

La parole devient lumière

Après 20 ans de recherches, les fibres optiques sont aujourd'hui capables de transporter l'information lumineuse sur des kilomètres. Ce qui permettra, dans un proche avenir, d'assurer les liaisons téléphoniques par fils de verre.

■ La direction générale des télécommunications (DGT) vient de lancer un programme de recherches auquel sont associées les firmes industrielles pour tester les applications de la transmission optique dans les liaisons téléphoniques. Bien sûr, il ne s'agit pas de revenir aux signaux lumineux du morse, bien que le procédé y soit apparenté, puisqu'il consiste à coder la voix sous forme d'impulsions lumineuses qui sont envoyées dans des conducteurs appropriés. Ces conducteurs, ce sont, bien sûr, les fibres optiques qui sont capables de conduire la lumière fort loin, aussi bien qu'un fil de cuivre conduit le courant.

La télétransmission optique était théoriquement possible dès l'invention des fibres. Mais elle se heurtait à deux obstacles majeurs qui n'ont été levés que dans les années 70 : le manque de transparence des fibres et l'absence d'un émetteur de lumière pouvant travailler aux cadences de l'électronique, c'est-à-dire plusieurs millions d'impulsions par seconde.

Le premier obstacle est inhérent à la nature même des milieux transparents, qui absorbent toujours une plus ou moins grande partie de l'énergie lumineuse qui les traverse. Il suffit de regarder par la tranche un verre un peu épais pour s'en rendre compte. Les premières fibres avaient un facteur d'atténuation si élevé qu'au bout d'une centaine de mètres, il ne restait plus rien du signal lumineux introduit à l'entrée.

Ce facteur d'atténuation se mesure en décibels, qui sont aussi, de manière particulière, utilisés pour mesurer les intensités sonores. Le décibel ici indique de manière simple le rapport entre la puissance émise et la puissance reçue. Ce rapport étant toujours très élevé, il est plus facile de l'exprimer selon une échelle logarithmique : si P_e est la puissance envoyée à l'entrée et P_s la puissance recueillie à la sortie, le facteur d'atténua-

tion du milieu transmetteur, évalué en décibels, est égal à $10 \log (P_e/P_s)$.

Par exemple, si la puissance reçue n'est que le dixième de la puissance émise, le facteur d'atténuation est de 10 dB — puisque $\log 10 = 1$. De même, une atténuation de 25 dB correspond à un rapport entre émission et réception égal à 317, et une atténuation de 30 dB indique qu'on ne recueille à la sortie que le millième de l'énergie envoyée. A 40 dB on est au dix-millième, et ainsi de suite : le dB est une unité pratique pour exprimer des rapports très rapidement croissants.

Les premières fibres dépassaient 1 000 dB par km, et le problème de les utiliser pour les transmissions ne se posait même pas ; plus tard, elles arrivèrent à 100 dB, ce qui était encore infiniment trop — on ne retrouvait à l'autre bout que le dix milliardième de la puissance initiale. Peu après 1970, en Angleterre, au Japon et aux USA, des fibres ne faisant que 25 dB au km apparurent : les premières études sur la transmission lumineuse des informations pouvaient commencer.

Aujourd'hui, on arrive en laboratoire à 1 dB au km, valeur qui suppose une transparence dont on peut se faire une idée : une vitre faite de ce verre et épaisse d'un kilomètre nous paraîtrait complètement transparente, puisqu'elle n'absorberait que 20 % de la lumière émise. Une atténuation aussi faible est peu perceptible à l'œil.

En production industrielle, on peut garantir 5 dB par km : on recueille à la sortie le tiers de ce qu'on a mis à l'entrée, ce qui est très estimable. En pratique, une bonne partie des fibres se situe au-dessus du niveau garanti avec des atténuations de 2 à 3 dB, ce qui donne à une réception valant de 50 % à 60 % de l'énergie émise.

Ce niveau de qualité étant atteint, au prix bien sûr d'une technologie très affinée puisque la pureté des verres utilisés atteint 99,999... %, la

transmission des informations sur plusieurs kilomètres pouvait être envisagée. Encore fallait-il trouver une source de lumière capable d'émettre un faisceau intense et minuscule — de 5 à 9 centimètres de mm ! — et capable en outre de fractionner cette émission des milliers et même des millions de fois par seconde.

Le transport de l'information téléphonique, donc d'une vibration sonore, se fait en effet exclusivement sur les hautes fréquences. En principe, il suffit de deux fils pour transporter le courant modulé par le microphone jusqu'à l'écouteur ; en pratique, étant donné le nombre de postes téléphoniques, cela conduirait à multiplier les câblages à tel point que la largeur des rues serait à peine suffisante pour les loger tous.

L'astuce consiste alors à moduler un courant de haute fréquence selon les variations données par le microphone : l'amplitude de la fréquence porteuse dessine la courbe de variation fournie par le micro. C'est cette fréquence qui est envoyée sur le fil. Elle n'occupe évidemment qu'une très petite place dans la gamme des fréquences susceptibles de circuler sur le même fil, par exemple, de 60 000 à 64 000 Hz.

Rien n'empêche alors de faire passer une seconde communication sur une fréquence porteuse comprise entre 64 000 et 68 000 Hz, et ainsi de suite. On met ainsi 12 voix étalées sur 48 000 Hz entre 60 000 et 108 000 Hz. Avec un étalement de 300 000 Hz, on fait passer 60 voix, et cela jusqu'au standard actuel qui fait passer par le même fil 10 000 voix étalées sur 60 MHz.

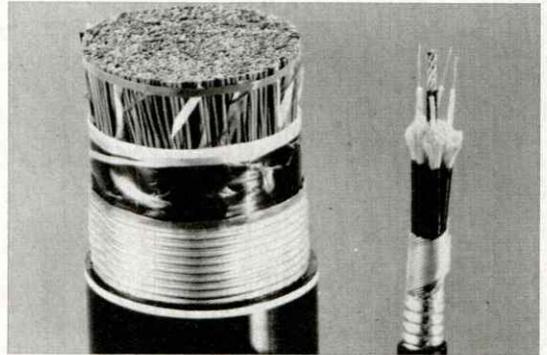
Ce procédé est dit analogique. Mais il existe aussi maintenant un procédé numérique, et c'est celui-ci qui actuellement intéresse les transmissions optiques. Au lieu de moduler une onde de haute fréquence, on découpe la courbe donnée par le microphone et on mesure l'amplitude de cette courbe 8 000 fois par seconde. Cela revient donc à remplacer la courbe par un pointillé très serré, puisqu'il tient 8 000 points dans une seconde. L'ordonnée de chaque point, donc l'amplitude de la courbe à cet instant, est mesurée sur une échelle à 256 marches. C'est un fractionnement qui serait un peu grossier pour transmettre toutes les nuances musicales d'un orgue, mais reste largement suffisant pour que la voix soit parfaitement compréhensible et identifiable.

Les 256 marches sont transcrites en numération binaire, ce qui nécessite 8 éléments d'information, ou bits, puisqu'il faut aller de 0 à 255, soit en binaire de 00000000 à 11111111 avec tous les intermédiaires genre 01001101. Comme l'amplitude est mesurée 8000 fois par seconde, cela fait 64 000 bits (0 ou 1) par seconde à transmettre. Le codage lumineux est très simple, le 1 pouvant être l'émission d'un point de lumière et le 0 l'absence de lumière. Notons d'ailleurs que le système urbain normalisé est de 34 000 000 de bits par seconde.

Mais restons en pour la démonstration à 64 000 bits/s ; pour les envoyer sous forme lumineuse, il faut donc une source capable de s'allumer et s'éteindre 64 000 fois par seconde. Ajou-

tons, comme nous l'avons dit, que le faisceau doit être minuscule et intense (par rapport aux dimensions considérées : point n'est besoin de lampes de 100 W). Jusqu'en 1970, un tel émetteur n'existait pas. Depuis, et dans le même temps qu'étaient développées les fibres à faible atténuation, les laboratoires Bell, aux USA, mettaient au point des lasers à semi-conducteurs répondant aux exigences des télécommunications optiques.

Ces lasers sont essentiellement à base d'arse-



Ces 6 fibres optiques (à droite) ont la même capacité de transmission qu'un câble traditionnel avec 900 paires de fils de cuivre (à gauche).

nic, de gallium et d'aluminium. Le premier est un corps simple qui, contrairement à la légende, n'est pas toxique par lui-même ; ce sont les oxydes qui sont vénéneux ; le gallium est un métal analogue au zinc, et l'aluminium est connu. L'arséniure de gallium est un semi-conducteur qui forme trois des cinq couches du laser, les deux autres étant faite du même arséniure de gallium dans lequel l'aluminium remplace en partie le gallium au niveau des atomes dans le réseau cristallin.

Ce laser présente le gros avantage d'émettre dans le proche infrarouge (0,8 à 0,9 μ) domaine de longueurs d'ondes où l'atténuation dans les fibres atteint son minimum. De plus son temps de mise en action est extrêmement court — $2 \cdot 10^{-10}$ s — et la puissance émise, 10 mW, convient très bien pour la transmission de signaux digitaux. Mais la diode laser, pour lui donner son nom, garde encore l'inconvénient d'une fiabilité incertaine et d'une durée de vie un peu courte. Ces deux points faibles devraient être éliminés peu à peu, et le dispositif est dès maintenant suffisant pour être utilisé dans des installations pilotes.

Le débit des diodes laser est d'ailleurs si rapide qu'il peut saturer les fibres par suite d'un phénomène de dispersion. Un éclair lancé à l'entrée du fil de verre comporte en effet une infinité de rayons dont certains sont parallèles à l'axe, ou du moins très voisins, tandis que d'autres sont plus obliques. Les rayons très voisins de l'axe suivent un trajet pratiquement rectiligne, ou comportant très peu de réflexions, et ils arrivent donc avant ceux qui ont fait toute la longueur selon un chemin en dents de scie.

Le très bref éclair du départ arrive donc étalé à la sortie sous forme d'une impulsion de plus longue durée. Il en résulte que deux éclairs séparés d'un temps très bref peuvent ressortir à l'autre bout de la fibre sous la forme d'un seul éclair allongé dont la durée sera supérieure à celle des deux éclairs plus l'intervalle entre les deux.

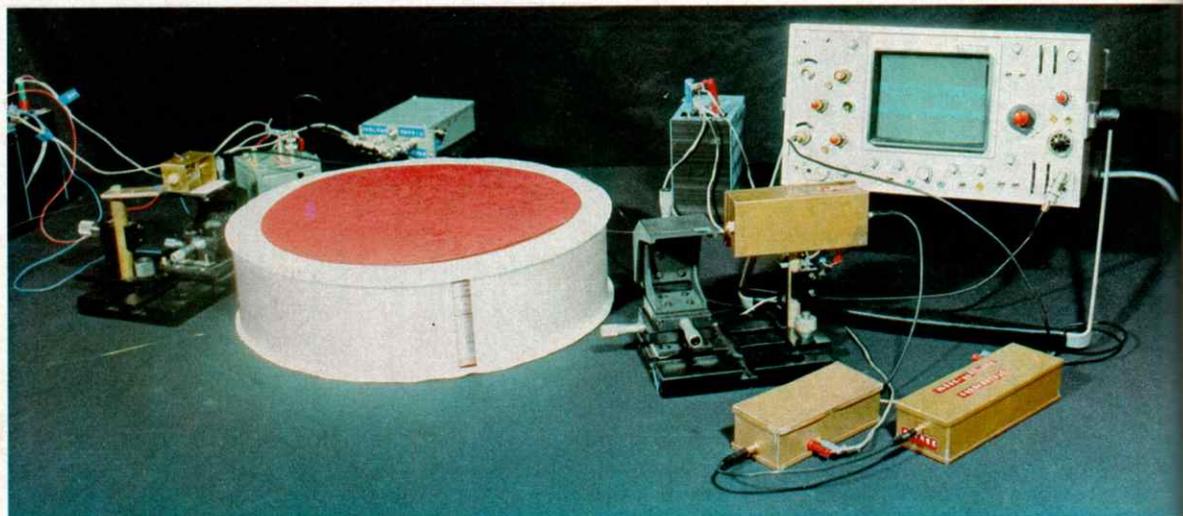
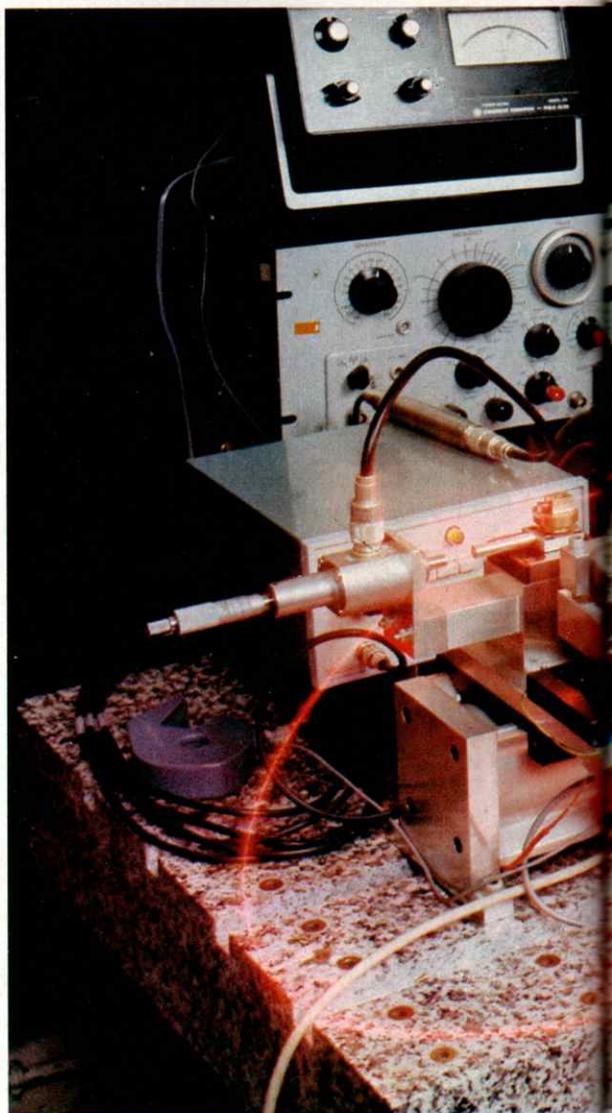
Les fibres à gradient d'indice sont meilleures sous cet angle que celles à saut d'indice, et ce sont elles qui ont été retenues dans le programme de la DGT. Avec deux fibres, une pour l'aller, une pour le retour, on peut passer simultanément 480 voix, soit 34 Mbits.

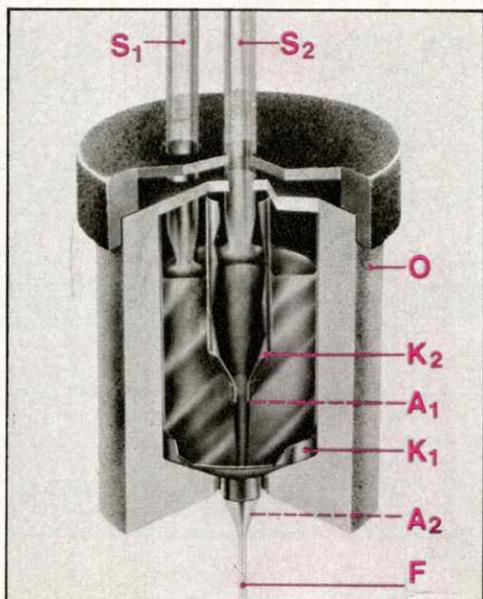
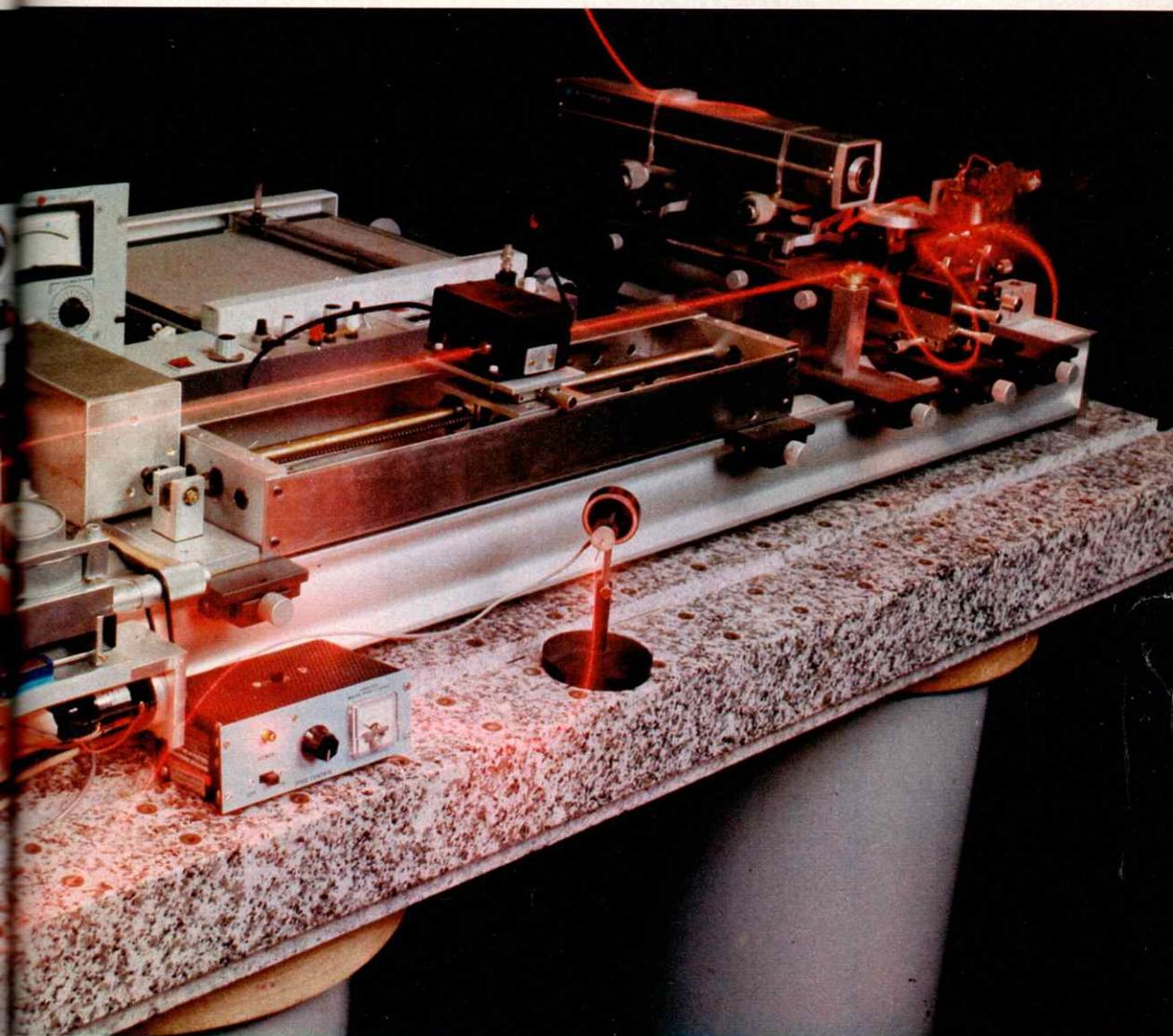
Les premières installations sont prévues pour relier entre eux les centraux téléphoniques des grandes agglomérations, centraux qui sont distants de 6 à 7 km les uns des autres. L'installation nouvelle ne commence pour l'instant qu'à la sortie du central : le poste téléphonique, le raccordement au réseau, le codage numérique des voix restent identiques.

A l'arrivée, la détection des signaux lumineux se fait par des diodes pin ou des photodiodes en régime d'avalanche. Les premières sont simples et rapides, mais les secondes présentent des temps de montée plus faibles, et surtout un gain interne dû aux phénomènes d'avalanche, gain qui peut atteindre la centaine de fois. Elles nécessitent toutefois des tensions élevées et présentent un bruit supplémentaire lié au gain d'avalanches.

Une fois détectée et convertie en signaux électriques, l'information est envoyée à chaque poste téléphonique avec les moyens habituels. Pour l'instant, la fibre optique n'intervient qu'entre les deux centraux téléphoniques. La fibre présente l'avantage de pouvoir couvrir directement de 6 à 10 km sans répéteur au lieu de 2 km pour les câbles classiques. On entend par répéteur une installation de détection et d'amplification, nécessaire pour redonner au signal une puissance suffisante pour parcourir la distance suivante.

En lançant le programme d'étude et de réalisation des transmissions optiques, la DGT se place
(Suite du texte page 75)





DEVENUE LUMINEUSE, LA VOIX CHEMINE DANS UN FIL DE VERRE

Demain, les conversations téléphoniques ne passeront plus par les traditionnels poteaux télégraphiques qui s'étirent le long des voies de la SNCF, ni même par des câbles enterrés : codées en binaire, puis transformées en scintillements lumineux, les paroles voyageront dans des fibres de verre minces comme des cheveux. Le document ci-dessus montre un banc d'essai du C.N.E.T. Le trait rouge est un signal lumineux émis par une diode laser ; ce signal voyage le long d'une fibre dont on voit le chemin sinueux, avant d'être recueilli par une photo-diode à avalanche. Sur la page de gauche, une autre installation envoie 8 000 000 d'éléments d'information (0 ou 1) à travers 1 km de fibre enroulée sur un tambour. Ci-contre, le double creuset pour l'étrépage des fibres à saut d'indice. Le four O, avec les deux creusets K1 et K2, sert à fondre les barres de verre S1 et S2 dont les indices de réfraction sont différents. Entre A1 et A2, les deux verres se mélangent sur une certaine épaisseur pour donner la variation désirée d'indice dans la fibre F.

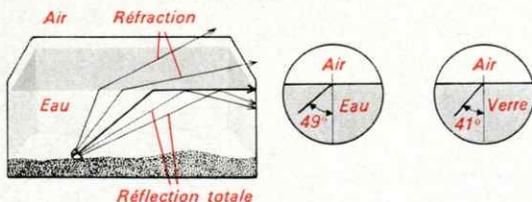
DES CHEMINS DE LUMIÈRE A RÉFLEXION TOTALE

Pour avoir plongé un bâton dans l'eau, tout le monde sait que la réfraction fait voir le bâton comme brisé : la partie immergée semble moins inclinée, moins oblique que celle qui reste au-dessus du niveau. En remplaçant le morceau de bois par un rayon lumineux, on constate le même phénomène, à savoir que le rayon se rapproche de la verticale en passant dans l'eau. Cela parce que l'indice de réfraction du liquide est plus élevé que celui de l'air.

Inversement, un rayon parti obliquement du bassin s'écarterait encore davantage de la verticale en sortant dans l'air. Cette dissymétrie amène évidemment à un cas limite, celui où un rayon quasiment rasant, donc faisant pratiquement 90° avec la verticale, passe de l'air dans l'eau. On sait que dans ce cas le rayon réfracté se rapproche de la verticale : il va donc passer dans l'eau en faisant un angle très inférieur aux 90° de l'angle d'incidence.

La loi habituelle de la réfraction $\sin i = n \sin r$ montre alors que le rayon réfracté fait un angle de 49° avec la verticale, l'indice de l'eau étant de 1,33. Si on prend maintenant un rayon partant du fond du bassin, on voit le rayon sortant dans l'air se rapprocher de l'horizontale à mesure que l'angle de départ se rapproche des 49°.

Pour 49° le rayon sort horizontal et, pour une incidence supérieure, le rayon ne sort plus du tout : il est réfléchi comme si l'interface eau-air était un miroir ; on dit qu'il y a réflexion totale.



Le principe de la réflexion totale ...

Le phénomène de réflexion totale n'a lieu que si la lumière chemine dans un milieu limité par une surface continue quelconque le séparant d'un autre milieu d'indice moins élevé. C'est ainsi le cas dans l'eau quand le milieu adjacent est l'air, d'indice voisin de 1. Mais ce ne serait plus le cas si le milieu voisin était du verre dont l'indice, 3/2, est supérieur à celui de l'eau qui vaut 4/3.

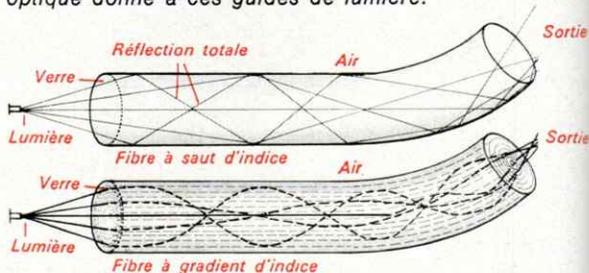
Mais c'est de nouveau le cas si la lumière se propage dans un bloc de verre bien plan placé dans l'air. Pour le verre ordinaire, l'angle limite est de 41°.

Imaginons maintenant une longue règle en verre aux arêtes bien polies, et envoyons un rayon lumineux à un bout, sensiblement dans l'axe. Il peut arriver, cas limite, que le rayon soit strictement parallèle aux arêtes, et il ressort tout droit à l'autre bout. En pratique, le rayon fait toujours un certain angle, et au bout d'une certaine distance, il finit par rencontrer une des faces latérales.

Mais là la rencontre sous un angle très supérieur aux 41° de l'angle limite : il y a réflexion totale, le rayon ne sort pas à l'extérieur mais se trouve renvoyé à l'intérieur de la règle jusqu'au moment où il rencontre la face opposée. Il est à nouveau

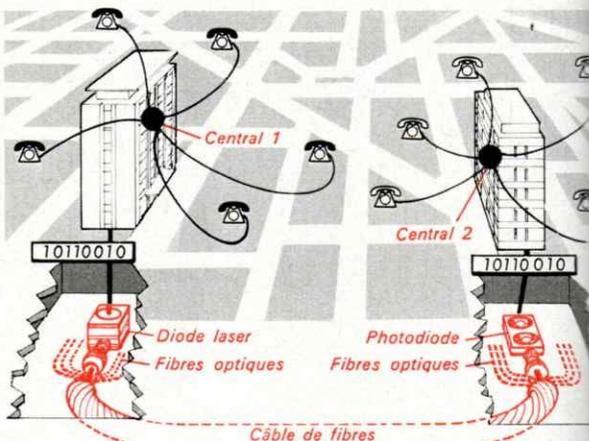
renvoyé et parcourt ainsi toute la règle selon un trajet en dents de scie avant de sortir à l'autre bout. Tel est le principe du guide optique : à condition d'envoyer le rayon à l'entrée dans une direction très proche de l'axe de façon à ce qu'il y ait réflexion totale chaque fois, la lumière suit la règle de verre d'un bout à l'autre.

On peut même courber cette règle, à condition de ne pas faire de courbures si accentuées que le rayon tombe en dessous des 41° fatidiques, et la lumière continuera à être guidée d'un bout à l'autre. En pratique, on prend d'ailleurs une règle ronde et très mince d'où le nom de fibre optique donné à ces guides de lumière.



... et son application dans les fibres optiques.

Le principe de ces guides était connu depuis bien longtemps, les fontaines lumineuses en constituant un excellent exemple. Mais la réalisation pratique n'a que quelques dizaines d'années, car de nombreux problèmes techniques se posaient. Tout d'abord, la réflexion totale demande, pour être parfaite, que l'interface séparant les deux milieux le soit aussi. Le très mince fil de verre qui va servir de guide doit donc être totalement lisse. Mais il ne suffit pas que le poli extérieur soit parfait, encore faut-il que rien ne vienne altérer cette perfection. Or un fil de verre laissé à l'air libre est sali en très peu de temps par l'atmosphère ambiante : des poussières se déposent, la condensation liée à l'humidité vient ternir le surfacage le mieux glacé, et l'interface perd ses qualités de départ : il suffit d'une poussière un peu translucide dont l'indice de réfraction

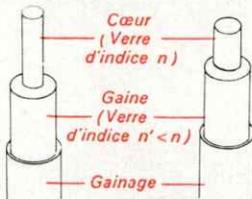


La transmission optique, dans un premier temps, n'interviendra qu'entre deux centraux téléphoniques.

n'est pas celui de l'air, pour que le trait de lumière qui arrive à ce point de contact quitte le verre. Mais, d'un autre côté, on sait qu'il suffit que le milieu extérieur au verre soit d'indice plus faible que lui pour que la réflexion totale ait lieu. Bien entendu, plus l'indice est voisin de celui du verre, et plus l'angle limite s'écarte des 41° pour se rapprocher de l'angle droit. Mais la lumière étant envoyée à l'entrée pratiquement dans l'axe, les angles de réflexion à l'intérieur sont toujours très voisins de 90° et il n'est pas nécessaire que la limite en soit aussi éloignée que les 41° de l'interface air-verre.

On va donc entourer la fibre d'une gaine faite d'un autre verre d'indice inférieur, et en pratique il suffit que la différence des indices soit de 1% pour qu'il y ait réflexion totale. Si le verre de la fibre centrale, dite cœur, a un indice de 1,50, il suffira que le verre de la gaine ait un indice de 1,49 pour que la réflexion totale persiste, à condition encore de ne pas donner à la fibre de courbures trop accentuées. Il est vrai qu'on est déjà limité en ce domaine par la fragilité du verre : les fibres ont une certaine élasticité et peuvent donc être courbées, mais elles cassent vite si on courbe trop. Le verre n'est pas du fil de cuivre. Les fibres actuellement réalisées par le Centre National d'Etudes des Télécommunications ont un diamètre extérieur voisin du dixième de millimètre (de 11 à 13/100 de mm). Le cœur, quant à lui, ne mesure que 6 à 8/100 de mm — ce sont là les dimensions d'un cheveu standard. Les fibres réalisées par d'autres industriels, aussi bien français qu'étrangers, ont des diamètres comparables. Notons qu'une version un peu différente de ces modèles, à l'étude en Angleterre et aux USA, conserve la gaine habituelle mais remplace le cœur en verre par un liquide. Il existe en effet des liquides d'une extrême transparence qui peuvent concurrencer la silice en ce domaine.

Toutes ces fibres sont dites à saut d'indice, terme assez parlant puisqu'il indique bien qu'en franchissant l'interface cœur-gaine, on saute d'un indice à un autre. Mais on peut réaliser des fibres où l'indice varie graduellement depuis le centre



Les deux types de fibres optiques : à saut d'indice (A) et à gradient d'indice (B).

jusqu'à la périphérie. On prend par exemple un cylindre de silice sur lequel on dépose peu à peu des couches minces de verre dont l'indice est constamment décroissant. Une fois fondu et étiré, ce cylindre donne des fibres où se retrouvent toutes les gradations d'indice déposées à la fabrication.

A l'intérieur de telles fibres, dites à gradient d'indice, la lumière ne suit plus un trajet en dents de scie, mais un trajet ondulé, la constante variation d'indice ramenant sans cesse le rayon vers le milieu. Bien entendu, on garde quand même la gaine extérieure pour renvoyer vers l'axe les rayons plus obliques qui subissent alors une réflexion totale comme dans le cas précédent. □

donc sur un terrain nouveau dont elle espère tirer de nombreux avantages. Tout d'abord, ces recherches donnent une solide impulsion aux industriels français qui, en ce domaine, s'étaient un peu laissés déborder par l'étranger. Parties avec un certain retard, nos industries sont en passe de combler l'écart et même de dépasser les réalisations étrangères. A l'échelon national, ce programme aura donc des répercussions importantes sur nos capacités techniques de recherche et de production.

Au niveau pratique, les transmissions optiques doivent permettre aux PTT, tout en gardant une avance scientifique importante, de poursuivre dans les meilleures conditions l'extension du réseau téléphonique. Pour commencer, l'optique permettra de réaliser aux moindres frais les liaisons entre les centraux : les canalisations actuelles sont saturées et le remplacement des câbles de cuivre par des fils de verre permet un gain de place considérable.

Premier avantage aussi pour tous les citoyens : moins de chantiers et moins de trottoirs éventrés ; pour un mince tuyau de plastique déjà installé, la lumière sur fibre permet de faire passer 50 fois plus de communications que l'électricité sur fil. On pourra donc multiplier d'autant le nombre de postes téléphoniques, donc d'abonnés, sans changer les canalisations actuelles.

D'ici moins de deux ans, donc en 1980, des liaisons expérimentales inter-centraux seront installées. On peut donc compter que d'ici 6 à 7 ans, les liaisons optiques deviendront courantes sur le réseau téléphonique. Pour un écart de 7 à 8 km, aucun répéteur ne sera nécessaire.

Plus tard, l'optique sera ensuite appliquée aux liaisons à grande distance, mais il faudra des relais d'amplification tous les 5 à 7 km, à moins que la transparence des fibres n'ait encore progressé de manière sensible. Dans un avenir plus lointain, on peut considérer que la liaison qui va du central à l'abonné se fera elle aussi par fibres optiques. Les liaisons ici sont plus courtes, mais elles se comptent par millions.

A ce moment, la fibre arrivera directement au poste téléphonique de l'abonné, le codage de l'onde sonore en signaux numériques, se faisant dans le poste lui-même. De telles installations conduisent toutefois à repenser toute la conception du téléphone, mais les avantages seront énormes : la double fibre optique pouvant transmettre beaucoup plus d'informations sera susceptible d'assurer non seulement la transmission de la parole, mais aussi celle de l'image.

La visiophonie, liaison qui assure à la fois le dialogue et l'image des interlocuteurs, pourra alors devenir une réalité aussi banale que le téléphone l'est de nos jours. Et on aura le plaisir de savoir que les intéressantes paroles qu'on prononce au téléphone sont transportées jusqu'à un auditeur attentif par un pointillé de lumière dans un fil de verre : c'est cela le progrès.