75-222

CENTRE DE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE

RAPPORT FINAL

Etude d'un rectificateur d'impulsion lumineuse à l'aide d'une ligne de micro-photodiodes à délai électronique, en vue de solutionner les problèmes de distorsion rencontrés dans les systèmes de communication par fibre optique.

préparé pour:

LE MINISTERE DES COMMUNICATIONS

par:

Jacques Bures
et
Jean-Marie Gagné

CDT P216

19 novembre 1976

Dossier: MAS OSU5-0060

Ecole Polytechnique de Montréal

P
91
C655
B87
1976

Campus de l'Université
de Montréal
Case postale 6079
Succursale 'A'
Montréal, Québec
H3C 3A7

CONFIDENTIEL - COMMERCIAL

PROJET CDT No P216

checked 11/87

P
91
C655
B87
1976

RAPPORT

ETUDE D'UN RECTIFICATEUR D'IMPULSION LUMINEUSE A L'AIDE D'UNE LIGNE DE MICRO-PHOTODIODES A DELAI ELECTRONIQUE, EN VUE DE SOLUTIONNER LES PROBLEMES DE DISTORSION RENCONTRES DANS LES SYSTEMES DE COMMUNICATION PAR FIBRE OPTIQUE.

préparé pour:

LE MINISTERE DES COMMUNICATIONS

Industry Canada
Library Queen
JUIL JUL 20 1998
Industrie Canada
Bibliothèque Queen

par:

Jacques Bures
et
Jean-Marie Gagné
Ecole Polytechnique de Montréal

COMMUNICATIONS CANADA
NOV 6 1985
LIBRARY — BIBLIOTHÈQUE

"Nous croyons que les données et les résultats soumis sont exacts autant qu'ils sont raisonnablement susceptibles de l'être. Cependant, n'ayant aucun pouvoir sur l'application de ces données et résultats, nous déclinons toute responsabilité pour les dommages pouvant résulter de leur utilisation."

CHERCHEUR PRINCIPAL

DATE: 19 novembre 1976

Dr Jacques Bures

TABLE DES MATIERES

page

1. INTRODUCTION ---------- 1

2. CHOIX DES ELEMENTS ---------- 3
   2.1 L'émetteur ---------- 4
   2.2 Le récepteur ---------- 4

3. SIMULATION DU PROBLEME ---------- 5

4. ELEMENTS GENERAUX DU "DESING" THEORIQUE D'UN PROTOTYPE ---------- 8
   4.1 Intégration des éléments ---------- 8
   4.2 Géométrie du détecteur ---------- 8
   4.3 Nombre d'éléments ---------- 10

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS ---------- 11

6. BIBLIOGRAPHIE ---------- 13

7. FIGURES ---------- 14

---

1. INTRODUCTION

Le but de ce rapport est de présenter les résultats d'une recherche exploratrice en vue de réaliser un dispositif de détecteurs à micro-photodiodes capable de rectifier la distorsion et l'étalement des impulsions lumineuses transmises par une fibre optique multimode.

Plusieurs phénomènes limitent les performances d'un système de communication par fibre optique. Ces limitations se traduisent en général par une perte d'énergie dans la fibre et par une diminution de la capacité d'information (bits/sec). Ceci provient principalement de l'interdépendance des différents aspects suivants[1]: type de modulation (continue ou discontinue), source (lumière cohérente ou incohérente), nature de la fibre optique (dimension, valeur des indices de réfraction, fibre mono ou multimode) et les caractéristiques des détecteurs (temps de réponse, réponse spectrale, dimensions, etc.).

Comme R. Bouillie et al[2] l'ont mentionné ainsi que d'autres auteurs, les fibres multimodes présentent plusieurs avantages comparativement aux fibres monomode, et particulièrement dans le cas où la lumière provient d'une diode luminescente incohérente. Malheureusement, en plus de toutes les pertes inhérentes aux fibres (absorption et dispersion dans le matériel, effets radiatifs dus aux courbes, interférences entre deux fibres, effets des revêtements protecteurs, etc.), les fibres multimodes présentent un inconvénient qui leur est propre et qui est caractérisé par des chemins optiques différents pour chaque mode. Une théorie simplifiée[2] (hypothèse géométrique des rayons lumineux) permet de bien comprendre le phénomène. Chaque mode correspond à différentes inclinaisons des rayons lumineux et transporte une certaine quantité d'énergie. A la sortie de la fibre, les quantités d'énergie associées à chaque mode arrivent donc en des temps différents et dans le cas d'une transmission par impulsion, cet effet se manifeste

globalement par une distortion et un étalement de l'impulsion dans le temps. Typiquement cet étalement peut atteindre (pour une impulsion de largeur initiale de 10 nsec) une valeur de plusieurs centaines de nsec/km. Si, à la sortie de la fibre, l'impulsion est détectée par un seul récepteur, cet étalement limite intrisèquement la capacité d'information.

Pour minimiser ces inconvénients et augmenter la capacité d'information, quelques solutions ont déjà été proposées et se basent toutes sur le fait qu'à la sortie de la fibre multimode, les différents modes de propagation (et l'énergie qu'ils transportent) sont reliés aux inclinaisons des rayons par rapport à l'axe de la fibre. D. Gloge[3] propose un récepteur circulaire particulier à semi-conducteur, dont le champ électrique décroit en fonction du rayon: ainsi les photo-charges créées en tout point de la surface photo-sensible arrivent au collecteur avec des retards compensant ceux des modes. D.M. Henderson[4] propose d'injecter, au niveau de l'entrée du répétiteur, une énergie optique additionnelle, de telle façon que les effets d'interférence compensent et minimisent les retards.

Nous allons présenter les grandes lignes d'une autre solution à ce problème. Cette approche consiste à utiliser un arrangement de plusieurs micro-photodiodes. Chaque élément photo-sensible reçoit l'énergie lumineuse transportée dans un mode et un système convenable de délais électroniques associés à chacun de ces éléments compense les retards relatifs à chaque mode de propagation. Nous n'avons considéré dans notre étude, que l'aspect concernant la correction des retards optiques par des délais électroniques.

Notre travail se divise en trois parties. Tout d'abord nous avons fait une investigation poussée des différents éléments opto-électroniques offerts sur le marché. Ceci nous a amenés à faire un certain choix guidé

par les propriétés optiques et photo-électriques de ces éléments. Puis nous avons réalisé une simulation du problème à l'aide d'un montage optique simple. Enfin, des résultats obtenus, nous proposons les grandes lignes du "design" théorique d'un prototype rectificateur et égalisateur d'impulsions transmises par une fibre optique multimode.

2. CHOIX DES ELEMENTS

Pour pouvoir déterminer efficacement les caractéristiques du prototype, nous avons réalisé une simulation du problème. Les différents éléments opto-électroniques utilisés dans le montage devaient posséder les caractéristiques aussi proches que possible de la réalisé et que l'on peut résumer comme suit:

L'émetteur doit délivrer des impulsions lumineuses courtes (de l'ordre de 10 nsec de large), de puissance et de taux de répétition suffisants pour pouvoir observer efficacement les phénomènes à l'oscilloscope.

Le récepteur, composé de plusieurs photodiodes, doit posséder des temps de réponse suffisamment courts pour ne pas altérer le profil des impulsions et avoir un gain suffisamment élevé pour permettre une observation facile. Enfin son domaine spectral de réponse doit être compatible avec la longueur d'onde de l'émetteur.

Notons tout de suite l'impossibilité actuelle d'utiliser les lignes de micro-photodiodes (diodes array) fonctionnant en flux intégré, à cause des trop grands délais de temps Δt existant entre l'interrogation de 2 diodes successives: par exemple la "diode array" R.L. 512 de Reticon Corporation[5],

que nous avons étudiée en détail[6], demande, dans les meilleures conditions, un Δt de l'ordre de 50 µsec, alors que les délais mis en jeu dans notre problème ne dépassent pas quelques centaines de nsec.

Après une recherche intensive auprès des compagnies, nous avons choisi les éléments suivants:

2.1 L'émetteur

C'est un laser pulsé (diode laser à injection GaAs), type PL 1000 de la compagnie International Laser System[7] et dont les caractéristiques principales sont les suivantes:

λ	=	905 nm
Divergence	=	3 mrad (pouvant être corrigée partiellement à l'aide d'une lentille additionnelle)
Impulsion	=	12 nsec de largeur à mi-hauteur Temps montée et descente: $\leq$ 3 nsec Puissance nominale: 1 Watt Répétition 1 K Hz à 1 M Hz (répétitif ou pseudo-aléatoire et pouvant être déclenché extérieurement).

2.2 Le récepteur

Nous nous sommes procuré 2 éléments de base du dispositif récepteur. Chaque élément est constitué d'une double photodiode au silicium à avalanche, type 530505, de la Cie E.M.I.[8] La deuxième photodiode (maintenue dans l'obscurité) sert de référence et permet de contrôler, par l'intermédiaire d'un régulateur intégré (type C512 de la même Compagnie[9]), les tensions de polari-

sation prescrites par le constructeur (de l'ordre de 77 Volts). Les caractéristiques opto-électroniques sont les suivantes:

Sensibilité maximum à 900 nm (réponse 24A/W)
Temps de réponse : .5 nsec
Capacité : 2 pF.
Gain d'avalanche : 200
Surface photosensible : 8×10^{-3} mm^2

Pour adapter et amplifier les signaux de sortie, nous avons construit le préamplificateur tel qu'indiqué sur la Figure 1. Le transistor 2N 4260 est employé en "current-mode operation" à haute vitesse. Les temps d'ouverture et de fermeture sont de l'ordre de la nsec. Le choix des résistances R_4 et R_5 résulte d'un compromis entre l'amplification de l'impulsion et son élargissement. Nous avons pris $R_4 = 68\Omega$ et $R_5 = 18\Omega$ ce qui donne un gain de 4 sans élargissement notable de l'impulsion. Ce montage nous permet ensuite d'adapter l'impédance de sortie à 50Ω.

La Figure 2 illustre la réponse typique de l'un de nos détecteurs, relevée à l'oscilloscope. On ne constate pas d'élargissement notable de l'impulsion et sa largeur à mi-hauteur est du même ordre (≈12 nsec) que celle de l'impulsion lumineuse à la sortie du laser.

3. SIMULATION DU PROBLEME

Nous avons réalisé une simulation du retard d'une impulsion par rapport à une autre en créant une différence de chemin optique de parcourt. Ensuite nous avons corrigé ce retard à l'aide d'un délai électronique approprié.

Le montage simple est illustré sur la Figure 3 et photographié sur la Figure 4. Une première lentille (L_1) permet de corriger la divergence naturelle du faisceau laser. La lame semi-transparente (L.S.T.) divise l'amplitude de l'impulsion provenant du laser en deux parties égales: l'une va directement au premier détecteur (D_1) après focalisation par la lentille (L_2); l'autre subit un décalage de parcours optique à l'aide du jeu de miroirs (M_1), (M_2) et (M_3), puis est focalisée par la lentille (L_3) sur le deuxième détecteur (D_2). Finalement les impulsions détectées par (D_1) et (D_2) sont transmises, par l'intermédiaire de câbles coaxiaux, type RG 59/U, de longueurs X_1 et X_2, vers les 2 canaux de l'oscilloscope Tektronix 200 M Hz.

Les chemins optiques parcourus (AD_1) et (AD_2) par les 2 impulsions simulent ceux relatifs à la propagation de deux modes d'une fibre optique et les délais électroniques sont matérialisés par les longueurs relatives des câbles X_1 et X_2.

La Figure 5a montre le retard relatif des deux impulsions. Les conditions expérimentales sont les suivantes:

$$AD_2 - AD_1 = 2.87 \text{ m}$$

$$X_1 - X_2 = 0$$

$$\text{Délai d'arrivée } \Delta t = 10 \text{ nsec}$$

En utilisant la théorie géométrique simple proposée par R. Bouillie et al[10], ce délai Δt correspondrait au mode associé à l'angle θ de propagation par rapport à l'axe de la fibre, donné par:

$$\frac{1}{\cos\theta} - 1 = \frac{\Delta t\, c}{n_1 L}$$

où L est la longueur de la fibre, n_1 l'indice et c la vitesse de la lumière. A l'aide des valeurs typiques ($L = 1$ km, $n_1 = 1.6$) on trouve:

$$\theta \simeq 3^{o}.5$$

La Figure 5b représente la somme des 2 impulsions qui simule l'élargissement que l'on observerait avec un détecteur unique.

La Figure 6a représente les 2 mêmes impulsions dont la différence des chemins optiques a été compensée par un délai électronique de telle sorte que le retard soit annulé. Les conditions expérimentales sont alors:

$$AD_2 - AD_1 = 2.87\text{m}$$
$$X_1 - X_2 = 1.90\text{m}$$
$$\Delta t = 0$$

La Figure 6b représente la somme des 2 impulsions. Cette opération simule la correction ou égalisation des retards.

En conclusion, nous noterons que les éléments choisis pour réaliser notre simulation possèdent les propriétés opto-électroniques convenables. Le temps de réponse des diodes est court ($\simeq$1 nsec) et le gain est suffisamment élevé (200 pour l'avalanche et 4 pour le préamplificateur). Tout ceci montre que la réalisation d'un prototype basé sur le principe de la correction des retards optiques est parfaitement réalisable sur le plan scientifique.

4. ELEMENTS GENERAUX DU "DESIGN" THEORIQUE D'UN PROTOTYPE

Les résultats expérimentaux obtenus dans notre expérience de simulation et les propriétés opto-électroniques des éléments choisis vont nous permettre de dégager les grandes lignes du "design" théorique d'un appareil rectificateur et égalisateur. Nous allons aborder les trois aspects suivants: l'intégration des éléments sur un même substrat, la géométrie du détecteur et le nombre nécessaire d'éléments micro-photodiodes.

4.1 Intégration des éléments

Notons tout d'abord qu'il existe déjà sur le marché des lignes et matrices de micro-photodiodes où les diodes, une horloge et un système d'interrogation et d'interrupteurs sont complètement intégrés: par exemple, les 512 éléments de la ligne RL-512 fabriquée par Reticon[5] et les composants associés sont réunis sur un même support de dimensions très réduites (2.2cm x .8cm x .1cm). Cette technologie d'intégration est donc bien connue ce qui démontre la possibilité de réalisation pratique du prototype proposé.

La très petite surface photo-sensible de nos diodes ($S = 8 \times 10^{-3} mm^2$) et l'existence sur le marché de délais électroniques intégrés de dimensions très réduites[11], font que rien ne semble s'opposer, sur le plan des principes, à la réalisation d'un multidétecteur complètement intégré que l'on pourrait placer au niveau des répétiteurs de la ligne: diodes, régulateurs, préamplificateurs et délais électroniques peuvent être réunis sur le même substrat.

4.2 Géométrie du détecteur

Le problème présente la symétrie cylindrique et nous suggère de choisir un détecteur à géométrie circulaire. Chaque élément récepteur (voir Figure 7), de forme annulaire, va recueillir une certaine quantité d'énergie contenue dans l'angle solide élémentaire qu'il délimite:

$$\Delta\Omega = 2\pi \sin\theta\Delta\theta \text{ stéradian.}$$

Nous allons préciser les dimensions relatives de chaque surface réceptrice. Nous prendrons l'approximation des petits angles θ, puisque dans la pratique $\theta \leqslant \theta_M$, où θ_M est l'angle maximum de propagation des rayons par rapport à l'axe de la fibre, donné par:

$$\cos\theta_M = \frac{n_2}{n_1},$$

où n_1 est l'indice intérieur et n_2 l'indice de l'enveloppe. Typiquement avec $n_1 = 1.6$; $n_2 = 1.5$ nous trouvons $\theta_M \simeq 20^o$, ce qui justifie notre approximation. Dans ce cas on peut écrire:

$$\Delta\Omega \simeq 2\pi\theta\Delta\theta ,$$

et le temps de retard, entre le mode axial et celui associé à l'angle θ:

$$t = \frac{Ln_1}{c}\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right) \simeq \frac{Ln_1}{c}\frac{\theta^2}{2} .$$

Un raisonnement qualitatif et suggéré par notre expérience de simulation "à 2 modes", nous incite à choisir des différences de délais électroniques (entre 2 récepteurs annulaires consécutifs) égaux à la largeur à mi-hauteur t_o de l'impulsion initiale:

$$\Delta t = t_{i-1} - t_i = \frac{Ln_1}{c}\theta\Delta\theta = t_o.$$

De cette façon, chaque élément récepteur, pris séparément, délivre une impulsion électrique de même largeur que l'impulsion initiale. Δt et $\Delta\Omega$ sont alors constants et reliés par:

$$\Delta t = \frac{\Delta\Omega}{2\pi}\frac{Ln_1}{c} = t_o .$$

Ceci conduit à un découpage de l'angle solide total (délimité par θ_M) en N angles solides élémentaires égaux $\Delta\Omega$. Dans l'approximation des petits angles et dans le plan focal d'une lentille, cela se traduit par l'égalité des surfaces de chaque élément annulaire récepteur.

Les rayons des cercles concentriques sont alors donnés par:

$$r_1, \ldots, r_N = \sqrt{N}\, r_1$$

tel qu'indiqué sur la Figure 7.

On notera ici que ce "design" théorique correspond exactement à celui qu'il faudrait employer pour réaliser un récepteur multiplex associé à un interferomètre Fabry-Perot et capable de détecter simultanément N éléments spectraux de même largeur spectrale (exprimée en nombre d'ondes).

4.3 Nombre d'éléments

Le multirécepteur décrit précédemment réalise, en fait, un échantillonnage de la distribution d'énergie $E(\theta)$ existant au niveau du répétiteur. On serait tenté d'appliquer le théorème bien connu de l'échantillonnage au pas de Shannon et en déduire le nombre optimum d'échantillons nécessaires à la reconstitution de $E(\theta)$. Tel n'est pas le cas, puisque ce n'est pas $E(\theta)$ que nous voulons reconstituer, mais le profil temporel de l'impulsion initiale à partir de sa version élargie et recueillie à la sortie de la fibre.

Si t_s est la largeur à mi-hauteur de l'impulsion de sortie, le traitement précédent nous conduit naturellement à découper t_s et N éléments "retardés" de Δt, chacun étant égal à t_o. Il vient donc:

$$N \simeq t_s / t_o \; .$$

En général t_s dépend de la largeur et du profil de l'impulsion initiale, de la longueur L de la fibre, des indices n_1 et n_2 et de la distribution E (θ). Un traitement plus rigoureux du problème nous obligerait à fixer à priori toutes ces données. Nous pensons que ces investigations sont intéressantes et nécessiteraient d'être approfondies. Pour illustrer simplement la méthode, nous nous sommes servis des résultats théoriques trouvés par R. Bouillie et al dans le cas d'un modèle réaliste d'une impulsion initiale de profil temporel lorenztien. Avec E (θ) constant, ces auteurs trouvent[12]:

$$t_s = t_o \left[\sqrt{1 + \left(\frac{t_M}{t_o}\right)^2} - 1 \right] ,$$

où t_M est le retard maximum correspondant à θ_M. Une application numérique pour les valeurs réalistes suivantes:

$$L = 1 \text{ km} \; ; \; n_1 = 1.6 \; ; \; n_2 = 1.5 \; ; \; t_o = 10 \text{ nsec}$$

donne:

$$t_M = 337 \text{ nsec} \quad \text{et} \quad N = 33 \text{ éléments},$$

auxquels sont associés des délais électroniques variant de 10 nsec en 10 nsec.

Cet exemple simple montre que le nombre d'éléments récepteurs nécessaires à la rectification n'est pas prohibitif, même pour une longueur importante de la fibre optique.

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'expérience de simulation que nous avons réalisée à l'aide des éléments opto-électroniques disponibles sur le marché, puis l'étude théorique du "design" d'un multirécepteur capable de rectifier et d'égaliser les

impulsions, nous montrent qu'un tel dispositif est parfaitement réalisable dans la pratique. Nous ne voyons pas d'obstacles technologiques à l'intégration des différents éléments qui le composent: diodes, régulateurs, préamplificateurs et délais électroniques doivent pouvoir s'intégrer sur le même support au niveau d'un répétiteur de la ligne, puisqu'ils existent déjà sous des formes partiellement intégrées. De plus, nous avons montré que le nombre d'éléments récepteurs nécessaires à une rectification efficace reste raisonnable même pour une section de ligne de l'ordre du km. Enfin notons la souplesse d'emploi du dispositif proposé comparativement du détecteur à "carrier drift"[3]: les délais électroniques de notre système peuvent être ajustés selon les besoins et ne sont pas fixés une fois pour toute par la construction de l'appareil.

Il serait intéressant de faire l'étude des coûts financiers et d'entreprendre la réalisation pratique d'un prototype. Nous pensons que ce travail dépasse pour le moment le cadre de notre objectif et surtout qu'il est prématuré. En effet notre étude n'est que préliminaire et les résultats encourageants qui en découlent devraient inciter le Ministère à poursuivre plus à fond l'étude entreprise jusqu'ici.

En particulier nous pensons qu'il est absolument nécessaire d'essayer réellement notre système avec une ligne à fibre optique et de poursuivre l'étude mathématique du problème d'une façon plus poussée.

6. BIBLIOGRAPHIE

1- S.E. MILLER, T. LI and E.A.J. MARCATILI, Proceedings of the IEEE, 61, 1703-1751, 1973.

2- R. BOUILLIE, K.H. STEINER and M. TREHEUX, Opto-Electronics, 5, 457-477, 1973.

3- D. GLOGE, Opto-Electronics, 5, 345-350, 1973.

4- D.M. HENDERSON, The Bell System Techn. Journ. 52, 1867-76, 1973.

5- RETICON CORPORATION, Notice technique, Solid State Line Scanner RL-512, RL-256E, Mountain View, California.

6- J. BURES, G. FERNANDEZ et M. NANJO, "Quelques propriétés opto-électroniques d'une ligne de micro-photodiodes", Manuscrit soumis à Applied-Optics, (1976).

7- Notice technique M.1144, 1976, International Laser Systems, Inc., Orlando, Florida, USA.

8- Notice technique: Photodiodes Types S30504 et 30505, E.M.I. Electronics Ltd, Electron Tube Division, Hayes, Middlesex, England.

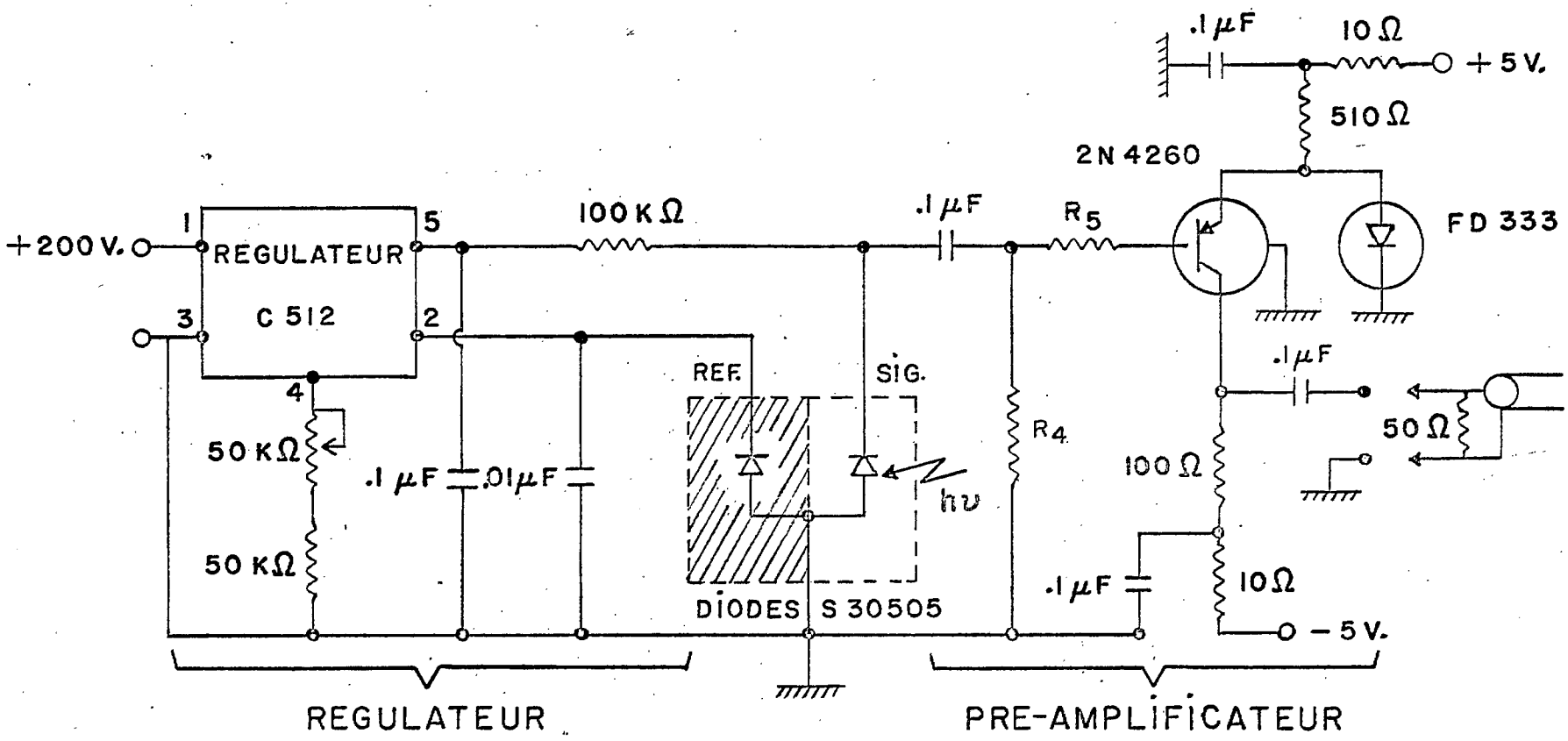
9- Notice technique: Bias Controller, types C511 et C512, E.M.I.

10- Eqs. 2 et 4, p. 458 de la référence 2.

11- Engineering Bulletin 45004, miniature tapped delay lines, Sprague Electric Company, 1971, North Adams, Mass.,USA.

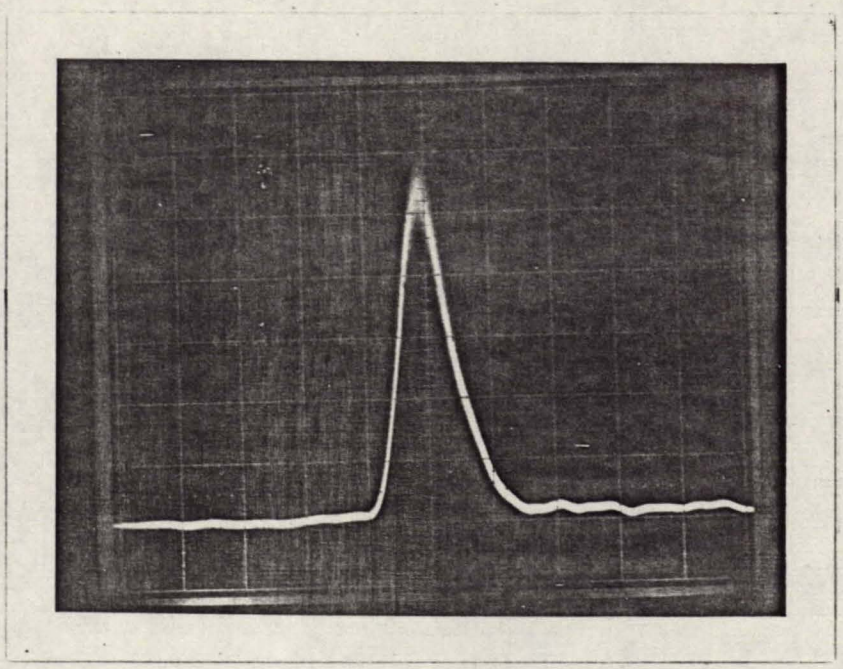
12- Eq. 38, p. 467 de la référence 2.

7. LES FIGURES



SCHEMA ELECTRONIQUE D'UN ELEMENT PHOTO-DETECTEUR

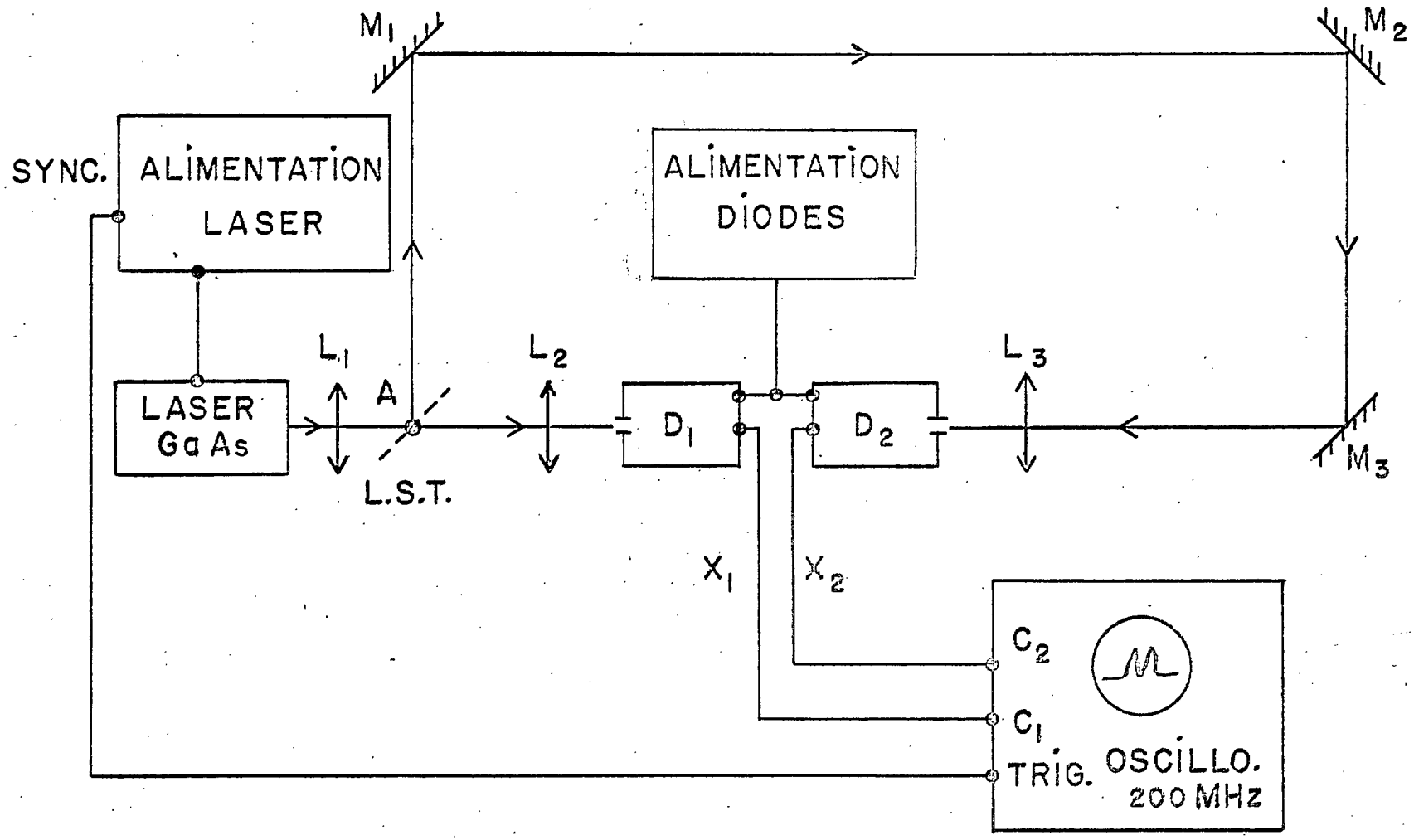
FIG. I



REPONSE D'UN ELEMENT PHOTO-DETECTEUR

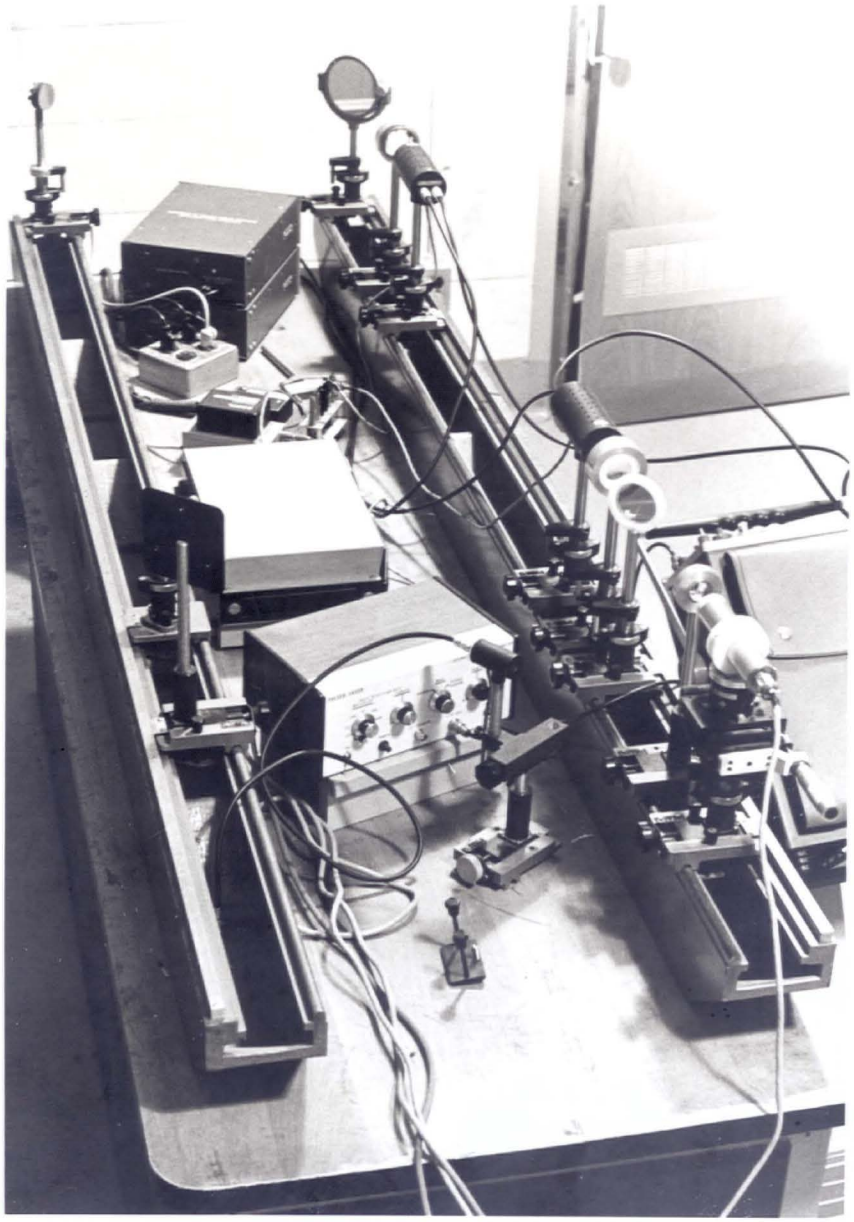
(VERT.: 10 m.V./cm.; HORIZ.: 10 n.sec./cm.)

FIGURE 2



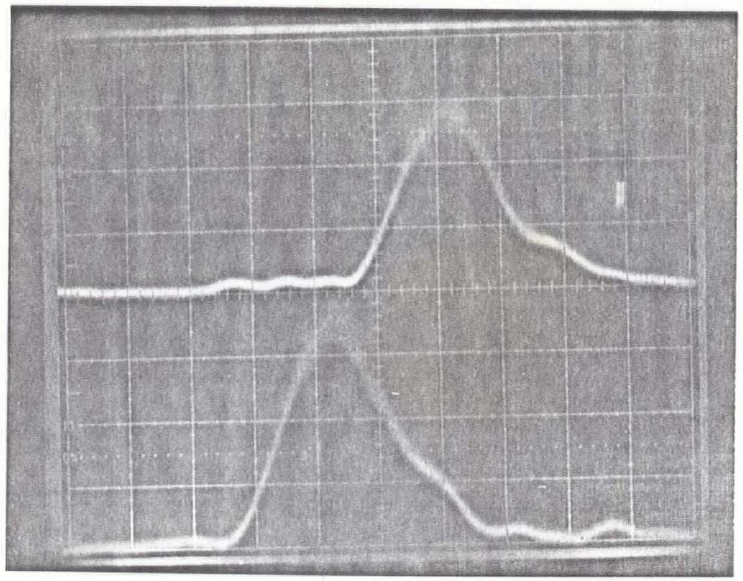
SCHEMA DU MONTAGE OPTIQUE

FIG. 3



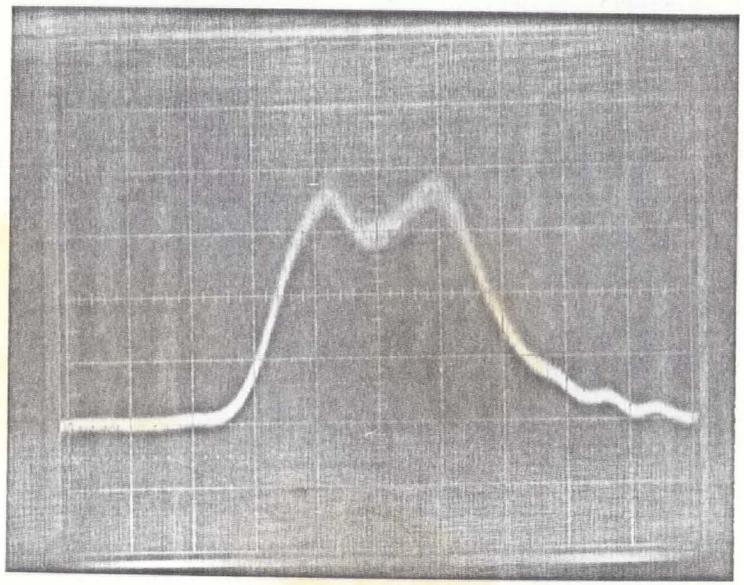
PHOTOGRAPHIE DU MONTAGE EXPERIMENTAL

FIGURE 4



IMPULSIONS AVEC DELAI OPTIQUE

FIG. 5a



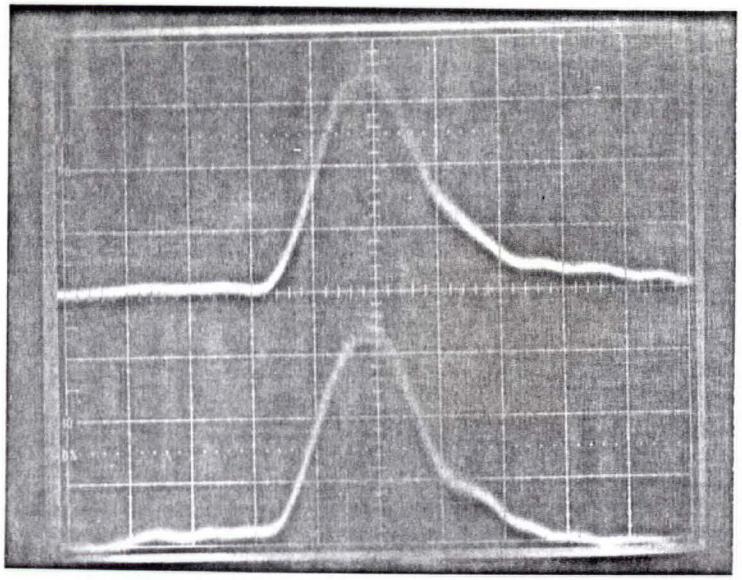
SOMME DES DEUX IMPULSIONS

FIG. 5b

SIMULATION DE DEUX MODES DE PROPAGATION

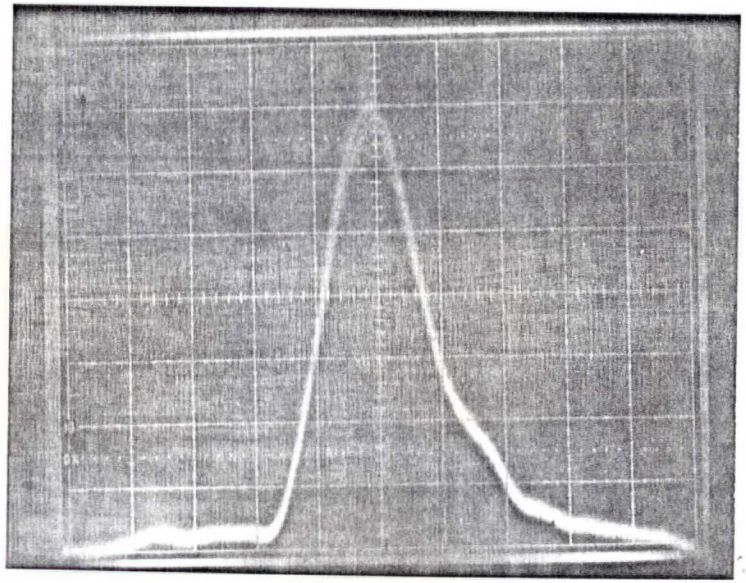
(VERT.: 5 mV./cm.; HORIZ.: 5 n.sec./cm.)

FIGURE 5



IMPULSIONS AVEC DELAI
ELECTRONIQUE CORRECTEUR

FIG. 6 a



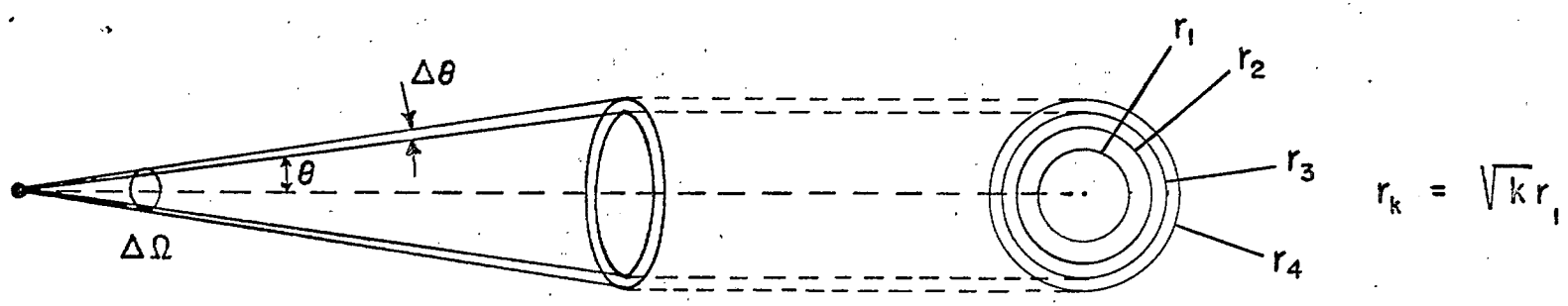
SOMME DES DEUX IMPULSIONS

FIG. 6 b

CORRECTION PAR DELAI ELECTRONIQUE

(VERT.: 5 m.V./cm.; HORIZ.: 5 n.sec./cm.)

FIGURE 6



DESSIN GEOMETRIQUE D'UN MULTI-RECEPTEUR
A SURFACE CONSTANTE

FIGURE 7