

Le rôle des Laboratoires de Marcoussis au sein du groupe CGE

Un exemple : le développement des communications par fibres optiques

Jean-Pierre Hauet

LE groupe CGE constitue un puissant ensemble industriel dont les activités s'ordonnent actuellement autour de deux grands thèmes : l'énergie et les communications.

L'une des caractéristiques essentielles de cet ensemble est sa décentralisation en de multiples filiales, jouissant toutes d'une large autonomie dans le domaine industriel, commercial et social.

L'ensemble du groupe consent au profit de la recherche-développement un effort important : 4 800 MF en 1985, soit 6 % du chiffre d'affaires de l'année. Cet effort est mené pour l'essentiel au sein de chacune des grandes filiales : Alsthom, CGEE Alsthom, Alcatel, les Câbles de Lyon et près de 9 000 personnes s'y consacrent au total dans le groupe.

En amont de ces activités, dont une large part relève du développement plus que de la recherche proprement dite, les Laboratoires de Marcoussis, centre de recherches de la Compagnie générale d'électricité, constituent un pôle de recherche plus avancée, investi d'une double mission :

- d'une part, préparer l'avenir à long terme du groupe, en explorant de nouveaux domaines susceptibles de se révéler, le moment venu, porteurs d'activités nouvelles pour les filiales,
- d'autre part, apporter aux filiales du groupe un soutien scientifique et technique dans l'exécution de leurs propres pro-

grammes de recherche-développement.

La partie la plus amont des travaux de Marcoussis est financée par la CGE maison mère. Les résultats correspondants sont ensuite mis gratuitement à la disposition de l'ensemble des filiales du groupe.

Les travaux menés directement pour le compte des filiales du groupe CGE font par contre l'objet de contrats et de financements spécifiques.

Cette double approche permet à Marcoussis d'accompagner le développement d'un projet depuis sa phase de recherche la plus amont jusqu'à son transfert industriel vers une filiale du groupe.

L'histoire des communications par fibres optiques est une bonne illustration de cette organisation qui s'est révélée à l'expérience très efficace.

Elle s'étale sur quinze ans depuis la mise au point, en 1972, des premiers guides d'onde optiques jusqu'à la mise en service prochaine de la liaison continent-Corse et du premier câble transatlantique en fibres optiques (TAT 8).

Ce parcours scientifique et technologique est pourtant loin d'être achevé. L'utilisation de l'énergie lumineuse comme vecteur de l'information demeure aujourd'hui un domaine en pleine évolution. Une centaine de chercheurs s'y consacrent à Marcoussis et bien que nous ayons choisi, pour des raisons de sobriété dans l'exposé, de nous limiter dans cet article aux transmissions point à point à longue distance et à haut débit, le lecteur comprendra facilement que l'enjeu des liaisons optiques excède très largement ce seul domaine et intéresse à moyen terme tous les secteurs de la communication.

L'optoélectronique constitue une discipline en pleine révolution technologique. Son enjeu industriel et les fonctions nouvelles auxquelles elle peut donner naissance justifient largement qu'un intérêt accru lui soit porté par l'ensemble de la communauté scientifique, comme c'est le cas dès à présent au Japon, aux Etats-Unis et dans notre pays.

1. LE PRINCIPE DES LIAISONS PAR FIBRES OPTIQUES

Découvertes en 1970, les fibres optiques à faible perte ouvrent de larges perspectives dans le domaine des télécommunications. On peut résumer l'innovation qu'elles apportent en affirmant qu'elles permettent de transmettre sans répéteur des informations à des cadences et des distances plus grandes, en occupant un plus faible volume et en coûtant moins cher que les techniques antérieures. Les raisons profondes de ces avantages des fibres optiques ne sont pas faciles à saisir. Nous allons nous efforcer de les faire comprendre en utilisant des concepts simples.

Supposons que nous soyons dans une salle où l'on donne un concert. Nous savons que nos oreilles peuvent recevoir des sons lorsque leur fréquence est comprise à l'intérieur de la bande 10 Hz - 10⁴ Hz. Les instruments sont conçus pour émettre des sons dans cette plage dont la largeur, ou largeur de bande, est pratiquement égale à 10⁴ Hz. En un point donné de la salle, on recevra un signal qui évoluera en fonction du temps. Il est la somme de composantes sinusoïdales dont les fréquences sont inférieures à $v = 10^4$ Hz. Un théorème dû à Fourier nous apprend que le signal ne pourra varier substantiellement en une durée très inférieure à une valeur τ donnée par la relation :

$$\tau = \frac{1}{2\pi v} \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Par contre, il pourra être modifié en une durée égale ou supérieure à τ . On pourra donc en un point de la salle recevoir des informations à une cadence :

$$\frac{1}{\tau} = 2\pi v \approx 6 \cdot 10^4$$

Notre plaisir ne dépendra pas seulement de cette succession de sensations dans le temps. Le son reçu à un instant donné varie dans l'espace et nous savons l'importance de la place des divers instruments. La distance qui sépare nos oreilles joue un rôle essentiel dans l'impression que nous ressentons.

En effet, la physique nous apprend que le son perçu ne peut varier substantiellement entre deux points A et B dont la distance serait très inférieure à la longueur d'onde

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

v étant la vitesse de propagation du son dans l'air ($3 \cdot 10^4$ cm s⁻¹).

A contrario, si cette distance était trop grande, la structure spatiale du phénomène sonore ne serait pas perçue avec suffisamment de détail.

Si l'on admet que la distance moyenne entre nos oreilles est de 15 cm, on voit que celles-ci constituent un système bien adapté à l'analyse des sons dont la longueur d'onde est de l'ordre du double, soit de 30 cm, c'est-à-dire correspondant à une fréquence de :

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^1} = 10^3 \text{ Hz}$$

Cette valeur de 1 000 Hz se situe approximativement au centre de la plage de sensibilité de nos oreilles et nous pouvons ainsi vérifier que le système d'audition de l'homme est organisé pour apprécier avec efficacité les variations spatiales et temporelles du son et de tirer, par exemple, profit des effets stéréophoniques du jeu d'un orchestre.

On peut penser que cette réflexion sur l'écoute de la musique nous écarte de notre but qui est de faire comprendre l'intérêt des ondes optiques pour les télécommunications. Il n'en est rien car cet intérêt est commandé pour l'essentiel par l'interaction entre les propriétés temporelles et spatiales de ces ondes. L'audition de la musique nous montre bien que l'orchestre produit une fonction de x, y, z, t . La *fluctuation spatiale* de l'onde est négligeable à l'intérieur de « grains » de l'ordre de λ . La *fluctuation temporelle* est négligeable à l'intérieur de durées de l'ordre de τ . L'univers produit par l'orchestre est spatio-temporel à quatre dimensions. Il est granulaire et la dimension spatiale des « grains » est proportionnelle à leur dimension temporelle. Pour l'observer, nous disposons de nos oreilles qui nous donnent la capacité d'évaluer l'évolution temporelle déterminée par leur largeur de bande de 10⁴ Hz et celle d'évaluer la structure spatiale grâce à la distance $a = 15$ cm qui les sépare.

Au lieu de l'audition d'un orchestre, nous pourrions considérer la vision d'un paysage. Nous pourrions faire à ce sujet des réflexions analogues. Retenons que, dans ce cas, la bande passante nécessaire pour transmettre le signal à une cadence compatible avec la durée de la rémanence des images sur la rétine est :

$$\Delta\nu \# 10^7 \text{ Hz}$$

Pour transmettre une image de télévision, il est nécessaire de disposer d'une bande passante 10³ fois plus large que pour écouter une symphonie.

Supposons que nous voulions communiquer à grande dis-

tance, par exemple 100 km, le signal correspondant à cette symphonie. Il est clair que la portée du son ne dépasse pas 1 km. On devra donc faire « porter » le signal par les seules ondes capables de transmettre à grande distance, c'est-à-dire les ondes électromagnétiques et pour cela moduler une onde dite « porteuse » au rythme du signal à transmettre.

La modulation consiste à faire varier l'un des paramètres de l'onde porteuse au rythme du signal à transmettre. On peut utiliser une modulation d'amplitude, de fréquence ou de phase. Si la fréquence de l'onde porteuse est ν_0 et la bande passante du signal à transmettre $\Delta\nu$, l'onde porteuse modulée occupera dans le spectre au voisinage de ν_0 une plage de largeur $\Delta\nu$. Ainsi, plus la cadence du signal à transmettre est grande, plus la place occupée dans le spectre par l'onde doit être large.

La fréquence ν_0 de l'onde porteuse doit être choisie de façon à satisfaire les besoins de débit de transmission, en tenant compte de ses propriétés de propagation. On peut admettre, en ordre de grandeur, que ces propriétés restent constantes à l'intérieur d'une plage de largeur $0,1 \nu_0$ autour de ν_0 . Nous disposerons donc, en partant d'une porteuse ν_0 , d'une bande passante :

$$\Delta\nu = 0,1 \nu_0$$

On sait que les *ondes kilométriques*, utilisées par RTL et Europe I, se propagent à grande distance en contournant les collines. Dans cette plage :

$$\nu_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Hz donc } \Delta\nu = 2 \cdot 10^4 \text{ Hz}$$

Nous constatons que ces fréquences permettent de transmettre les sons mais ne sont pas assez élevées pour porter des signaux de télévision.

Les *ondes hyperfréquences* centimétriques et décimétriques permettent d'établir des liaisons entre deux points à condition que ceux-ci soient en visibilité directe. Dans cette plage, on a typiquement :

$$\nu_0 = 10^9 \text{ Hz donc } \Delta\nu = 10^8 \text{ Hz}$$

Il apparaît possible de transmettre 10^8 signaux audibles ou 10 canaux de télévision. Cette possibilité de débit est utilisée dans les câbles hertziens et dans les liaisons entre la Terre et les satellites. Ce débit d'informations reste modeste mais autorise un contact facile avec tous les correspondants d'une vaste région. Les télécommunications spatiales sont ainsi bien adaptées à la transmission d'informations à faible cadence, par exemple celles qui apportent aux navires la connaissance de leur position, mais elles ne peuvent apporter la disponibilité d'un très grand nombre de canaux de télévision.

Les *ondes optiques* dans le visible ou dans l'infrarouge plus ou moins lointain offrent par contre *a priori* des possibilités de transmission d'immenses débits d'informations.

En effet, en se plaçant à une longueur d'ondes de $1,5 \mu\text{m}$ qui, pour des raisons exposées par la suite, se révèle particulièrement favorable, on peut écrire :

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

où c est la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 \text{ m x s}^{-1}$)

λ_0 la longueur d'onde ($1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$)

d'où $\nu_0 = 2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

On dispose alors d'une bande passante

$$\Delta\nu = 2 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$$

permettant théoriquement de transmettre l'équivalent de 10^6 canaux de télévision.

Le problème est d'assurer la transmission de ces ondes optiques car on connaît les limitations évidentes, dues notamment à l'absorption par les nuages, des systèmes de transmissions directs utilisés à certains moments de l'histoire.

Seules les fibres optiques, pour autant que leur atténuation soit suffisamment faible, permettraient de tirer parti de cette aptitude des ondes lumineuses à véhiculer de hauts débits d'informations.

Mais les fibres optiques offrent également des avantages décisifs de faible occupation de l'espace et de modeste coût. Nous avons souligné qu'un phénomène ondulatoire évolue dans un univers à quatre dimensions spatiales et temporelles. Cet univers est granulaire et la dimension spatiale des grains est proportionnelle à la dimension temporelle exprimée en longueur d'onde. Elle lui est inversement proportionnelle si cette dimension est exprimée en fréquence.

Plus la fréquence ν augmente, plus la largeur spectrale et, avec elle, les débits d'informations croissent. Simultanément, les dimensions spatiales diminuent et la théorie des ondes guidées montre qu'un cylindre en verre d'indice décroissant à partir de l'axe peut transmettre une onde sur un seul mode, c'est-à-dire par un seul chemin, si le diamètre du cylindre est de l'ordre de la longueur d'onde, soit environ 10^{-4} cm autour de la plage optique (figure 1).

Le volume occupé par un guide d'onde optique peut donc être très modeste et si, de surcroît, il peut être réalisé avec des matériaux abondants et bon marché, on conçoit que la fibre optique puisse constituer un moyen de transporter des grands débits d'informations dans un faible volume pour un coût modeste.

Au-delà des problèmes technologiques liés à la fabrication de la fibre, il y avait une autre difficulté de taille à surmonter avant de pouvoir en tirer parti. Il convenait en effet de mettre au point des dispositifs d'émission de la lumière suffisamment puissants et suffisamment fins pour pouvoir assurer un couplage satisfaisant avec une fibre de dimension très minime.

Il fallait également être en possession de dispositifs de détection suffisamment sensibles pour pouvoir récupérer le signal lumineux à l'autre extrémité de la fibre afin de l'amplifier et d'en assurer le traitement.

L'ensemble de ces conditions s'est trouvé satisfait dans les années 70 et une grande aventure, à laquelle se sont tout de suite associés les Laboratoires de Marcoussis, est née.

2. LES PERCÉES TECHNOLOGIQUES AYANT PERMIS LE LANCEMENT DES PROGRAMMES DE RECHERCHE À MARCOUSSIS

2.1. Les fibres optiques à faible atténuation

Comme indiqué ci-dessus, l'atmosphère, bien que présentant *a priori* de nombreuses fenêtres de transmission, n'est pas un milieu de transmission convenable compte tenu des instabilités d'indice liées aux hétérogénéités de température et des pertes importantes dues aux éléments qu'elle contient naturellement : vapeur d'eau, brouillard, pluie, neige, fumées, qui absorbent fortement les rayonnements visibles et infrarouges.

Des études furent en conséquence lancées pour la mise au point de liaisons utilisant des conduits de quelques dizaines de centimètres de diamètre permettant de disposer d'un milieu non perturbé par les intempéries. Ces conduits devraient être équipés périodiquement de lentilles et de miroirs pour guider le faisceau. La solution s'avéra coûteuse : en effet, la température du guide doit être homogène et un tel système devrait maintenir les lentilles et les miroirs correctement alignés pour corriger des effets dus aux perturbations externes : vibrations, mouvements de terrain.

En parallèle à ces recherches infructueuses, l'idée d'utiliser

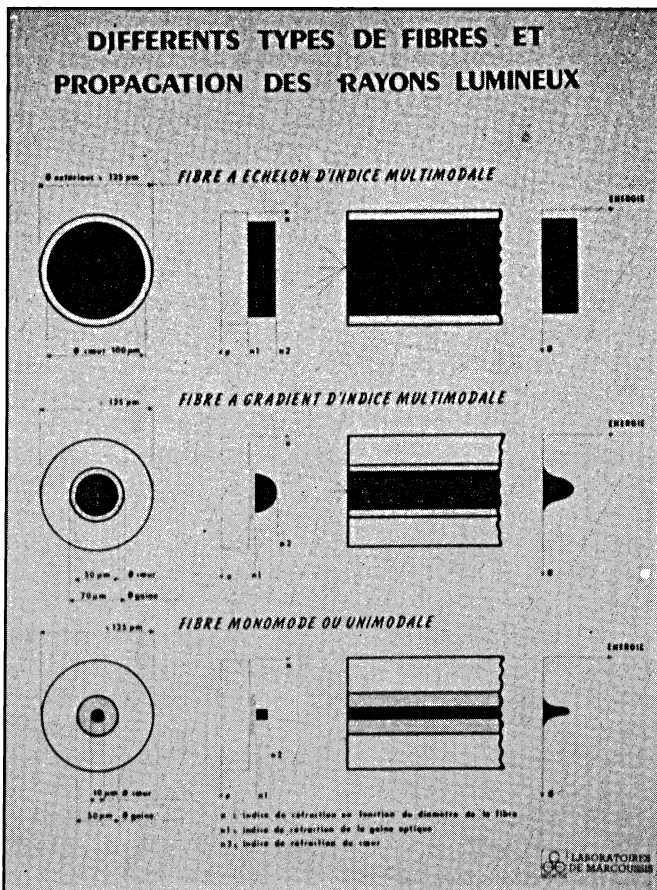


Fig. 1. Différents types de fibres et propagation des rayons lumineux.

une fibre de verre fut évoquée par deux chercheurs du Standard Telecommunication Laboratories en Angleterre, Kao et Hockham en 1966. Les meilleures fibres préparées à cette époque à partir des verres les plus purs connus présentaient des atténuations extrêmement élevées, de l'ordre de 1 000 dB/km.

Une réduction importante de cette atténuation, à moins de 20 dB/km, était nécessaire pour rendre possibles des liaisons opérationnelles. Plusieurs laboratoires lancèrent des recherches visant cet objectif. La Société Corning Glass Works fut la première à mettre au point une fibre à faible atténuation, 20 dB/km, sur quelques centaines de mètres. Ce résultat, obtenu par l'équipe de R. D. Maurer en 1970, fut rapidement amélioré et, en 1972, des fibres d'atténuation de 2 dB/km à 0,8 μm étaient produites par les laboratoires de Corning.

Le procédé utilisé par Corning pour élaborer la préforme de verre à partir de laquelle est étirée la fibre, consiste à hydrolyser, ou plus exactement oxyder à la flamme, des gaz précurseurs — chlorure de silicium, chlorure de germanium — produisant ainsi de fines particules de silice dopée, qui viennent se déposer sur un mandrin.

La composition du mélange gazeux varie durant l'opération, ce qui permet d'obtenir un profil de composition et, de ce fait, une variation de l'indice de réfraction dans le sens transverse de la préforme. Après dépôt, le mandrin est extrait. Le bloc, formé de l'agglomération de fines particules, est transformé, par traitement dans un four, en barreau de verre homogène et exempt de bulles.

Des recherches menées en parallèle aux laboratoires de la Bell Telephone aboutirent en 1974 à la mise au point d'un procédé en phase vapeur assez différent. Le dépôt est effectué à l'intérieur d'un tube support de silice. Comme dans le procédé Cor-

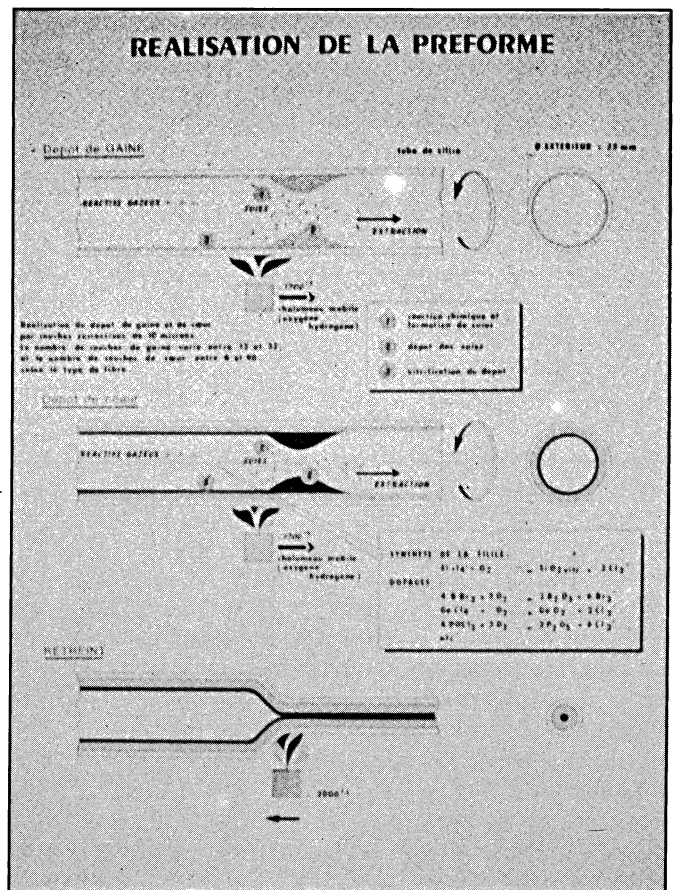


Fig. 2. Elaboration des préformes.

ning, la variation de la composition des gaz précurseurs permet d'obtenir un gradient de composition radial. Après le dépôt, le tube est chauffé à une température voisine de 2000 °C, opération au cours de laquelle on obtient, par rétreint radial, un barreau plein. Ces deux procédés et leurs variantes sont utilisés actuellement pour la fabrication des fibres optiques pour télécommunications (figure 2).

2.2. Les transducteurs électro-optiques à base de semi-conducteurs

La réalisation de transducteurs électro-optiques, émetteurs et récepteurs, adaptés en longueur d'onde, de faibles dimensions, consommant peu d'énergie, modulables à des vitesses élevées, de grande fiabilité, était une condition indispensable au développement des transmissions sur fibre optique.

En ce qui concerne les émetteurs, après la découverte expérimentale de l'effet laser par Maiman en 1960 dans un barreau de rubis, plusieurs équipes, celles de Hall, Nathan et Quist, obtinrent, en 1962, l'effet laser dans un semi-conducteur. Il s'agissait de lasers à arseniure de gallium (GaAs) fondés sur une jonction P-N. Sous une densité de courant suffisante, on obtient l'amplification de lumière par émission stimulée dans la région proche de la jonction au voisinage de laquelle se recombinent les électrons et les trous. La zone active est placée dans une cavité résonnante du type Perot-Fabry dont les miroirs semi-transparents sont les faces clivées du laser. L'utilisation de matière condensée permet d'obtenir des coefficients de gain très importants et par conséquent de réaliser des lasers de très petites dimensions. Cependant, la densité de courant de seuil, c'est-à-dire celle nécessaire pour que le gain par émission stimulée compense les pertes inhérentes au matériau et celles dues à la transmission des miroirs, est très élevée de l'ordre de 50 kA/cm² à 300 °K (27 °C). Il en

résulte qu'un fonctionnement continu n'est pas possible sans échauffement prohibitif. Ce composant ne peut fonctionner qu'à la température de l'azote liquide.

Ce n'est qu'en 1970 qu'Hayashi et Panish aux Etats-Unis et Alferov en URSS obtiennent un fonctionnement en continu à température ambiante. Ils utilisent pour cela une *double hétérostructure laser*. Dans une double hétérostructure, l'injection des électrons et des trous, donc l'émission de photons, est localisée dans une couche active de très faible épaisseur (quelque 0,1 μm). La couche active est localisée entre deux couches de confinement d'un matériau différent. On crée ainsi une sorte de puits où l'énergie est confinée dans un très petit volume. Dans ces conditions, la densité de courant de seuil est considérablement réduite, de l'ordre de 1 kA/cm^2 . Il est par ailleurs possible de localiser l'injection du courant et donc l'émission de lumière sur une faible largeur. On constitue ainsi un ruban de matériau actif dont l'épaisseur est de 0,1 μm , la largeur de quelques μm et la longueur celle de la cavité Perot-Fabry, c'est-à-dire quelques centaines de μm (figure 5).

Il devient possible de réaliser des lasers semi-conducteurs avec de faibles courants de seuil qui fonctionnent en continu à température ambiante. Pour réaliser de tels composants, on fait croître par épitaxie sur un substrat monocristallin, tel que GaAs, des couches successives de matériaux tels que GaAlAs avec des concentrations différentes d'Al. Les couches de confinement sont en GaAlAs avec une forte teneur en Al, la couche active est en GaAs avec une faible concentration en Al.

On peut aujourd'hui réaliser avec ces matériaux des lasers qui émettent dans une gamme de longueurs d'onde comprise entre 0,78 et 0,9 μm , avec de faibles courants de seuil (10 à 80 mA), émettant à des puissances optiques de plusieurs dizaines de mW en continu à 300 °K (27 °C).

En parallèle, le silicium s'est révélé être un matériau excellent pour réaliser des photodétecteurs dans cette gamme de longueurs d'onde.

Cependant, dans le courant des années 70, les progrès réalisés sur les fibres ont montré l'intérêt d'utiliser une autre longueur d'onde, voisine de 1,3 μm . Les matériaux à base de GaAs ne permettent pas de réaliser de tels émetteurs. Le Si ne convient pas pour les détecteurs. Il fallait donc trouver d'autres associations de matériaux, et ce furent les doubles hétérostructures du type InP/GaInAsP/InP. L'ajustement de la composition de la couche GaInAsP permet de réaliser des émetteurs mais aussi des détecteurs fonctionnant dans la gamme de longueurs d'onde 1,2 à 1,6 μm . Depuis, des progrès sur la croissance des matériaux et sur les structures employées ont permis de réaliser des composants très performants en courant de seuil (10 mA), puissance optique émise (quelques dizaines de mW), vitesse de modulation (quelques GHz) et fiabilité (supérieure à 25 ans).

3. LES GRANDES ÉTAPES DES TRAVAUX DES LABORATOIRES DE MARCOUSSIS. L'ÉTAT DE L'ART ACTUEL

3.1. La maîtrise des procédés d'élaboration des fibres optiques

Les Laboratoires de Marcoussis commencèrent leurs études en 1972, dès que furent connus les premiers résultats obtenus par Corning. Les premières recherches portèrent sur l'élaboration de verres de haute pureté et en particulier sur la préparation par différentes voies des matières premières nécessaires : purification de composés de la silice en solution par fixation des impuretés sur résine échangeuse d'ions, production de poudre de silice

par plasma à partir de précurseurs gazeux. Les objectifs visés étaient ambitieux. Il convient en effet de rappeler que les teneurs en impuretés admissibles doivent se situer à des niveaux inférieurs à quelques 10^{-9} g/g alors qu'à cette époque les meilleurs produits considérés comme ultrapurs contenaient typiquement 10^{-6} g/g d'éléments indésirables. Les études menées à Marcoussis permettront d'approcher les valeurs de quelques 10^{-9} g/g et d'élaborer dès 1974 des verres sodo-calciques d'atténuation proche de 10 dB/km.

Lorsque les chercheurs de la Bell Telephone proposèrent en 1974 le procédé de dépôt en tube de silice, les Laboratoires de Marcoussis évaluèrent l'intérêt de cette méthode et une recherche fut immédiatement engagée dans cette voie. Des résultats significatifs, marqués par une atténuation de l'ordre de 1 dB/km à 1,06 μm , furent rapidement atteints.

Les premières recherches furent consacrées aux fibres *multimodes* à gradient d'indice (figure 1). Ces fibres de grande dimension de cœur typiquement 50 μm peuvent être couplées aux diodes électroluminescentes et aux sources laser avec une bonne efficacité. Leur raccordement par soudure pose beaucoup moins de problèmes que les fibres *monomodes* de faible diamètre de cœur (7 à 10 μm). Les bons résultats obtenus au terme de cette phase d'étude permirent de fournir en 1977 une vingtaine de préformes à CLTO, afin que cette filiale des Câbles de Lyon, chargée du développement industriel des fibres, mette au point ses techniques de fibrage (figure 3).

Dès 1979, les Laboratoires de Marcoussis prirent conscience de l'intérêt essentiel des fibres monomodes pour les liaisons à longue distance et à haut débit qui évitent le phénomène d'étalement des impulsions lié aux différences de chemin optique qui apparaissent dans les fibres multimodes. Avec l'aide du CNET, un programme de recherche ambitieux fut lancé qui permit rapidement d'obtenir des résultats très bien situés au plan international : atténuation de 0,38 dB/km à la longueur d'onde de 1,3 μm qui correspond à une fenêtre de transmission particulièrement intéressante de la silice (cf. figure 4).

Cet acquis s'est trouvé concrétisé par la réalisation en 1983 aux Laboratoires de Marcoussis, en coopération avec les filiales du groupe CGE concernées, d'une maquette de liaison qui, présentée aux clients du premier câble transatlantique TAT 8, permit à la CGE de disposer d'atouts techniques équivalant à ceux de ses principaux concurrents américains et anglais.

Les Laboratoires de Marcoussis transfèrent ensuite vers CLTO, de 1984 à 1985 :

- les structures de fibres monomodes adaptées au câble sous-marin optique développé en parallèle par les Câbles de Lyon,
- le savoir-faire pour la fabrication des préformes monomodes et leur fibrage (photos 1 et 2),
- les maquettes d'appareils de mesure nécessaires au contrôle des principales caractéristiques optiques : atténuation, dispersion chromatique, homogénéité optique du guide,
- les méthodes de raccordement par soudure.

Ces éléments clés ont permis de lancer la fabrication du câble continent-Corse et de la partie du câble TAT 8 commandée à la CGE avec un espacement entre répéteurs immergés de 50 km au lieu de 5 km dans les technologies classiques de câbles métalliques.

L'intérêt économique, qui s'attache à l'accroissement des distances entre répéteurs, conduisit dès 1984 à lancer de nouvelles études sur les fibres optimisées au voisinage de 1,55 μm qui correspond à une nouvelle fenêtre de transmission des verres de silice, encore plus avantageuse que la fenêtre à 1,3 μm (figure 4).

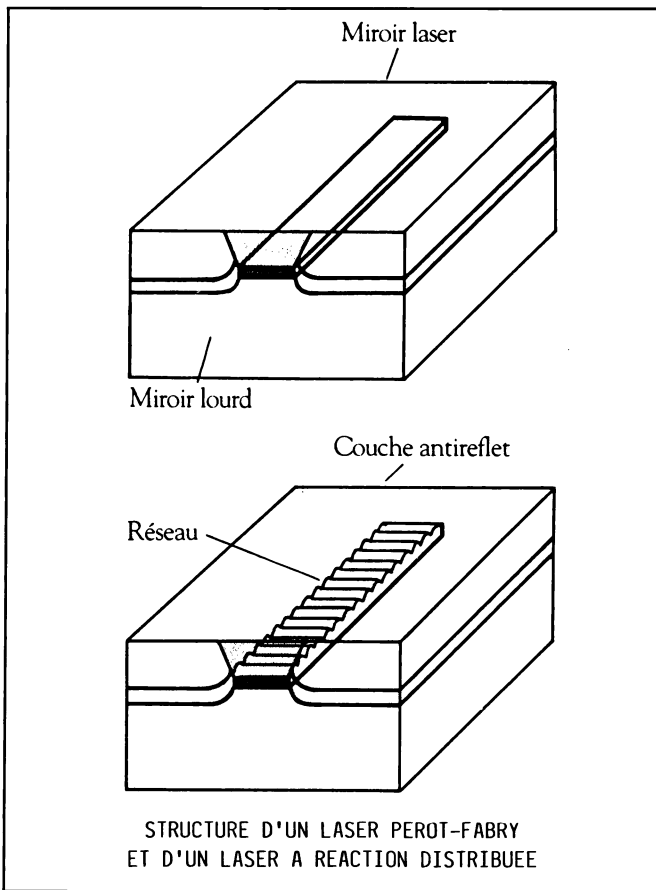


Fig. 3.

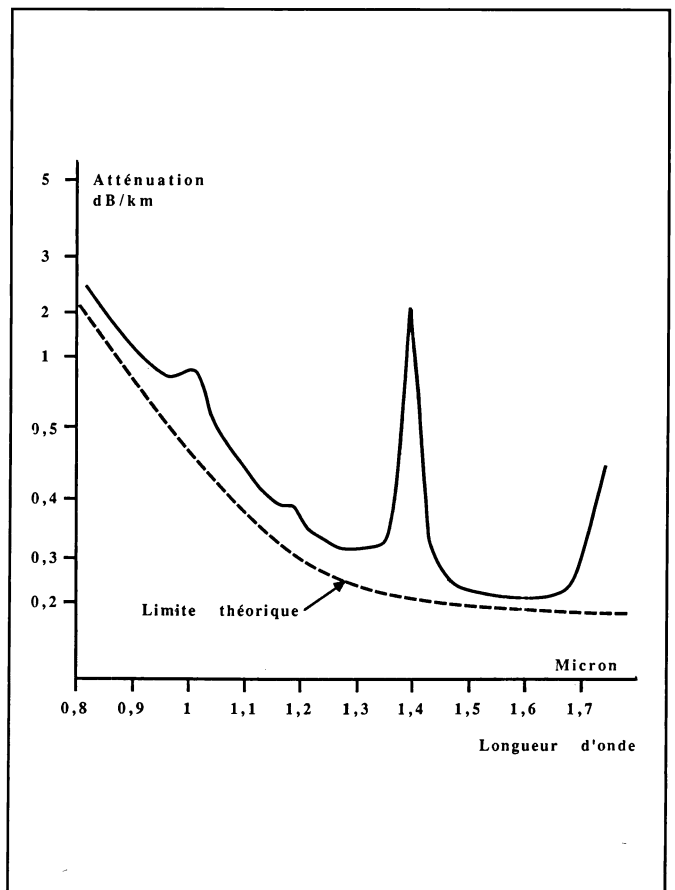


Fig. 4

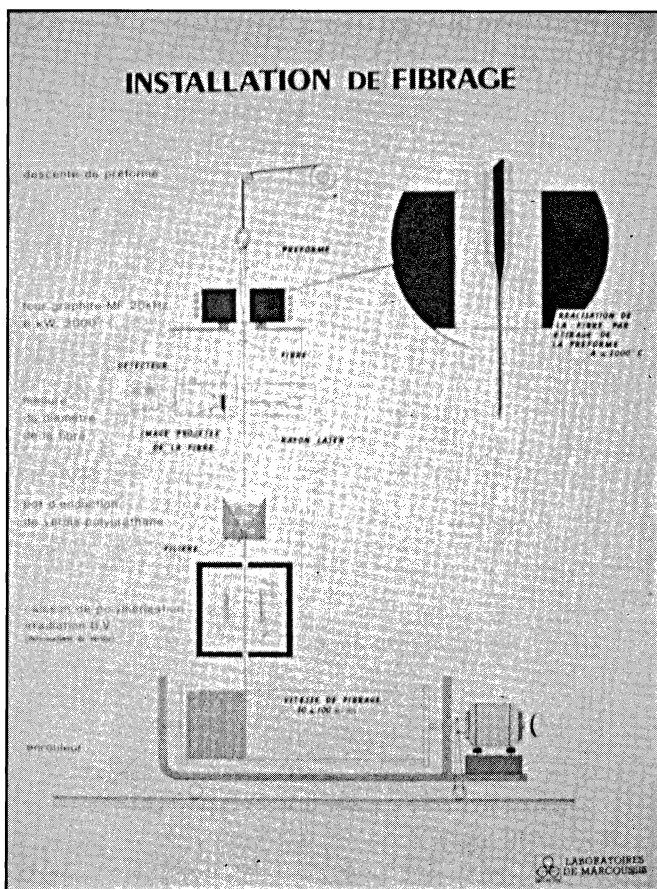


Fig. 5.

Avec un gain de quelques centièmes de dB/km, celles-ci permettront d'accroître de quelques dizaines de kilomètres les distances entre répéteurs ou de relier, sans répéteurs, des îles au continent lorsque les distances les séparant sont de l'ordre de 100 à 150 km.

Ces études aboutissent fin 1986 au transfert vers les Câbles de Lyon de l'ensemble des éléments nécessaires à la définition et à la fabrication de ces fibres dont les caractéristiques essentielles sont :

- atténuation inférieure à 0,25 dB/km,
- dispersion chromatique nulle à 1 550 nm (± 10 nm)'.

3.2. La maîtrise des composants d'extrémité

Les Laboratoires de Marcoussis commencèrent leurs études d'émetteurs optiques en 1972. Ces études portèrent d'abord sur les diodes électroluminescentes et les diodes laser à base de GaAs/GaAlAs pour émission autour de 0,85 μ m et conduisirent à la réalisation, en 1974, pour la première fois en France, d'un laser fonctionnant en continu à 300 °K.

En 1979, en cohérence avec la politique suivie sur les fibres optiques, les Laboratoires de Marcoussis décidèrent, dans le cadre de la stratégie industrielle définie par CIT Alcatel et les Câbles de Lyon, de porter tous leurs efforts sur les composants à base d'InP, adaptés à la longueur d'onde de 1,3 μ m et destinés aux transmissions à grandes distances.

Pratiquement simultanément, en 1980, CIT Alcatel décida de développer un département spécialisé dans les composants optoélectroniques (CIT-CSO) qui, implanté sur le site même de

Fig. 3. Procédés de fibrage.

Fig. 4. Atténuation de la lumière dans les verres de silice.

Fig. 5. Structure d'un laser Perot-Fabry et d'un laser à réaction distribuée.

Marcoussis, constitue depuis l'aval industriel privilégié de la Division composants optoélectroniques des Laboratoires.

Dans le domaine 1,3 μm , les premiers travaux de Marcoussis se portent sur une diode électroluminescente qui est transférée à CIT-CSO dès 1981.

L'activité est ensuite centrée pour les besoins des transmissions sous-marines sur le laser à ruban enterré à 1,3 μm . A cette époque, de tels lasers n'existent pas en France. Un transfert de ce composant sera fait vers Alcatel en 1983. Les performances obtenues sont très satisfaisantes et ces composants seront employés dans les transmissions sous-marines et notamment dans les grands projets évoqués précédemment.

Depuis cette date, les transferts vers CIT-Alcatel, devenue Alcatel, se sont accélérés avec notamment un transfert de l'ensemble de la tête optique laser (photo 3, figure 6) et celui, en 1986, d'un laser à ruban enterré émettant à 1,55 μm et adapté par conséquent aux exigences de cette nouvelle fenêtre de transmission.

Parallèlement, les études sur les photodétecteurs engagées dès 1966 se sont poursuivies : photodétecteur au silicium tout d'abord, puis photodiodes à structure PIN (Positif - Intrinsic - Négatif), au germanium ensuite (photo 4).

La collaboration avec le CNET permet d'aborder suffisamment tôt l'étude des photodiodes rapides et de photodiodes dites « à avalanche » qui intègrent, dans leur structure, un étage d'amplification. Ces photodiodes se révèlent particulièrement intéressantes pour les liaisons à 1,3 μm .

On constate, en fait, que la consécration de cette longueur d'onde, par opposition aux 0,8 μm des premières liaisons optiques, a déclenché une accélération impressionnante dans le domaine de l'optoélectronique.

De nombreux laboratoires, japonais en particulier, ont investi massivement dans ce domaine.

Aux Laboratoires de Marcoussis, une organisation à deux niveaux — pré-développement et études — a été mise en place, d'une part pour satisfaire les besoins à court terme d'Alcatel, d'autre part pour suivre les progrès de la recherche dont l'évolution demeure exponentielle.

Dans le domaine des études, un accent particulier a été mis, à partir de 1984, sur les lasers monochromatiques à résonateur distribué, appelés en anglais DFB lasers (Distributed Feed Back lasers) (figure 5).

Il est apparu en effet très tôt que les lasers à oscillateur Perot-Fabry étaient peu sélectifs en longueur d'onde, car ils émettent sur plusieurs modes longitudinaux. Dès 1971, Kogelnik et Shank des Bell Lab's ont proposé d'intégrer dans la structure un réseau de diffraction qui, couplé à la zone active, permet d'apporter une grande sélectivité en longueur d'onde et de limiter l'émission à un seul mode optique. Dans la pratique, ce besoin n'était pas justifié à la longueur d'onde de 0,85 μm et peu de travaux ont été faits sur les lasers à base de GaAs. La situation est de toute autre nature à 1,3 ou 1,55 μm , où la dispersion chromatique de la fibre rend nécessaire l'emploi d'émetteurs monochromatiques pour les transmissions à grande distance et haut débit. Ce problème reste cependant technologiquement extrêmement difficile. Ce n'est qu'en 1982 que Suetatsu réalise au Japon le premier laser de ce type dit à résonateur distribué (DFB) émettant en continu à température ambiante au voisinage de 1,55 μm . Depuis, les travaux se sont intensifiés sur ce composant qui est aujourd'hui de première importance.

Les Laboratoires de Marcoussis ont réalisé en 1985 leurs premiers lasers DFB dont ils améliorent actuellement les performances dans le cadre d'un programme sur les liaisons à haut débit soutenu par la DAI (Direction de affaires industrielles et internationales du ministère de l'Industrie, des Postes et Télé-

communications et du Tourisme).

L'élaboration de composants aussi perfectionnés nécessite de maîtriser un ensemble de technologies de base qui, elles-mêmes, sont en pleine évolution.

Ainsi, les Laboratoires de Marcoussis ont-ils démarré en 1981 l'étude de la croissance épitaxiale par jets moléculaires (photo 5). Aujourd'hui, cette technique paraît appelée à un brillant avenir. Elle permet une grande souplesse dans la croissance des couches épitaxiales, un contrôle très précis des épaisseurs, une excellente homogénéité. Elle semble être un outil puissant pour la nouvelle ère technologique qui s'ouvre, celle de la micro-optoélectronique intégrée.

4. LE MARCHÉ DES TRANSMISSIONS OPTIQUES ET SON ÉVOLUTION

L'accroissement régulier de la capacité de transmission des câbles coaxiaux métalliques et le développement des liaisons par satellite avaient permis de répondre jusqu'à ces dernières années aux besoins en pleine expansion d'échanges d'informations.

Pourtant, ces réseaux qui acheminent actuellement 80 % des transmissions téléphoniques sont loin de satisfaire aux futurs besoins. Le développement des transmissions d'images et de données implique en particulier la mise en service de nouvelles artères de très grande capacité. La figure 7 représente pour les câbles sous-marins l'accroissement constaté au cours des quinze dernières années du réseau mondial de télécommunications. Elle montre une croissance exponentielle du nombre de circuits mis en service.

Il est souvent admis que la satisfaction des besoins futurs, dont l'évolution ne devrait pas être en retrait par rapport à celle du passé, se fera en priorité par recours aux transmissions par satellites.

En fait, les possibilités nouvelles offertes par les fibres optiques sont considérables et leur coût est déjà tout à fait comparable à celui des liaisons par satellites.

Le tableau ci-dessous précise à cet égard l'évolution du coût des liaisons à longue distance par câbles et par satellites.

COÛT ANNUEL COMPARATIF DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE TRANSMISSIONS À LONGUE DISTANCE

TAT	Câbles transatlantiques		Liaisons satellites Intelsat		
	Nombre de circuits	Coût par circuit et par an		Nombre de circuits	Coût par circuit par an et en \$
1	48	43 038	I	240	83 600
2	48	37 066	II	240	36 530
3	128	16 471	III	1 200	5 570
4	128	16 406	IV	4 000	2 890
5	720	4 572	IVA	6 000	2 050
6	4 000	1 970	V	12 000	1 230
7	4 200	1 714	VA	13 500	1 040
8 ¹	40 000	400	VI	40 000	445

1. Câble sous-marin transatlantique à fibres optiques.

Ce tableau fait clairement apparaître :

- l'asymptote à laquelle sont parvenues les liaisons coaxiales (comparaison entre les liaisons transatlantiques TAT 6, TAT 7 et les TAT précédents),
- l'effet déterminant du changement de technologie, câbles coaxiaux et câbles à fibres optiques (comparaison entre TAT 7 et TAT 8),
- les mêmes niveaux de coût constatés actuellement pour les deux types de liaisons câbles et satellites (comparaison entre TAT 8 et Série VI d'Intelsat).

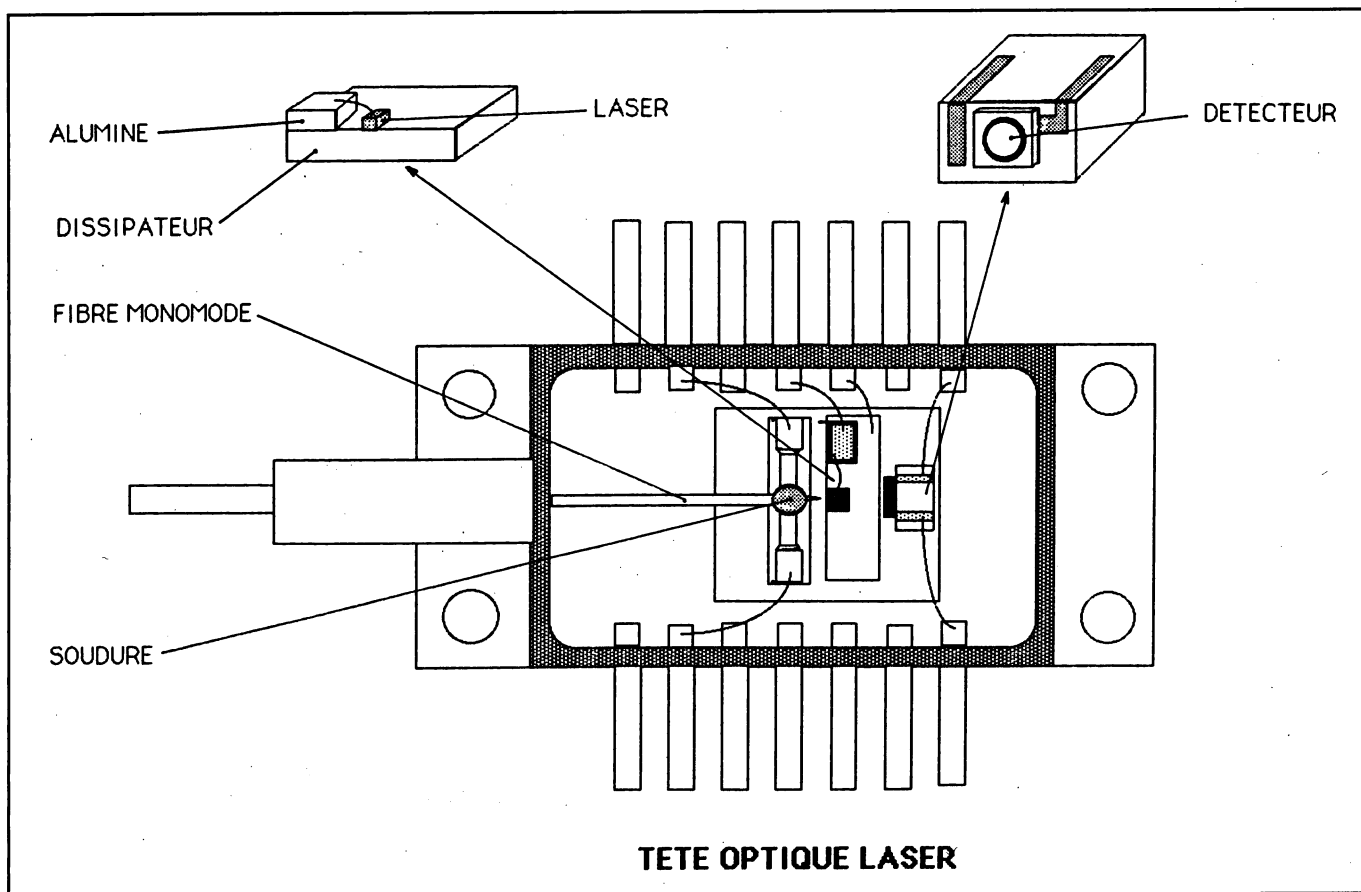


Fig. 6. Schéma de tête optique laser.

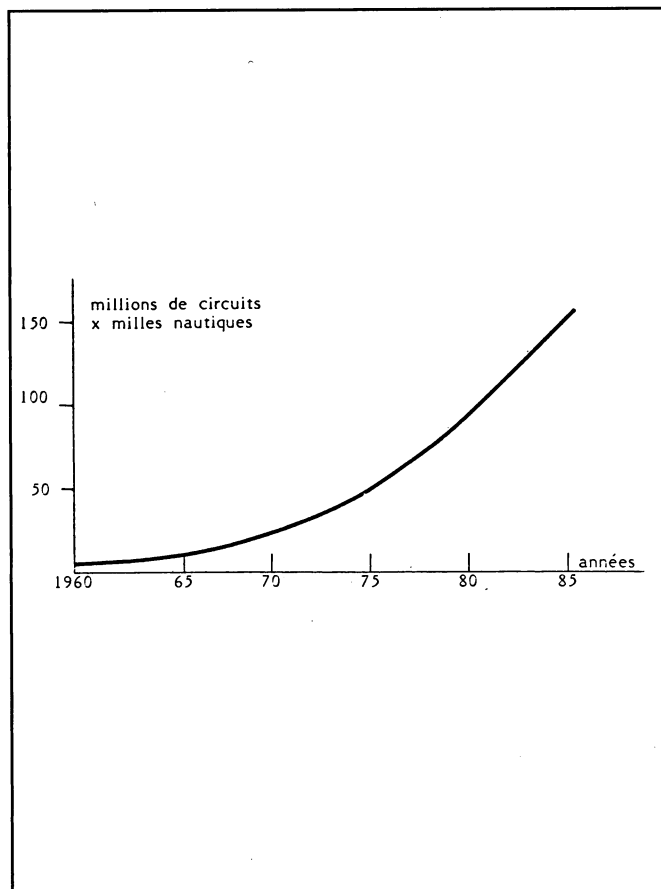


Fig. 7. Nombre de circuits installés dans le monde.

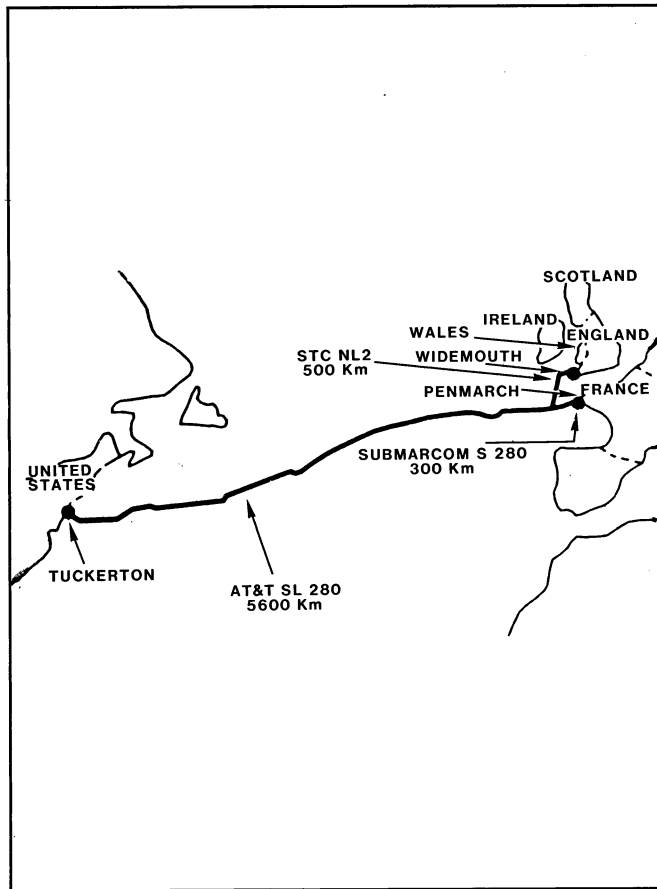


Fig. 8. Liaison transatlantique TAT 8.

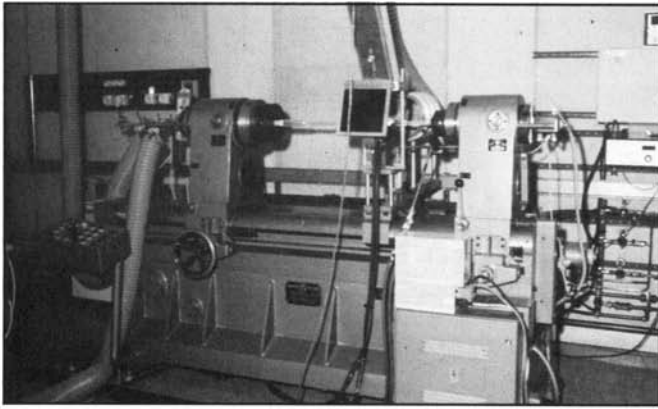


Photo 1.

Par ailleurs, les avantages des liaisons par câbles : meilleure qualité de transmission, discrétion, plus grande fiabilité, demeurent des atouts supplémentaires non négligeables qui devraient leur permettre de prendre une bonne part des nouveaux marchés.

Cette situation explique l'intérêt très vif des constructeurs et des exploitants de liaisons sous-marines pour les câbles à fibres optiques et justifie les efforts considérables de recherche et de développement consacrés à ce domaine. La mise en place à un rythme accéléré de liaisons à fibres optiques se traduit concrètement par une reprise de la croissance du trafic par liaisons sous-marines qui semblait avoir atteint un plafond depuis quelques années :

- Pose d'une liaison transatlantique de 6 500 km, TAT 8, en 1988 entre les USA, l'Angleterre et la France, débit 2×280 Mb/s à $1,3 \mu\text{m}$ soit $2 \times 20\,000$ voies téléphoniques réparties entre 28 copropriétaires (fig. 8).

- Pose d'une liaison transpacifique de 15 000 km, HAW4/TPC3, en 1989 : Californie, Hawaï, Japon, Philippines, débit 2×280 Mb/s à $1,3 \mu\text{m}$ également.

Par ailleurs, la déréglementation qui s'étend à plusieurs des principaux pays industrialisés : Etats-Unis, Japon, Angleterre, stimule le marché. Des investisseurs privés proposent d'installer une liaison transatlantique additionnelle et d'en louer des canaux à des utilisateurs privés pour satisfaire aux besoins croissants en transmission de données. Parallèlement, le lancement d'un projet TAT 9, en technologie $1,55 \mu\text{m}$, est déjà discuté.

Le domaine des liaisons par fibres optiques est un domaine extrêmement concurrentiel. En matière de fibres, la concurrence est américaine (Corning et ATT), anglaise (STC) et japonaise (Sumitomo, Fujikura, Furukawa). En matière de composants optoélectroniques, elle est essentiellement japonaise : Hitachi, Fujitsu, Nec et subsidiairement américaine : ATT, Lasertron.

Les résultats obtenus à Marcoussis ont permis au groupe CGE et à ses deux grandes filiales, les Câbles de Lyon et Alcatel, de disposer de technologies propres et de constituer :

- une filiale spécialisée dans les fibres optiques (CLTO) occupant dès à présent plus de 125 personnes à Bezons ;
- un département de 130 personnes spécialisé dans les composants optoélectroniques (Alcatel-CSO).

Réunis au sein de Submarcom, les Câbles de Lyon et Alcatel ont réalisé la liaison continent-Corse de 380 km qui doit être mise en service en 1987 et qui pourra être prolongée vers la Sardaigne et la Sicile. Ils sont en charge aux côtés d'ATT (USA) et de STC (GB) de la bretelle dirigée vers la France de la liaison transatlantique TAT 8 qui possédera, après sa mise en service en 1988, une capacité de transmission équivalant à celle de tous les câbles sous-marins transatlantiques déjà posés.

Des négociations sont en cours pour la fourniture de nou-

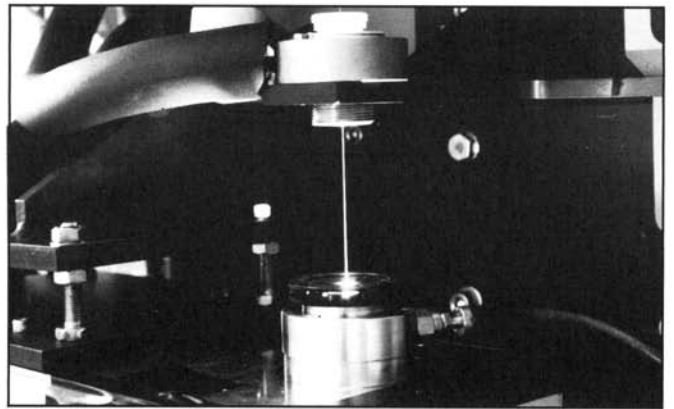


Photo 2.

velles liaisons telles que France-Portugal, Irlande-Angleterre ou le futur TAT 9. En parallèle, des marchés des liaisons terrestres à haut débit entre métropoles ont été obtenus, aux Etats-Unis notamment.

Nous n'en sommes encore toutefois qu'à l'aube du développement des transmissions optiques. Les capacités des câbles optiques permettent de répondre aux futurs besoins de réseaux de télécommunications, tels qu'on peut les imaginer dans les premières décennies du siècle prochain.

Les progrès technologiques attendus sur les fibres, sur les composants et sur les systèmes permettent de l'affirmer avec une quasi-certitude.

5. LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUES À MOYEN TERME

La conquête par l'optique et par la photonique du monde des télécommunications a commencé en 1970. Les progrès accomplis sont immenses mais la victoire n'est pas encore totale.

Nous savons guider les ondes pour un coût modeste sur des distances déjà très grandes. Par contre, nous ne sommes pas encore parvenus à tirer parti du très large spectre qui nous est offert en nous donnant la possibilité d'envoyer sur de très longues distances un débit considérable d'informations dans les fibres.

Schématiquement, nous sommes capables de mettre en œuvre une bande passante de 10^9 Hz alors que la bande passante théoriquement disponible est de 10^{13} Hz. Mais de nouveaux progrès se préparent tant en ce qui concerne les débits d'information que les distances de transmission.

5.1. De nouveaux progrès sont attendus sur les fibres

Une bonne maîtrise des procédés d'élaboration va permettre de produire à très court terme d'une manière reproductible des fibres dont l'atténuation n'excédera pas $0,22 \text{ dB/km}$ à $1,55 \mu\text{m}$, valeur déjà obtenue en laboratoire. Le profil d'indice en triangle ou en trapèze de ces fibres (figure 1) est obtenu par l'ajout de germanium.

L'atténuation théorique limite de la silice liée à la diffusion Rayleigh du matériau est de $0,13 \text{ dB/km}$ à $1,55 \mu\text{m}$. Les dopants introduits pour accroître l'indice et obtenir les profils adaptés à ce type de fibre augmentent cette diffusion de 5 centièmes de dB/km. Afin de s'affranchir de ces quelques centièmes de dB/km, il apparaît possible de développer des structures particulières de fibres à cœur de silice pure et gaine optique « enterrée ». La diffé-

Photo 1. Fabrication des préformes.

Photo 2. Détail de l'opération de fibrage.

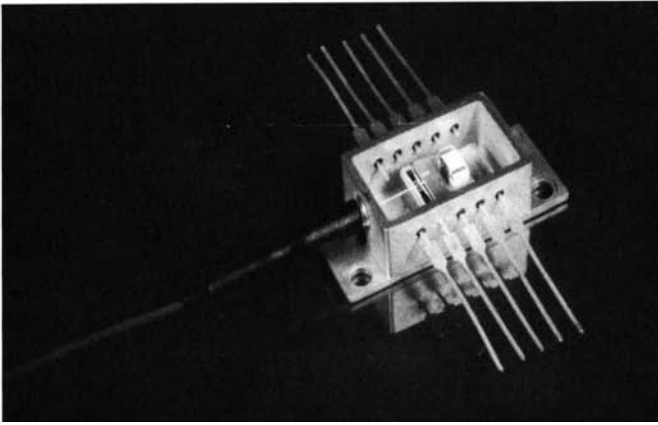


Photo 3.

rence d'indice entre le cœur et la gaine est obtenue en ajoutant à la silice constitutive de la gaine, du fluor dont la propriété, à l'inverse du germanium, est d'abaisser l'indice de la silice.

La recherche de plus faibles atténuations, après être parvenue au voisinage des limites théoriques du verre de silice, implique de changer de matériau. Les meilleurs candidats sont actuellement les verres fluorés qui transmettent la lumière dans une large plage de longueur d'onde pouvant s'étendre jusqu'à 6 μm . La diffusion Rayleigh variant en λ^4 , l'atténuation théorique de ce type de matériau se situe à un très faible niveau, de l'ordre du centième de dB/km.

Ces verres, découverts à l'université de Rennes en 1975, sont moins bien connus que les verres de silice. Leur élaboration est actuellement plus délicate, leurs propriétés chimiques et en conséquence leur tenue à la corrosion mal maîtrisées. Pour se rapprocher des limites théoriques d'atténuation permises, il est nécessaire d'engager des recherches importantes, dont les chances d'aboutissement ne sont pas aujourd'hui indiscutables, mais dont l'enjeu est évident. Les laboratoires des compagnies industrielles et des organismes publics engagés dans la compétition ouverte dans le domaine des communications optiques ont en conséquence mis en place des programmes de recherches importants pour étudier ces nouveaux matériaux. Les Laboratoires de Marcoussis sont évidemment engagés dans cette compétition, en liaison avec des équipes universitaires.

Les progrès ainsi espérés, dans un futur peut-être encore lointain, sur les fibres optiques à base de verre fluoré nécessiteront l'étude et la mise au point de composants laser et de photodétecteurs adaptés à la nouvelle gamme de longueurs d'onde 2 à 5 μm . Cela passera préalablement par l'étude de nouveaux matériaux, l'InP et ses dérivés n'étant plus adaptés à ce domaine de longueurs d'onde.

Des travaux préliminaires sont en cours sur ce thème à Marcoussis, en liaison avec l'université de Montpellier.

5.2. Les transmissions cohérentes permettront d'accroître les distances et les débits

Un point essentiel mérite d'être souligné : dans les systèmes actuels de communications optiques, les lasers semi-conducteurs sont utilisés comme de simples émetteurs de lumière, dotés d'une très forte brillance dans leur direction d'émission privilégiée, mais dont la propriété de cohérence temporelle des ondes électromagnétiques qu'ils émettent n'est pas utilisée.

La possibilité de disposer à relativement court terme de sources monochromatiques de très faible largeur spectrale permet d'envisager de tirer parti de cette propriété en ayant recours à des méthodes de détection hétérodyne venant se substituer à la détection directe aujourd'hui utilisée.

Expliquons-nous : dans l'état actuel des systèmes, l'onde

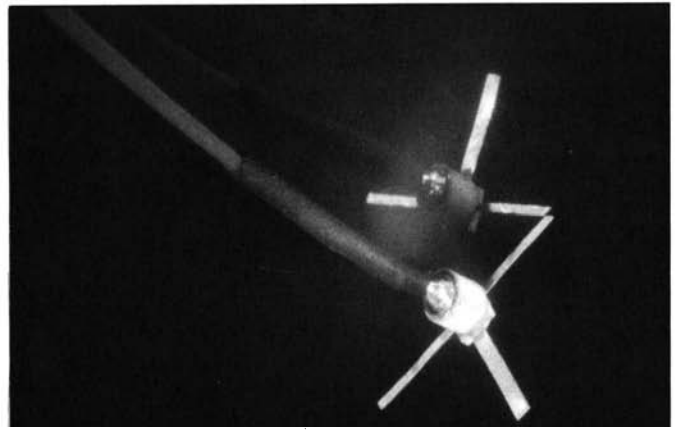


Photo 4.

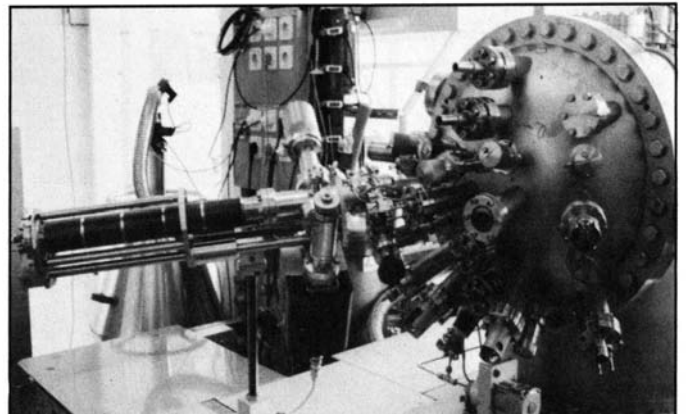


Photo 5.

porteuse, modulée par le signal, vient réagir directement sur le détecteur qui est une diode, ne transmettant le courant que dans un sens et qui, à la sortie, restitue un signal modulé conformément à l'enveloppe de l'onde porteuse qui contient l'information.

Supposons que le guide d'ondes transmet plusieurs ondes, par exemple trois ondes, dont les couleurs sont bleues, vertes et rouges. Une détection directe ne permettra pas de séparer les signaux transportés sur chacune des trois ondes. Il ne sera donc pas possible d'effectuer correctement la réception. Si on dispose d'un oscillateur optique local, dont on peut choisir la fréquence, nous pourrons faire interférer celle-ci sur le détecteur avec l'onde reçue. En prenant une fréquence de l'oscillateur proche de celle de l'onde bleue, on obtiendra une fréquence de battement avec celle-ci suffisamment faible pour être détectée et amplifiée à la sortie du détecteur par un amplificateur adapté. Le battement avec les ondes vertes et rouges aura une fréquence beaucoup plus grande et ne sera pas amplifié. Cette méthode, dite de détection hétérodyne, permet de recevoir celles des nombreuses ondes guidées par la fibre à laquelle on a choisi de s'intéresser. Elle apporte la possibilité de recevoir le grand nombre de canaux de télévision que la fibre est capable de guider.

Cette technique d'hétérodynage offre un double avantage :

- une plus grande sensibilité des puissances détectées par rapport à la détection directe permettant d'accroître les distances de transmission sans régénération ;
- un accès aux très hauts débits par des méthodes de multiplexage permettant de tirer parti de la grande largeur de bande du guide.

Photo 3. Tête optique destinée aux liaisons sous-marines.

Photo 4. Photodiode réceptrice.

Photo 5. Four d'épitaxie par jets moléculaires.

Elle suppose que puissent être réalisés des lasers de très grande finesse spectrale et accordables électriquement en longueur d'onde.

5.3. Une possibilité d'avenir : l'amplification optique

Si la transmission le rend nécessaire, il faut insérer sur les parcours des amplificateurs chargés de régénérer le signal. Aujourd'hui, on ne sait pas réaliser cette fonction dans des conditions préservant la très grande largeur de bande dont on dispose sur la fibre. En effet, dans un répéteur, on effectue une détection directe et on réémet au rythme du signal détecté.

Des amplificateurs optiques, soit semi-conducteurs, soit utilisant d'autres effets tels que l'effet Raman, sont parfaitement concevables. Des gains de plus de 20 dB ont été obtenus en laboratoire et leur installation, soit à l'émission, soit à la réception, soit en ligne, paraît très prometteuse dans un futur relativement proche.

5.4. L'optoélectronique intégrée et les nouvelles fonctions optiques

Les progrès considérables qui ont déjà été réalisés, et qui vont continuer à l'être, dans les technologies relatives aux matériaux à base d'InP, permettront, par un contrôle de plus en plus fin des technologies d'épithaxie, par la maîtrise d'éléments de dimension submicronique, par les progrès effectués dans le dépôt des couches de passivation, de réaliser de véritables circuits microoptoélectroniques intégrés monolithiquement sur un même substrat d'InP. Ces circuits pourront associer des fonctions optiques et électroniques, par exemple regrouper une photodiode et un premier étage d'amplification. Ils pourront regrouper des fonctions optiques entre elles, par exemple plusieurs lasers émettant chacun à une longueur d'onde différente, les guides optiques de couplage et un modulateur électro-optique.

On peut également penser que la réalisation de structures à puits quantiques, de superréseaux, c'est-à-dire des empilements d'un grand nombre de couches alternées de deux matériaux différents de très faibles épaisseurs, permettra de réaliser des effets nouveaux ou de modifier sensiblement les propriétés habituelles des semi-conducteurs. On peut ainsi espérer réaliser de nouveaux photodétecteurs beaucoup plus sensibles, des lasers à performances améliorées en seuil, en tenue et en température, réaliser des éléments bistables optiquement très sensibles.

Sans prétendre atteindre le degré d'intégration de l'électronique sur silicium, car les ondes optiques s'accommodent mal des rayons de courbure trop faibles, il est probable qu'à échéance de quelques années se trouveront disponibles, à des coûts de plus en plus réduits, de nouveaux composants dont les performances permettront de tirer pleinement parti des immenses possibilités qu'offrent les transmissions optiques.

CONCLUSION

L'optoélectronique est devenue indispensable aux transmissions à longue distance et à haut débit, grâce aux progrès rapides intervenus dans le domaine des fibres optiques et dans celui des composants optoélectroniques.

Les percées technologiques actuelles, introduction de nouvelles fonctions et progrès en direction de l'optoélectronique intégrée, permettent d'affirmer qu'à plus ou moins long terme, elle va également jouer un rôle important et parfois décisif dans des domaines d'application beaucoup plus larges : transmissions entre satellites, commutation, réseaux locaux, informatique.

Dans cette évolution de portée historique, on entend parfois dire que le « photon » va remplacer l'« électron ». Il faut adhérer à cette affirmation tout en la nuanciant.

Si on appelle « électronique » les opérations d'amplification,

d'oscillation, de détection, etc., réalisées dans les transistors et dans les circuits intégrés, on constate que leur cadence est limitée par la mobilité des charges dans la matière condensée qui est de l'ordre de 1 000 m/s. Compte tenu de l'épaisseur des couches à mettre en œuvre qui sont de l'ordre de 10^{-4} cm, il est difficile de dépasser des largeurs de bande de 10^{10} Hz, c'est-à-dire 10^9 ou 10^8 fois plus faibles que celles permises par la photonique optique.

Dans certaines circonstances, la photonique optique viendra donc remplacer l'électronique incapable de faire face aux cadences d'informations qui lui sont imposées. Mais l'électronique apportera son aide pour effectuer des calculs ou réaliser des automatismes.

Il faut donc prévoir un progrès d'ensemble, largement déterminé il est vrai par ceux de la photonique, dans le cadre d'une coopération concertée de la photonique et de l'électronique au sein de cette science nouvelle qu'est l'optoélectronique.

Une telle évolution mettra à la disposition des hommes des moyens plus efficaces et moins coûteux pour communiquer entre eux et jouera à coup sûr un rôle essentiel dans l'évolution culturelle et économique de notre monde.

Elle suppose la maîtrise de technologies et de composants de plus en plus complexes dont la mise au point exige des efforts de recherche-développement dont le poids relatif dans la valeur des produits finals prend des proportions inconnues jusqu'à présent.

Pourtant, dans la compétition internationale qui s'exerce, seuls subsisteront les groupes qui, au-delà de leurs compétences traditionnelles de systémiers et d'ensembliers, bénéficieront de l'indépendance technologique leur permettant d'offrir à leur clientèle potentielle les produits les plus innovants.

Les Laboratoires de Marcoussis s'y emploient au profit du groupe CGE, aux côtés des équipes spécialisées d'Alcatel et des Câbles de Lyon.

Il est heureux, tant l'effort à accomplir est immense, que l'Europe prenne progressivement conscience à la fois de sa vulnérabilité et de son aptitude à la surmonter, en mettant sur pied, dans le cadre des programmes communautaires notamment, la coopération internationale qui seule permettra à nos industries de rester présentes dans des marchés où les protections nationalistes sont désormais illusoire et de créer ou de sauvegarder les emplois dont notre économie a tant besoin.

Notes

1. A titre de comparaison, pour situer les ordres de grandeur évoqués dans ce chapitre, on peut noter qu'une vitre de qualité moyenne présente une atténuation de $2 \cdot 10^5$ dB/km. Trois dB/km (décibels par kilomètre) correspondent à la diminution, sur un kilomètre, de la moitié de la puissance lumineuse transmise. De façon précise, l'atténuation, exprimée en dB, est égale à :

$$-10 \log \frac{P_1}{P_0}$$

où P_0 est la puissance lumineuse injectée et P_1 la puissance récupérée.

2. Un matériau de type P comporte un déficit d'électrons (ex. : matériaux de la colonne III de la classification de Mendeleïev : In, Ga). Un matériau de type N en comporte un excès (ex. : matériaux de la colonne V : As, P).

3. Les fibres « multimodes » à large cœur permettent la propagation d'ondes ayant un grand nombre de modes électromagnétiques différents. Le gradient d'indice est calculé pour que le temps de propagation demeure relativement voisin quel que soit le mode.

Les fibres « monomodes » n'autorisent la propagation que selon un seul chemin optique (cf. figure 1).

4. La dispersion chromatique est liée à la variation de l'indice, donc de la durée de propagation, en fonction de la longueur d'onde.

Il en résulte un étalement du signal et une diminution de la bande passante. Pour y remédier, il faut soit ajuster le profil d'indice de la fibre pour réduire cette dispersion, si on utilise une source émettrice ayant une certaine largeur spectrale, soit développer des sources émettrices monochromatiques à très faible largeur de raie.