

Les fibres òptiques

per Michel Treheux

Les fibres òptiques substituiran ben aviat els actuals fils de coure i permetran una veritable revolució en el camp de les comunicacions. La quantitat d'informació que poden transmetre és unes 1.000 vegades superior a la que avui ens permet la comunicació telefònica. L'any 2.000 tothom consultarà els bancs d'imatges i els viatges de negocis seran substituïts per videoconferències.

Petita i curta història del que s'esdevindrà

Patrick i Violaine quedaren perplexos davant un instrument estrany, de formes arcaïques, d'un color gris més aviat polsós i amb un cordó recargolat, que hi havia al graner de la casa de llur àvia. Portats per la curiositat, descobriren, a sota, una etiqueta on es llegia... "telèfon". Ja n'havien vist a les pel·lícules d'època però mai no havien imaginat que pogués ésser tan lleig. I a més a més, aquests fils metàl·lics que pengen! Per a què podien servir? Actualment, l'any 2005, quan tota la informació es vehicula per la llum, és difícil per als infants de comprendre com hom podia comunicar-se a través de fils de coure.

Si els expliquem, a més a més, que les quantitats d'informacions que constitueixen el seu lot quotidià al visiófon o a la macrovisió són mil vegades més grans que les que intercanviaven llurs avis a través del telèfon, tot just fa vint-i-cinc anys, podran adonar-se de la distància de la seva civilització òptica en relació amb l'era de l'electrònica dels anys 1980. Però, d'on ha sortit i doncs, aquesta veritable mutació?

L'historiador que se centri en aquest problema apassionant podrà remuntar fins als senyals de fum o el telègraf Chappe per retrobar les primícies dels mitjans de comunicació moderns. Si la seva anàlisi és prou acuradada, descobrirà fins i tot alguns investigadors estraforaris que, cap als anys 1960, pensaven utilitzar làsers per a transmissions aèries. Si donem

una ullada a fotografies d'època, comprovarem la follia d'aquests precursors que, per a uns 140 Mb/s, utilitzaven làsers de dos metres de llarg. De tota manera, l'atmosfera no podia ser prou estable (boira, fums, turbulència) per permetre mitjans de comunicació segurs. Remenant suficientment en el arxius, tindrà la impressió d'una reeixida fortuna dels sistemes sobre fibres òptiques sense comprendre exactament com aquestes han pogut sorgir tan brutalment. Quan, per casualitat, retrobi alguns vells investigadors jubilats, aconseguirà, finalment, l'explicació...

Recerca i casualitat

El naixement de les fibres òptiques fou, a la vegada, el fruit d'una recerca organitzada i d'una casualitat feliç:

– **recerca organitzada**, puix que la mateixa fibra es despenia d'una reflexió sobre la conducció de la llum, l'única possibilitat per alliberar-se de les pertorbacions atmosfèriques.

– **casualitat feliç**, puix que cap al 1970 hom descobria que tres materials presentaven característiques interessants en la mateixa regió de l'espectre òptic: eren, d'una banda, l'arseniür de gal·li i els seus derivats, que emeten llum en longituds d'ona compreses entre 0,8 μ i 0,9 μ ; d'altra banda, el silici, capaç de detectar, amb una sensibilitat molt bona, aquesta gamma de longitud d'ona, i, finalment, el sílice, extraordinàriament transparent en aquesta zona.

En funció d'aquests elements pogueren néixer doncs les fibres òptiques. Molt ràpidament, nombrosos laboratoris compregueren el partit que podien treure d'aquests "cabells lluminosos" i tingueren lloc progressos permanents, tant en l'àmbit de la tecnologia com en el de l'aplicació. Tot seguit explicarem la "història" d'aquest desenvolupament.

– **Les dimensions**: Per conduir la llum és necessari, com en una font lluminosa, disposar de dos materials d'índex diferents: el cor on es concentrarà la propagació, que tindrà un índex superior al material exterior, i la beina. Segons el tipus de fibra, el cor podrà tenir dimensions que aniran de 10 a 85 μ , mentre que la beina restarà fixada a 125 μ (existeixen també altres dimensions per a aplicacions a distàncies curtes).

– **L'atenuació**: l'atenuació va lligada a dos factors essencials, que són l'absorció de la matèria i la difusió de la llum sobre els agregats de partícules que existeixen sistemàticament en els materials vitris. Aquests dos fenòmens varien al llarg de l'espectre òptic, i mentre que el primer és tributari de les impureses, el segon minva ràpidament amb la longitud d'ona. En la primera finestra "històrica", al voltant de 0,8 μ , s'observaven normalment atenuacions de 3 dB/Km. La segona finestra (1,3 μ), i més tard la tercera (1,55 μ), han portat aquesta atenuació respectivament a 0,7 dB/Km i 0,2 dB/Km. Donat que la dinàmica dels sistemes se situa entre 30 i 50 dB, aquest tipus d'atenuacions porten a distàncies compreses entre 10 i 200 quilòmetres.

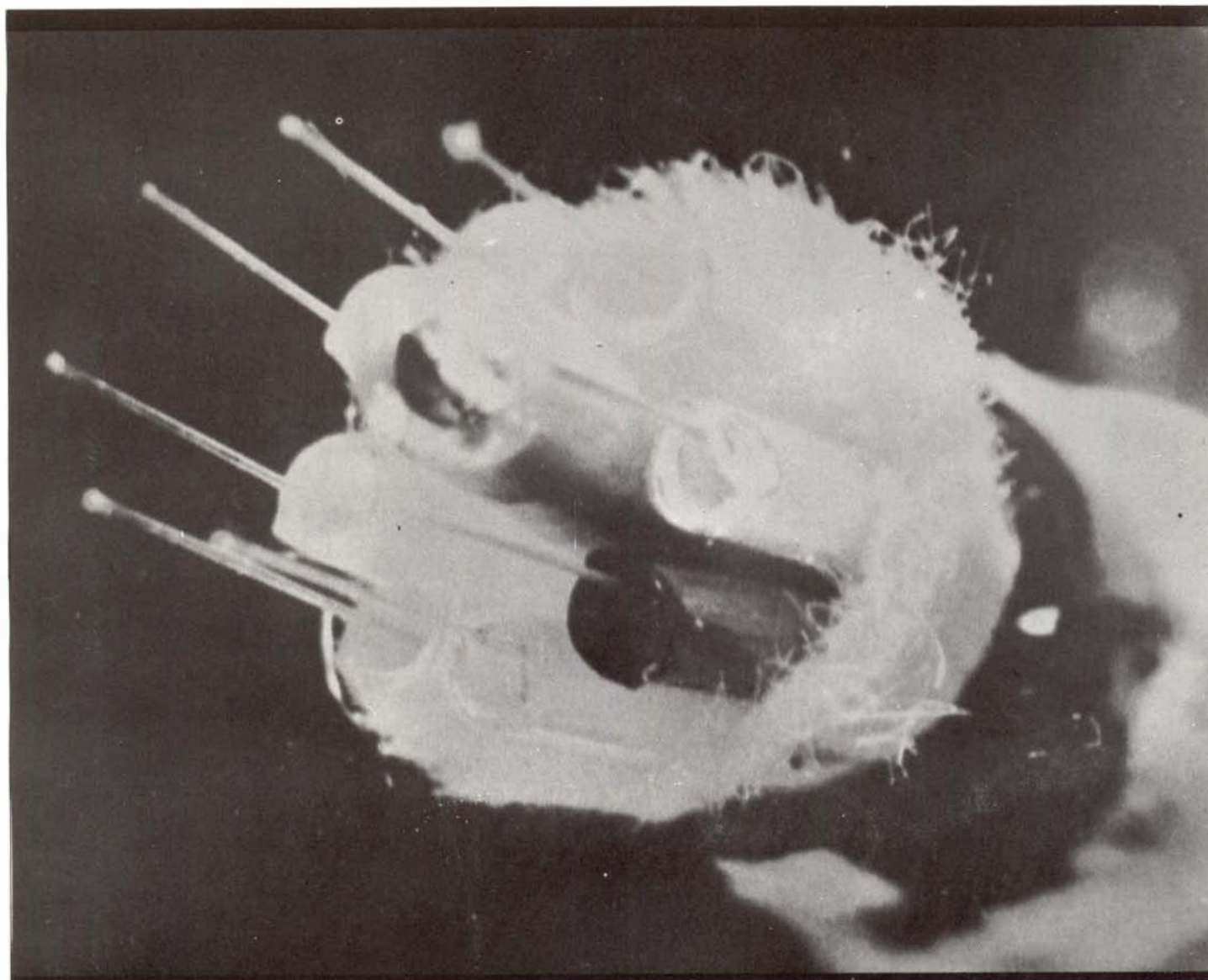


Fig. 1

Cable telefònic de fibres òptiques, primes com un cabell, instal·lat a Berlin Oriental.

– **La capacitat d'informació:** qual-sevol medi de transmissió es caracteritza per la quantitat d'informacions que pot transportar. Expressada, en general, en megahertz (banda passant) o en megabits per segon (cabal), aquesta capacitat depèn estretament del tipus de fibres i de la longitud de la línia. Per a fibres de baixa gamma, és de l'ordre del centenar de MHz/Km (recordem que una imatge de televisió ocupa de l'ordre de 7 MHz), mentre que poden assolir uns quants centenars de GHz (1000 MHz) per a fibres monòmodes amb fonts òptiques ben adaptades.

Aquests tres paràmetres (grandària petita, atenuació molt feble, grans capacitats) expliquen per si sols l'èxit de les fibres òptiques i el fet que avui (recordem que som a l'any 2005) hagin substituït totalment les xarxes de coure les capacitats màximes de les

quals eren de l'ordre d'unes quantes desenes de MHz/Km (el cable coaxial més gruixut utilitzat en les P.T.T. de l'època, vehiculava capacitats de 60 MHz amb repetidors electrònics cada dos mil quilòmetres). D'altra banda, podem remarcar que la relació 1000 en capacitat apareix entre el coaxial

El naixement de les fibres òptiques fou a la vegada el fruit d'una recerca organitzada i d'un atzar fel·liç.

més gros dels anys 1980 i les fibres monòmodes d'avui, relació aquesta que explica força bé la progressió dels vint darrers anys en matèria de quantitat d'informació subministrada als usuaris.

Per poder utilitzar aquestes tècniques calia posar a punt, paral·lelament, fonts emissores i detectors de llum. Si s'hagués conegut abans del 1970 les possibilitats d'eletroluminiscència en l'arseniür de gal·li, s'hauria demostrat que l'efecte làser, en aquest semiconductor, podia obtenir-se simplement mitjançant injecció de corrent i els primers diodes funcionant a temperatura ambient hauriem sortit dels laboratoris en paral·lel amb les primeres fibres (vegeu text emmarcat n.º 4).

El silici fotodetector ja s'utilitzava molt i només calia una senzilla adaptació tecnològica. El descobriment, vers el 1977, de zones d'atenuació molt febles, a 1,3 μ i després a 1,55 μ , havia de renovar les recerques, i un material complex (GaInAsP sobre substrat d'InP) permetria d'emetre en aquestes finestres, mentre que el germani, ben aviat seguit del complex (HgCd, CdTe), en permetria la detecció.

La fibra, per ella mateixa, necessitava el suport de cables per protegir-

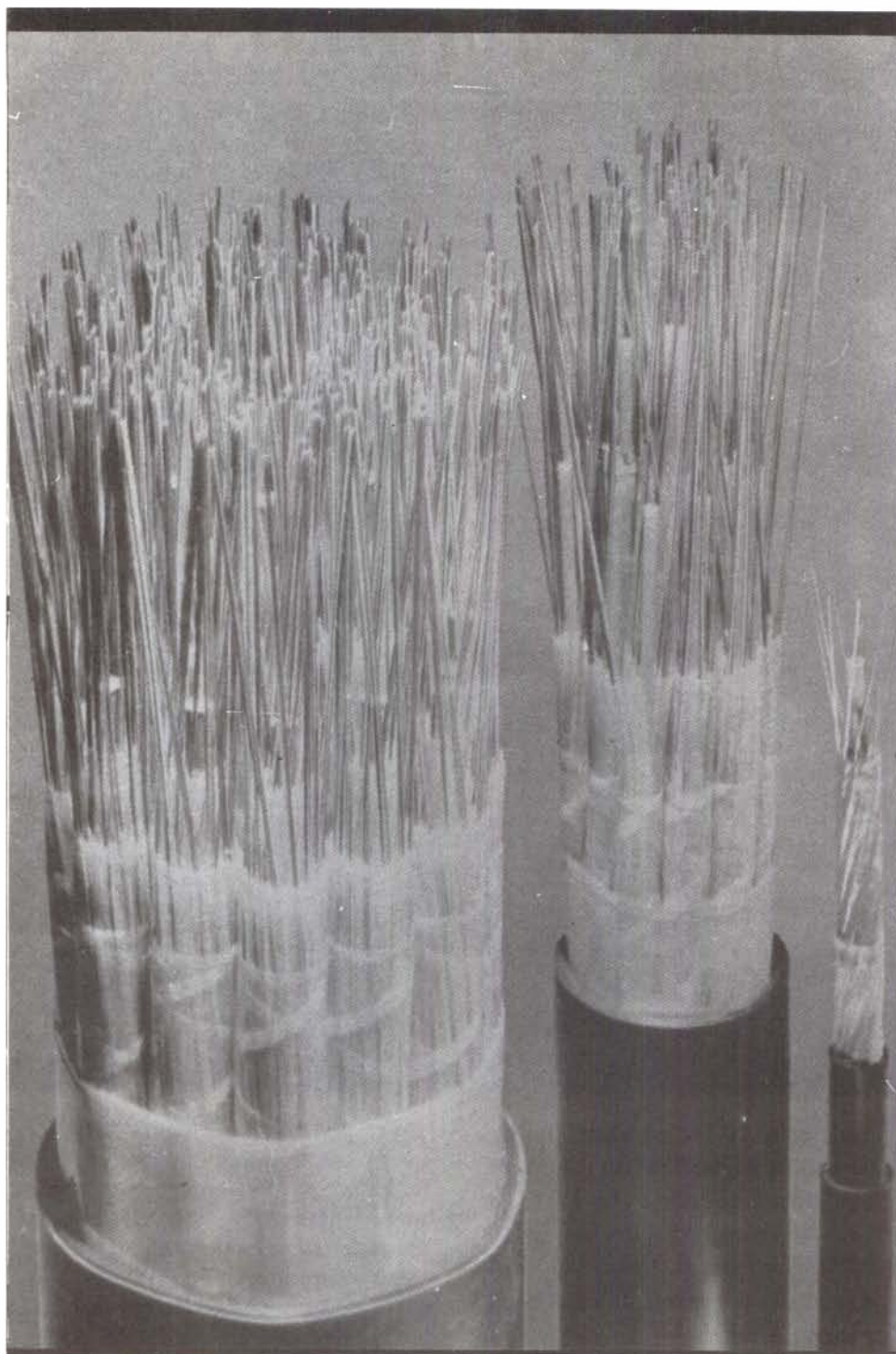


Fig. 2

En aquesta fotografia s'aprecia la varietat de mides dels cables de fibres òptiques actuals.

diari, quan només us cal buscar una pel·lícula que us agradi i recórrer al vostre banc d'imatges per tenir la recepta del vostre plat preferit?

El somni dels tècnics es concretitzà ràpidament en aquest terreny amb la primera experiència de videocomunicació, que prefigurava, en certa mesura, els nostres sistemes actuals. "Biarritz", que s'instal·là el 1983, ja tenia el seu visiófon (amb tub catòdic, i no amb pantalla plana com ara), els seus accessos a nombrosos programes de televisió i, fins i tot, els primers bancs d'imatges interactives. La majoria dels senyals no es beneficiaven de la numeració que aparegué més tard, cap al 1990, en l'àmbit de la televisió. Per això, sens dubte, el cost que tenia per a l'usuari era prohibitiu per a una generalització immediata.

là de les agressions exteriors i d'un conjunt de ressorts de connexions per acoblar-la als emissors i als receptors. Tenint en compte les dimensions, aquest darrer punt era un dels més difícils de resoldre i mobilitzava tots els recursos de la "micromecànica". Al final dels anys 1970, el conjunt d'aquests problemes semblava resolt en el pla industrial i els primers sistemes es posaven en funcionament en el mateix camp: A França, per exemple, una primera línia unia dues grans centrals telefòniques: Tuileries i Philippe-Auguste, situades a una distància de 7,3 Km. S'instal·là un cable de 70 fibres i ja mostrava qualitats que posteriorment s'explotarien llargament

Perspectives en telecomunicacions

Els resultats, bastants extraordinaris per a l'època, feien somniar els nostres investigadors, que començaven a entreveure d'altres perspectives a més de la senzilla substitució de sistemes sobre coure, per a aplicacions a la xarxa telefònica. El moment era oportú, puix que, a més a més, el vell motlle de les comunicacions audiovisuals, amb un nombre molt limitat de canals de ràdio i de televisió, s'estava esquerdant sota la pressió del públic. ¿Podeu imaginar-vos, avui, veure-us reduïts a tres programes de televisió i a escollir-ne un amb l'ajuda d'un

L'audiovisual esdevindrà el mitjà de comunicació únic, tant per als intercanvis interpersonals com per a la informació en qualsevol àmbit.

Basant-se en aquesta experiència, els responsables de les telecomunicacions de l'època buscaven una estratègia capaç de crear el conjunt dels serveis de videocomunicacions, amb una progressió en el temps que assegurés una certa rendibilitat econòmica

Fig. 3

Els mitjans audiovisuals s'introduiran en l'activitat diària per esdevenir el mitjà de comunicació més corrent en tots els àmbits.

Aquesta estratègia s'havia de fer a tres nivells, el primer dels quals consistia a enterrar una xarxa de cables òptics respecte als usuaris per a serveis relativament senzills (distribució de programes de vídeo), però que representaven un gran progrés en relació amb les tres cadenes nacionals.

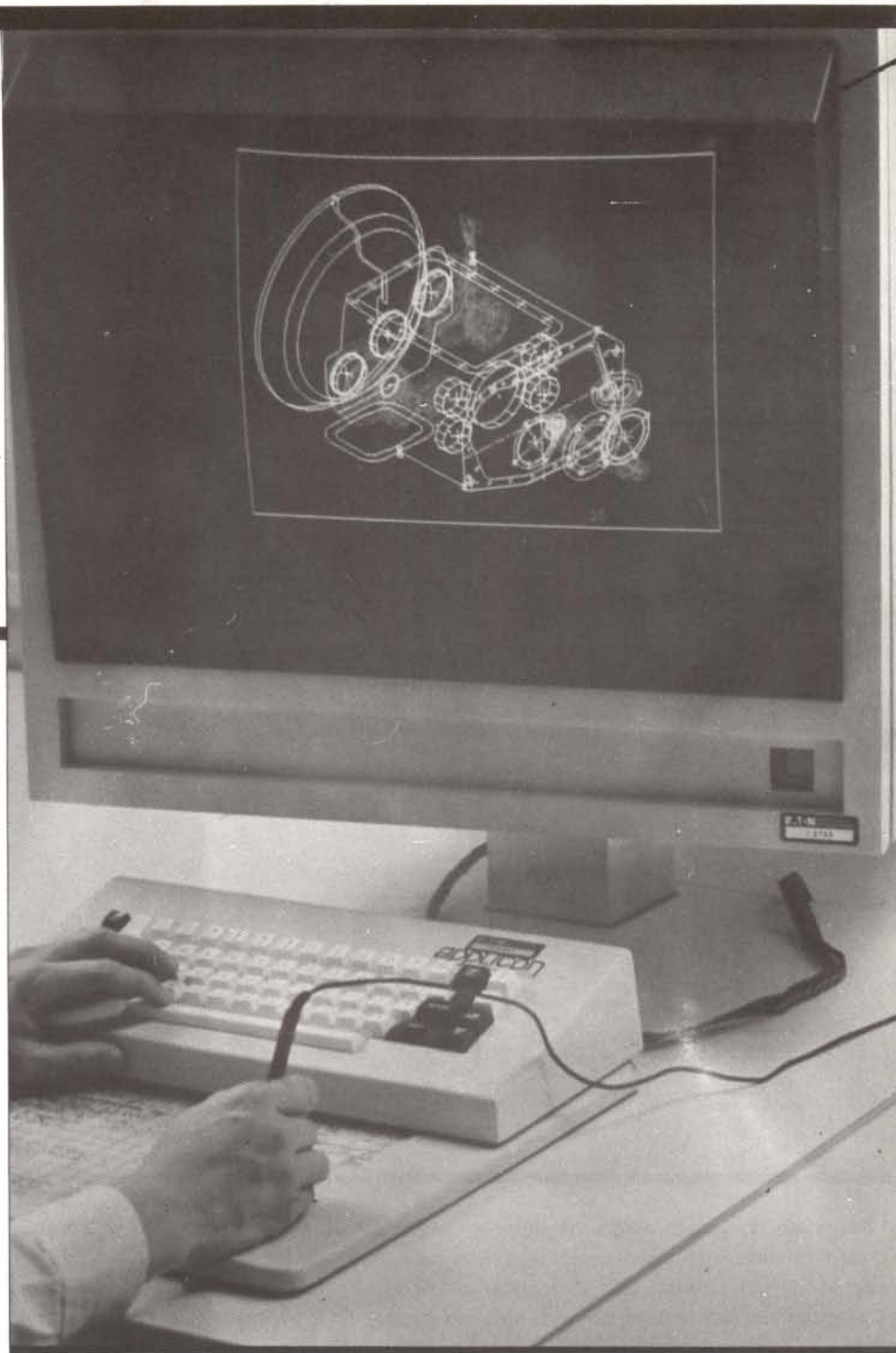
Aquesta primera etapa portava a la infraestructura pensant de la nostra xarxa actual.

El segon nivell creava, mitjançant l'acoblament de la imatge distribuïda i de les xarxes de dades numèriques, una intel·ligència nova que havia de fer possible una bona part de les aplicacions interactives que avui coneixem (videotex animat, accés a bancs d'imatges per a la informació, la formació, la compra i la reparació a distància, etc.).

Paral·lelament a aquestes dues etapes, es posava en funcionament una xarxa de transmissió molt evolucionada, que utilitzava majorment fibres monòmodes, primer entre les grans aglomeracions, després més localment, fins a fer el servei a petits centres (recordem que actualment aquestes fibres arriben fins i tot a alguns usuaris).

És important remarcar que l'òptica no ha jugat un gran paper únicament en matèria de transmissió, sinó que també se n'utilitzaren un cert nombre de funcions per aportar flexibilitat a l'organització de les xarxes.

Les tècniques de multiplexatge permeten de passar d'enllaços de transmissió monòmodes, instal·lats el 1985, per a capacitats de 140 Mb/s, a línies capaces de vehicular avui més de 10 Gb/s. si afegim a les qualitats



tècniques dels multiplexors la possibilitat de commutar els senyals per via òptica, arribem a les tècniques actuals de xarxes complexes a on l'òptica assegura la major part dels tractaments (gestió i senyalització, tractament dels senyals, commutació i transmissió). Mirem ara una mica al nostre voltant. La imatge, o millor dit l'audiovisual, ha esdevingut el mitjà de comunicació únic, tant per als intercanvis interpersonals, com en la informació, en l'àmbit de l'educació, o a l'empresa, on la visioconferència ha substituït, progressivament, els desplaçaments. De mica en mica, les noves generacions han après a utilitzar aquests mitjans i han passat de l'estadi d'espectadors passius de 1984, al de productors que

manegen la cambra i la consola gràfica amb la mateixa facilitat que el llapis l'antany. L'audiovisual, reservat abans a una élite, ha esclatat, literalment. És veritat que els nous discs òptics numèrics reversibles, integrats a les cambres en estat sòlid, permeten a cadascú de realitzar produccions de qualitat tal i com abans es feia una bona fotografia. No obstant això, malgrat l'aparició de les pantalles planes que han marcat la fi del tub catòdic, la imatge resta poc viva, encara que alguns artificis hagin pogut donar una impressió de relleu. Des de fa uns mesos, els xinesos (que han substituït els japonesos en el camp de la imaginació) han presentat un nou sistema de visualització en relleu integral:

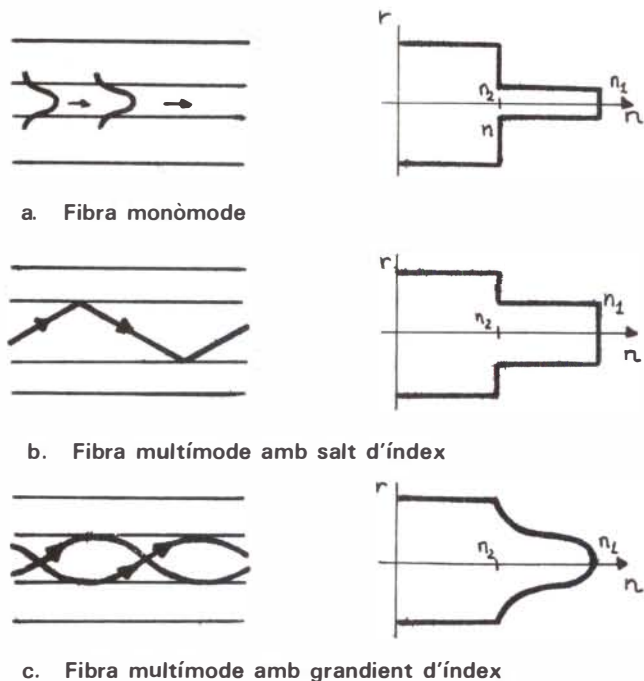
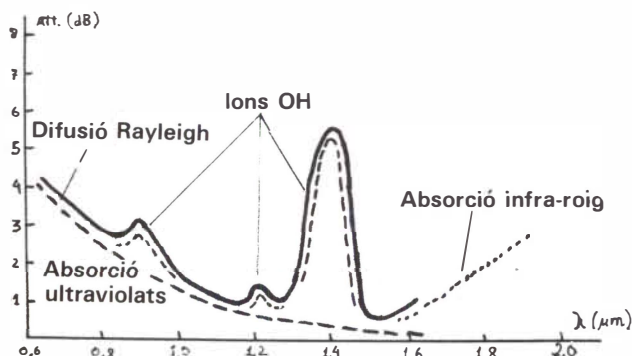


Fig. 4

Fibres òptiques i propagació segons el diàmetre de la part central de la fibra. L'atenuació és il·lustrada en l'esquema final, a on apareixen les fonts d'absorció i de difusió.



l'holovisió. Les demostracions públiques han estat sorprenents; alguns espectadors han intentat fins i tot tocar els actors de tan ben reproduïda que estava la impressió de visió real. L'inconvenient més gran d'aquest sistema és que cal desplaçar-se, puix que sembla difícil trobar un mitjà de transmissió capaç de suportar-lo. En efecte, la seva capacitat és mil vegades més gran que el senyal de vídeo clàssic. Però ja es parla de la propagació de les solucions en les fibres i de la conjugació de fase per a la conmutació...

el segle XIX. Aquestes lleis mostren que, en funció de les seves dimensions, apareix una quantificació dels modes de propagació de l'energia en la guia. Si el diàmetre de la part central (el cor) és prou petit, només pot existir una sola forma de propagació: la fibra s'anomena monòmode (a). Si el diàmetre de la part central és més gran, poden coexistir un gran nombre de modes, fins al punt que la teoria de la propagació esdevé la dels raigs de l'òptica clàssica i, per consegüent, la de les lleis de Descartes (reflexió total). Les fibres corresponents s'anomenen multimodes. Segons la distribució de l'índex dins del cor, distingim igualment fibres amb salt d'índex o amb gradient d'índex. En el primer cas (b), el trajecte òptic (índex X distància) depèn de l'angle d'entrada a la fibra. Al cap d'una certa distància, una impulsió, repartida a la vegada en dos angles diferents, s'ampliarà en el temps. En aquest cas, concebem que

la capacitat d'informació serà relativament feble (cavalcada de les impulsions).

Les fibres amb gradient d'índex (c) toren inventades per pal·liar aquest defecte. En aquest cas, els trajectes òptics, mitjançant una fibra ideal, són independents de l'angle. La capacitat és llavors molt més gran. Només està limitada per la dispersió del material, com en el cas de les fibres monòmodes. Aquesta dispersió està lligada al mateix material l'índex del qual varia amb la longitud d'ona i de la font utilitzada. Si aquesta és espectralment pura (font monofreqüència), la dispersió és nul·la. Si ho és, una impulsió emesa en dues longituds d'ona arribarà, en moments separats, al final d'una distància determinada. Llavors, la capacitat es veurà reduïda. En la mesura que és difícil realitzar fibres perfectes amb gradient d'índex, els dos fenòmens limiten la capacitat de les fibres multimodes, mentre que les fibres

Fibres òptiques i propagació

Les fibres òptiques són guies d'ones electromagnètiques i segueixen, en aquest aspecte, les lleis de propagació descobertes per Màxwell

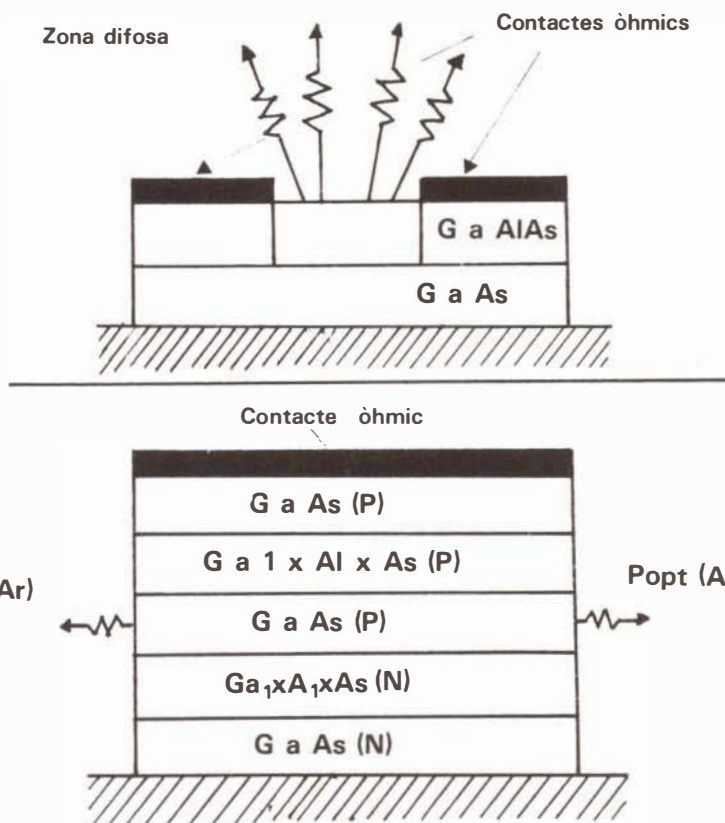
Amb l'holovisió hom aconsegueix la impressió que les imatges de televisió són reals i poden tocar-se.

monòmodes només estan limitades pel segon. Llavors és interessant utilitzar làsers monofreqüències per assolir les capacitats esmentades en el text (unes quantes desenes de GHz. km).

Un paràmetre fonamental per a

Fig. 5

Díode electroluminiscent i díode làser: estructura dels dos tipus de components emissors. El primer és d'estructura senzilla, una excitació elèctrica provoca una emissió de fotons. El segon, mitjançant la injecció d'un corrent important en un volum reduït produeix una emissió làser.



totes les guies és l'obertura numèrica definida a partir de la diferència d'índex entre la beina i el cor. És aquesta la que determina l'angle sota el qual es pot penetrar en una fibra i determina, doncs, el conjunt de les relacions d'acoblament.

Un dels paràmetres essencials de les fibres és l'atenuació il·lustrada en la figura següent, on retrobem les principals fonts d'absorció (U.V. -infraroig, ions OH -sortides de residus de vapor d'aigua) i de difusió (lleis de Rayleigh). La corba final (trets plens) fa aparèixer les finestres característiques al voltant de $0,8 \mu$, $1,3 \mu$ i $1,5 \mu$.

Díode electroluminiscent i díode làser

Hom distingeix dos tipus de components emissors.

El primer, d'estructura senzilla, conegut des de fa molt temps, és un díode electroluminiscent. Una excitació electrònica, en un determinat material, provoca una emissió de fotons. L'emissió espontània és incoherent. En resulta un espectre òptic bastant ample i, sobretot, un diagrama d'emissió proper a 180° . Tenint en compte l'angle d'acceptança de les fibres (de 10 a 20°), s'obtenen, en general, pèrdues superiors al 90% . Contràriament, per la seva simplicitat, es un component de molt baix cost.

El segon, mitjançant la injecció d'un corrent important en un volum molt reduït, posa en funcionament un

fenomen d'inversió de població electrònica que porta a una emissió làser. Potent, i sobretot més directiva, la potència òptica pot ésser modulada a una velocitat molt elevada (26 Hz). A més a més, l'espectre emès és molt més estret i pot ésser, fins i tot, monofreqüència. Contràriament, per la seva complexitat lligada a la seva estructura (estabilització tèrmica, asserviment de la potència, etc.), és un component més car. Troba nombroses aplicacions fora de les fibres òptiques, en particular, amb els discs òptics (videodisc, compact discs, etc.)

Les xarxes del futur.

La primera fase del desenvolupament de les xarxes de videocomunicacions correspon a la creació de serveis de teledistribució (selecció entre 15 a 30 programes). La xarxa comprèn "grups d'usuaris" (de 250 a

1000 aproximadament) units a un centre de distribució que disposa, mitjançant una xarxa de transport, de tots els programes disponibles. L'usuari selecciona, gràcies a la comanda, un programa que ell ha escollit i que li és enviat per la seva fibra òptica. El cap de xarxa concentra totes les informacions audiovisuals disponibles provinents de les xarxes de transmissió, de xarxes de difusions (canal hertzià o satèl·lits, programes locals) i, eventualment, bancs de programes anomenats també "videoteques". Aquesta primera fase, conforme a les decisions que s'han pres recentment (03/11/1982), posa en funcionament, en especial a la part terminal de la xarxa (la distribució), la infraestructura pesant (enginyeria civil, cables, connexions, equipament d'extremitats) de la futura xarxa.

La segona fase és la introducció de possibilitats de diàleg entre l'usuari i la xarxa per mitjà de enllaços de baix

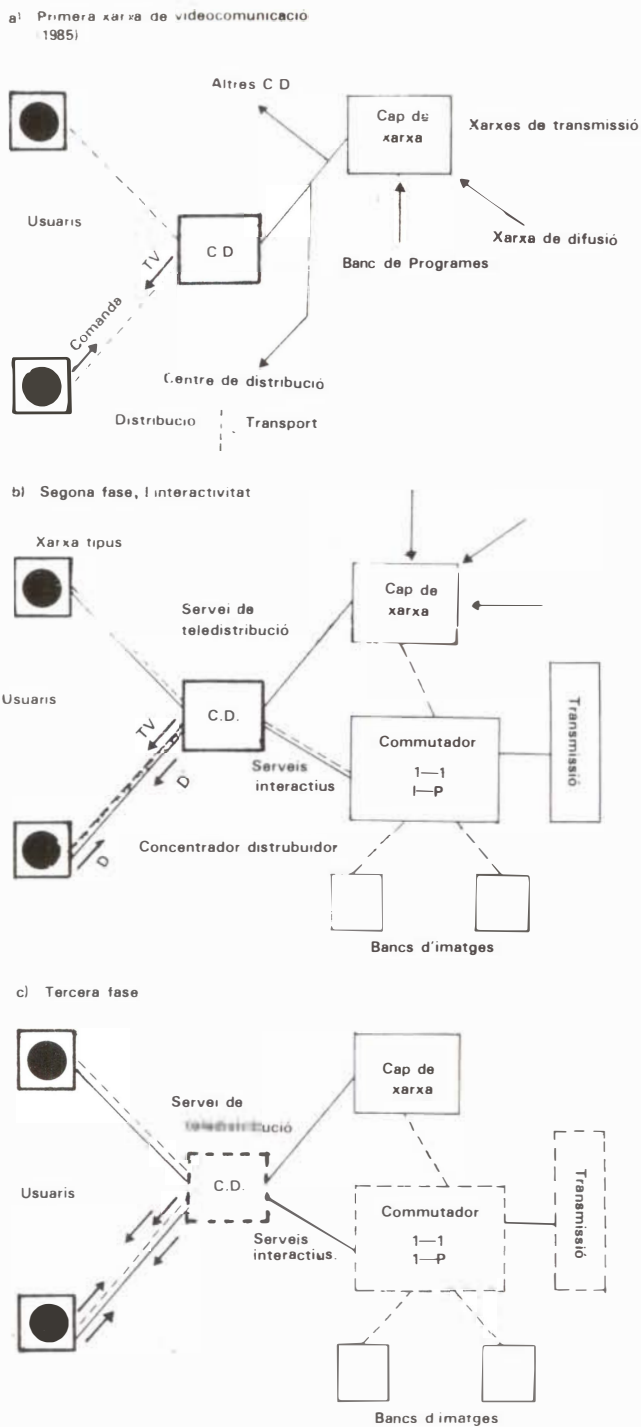


Fig. 6

Les xarxes del futur: les tres fases del desenvolupament de la xarxa de videocomunicació.

via descendent utilitza un múltiplex elèctric del canal D' i del canal de vídeo en una longitud d'ona $\lambda 2$.

La darrera fase afegeix un múltiplex elèctric del canal visiofònic i de les dades D i una longitud d'ona suplementària per al retorn del visiofòn: $\lambda 3$.

Aquesta agilitat és un dels elements fonamentals, puix que permet de no modificar en res l'arquitectura de base de la xarxa. Les intervencions només s'efectuen a les extremitats amb conservació integral de les instal·lacions precedents.

Si imaginem la capacitat que hauria de vehicular la xarxa de transmissió interurbana del futur, un càlcul senzill, basat en l'equació: 1 imatge de vídeo = 1000 línies telefòniques, ens mostra que caldrà multiplicar la xarxa actual per un factor proper a 1000.

El problema que es planteja el 1983 és construir aquesta xarxa en condicions econòmiques, sense conèixer exactament l'evolució de la demanda (en quin termini de temps es produirà el pas d'1 a 1000?).

Sabem, d'altra banda, que la instal·lació d'un enllaç amb fibres monòmodes serà més econòmic per a cabals clàssics de 140 Mb/s (base de la xarxa actual) que qualsevol altre mitjà de comunicació.

Partint d'aquestes consideracions, el Centre Nacional d'Estudis de Telecomunicacions de França ha presentat un projecte per tal de demostrar que la instal·lació d'un enllaç monòmode de 140 Mb/s (per consegüent, rendible el 1983) podia evolucionar en el temps, fins a capacitats per fibres superiors a 10 Gb/s, sense modificació de la infraestructura de base (enginyeria, cables i connexions associades).

cabal bidireccionals comparables a enllaços telemàtics (D-D' al gràfic). La xarxa de transport es duplica amb l'aparició de línies adaptades als serveis interactius i, commutadors que donen accés a bancs d'imatges locals o a distància (xarxa de transmissió).

Aquesta segona etapa introdueix essencialment una infraestructura lleugera basada en logicials multiserveis. S'ha de produir en fase amb l'evolució actual de la xarxa telefònica (xarxa que integra la telefonia i les dades) i beneficiar-se dels estudis corresponents.

La darrera evolució completa els serveis precedent amb les possibilitats de enllaços bidireccionals que obren la

via d'un conjunt de combinacions extremadament variades. La xarxa de Biarritz, que posseix aquesta darrera arquitectura, sembla, avui, el blanc de la futura xarxa de videocomunicacions.

La figura següent mostra la importància del paper dels mitjans òptics en aquesta evolució. La primera fase es realitza amb elements senzills sobre una fibra òptica per usuari entre el centre de distribució i l'usuari.

La segona fase utilitza la possibilitat de multiplexar diverses longituds d'ona sobre una fibra per multiplicar els senyals vehiculats per aquesta. A la longitud d'ona $\lambda 1$, es transporta el canal D de dades telemàtiques. La