

LE RESEAU TELEPHONIQUE



LE RESEAU TELEPHONIQUE

par L.J. Libois

■ *Pour satisfaire des demandes toujours croissantes dans un domaine où elle a pris d'indéniables retards, la France devrait quintupler en quinze ans les dimensions de son réseau téléphonique. Quels moyens mettre en œuvre ?*

■ *Vu les dimensions imposantes et la complexité des infrastructures nécessaires, la réponse à cette question est en grande partie économique. Sans négliger les problèmes d'investissements et de rentabilité, le présent article expose les principaux problèmes techniques posés par cette gigantesque croissance et recense les solutions dont on dispose — ou dont on disposera demain — pour y faire face.*

■ *La technologie des télécommunications est en effet en pleine évolution. La commutation électronique et la numérisation de la transmission, par exemple, annoncent une conception nouvelle des réseaux téléphoniques. D'autres innovations spectaculaires seront sans doute exploitées dans un proche avenir : communications par satellites, par guides d'ondes, voire par lasers.*

Ancien élève de l'Ecole polytechnique et de l'Ecole nationale supérieure des télécommunications, Louis-Joseph Libois est, depuis 1968, directeur du Centre national d'études des télécommunications (CNET). Auparavant, pendant six ans, il fut directeur de l'établissement du CNET à Lannion. Son rôle a été décisif dans le développement en France de la commutation électronique.

Le terme « télécommunications » est indifféremment appliqué à la diffusion d'information « à sens unique » comme c'est le cas en radio ou en télévision, et à l'échange d'informations. L'essentiel est que le support utilisé soit le courant électrique ou les ondes électromagnétiques. En fait, si la télévision d'une part, le téléphone ou le télex d'autre part, sont actuellement bien différents du point de vue des applications, les mêmes principes techniques sont employés dans les deux cas. Un faisceau hertzien ou un circuit par satellite de télécommunications, par exemple, permettent la transmission de signaux de télévision aussi bien et souvent en même temps que des communications téléphoniques.

Considérons donc la « machine » de télécommunication qui englobe toutes ces techniques : le réseau de télécommunications. Le but d'un réseau est de rendre possible les communications d'un point à un autre d'un territoire.

Un réseau doit trouver, en interprétant les ordres qu'il reçoit, le point avec lequel on désire correspondre : il doit ensuite établir un chemin entre les deux points. Ainsi le réseau est-il un ensemble d'appareils « intelligents » — les commutateurs — qui trouvent un chemin, et de supports « physiques », ceux de la transmission, qui concrétisent ces chemins. Par analogie avec la théorie des graphes — discipline bien utile pour la compréhension des réseaux téléphoniques — on notera qu'un réseau est un ensemble de branches (les artères de transmission) et de nœuds (où se trouvent les commutateurs). Mais un réseau n'est pas un graphe figé

de structure déterminée une fois pour toutes ; au fur et à mesure que la taille du réseau croît, l'ensemble du graphe s'adapte. Son dessin se modifie aussi à chaque fois que des techniques nouvelles sont introduites. Pour avoir un réseau efficace deux problèmes se posent donc : trouver un chemin rationnel et économique dans le graphe existant ; trouver les structures de graphe les meilleures possibles à chaque fois que les « nœuds pendants » — les points terminaux du graphe, c'est-à-dire les abonnés — croissent en nombre. Comprendre ces deux problèmes est encore relativement aisé au niveau des lignes d'abonnés ou, comme on dit dans le jargon des télécommunications, de la *distribution*.

Un réseau de distribution écoule des communications qui ne dépassent pas une aire géographique limitée. En première approximation, on peut considérer qu'il comprend un commutateur et les lignes qui le relient à votre poste. Combien de personnes connaissent l'importance, la taille, la complexité, et... le coût des commutateurs ? Les usagers du téléphone ont en effet du réseau téléphonique une connaissance un peu analogue à celle que les navigateurs ont des icebergs ! On ne se doute en général pas de l'importance de la partie « invisible ». Le poste d'abonné et les fils de raccordement visibles dans les immeubles ne représentent pas plus de 50 à 100 F sur les 5 000 F que coûtent — en gros — les investissements nécessaires au raccordement d'un nouvel abonné qui pourra téléphoner à n'importe quel point d'un réseau de la taille du réseau français.

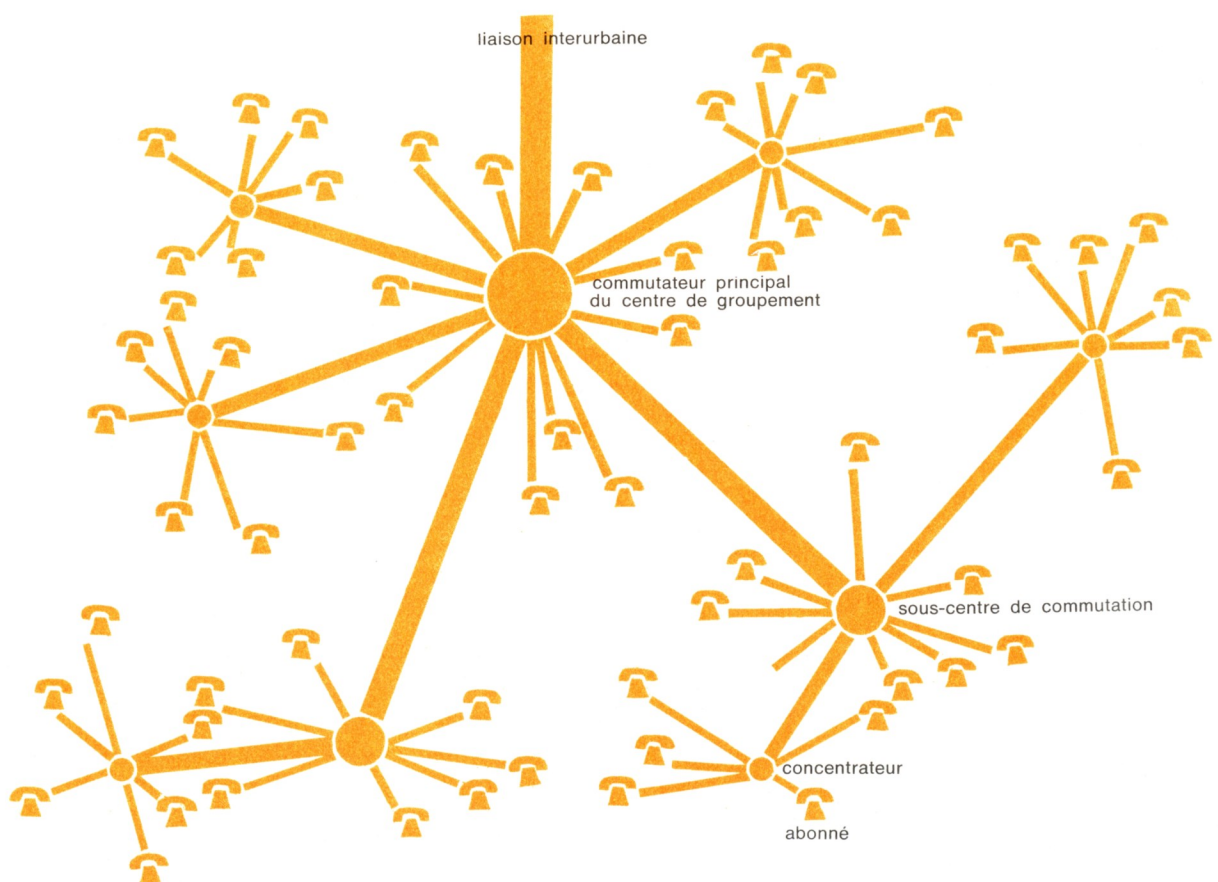


Fig. 1. Réseau de distribution. Un réseau téléphonique est constitué d'organes de transmission et de commutateurs permettant la connexion de la ligne du demandeur et celle du demandé. Au sein des réseaux de distribution, les abonnés sont reliés à un seul commutateur qui possède l'autonomie d'acheminement, c'est-à-dire qu'il peut aiguiller un appel sur n'importe quelle direction. Pour des raisons d'économie, on peut « concentrer » les lignes en amont du commutateur. S'il existe un nombre suffisant d'abonnés situés dans une même zone éloignée du commutateur, on les relie à un sous-centre de commutation qui ne peut qu'établir des communications entre les abonnés reliés au même sous-centre ou les envoyer au commutateur principal.

Le réseau élémentaire.

Un réseau de télécommunications forme un tout. Pour que sa gestion soit possible, il est organisé en plusieurs niveaux hiérarchiques. Les abonnés et le central auxquels ils sont rattachés forment le réseau de distribution.

Les réseaux de distribution comprennent les lignes de raccordement des postes d'abonnés à un commutateur qui est capable (on dit qu'il « possède l'autonomie d'acheminement ») d'envoyer une communication d'un poste à un autre du réseau local de distribution, ou de l'envoyer vers l'extérieur de sa zone géographique, vers le réseau régional et national. En schématisant à l'extrême ici, on définit le réseau régional comme l'ensemble des branches qui relient les commutateurs de distribution entre eux et à des commutateurs régionaux. De même, le réseau national relie les commutateurs régionaux entre eux. On verra qu'il y a de nombreuses entorses à ce schéma mais, dans ses grandes lignes, il est valable pour tous les réseaux du monde.

Un réseau local de distribution (fig. 1) se compose donc de toutes les liaisons allant des abonnés au central le plus proche. Partant du poste d'abonné où la manœuvre du cadran et la parole sont transformées en signaux électriques, deux fils établissent la liaison, en basse fréquence, avec le commutateur. Mais le téléphone — comme le télex (qui permet la transmission de messages écrits, transitant sur un

réseau spécialisé et reçus par des téléimprimeurs) — est un instrument d'échange d'informations qui n'est utilisé que de façon intermittente. On cherche donc un compromis économique entre les équipements affectés en permanence à un abonné (que celui-ci soit engagé ou non dans une communication) et les équipements qui n'interviennent qu'à l'occasion d'une communication et qui seront affectés à un groupe de plusieurs abonnés.

Ce compromis, fondé sur le caractère aléatoire et intermittent des appels, s'exprime par la recherche de moyens de *concentration* des communications. Dans certains cas, la fonction de concentration est uniquement assurée par des organes du central. Dans d'autres cas, en zone rurale en particulier, on peut confier, pour partie, cette fonction à un organe spécialisé, un « concentrateur », situé au voisinage du groupe d'abonnés qu'il dessert. C'est un appareil qui affecte une ligne à l'abonné dès qu'il décroche ; ainsi un concentrateur desservant 40 abonnés les reliera au central par 8 lignes seulement, mettant à profit le fait qu'il est très rare que plus de 8 abonnés (résidentiels du moins) cherchent à téléphoner simultanément. « Rare » n'est pas un qualificatif purement subjectif. Le calcul du nombre d'organes des réseaux de télécommunications est fondé sur une théorie statistique qui permet de préciser ce qu'un ingénieur entend par « rare ». Elaborée dès 1905 par le mathématicien danois Erlang, perfectionnée depuis, cette théorie permet de calculer la proportion des cas où il y aura saturation des circuits. Cette probabilité permet d'établir un

indice de la « qualité de service ». Si l'on suppose, d'une part, que la probabilité pour qu'un appel se présente à un organe du réseau (au concentrateur, par exemple) dans un intervalle de temps élémentaire ou dans un autre est la même pourvu que les deux intervalles soient égaux, si d'autre part l'on admet que la probabilité pour qu'une conversation en cours se termine dans la seconde suivante est indépendante de la durée déjà écoulée de cette conversation et si, enfin, l'on se fixe une probabilité de blocage (0,05 % par exemple), la théorie d'Erlang fournit au moyen d'abaques le nombre d'organes nécessaires à l'écoulement du trafic. Avec les mêmes hypothèses de calcul, on peut déterminer, inversement, la probabilité pour que l'appareil concentrant 40 abonnés sur 8 lignes se bloque (fig. 2).

Toutefois, il ne faut pas confondre ces concentrateurs avec les équipements des lignes partagées dans lesquels deux ou plusieurs abonnés sont reliés une même ligne, de sorte qu'à partir du moment où l'un d'eux l'utilise, elle apparaît occupée.

Dans tous les cas, une nouvelle étape dans la concentration est assurée par le commutateur dont l'objet primordial est néanmoins de mettre en relation deux correspondants qui ne sont généralement pas les mêmes d'une communication à la suivante. La façon dont elle est réalisée dans la pratique est assez complexe et actuellement en pleine révolution technologique.

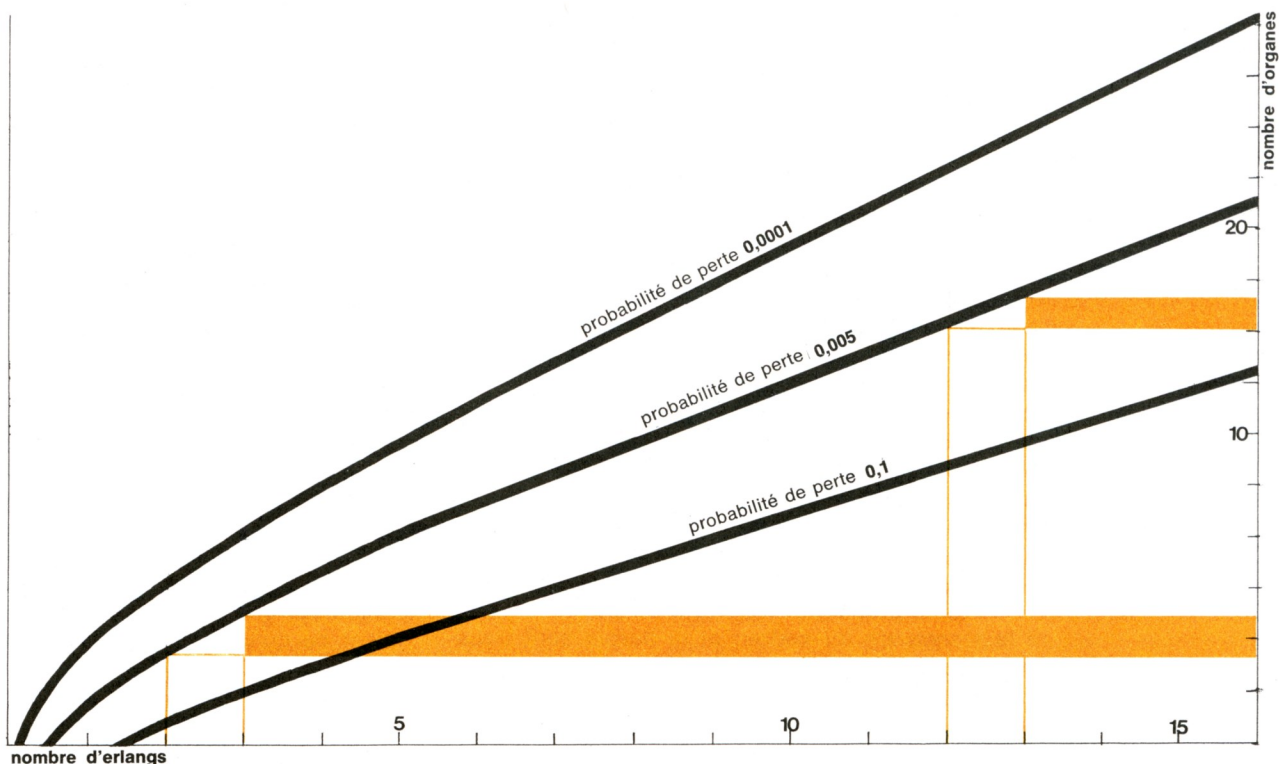
Comment choisir le nombre et l'implantation des centraux ? Un nombre élevé de centres de commutation permet en principe des économies sur le réseau d'abonnés, tant sur la longueur des lignes

que sur le diamètre des conducteurs (car plus la ligne est longue, plus le diamètre du fil doit être grand pour limiter l'affaiblissement du courant). A l'inverse, multiplier le nombre de petits centraux, qui exigent autant de bâtiments et d'installations leur fournissant l'énergie électrique appropriée, coûte cher et introduit une complexité accrue du réseau de jonctions entre commutateurs de distribution.

Aujourd'hui, un accroissement de la taille de la zone de desserte d'un central est possible grâce à l'amélioration des performances électriques du poste d'abonné : un microphone et un écouteur de meilleure efficacité se contentent d'un courant plus faible. (On peut également recourir à des artifices tels que la suralimentation des lignes longues, ou l'insertion de répéteurs à « impédance négative ».)

Certains réseaux locaux — c'est le cas, en particulier, des grands réseaux urbains —, comportent obligatoirement plusieurs centraux. En effet, on ne sait pas encore faire fonctionner des commutateurs ayant la charge de plus de 40 000 lignes d'abonnés. Or il est bien évident qu'une ville comme Paris, qui possède plus de 700 000 lignes principales, n'a qu'un seul réseau de distribution. Il faut donc, pour écouler le trafic local, plusieurs commutateurs reliés entre eux par des faisceaux spéciaux dits de *jonction*. Chacune de ces jonctions se termine dans un central par un joncteur, organe qui interprète les codes de signalisation. Comme les réseaux urbains français comportent des centraux de générations différentes qui utilisent malheureusement des codes fort divers, les joncteurs sont des équipements complexes.

Fig. 2. Courbes d'Erlang. Des abaques — les courbes d'Erlang — permettent de calculer le nombre de circuits nécessaires pour écouler, avec une probabilité de perte donnée, un certain trafic. On voit que pour écouler (avec une probabilité de perte de 0,005 par exemple) un troisième erlang, il faudra plus d'organes que pour en écouler un treizième.



Le réseau interurbain.

Tous les commutateurs ne peuvent être reliés entre eux. Les communications sont aiguillées d'un centre à l'autre par des commutateurs spécialisés, les centres de transit.

Les joncteurs sont également essentiels au dialogue des réseaux locaux avec le réseau interurbain régional puis national. Mais ici, en dehors du fait que les liaisons requièrent des techniques différentes, car elles portent sur de grandes distances, il est nécessaire de spécialiser les organes, voire les commutateurs, dans des types particuliers de dialogue.

En effet, il existe en France quelque 25 000 commutateurs. Vouloir les relier deux à deux représenterait 625 000 000 faisceaux de circuits. Cette solution élémentaire est irréalisable. Une première mesure de simplification consiste à découper le territoire en aires géographiques — les « groupements », qui sont donc les réseaux de distribution — et faire en sorte que le trafic émanant d'un groupement et destiné à un autre groupement transite obligatoirement par le (ou les) centre des groupements intéressés. La création arbitraire de groupements simplifie déjà le problème du réseau interurbain, mais, comme il existe actuellement 700 centres de groupement en France, il faut encore 500 000 faisceaux de circuits (ou 250 000 selon que l'on considère des faisceaux orientés ou non) pour les relier deux à deux. Ce serait encore une absurdité de procéder ainsi d'autant que la majorité des couples de centres de groupement échangent un trafic quasi nul. Il apparaît donc nécessaire de faire jouer à certains centres privilégiés un rôle spécial de commutation interurbaine, de *transit*, auquel d'autres centres peuvent s'adresser pour établir les communications nécessaires. Il existe à cette fin deux solutions extrêmes et un grand nombre de solutions intermédiaires (fig. 3).

La première solution consiste à adopter une structure de réseau entièrement *hiérarchisée* : on définit un certain nombre de niveaux hiérarchiques, on choisit le niveau à conférer à chaque centre et le supérieur hiérarchique à affecter à un centre qui n'est pas du niveau le plus élevé, et l'on oblige chaque appel à remonter puis à redescendre toute la pyramide hiérarchique. Cette solution a le mérite d'être simple, mais elle est coûteuse et, de plus, très vulnérable à la saturation comme à la destruction : qu'un nœud ou une branche soit engorgé ou détruit, et tout le réseau, en aval, est hors de fonctionnement. A l'extrême opposé, on pourrait concevoir, pour un réseau militaire par exemple, un réseau très maillé sans aucune hiérarchie, très peu vulnérable aux destructions mais, en revanche, d'une forte complexité.

Le réseau téléphonique français est un réseau niérarchisé à trois niveaux, mais qui comporte une certaine souplesse d'acheminement. Il est hiérar-

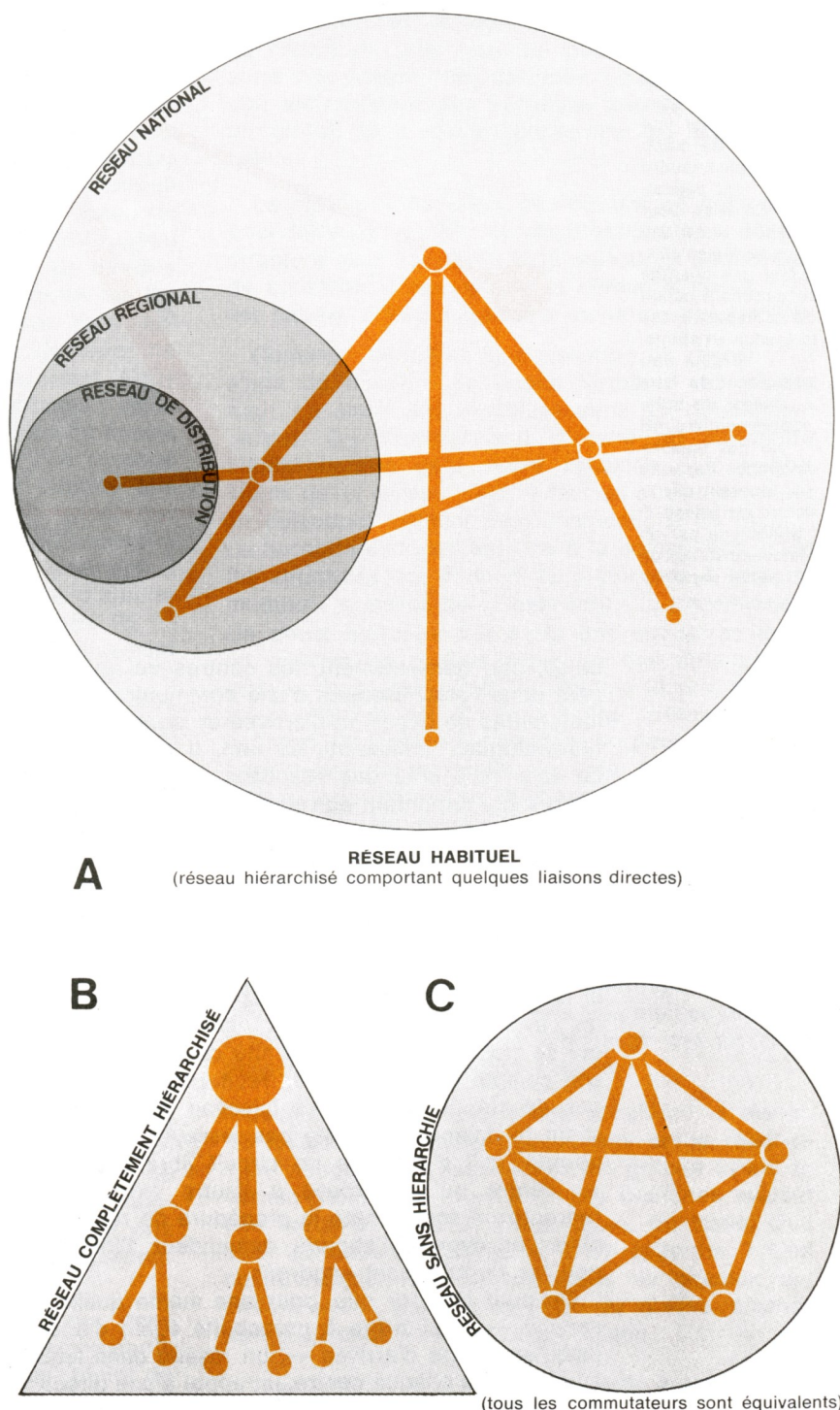


Fig. 3. Réseau interurbain. Les réseaux interurbains de télécommunications sont en général organisés en plusieurs niveaux. Les commutateurs des réseaux de distribution sont reliés entre eux, directement ou par l'intermédiaire d'un centre de transit, et ces liaisons constituent un réseau régional. Les réseaux régionaux, par l'intermédiaire de leurs centres de transit, sont reliés entre eux ; ce dernier ensemble est le réseau national, qui possède également un centre de transit.

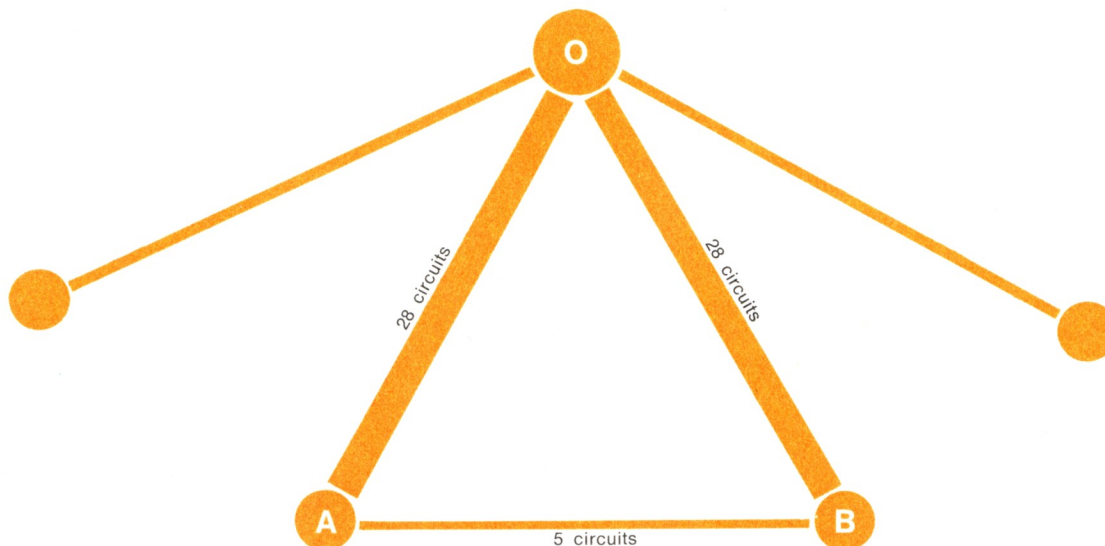
Un réseau ainsi organisé peut être entièrement hiérarchisé (B) : la seule possibilité pour établir une communication est de remonter puis de redescendre la « pyramide » hiérarchique. Il peut être sans hiérarchie aucune (C) : tous les commutateurs sont reliés entre eux et font du transit. Il peut enfin (A) être hiérarchisé, donc posséder des centres de transit, mais avoir néanmoins des liaisons directes entre des commutateurs qui ne sont pas des centres de transit ; c'est le cas habituel.

Fig. 4. Gestion technique du réseau.

Le choix d'une liaison entre deux points A et B pour écouler une demande de trafic supplémentaire est délicat.

En effet, pour écouler un erlang supplémentaire, il faut une quantité de circuits fonction de la capacité des faisceaux existants.

Il peut être intéressant de faire passer de trafic supplémentaire AB par des liaisons de grande capacité passant par le centre de transit O plutôt que par un faisceau direct de petite capacité.



chisé, car, généralement, les centres qui interviennent dans l'établissement d'une communication sont les centres de départ et d'arrivée et leurs supérieurs hiérarchiques, immédiats ou non. Il est souple en ce sens qu'à côté des faisceaux de circuits « normaux » qui remontent ou redescendent la hiérarchie, il peut exister, lorsque c'est économiquement intéressant, des faisceaux « transversaux » qui « court-circuitent » la hiérarchie. La règle suivie pour acheminer un appel qui se présente est, à quelques exceptions près, la suivante : examiner le faisceau transversal rapprochant le plus du centre d'arrivée, si un tel faisceau existe; s'il existe sur ce faisceau un circuit libre, l'occuper et demander au centre qui se trouve à l'autre extrémité de reprendre pour son compte la procédure de recherche; s'il n'existe pas de circuit libre sur ce faisceau transversal ou si un tel faisceau n'existe pas, essayer le faisceau normal; s'il s'y trouve un circuit libre, demander au centre qui se trouve à l'autre extrémité de reprendre à son compte la procédure de recherche, sinon envoyer à l'abonné demandeur l'indication que les circuits sont engorgés.

On peut montrer que, pour une même qualité de service — c'est-à-dire à probabilité égale d'aboutir jusqu'au centre d'arrivée —, un réseau dans lequel, au niveau de chaque centre, un appel a une direction de « débordement » possible permet une économie d'environ 30 % par rapport à un réseau sans débordement. Avoir la possibilité de débordements plus nombreux permet encore une économie de 3 % sur le coût des circuits, mais au prix d'un accroissement notable de complexité des centraux.

Les centres de transit assurent donc la liaison entre les réseaux locaux et le réseau interurbain. Les centres de transit régionaux sont de même la « frontière » entre les réseaux régionaux et le réseau national.

Nombre des principes qui régissent l'acheminement des appels sur le réseau interurbain, sont guidés par des impératifs fixant les qualités de transmission (l'affaiblissement du courant, par exemple) de tel ou tel type de circuit. Un système qui permettrait à une communication de faire le tour de la France, avant d'aboutir, laisserait peu de chances aux correspondants de s'entendre. En revanche, au fur et à mesure de l'évolution du trafic, un grand nombre de choix sont à faire, cas par cas, en quelque sorte jour par jour, pour acheminer au mieux les communications dans le réseau existant.

La gestion technique du réseau.

Qu'il s'agisse de gérer le réseau au jour le jour ou de créer de nouvelles liaisons, il faut trouver le meilleur compromis entre l'utilisation de circuits directs (qui permettent d'économiser le coût du transit) et celle de circuits passant par des centres transit.

Peut-on remettre en cause la procédure d'acheminement déterminée par le choix de trois niveaux hiérarchiques dans le réseau ? Doit-il exister un faisceau de circuits entre deux villes données et, si oui, quelle capacité lui accorder ? Il est sans doute plus facile de saisir le problème en supposant un réseau constitué d'un certain nombre de centres A, B, C, ... et d'un unique centre de transit O.

Supposons que le trafic entre A et B corresponde à une moyenne de trois communications simultanées, c'est-à-dire à 3 erlangs (l'erlang est l'unité de trafic; il correspond à l'utilisation permanente d'un circuit), et qu'il existe cinq circuits AB (fig. 4).

La théorie d'Erlang montre que les cinq circuits AB permettent d'écouler 2,7 erlangs, et qu'ajouter un sixième circuit n'écoulerait que 0,17 erlang supplémentaire (nous sommes dans le domaine des rendements décroissants). En d'autres termes, le coût (en circuit) d'écoulement d'un erlang supplémentaire sur le faisceau AB est de 6 fois le coût du circuit existant AB. Considérons maintenant le faisceau du circuit AO, reliant A au centre de transit. Ce faisceau écoule le trafic AO, la partie du trafic de liaisons telles que AB qui ne trouve pas à s'écouler sur les faisceaux directs et le trafic de liaisons pour lesquelles il n'a pas été jugé opportun de créer de faisceau direct. Ce trafic est donc important. Nous le supposons par exemple de 20 erlangs ; selon la théorie d'Erlang, un faisceau de 28 circuits écoule ce trafic à concurrence de 98 %. Si l'on renonce à constituer un certain nombre de circuits tels que le sixième circuit du faisceau AB, et si l'on reporte de la sorte une demande supplémentaire de 1 erlang sur le faisceau AO, pour atteindre B en passant pas le faisceau OB, il suffira d'ajouter un seul circuit pour que, selon la théorie, 95 % de cet erlang soit écoulé. Le coût d'écoulement d'un erlang supplémentaire entre A et B (par O) n'est donc, calculé de cette façon, que 1,05 fois le coût d'un circuit AO et d'un circuit OB. La recherche de l'optimum économique fait donc intervenir de façon complexe les coûts des différents circuits et les trafics qu'ils permettent d'écouler (eux-mêmes fonction de la solution générale retenue).

Le problème que nous avons présenté est abusivement simplifié, car nous avons supposé connu a priori le prix des circuits. Or, comment définir le prix d'un circuit ? Le problème a un sens lorsqu'on parle d'investissement, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de dégager des moyens de financement pour l'acquisition de ressources nouvelles. S'agissant simplement de routage, c'est-à-dire de l'utilisation de ressources existantes sans création de ressources nouvelles, ce sens n'est plus aussi évident car les générations antérieures ont peut-être eu tort de poser un câble entre telle et telle ville, mais maintenant qu'il existe et ne peut être retiré, quel prix fixer à son utilisation ? Et d'abord, quel est l'optimum que l'on recherche ?

Il ne peut s'agir de minimiser un coût car, dans le réseau pris à un instant donné, la majeure partie des dépenses ont déjà été faites. Il s'agit plutôt de maximiser la satisfaction de la demande, mais quelle est la mesure de cette satisfaction ? Un circuit supplémentaire entre Lille et Grenoble est-il préférable à un circuit supplémentaire entre Dunkerque et Orléans ? Et si l'on renonçait à la construction du circuit supplémentaire entre Lille et Grenoble, ne pourrait-on du même coup constituer un circuit de plus entre Saint-Etienne et Chambéry ? Il semble qu'il faille retenir, pour la mesure de l'importance d'une demande, deux termes ; l'un tient compte de la satisfaction du public, c'est-à-dire de

la qualité de service, donc de la proportion d'appels au départ de telle ville qui pourra aboutir à telle autre ville nommément désignée. Le deuxième terme doit tenir compte des bénéfices que la constitution du circuit assurera à l'entreprise qui exploite le réseau.

Le problème de choix des circuits se pose ainsi pour faire passer des communications dans l'infrastructure existante. Mais si le réseau ne permet pas de satisfaire intégralement la demande parce qu'il est saturé, il faut construire de nouveaux circuits.

Comment contrôler la croissance du réseau ? Il s'agit de trouver une bonne structure du graphe futur. Le choix des investissements est doublement délicat. On introduit tout d'abord un paramètre supplémentaire dans notre réflexion : le temps. Moins qu'un réseau idéal, il faut en effet déterminer un calendrier optimal des modifications du réseau. La seconde difficulté est liée à la compétition entre les structures qui donnent la préférence à la commutation, et celles qui « favorisent » la transmission. Un choix doit être fait entre des structures ayant un nombre de mailles élevé ou des structures à artères de grosse capacité. Comme le prix du kilomètre d'artère est d'autant moins coûteux que la capacité de l'artère est grande, on peut essayer de faire passer le maximum de trafic sur de grosses artères principales, en drainant le trafic de vastes zones vers les extrémités de cette artère et les nœuds qui la jalonnent. Cependant, en dehors du fait qu'un tel réseau, ayant peu de mailles, est peu sûr, on imagine facilement que le « drainage » des trafics de zones géographiques étendues vers ces artères est également coûteux. Les solutions les meilleures seront un difficile compromis entre un développement du réseau vers des mailles dont les branches sont de grosses artères et une structure possédant de nombreuses mailles.

Jusqu'à présent nous avons considéré le réseau de télécommunications comme une entité relativement abstraite. Le réseau était un graphe ayant un certain nombre de nœuds et ses branches avaient une certaine capacité d'écoulement du trafic. Que sont les communications et leurs supports ? Une communication est un ensemble de signaux qui circulent d'un point à un autre du réseau, c'est-à-dire d'un bout à l'autre d'une liaison.

Les *circuits* sont le support des liaisons entre deux commutateurs. Leur durée de vie ne s'exprime donc pas en minutes, comme une conversation, mais en mois pour des circuits saisonniers vers les stations de vacances ou, le plus souvent, en années. Un circuit Paris-Lyon peut fort bien servir de support à une communication Paris-Lyon et, l'instant d'après, à une communication entre Lille et Grenoble, laquelle empruntera par exemple successivement des circuits Lille-Paris, Paris-Lyon et Lyon-Grenoble. On peut fort bien avoir des circuits Paris-Lyon qui passent par Clermont-Ferrand et d'autres par Nancy. Les circuits

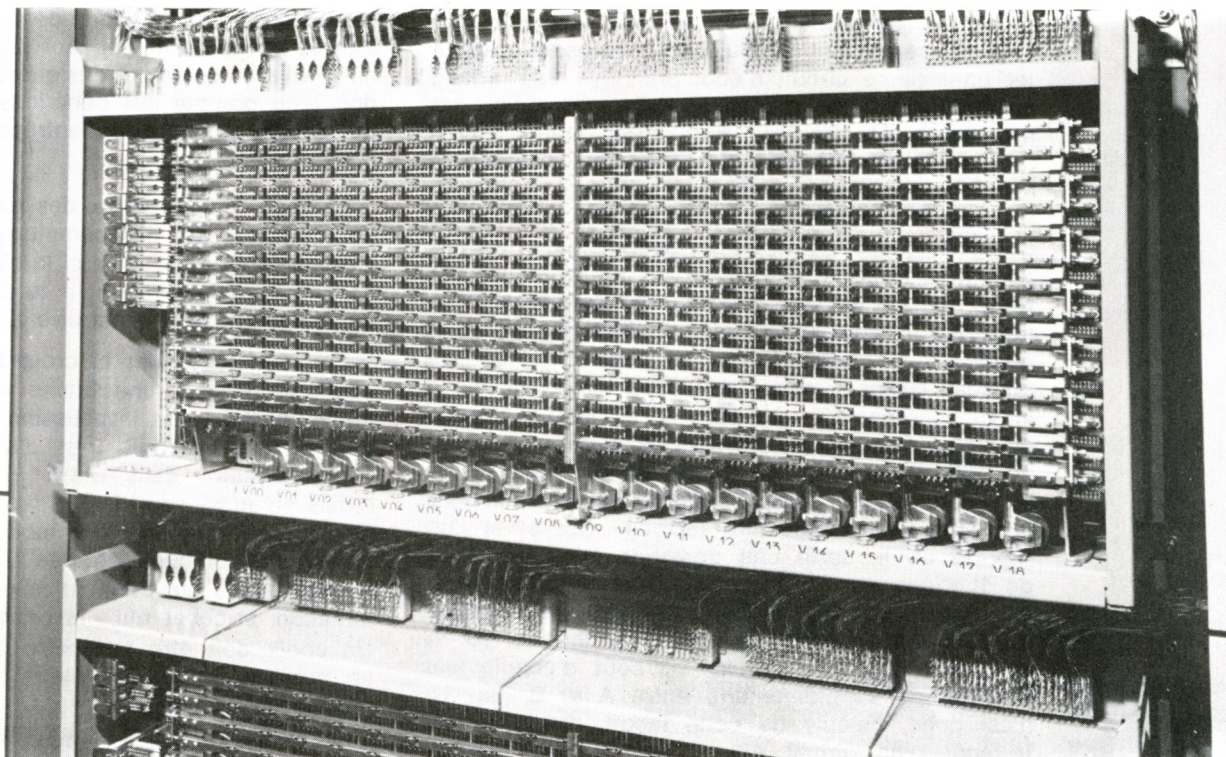


Fig. 5. Les commutateurs automatiques Crossbar sont des appareils électromécaniques. Le réseau de connexion établit la liaison entre deux abonnés grâce à un système de barres commandées en coordonnées cartésiennes. Ces barres sont montées dans des « cadres » eux-mêmes insérés par « baies ». Un autocommutateur comprend plusieurs baies. Ici un cadre de sélecteurs avec raccordement par conjoncteurs. (Cliché CGCT.)

d'ailleurs porteront deux types de signaux : les signaux de parole, ceux de la communication proprement dite, et des signaux de commande qui, envoyés par le poste de l'abonné, sont interprétés, pris en charge par les commutateurs afin que le correspondant puisse être trouvé, et la liaison entre les deux abonnés établie. Ces signaux de commandes sont gérés par les commutateurs.

La commutation.

Les commutateurs, appareils volumineux, complexes et coûteux, sont les organes de commande du réseau.

Le réseau téléphonique est un instrument d'échange d'informations qui met en contact de façon intermittente des abonnés, et ces correspondants ne sont généralement pas les mêmes d'une communication à la suivante. Les commutateurs, appareils placés aux nœuds du graphe qu'est le réseau, établissent donc des communications intermittentes et trouvent les chemins entre deux correspondants. Ils interprètent les ordres codés envoyés par les abonnés, ou encore ceux que leur envoient les autres commutateurs du réseau, dans le cas des communications interurbaines.

Intéressons-nous aux commutateurs automatiques

(par opposition aux appareils servant à la commutation manuelle dans lesquels les opératrices jouent le rôle de ces équipements qui gèrent les circuits). Bornons-nous d'ailleurs au modèle le plus récent d'autocommutateur automatique électromécanique, le « Crossbar » (fig. 5). C'est une technique relativement récente en Europe (elle a été introduite pour la première fois en France vers la fin des années 1950). Tous les centraux nouveaux commandés actuellement en France sont de ce type. Le système Crossbar tire son nom de la technique de réalisation du réseau de connexion qui est à « barres croisées ». Si dans tous les types de commutateurs, la fonction de commande reste la même, c'est la conception de sa réalisation physique qui est diverse. On s'est acheminé de génération en génération d'autocommutateurs vers une centralisation des organes de commande. Cette centralisation, encore limitée dans le Crossbar parce qu'il n'est pas facile de construire des appareils électromécaniques de commande compacts, sera beaucoup plus tranchée lorsqu'on abordera la commutation électronique. Dans ce cas, la commande est assurée par un véritable ordinateur de processus « indépendant » fonctionnant en temps réel.

Cela est tellement vrai que dans certains réseaux à commutation électronique — nous le verrons plus loin — le même ordinateur commande plusieurs commutateurs géographiquement éloignés l'un de l'autre.

On trouve donc dans les autocommutateurs électromécaniques des organes qui n'interviennent que pour l'établissement de la communication, dont certains à titre très transitoire, et des organes de supervision. Lorsqu'un abonné décroche, un contact se ferme dans son appareil. Un courant continu, envoyé par le central, parcourt alors sa ligne. Le commutateur détecte le courant et connecte la ligne à un « enregistreur »; la tonalité « invitation à numéroté » est envoyée au demandeur. Le numéro demandé arrive sous forme de signaux codés de façon bien déterminée, et il est mis en mémoire dans l'enregistreur. Celui-ci rend compte alors à un « traducteur » qui détermine d'abord le faisceau de sortie désiré, marque cette sortie sur le réseau de connexion et, ensuite seulement, provoque l'établissement d'un chemin à travers ce réseau. C'est le traducteur qui commande l'envoi des signalisations (appel en cours, demandé occupé...) sur la ligne du demandeur. Lorsque l'abonné demandé décroche, la connexion des lignes est ordonnée par l'enregistreur et il envoie les impulsions de *taxation* au compteur du demandeur. L'enregistreur est alors libéré et prend en charge les nouveaux appels arrivant. Pendant la durée de la communication, un organe spécialisé surveille l'état des lignes et libère toutes les connexions dès qu'un des abonnés raccroche.

Si l'on veut comparer le central à un ordinateur électronique, on dira que l'abonné, en décrochant, provoque une interruption qui a pour effet de lui affecter un canal. Les interruptions de fin de caractère provoquent chacune une petite séquence, l'interruption de fin de transmission, monopolise un court instant l'unité centrale, dédoublée pour des raisons de sécurité, qui recherche sur le périphérique-réseau de connexion un itinéraire libre et lance l'entrée-sortie. Des compteurs de temps ou le raccrochage provoque une interruption qui appelle le programme de fin de transmission.

Le réseau de connexion d'un autocommutateur est, en général, électromécanique même si la commande est électronique. Il faut, en commutation traditionnelle, que les lignes soient connectées entre elles.

Cette partie électromécanique des commutateurs est dans le cas du Crossbar une grille de lames mobiles et perpendiculaires sélectionnant un chemin repéré en quelque sorte par des coordonnées cartésiennes. D'autres systèmes sont en cours de développement. Dans le réseau de connexion à contacts scellés par exemple, le réseau est câblé et chaque point de contact possible est réalisé par deux lamelles placées dans une ampoule sous vide; il s'ouvre ou se ferme sous l'effet d'un électro-aimant entourant l'ampoule. Des signaux de commandes passent dans les électro-aimants. Les signaux de paroles passent dans les lamelles.

La commutation représente le plus gros poste des investissements en télécommunications. En France, par exemple, on dépense en gros 1,25 fois

en commutateurs ce que l'on dépense pour tous les autres investissements rassemblés. Construits dans des immeubles sans style bien défini (mis à part la grande hauteur de plafond et les murs aveugles!) ils attirent moins l'attention du public que le deuxième élément du réseau, celui qui concrétise les branches du graphe : la transmission.

La transmission.

La transmission est le domaine privilégié de l'électronique. Sur fils ou sur ondes électromagnétiques, on cherche à faire passer sur une même liaison le plus grand nombre possible de communications.

L'ancêtre des techniques de transmission est la basse fréquence. Le courant correspondant aux signaux de la parole est transmis tel quel. Pour compenser les affaiblissements en ligne, on insère à intervalles réguliers (70 km environ) des amplificateurs appelés « répéteurs ». Comme un amplificateur est un organe qui a généralement une entrée (où se présente un signal de niveau faible) et une sortie (où ressort le même signal amplifié), on trouve le plus souvent commode de scinder le support de la communication en un sens aller et un sens retour et d'installer les amplis par paires. On parlera dans ce cas de circuits « 4 fils ». On peut également n'employer que 2 fils. Il faut alors, dans chaque station de répéteurs, installer des équipements, les transformateurs différentiels, qui séparent les deux sens de transmission; on doit utiliser aussi dans ce cas deux amplificateurs, et réunir les deux sens de transmission au moyen d'un deuxième transformateur différentiel.

La transmission « basse fréquence » nécessite donc une liaison électrique entre les deux correspondants. La transmission correcte des conversations téléphoniques occupe une bande de fréquences comprise entre 300 et 3 400 hertz : c'est la bande de fréquences de signaux acoustiques de la voix humaine. Mais les caractéristiques électriques des lignes se prêtent en général à la transmission de bandes de fréquences beaucoup plus larges. Pour les mieux utiliser, on peut donc essayer de faire passer sur le même support plusieurs communications, mais qui empruntent des bandes de fréquences différentes. Il faut pour cela transposer la bande des fréquences « naturelles » (300-3 400 Hz) dans une bande $F + 300$, $F + 3 400$ ou $F - 300$, $F - 3 400$, F étant la fréquence d'un courant dit *courant porteur*. En utilisant plusieurs valeurs de F , on peut émettre en parallèle, sur le même circuit, plusieurs communications ainsi transposées. A la réception, on sépare les différentes communications par un système de filtres et on les retranspose pour retrouver les fréquences naturelles.

Plusieurs types de supports physiques permettent la transmission. Les paires de fils portées par des poteaux en bois sont malheureusement trop



Fig. 6. La transmission sur les liaisons interurbaines est assurée le plus souvent encore par des câbles coaxiaux qui sont enterrés. Ici on pose le câble Boston-Miami. (Cliché ATT.)

souvent présentes dans les paysages des pays industrialisés pour qu'il soit nécessaire de les décrire. Dans les villes, le réseau de distribution est enterré, et la transmission est assurée par des câbles dits urbains. Les premiers câbles interurbains étaient constitués de paires de fils. Aujourd'hui, les câbles contiennent sous une même enveloppe jusqu'à 1 800 paires de fils. Bien qu'isolés par des enroulements de papier ou des gaines de plastique, les fils présentent entre eux une capacité non négligeable. Pour contre-balancer cet effet (c'est-à-dire pour obtenir une bande passante en fréquence correcte), on insère à intervalles réguliers des bobines d'inductance, les « pots Pupin » (du nom de leur inventeur). Pour exploiter les câbles en haute fréquence cette technique ne suffit plus. La fréquence de coupure, c'est-à-dire la fréquence au-dessus de laquelle le courant ne « passe » plus dans le circuit, est trop basse. On utilise donc des répéteurs qui sont des amplificateurs correcteurs favorisant les hautes fréquences.

L'ossature du réseau français de lignes à longue distance est en fait constituée de câbles coaxiaux et de faisceaux hertziens. Qu'est-ce qu'un câble coaxial ? Un ensemble de tubes coaxiaux dans une armature d'acier et une enveloppe. Un tube coaxial est fait d'un conducteur cylindrique creux entourant un conducteur cylindrique plein, le centrage étant assuré par des rondelles ou une spirale en plastique. Pour un même rapport du diamètre du conducteur extérieur à celui du conducteur intérieur (l'optimum est toujours 3,6), les caractéristiques électriques s'améliorent avec la taille. L'affaiblissement est important, surtout aux fréquences élevées. Il faut donc placer des répéteurs correcteurs à intervalles assez rapprochés (fig. 6).

Du faisceau hertzien au laser.

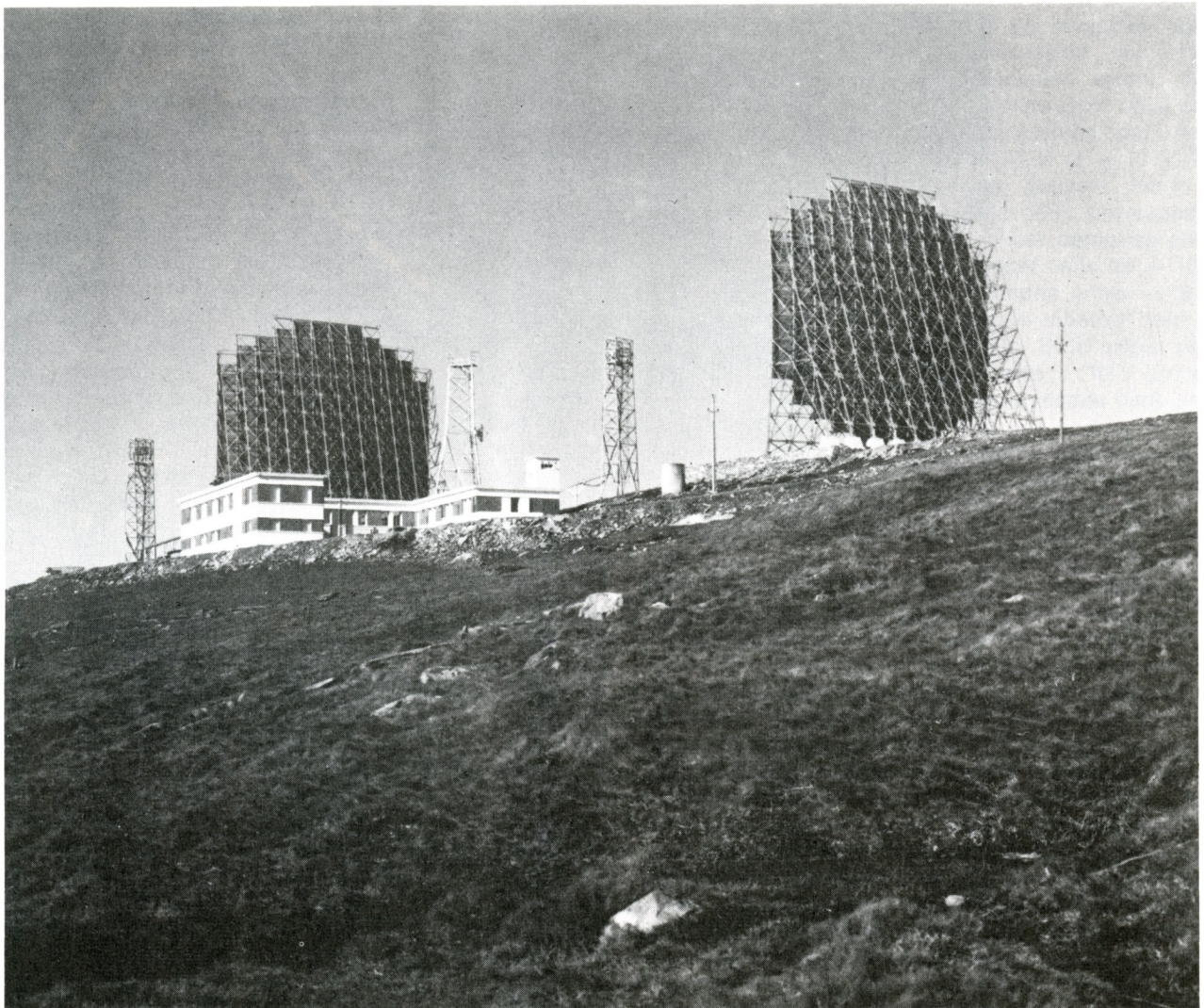
Les faisceaux hertziens ont fait décroître considérablement les coûts de la transmission. Les satellites de télécommunications entrent en concurrence avec les câbles sous-marins pour les liaisons transocéaniques. Guides d'ondes et lasers permettront d'écouler une quantité énorme d'informations.

Depuis quelques années, un substitut ou plutôt un complément des câbles interurbains existe : ce sont les faisceaux hertziens. Les faisceaux hertziens sont des liaisons radioélectriques directives fonctionnant en très haute fréquence (fig. 7). Ces faisceaux d'ondes hertziennes sont modulés comme dans la technique des courants porteurs. Mais la propagation des ondes ultracourtes (de fréquences de 4 à 7 GHz) impose que les relais — les antennes réception-émission et les stations d'amplification — soient en vue directe les uns des autres, distantes en moyenne de 50 km. Un des problèmes des ingénieurs est alors de rechercher les points hauts pour leur installation. L'ennui est que, dans le cas de sites montagneux en particulier, il faut commencer par construire des routes, amener l'énergie ou la produire sur place. Les progrès récents (la transistorisation complète) autorisent dans certains cas une alimentation par batterie enterrée. Les considérations géographiques mentionnées amènent une servitude : les faisceaux hertziens doivent en général éviter les villes (les pylônes et antennes n'étant pas toujours considérés d'un œil favorable par la Commission des sites). Il faut donc le plus souvent une « amorce » en câble coaxial, qui va du commutateur à la première antenne hertzienne en passant par la station d'amplification. On réalise maintenant des faisceaux hertziens d'une capacité de 10 800 voies (1 800 par canal). Au-delà de ces capacités se posent des problèmes de bandes de fréquence disponibles. C'est d'ailleurs ce qui, à terme, freinera le développement des faisceaux hertziens.

L'« amorce », c'est-à-dire le tronçon d'artère qui va du centre de transit de départ d'une ville aux antennes hertziennes les plus rapprochées, possède un grand nombre de circuits. C'est dans ce cas que l'on met en place les premiers prototypes de moyens de transmission à grande capacité comme le guide d'ondes. Une liaison expérimentale a ainsi été posée entre le centre d'amplification de Saint-Amand, à Paris, et la tour hertzienne de Meudon (voir la Recherche, n° 2, p. 186).

Un guide d'ondes est un tuyau creux sur les parois duquel des ondes électromagnétiques se réfléchissent. Les ondes porteuses se propagent donc à l'intérieur de ce tuyau. Il possède de plus la particularité appréciable d'avoir un affaiblissement qui diminue avec la fréquence ; sa capacité ne sera donc guère limitée que par les équipements de ligne, répéteurs et autres ; on peut envisager de lui faire supporter des débits de plusieurs centaines de milliers de communications téléphoniques. Le seul

Fig. 7. Les faisceaux hertziens, de développement plus récents que les câbles, connaissent un grand essor. On construit maintenant des faisceaux hertziens de 10 800 voies. Les faisceaux hertziens de longue portée nécessitent de très grandes antennes, comme celle de la station d'Arsamendi de la liaison troposphérique France-Portugal. (Cliché CNET.)



inconvenient est son coût très élevé : qu'on songe que les tolérances d'usinage de ce tuyau sont de l'ordre de 10 microns, et qu'il faut le tapisser intérieurement d'un fil de cuivre fin enroulé en spires jointives ! Les exigences de pose ne sont pas moins sévères : courbes majestueuses d'un rayon de courbure ne descendant pas au-dessous de 300 mètres, sauf à recourir à des renvois coudés et autres artifices.

Les guides d'ondes ne seront vraisemblablement pas rentables avant 1975 (à moins que des guides d'ondes *souples* puissent être posés à bas prix, auquel cas on s'accommodera volontiers d'un surplus de capacité). Ils pourront être dépassés en performance par le *laser*. Les pinceaux des lasers ont des longueurs d'onde de l'ordre du micron. Si l'on sait les moduler par les signaux des communications, ils pourront donc en porter plus que les ondes transmises par les guides dont la longueur d'onde est de l'ordre du millimètre (soit quelques centaines

de voies). Mais le laser n'est pas encore sorti du laboratoire. Les chercheurs s'efforcent de mettre au point des systèmes de modulation faciles à mettre en œuvre. La transmission du pinceau laser pose aussi des problèmes. On a pratiquement renoncé à une transmission dans l'atmosphère; les poussières, brumes et brouillards et, surtout, les turbulences apportent des affaiblissements et réduisent la cohérence de l'onde. Les essais se poursuivent sur plusieurs types de transmission en guide, soit que le guide joue le rôle d'un guide d'onde sur les parois duquel la lumière se réfléchit, soit qu'il n'assure qu'un rôle de protection, la focalisation étant assurée par des lentilles en verre échelonnées à intervalles réguliers ou des lentilles gazeuses réparties. Si ces recherches aboutissent, il est vraisemblable qu'en raison de tolérances moins sévères elles assureront au laser un net avantage sur le guide d'ondes.

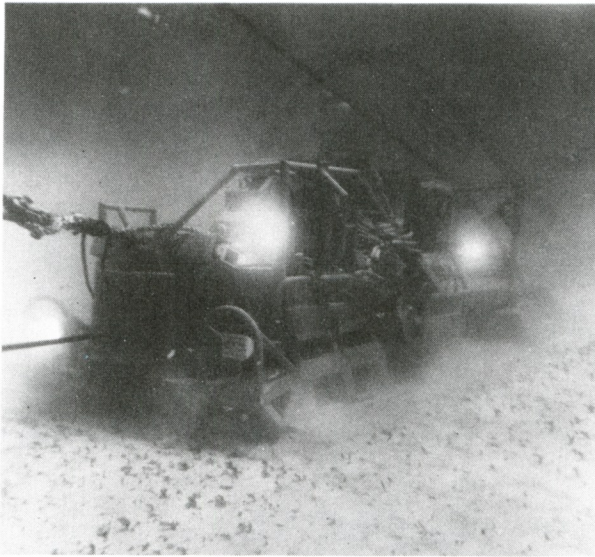


Fig. 8. Les câbles sous-marins, grâce à des progrès constants, sont jusqu'à présent plus économiques que les satellites de télécommunications. Cette charrue creuse une tranchée au fond de l'océan dans laquelle est posé le câble transatlantique « TAT 5 » en service depuis mai 1970. (Cliché Bell System.)

Il y a dans le domaine de la transmission des télécommunications un autre gigantisme plus spectaculaire encore que celui des capacités, c'est celui des très grandes distances par câbles sous-marins et par satellites. Des circuits intercontinentaux, en effet, connectent tous les réseaux du monde, qui forment ainsi un seul réseau à l'échelle planétaire.

Les câbles sous-marins (fig. 8) attirent moins l'attention du public que les satellites de télécommunications. Ils acheminent cependant la majorité du trafic intercontinental. Les câbles modernes, grâce aux répéteurs transistorisés, sont très fiables et coûtent moins cher que les satellites qui, bien qu'assurant des liaisons de télévision, ne seraient pas rentables sans le trafic téléphonique. La durée de vie des satellites actuels est de quelques années, et ils exigent des stations terrestres d'émission et de réception d'une grande complexité. Aussi le développement des satellites est-il soumis à de nombreux progrès technologiques : augmentation de la puissance d'émission autorisant soit des largeurs de bandes supérieures, soit des stations terrestres plus simples; concentration de la puissance rayonnée sur de faibles surfaces de la terre, ce qui suppose une stabilisation précise et des antennes assez directives; multiaccès, par l'affectation à chaque station émettrice de bandes de fréquences, ou de créneaux de temps, ou des deux simultanément. Intelsat I, lancé en 1965, avait une bande passante de 30 MHz; Intelsat IV aura 12 canaux de 63 MHz, soit 750 MHz, correspondant à 7 200 voies téléphoniques (avec la souplesse accrue liée au multiplexage temporel).

Futuristes (le laser), en cours de développement (le guide d'ondes), existants déjà mais coûteux (les satellites) les moyens de transmission sont finale-

ment des pièces plus grosses ou plus perfectionnées d'un « meccano » dont la structure ne varie pas du fait de leur introduction. Les progrès de la commutation, puisqu'ils agissent sur les systèmes qui commandent le réseau, bouleversent la structure du réseau-« meccano ». La commutation électronique *stricto sensu* permettra par sa souplesse une meilleure gestion du réseau, alliée à la modulation par impulsions et codage (la numérisation du réseau), elle bouleversera la notion d'équipement d'abonné, de voie, de commutation.

La transmission classique est analogique, c'est-à-dire qu'elle transmet soit le signal lui-même, soit un signal dont une des caractéristiques (amplitude, fréquence ou phase) est fonction de la valeur instantanée du signal à transmettre. En tout état de cause, elle est continue, c'est-à-dire que le signal transmis s'intéresse à l'ensemble des valeurs que prend au cours du temps le signal à transmettre.

Le MIC.

La modulation par impulsions et codage permet d'écouler sur une même liaison plusieurs conversations « échantillonnées ». Economique, cette modulation n'est pas sensible aux parasites. Ses possibilités, ajoutées à celle de la commutation temporelle, sont des atouts majeurs pour la modernisation des télécommunications.

Or il existe toute une classe de procédés de modulation, dits par échantillonnage, qui ne s'intéressent précisément qu'aux valeurs du signal à des instants privilégiés. Une analogie permet de comprendre cela : deux points définissent une droite, trois un cercle, cinq une conique. Le théorème de Shannon démontre de même que 2 n échantillons par seconde, régulièrement espacés, suffisent à définir un signal de bande passante n hertz. Le premier intérêt d'un tel système est que si le temps nécessaire pour transmettre un échantillon est inférieur à l'intervalle qui sépare deux échantillons, il reste des temps morts que l'on peut mettre à profit pour transmettre des échantillons relatifs à d'autres communications. C'est ce principe qui porte le nom de *multiplexage temporel*. Le deuxième intérêt vient de ce que, de toutes les façons de transmettre un échantillon (amplitude, largeur, déphasage d'une impulsion, etc.), il en est une qui présente des propriétés uniques, le codage.

On peut en effet représenter la valeur de l'échantillon par un nombre, et ce nombre peut s'exprimer par exemple en système binaire, c'est-à-dire par une suite de signaux qui ne peuvent prendre que deux états. La quantification initiale, c'est-à-dire l'arrondissement d'une grandeur continue à un nombre qui ne peut prendre que des valeurs discontinues, introduit certes une erreur, mais qui peut être très faible si l'on choisit un pas de

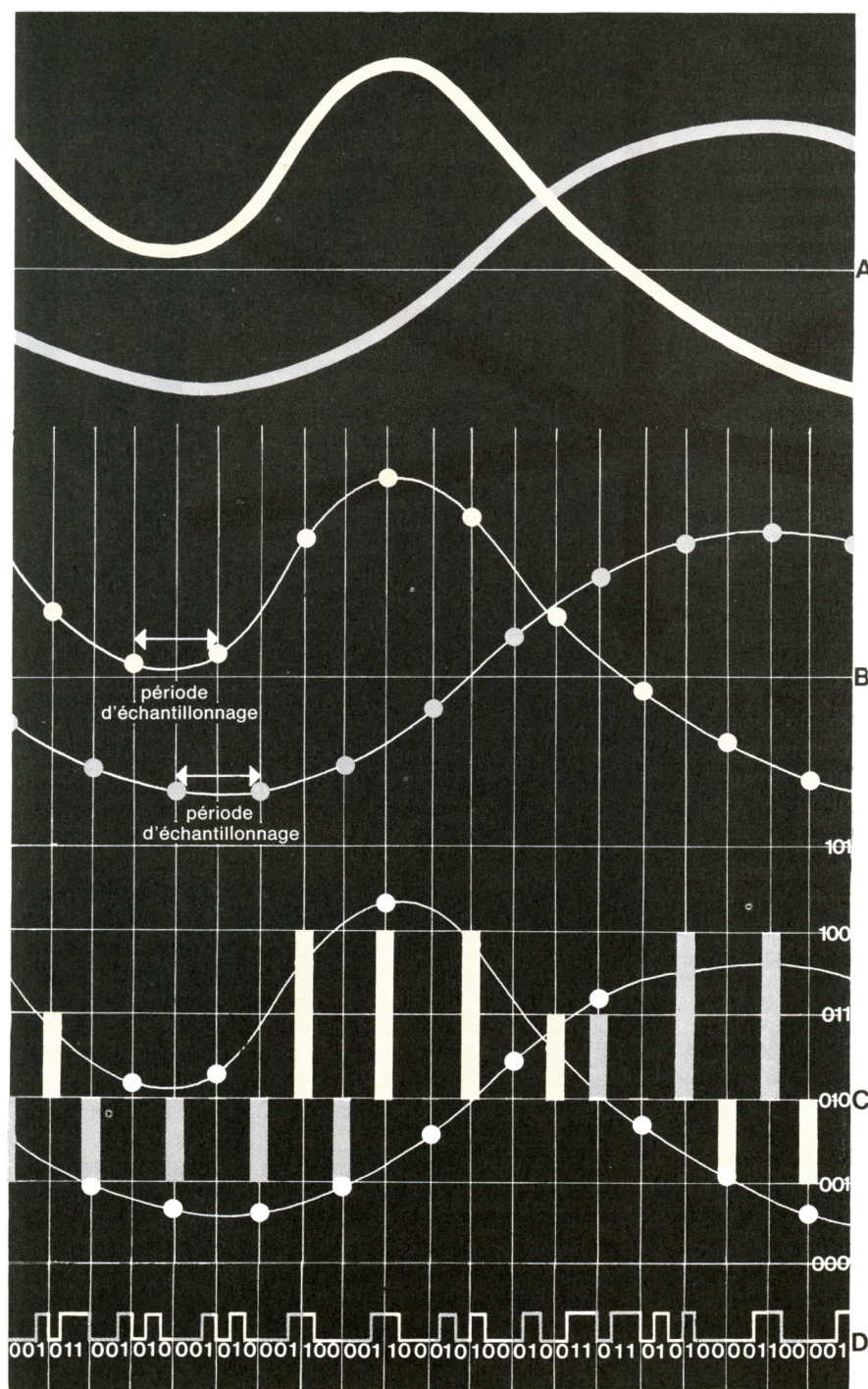


Fig. 9. La modulation par impulsions et codage (MIC) combine les avantages d'une transmission de communications **échantillonnées** (ce qui permet de faire passer plusieurs communications simultanément sur un même support) et d'une transmission de **signaux codés** (ce qui évite parasites et erreurs). Par exemple, la parole qui est transcrite en signaux analogiques de fréquences vocales (A) est d'abord échantillonnée (B); les impulsions d'échantillonnage sont alors modulées en amplitude. Ces impulsions sont ensuite mesurées (C) et exprimées en nombres binaires, à l'aide d'impulsions de hauteur et durée normalisées; on mesurera les impulsions de (B) par un nombre binaire à 3 chiffres par exemple; ici, pour 1, il y aura une impulsion; pour un 0 il n'y en aura pas. Enfin, la mesure codée d'un échantillon est envoyée dans un temps plus bref que la période d'échantillonnage; dans le temps restant, les échantillons d'autres communications peuvent être envoyés; c'est le multiplexage temporel (D).

quantification suffisamment fin. En revanche, après cette erreur initiale, la transmission numérique n'introduit pratiquement plus aucune erreur. Prenons un exemple: si les deux états dont nous parlions précédemment sont représentés par deux tensions respectivement de $+10\text{ V}$ et -10 V , les imperfections de transmission peuvent faire en sorte qu'à un signal émis de $+10\text{ V}$ corresponde un signal reçu dont la tension est comprise entre $+7\text{ V}$ et $+13\text{ V}$ et qu'à un signal émis de -10 V corresponde un signal reçu compris entre -13 V et -7 V . Qu'importe cette erreur; le répéteur sera en fait un régénérateur d'impulsions. Si le signal reçu est positif, le régénérateur renverra $+10\text{ V}$, s'il est négatif, -10 V . L'information se transmet donc sans dégradation (fig. 9).

Les avantages de cette technique sont nombreux: qualité de la transmission, souplesse pour l'acheminement des communications (puisque la qualité globale ne dépend plus de l'acheminement choisi), technologie par tout ou rien comme en informatique, (ce qui permet d'utiliser de « mauvais » équipements, plus économiques). Les simples paires métalliques peuvent être utilisées jusqu'à 2 mégabits par seconde (un bit est la quantité élémentaire d'information), correspondant à une capacité de 32 voies téléphoniques. Les câbles coaxiaux de 2,6-9,5 mm de diamètre peuvent être exploités jusqu'à 12 MHz, en analogique; en transmission numérique, des essais ont eu lieu à 224 et même 560 Mbits/s.

D'autre part, la transmission analogique est très mal adaptée à la transmission d'informations par nature numériques comme les signaux de dialogue avec les ordinateurs. La transmission de données classique exige des appareils coûteux transcrivant la modulation numérique en analogique (les modems). Ces modems permettent difficilement de dépasser un débit de 4 800 bits/s sur un circuit téléphonique ordinaire, alors qu'en numérique une voie téléphonique correspond à 64 000 bits/s!

Pour cet ensemble de raisons, le MIC apparaît comme extrêmement prometteur et il ne fait pas de doute qu'il est appelé à un développement considérable. Il a pourtant un concurrent, d'un principe toutefois assez voisin, la *modulation en delta*. Il s'agit également d'un codage numérique, mais chaque échantillon, au lieu de représenter la valeur instantanée du signal, représente sa variation depuis l'échantillonnage précédent. Un 1 représentera par exemple un signal supérieur d'un pas et un 0 un signal inférieur d'un pas. Il existe enfin un procédé mixte, le MIC-Delta qui, comme le Delta, représente la variation du signal mais, comme le MIC, décrit cette variation au moyen de plusieurs éléments binaires. Nous n'entrerons pas dans une discussion des mérites respectifs de ces différents types de modulation. (Le MIC a la faveur des techniciens pour la transmission sur le réseau proprement dit, et le Delta présente certains avantages pour le réseau d'abonnés, c'est-à-dire les lignes reliant chaque abonné à son central.)

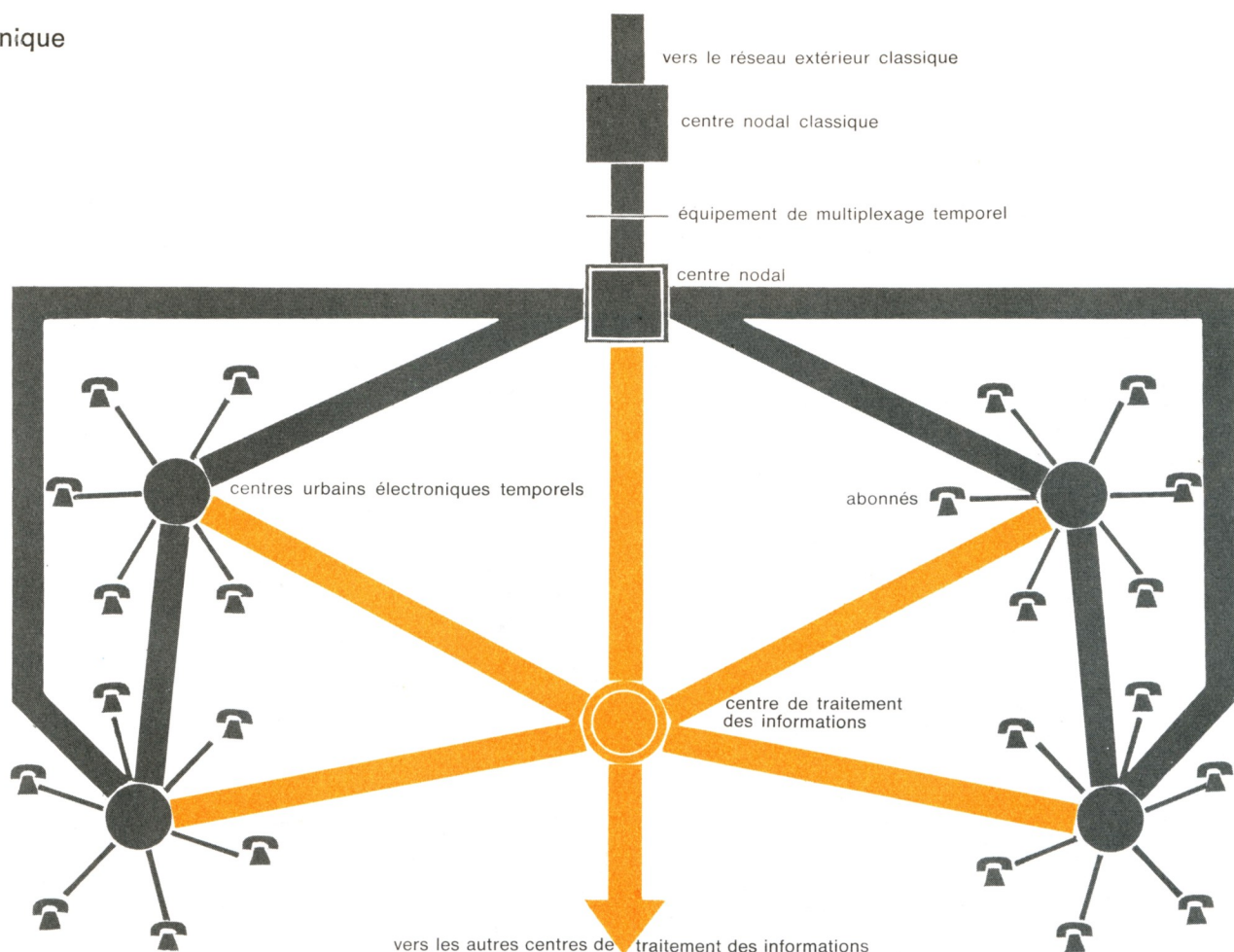


Fig. 10. Le réseau Platon, le premier réseau intégré du monde, conçu dans les laboratoires du CNET et construit par la Société lannionnaise d'électronique (SLE/CGE), fonctionne dans la région de Lannion. Les abonnés sont reliés à des centres urbains qui sont des commutateurs électroniques temporels commandés à distance par un même calculateur, le centre de traitement des informations. Ce réseau communique avec le réseau extérieur par l'intermédiaire d'un centre dit « nodal ». Comme les liaisons à l'intérieur de ce réseau intégré sont en MIC (modulation par impulsions et codage), il y a à la sortie du nodal temporel un équipement de décodage et modulation en amplitude, c'est-à-dire de transcription des communications en signaux classiques afin qu'elles puissent être traitées sur le réseau ordinaire.

Vers un réseau intégré.

L'introduction de la commutation électronique déterminera à terme la conception même du réseau.

La commande de l'établissement d'une communication, la réception de la numérotation, la traduction de celle-ci, la recherche d'itinéraire, l'établissement de la communication, la supervision et la détection du raccrochage, la taxation et l'observation de trafic sont des opérations *logiques* et, à ce titre, peuvent toutes relever d'une technique électronique très voisine de l'informatique. Cela explique l'idée d'utiliser des calculateurs pour la commande centralisée des centraux. Certains autocommutateurs de petite capacité peuvent être gérés par des calculateurs du type calculateur non spécialisé. Les centraux publics de plusieurs milliers de lignes, en revanche, requièrent des calculateurs spécialisés (très fiables, rapides et adaptés au travail en temps réel). Cela pour la commande du processus de commutation.

Pour l'établissement d'un chemin de parole entre deux abonnés, il existe deux solutions. La première, — c'est l'exemple que nous avons décrit plus haut —, correspond à une évolution des commutateurs électromécaniques. Un chemin physique est affecté à une seule communication pendant toute sa durée : c'est la commutation électronique *spatiale*. Il existe

de nombreux types de commutateurs électroniques spatiaux plus ou moins évolués. Les Suédois ont un prototype fonctionnant en vraie grandeur dans leur réseau. Une maquette fonctionne à titre expérimental en France (l'autocommutateur Périclès). Plusieurs modèles de laboratoire sont en cours de mise au point, et quelques appareils sont commandés pour ce qui concerne l'Europe. Aux Etats-Unis, 15 % des nouveaux commutateurs sont électroniques spatiaux.

Dans la deuxième solution, la commutation *temporelle* — domaine dans lequel le CNET est pionnier —, il n'existe pas à proprement parler de chemin physique attribué à une communication. Il s'agit au contraire de créneaux de temps pendant lesquels, au moyen de portes électroniques, une communication peut disposer d'organes de connexion qui l'instant élémentaire suivant, servent à d'autres communications. On a donc, au niveau du réseau de parole du commutateur, un « multiplexage » temporel un peu similaire à la modulation par impulsions et codage.

Dans la plupart des commutateurs électroniques temporels, les informations traversent le central sous forme numérique. Il est très tentant, dans ces conditions, d'associer commutation temporelle et transmission MIC en un système unique dit *réseau intégré* qui épargne les opérations coûteuses de conversion analogique-numérique et numérique-analogique tout en améliorant encore la qualité des

Le téléphone encombré

La gestion technique d'un réseau de télécommunications pose des problèmes complexes. On ne peut pas, néanmoins, attribuer toutes les difficultés que connaît le téléphone à des erreurs ou à des lacunes technologiques. En France, le mot « téléphone », tout autant que l'expression « départ en vacances », évoque le mot « encombrement ». Le réseau des Etats-Unis, pourtant souvent cité comme un exemple de bon fonctionnement, est de plus en plus souvent engorgé aux heures de pointe, notamment sur la côte Est. Faut-il en conclure, comme le font certains, que les hommes sont incapables de maîtriser une machine aussi gigantesque qu'un réseau de télécommunications ? Les économistes ne le pensent pas.

L'étendue de la crise du téléphone en France se mesure par quelques chiffres. Avec 4 millions de lignes principales au début de 1970, la France ne tient que le seizième rang dans le monde pour le nombre de lignes par habitant. Le nombre des demandes de raccordement en attente était l'année dernière aussi élevé que celui des lignes raccordées dans le même temps. 75 % du réseau seulement est automatisé. Voilà pour le « parc » installé.

Appréhender la façon dont le trafic est écoulé est plus difficile. Peu de pays publient des indices de qualité de service sur les différentes liaisons. Aux heures chargées, de nombreux appels sont rejetés mais, parmi ceux-ci, un grand nombre émanent d'abonnés qui, n'ayant pu obtenir leur correspondant lors d'une première tentative, renouvellent plusieurs fois leur appel, aggravant ainsi l'encombrement.

Des investissements importants.

La France a aujourd'hui l'équipement (en densité téléphonique) qu'avait la Suède il y a quarante ans. Pour combler son retard avant 1985, c'est-à-dire pour que sa den-

sité téléphonique cette année-là soit de 33 postes par habitant et se trouve ainsi en harmonie avec son activité économique, un programme d'investissements extrêmement important est nécessaire.

Or la création d'un abonné nouveau — c'est-à-dire son raccordement et le renforcement du réseau interurbain nécessaire — coûte environ 5 000 F. Le développement du téléphone exige de gros investissements. Equipement nécessitant d'importantes immobilisations de capital (en 1971, les télécommunications investiront plus de 5 milliards de francs), le téléphone a été, au premier chef, victime d'un manque de ressources financières. Dotées d'un « budget annexe », ne pouvant ainsi bénéficier de ressources fiscales ni emprunter librement sur le marché, les PTT ont de longue date équilibré leur budget en comblant par les bénéfices du téléphone (qui auraient normalement dû être investis pour développer le réseau) le déficit de leurs autres services, dont la productivité ne croît guère. Ainsi condamnés à l'auto-financement total, les Télécommunications n'ont-elles pu faire face à la très forte croissance des demandes depuis le début des années 1960, — croissance qui n'a d'ailleurs été suscitée par aucune publicité. Il n'est pas étonnant que, dans ce climat, l'entreprise ne soit pas devenue un modèle de bonne gestion, à la différence, par exemple, de l'ATT (American Telephone and Telegraph), dont la filiale Western Electric est l'unique exemple où le célèbre cabinet en organisation McKinsey n'a rien trouvé à modifier.

Entreprise par leur nature, administration par leur statut, les Télécommunications opposent encore de l'inertie aux méthodes de management les plus élémentaires. Dans un passé récent, faute d'argent, les ingénieurs ont dû utiliser des moyens de fortune, des bricolages en définitive fort coûteux.

Une industrie en mutation.

L'étroitesse du marché français, jointe à une très faible volonté d'exportation des constructeurs, a fait que les séries de matériel de télécommunications furent de petites dimensions. Leur prix s'en est ressenti. Dans ces conditions, la lutte des pouvoirs publics contre le monopole du groupe américain ITT (International Telephone and Telegraph Corp.) a suscité des solutions compliquées et finalement peu efficaces (le système des quotas, par exemple). La politique d'innovation technologique qu'a menée le CNET (Centre national d'études de télécommunications) pour améliorer les positions françaises dans ce secteur a été ralentie par le manque de moyens de financement que connaissait le téléphone. La croissance de l'équipement téléphonique, plus lente que nécessaire, a entraîné des inadaptations dans le réseau. La diversité de matériel fait croître le coût du réseau aussi bien en investissement qu'en exploitation.

Les dix années à venir, et plus particulièrement les années que couvre le VI^e Plan, seront décisives. Le matériel commandé pendant le VI^e Plan sera mis en service de 1973 à 1977. A cette date, le parc d'abonnés doit être de 8,7 millions de lignes principales. Le trafic qui sera écoulé en 1977 sera 4 fois supérieur à ce qu'il était en 1968. 30 à 35 milliards de francs seront nécessaires pour réaliser ces programmes. Ce sont des moyens raisonnables. Reste à bien dépenser cet argent. Reste aussi à introduire, avec précaution et astuce, les techniques nouvelles qui permettent aussi bien d'améliorer la rentabilité du réseau que de donner à l'industrie les chances de conquérir de nouveaux marchés d'exportation.

M. Perceval.

liaisons. Cela suppose néanmoins résolus les problèmes liés au fait que les différentes horloges d'échantillonnage du réseau différent et par leur fréquence et par leur phase. On peut bien penser synchroniser ces horloges par la diffusion d'une référence externe ou par alignement mutuel. D'autres solutions sont à l'étude, celle en particulier qui consiste à introduire des « bits de bourrage » lorsque l'information n'arrive pas à une cadence suffisante, quitte à prévenir l'autre extrémité, par le

moyen d'une voie de service, qu'il ne faut tenir aucun compte de l'élément binaire introduit.

Un réseau de télécommunications est donc intégré lorsque les principes de multiplexage dans le temps et de modulation par impulsions et codage sont appliqués à la fois pour la transmission (MIC) et la commutation temporelle. Ce type de réseau qui pour la première fois au monde est expérimenté en vraie grandeur dans la région de Lannion (il est relié au commutateur électronique temporel Platon

développé par le CNET), utilise donc essentiellement des informations numériques (fig. 10). Rien n'empêche alors qu'un réseau intégré soit aussi un réseau *universel*, indifférent à la nature des informations transmises, que ce soit des communications téléphoniques, des données de calculateurs ou de télex. Dans les réseaux actuels, il est difficile de modifier les bandes passantes réservées en analogique à une voie déterminée de transmission. Dans un réseau intégré universel, au contraire, il serait facile de modifier à la demande le débit de transmission des voies numériques et de constituer entre centres de transit par exemple des canaux à grand débit par agrégation de plusieurs voies temporelles élémentaires de débits différents.

Cependant l'installation d'un modem sur chaque ligne d'abonné est une opération coûteuse. On peut imaginer une solution qui tire bénéfice de la simplicité de la transmission ordinaire sur les lignes d'abonnés et du transit en MIC. On peut en effet concentrer les lignes d'abonnés par des dispositifs de type spatial et pratiquer ensuite la commutation temporelle. Cette solution polarise maintenant l'attention des laboratoires qui cherchent à mettre au point un commutateur dit à « cœur temporel ».

Un phénomène nouveau milite pour l'adoption de réseau intégré permettant un fonctionnement en réseau universel. C'est la transmission de données. Le rythme actuel de croissance des transmissions de données est très élevé (de l'ordre de 80 % par an), et l'on pense qu'il se maintiendra à ce niveau pendant de nombreuses années. On admet généralement qu'il devrait exister en France environ 50 000 terminaux en 1975, et environ 700 000 en 1985. Beaucoup de ces terminaux devraient être rudimentaires : un poste téléphonique à peine modifié, doté de quelques touches pour interroger une banque de données et d'un dispositif d'impression simplifié, la réponse du calculateur pouvant même être vocale. A côté de ces terminaux élémentaires, on trouvera des téléimprimeurs, des écrans de visualisation alphanumériques, dans certains cas des imprimantes et des écrans de visualisation graphiques et, bien sûr, des calculateurs. Des concentrateurs, voire des commutateurs de messages, accroîtront l'efficacité des lignes de transmission. On verra sans doute se développer des réseaux privés sur lignes louées pour satisfaire les besoins de certaines grosses entreprises.

Les débits d'informations seront de 200 bits/s pour une large classe d'utilisations, de 600 ou 1 200 bits/s pour les téléimprimeurs dotés d'une mémoire tampon ou les écrans de visualisation graphiques, de 4 800 ou 9 600 bits/s pour d'autres écrans, des imprimantes et pour certains réseaux dotés de concentrateurs, de 48 000 bits/s et au-delà pour certaines applications dont, dans bien des cas, des connexions entre calculateurs. En France, les Télécommunications préparent pour le VII^e plan un réseau moderne tenant compte de ces exigences.

A titre transitoire, les sociétés exploitantes cons-

truissent des réseaux spécialisés (comme le télex est un réseau spécialisé) pour les besoins de la téléinformatique; la France par exemple, sera dotée en 1972 d'un tel réseau — « Caducée », — spécialisé dans la transmission de données mais utilisant les matériels du parc téléphonique actuel. Ce réseau permettra de relier deux abonnés quelconques à 4 800 bits/s et éventuellement certains d'entre eux à 48 000 bits/s. Il permettra à un calculateur de prendre l'initiative d'établir une communication. Intéressant pour les applications mettant en cause de nombreuses transactions de faible durée, sa nature de réseau commuté, c'est-à-dire possédant des points de commutation, permettra l'interconnexion de nombreux utilisateurs de l'informatique. A plus long terme, on peut concevoir un réseau commuté capable d'écouler le trafic téléphonique comme celui de données sur les mêmes supports.

Chaque composant, chaque pièce du « meccano » qu'est le réseau de télécommunications est aujourd'hui l'objet de recherches actives. L'enjeu industriel est important et le développement de nouveaux systèmes plus performants est une des armes favorites des constructeurs de matériel désireux de conquérir une meilleure place sur le marché. La structure du réseau — considérée comme une entité — se modifie d'année en année au fur et à mesure de l'introduction des techniques nouvelles. C'est un véritable système vivant que nous avons décrit. Contrôler sa croissance est une des tâches primordiales de la vie économique des dix années à venir. ■

Pour en savoir plus :

■ Sur toutes les techniques employées en télécommunications, il existe un *Cours professionnel technique des PTT*, destiné en général aux élèves de l'Ecole nationale supérieure de télécommunications (Eyrolles).

■ Une présentation plus concise est donnée dans : John Mc Reynolds Wozencraft et Irwin Mark Jacobs, *Principles of communication engineering*, Wiley.

■ Revues : Quatre revues françaises pourront être consultées. Elles comportent d'abondantes bibliographies : les *Annales des télécommunications* (CNET) (théorique) ; *L'Echo des recherches* (CNET).

Commutation et électronique (Socotel) ;

Câbles et transmissions (Cotelec) ;

le *Bulletin signalétique des télécommunications* (supplément aux *Annales*) fait mention de tout article paraissant dans le monde.

Chaque société exploitante ou constructrice de matériel possède une revue. Les plus connues sont *The Bell System Technical Journal* (ATT aux Etats-Unis), et la *Revue des télécommunications* (ITT).