

LE TRAITEMENT DU SIGNAL OPTIQUE POUR LES TELECOMMUNICATIONS

par F. FLORY,

Ecole Nationale Supérieure de Physique
de Marseille.

Un réseau de télécommunications nécessite des dispositifs permettant de moduler, de commuter, de multiplexer et d'amplifier le signal. Ces opérations se réalisent sans difficulté sur des signaux électriques, mais posent des problèmes tout à fait différents lorsqu'il s'agit de signaux optiques. Problèmes qui sont d'ailleurs loin d'être complètement résolus à l'heure actuelle, ce qui oblige souvent à effectuer des conversions de signaux avant et après traitement. C'est le cas des répéteurs, dans lesquels l'amplification se fait nécessairement par voie électronique, ce qui impose une double conversion photons-électrons à l'entrée, et électrons-photons à la sortie.

Il est donc tout à fait souhaitable de pouvoir disposer de méthodes de traitement purement optiques, ce qui nécessite la mise en œuvre de processus physiques agissant directement sur le rayonnement lumineux.

Une telle action ne peut avoir lieu que dans la matière car, dans le vide, la lumière est insensible aux champs extérieurs. En revanche, un champ électrique, un champ magnétique ou un champ de forces perturbent les propriétés d'un matériau sur lequel ils sont appliqués, ce qui modifie à leur tour les conditions de propagation d'un faisceau lumineux à l'intérieur de ce matériau.

Nous examinerons d'abord les principaux processus permettant de réaliser la modulation et la commutation optique, puis nous donnerons quelques exemples de dispositifs utilisant ces effets, notamment des composants d'optique intégrée.

1. LES PRINCIPAUX PHENOMENES MIS EN JEU EN VUE DU TRAITEMENT DES SIGNAUX OPTIQUES.

1.1. Effet Faraday.

C'est un effet magnéto-optique. Un champ magnétique longitudinal, c'est-à-dire dont la direction est celle du faisceau lumi-

neux, crée dans la matière une biréfringence circulaire proportionnelle à l'intensité du champ. Une onde lumineuse polarisée rectilignement voit alors sa direction de polarisation tourner d'un angle θ à la traversée du milieu, avec $\theta = V/lH$. V est la constante de Verdet du matériau, l la longueur d'interaction et H l'intensité du champ magnétique. Une caractéristique importante de l'effet Faraday se trouve dans le fait que le sens de rotation de la vibration lumineuse ne dépend que du sens du champ et est indépendant du sens de propagation de la lumière. Cette caractéristique est utilisée dans les *isolateurs optiques*.

On développe actuellement des matériaux comme le YIG ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) à grand pouvoir rotatoire.

1.2. Effets électro-optiques.

Il s'agit là d'anisotropies induites par un champ électrique. On distingue l'effet Kerr et l'effet Pockels.

* L'EFFET KERR concerne les verres et certains liquides dont les molécules tendent à s'aligner sous l'effet d'un champ électrique appliqué, ce qui confère au matériau les propriétés d'un milieu optiquement uniaxe. L'effet est *quadratique*, c'est-à-dire que la différence $n_e - n_o$ entre l'indice extraordinaire principal et l'indice ordinaire du milieu uniaxe est proportionnelle au carré du champ électrique : $n_e - n_o = B\lambda E^2$.

* L'EFFET POCKELS, en revanche, est *linéaire* en fonction du champ électrique appliqué. Il se manifeste sur des cristaux non centrosymétriques (dépourvus de centre de symétrie). Le milieu est donc initialement anisotrope et le champ électrique perturbe cette anisotropie. La biréfringence $n_e - n_o$ est proportionnelle à l'intensité E du champ. Parmi les matériaux présentant un effet électro-optique important, on s'intéresse actuellement au niobate de lithium (LiNbO_3), au niobate de potassium (KNbO_3), à l'arséniure de gallium (GaAs).

1.3. Effet acousto-optique.

La propagation d'une onde acoustique dans un milieu réfringent s'accompagne de variations spatiales périodiques de pression qui se traduisent à leur tour par des variations d'indice de réfraction. On crée ainsi un réseau de phase dans le matériau.

On observe un effet acousto-optique important en particulier dans le molybdate de plomb (PbMoO_4), l'oxyde de tellure (TeO_2), le niobate de lithium, le phosphore de gallium (GaP).

1.4. Effet photoréfractif.

Lorsqu'on éclaire un matériau électro-optique, des porteurs de charges sont créés et peuvent se déplacer, soit par diffusion, soit sous l'effet d'un champ électrique appliqué. Il en résulte l'apparition d'un champ de charge d'espace qui module la biréfringence du matériau. On peut ainsi créer un réseau de phase, comme dans le cas de l'effet acousto-optique, en faisant interférer deux ondes lumineuses dans le matériau. Une troisième onde incidente sur ce réseau sera diffractée dans des directions que l'on pourra contrôler en agissant sur la période des franges d'interférences.

Citons, parmi les principaux matériaux photoréfractifs, le titanate de baryum (BaTiO_3), le niobate de potassium, l'arséniure de gallium, le « B.S.O. » ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$).

2. EXEMPLES DE DISPOSITIFS UTILISANT LES PHENOMENES PRECEDENTS.

2.1. Isolateur optique.

Une cellule à effet Faraday introduisant une rotation de la vibration lumineuse de 45° , placée entre deux polariseurs rectilignes, orientés eux-mêmes à 45° l'un de l'autre, réalise un isolateur optique. Il est en effet facile de se rendre compte qu'un tel dispositif transmet la lumière sans atténuation dans un sens et l'arrête dans l'autre. C'est l'équivalent des isolateurs à ferrite bien connus en hyperfréquences.

2.2. Les déflecteurs et modulateurs électro-optiques.

Les déflecteurs sont basés sur la propriété des milieux biréfringents d'associer à tout rayon incident non parallèle à l'axe optique deux rayons réfractés spatialement distincts et correspondant chacun à une polarisation particulière du front d'onde (fig. 1).

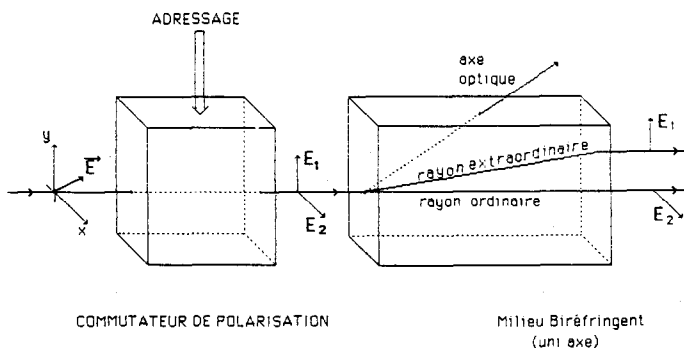


Fig. 1. — Déflecteur électro-optique à deux positions.

Précédés d'un commutateur de polarisation, de tels milieux constituent donc des défecteurs à deux positions dont les performances ne sont fonctions que des caractéristiques statiques des matériaux biréfringents utilisés.

On peut constituer (fig. 2) à l'aide de n cellules élémentaires un défecteur à 2^n positions. Les commutateurs de pola-

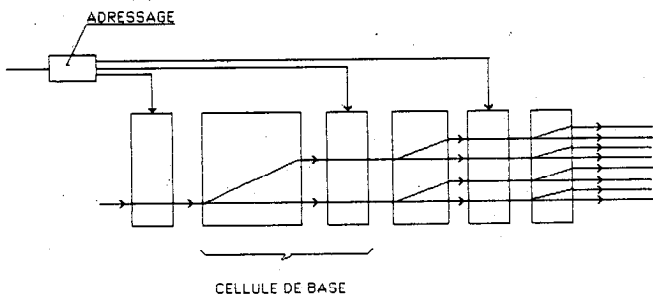


Fig. 2. — Défecteur à 8 positions.

risation pourront être des cellules à effet Pockels. En pratique, de telles cellules peuvent être réalisées en déposant sur deux faces opposées d'un cristal des électrodes qui vont permettre d'appliquer un champ électrique au milieu. On distingue deux configurations : la configuration longitudinale (la lumière passe alors à travers les électrodes — ZnO — qui doivent être transparentes) et la configuration transversale (fig. 3).

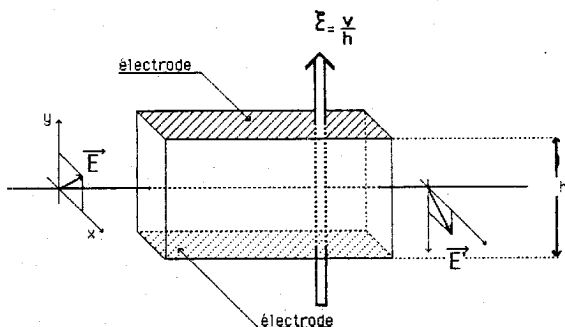


Fig. 3. — Commutateur de polarisation à effet Pockels.

La tension à appliquer étant $E \times h$, cette dernière configuration paraît intéressante pour de faibles épaisseurs de cristal.

Une difficulté subsiste : la longueur du cristal doit être adaptée pour avoir un état de polarisation identique en entrée et en sortie en l'absence du champ électrique.

2.3. Les défecteurs acousto-optiques et photo-induits.

On a vu que l'on pouvait, par effet acousto-optique ou par effet photoréfractif, créer des réseaux de phase dans certains matériaux.

On peut utiliser de tels réseaux pour contrôler la direction de propagation de la lumière (fig. 4). On a porté sur le tableau de la fig. 5 les caractéristiques de quelques défecteurs acousto-optiques.

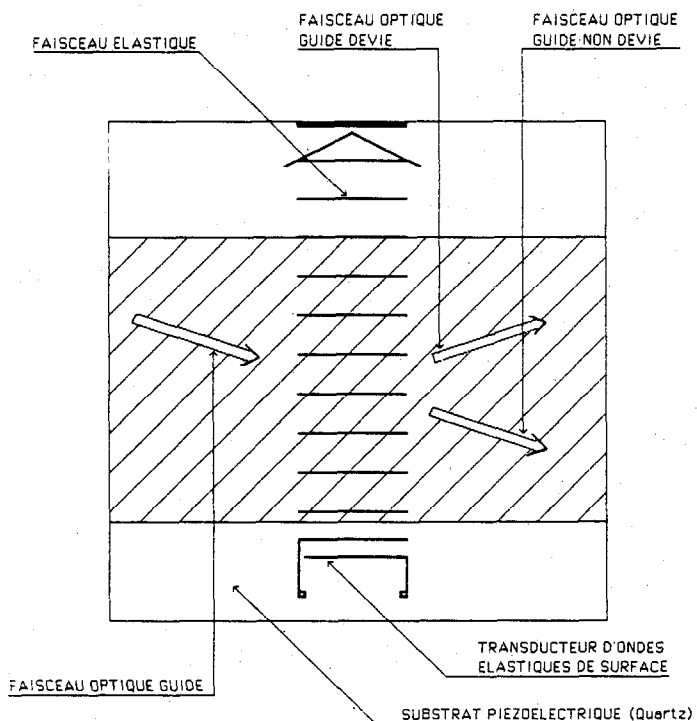


Fig. 4. — Déviateur acousto-optique.

On étudie actuellement des systèmes de commutation optique dans lesquels la déflexion des faisceaux lumineux est assu-

MATERIAUX REFRINGENTS	TRANSDUCTEUR	FREQUENCE ACOUSTIQUE (MHZ)	PUISSANCE ACOUSTIQUE (WATTS)	RENDEMENT OPTIQUE (%)	NOMBRE DE PINCEAUX INDEPENDANTS
QUARTZ	ZnO	650	3	10	200
QUARTZ	Li Nb O ₃	200	3	30	400
αIO ₃ H	Li Nb O ₃	110	10	50	250
Rutile	ZnO	700	3	10	800
PbMoO ₄	Li Nb O ₃	150-300	0,3	≥ 60	1200

Fig. 5. — Caractéristiques de déflecteurs acousto-optiques.

rée par des matrices de réseaux photo-induits inscriptibles et effaçables à volonté (fig. 6).

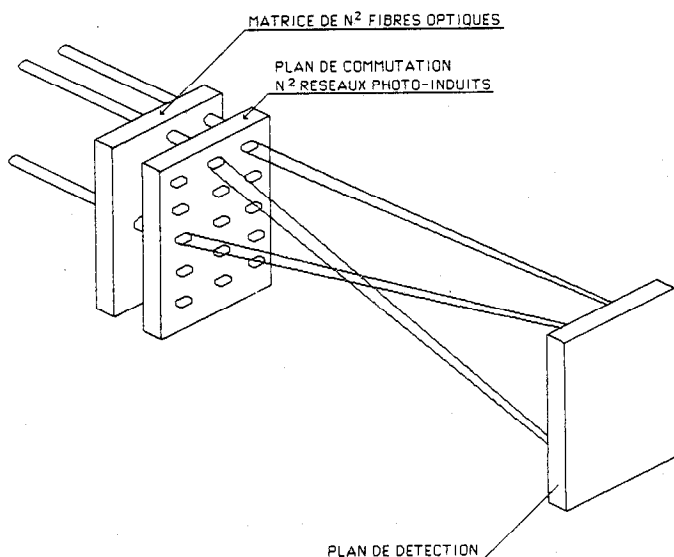


Fig. 6. — Commutation spatiale par réseaux photo-induits.

On cherche maintenant à réduire l'encombrement de ces systèmes et l'énergie nécessaire à leur commande. L'optique intégrée trouve alors tout son intérêt. Voici quelques exemples de dispositifs utilisant cette technologie :

a) LE COUPLE DIRECTIONNEL.

Le principe de base de l'optique intégrée est de confiner la lumière dans des guides d'ondes diélectriques réalisés sous forme planaire sur des substrats transparents aux longueurs d'onde choisies, grâce aux méthodes classiques de photolithographie. Les substrats (par exemple, le niobate de lithium) sont retenus pour leurs coefficients électro-optiques élevés. Les guides d'ondes peuvent être obtenus par diffusion d'atomes (titane par exemple) dans des zones définies par masquage.

Considérons l'exemple du fonctionnement d'un coupleur directionnel (fig. 7).

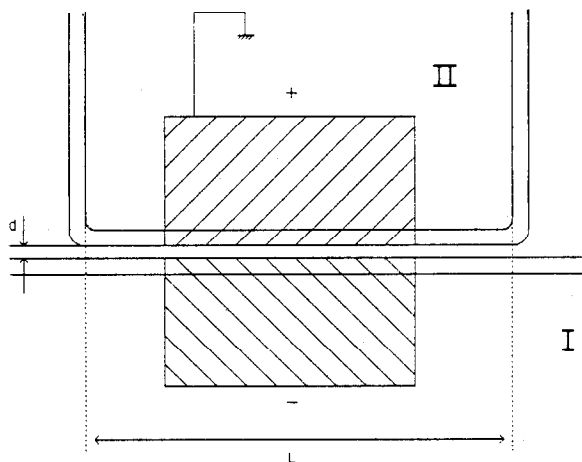


Fig. 7. — Coupleur directionnel.

C'est un système constitué de deux guides d'ondes I et II séparés d'une distance d sur une longueur L . Si une onde lumineuse se propage dans le guide I, il y a échange d'énergie avec II par l'intermédiaire des ondes évanescentes existant dans la région séparant les deux guides. On peut montrer que, si les deux modes couplés des deux guides ont la même constante de propagation, on peut avoir échange total d'énergie entre ces deux modes, la longueur L étant bien choisie.

Pour « commander » ce coupleur directionnel, c'est-à-dire commuter la lumière en I ou en II, on peut :

- faire varier le coefficient de couplage entre les deux guides en modifiant l'indice du milieu intermédiaire ;

- modifier la constante de propagation de l'un des modes (en modifiant l'indice de réfraction du guide par effet électro-optique) ;
- modifier les constantes de propagation des deux modes dans des sens opposés (toujours par effet électro-optique).

Ce sont les deux dernières méthodes qui sont utilisées. Il faut pour cela placer des électrodes sur chacun des guides.

b) LES MODULATEURS EN OPTIQUE INTÉGRÉE.

Nous avons vu que l'on pouvait modifier l'indice d'un guide d'onde plan par effet électro-optique, donc en agissant simplement sur une tension de commande. On peut ainsi contrôler la variation de phase de l'onde qui se propage. C'est un système modulateur de phase.

Pour transformer cette modulation de phase en modulation d'amplitude, il suffit de réaliser un interféromètre optique (fig. 8).

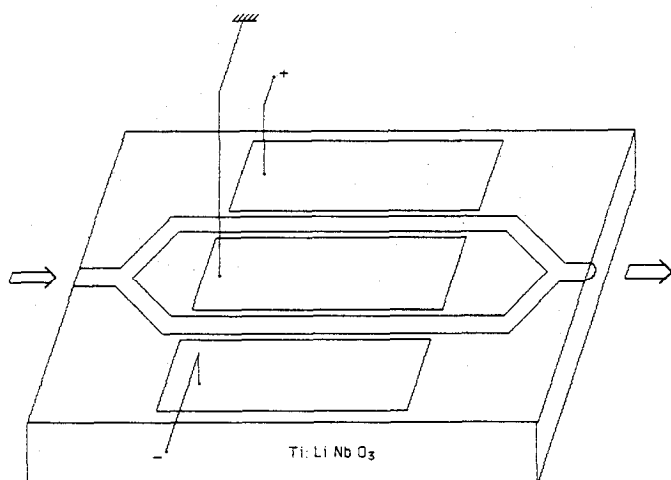


Fig. 8. — Modulateur d'amplitude en optique intégrée.

On peut réaliser l'équivalent en optique intégrée de l'interféromètre de Mach Zehnder.

La lumière guidée est envoyée dans les deux bras d'un interféromètre grâce à un premier embranchement du type Y. Après propagation dans les deux bras, les deux ondes sont recombinées dans le guide de sortie grâce à un deuxième em-

branchement. Suivant la phase relative des deux ondes recombinaées au deuxième embranchement, l'intensité dans le guide de sortie sera maximale ou minimale (lorsqu'elle est minimale, l'énergie correspondante fuit alors dans le substrat).

En utilisant l'effet électro-optique dans un ou deux bras, on peut commander électriquement la sortie du dispositif. Les tensions de commande peuvent être de 1,5 à 6 V.

Quand une fibre monomode est utilisée en sortie, on a pu mesurer des coefficients d'extinction supérieurs à 98 % avec des temps de montée et de descente de l'ordre de 500 ps.

A partir de cette configuration de base, on peut réaliser différents circuits : par exemple (fig. 9), un modulateur à commande numérique qui effectue l'opération de conversion numérique électrique - analogique optique.

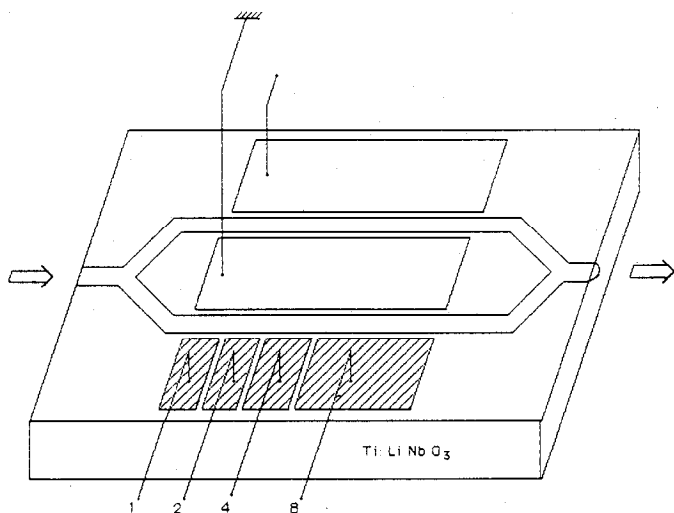


Fig. 9. — Modulateur d'amplitude à commande digitale en optique intégrée.

On peut réaliser aussi des bistables en insérant une boucle de contre-réaction opto-électronique. On voit dans ces exemples tout l'intérêt de l'optique intégrée. En effet, on a ainsi :

— une densité d'énergie qui peut être considérable du fait du confinement de la puissance optique ;

- les conditions de propagation modales, très spécifiques, peuvent être modifiées à volonté par de très faibles variations d'indice induites par effet électro-optique ;
- comme pour les circuits électroniques, les possibilités de miniaturisation sont importantes.

BIBLIOGRAPHIE

- Cours de Monsieur HUIGNARD à l'E.N.S.P.M.
 - *Ophtoélectronique* - G. BROUSSAUD - Masson.
 - Revue technique de Thomson-C.S.F. - Volume 6 - décembre 1974.
 - Revue technique de Thomson-C.S.F. - Volume 15 - septembre 1983.
 - Revue technique de Thomson-C.S.F. - décembre 1983.
 - *New directions in guided wave and coherent optics* - Volume 2 - OSTROWSKY et SPITZ - NATO-ASI série - Nijhoff.
-