

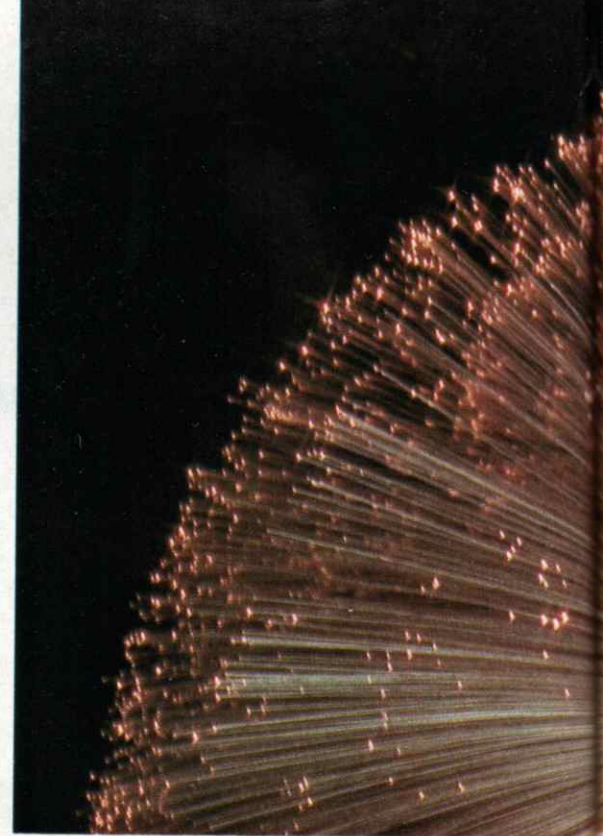
# Les fibres optiques prennent le relais

*Plus encore que d'énergie, la société moderne est gourmande de communications. En prenant lentement mais sûrement le relais du traditionnel câble de cuivre, les fibres optiques doivent permettre la poursuite du grand bond en avant amorcé il y a déjà quelques années par la révolution que représente l'électronique intégrée.*

■ « S'il fallait doter du téléphone tous les foyers du monde avec la technologie classique, les ressources en cuivre de la planète seraient insuffisantes. » Cette boutade prononcée récemment par un responsable d'une importante firme d'électronique française vise manifestement le traditionnel câble de cuivre. Ce véhicule qui a rendu tant de services aux télécommunications commence à vieillir, il ne suffit plus à la tâche.

Car les communications téléphoniques ne sont pas tout. Depuis quelques années, en effet, l'électronique intégrée a ouvert la voie, en matière de télécommunications, à toute une série d'applications qui s'imposent déjà ou qui sont appelées à le faire de plus en plus : télésurveillance, télégestion, télécopie, télédistribution, visiophonie, vidéo-conférences en sont quelques-unes. Pour bien faire, il faudrait remplacer chaque fil de téléphone de 2 mm par un câble de la grosseur du doigt. Au total, cela ferait des canalisations de la taille des tunnels du Métropolitain.

Mais rassurons-nous, la Terre ne manquera pas de cuivre. En tous cas pas par la faute des télécommunications puisque celles-ci disposent déjà d'un véhicule tout neuf : la fibre de verre,



dite fibre optique. Pour donner un ordre de grandeur, disons qu'un câble de fibres optiques de l'épaisseur de votre stylo-bille peut transporter simultanément 50 000 conversations téléphoniques. Pour la même performance, il faut un câble traditionnel gros comme le poing. Mais là ne s'arrêtent pas les avantages des fibres optiques (voir encadré page 99). En plus de leurs grandes capacités et de leur infime encombrement, les fibres optiques sont plus faciles à installer, ne nécessitent pas d'adaptation d'impédance, ne sont pas perturbées par les champs électromagnétiques, etc.

La communication par voie optique ne date pas vraiment d'aujourd'hui. Les signaux de fumée des Indiens d'Amérique, les phares côtiers ou les lanternes clignotantes des bateaux en sont quelques exemples. Mais pour passer au stade des télécommunications, il a fallu attendre 1960, date de l'invention du laser. On découvrit ainsi le rayon laser, faisceau très fin de lumière monochromatique d'une très grande portée qui pouvait être interrompu électroniquement à des fréquences très élevées. On pouvait donc transmettre des signaux selon le même principe utilisé pour les ondes hertziennes, ce qui était impossible avec la lumière ordinaire. A l'arri-



Pour cette boule lumineuse, hérisson de fibres de verre servant de bibelot décoratif, et pour ce câble de 144 fibres optiques capable de transmettre 50 000 conversations téléphoniques simultanées, un même principe : des rayons lumineux « piégés » et canalisés dans un guide transparent.

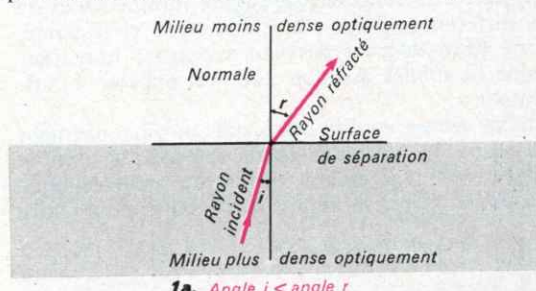
vée, ces signaux lumineux pouvaient être traduits en signaux électroniques. Cependant, ce qui était bon en laboratoire ne l'était plus dans la pratique : limites d'utilisation en ligne droite, aléas atmosphériques (brume, turbulences), pollution. D'où l'idée de propager les rayons lumineux dans un guide.

L'histoire du mariage des fibres optiques et des télécommunications remonte en fait à 1964, lorsque, à une réunion de la British Association for the Advancement of Science, des chercheurs britanniques ont proposé pour la première fois l'utilisation de fibres de verre comme véhicules d'informations. Les travaux sérieux sur la question n'ont commencé qu'en 1966, menés par Kao et Hockham aux Etats-Unis. A l'époque, les fibres de verre étaient inutilisables pour les télécommunications : elles ne pouvaient supporter qu'un taux très faible d'informations et l'atténuation était de l'ordre de 1 000 dB par kilomètre, c'est-à-dire que tous les dix mètres, la lumière perdait les neuf dixièmes de sa puissance. De plus, ces fibres étaient très fragiles.

Depuis, d'énormes progrès ont été accomplis. Les pertes s'évaluent actuellement à moins de 3 dB/km (après chaque kilomètre franchi, il reste encore la moitié de la puissance lumineuse). Les câbles de fibres optiques sont devenus incassables grâce au recours à des structures nouvelles. En fin, la bande passante est suffisamment large pour permettre la transmis-

sion simultanée de plus de trente chaînes de télévision.

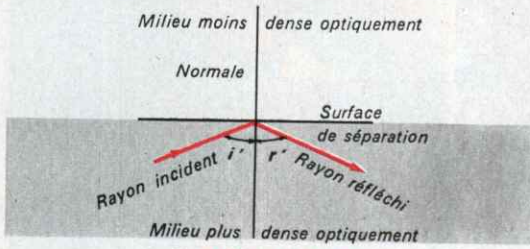
Pour bien comprendre, tout d'abord, comment les fibres de matériaux transparents réussissent à « piéger » la lumière pour la transmettre, il faut rappeler quelques principes optiques simples de réfraction et de réflexion. La figure 1 a



1a. Angle  $i <$  angle  $r$

monstre que lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, moins dense optiquement (c'est-à-dire ayant un indice de réfraction moins élevé), il est dévié de sa trajectoire et s'écarte de la normale à la surface de séparation. A l'inverse, si le rayon passe du milieu moins dense au plus dense, il suit exactement le même itinéraire mais en sens contraire, c'est-à-dire que le rayon réfracté se rapproche de la normale à la surface de séparation. A chaque angle d'incidence correspond un angle de réfraction qui varie en fonction du « saut d'indice »

de réfraction (la différence d'indice entre les deux milieux). Si on augmente l'angle d'incidence jusqu'à un « angle critique » et au-delà, le rayon ne traverse plus la surface de séparation et se réfléchit à l'intérieur du même

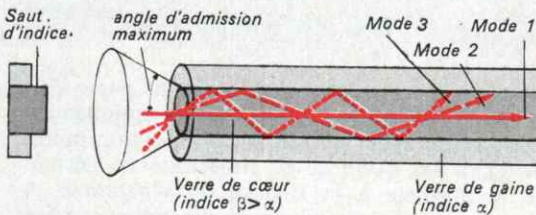


milieu (fig. 1 b) en formant avec la normale un angle de réflexion toujours égal à l'angle d'incidence.

Dans les fibres optiques, ce milieu est généralement un cylindre de verre de diamètre extrêmement réduit. En fait, on utilise des fibres formées de deux couches coaxiales de verres d'indices de réfraction différents et c'est le saut d'indice entre le verre du cœur et celui de la gaine (d'indice moindre) qui assure la réflexion interne et piège la lumière. Celle-ci peut donc être transmise sur de longues distances par les fibres sans que le parcours plus ou moins sinueux du câble ne gêne la transmission.

Voilà pour la théorie. Dans la pratique, les choses sont moins simples. Tout d'abord, le petit diamètre du cœur, 1 à 100 microns (0,001 à 0,1 mm), est proche de la longueur d'onde de la lumière et provoque donc des effets d'interférence entre les rayons réfléchis à des angles différents. Il en résulte que la lumière se propage en un certain nombre limité de « modes ». Le nombre de modes transmissibles dans une fibre optique dépend du diamètre du cœur par rapport à la longueur de l'onde lumineuse et de la différence d'indice entre le cœur et la gaine. Une fibre de ce type peut supporter une trentaine de modes distincts ; elle est appelée « multimode ».

Ces fibres multimodes ont un inconvénient majeur : la distance totale parcourue par le rayon est légèrement différente pour chaque mode et donc le temps nécessaire pour faire



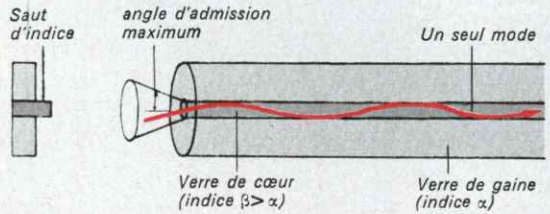
## 2. Fibre multimode à saut d'indice.

- Mode 1 : chemin le plus court = premier arrivé
- Mode 2 : chemin plus long = arrive plus tard
- Mode 3 : chemin encore plus long = arrive encore plus tard

tout le parcours est également différent (fig. 2). Résultat : une impulsion lumineuse de très courte

durée lancée dans une fibre optique de plusieurs kilomètres arriverait considérablement allongée. Ce qui limite la fréquence à laquelle on peut envoyer ces impulsions et donc le taux d'informations transmissibles. Pour certaines applications où le débit n'est pas très important, ou pour des distances relativement courtes, cela ne crée pas de difficulté. Pour les télécommunications, où les débits et les distances sont beaucoup plus conséquents, elles sont inutilisables.

Deux autres constructions de fibres optiques permettent de résoudre ce problème d'étalement. La première consiste à réduire le diamètre du cœur (1 à 5 microns — la dimension exacte dépend de la différence d'indice et de la longueur d'onde utilisée). Il ne reste plus qu'un seul mode

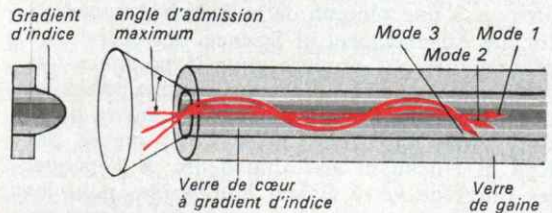


Un seul mode de propagation, angle d'admission très limité

## 3. Fibre monomode à saut d'indice.

transmissible (fig. 3) et la fibre n'étaie plus les impulsions. Mais cela pose de nouveaux problèmes. Car le cœur si mince de la fibre ne peut capter que très peu de lumière. En plus, l'angle d'admission est très réduit. Résultat : des exigences très strictes au niveau du lancement de la lumière sur la fibre et de la précision de l'alignement des fibres lorsqu'on veut les connecter.

La deuxième solution consiste à fabriquer des fibres dont l'indice ne saute pas brutalement, mais décroît graduellement du centre du cœur à l'interface entre celui-ci et la gaine. Dans ce type de fibres dites à « gradient d'indice », la lumière n'est plus réfléchié par un saut d'indice entre cœur et gaine mais est constamment déviée



## 4. Fibre multimode à gradient d'indice.

- Mode 1 : chemin le plus court, mais vitesse la plus lente
- Mode 2 : chemin plus long : mais vitesse plus grande
- Mode 3 : chemin encore plus long, mais vitesse encore plus grande

vers le centre (fig. 4). Les différents rayons suivent toujours des chemins plus ou moins longs avec la différence maintenant que les rayons du chemin le plus long passent dans du verre d'indice moindre. Ils parcourent le trajet plus rapidement, et arrivent tout juste à rattraper les autres rayons. Dans la pratique, le profil de variation d'indice dans le cœur est déterminé, lors de la fabrication, selon une parabole, pour obtenir

(suite du texte page 172)

## LE CABLAGE PAR FIBRES OPTIQUES : DES AVANTAGES DE PLUS EN PLUS APPRÉCIABLES

**Bande passante.** L'avantage essentiel des fibres optiques c'est leur très large bande passante : plusieurs centaines de mégahertz. La capacité de transmission est entre dix et trente fois supérieure au câble de transmission en cuivre. Un câble de fibres optiques gros comme le doigt peut transporter quelque 50 000 conversations téléphoniques simultanées, soit l'équivalent d'un câble conventionnel de 4 050 paires de fils de cuivre.

**Encombrement réduit.** Mille fois plus faibles que celles d'un câble conventionnel, les dimensions des câbles optiques leur permettent de multiplier les capacités par la simple addition de câbles supplémentaires sans risque d'encombrement des canalisations. Ils peuvent aussi être installés dans les mêmes canalisations que les câbles de cuivre existants.

**Faible atténuation.** Actuellement elle est inférieure à 3 dB/km. Pour cela les câbles de fibres optiques ne nécessitent un répéteur que tous les 10 à 15 km. Et les constructeurs envisagent pour bientôt un répéteur tous

les 50, voire 100 km. Un câble de cuivre exige un répéteur tous les 2 km au plus.

**Insensibilité aux parasites.** Ne transportant aucun courant électrique, les câbles de fibres optiques ne sont pas susceptibles aux conditions atmosphériques, éclairs, proximité de lignes électriques ou autres parasites. Ils ne nécessitent pas non plus de blindage anti-diaphonique.

**Sécurité.** Ces câbles sont insensibles aux chocs et peuvent être employés sans risques là où existe un danger d'explosion.

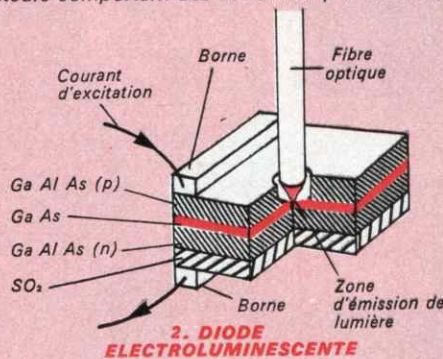
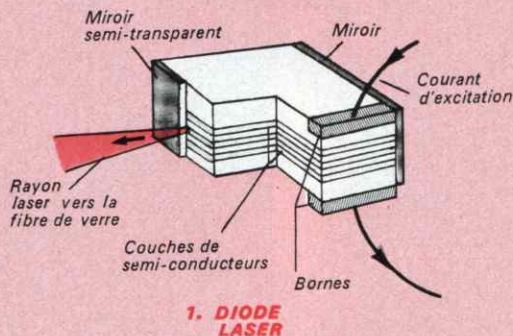
**Coût.** Le prix des fibres optiques a été divisé par 5 depuis 1976 et par deux depuis 1978. Une production de 100 000 km par an ramènerait les prix de 6-7 F actuellement à 40 centimes environ. Le prix du fil de cuivre, par contre, est en hausse constante en raison de la production mondiale limitée.

**Garantie d'approvisionnement.** Le matériau de base est la silice. Très abondante dans la nature pratiquement partout dans le monde, son prix est dérisoire.

## ÉMETTEURS ET RÉCEPTEURS DE LUMIÈRE : LES SEMI-CONDUCTEURS ONT LA PAROLE

Lorsqu'un courant électrique élevé passe dans certains semi-conducteurs, la majorité de leurs électrons passent à un niveau supérieur d'énergie. Une faible partie de ces électrons retombe spontanément au niveau d'énergie antérieur en restituant le gain d'énergie sous

silicium. Il est dopé de tellure, d'aluminium (donnant ainsi du Ga Al As dans le cas du schéma de la figure 2) d'indium ou d'autre élément en quantité microscopique pour former une pastille de matériaux semi-conducteurs comportant des couches « p » déficitaires en



forme de rayon lumineux. Ce dernier stimule les autres électrons et les fait retomber à leur premier niveau d'énergie. En même temps, l'énergie qu'ils avaient acquise est restituée sous forme de lumière de même longueur d'onde et en synchronisme parfait avec le rayon stimulant. Ce qui explique le sigle Laser : Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, ce qui veut dire en français Amplification de la lumière par l'émission stimulée du rayonnement. En ajoutant un miroir à chaque extrémité de la pastille de semi-conducteurs (représentée schématiquement sur la figure 1) on obtient une cavité résonante. La lumière fait des allers-retours entre les miroirs en s'accroissant à chaque passage. Il suffit alors que l'un des miroirs soit à moitié transparent pour obtenir le faisceau lumineux cohérent du laser. On peut coupler les diodes laser aux fibres optiques presque sans pertes : leur rayonnement fin correspond parfaitement au caractère de la fibre. La technologie des diodes électroluminescentes est très proche de celle utilisée pour les transistors et les circuits intégrés formés de différentes couches de silicium. Là, l'arseniure de gallium (Ga As) remplace le

électrons ou des couches « n » comportant un surplus d'électrons, suivant le dopant.

Si on applique une tension à la pastille, les « trous » (déficits mobiles d'électrons) de la couche « p » et les électrons de la couche « n » (excédents mobiles d'électrons) se recombinent dans la couche Ga As produisant des photons. Le courant électrique fournit les nouveaux électrons et « trous » nécessaires à la continuation de ce procédé. Le rendement est presque de 100 % (contre 2 à 5 % pour l'ampoule classique). A la réception, on emploie une photodiode au silicium ou au germanium pour reconvertir les impulsions lumineuses en courant électrique. Les photodiodes fonctionnent selon le même principe que les diodes électroluminescentes ci-dessus sauf que la tension est appliquée en sens inverse et que le courant se trouve bloqué. L'arrivée d'un photon provoque la création d'une paire électron-« trou ». Ces électrons et ces « trous » sont séparés par le champ électrique et passent dans les couches p et n par attraction électrique. Un courant peut donc passer dans la diode et son intensité est proportionnelle à celle de la lumière reçue.

# les « HORS-SÉRIE »



Seuls sont disponibles les titres figurant sur la liste ci-contre

## BON DE C

à découper ou recopier et à retourner à Science  
VEUILLEZ M'ENVOYER LES NUMÉROS HORS

N° .....

JE JOINS 12 F (franco) par EXEMPLAIRE (soit  
RÈGLEMENT A L'ORDRE DE SCIENCE ET VIE

C.C.P. 3 volets (sans indiquer le n° de compt

NOM .....

N° .....

RUE .....

CODE POSTAL .....

## LES FIBRES OPTIQUES

(suite de la page 98)

que tous les rayons se propagent dans la fibre à la même vitesse quel que soit le chemin parcouru. Ce sont ces fibres à gradient d'indice que l'on utilise pour les télécommunications.

Pour être véhiculées d'un point à un autre, les informations passent sur les fibres optiques sous une forme analogique (l'intensité lumineuse est fonction du message) ou digitale (présence ou absence d'une impulsion de lumière). Le débit d'informations pouvant aller jusqu'à 140 millions d'impulsions par seconde actuellement (cette limite recule constamment), interdit l'utilisation de lampes incandescentes classiques. En fait, il faudrait une lumière aussi pure que possible, pouvant être commandée électroniquement et émise par une source de taille assez réduite pour s'adapter aux fibres. Il existe deux sources remplissant ces conditions : les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (voir encadré p. 99). Pour détecter la lumière à l'arrivée on emploie des photo-diodes au silicium ou germanium.

Tirer le verre ordinaire ou le plastique en fibres suffit pour fabriquer des jouets comme la boule lumineuse, mais quand on veut établir des liaisons de communication sur plusieurs kilomètres, il faut que le verre soit de très haute qualité : imaginez une vitre épaisse d'un kilomètre et encore transparente. Il faudrait en plus respecter les profils d'indice décrits plus haut.

Dans la technique dite à double creuset, les deux verres de composition différente sont introduits dans deux creusets concentriques. On chauffe le tout à environ 1 200° et on étire la fibre qu'on enroule sur un tambour. Cette technique permet aisément de fabriquer en continu des fibres à saut d'indice, mais la qualité est limitée : le verre se pollue par les constituants des creusets. De plus, elle se limite à des verres dont la température de fusion n'est pas trop élevée. La seconde technique de fabrication consiste à tirer directement la fibre à partir d'un barreau appelé « préforme » et dont la composition est déterminée avec précision pour correspondre au profil d'indice désiré. Ce procédé a, cependant, l'inconvénient de fabriquer des fibres d'une longueur maximum de 5 km.

Deux procédés sont courants pour l'opération longue et délicate qu'est la fabrication des préformes. Dans un procédé on commence à partir d'un tube de silice qui va constituer la gaine de la fibre. A son intérieur, on passe un gaz pour déposer des couches successives, également de silice, d'une épaisseur d'un centième de millimètre chacune. La couche est immédiatement vitrifiée par la haute température à laquelle est portée le tube de silice (1 600°). A chaque couche on augmente l'indice par l'addition de dopants (en général de l'oxyde de germanium ou de phosphore). Une fois ces opérations termi-

nées, le tube est tiré jusqu'à ce qu'il devienne un barreau plein.

L'autre méthode pour fabriquer des préformes, consiste à déposer les couches successives sur un mandrin en rotation. Ensuite on retire le mandrin et tire le tube ainsi formé pour obtenir la préforme.

Aujourd'hui, donc, les fibres optiques sont techniquement au point. Suffisamment, en tous

ques coûtent aujourd'hui sensiblement plus cher au mètre que le fil téléphonique actuel (1 F le mètre), il suffit que la production commence à croître pour qu'ils atteignent des seuils parfaitement raisonnables. Ainsi, les quelque 50 000 km de fibres optiques que nécessitera le projet de Biarritz doivent ramener le prix du mètre de 6-7 F (prix actuels) à 2,50 F environ. Et une production annuelle de 100 000 km ferait tomber

## LA TÉLÉMATIQUE CHEZ LES BIARROTS

*Biarritz, 1983. Le visiophone est là. Que ce soit pour demander un renseignement, consulter un mode d'emploi, ou faire une réclamation, l'abonné peut toujours entrer en contact audiovisuel avec le central (opératrice ou machine) au moyen de son visiophone. D'autre part, le central accomplit une commutation d'images, c'est-à-dire qu'en composant le numéro d'un autre abonné, un Biarrot (habitant de Biarritz) peut entrer en communication visiophonique avec lui. Le visiophone de chaque abonné comporte un écran couleur et une caméra fixe de TV noir et blanc, pour prendre en image sa tête et ses épaules lorsqu'il dialogue avec son correspondant; il peut parler les mains libres. Mais il n'est pas limité à utiliser la caméra incorporée dans son visiophone: il peut utiliser toutes les possibilités des magnétoscopes et caméras TV amateurs qui apparaissent sur le marché. Bien sûr, il peut aussi atteindre le réseau téléphonique national pour appeler un correspondant hors de Biarritz (mais sans le voir sur son écran) ou pour se servir des prestations déjà offertes ou prévues par les télécommunications: liaison avec des voitures, Télétel, télécopie, interrogation d'une banque de données, etc.*

*Deuxième type de services dont jouissent les habitants de cette ville: la distribution des programmes TV. L'abonnement sera probablement distinct de celui du visiophone, tout en utilisant les mêmes câbles optiques. L'abonné pourra regarder sur son propre téléviseur non seulement des programmes nationaux et voisins, mais aussi demander à une vidéothèque centrale des programmes pré-enregistrés, accompagnés d'un son stéréophonique de haute qualité.*

*A l'origine de cette débauche de télématique: la décision prise par la direction générale des Télécommunications de câbler une ville de 300 000 habitants avec des fibres optiques pour raccorder les abonnés en un réseau vidéo-commuté. Le but: faire un essai d'exploitation de ces fibres à l'échelle réelle. Le 12 septembre 1979, le conseil des ministres décidait de consacrer à la télématique 15% des crédits des télé-*

*communications, dont 300 millions de F pour ce projet expérimental. Aujourd'hui, l'appel d'offres est clos et les études préliminaires sont en cours. Le début des travaux est prévu pour le second semestre de cette année.*

*Ce « réseau à tout faire » des PTT va assurément susciter de nombreuses initiatives de la part des prestataires privés. On peut s'attendre à toute une nouvelle gamme de services: vente par visiophone en voyant les produits proposés, réservations de toutes sortes, etc. Seuls l'imagination... et le marché imposeront leurs limites.*

*Le projet de Biarritz a aussi pour but de permettre à l'industrie française de maîtriser les techniques des fibres optiques et la création d'une nouvelle industrie de pointe. Le marché mondial est estimé à plus de 4 milliards de francs pour les dix années à venir.*

*Après Biarritz, la direction générale des Télécommunications envisagerait de relier par câbles optiques 2 millions de Français d'ici à 1987. De son côté, la R.A.T.P. va utiliser des fibres optiques pour passer les communications entre les gares R.E.R. de Vincennes et de Noisy-le-Grand-Mont d'Est. En effet, les fibres optiques ne sont pas perturbées par la masse de parasites qui existent dans pareil environnement. De plus, le faible encombrement du câble optique permettra son installation sans modification des infrastructures existantes.*

*Les PTT ont installé, quant à eux, une liaison à titre d'essai comportant 70 fibres optiques sur une longueur de 8 km entre les deux centraux téléphoniques parisiens Tuileries et Philippe-Auguste. Là aussi, on a pu introduire facilement le câble optique (2 cm de diamètre seulement) dans les canalisations déjà existantes.*

*Le renouvellement du réseau urbain de transmissions téléphoniques fera appel, entre 1982 et 1985, à des fibres optiques, du moins en partie. Ce marché, estimé à 10 000 km de fibres par an, justifierait à lui seul le développement d'une industrie de fibres optiques. □*

cas, pour que partout dans le monde on voit depuis quelque temps se multiplier les projets de câblages pour des agglomérations de plus en plus importantes. C'est le cas en France de Biarritz, ville de trente mille habitants (voir encadré ci-dessus). Côté économique, les avantages sont, globalement, immenses: les retombées que l'utilisation des fibres optiques entraîneront en permettant un développement des télécommunications de l'ampleur suggérée au début de cet article ne sauraient nous échapper.

Quant au coût comparatif, si les fibres opti-

ces prix à 40 centimes le mètre. Mais que sont 100 000 km/an quand on sait que 17 millions de km de fils conventionnels sont fabriqués en France tous les ans. Pour l'instant, la production de fibres optiques connaît encore une croissance lente: 10 000 km/an en France. Cela dit, le marché mondial des fibres optiques est évalué à quelque 4 milliards de F pour les dix prochaines années, alors qu'il n'était que de 150 millions de F en 1978. Une simple question de temps.

**Sotires ELEFTHERIOU ■**