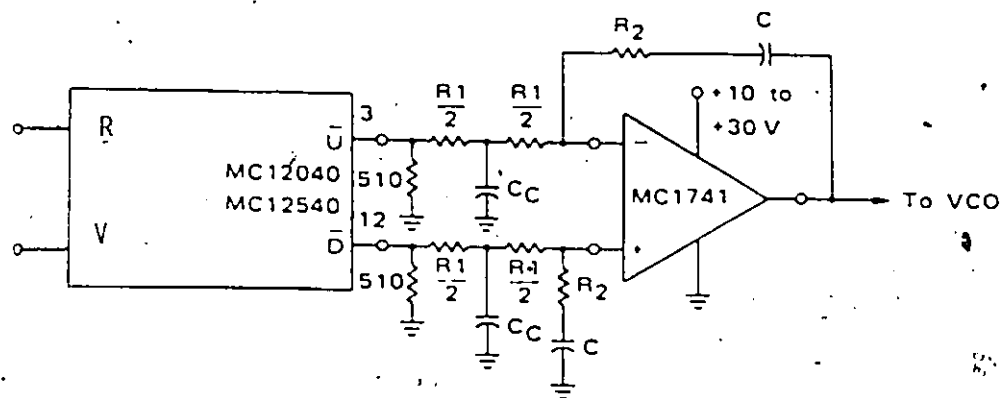


Figure 3.3 Fonctionnement du détecteur de phase et de fréquence MC 12040.

toutes deux nulles que pour deux signaux en accord de phase et de fréquence. Que le signal de référence soit en avance ou en retard à l'instant initial où le système est mis en action, ne porte pas à conséquences car les deux situations vont toutes deux mener à un asservissement en phase stable. Le gain du détecteur de phase est de 0.16 volt/radian pour une plage d'utilisation de  $+2\pi$  radians sur des niveaux logiques ECL variant entre approximativement -0.8 V et -1.8 V, pour une alimentation standard de  $V_{EE} = -5.2$  V et  $V_{CC} = 0$  V.

Les deux signaux d'erreur U et D sont utilisés afin d'obtenir deux sorties au niveau logique "1" lorsque l'asservissement en phase est obtenu. De cette façon, la tension à la sortie de l'amplificateur opérationnel est quelconque mais stable en supposant des niveaux logiques "1" identiques et stables à l'entrée.

Les signaux d'erreur du détecteur de phase sont sommés par un amplificateur opérationnel du type MC 1741 qui agit également comme filtre passe-bas du deuxième ordre. Il est à remarquer que les deux filtres RC composés de résistances de 33 K $\Omega$  et de condensateurs de 36 pF sont utilisés afin d'intégrer certains signaux d'erreur étroits qui pourraient passer inaperçus à l'amplificateur opérationnel à cause de sa faible largeur de bande (typiquement une centaine de kilohertz). Les caractéristiques fondamentales du P.L.L. sont principalement dépendantes du filtre passe-bas utilisé. En utilisant les figures 3.2 et 3.3 et les références 41 et 42, on peut obtenir les caractéristiques suivantes pour

la boucle d'asservissement:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_\phi K_v}{N T_2}}$$

$$\xi = \sqrt{\frac{K_\phi K_v}{N T_2}} \frac{T_1}{2}$$

$$T_1 = \frac{2\xi}{\omega_n} = R_2 C$$

$$T_2 = \frac{K_\phi K_v}{N \omega_n^2} = R_1 C$$

$$K_F = \frac{1 + T_1 s}{T_2 s}$$

$$T_p = \frac{N T_1 + T_2}{K_v \times \frac{U_d}{\omega_0}}$$

où

$K_\phi$  : Gain du détecteur de phase (0.16 V/rad).

$K_F$  : Gain de l'amplificateur filtre.

$K_v$  : Gain du VCO ( $10^7$  rad/s/V).

$N$  : Diviseur (10).

$\omega_n$  : Fréquence naturelle.

$\xi$  : Amortissement.

$T_p$  : Temps d'acquisition.

$U_d$  : Tension d'alimentation.

$\omega_0$  :  $2\pi f_0$

$f_0$  : fréquence au repos du VCO.

En utilisant les paramètres du système, on obtient les valeurs suivantes:

$$\omega_n = 1557 \text{ rad/s}$$

$$T_2 = 0.066 \text{ s}$$

$$T_1 = 5 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$$\xi = 0.4$$

$$T_p \approx 6.7 \text{ s}$$

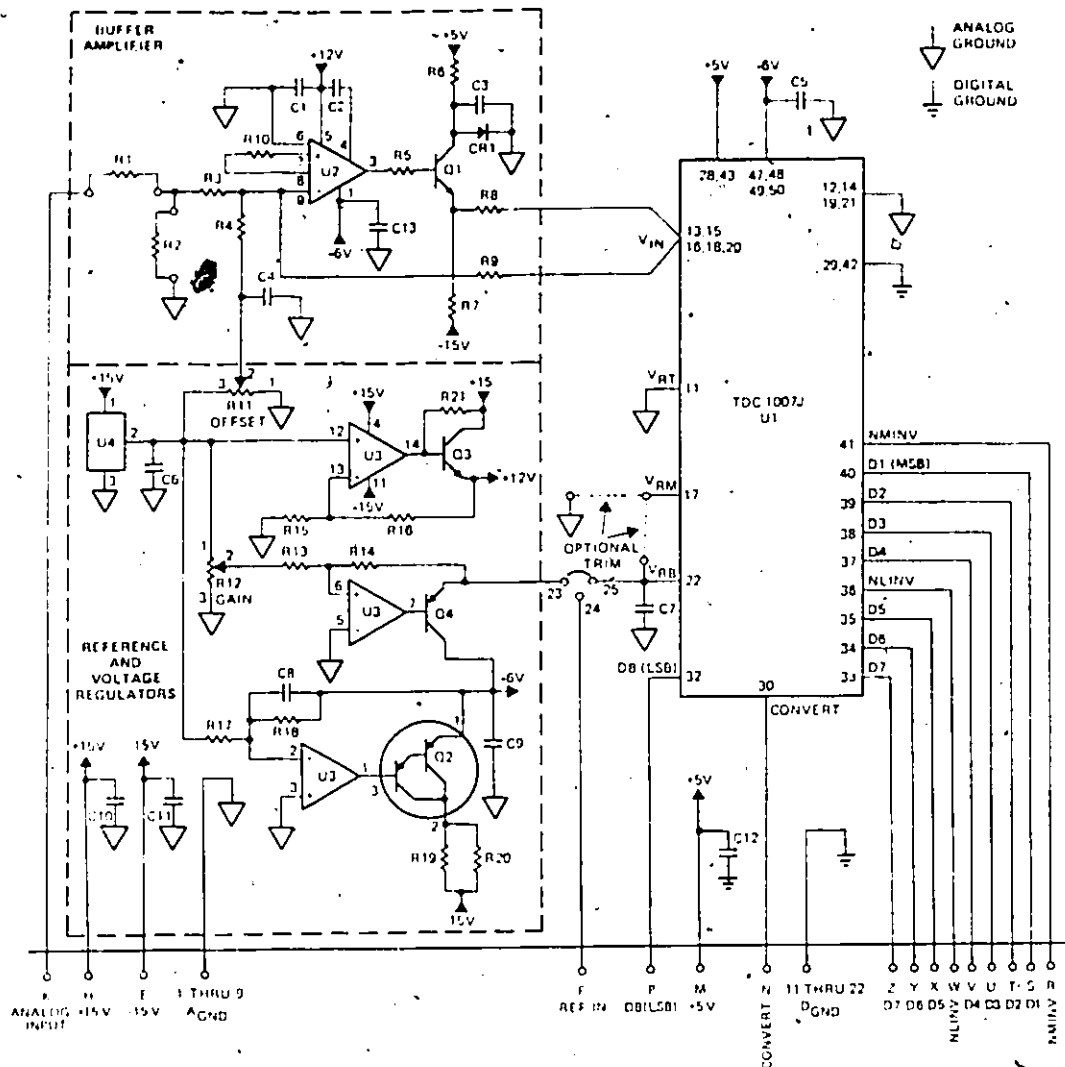
Il est à noter que cette boucle d'asservissement n'est pas critique du tout. Son fonctionnement est simple et elle est utilisée en mode constant pour suivre la référence à quartz déjà stable et pour générer l'horloge à 100 MHz. Il n'en est pas de même au récepteur où une boucle similaire est utilisée pour le recouvrement de l'horloge.

Le signal d'erreur intégré par le filtre passe-bas est envoyé par la suite à l'oscillateur contrôlé par voltage (VCO). Le VCO est compatible à la famille ECL (MOTOROLA MC 1648) et fonctionne de pair avec un circuit d'oscillation extérieur LC à son entrée. La fréquence du VCO varie lorsque la tension DC d'erreur est appliqué à une diode à capacité variable (MVA 3102), ce qui a pour effet de varier la capacité

) du circuit d'oscillation externe LC du VCO et de générer l'horloge à 100 MHz. La boucle d'asservissement se referme enfin sur un circuit diviseur par dix composé d'un compteur (MC 10138) et d'une porte ET (MC 10104). Le signal résultant à 10 MHz est alors utilisé aux fins de comparaison avec la référence à quartz et aussi pour contrôler la conversion parallèle-série du signal multiplexé.

### 3.1.3. Conversion analogique - numérique du signal vidéo

Il est maintenant temps de s'intéresser à la conversion analogique-numérique des différents signaux à transmettre. La conversion du signal vidéo est effectuée par un circuit prototype de la compagnie TRW (figure 3.4). La plaquette en question de TRW est construite autour du circuit intégré TDC 1007J qui convertit chaque échantillon en un mot de huit bits. La conversion est de type éclair ("flash") et la vitesse maximale de conversion est de 30 mégaéchantillons par seconde. Ce convertisseur ne requiert pas l'utilisation d'un "sample-and-hold" et est compatible TTL. La vitesse à laquelle le convertisseur est utilisé n'est que de 10 mégaéchantillons par seconde, ce qui est bien en-deçà des capacités du circuit. Le signal indiquant le départ de chaque conversion est dérivé de l'horloge ECL à 10 MHz que l'on a converti en signal TTL à l'aide d'un convertisseur ECL-TTL (MOTOROLA MC 10125) et décalé par rapport au signal d'entrée parallèle utilisé pour la conversion parallèle-série par le MC 10141.



TDC1007PCB Schematic

PARTS LIST

RESISTORS

R1	012	1.4W	2%
R2	80 Ω	1.4W	2%
R3	10KΩ	1.4W	2%
R4	4.2KΩ	1.4W	2%
R5	10Ω	1.4W	2%
R6	56Ω	1.4W	5%
R7	10Ω	2W	5%
R8	6.8Ω	1.2W	5%
R9	20KΩ	1.2W	2%
R10	1	1.4W	2%
R11	20KΩ	1.4W	Multiturn Cermet Pot
R12	20KΩ	1.4W	Multiturn Cermet Pot
R13	21.5KΩ	1.4W	2%
R14	21.5KΩ	1.4W	2%
R15	11.3KΩ	1.4W	2%
R16	42.2KΩ	1.4W	2%
R17	21.5KΩ	1.4W	2%
R18	51.5KΩ	1.4W	2%
R19	24Ω	2W	10%
R20	24Ω	2W	10%
R21	82Ω	1.4W	2%

CAPACITORS

C1	0.1μF	50V
C2	2.0μF	50V
C3	0.1μF	50V
C4	0.1μF	50V
C5	0.1μF	50V
C6	10μF	10V
C7	100μF	10V
C8	0.001μF	50V
C9	100μF	10V
C10	100μF	20V
C11	100μF	20V
C12	100μF	10V
C13	0.1μF	50V

TRANSISTORS

Q1	2N5936
Q2	2N6034
Q3	2N2222
Q4	2N2907

DIODE

CR1	1N4001
-----	--------

MISCELLANEOUS

- A1 Camlion G4 pin socket 704-4064-01 04 12 for U1\*\*
- A2 Thermalloy heat sink 607 FOR Q2
- A3 TRW Cinch edge connector 251 22 30 160
- A4 Printed circuit board TRW TPC 1007
- A5 Moore Systems stitch weld pins 700508 for R1, R2 (4 Required)

INTEGRATED CIRCUITS

U1	TRW TDC1007J
U2	Plassey SL541C
U3	Motorola MCA741
U4	Motorola MC1403U

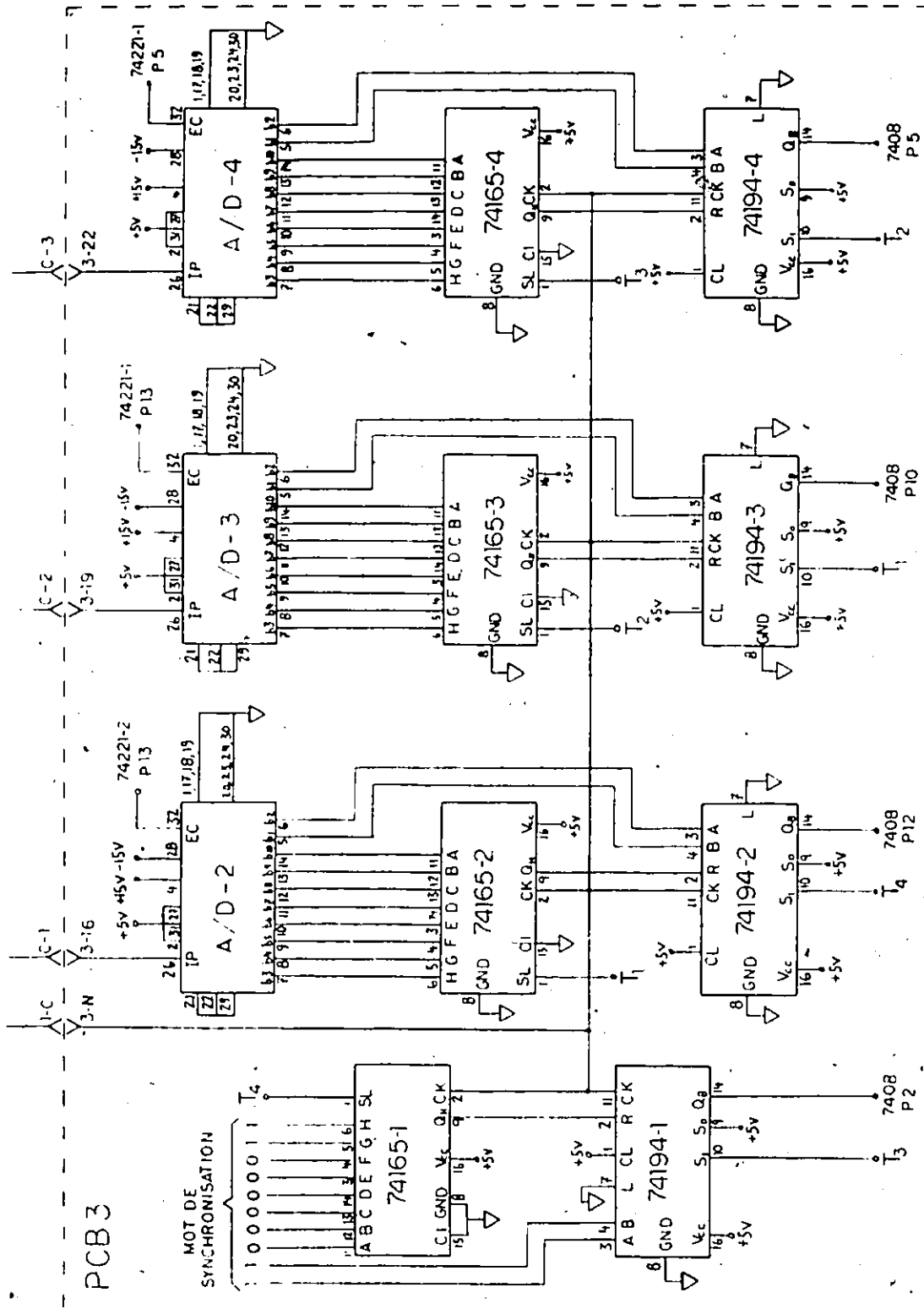
\*Input impedance and range select (75Ω, 1V option supplied)  
 \*\*A zero insertion force socket (Textool PN 232 2601 00 0606, 2 required) may be substituted by the user  
 †Amplifier compensation components

Figure 3.4 Circuits du convertisseur analogique-numérique du signal vidéo.

La plaquette prototype de TRW, qui possède ses propres régulateurs de tension, permet d'ajuster le niveau maximum du signal d'entrée de 1 à 10 V (échelle maximale) et offre des contrôles de gain et d'ajustement de niveau DC. Le circuit a été ajusté de façon à recevoir un signal de 2 Vpp maximum à l'entrée, adapté à une impédance de 50 ohms. Un amplificateur inverseur avec gain variable est utilisé également de façon à ce qu'il soit simple d'alimenter la plaquette à l'aide d'un signal vidéo en bande de base non inversé provenant d'un démodulateur standard. Les huit lignes parallèles supportant la valeur de chaque échantillon sont, à leur sortie de la plaquette TRW, converties du niveau TTL actuel au niveau ECL nécessaire au multiplexage à l'aide de convertisseurs TTL-ECL (MOTOROLA MC 10124).

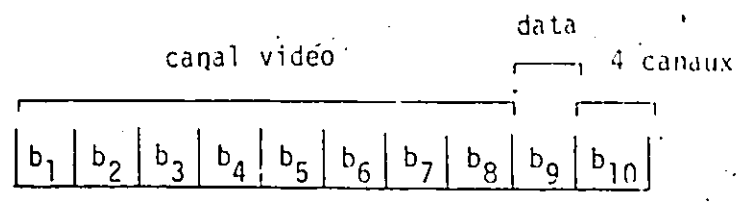
#### 3.1.4. Conversion analogique numérique et multiplexage des trois signaux basse fréquence

La conversion analogique-numérique des trois signaux basse fréquence s'effectue en parallèle et le résultat de cette conversion est multiplexé en temps sur un bit de transmission de 10 Mb/s avec le mot de synchronisation (figure 3.5). A la figure 3.6 est définie la case de chacun des 4 canaux (3 signaux et le mot de synchronisation). Ce bit résultant est par la suite converti d'un niveau logique TTL à un niveau ECL pour le multiplexage final du signal global.



CONVERSIONS: A → D, PARALLÈLE → SÉRIE

Figure 3.5 Circuits réalisant les conversions analogique-numérique et parallèle-série des canaux à faible débit au transmetteur.



- b<sub>1</sub> à b<sub>8</sub> : Signal vidéo transmis à 80 Mb/s.
- b<sub>9</sub> : Canal de data à 10 Mb/s.
- b<sub>10</sub> : Services à basse vitesse multiplexés.  
Transmission à 10 Mb/s.

Détail du bit no.10

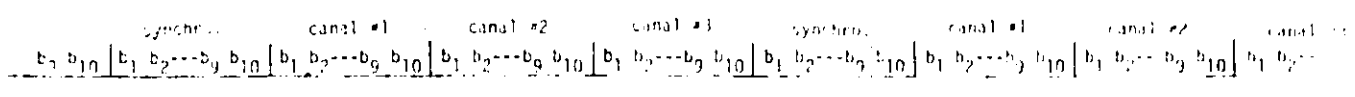


Figure 3.6 Allocation temporelle des trois canaux des services basse vitesse et du mot de synchronisation.

La conversion analogique-numérique des trois signaux basse fréquence est effectuée par trois convertisseurs identiques de 10 bits par échantillon (ANALOG DEVICES HAS-1002) qui ont une vitesse d'opération maximale de 588 KHz. Les circuits intégrés TTL 74LS165 et 74LS194 sont utilisés en parallèle pour stocker le résultat des différentes conversions avant le multiplexage. Ces circuits de stockage sont contrôlés par une horloge à quatre phases (T<sub>1</sub> à T<sub>4</sub>). Les convertisseurs analogiques-numériques, eux, utilisent des signaux de courte impulsion dérivés de l'horloge à quatre phases et produits par des monostables multivibrateurs 74LS221. Le multiplexage de ces trois signaux et du mot de synchronisation est également effectué à l'aide de l'horloge à quatre phases (figure 3.7). Chacun des quatre canaux est sélectionné tour à tour par une phase différente de l'horloge lorsque l'information à transmettre est valide. Chaque canal transmet ses dix bits (correspondant à un mot) consécutivement lorsque sélectionné par la phase appropriée. Chacune des portes ET 74LS08 à deux entrées supporte une phase T<sub>i</sub> différente et un des quatre canaux (3 signaux plus le mot de synchronisation). Le tout est par la suite multiplexé par trois portes OU 74LS32. Le résultat est ensuite converti à des niveaux ECL et multiplexé avec le signal vidéo. A ce moment, nous avons neuf des dix bits de transmission utilisés (huit pour le vidéo et un pour les services basse fréquence) et le dixième, bien que transmis également, ne supporte aucune information. En fait, ce dixième bit, d'un débit de 10 Mb/s pourrait supporter par exemple dix stations de radio FM, mais nous n'avons pas jugé bon de réaliser pareil circuit. Un tel service est sans doute pertinent à un tel système mais ne pose pas de défi majeur

# GÉNÉRATION D'HORLOGES ET MULTIPLEXAGE DE DATA

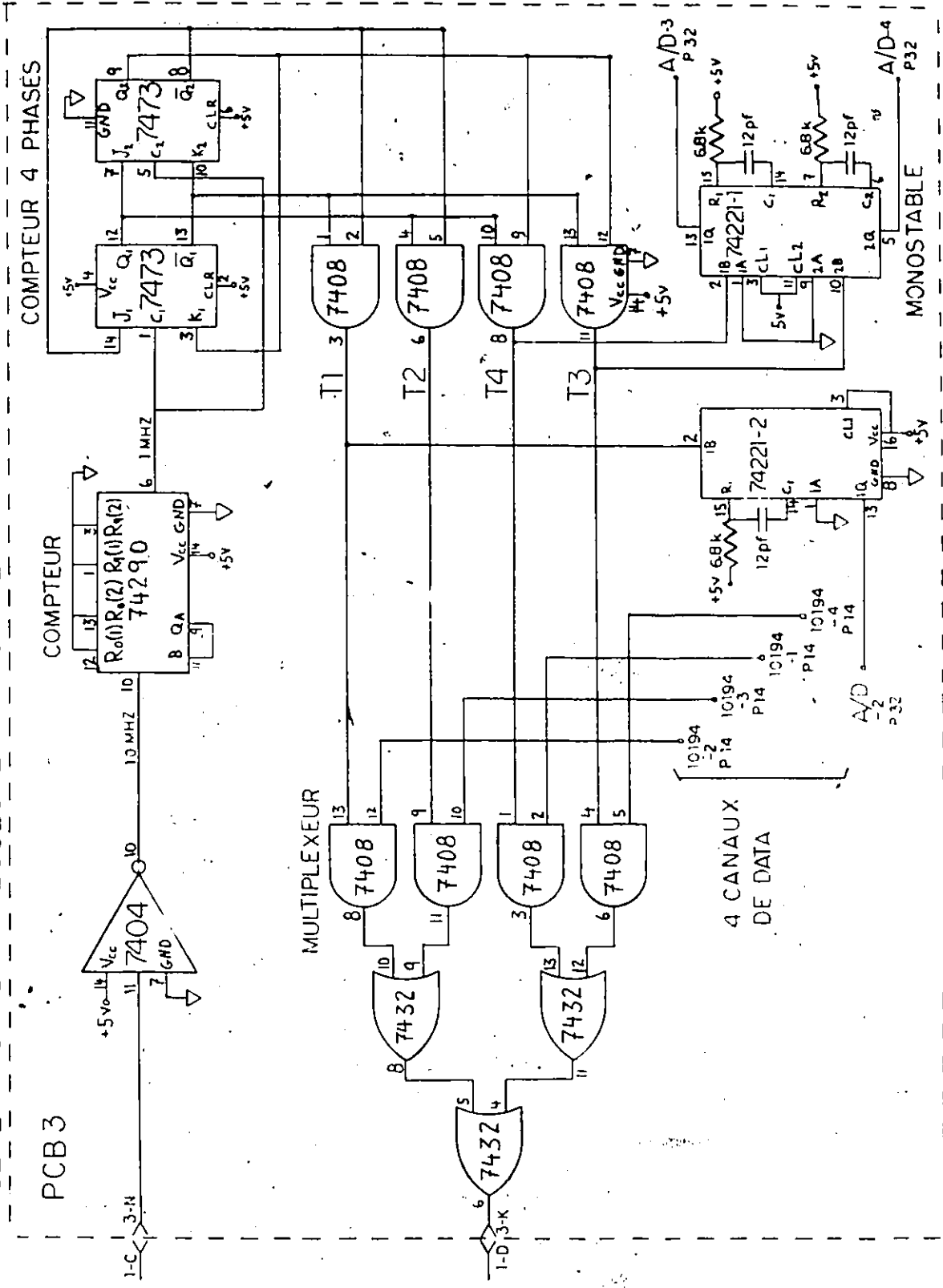


Figure 3.7 Génération des horloges à basse fréquence et multiplexage des quatre canaux à faible débit au transmetteur.

de conception. Il ne nous intéresse que pour démontrer que l'espace nécessaire est disponible et que le signal en question est simple à interfacer.

Ainsi, le mot de synchronisation, choisi arbitrairement, comme 1100000011 est transmis à une fréquence de 2.5 MHz. Il est bien entendu que de l'espace utile est perdu par le mot de synchronisation et qu'il serait simple de diminuer son taux de transmission. D'un autre côté, il faut mentionner encore que le système ne se veut pas un exemple d'économie à tout prix mais avant tout une démonstration simple de la possibilité de réaliser un tel système. Egalement, il n'est pas tragique de gaspiller un peu de largeur de bande car la fibre optique nous en offre suffisamment pour qu'il soit inutile de trop s'en inquiéter. La largeur de bande de la fibre utilisée lors de la démonstration en laboratoire est d'environ de 400 MHz pour une distance de près de 6 km. On peut supposer que la longueur moyenne des liens optiques d'un système de télédistribution se situe autour de cinq kilomètres et qu'une largeur de bande de moins de 100 MHz serait alors suffisante pour supporter un signal NRZ de 100 Mb/s.

### 3.1.5 Multiplexage haute vitesse

Le multiplexage total des dix bits de 10 Mb/s chacun s'effectue par des registres MOTOROLA MC 10141 (figure 3.8). L'information sous forme parallèle est d'abord chargée par l'horloge de 10 MHz dont la phase doit être ajustée avec soin de façon à ce que ses transitions ne surviennent pas en même temps que celles de l'horloge de 100 MHz qui, elle, transmet en série les bits chargés par l'horloge de

CONVERSIONS: TTL → ECL, PARALLÈLE → SÉRIE

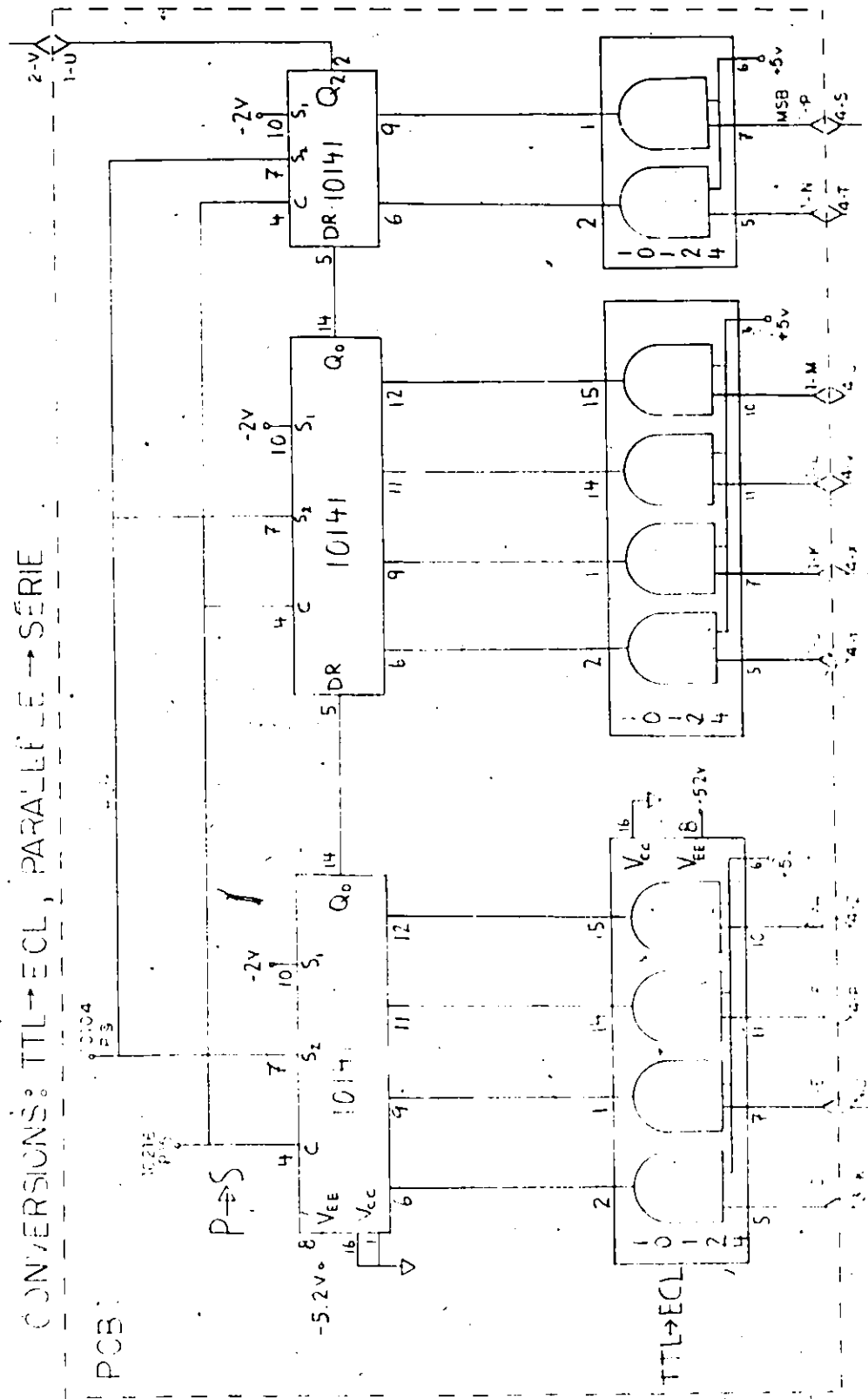


Figure 3.8 Conversions TTL-ECL et parallèle-série des dix bits formant l'information série à transmettre.

10 MHz. En pratique, il est assez simple d'utiliser une certaine longueur de câble coaxial flexible d'impédance de 50  $\Omega$  pour ajuster avec soin la phase relative des horloges à 100 MHz. Cependant, il n'est pas toujours facile de prévoir théoriquement le délai d'un signal avec précision car la période de l'horloge de 100 MHz n'est que de 10 ns, ce qui est relativement court. Ainsi, quelques centimètres de câble permettent de faire l'ajustement fin d'un délai quelconque. Une fois l'information parallèle chargée, elle est poussée vers l'extérieur par l'horloge à 100 MHz et donne un signal sous forme NRZ à 100 Mb/s.

### 3.1.6 Mélangeur de bits

Le mélangeur de bits ("scrambler") est utilisé pour rendre le flot d'information série le plus aléatoire possible afin de permettre au récepteur de recouvrer l'horloge à partir seulement de l'information transmise. Habituellement, un signal vidéo quelconque est "relativement structuré" et contient beaucoup de redondance, ce qui peut générer de longues séries de 1 ou de 0, situation indésirable. En effet, le circuit de recouvrement d'horloge a besoin du plus grand nombre de transitions possible car ce sont elles qui permettent de régénérer l'horloge à 100 MHz. La situation serait sans doute plus simple si l'information était sous forme RZ (Return to Zero) ou Manchester, ce qui aurait pour effet de générer plus de transitions mais aussi de doubler le taux de transmission pour la même quantité d'information.

Le mélangeur que nous avons sélectionné est dérivé d'une séquence binaire à longueur maximum de degré cinq et d'exposant 31, et caractérisé par l'équation algébrique irréductible suivante:  $f(X) = X^5 + X^2 + 1$ . La période du mélangeur est de  $2^5 - 1 = 31$ . Ceci devrait assurer un mélange suffisant pour que l'information apparaisse aléatoire. Le circuit utilisé est décrit à la figure 3.9 et est composé de bascules MOTOROLA MC 10176 et de portes OU exclusif. En théorie, cinq bascules devraient être utilisées mais, en pratique, le délai de rétroaction à la première bascule était trop long. Il a donc fallu générer un délai court de 3.4 ns à l'aide d'une porte logique (délai typique de 2 ns) et d'un câble coaxial d'environ 30 cm pour remplacer la première bascule. La relation entre l'horloge à 100 MHz, le signal d'entrée et la ligne de rétroaction est particulièrement critique et difficile à prévoir en pratique. C'est pourquoi il est en général nécessaire d'ajuster la phase des différents signaux à l'aide de câbles coaxiaux flexibles de 50  $\Omega$ .

### 3.1.7 Transmetteur optique à diode laser

Le transmetteur optique est fabriqué par la compagnie EXXON ENTREPRISES INC. et on retrouve son bloc diagramme à la figure 3.10. C'est un circuit compatible avec la famille logique ECL et d'une vitesse de transmission maximale de 275 Mb/s en NRZ. L'élément générateur de lumière est une diode laser AlGaAs Di-PAC et elle émet un signal lumineux de longueur d'onde de 0.82  $\mu\text{m}$  typiquement. La puissance maximale émise est supérieure à 1 mW pointe à pointe. La largeur spectrale est de 2 nm.

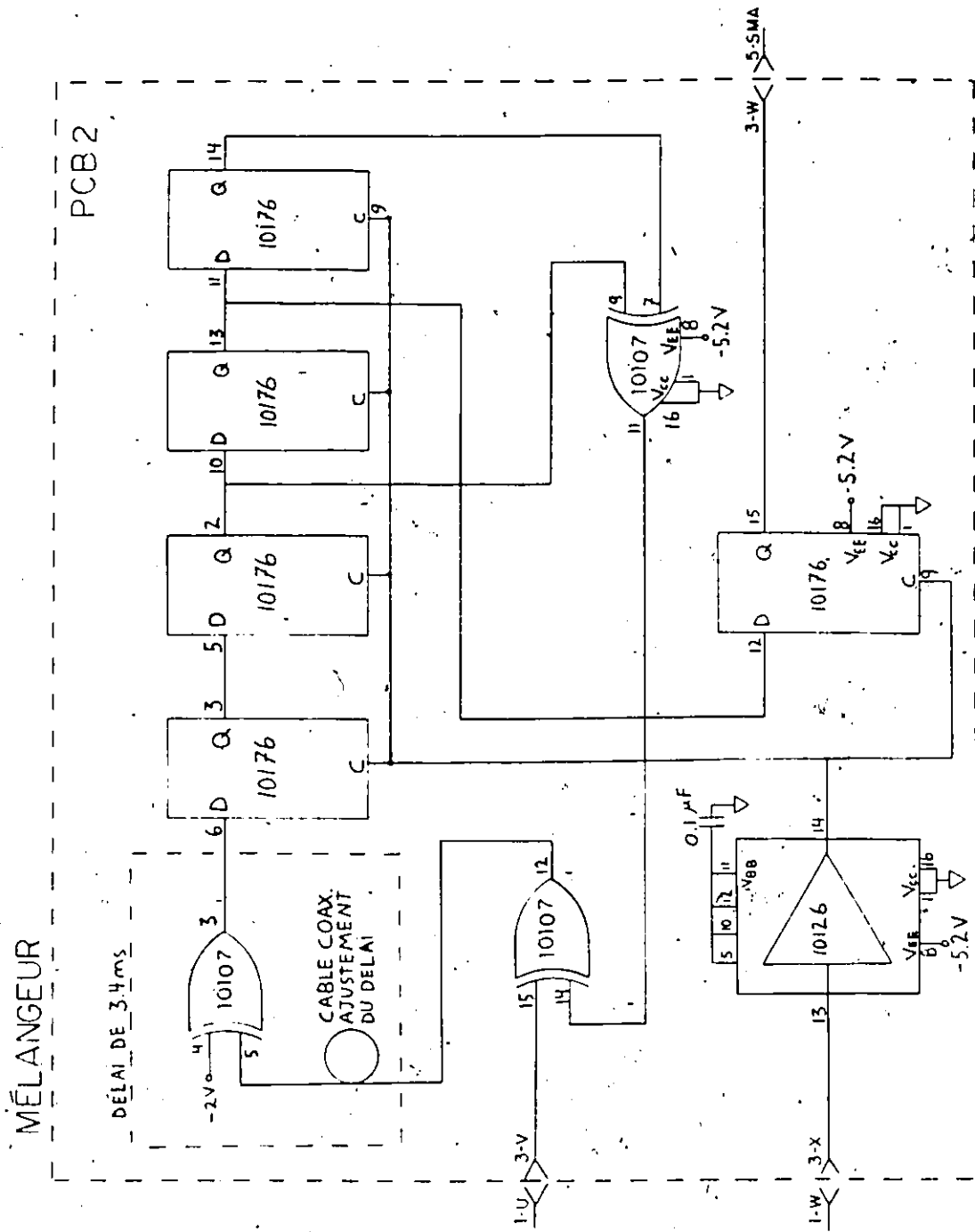


Figure 3.9 Mélangeur de bits dérivé d'une M-Sequence dont la période maximale est de 31 bits.

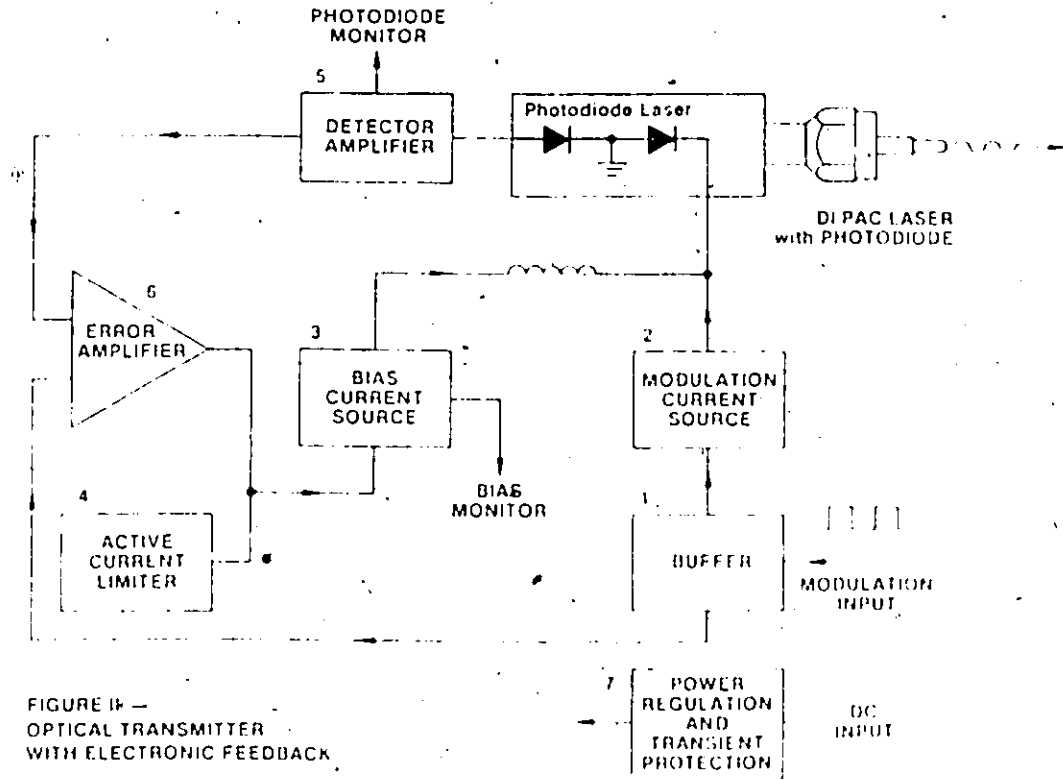


FIGURE 11 -  
OPTICAL TRANSMITTER  
WITH ELECTRONIC FEEDBACK

Figure 3.10 Bloc diagramme du transmetteur optique à diode laser  
de EXXON ENTREPRISES INC.

Le signal de sortie de la diode laser est stabilisé par une boucle de rétroaction qui compare le signal de modulation à l'émission de la diode laser. Il est possible de connaître le signal lumineux à la sortie grâce à un photodétecteur qui est monté à l'arrière de la diode laser, et qui détecte une partie de la puissance lumineuse émise par cette même diode à travers sa facette arrière qui n'est pas totalement réfléchissante. Le signal d'erreur résultant de la différence entre la sortie du photodétecteur et du signal de modulation est amplifié et sert à contrôler le courant de polarisation qui excite la diode laser. Ce contrôle par rétroaction du signal lumineux nous permet de s'assurer que le niveau logique correspondant au "0" se situe juste au-dessus du coude de la caractéristique "puissance optique vs courant de polarisation" pour que le signal de modulation demeure continuellement dans la région d'émission "stimulée" de la diode laser. Une deuxième source de courant est également utilisée, en plus de celle servant à la polarisation, afin de convertir le signal de modulation de niveau logique ECL en un courant électrique compatible avec la diode laser. Finalement, les circuits de transmission optique comprennent des régulateurs de voltage pour l'alimentation et une protection contre les impulsions transitoires.

### 3.1.8 Lien de fibre optique

La fibre optique utilisée pour la démonstration du système est fabriquée par la compagnie CORNING OPTICAL WAVEGUIDES. C'est une fibre à gradient d'indice dont le coeur a un diamètre de 50  $\mu\text{m}$  et dont le diamètre extérieur de l'enveloppe est de 125  $\mu\text{m}$ . L'ouverture numérique (NA) de la fibre est de 0.20 et peut donc accepter la lumière sous un

angle d'incidence de  $11^\circ$ . L'atténuation de la fibre spécifiée à 850 nm est d'environ 2.5 dB/km, alors qu'elle est de 1.3 dB/km à 1300 nm. La largeur de bande pour un kilomètre se situe à environ 1 GHz et décroît avec la distance d'une façon non-linéaire. La longueur de fibre utilisée est d'environ 6 km et, en tenant compte des pertes aux connecteurs et aux épissures, l'atténuation totale du lien se situe autour de 20 dB. Le récepteur pouvant tolérer un niveau de signal de -41 dBm minimum pour un taux d'erreur de  $10^{-9}$ , il serait donc possible d'allonger le lien sans problème jusqu'au point où la largeur de bande deviendrait critique, c'est-à-dire aux environs de 100 MHz, ce qui correspondrait à une longueur d'environ 15 km.

## 3.2 Récepteur

### 3.2.1 Bloc diagramme du récepteur

Le bloc diagramme des circuits du récepteur est présenté à la figure 3.11. Un récepteur optique à photodiode APD fabriqué par la compagnie EXXON reçoit le signal lumineux provenant de la fibre optique et le convertit en impulsions électriques qui sont alors utilisées pour le recouvrement de l'horloge à 100 MHz. Le recouvrement d'horloge est effectué à l'aide de circuits non-linéaires suivis d'un filtre passe-bande et d'un asservissement en phase (P.L.L.) fonctionnant à 100 MHz. Une fois l'horloge à 100 MHz recouvrée, elle est appliquée au démélangeur qui nous redonne l'information transmise originalement au transmetteur. Suivant le démélangeur se trouve le circuit de conversion série-parallèle et les bascules (latch) contrôlées l'une par l'horloge à 100 MHz, l'autre par l'horloge à 10 MHz dérivée de celle à 100 MHz.

Une autre conversion série-parallèle est effectuée sur le neuvième bit multiplexé qui comprend les trois canaux à basse vitesse et le mot de synchronisation. Cette dernière conversion est contrôlée par une autre sous-horloge à 1 MHz qui, à son tour, générera l'horloge à phases utilisée pour charger les bascules des différents convertisseurs numériques-analogiques. La phase des différents circuits d'horloge est contrôlée par les circuits de synchronisation qui utilisent uniquement le mot de synchronisation pour contrôler toutes les horloges.

# RÉCEPTEUR

FIBRE OPTIQUE

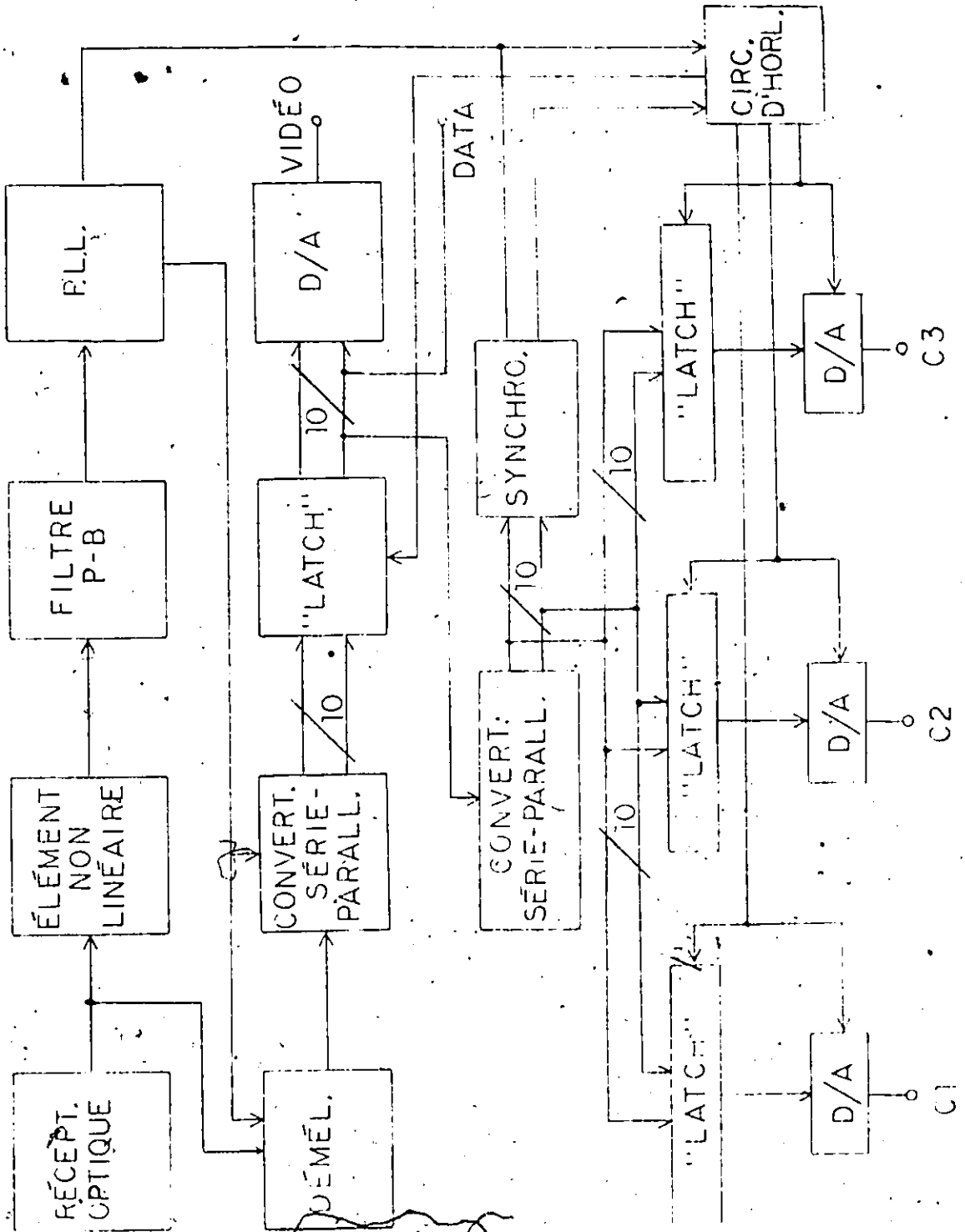


Figure 3.11 Bloc diagramme des fonctions du récepteur.

### 3.2.2 Circuits de recouvrement d'horloge

Le coeur des circuits de recouvrement d'horloge est une boucle d'asservissement en phase (P.L.L.) qui fonctionne à 100 MHz sans diviseur de fréquence comme le montre la figure 3.12. Par contre, avant de considérer l'asservissement en phase comme tel, il est nécessaire de traiter le signal NRZ reçu de façon à générer une composante à la fréquence de 100 MHz comme signal de référence à l'entrée du détecteur de phase. En effet, nous savons très bien que le signal NRZ, où les deux états logiques "0" et "1" sont équiprobables, possède un spectre en fréquence continu de la forme  $(\text{sinc})^2$  où toute composante harmonique est inexistante. C'est pourquoi il est nécessaire de faire passer le signal NRZ dans un élément non-linéaire pour générer une raie à 100 MHz qui pourra par la suite être filtrée par un premier filtre passe-bande et ensuite par l'asservissement en phase.

L'élément non-linéaire se compose simplement d'une porte logique qui compare le signal avec une version retardée de lui-même d'une demi période (5 ns). La porte OU exclusif est de MOTOROLA, MC 10107 et le retard est composé du délai d'un amplificateur MC 10216 et d'un bout de câble coaxial flexible de 50" pour l'ajustement fin du délai. L'élément non-linéaire ne fournit pas seulement une composante à 100 MHz mais aussi d'autres harmoniques indésirables qu'il faut filtrer avant d'entrer dans l'asservissement en phase comme tel, car le détecteur de phase MOTOROLA MC 12040 est de type numérique et requiert une onde carrée à son entrée. Ainsi, nous avons d'abord réalisé un filtre passe-bande de largeur de bande de 5 MHz à l'aide de

# RECOURVEMENT D'HORLOGE PAR PLL PCB 6

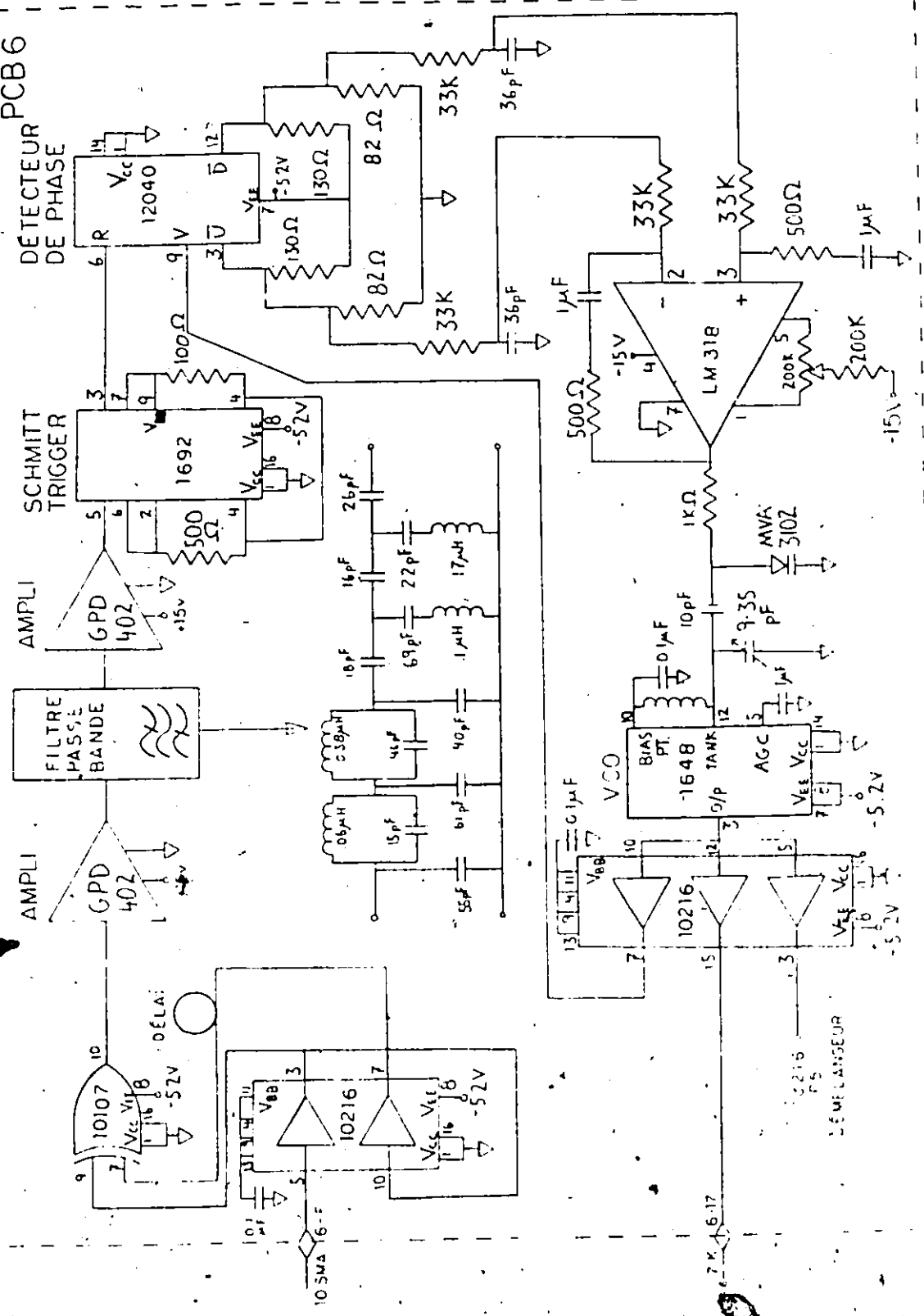



Figure 3.12 Recouvrement d'horloge par asservissement en phase au récepteur.

composantes LC uniquement. Ce filtre a pour fonction de se débarrasser des harmoniques autres que celle à 100 MHz qui sont le résultat de l'opération non-linéaire. La réalisation d'un tel filtre à 100 MHz n'est pas triviale. Il faut noter que les inductances commerciales ont des comportements souvent indésirables à haute fréquence et que l'assemblage physique des composantes est aussi particulièrement critique. Il aura donc été nécessaire de construire les inductances avec du fil de cuivre rigide No. 18 bobiné sur un noyau d'air et de les mesurer individuellement à la fréquence d'opération. Un grand soin a été apporté au montage physique des composantes afin de minimiser la longueur des fils.

Ce filtre passe-bande est composé de deux filtres mis en cascade, l'un passe-bas, le second passe-haut. Ils sont tous les deux de type elliptique, d'impédance d'entrée et de sortie de 50  $\Omega$ . Les pertes d'insertion sont d'environ 3 dB. L'oscillation dans la bande passante est de 1dB et l'atténuation est de 35dB à 1.145 fois la fréquence de coupure. Deux amplificateurs hautes fréquences AVANTEK GPD 402 de gain de 8 dB chacun côtoient le filtre et assurent un niveau de tension élevé à l'entrée de l'amplificateur MOTOROLA MC 1692 monté en Schmitt Trigger. L'amplificateur de type Schmitt Trigger est très important à l'entrée du détecteur de phase pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il faut mentionner le fait que le détecteur de phase utilisé, le MC 12040, est spécifié pour fonctionner à une vitesse maximale typique de 80 MHz alors qu'il est utilisé ici à 100 MHz. Il faut donc s'assurer de présenter un signal se rapprochant le plus d'une onde carrée à l'entrée du détecteur de phase afin qu'il puisse opérer à 100 MHz. Deuxièmement,



le signal filtré puis amplifié n'est pas compatible avec les niveaux logiques ECL; il faut donc traiter ce signal afin de le rendre compatible avec les niveaux d'entrée du détecteur de phase.

Un autre commentaire de nature pratique ayant une importance appréciable est le problème d'interférence qui s'établit entre les deux signaux à 100 MHz au détecteur de phase. Il est important de minimiser l'interférence en éloignant physiquement le plus possible les deux lignes afin de permettre l'asservissement en phase qui s'avère à peu près impossible à réaliser lorsque les deux signaux à comparer interfèrent entre eux au moment où le système est mis en marche et que leur fréquence diffère.

La boucle d'asservissement en phase est à peu près identique à celle du transmetteur, sauf en ce qui concerne l'amplificateur opérationnel utilisé (le LM 318 au lieu du MC 741) et de la fréquence d'opération (100 MHz au lieu de 10 MHz). Il n'est alors pas nécessaire d'utiliser de diviseurs dans la boucle d'asservissement mais il faudra utiliser des paramètres différents pour accommoder la fréquence élevée du signal, étant donné que le détecteur de phase n'est spécifié que pour une fréquence d'opération de 80 MHz.

Ainsi, en utilisant les paramètres suivants:

- $K_{\phi}$  = Gain du détecteur de phase (0.16 V/rad)
- $K_F$  = Gain de l'amplificateur-filtre
- $K_V$  = Gain du VCO ( $10^7$  rad/s/V)
- $N$  = Diviseur (1)

on obtient les résultats suivants:

$$\omega_n = 4.5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$$

$$T_2 = 79 \times 10^{-3} \text{ s.}$$

$$T_1 = 356 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\xi = 0.8$$

$$T_p = 0.053 \text{ s}$$

L'utilisation de l'amplificateur opérationnel filtre passe-bas n'est certes pas aussi triviale que celle au transmetteur qui n'opère qu'à une fréquence de 10 MHz. Premièrement, il est nécessaire d'utiliser un amplificateur avec un facteur gain-largeur de bande plus élevé à cause de la vitesse d'opération supérieure. Deuxièmement, il s'avère nécessaire de polariser l'amplificateur entre -15 V et 0 V au lieu de -5 V et 5 V comme au transmetteur. En effet, il s'est avéré nécessaire de maintenir un côté de la diode à capacité variable et de l'amplificateur opérationnel à la masse pour assurer une stabilité suffisante. Il est par ailleurs aussi très important de compenser avec soin l'amplificateur car un très léger déséquilibre du gain différentiel ne cause pas seulement une différence de phase à la sortie du VCO mais empêche aussi totalement la réalisation de l'asservissement en phase.

Ainsi, parce qu'il n'y a pas de circuit diviseur de fréquence suivant le VCO, trois amplificateurs montés dans le même boîtier distribuent l'horloge à 100 MHz et l'acheminent au détecteur de phase pour comparaison avec l'horloge extraite de l'information NRZ au

démélangeur de bits, aux circuits de conversions série-parallèle à haute vitesse et aux circuits diviseurs d'horloges. Le VCO est utilisé de la même façon qu'au transmetteur avec un circuit d'excitation extérieur LC qui peut être ajusté à l'aide d'un condensateur variable.

### 3.2.3. Démélangeur

Le démélangeur représenté à la figure 3.13 effectue l'opération inverse du mélangeur au transmetteur. Il est composé d'éléments identiques, soit cinq bascules contrôlées par l'horloge à 100 MHz et deux portes logiques OU exclusif. Les entrées du circuit comme tel sont l'information mélangée sous forme NRZ provenant du récepteur optique et de l'horloge à 100 MHz. La relation en phase entre ces deux signaux est très importante. A cause des deux délais dans la boucle de rétroaction causés par les portes logiques OU exclusif, la phase entre le signal mélangé et l'horloge à l'entrée doit être ajustée, à l'aide d'un câble coaxial flexible de 50  $\Omega$ , à 2 ns près. Cet ajustement de phase est très important pour respecter les spécifications imposées par les bascules MC 10176 en ce qui a trait aux relations entrée-horloge.

À la sortie du démélangeur, on retrouve donc l'information toujours sous forme NRZ-série, mais elle est maintenant prête à être convertie sous la forme parallèle en lui appliquant une horloge à 10 MHz possédant la phase appropriée.

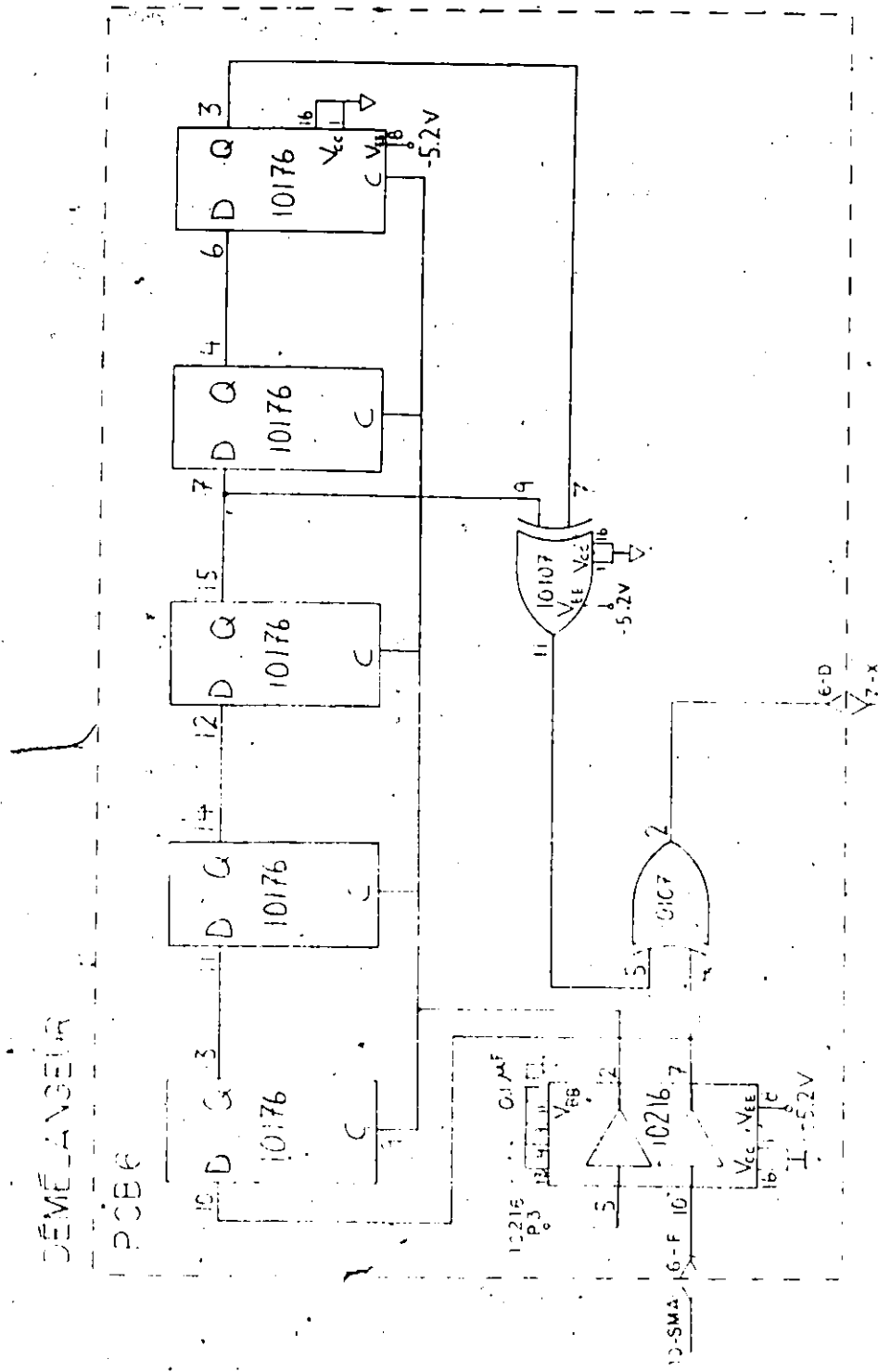


Figure 3.13 Démélangeur de bits au récepteur.

### 3.2.4. Conversions série-parallèle et D/A du signal vidéo

Les circuits de conversions série-parallèle et numérique-analogique sont représentés à la figure 3.14. L'information série provenant du démélangeur est d'abord passée dans trois registres MC 10141 qui, contrôlés par l'horloge à 100 MHz, poussent l'information série sous forme parallèle de 10 bits côte à côte. Il est capital en ce point de s'assurer que les phases relatives de l'information série et de l'horloge à 100 MHz sont convenables. A nouveau, un bout de câble coaxial de 50  $\mu$  sera nécessaire à l'ajustement précis des phases relatives. Les dix lignes parallèles sortant des registres entrent dans les bascules qui ont pour rôle d'attraper l'information parallèle et de la geler temporairement selon la phase appropriée de façon à ce que les mots de 10 bits ainsi formés aient le contenu désiré. Les bascules qui effectuent cette opération sont contrôlées par l'horloge à 10 MHz qui a obtenu la phase appropriée des circuits de synchronisation. Ainsi, la sortie des bascules, qui maintient les mots pour une période de 100 ns, peut être utilisée directement par le convertisseur vidéo numérique-analogique de huit bits MP8318 compatible ECL de la compagnie ANALOGIC. Une ligne de contrôle (strobe) à 10 MHz avertit le convertisseur lorsque l'information à son entrée est valide et qu'une conversion peut être entreprise. Cette ligne à 10 MHz est dérivée de l'horloge à 10 MHz où un retard a simplement été ajouté pour tenir compte des délais de propagation. La sortie du convertisseur, une fois filtrée à l'aide d'un filtre passe-bas de 4.5 MHz, nous procure le canal vidéo en bande de base qui peut alimenter directement un moniteur ou être modulé à n'importe quelle fréquence.

# CONVERSIONS SÉRIE-PARALLÈLE, D/A

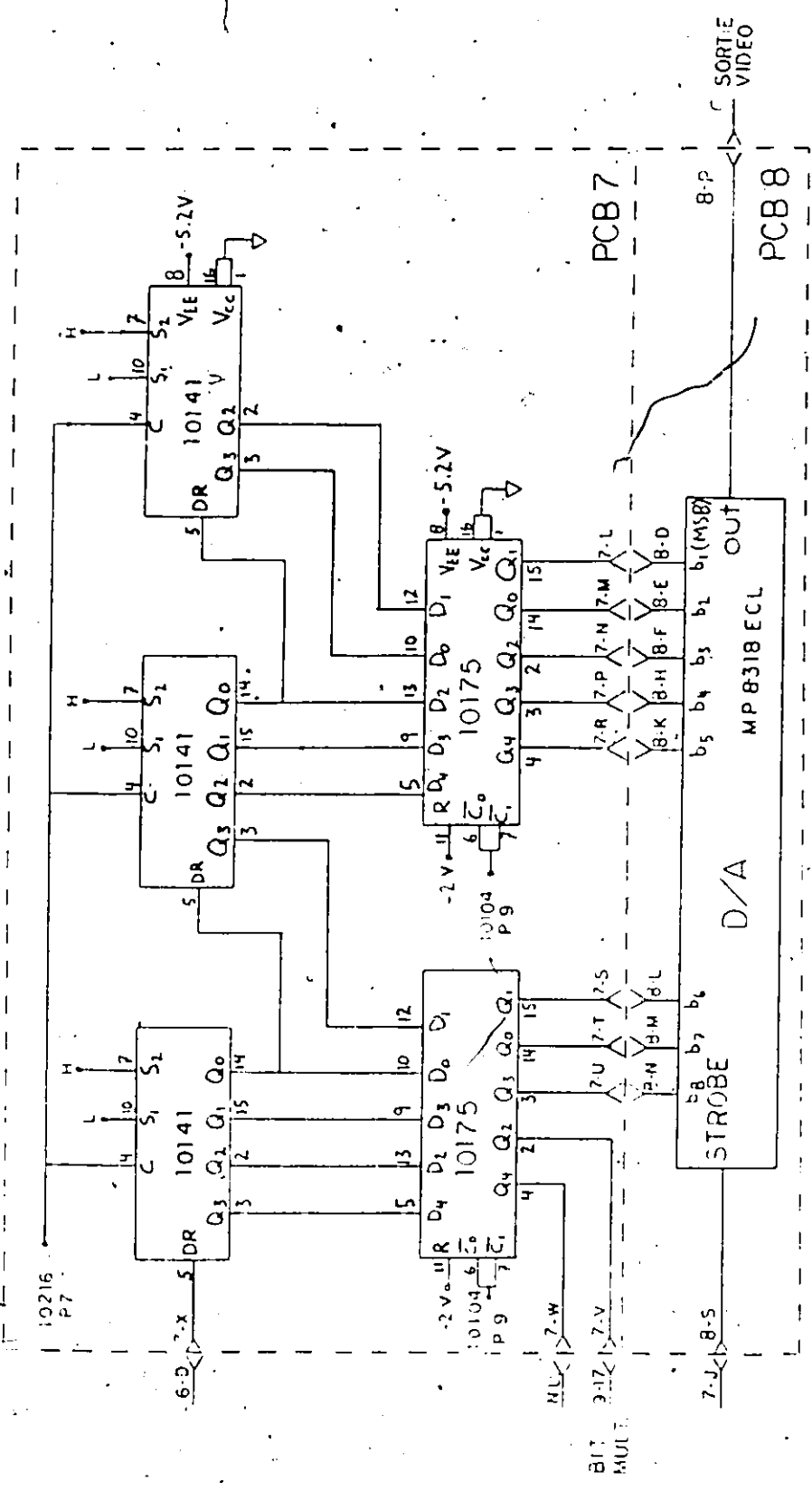


Figure 3.14 Conversion série-parallèle et numérique-analogique de la composante vidéo.

### 3.2.5 Conversions série-parallèle et numérique-analogique des services à basse fréquence

On retrouve aux figures 3.15 et 3.16 les circuits de conversion série-parallèle et numérique-analogique des trois canaux à basse fréquence et du canal de synchronisation. Comme expliqué précédemment, l'information à 100 MHz a été convertie de série à parallèle, nous donnant dix lignes de données parallèles dont une, multiplexée, contient toute l'information à basse fréquence. Cette ligne multiplexée sera maintenant démultiplexée en la passant tout d'abord dans des registres qui donneront dix nouvelles lignes parallèles à 1 Mb/s chacune.

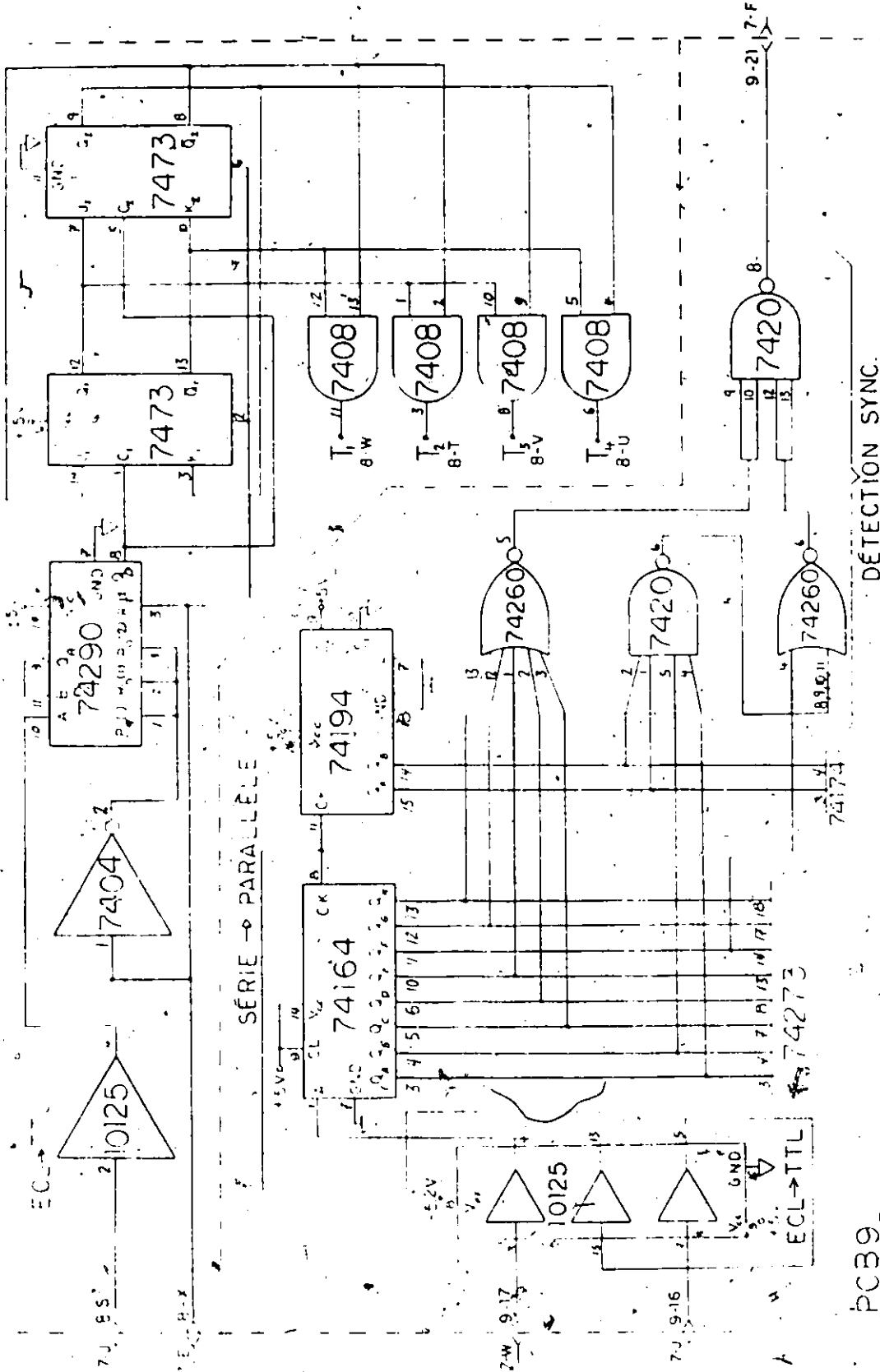
Cette opération est effectuée par les circuits intégrés 74LS164 et 74LS194 de la famille logique TTL après une conversion ECL-TTL effectuée par un convertisseur MC10125. Les registres utilisent l'horloge à 10 MHz convertie de ECL à TTL par un MC 10125 afin de réaliser la conversion série-parallèle. Les dix lignes parallèles ainsi générées contiennent les trois canaux d'information plus le mot de synchronisation qui transmettent tour à tour un mot d'information de dix bits. Il est donc nécessaire, pour reformer les trois canaux de données, de distribuer les dix lignes aux trois séries de circuits dédiés aux trois services. Ainsi, trois séries de bascules, chacune composée des circuits intégrés 74LS273 et 74LS174, sont branchées en parallèle à la sortie des registres et sélectionnées à tour de rôle par une phase spécifique de l'horloge à quatre phases. Ainsi, lorsque l'information d'un canal spécifique est valide, une des quatre phases qui correspond à ce canal ira signifier à la bascule de garder le mot

GÉNÉRATION D'HORLOGES, CONVERSION S → P, DÉTECTION SYNC.

PCB 8

COMPTEUR

COMPTEUR 4 PHASES



PCB 9

Figure 3.15 Circuits de génération d'horloges à basse fréquence, de conversion série-parallèle des quatre canaux à faible débit et détection du mot de synchronisation.

CONVERSION D→A DES 3 CANAUX BASSES VITESSES

PCB 9

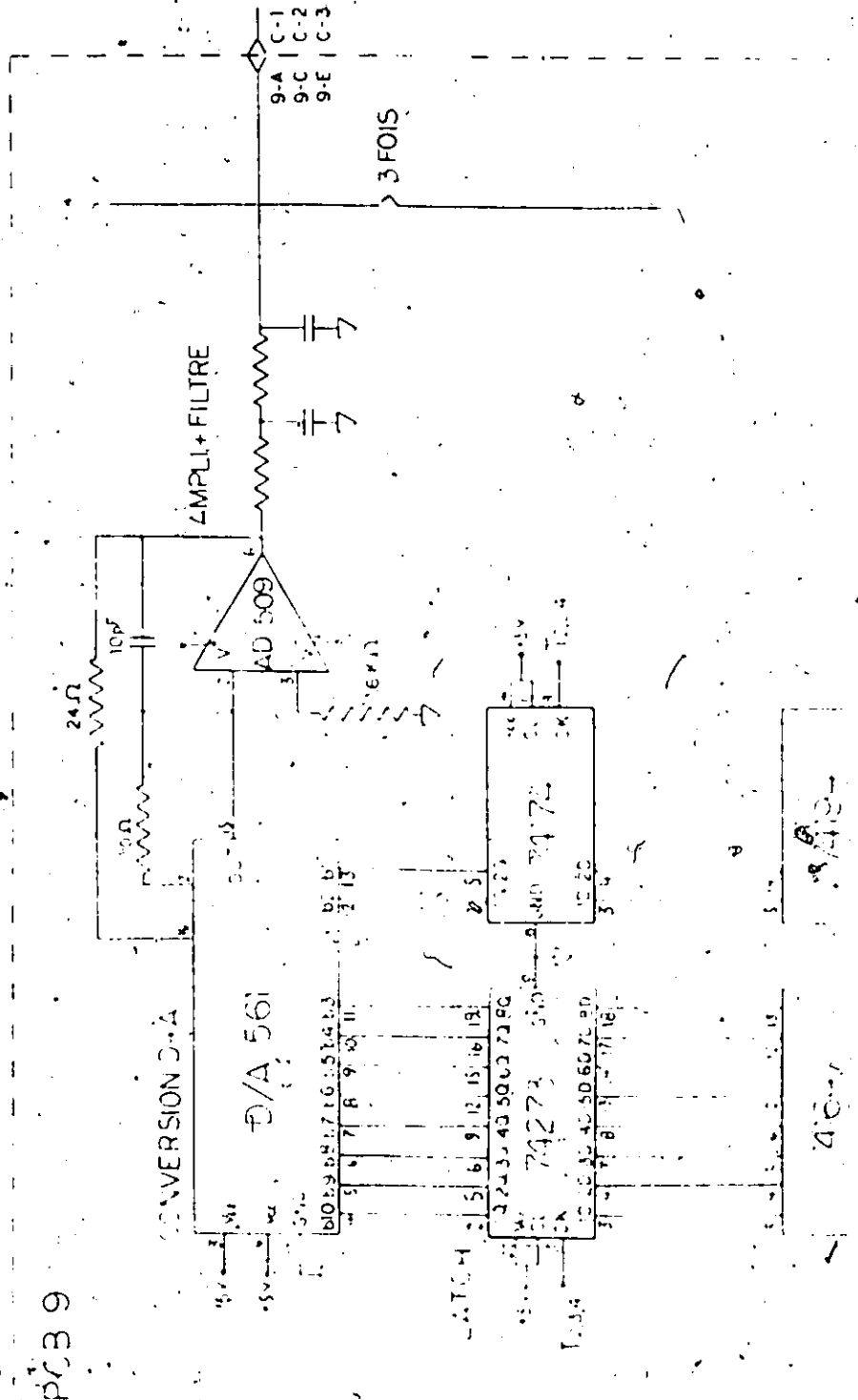


Figure 1.14 Conversion numérique-analogique des trois canaux à basse fréquence

en question et de le transmettre au convertisseur numérique-analogique AD561 de ANALOG DEVICES qui, lui, effectuera la conversion immédiatement.

Le convertisseur a une vitesse d'utilisation maximale de 4 mégaconversions par seconde et peut être utilisé sur diverses plages dynamiques, au besoin. Dans notre cas, il fonctionne entre  $\pm 5V$  et est suivi par un amplificateur "buffer" AD 509 de la compagnie ANALOG DEVICES et d'un filtre passe-bas d'une largeur de bande reliée à celle du signal afin de retrouver un signal analogique exempt de toutes hautes fréquences indésirables à la sortie.

Pour ce qui est du mot de synchronisation, il faut agir différemment. C'est lui qui, en effet, nous permet de resynchroniser toutes les horloges au récepteur et il ne doit donc pas être dépendant de l'horloge à quatre phases. C'est ainsi que nous avons simplement branché sur les dix lignes parallèles à la sortie des registres des portes logiques ET 74LS260 et OU 74LS20 afin de détecter directement, sans horloge, le mot de synchronisation. Ces portes logiques détectent donc la présence de toute série de dix bits de la forme 1100000011 sans aucune discrimination. Il faut réaliser à ce moment que ce circuit de détection passif n'est jamais désactivé et que toute série de dix bits correspondant à un mot légal d'un des trois canaux de données ou de la combinaison d'une partie de deux mots peut produire une séquence identique au mot de synchronisation.

Il est évident que dans la situation où le système est parfaitement synchronisé, il est indésirable d'obtenir de faux signaux de synchronisation par le fait du hasard. Par contre, il est nécessaire de supporter cette situation car le détecteur du mot clef doit rester activé dans le cas où le système tombe hors de synchronisation. Egalement, dans les circuits traitant les services à basse fréquence, on retrouve une horloge à quatre phases similaire à celle du transmetteur qui est utilisée par le multiplexage des quatre canaux. Au détecteur, un système similaire est utilisé sauf que les circuits compteurs 74LS290 et 74LS73 sont assujettis en phase à l'aide du signal de resynchronisation d'horloge basé sur le détecteur du mot de synchronisation. Ainsi, chaque présence valide du mot de synchronisation remet à zéro les compteurs et assure un accord de phase avec le transmetteur.

### 3.2.6 Circuits de synchronisation d'horloge

La base de ces circuits est la détection du mot de synchronisation basse fréquence à 250 KHz. Comme expliqué auparavant, le circuit de détection n'est assujetti à aucune contrainte et indique la présence de tout mot de dix bits de la forme 1100000011. Il est donc nécessaire de pouvoir faire la distinction entre un signal valide et un non-valide. La façon la plus simple de réaliser cette distinction est de comparer le signal de détection avec une version retardée de lui-même. La figure 3.17 nous montre les circuits intégrés 74LS221 et 74LS32, respectivement multivibrateur monostable et porte logique OU,

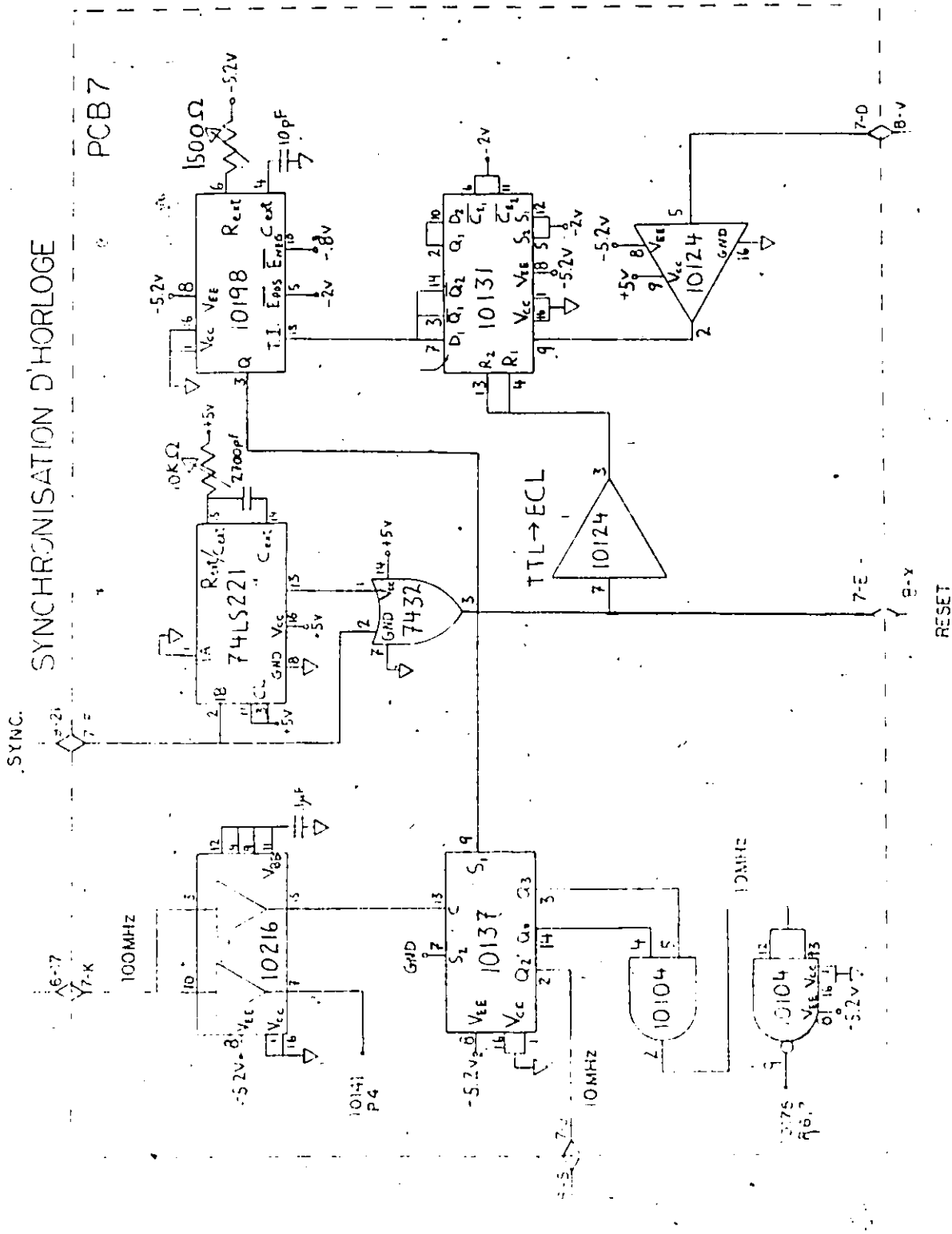


Figure 3.17 Synchronisation d'horloges au récepteur.

qui permettent de générer une impulsion qui sera utilisée pour remettre à zéro les compteurs des circuits basse vitesse qui, eux, génèrent l'horloge à quatre phases. Egalement, cette impulsion, une fois convertie TTL-ECL à l'aide du convertisseur MC10124, est comptée par le circuit intégré MC10131 afin de contrôler la phase de l'horloge à 10 MHz.

Avant de poursuivre plus loin la description de la synchronisation d'horloge, il est important de remarquer que si le système est désynchronisé, la position de la ligne multiplexée à 10Mb/s est perdue et les mots lus ne sont plus valides. Il en résulte donc une situation où le détecteur du mot de synchronisation sera appliqué à un autre bit démultiplexé ne contenant pas l'information recherchée.

Il est donc nécessaire de prévoir une fonction logique qui fera en sorte que si aucun mot de synchronisation n'est présent, une recherche en phase soit effectuée. Cette recherche s'effectue en modifiant la phase du compteur à 10 MHz qui sélectionne les dix bits parallèles à 10 Mb/s. Cette opération de recherche est effectuée aussi longtemps que le circuit de détection du mot de synchronisation ne détecte la présence de quatre mots consécutifs valides. Si l'on revient à la description des circuits comme tels, cette fonction de recherche en phase de l'horloge à 10 MHz est contrôlée par le compteur MC10131, suivi du multivibrateur monostable MC10198 qui envoie un signal de correction au compteur diviseur par dix MC10137 qui, lui, produit l'horloge à 10 MHz en divisant l'horloge à 100 MHz.

Le compteur MC10131 compte continuellement une phase (T<sub>3</sub>) de l'horloge à quatre phases et lorsqu'il en compte quatre consécutives, il émet une impulsion au multivibrateur monostable qui, à son tour, génère une impulsion très brève de 10 ns de largeur. Cette brève impulsion appliquée au compteur MC10137 a pour effet de stopper le compteur le temps d'une période. La période de l'horloge à 100 MHz étant de 10 ns, il a fallu recourir au circuit MC10198 qui est, à notre connaissance, le seul circuit multivibrateur pouvant générer de si brèves impulsions. Ainsi, le compteur haute fréquence MC10137 subit un changement de phase de 36° à la fois, ce qui correspond au décalage temporel d'un bit à 100 MHz. De cette façon, les circuits de synchronisation chercheront chaque bit individuellement à tour de rôle jusqu'au moment où la phase sera récupérée. A ce moment, le détecteur de synchronisation détectera le mot clef régulièrement et, une fois le mot comparé avec lui-même, le compteur MC10131 sera continuellement remis à zéro de façon à l'empêcher d'amorcer une nouvelle recherche en phase.

Le compteur MC10137 fait également partie de la synchronisation en phase et produit deux horloges à 10 MHz. La première horloge est utilisée par la conversion série-parallèle du signal à 100 Mb/s et sert également d'entrée aux circuits générateurs de l'horloge à quatre phases. La seconde horloge à 10 MHz, de phase différente de la première, a pour fonction de déclencher la conversion numérique-analogique du signal vidéo (entrée "STROBE").

Ainsi, lorsque pour une raison ou une autre la synchronisation est perdue, en supposant que l'asservissement en phase à 100 MHz fonctionne correctement, il est garanti que le système de synchronisation rétablira la phase en moins de 0.2 ms, ce qui correspond à approximativement trois lignes horizontales d'un signal vidéo.

### 3.2.7 Récepteur optique

Le bloc diagramme du récepteur optique est présenté à la figure 3.18. La plaquette imprimée est fabriquée par la compagnie EXXON ENTERPRISES INC., modèle ORX5110. Le récepteur garantit une probabilité d'erreur de  $10^{-9}$  pour une sensibilité de -35 dBm à un taux de transmission de 150 Mb/s d'un signal de forme NRZ. Le détecteur optique nous offre donc d'excellentes performances à un taux de transmission une fois et demi supérieur au taux utilisé par notre système. La sensibilité de -35 dBm nous assure aussi qu'il est possible de transmettre un signal sur une distance d'environ 15 km sans régénération en utilisant une fibre multimode à gradient d'indice à une longueur d'onde de 0.8  $\mu$ m.

Le détecteur optique utilisé est un photodétecteur à avalanche alimenté par une tension continue de 300 V. Suivant le photodétecteur, on retrouve un amplificateur à transimpédance qui se distingue par une excellente figure de bruit. Cet amplificateur a la tâche de convertir en tension électrique le courant électrique généré par le

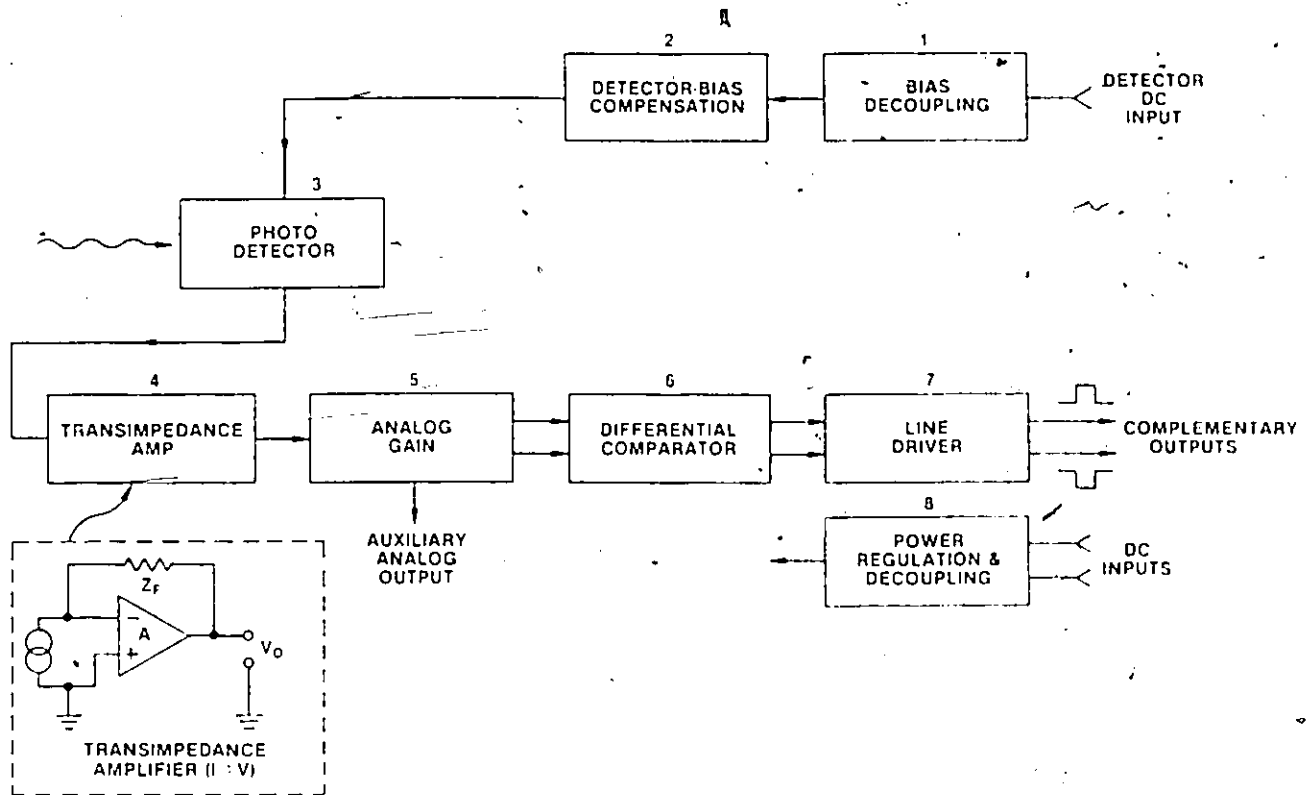


Figure 3.18 Bloc diagramme du récepteur optique à photodiode à avalanche de EXXON ENTREPRISES INC.

photodétecteur. Suivant l'amplificateur à transimpédance se trouve un amplificateur analogique à gain variable qui amplifie le signal de façon à le rendre compatible avec le détecteur différentiel qui interprète les niveaux à son entrée comme "0" ou "1" logiques. L'amplificateur différentiel compare en fait la tension d'entrée avec un niveau de référence à mi-chemin entre les deux niveaux logiques. Une fois la décision prise sur la valeur numérique d'un échantillon, le signal est amplifié par un amplificateur numérique compatible avec la famille logique ECL.

On retrouve également des circuits régulateurs de voltage pour les alimentations et un circuit de compensation pour l'alimentation à 300 V du photodétecteur. Le circuit de compensation est nécessaire du fait de la sensibilité en température du photodétecteur.

### 3.3 Mesures des performances

Il existe une très grande quantité de types de mesures qu'il est possible de prendre sur un système comme celui que nous avons réalisé. Premièrement, il y a un très grand nombre de mesures des performances d'un signal vidéo qui sont standardisées et reconnues internationalement, surtout en relation avec l'industrie de la câblodistribution. La plupart de ces mesures sont très spécialisées et s'adressent directement à la transmission analogique de signaux vidéos. D'un autre côté, il existe également une batterie de tests qui peuvent être appliqués à la transmission de signaux numériques. Il y a la mesure de la sensibilité du système qui est définie à partir du taux de probabilité d'erreur (BER) et sur laquelle un très grand nombre de facteurs peuvent interférer. On peut penser au type de codeur utilisé, à la largeur de bande, à l'égalisation de la phase, à la valeur du niveau de décision, etc..

Nous n'avons pas cru bon de réaliser une série de mesures exhaustive des performances du système. Notre préoccupation principale était de mesurer certains facteurs clefs qui démontrent le bon fonctionnement du système en situation typique plutôt que d'en mesurer les limites. Ainsi, nous n'avons pas mesuré les performances en fonction d'optimiser les paramètres du système. Au moment de la conception du système, nous avons pris des décisions en ce qui a trait aux paramètres principaux (taux d'échantillonnage, vitesse de transmission, type de mélangeur, type de fibre optique, etc.) de façon à ce que le système n'ait jamais à fonctionner à la limite de ses performances.

Ceci a représenté la règle de conception numéro un car une des qualités primordiales recherchées des abonnés est la fiabilité du système. Il faut donc prévoir des marges de manoeuvre suffisantes et c'est pourquoi la préoccupation première de ce travail a été la réalisation de façon simple et économique du système plutôt que l'optimisation de ses performances. Ceci a particulièrement influencé la décision d'utiliser de la fibre multimode à gradient d'indice au lieu de la fibre à saut d'indice qui, dans certains cas, pourrait être utilisée. En sélectionnant la fibre à gradient d'indice, nous permettons du même coup la transmission du signal d'information sur une distance d'à peu près 15 km sans régénération alors qu'il est établi que la distance moyenne pour un tel système se situe autour de 5 km, distance pour laquelle une fibre multimode à saut d'indice aurait pu être utilisée. Nous nous assurons donc une marge de manoeuvre intéressante, surtout du point de vue d'une expansion future.

### 3.3.1 Mesures de la sensibilité

Nous avons effectué une série de mesures de la sensibilité du système en fonction de la puissance reçue au récepteur (figure 3.19). Nous avons simulé un lien de longueur variable en utilisant un atténuateur variable en plus d'une certaine longueur fixe de fibre optique. Les résultats obtenus sont excellents et nous obtenons un taux d'erreur de  $10^{-9}$  pour une puissance reçue inférieure à -41 dBm. Une puissance de -41 dBm correspond à un lien d'environ 15 km pour une

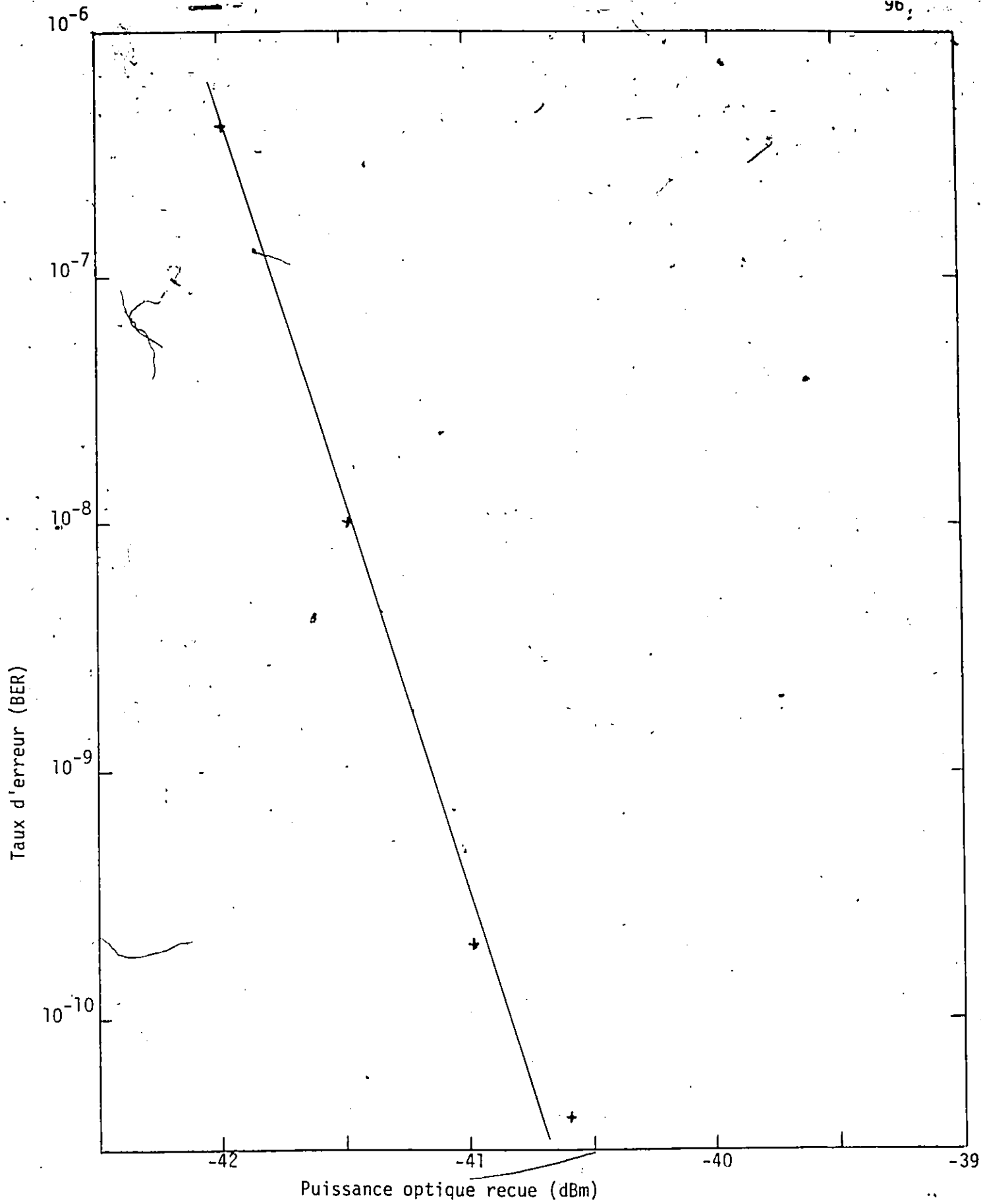


Figure 3.19 Sensibilité du récepteur(BER) en fonction de la puissance optique reçue.

atténuation de 2.5 dB/km en incluant les pertes d'épissures et de couplage. Les paramètres principaux du lien optique sont présentés au tableau 3.1.

### 3.3.2 Robustesse du circuit de recouvrement d'horloge

Une des qualités importantes d'un circuit de recouvrement d'horloge est sa robustesse par rapport aux situations extrêmes d'utilisations. Ces situations extrêmes se réalisent principalement lorsqu'une longue série de "0" logiques est transmise. C'est une situation indésirable, car, l'information étant transmise sous forme de NRZ, le contenu en fréquence de cette série de zéros est nulle. Il n'y a donc rien à extraire d'un tel signal et l'asservissement en phase ne reçoit plus de signal de référence pour asservir son oscillateur. La fréquence de la boucle d'asservissement dérive donc et lorsque de l'information non nulle parvient au récepteur, l'horloge interne n'est plus asservie et il se produit une période de temps où l'information n'est pas correctement décodée, période qui dure tant que l'asservissement en phase ne se réalise de nouveau.

A cause de l'incertitude qui existe quant au contenu de l'information transmise à tout moment, nous avons installé un mélangeur de bits au transmetteur qui permet de rendre le contenu du signal le plus aléatoire possible. Ainsi, le mélangeur peut accepter à son entrée une série de 31 zéros consécutifs et continuer de transmettre un signal pseudo-aléatoire. Il serait possible de faire mieux et d'utiliser un

circuit mélangeur possédant une période plus longue que 3l, mais, statistiquement et en pratique, il semble que 3l soit satisfaisant. Nous avons également mesuré le nombre de zéros nécessaire pour faire perdre la synchronisation du récepteur. La méthode utilisée pour réaliser cette expérience est de transmettre une série de zéros après chaque bloc de  $2^n-1$  bits pseudo-aléatoires transmis par un générateur pseudo-aléatoire.

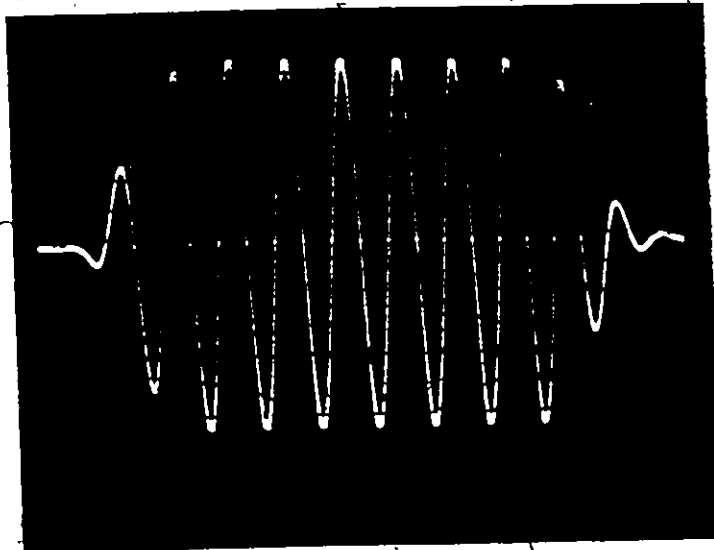
Il est donc possible dans ces conditions de mesurer la période de temps où le filtre passe bande à 100 MHz utilisé en avant du détecteur de phase oscillera de lui-même lorsqu'il n'est plus excité. Nous avons fait décrocher l'asservissement en phase en transmettant 70 zéros pour une séquence de 127 bits pseudo-aléatoires. Ce test se fait naturellement en excluant les circuits mélangeur et démélangeur de façon à vraiment transmettre la série de x zéros consécutifs. Les résultats sont excellents et prouvent la robustesse du circuit de recouvrement d'horloge. En pratique, il est très rare de voir les circuits de recouvrement d'horloge décrocher, et lorsque cela arrive, la synchronisation est récupérée en moins de 100  $\mu$ s. Ainsi, une perte de synchronisation se traduit par la perte d'information sur moins de deux balayages horizontaux du signal vidéo.

### 3.3.3 Mesures analogiques du signal vidéo

Comme mentionné auparavant, il existe un très grand nombre de mesures des qualités d'un signal vidéo. Ces types de mesures sont

standardisés et sont utilisés principalement pour caractériser les performances de transmissions de signaux vidéos analogiques. Nous n'avons pas cru important de réaliser une série exhaustive de ce type de mesure car dans notre cas, c'est-à-dire dans des situations normales d'utilisation, on peut supposer qu'il n'y a pas de dégradation de la qualité du signal vidéo causée par la transmission du signal. Ce qui devient alors intéressant à mesurer, c'est la dégradation de la qualité du signal causée par l'échantillonnage et la digitisation du signal analogique. Il est donc important de vérifier si le taux d'échantillonnage de 10 MHz et le codage de chaque échantillon sur huit bits sont suffisants pour rendre avec fiabilité, sans trop de pertes d'information, un signal vidéo de bonne qualité. Aux figures 3.20 à 3.25 sont comparées différentes formes d'onde typiques d'un signal vidéo parfait avec le résultat d'une transmission simulée de 15 km de fibre. Les photographies du haut représentent les formes d'onde idéales produites par un générateur de signaux vidéos (TEKTRONIK 149A) et celles du bas les formes d'onde résultant d'une transmission. Il est à remarquer que les principales dégradations sont causées par le taux d'échantillonnage trop lent. En particulier, on voit que le système a peine à suivre les fréquences les plus élevées (autour de 4.0 MHz et plus), ce qui cause une atténuation sur les fréquences qui se rapprochent de la moitié du taux d'échantillonnage. Cette légère perte de réponse en fréquences n'est par contre pas critique et des tests subjectifs d'appréciation de divers signaux vidéos, en comparant en parallèle les signaux d'entrée et de sortie, n'ont démontré que peu de dégradation aux yeux du téléspectateur moyen. Ce test subjectif représente, à notre avis, un compromis satisfaisant pour le choix de la fréquence d'échantillonnage du signal vidéo.

a)



b)

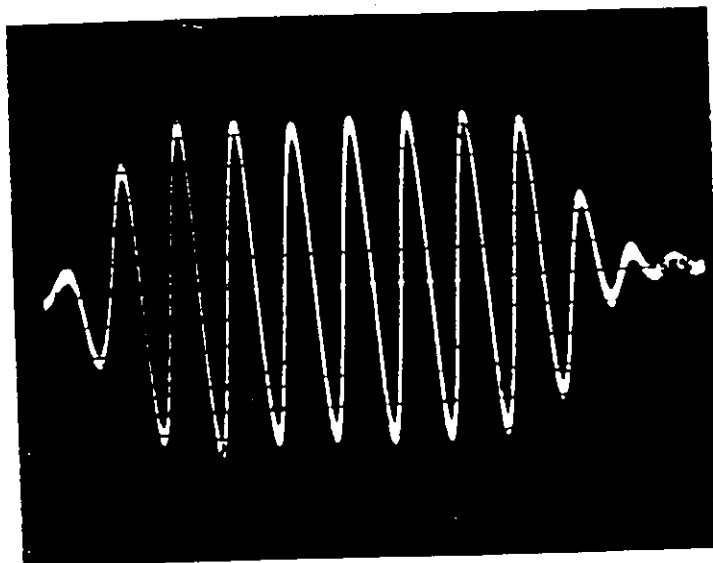
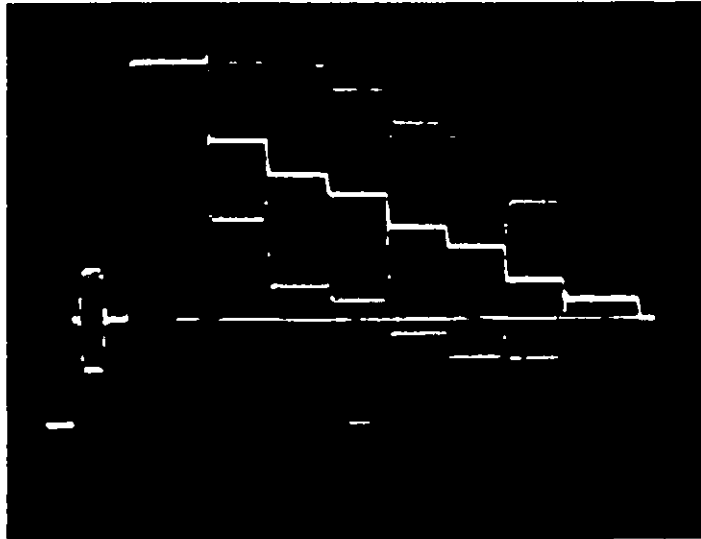


Figure 3.20 Signaux de synchronisation couleurs a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.

a)



b)

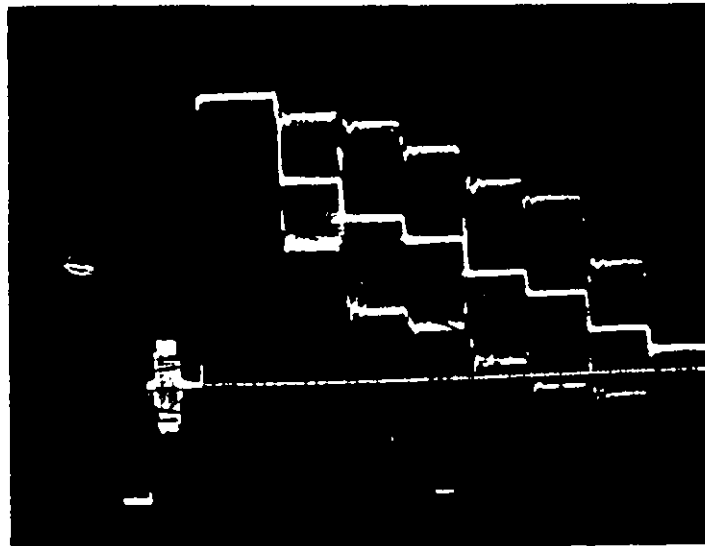
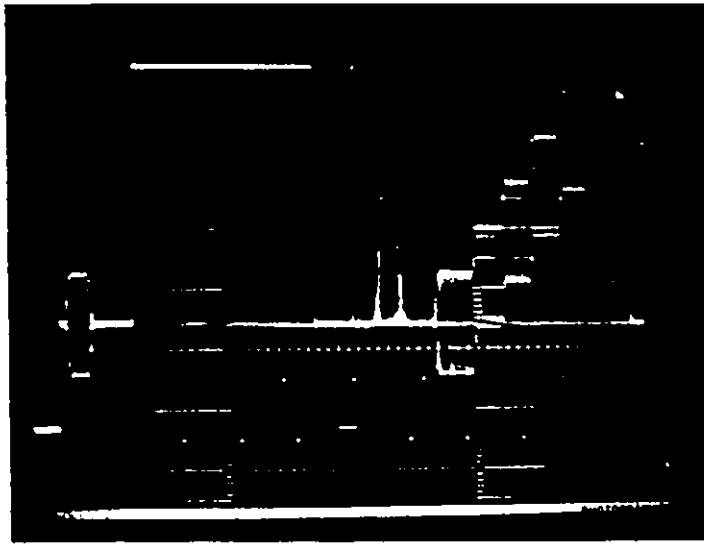


Figure 3.21 Signal test de couleur a) à la sortie du générateur  
b) après une transmission de 15 km.

a)



b)

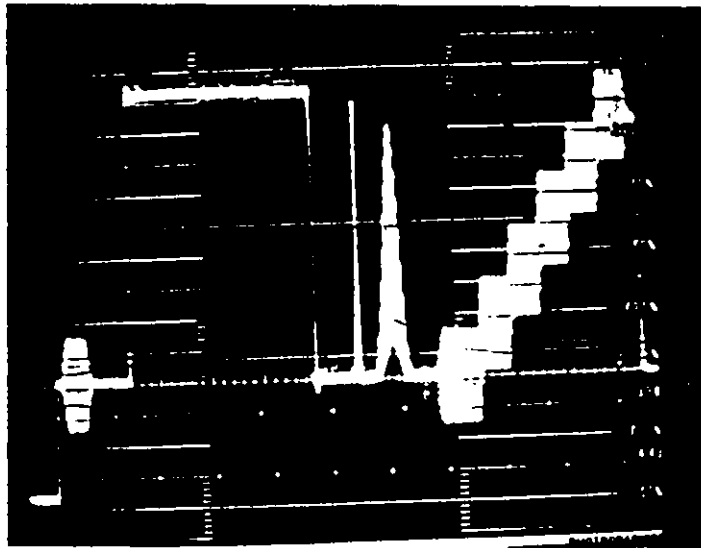
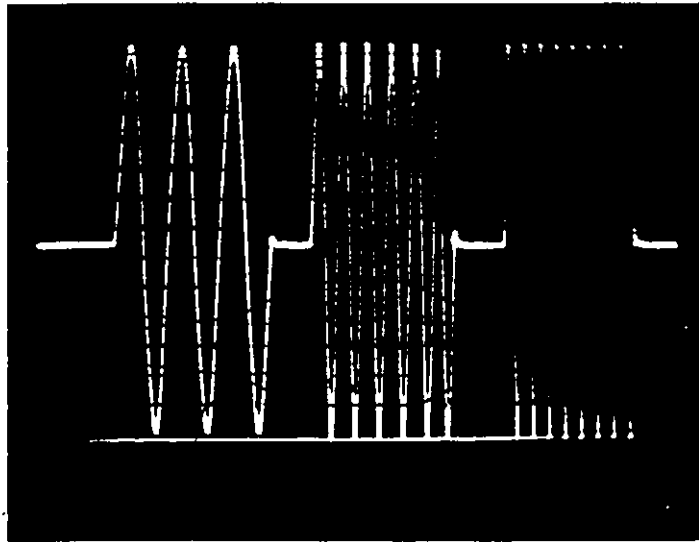


Figure 3.22 Signal composite: linéarité, impulsion  $\sin^2$ ,  $\sin^2$  modulé et fenêtré a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.

a)



b)

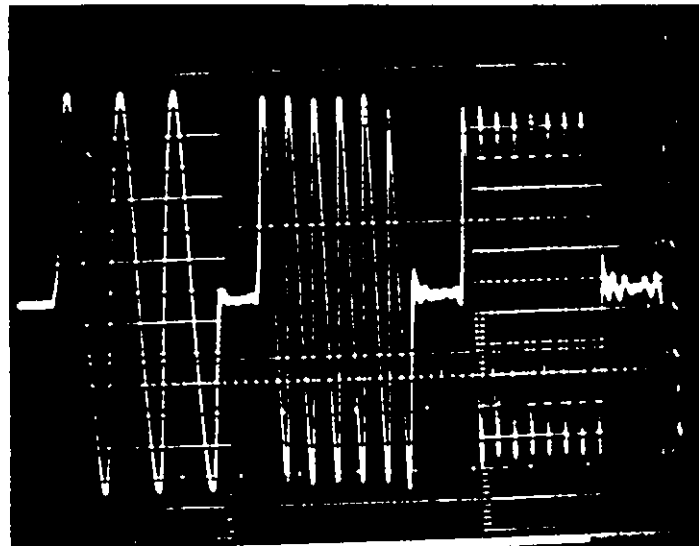


Figure 3.23 Caractéristiques amplitude vs fréquence a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.

a)



b)

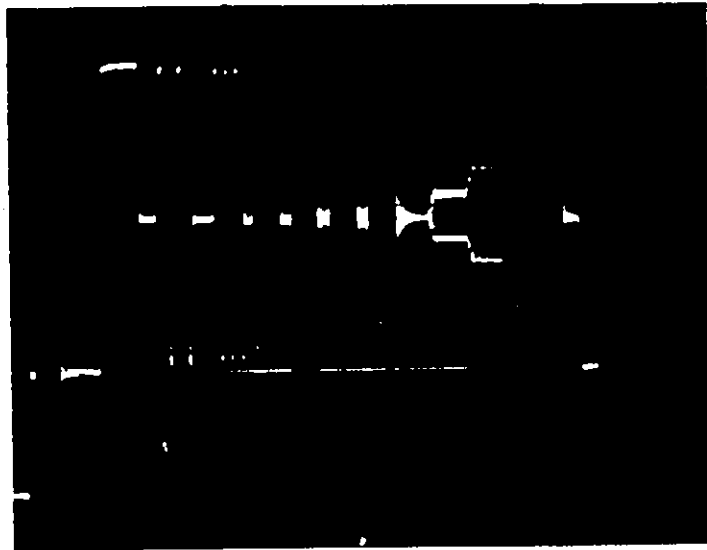
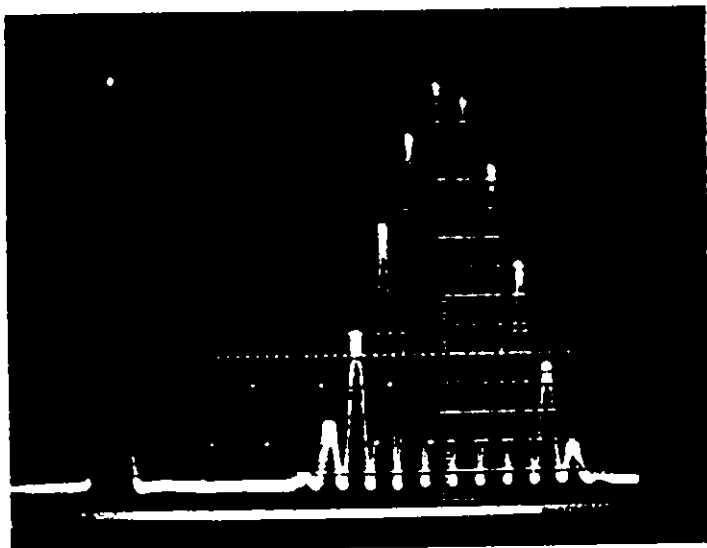


Figure 3.24 Caractéristiques amplitude vs fréquence a) à la sortie du générateur b) après une transmission de 15 km.

a)



b)

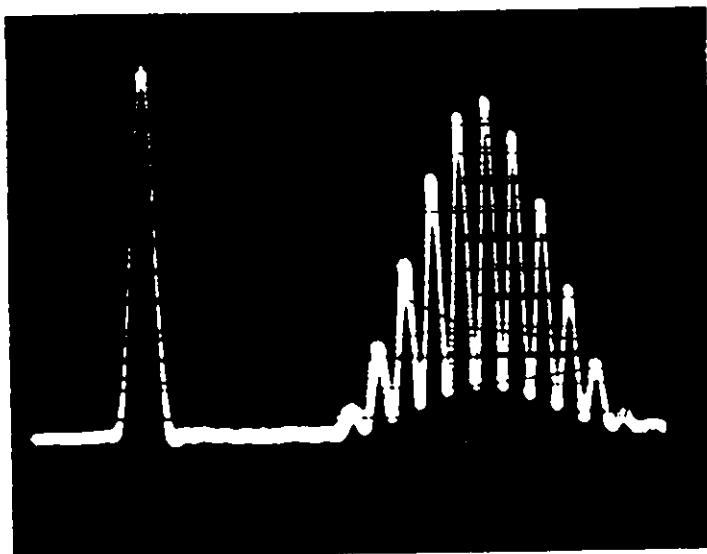


Figure 3.25 Impulsion  $\sin^2$  et  $\sin^2$  modulé a) à la sortie du générateur  
b) après une transmission de 15 km.

Nous sommes par contre conscients qu'un taux d'échantillonnage plus rapide, de l'ordre de 13 MHz, aurait permis une reproduction presque parfaite du point de vue de la mesure des paramètres vidéos.

Nous n'avons pas opté pour cette alternative car elle menait en, premier lieu, à un taux de transmission plus élevé et parce que le détecteur de phase au recouvrement d'horloge au récepteur, circuit critique s'il en est un, n'était spécifié que pour une utilisation typique de 80 MHz. Déjà, ce détecteur de phase est utilisé à une fréquence de 100 MHz et il nous a causé des problèmes du fait qu'il n'était pas spécifié pour de si hautes fréquences d'utilisation. Nous avons opté pour la simplicité de son opération et de ses excellentes caractéristiques déjà mentionnées plus tôt, au détriment d'une fréquence d'échantillonnage plus élevée. Ultiment, la mesure subjective de la qualité du signal vidéo nous a permis de sélectionner le taux d'échantillonnage le plus bas possible qui nous procure tout de même une image de qualité satisfaisante. Ainsi, le compromis sur la qualité nous a permis d'utiliser un circuit plus simple d'utilisation, moins dispendieux et permettant de diminuer le nombre de composantes ayant à fonctionner à haute vitesse.

Il est par contre clair à nos yeux que le taux d'échantillonnage de 10 MHz utilisé ne serait pas suffisamment élevé si l'on désirait réaliser un système de télédistribution commercial. La légère perte de réponse en fréquence causée par le taux d'échantillonnage n'est pas acceptable et, en fait, représente le seul facteur du système où nous avons délibérément compromis la qualité finale au profit de la simplicité et de la robustesse.

Taux de transmission	100 Mb/s
Atténuation de la fibre	2.5 dB/km
Puissance reçue au récepteur pour un taux d'erreur de $10^{-9}$	-41.2 dBm
Largeur de bande correspondante à une longueur de 15 km donnant un taux d'erreur de $10^{-9}$	150 MHz
Longueur d'onde du signal lumineux	0.8 $\mu$ m
Plage dynamique du photodétecteur	19 dB
Vitesse maximale d'opération du récepteur	150 Mb/s

Tableau 3.1 Principaux paramètres du lien optique

## Conclusion

L'utilisation de la fibre optique dans les réseaux locaux de télédistribution est sur le point de devenir une réalité. Cependant, de nouveaux problèmes inhérents à cette nouvelle application devront être solutionnés. Le défi est de taille et seule une approche globale permet de vraiment apprécier l'interaction entre les différents composants. Ainsi, dans le but de mieux comprendre les difficultés d'une telle réalisation, nous avons proposé les bases d'un réseau complet de télédistribution par fibres optiques.

Nous avons présenté, dans un premier temps, une introduction au domaine de la télédistribution par fibre optique afin de bien établir le sujet. Les options fondamentales y sont présentées. On y discute des mérites de la transmission numérique par rapport à la transmission analogique, de l'utilisation de la fibre optique versus celle de câbles coaxiaux, des types de services offerts, de la topologie du réseau, etc..

Une fois les caractéristiques fondamentales du réseau établies, nous avons présenté les technologies utilisées dans les systèmes de communications optiques. Cette section s'avère importante du fait qu'elle présente les éléments fondamentaux des communications par fibres optiques tout en soulignant les nouveaux développements de cette technologie en pleine expansion. Il est alors possible d'apprécier l'influence des caractéristiques fondamentales du réseau sur les composants optiques qui sont, à ce moment, moins bien connus par les ingénieurs en électronique. Nous avons également

discuté, dans ce même chapitre, des éléments qui permettraient de pousser encore plus loin les performances d'un réseau de télédistribution par fibres optiques. L'élément le plus important à retenir est sans doute le multiplexage en longueurs d'onde qui permet de multiplier la capacité du réseau sans avoir recours à des vitesses de transmission excessives.

La description technique du système construit est présentée au chapitre III. Chaque circuit, conçu et construit par l'auteur est décrit et expliqué. L'emphase est placée sur les circuits à haute vitesse qui sont plus difficiles à réaliser, plus particulièrement: les circuits d'horloges, les mélangeur et démélangeur, et le recouvrement d'horloge au récepteur. La mesure des performances du lien de communication suit la description des circuits. On n'y retrouve pas de série de mesures exhaustives des performances d'un canal vidéo; on y fait plutôt la démonstration du bon fonctionnement du système.

Nous sommes conscients des limites des performances du canal vidéo causée par le faible taux d'échantillonnage, mais il nous apparaît peu important d'y attacher trop d'importance à ce stage car la transmission comme telle de l'information est à toute fin pratique considérée comme idéale. En fait, le problème du lien de communication numérique se présente sous deux angles. Le premier consiste à réaliser un lien numérique qui fonctionne et qui se caractérise par son taux de probabilité d'erreur. Il y a des difficultés très particulières à résoudre qui n'ont rien à voir avec le type de signal transmis. Dans un deuxième temps, il y a le problème de la transmission numérique d'un

canal vidéo et de la mesure de ses performances selon les standards connus. Ce deuxième problème, bien que très important et d'intérêt, ne sera, dans notre cas, considéré que dans une démarche ultérieure dépassant le cadre de ce rapport.

Il nous semble plus important, à ce stade-ci des développements de la technologie des communications optiques, de mettre en place l'infrastructure du réseau et de réaliser le multiplexage des signaux d'une façon efficace en fonction des outils disponibles que d'étudier dans le détail les problèmes de chaque signal individuellement. Le système réalisé représente donc une première ébauche de solution au problème de la télédistribution par fibres optiques et démontre les possibilités offertes.

A partir des bases établies par ce système, nous serons en mesure d'améliorer les caractéristiques de la deuxième génération du système en s'attardant plus spécifiquement sur les services offerts que sur le lien de communication comme tel. Le taux de transmission devra probablement être augmenté pour permettre d'échantillonner le canal vidéo à quatre fois la fréquence fondamentale ( $4 \times 3.58 \text{ MHz} = 14.3 \text{ MHz}$ ), et les interfaces pour les différents services devront aussi être analysées et construites.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 - François, R. et al "Optical Fibres In Subscriber Loop Networks",  
Commutation & Transmission No 2/3, 1983, pp.119-136.
- 2 - Mogensen, G. "An Overview of Broad-Band Systems-Applications and  
Tradeoffs" IEEE J. on selected areas in communications, Vol. Sac-1,  
No.3, April 1983, pp.420-427.
- 3 - Lêchehaud, J. et al "Aste-Béon la première ligne de transfert par  
fibres optiques en télédistribution". ACTA Electronica, 24,1 1981-  
1982, pp.97-103.
- 4 - Byrne, T.P. et al "Positioning The Subscriber Loop Network for  
Digital Services", IEEE Transactions on communications, Vol.  
COM-30, No. 9, Sept. 1982, pp.2006-2011.
- 5 - Ogiwara, H. et al "Design Philosophy and Hardware Implementation  
for Digital Subscriber Loops". IEEE Transactions on  
Communications, Vol. COM-30, No.9, Sept. 1982, pp.2057-2065.
- 6 - Kimura, H. et al "Digital Transmission Technology"  
Telecommunications Technologies, Amsterdam, North-Holland, 1983,  
pp.45-70.
- 7 - Karia, A.J. et al "A Digital subscriber carrier System for the  
evolving subscriber Loop Network". IEEE Transactions on  
Communications, Vol. COM-30, No.9, Sept. 1982, pp.2012-2015.
- 8 - Popovics, J.P. "Optical Fiber Multiservice Subscriber Connection  
System: SAFO". IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-30,  
No.9, Sept. 1982, p.2215-2220.
- 9 - Chang, K.Y. et al "Fiber Optic Broad-Band Integrated Distribution -  
Elie and Beyond". IEEE Journal on selected areas in  
communications, Vol. SAC-1, No.3, April 1983, pp.439-444.
- 10 - Toth, A.G. et al "Communications To The Home With Fiber Optics".  
IEEE International Conference on Communications, Denver, Co. 14-18  
June 1981, p.24.1/1-6 Vol. 2.
- 11 - Nicholson, G. "Modulation Techniques for Cable Television  
Distribution On Optical Fibers." A.T.R. Vol. 17; No. 2, 1983,  
pp.25-37.
- 12 - Asatani, K. et al, "A Field Trial of Fiber Optic Subscriber Loop  
Systems Utilizing Wavelength-Division Multiplexers". IEEE  
Transactions on Communications, Vol. COM-30, No.9, Sept. 1982,  
pp.2172-2184.

- 13 - Kanzow, J. "Bigfon: Preparation For The Use Of Optical Fiber Technology In The Local Network Of The Deutsche Bundespost". IEEE Journal on Selected Areas In Communications, Vol. SAC-1, No.3, April 1983, pp.436-438.
- 14 - Genin, R.S. "Fiber Optic Applications In The Subscriber Loop Plant". Canadian Communications and Energy Conference, Montreal, 13-15, Oct. 1982, pp.313-316.
- 15 - Sakurai, K. et al "A Review of Broad-Band Fiber System Activity in Japan". IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. SAC-1, No.3, April 1983, pp.428-435.
- 16 - Treheux, M., "Applications des fibres optiques aux réseaux d'abonnés", European Conference On Optical Communications, Cannes, 21-24 Sept. 1982, p.25-30.
- 17 - Kawasaki, B.S. et al "Low-Loss Access Coupler For Multimode Optical Fiber Distribution Networks" Applied Optics, Vol. 16, No. 7, July 1977, pp.1794-1795.
- 18 - Conradi, J. "Fibre-Optical Transmission between 0.8 and 1.4  $\mu\text{m}$ ". IEEE Transaction On Electron Devices, Vol.ED-25, No.2, February 1978, pp.180-193.
- 19 - Whalen, M.S. et al "In-Line Optical Fibre Filter For Wavelength Multiplexing", Electronics Letters 15th August 1985, Vol. 21, No. 17, pp. 724-725.
- 20 - Johnson, D.C. et al "Fused Biconical Tapered Fiber-Optic Devices: Application To Data Buses", Fiber And Integrated Optics, Volume 3, Number 2-3, 1980, pp.263-284.
- 21 - Cassidy, D.T. et al "Wavelength-Dependent Transmission of Monomode Optical Fiber tapers". Applied Optics, Vol. 24, No.7, 1 April 1985, pp.945-950.
- 22 - Yataki, M.S. "An All-Fibre Polarising Beam Splitter And Spectral Filter". IEE Colloquium on advances in coherent optics devices and technologies, Digest No. 30, London, England, 26 March 1985, pp.3/1-4.
- 23 - Kawachi, M. et al "Fabrication of Single-Polarisation Single-Mode Fibre Couplers" Electronics Letters, 1982, 18, pp.962-964.
- 24 - Yokohama, I et al "Polarising Fibre Coupler With High Extinction Ratio", Electronics Letter, 1984, 20, pp:1004-1005.

- 25 - Haga, H. et al "An integrated 1x4 High-Speed Optical Switch and Its Applications to A Time Demultiplexer". IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. Lt-3, No.1, February 1985, pp.116-120.
- 26 - MacDonald, R.I. et al "Optoelectronic Broadband Switching Array", Electronics Letters, 14, 1978, pp.502-503.
- 27 - MacDonald, R.I. "Optoelectronic Switching In Digital Networks". IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. SAC-3, No.2, March 1985, pp.336-344.
- 28 - Kimura, T. et al, "Review: Progress of Coherent Optical Fibre Communication Systems". Optical And Quantum Electronics 15 (1983), pp.1-39.
- 29 - Okoshi, T. "Heterodyne and Coherent Optical Fiber Communications: Recent Progress". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. Mtt-30, No.8, August 1982, pp.1138-1149.
- 30 - Lin, C. et al "High-Speed Large-Signal Digital Modulation of 1.3 $\mu$ m In GaAsP Constricted Mesa Laser At A Simulated Bit Rate of 16 Gbit/s". Electronic Letters, 26th September 1985, Vol. 21, No. 20, pp.906-908.
- 31 - Epworth, R.E., Proceedings on the 4th European Conference on Optical Communications, Genoa, Italy, 1978, pp.492-501.
- 32 - Smith, R.G. et al, "Optical Detector Package" BSTJ, 57, July/August 1978 pp.1809-1822.
- 33 - Hess, K. "Detectors for Long Wavelengths". European Conference on Optical Communications, 23-26 October 1983, Geneva, pp.153-158.
- 34 - Personick, S.D. "Receiver Design For Digital Fiber Optic Communication Systems". Bell Systems Tech. J., Vol. 52, p.843-886, July-Aug. 1973.
- 35 - Cariolaro, G.L. "Error Probability In Digital Fiber Optic Communication Systems". IEEE Transactions on Information Theory, Vol. It-24, No.2, March 1978.
- 36 - Hawk, W. et al "The Calculation of Error Rates For Optical Fiber Systems", IEEE Transactions On Communications, Vol. COM-26, No.7, No.7, July 1978.

- 37 - Hesdahl, P.B. et al "A Multi Service Single Fiber Subscriber Network With Wideband Electro-Optical Switching", European Conference On Optical Communications, 23-26 October 1983, Geneva, pp.331-334.
- 38 - Hill, A.M., Proc. 6th European Conference On Optical Communications, York, 1980, pp21.6-1.
- 39 - Nicholson, G. "Modulation Techniques for Cable Television Distribution On Optical Fibers". A.F.R., Vol 17, No.2, 1983, pp.25-37.
- 40 - Franckart, J.P. et al "Analog Transmission of TV-Channels On Optical Fibers, With Non-Linearities Correction By Regulated Feed Forward", European Conference On Optical Communications, 23-26, October 1983, Geneva, pp.347-350.
- 41 - Best, R.E. "Phase-Locked Loops, Theory, Design, And Applications". McGraw-Hill Book Company, 1984.
- 42 - Motorola Mecl Data Book.  
Motorola Semiconductor Products Inc. 1982.