

Dans le cadre du Groupe de travail "Histoire des Télécommunications : archives et témoignages" (couramment appelé "Groupe Histoire" qu'il anime au sein du "Comité d'information et de liaison des cadres dirigeants retraités de France Télécom (COLIDRE), Maurice BERNARD a invité les membres du COLIDRE à rechercher des données sur l'histoire des télécommunications en France depuis 1945, par la consultation de documents et par des entretiens avec des acteurs de cette histoire.

Marcel THUÉ a rassemblé des données sur les faisceaux hertziens français civils de 1945 à 1990, et a élaboré le texte ci-joint, en tenant compte des commentaires formulés par plusieurs "acteurs" consultés. Ce texte constitue une synthèse des renseignements recueillis ; il est accompagné d'une bibliographie commentée des références consultées.

Ce texte est soumis à "l'Association pour l'histoire des télécommunications et de l'informatique" (AHTI en vue d'une publication éventuelle dans les "Cahiers d'histoire des télécommunications et de l'informatique".

Paris, le 17 novembre 2003
(révisé en mars 2004, révisé en juin 2004, révisé en octobre 2004)

Groupe de travail du COLIDRE

" Histoire des Télécommunications : archives et témoignages "

~::~::~~

LES FAISCEAUX HERTZIENS EN FRANCE

Contribution à l'histoire des faisceaux hertziens civils de 1945 à 1990

(Marcel THUE)

Le présent texte constitue une synthèse des renseignements recueillis dans les documents et témoignages cités en bibliographie, complétés par des souvenirs personnels pendant la période (1952 - 1960) où l'auteur a été associé à l'étude et au développement des faisceaux hertziens.

Le plan suivi est le suivant :

1. Liaisons expérimentales
2. Liaisons Continent - Corse
3. Premières liaisons avec relais
4. Normalisation des faisceaux hertziens
5. Constitution du réseau national
6. Liaisons à faible distance
7. Constitution d'un réseau pour télévision
8. Transistorisation et augmentation de capacité. Développement du réseau national
9. Numérisation des liaisons régionales
10. Réseau numérique national
11. Faisceaux hertziens transhorizon
12. Faisceaux hertziens divers

Le terme " faisceau hertzien " est une expression typiquement française, créée à l'Union internationale des télécommunications (UIT) par Georges VALENSI et Jean LALOU, qui désigne une liaison radioélectrique par ondes dirigées obtenues à l'aide d'antennes directives. Le terme allemand " Richtfunklinie " a sensiblement la même signification, mais il n'y a pas de terme anglais équivalent. En anglais, on utilise l'expression " radio

relay system " qui provient du fait que les liaisons par faisceau hertzien sont généralement conçues pour pouvoir utiliser des relais.

1. LIAISONS EXPÉRIMENTALES

La première liaison expérimentale en France fut assurée en 1946 - 47 par le Service des recherches et du contrôle technique des PTT (SRCT) avec du matériel utilisant la modulation de fréquence, développé dès 1941 par le Laboratoire central de télécommunications (LCT). Elle permit de connecter le central Vaugirard (Paris 15ème) et le bureau d'Enghien au moyen d'une liaison radioélectrique de 20 km environ entre un laboratoire du SRCT rue Jobbé Duval et une station hertzienne implantée à Montmorency, et de transmettre un multiplex à courants porteurs de 12 voies téléphoniques, sur une fréquence voisine de 3 GHz avec une puissance de 25 W environ.

Une autre expérimentation fut réalisée en 1950 avec du matériel utilisant la modulation par impulsions sur une fréquence voisine de 1,5 GHz avec une puissance de quelques watts, entre le centre d'amplification des " Lignes souterraines à grande distance " des PTT (LSGD) au Havre et une station hertzienne installée à Hennequeville près de Deauville, de l'autre côté de la Seine, à environ 20 km. Le système multiplex à impulsions modulées en position (IMP) assurait la transmission de 12 ou 24 voies téléphoniques.

2. LIAISONS CONTINENT - CORSE

On doit faire une place à part aux liaisons avec la Corse, l'utilisation d'ondes radioélectriques permettant d'augmenter significativement la capacité, par rapport au câble sous-marin à une voie téléphonique. Toutefois, les stations terminales n'étant pas en visibilité, il convenait d'utiliser des ondes de fréquence suffisamment basse pour qu'elles puissent être diffractées par la surface de la mer sans introduire trop d'affaiblissement. La première liaison Continent - Corse (Grasse - Calenzana, 1947, 12 voies téléphoniques en multiplex à courants porteurs) fonctionnait sur des fréquences voisines de 100 MHz ; la seconde (Mont Doublier - La Punta, 1953, 3 multiplex de 24 voies) utilisait des fréquences encore plus basses, dans la gamme 50 à 80 MHz, mais la partie du trajet où la propagation se faisait par diffraction était plus courte, compte tenu de l'altitude des deux stations terminales.

Cette liaison a d'ailleurs été prolongée ultérieurement (1956) jusqu'en Algérie (Bou Zizi près de Bugeaud) grâce à deux stations intermédiaires implantées respectivement dans le Nord et dans le Sud de la Sardaigne (Canistraddu et Campo sa Spina), les deux tronçons intermédiaires fonctionnant en visibilité sur des fréquences de l'ordre de 400 MHz.

La liaison hertzienne Continent - Corse a assuré l'acheminement de l'essentiel du trafic téléphonique avec la Corse jusqu'à la mise en service des câbles sous-marins à répéteurs immergés.

3. PREMIÈRES LIAISONS AVEC RELAIS

La rénovation du réseau français de télécommunication avait été quelque peu oubliée lors de l'adoption des plans de développement après la 2ème Guerre mondiale, la priorité ayant été donnée aux réseaux de transport (routes, chemins de fer, ...) ainsi qu'à la production et distribution d'énergie (charbonnages, électricité, gaz). Les télécommunications n'étaient pas alors ressenties comme une condition du développement économique, mais plutôt comme un " gadget " utile mais non indispensable. Compte tenu des besoins en communication formulés par l'armée américaine, entre les ports de l'Atlantique et les troupes stationnées en Allemagne, la Direction générale des télécommunications (DGT) put obtenir des " crédits d'infrastructure " substantiels provenant de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN/NATO) ce qui lui permit de rénover les liaisons souterraines à grande distance (LSGD) au moyen de câbles coaxiaux à grande capacité installés à partir de 1952 dans l'ensemble du réseau français, et en priorité sur les liaisons Paris - Bordeaux et Paris - Strasbourg. Il ne semblait pas nécessaire alors, pour les besoins de la téléphonie, de consacrer des crédits importants au développement de liaisons radioélectriques à grande capacité, les " faisceaux hertziens ".

3.1. Liaison de télévision Paris - Lille

Toutefois, les largeurs de bande disponibles sur les câbles coaxiaux n'étaient pas suffisantes pour transmettre des programmes audiovisuels, en particulier des images de télévision en système français à 819 lignes, plus exigeant que le système européen à 625 lignes. Il devint donc nécessaire de faire appel aux faisceaux hertziens lorsque l'on voulut transmettre des programmes

mis au point pour l'émetteur de télévision de Paris - Tour Eiffel vers le premier émetteur régional, installé à Lille en 1950. La " Radiodiffusion - Télévision française " (RTF) a mis en service à cet effet en 1951 une liaison par faisceau hertzien entre la Tour Eiffel et le beffroi de Lille, avec deux relais intermédiaires, à des fréquences voisines de 1 GHz. Le matériel avait été étudié et construit, à la demande de la RTF, par la Compagnie française Thomson - Houston (CFTH) et était exploité par la RTF, complètement indépendamment du réseau français de liaisons téléphoniques des PTT.

Mais cette liaison sera remplacée en 1953 - 54 par un des canaux du faisceau hertzien Paris - Lille étudié et construit par la Compagnie générale de TSF (CSF) pour les PTT, cette liaison transmettant à la fois téléphonie et télévision.

3.2. Liaison de téléphonie Dijon - Strasbourg

Car la Direction générale des télécommunications (DGT) s'était enfin décidée à implanter dans son réseau quelques liaisons par faisceau hertzien, à la fois pour la sécurisation des liaisons téléphoniques par câbles souterrains, et pour la transmission de programmes de télévision.

La première exploitation d'une liaison par faisceau hertzien pour la téléphonie fut effectuée sur une liaison transportant un multiplex à courants porteurs (à répartition en fréquence) à 60 voies téléphoniques, (transposées dans un " groupe secondaire " entre 60 et 300 kHz) et installée entre Dijon et Strasbourg, avec deux relais intermédiaires situés à Montfaucon près de Besançon et au Grand Ballon dans le massif des Vosges. Le matériel, fonctionnant à des fréquences comprises entre 240 et 280 MHz, avait été étudié et construit par la Société française radioélectrique (SFR).

La liaison Dijon - Strasbourg, mise en service en 1952, permit d'écouler un trafic téléphonique plus important entre Strasbourg et le Sud de la France, ainsi que d'acquérir une certaine expérience sur le comportement de trajets hertziens en région montagneuse.

3.3. Liaisons Paris - Lille, Paris - Strasbourg et Paris - Lyon

La constitution d'un réseau français de faisceaux hertziens commença vraiment en 1953 - 54, avec la mise en service des liaisons Paris - Lille, Paris - Strasbourg et Paris - Lyon. Les motivations de l'établissement de ces liaisons étaient d'une part la nécessité d'assurer un acheminement alternatif aux liaisons souterraines à très fort trafic, pour faire face à d'éventuelles coupures des liaisons coaxiales, et sécuriser ainsi les liaisons utilisées par les troupes américaines stationnées en Allemagne dans le cadre de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN), d'autre part d'assurer la distribution des programmes de télévision vers les émetteurs de province à partir de la régie de programmes située à Paris. Il s'agissait donc de liaisons à large bande, pouvant transporter sur chaque canal radioélectrique soit un multiplex téléphonique à 240 voies, soit une voie de télévision à 819 lignes.

Le premier matériel, étudié et construit à la demande de la DGT par la Compagnie générale de TSF (CSF) fonctionnait dans la bande des 4 GHz (3,5 à 4 gigahertz) et permettait la transmission de 3 canaux radioélectriques utilisant les mêmes antennes à l'émission et à la réception avec un plan de fréquences spécifique.

Pour la première liaison, la priorité fut donnée au trajet Lille - Paris, afin de transmettre de Londres à Paris les images du couronnement de la reine Elisabeth II (qui étaient retransmises en Allemagne, Suisse, Italie au moyen d'un réseau qui préfigurait l'Eurovision) en juin 1953 avant même l'achèvement de la tour hertzienne de Meudon, un terminal provisoire étant installé à Sannois.

La liaison Paris - Lille fut mise en service peu après, et assura la desserte de l'émetteur de télévision de Lille (avec 4 relais intermédiaires entre la tour de Meudon et celle de Loos les Lille) puis, à Noël 1953, la liaison Paris - Strasbourg (avec 9 relais), en 1954 la liaison Paris - Lyon (avec 6 relais), qui sera ultérieurement prolongée jusqu'à Marseille.

Ces premières liaisons utilisaient le même matériel développé par la CSF et désigné par la DGT sous le nom de faisceau hertzien GDH 101. Les développements ultérieurs, qui permettront la réalisation d'un réseau à l'échelle de la France, seront conformes aux normes internationales

d'origine européenne.

4. NORMALISATION DES FAISCEAUX HERTZIENS

Les liaisons à grande distance par faisceau hertzien avaient été étudiées aux Etats-Unis, aux Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) et expérimentées dès 1947 entre New York et Boston, avec du matériel dit TDX, puis TD2. Le développement de ce matériel fut utilisé pour l'équipement d'un réseau de faisceaux hertziens dans l'ensemble des Etats-Unis, et en particulier pour assurer la liaison dite " coast to coast " entre New York et San Francisco, mise en service en 1951 (5 000 km avec plus de 100 relais). Les ingénieurs du Bell System ne se souciaient pas de normalisation, et espéraient exporter leur matériel dans le monde entier.

En revanche, les laboratoires européens, en particulier au Royaume Uni et en Allemagne, conduisaient des études spécifiques à chaque labo, et commençaient à se préoccuper d'une normalisation des principales caractéristiques, nécessaire pour assurer l'interconnexion des liaisons installées dans les différents pays, afin de pouvoir constituer un réseau européen de faisceaux hertziens.

La question de la normalisation des faisceaux hertziens avait été posée à la VIIe Assemblée plénière du CCIR (Comité consultatif international des radiocommunications, de l'Union internationale des télécommunications, UIT) à Londres en 1953, et avait été confiée à la Commission d'études IX, qui traitait des " questions techniques diverses ". Compte tenu du développement rapide en Europe des faisceaux hertziens et de l'intérêt que portaient les constructeurs à la normalisation des matériels (à la demande des exploitants qui souhaitaient pouvoir faire cohabiter dans leurs réseaux des matériels de provenance diverse), ce sujet devint rapidement l'unique préoccupation de la CE IX, qui dès 1954 organisait à Genève une réunion intérimaire. Les premiers projets d'Avis (ultérieurement Recommandations) établis à partir de propositions présentées principalement par les administrations britannique et française, constituaient, à l'issue de la réunion intérimaire, un ensemble de normes permettant l'établissement d'un réseau cohérent.

Ils furent légèrement révisés et complétés par la VIIIe Assemblée plénière, qui se réunit à Varsovie en 1956 et adopta une quinzaine d'Avis qui traitaient des principales caractéristiques des faisceaux hertziens et permettaient l'interconnexion de systèmes développés par des constructeurs différents, soit en hyperfréquences grâce à une " disposition des canaux radioélectriques " (couramment appelée " plan de fréquences ") adaptée à la bande 3,8 à 4,2 GHz attribuée aux faisceaux hertziens par la Conférence administrative des radiocommunications, soit en fréquence intermédiaire à 70 MHz (avec des valeurs normalisées de l'excursion de fréquence et de la préaccentuation).

Les représentants des Etats Unis (provenant essentiellement des Bell Laboratories) ont d'abord suivi les travaux de la CE IX en observateurs, les caractéristiques de leur système TD2 ayant été choisies avant les études du CCIR, mais après 1956 ils ont éprouvé des difficultés pour l'exportation de leurs matériels qui n'étaient pas " conformes aux Avis du CCIR ". Aussi ont-ils décidé de participer activement aux travaux de la CE IX à partir de la IXe Assemblée plénière (Los Angeles, 1959) et ils ont obtenu que certaines caractéristiques du système TD2, adaptées à la bande 3,7 à 4,2 GHz, soient considérées comme des variantes de celles recommandées à Varsovie pour cette bande.

5. CONSTITUTION DU RESEAU NATIONAL

Le groupe " Faisceaux hertziens " du département Transmission du SRCT (intégré dans le CNET en 1953) alors dirigé par L.J. LIBOIS, avait participé activement à la normalisation des faisceaux hertziens au sein du CCIR. Il avait étudié un matériel de même capacité que le GDH 101 destiné à un système GDH 102 conforme aux Avis du CCIR, et avait fait construire par la CSF une liaison prototype, constituée de deux stations terminales et d'une station relais, et installée aux laboratoires d'Issy les Moulineaux, sur laquelle furent expérimentées et optimisées les caractéristiques destinées à être normalisées. Un certain nombre d'améliorations furent apportées au schéma de base, en particulier pour éliminer certaines fréquences parasites causées par l'emploi d'un oscillateur unique pour alimenter le mélangeur d'émission et, après transposition de fréquence, le mélangeur de réception.

Mais les laboratoires de la CSF avaient aussi entrepris de leur coté l'étude d'un nouveau matériel conforme aux Avis du CCIR, plus ambitieux que le GDH 101. Les caractéristiques de ce matériel, bénéficiant de l'expérience acquise sur les liaisons GDH 101 et sur les prototypes GDH 102, furent finalisées par accord entre la CSF et le SRCT, aboutissant à un matériel baptisé GDH 103, qui fut commandé à partir de 1956 pour l'équipement de ce qui allait devenir le réseau national de faisceaux hertziens.

Chaque artère pouvait comporter jusqu'à 6 canaux radioélectriques (en principe 5 en service normal et un en secours) conformes à la disposition des Avis du CCIR. Chaque canal pouvait transmettre soit une voie de télévision à 819 lignes (avec le son associé) soit un multiplex de 300 voies téléphoniques (5 groupes secondaires des systèmes à courants porteurs). Le matériel fonctionnait dans la bande de 3,8 à 4,2 GHz, il était fabriqué par la CSF et par la Société anonyme de télécommunications (SAT) pour le compte du Service des " Lignes à grande distance " (LGD) de la DGT. Il équipa à partir de 1956 les liaisons Paris - Rouen - Caen - Rennes - Nantes.

La constitution du réseau national fut poursuivie en 1962 - 65 avec du matériel à plus grande capacité, bénéficiant des récents progrès techniques et permettant de transmettre sur chaque canal radioélectrique 600 voies téléphoniques (matériel FH 686 de CSF, en Bretagne), puis 960 voies (matériel FH 687 de CSF sur les liaisons Paris - Nancy et Paris - Lyon, deux des artères les plus chargées).

6. LIAISONS A FAIBLE DISTANCE

En plus de la constitution d'un réseau national à grande capacité, destiné à couvrir l'ensemble du territoire français, en parallèle avec le réseau national de câbles souterrains, il est apparu nécessaire d'établir des liaisons hertziennes à faible capacité et petite distance pour assurer des liaisons difficiles à réaliser en câble souterrain, soit pour traverser des régions accidentées (montagnes, bras de mer, ...) soit pour transmettre des programmes de télévision difficiles à transmettre sur câble à cette période.

Outre la liaison expérimentale Le Havre - Deauville à travers l'estuaire de la Seine (voir paragraphe 1) et le cas particulier des liaisons Continent - Corse (voir paragraphe 2), les premiers besoins exprimés concernaient la transmission de programmes de télévision entre une régie située en centre-ville et un émetteur localisé sur un point haut des environs, ou pour transmettre vers une station du réseau hertzien un programme de " reportage ".

Des matériels conçus à cet effet ont été construits par une équipe de la CSF, dans la gamme des 7 - 8 GHz, sous le nom de TM 110 puis TF 120. Ces matériels utilisaient à l'émission la modulation directe d'un tube à modulation de vitesse (klystron) et une antenne parabolique à excitation excentrée ; ils étaient destinés à assurer des liaisons à une seule section radioélectrique, une liaison à deux sections nécessitant une mise en cascade avec démodulation dans la station relais.

Compte tenu de sa facilité d'emploi, ce type de matériel a aussi été utilisé sur certains trajets pour établir des liaisons bilatérales destinées à transmettre des multiplex à 12 ou 24 voies téléphoniques. Par exemple, une liaison à 12 voies a été installée en 1953 entre le Pic du Midi et Bagnères de Bigorre où se trouvaient les services de gestion de l'Observatoire du Pic du Midi ; elle a été remplacée ultérieurement par une liaison à 24 voies entre le Pic du Midi et Tarbes, pour desservir en outre la station de navigation aérienne et les services de l'émetteur de télévision installés au Pic du Midi. Mais ce type de liaison locale ou régionale à faible ou moyenne capacité se développera surtout dans le réseau téléphonique avec les matériels numériques (voir paragraphe 9).

7. CONSTITUTION D'UN RESEAU POUR TELEVISION

Le développement des émetteurs régionaux de télévision nécessitait l'établissement de liaisons à large bande entre la régie des programmes située à Paris et les émetteurs mis en service progressivement dans les régions.

Le premier émetteur régional implanté à Lille en 1950 fut alimenté dès 1951 par la liaison hertzienne Paris - Lille mise en service par la RTF (voir paragraphe 3.1.) puis à partir de 1953 par le faisceau hertzien Paris - Lille installé par les PTT (voir paragraphe 3.3.) sur lequel un des 3 canaux radioélectriques était utilisé pour la téléphonie, un pour la télévision, le 3ème restant disponible pour assurer des transmissions exceptionnelles ou pour servir à titre de secours.

La même disposition fut utilisée sur les autres faisceaux hertziens PTT du type GDH 101 (Paris - Strasbourg et Paris - Lyon - Marseille) ou GDH 103 (Paris - Rouen - Caen - Rennes - Nantes) afin de desservir les émetteurs de télévision situés près d'une station du réseau PTT, ou éventuellement à faible distance, en utilisant une section de raccordement (voir paragraphe 6.).

Mais la desserte d'émetteurs de télévision situés assez loin des stations du réseau PTT posa problème. Il s'agit d'abord de desservir des émetteurs " secondaires " recevant leurs programmes d'un émetteur principal relié au

réseau PTT, sur un trajet sur lequel les PTT n'envisageaient pas d'établir un faisceau hertzien. Après de longues et délicates négociations, et un examen au niveau gouvernemental, la RTF fut autorisée à installer ses propres liaisons hertziennes réservées à la télévision, par dérogation au monopole des PTT, pour desservir les émetteurs secondaires sur les trajets pour lesquels n'existait aucun besoin de transmission téléphonique, compte tenu des ressources du réseau de câbles existant.

C'est ainsi qu'un faisceau hertzien de télévision fut installé par la RTF en 1955 pour desservir l'émetteur de Mulhouse à partir de Strasbourg, avec un relais intermédiaire à Sélestat, puis en 1956 pour desservir l'émetteur de Nice - Pic de l'Ours à partir de Marseille - Grande Etoile, avec un relais intermédiaire près de Brignoles.

Un problème plus complexe concernait la desserte de l'émetteur de télévision de Bordeaux, car la DGT refusait d'établir, comme le demandait la RTF, une liaison hertzienne entre Paris et Bordeaux, compte tenu de l'existence entre Paris et Bordeaux de plusieurs câbles coaxiaux modernes, qui n'étaient pas jugés convenables par la RTF pour la transmission de télévision à 819 lignes. Finalement, la RTF fut autorisée à établir un faisceau hertzien de télévision entre l'émetteur de Bourges - Neuvy deux Clochers et Bordeaux. Cette liaison, mise en service en 1957, était raccordée à la liaison PTT Paris - Lyon à la station de Perreuse près de Nevers, elle assurait la desserte des émetteurs de Bourges, Limoges et Bordeaux, puis, grâce à une dérivation établie ultérieurement à partir de Limoges, des émetteurs de Toulouse - Pic du Midi et de Carcassonne - Pic de Nore.

Ce faisceau hertzien utilisait du matériel étudié et développé par un constructeur du Groupe Philips, Télécommunications radioélectriques et téléphoniques (TRT), fonctionnant dans la bande de fréquences 3,4 à 3,8 GHz (différente de la bande 3,8 à 4,2 GHz utilisée par la DGT) et avec des caractéristiques différentes de celles préconisées dans les Avis du CCIR, par exemple avec une fréquence intermédiaire de 115 MHz au lieu de 70 MHz. Chaque artère peut comporter 4 canaux radioélectriques, dont chacun peut être utilisé pour établir soit une liaison bilatérale, soit deux liaisons unilatérales de sens opposé.

A la suite de nombreuses discussions au niveau politique, et après la transformation de la RTF en 1959 en établissement public de l'Etat (devenu en 1964 l'Office de radiodiffusion - télévision française, ORTF), et compte tenu du développement de la 2ème chaîne de télévision créée en 1963, il fut finalement décidé de constituer un réseau national de faisceaux hertziens réservé aux transmissions de télévision, en attribuant à ces faisceaux la bande 8 à 8,5 GHz, en plus de la bande 3,4 à 3,8 GHz.

L'état major de la RTF, rattaché au Ministère de l'Information, ne souhaitait pas dépendre du Ministère des PTT (comme cela avait été le cas avant 1940). Ceci peut expliquer le choix d'un matériel non compatible avec celui des PTT, et fabriqué par un industriel différent (TRT) (matériel type FHD fonctionnant dans la bande 3,4 - 3,8 GHz avec des caractéristiques différentes de celles recommandées par le CCIR).

Dans la plupart des pays, l'organisme de radiotélédiffusion et de télévision était chargé seulement de la production et de la diffusion des programmes audiovisuels, alors qu'en France il était aussi chargé de la transmission de ces programmes entre régies de production et émetteurs de diffusion, ne permettant pas de synergie avec les transmissions de télécommunications.

Il faudra attendre la création de la 5ème et de la 6ème chaînes pour que TDF fasse appel, en février 1986, au satellite TELECOM 1 exploité par les PTT, solution plus facile à mettre en œuvre que d'ajouter 2 canaux dans l'ensemble du réseau.

8. TRANSISTORISATION ET AUGMENTATION DE CAPACITE DEVELOPPEMENT DU RESEAU NATIONAL

Le réseau de faisceaux hertziens exploité par le Service des Lignes à Grande Distance (LGD, ex LSGD) se révéla aussi fiable que le réseau de câbles souterrains, avec une qualité de transmission aussi bonne et une disponibilité parfois meilleure (le réseau hertzien n'ayant pas à redouter les coupures de câbles causées par les engins de terrassement).

Il fut donc décidé de doubler les principales artères du réseau souterrain par des artères hertziennes, d'autant plus que les progrès techniques permettaient d'augmenter la capacité de transmission de chaque canal radioélectrique.

Une amélioration substantielle résultait des progrès de la transistorisation d'abord en bande de base, puis en fréquence intermédiaire, et enfin en hyperfréquence ; un mélangeur d'émission à varactor fut utilisable pour les

capacités de 300 et 600 voies (matériels FH 663 de CSF en 1966, LHP 4 de TRT en 1967). La capacité de 1800 voies par canal nécessitait encore l'emploi d'un tube à ondes progressives comme amplificateur de puissance. La capacité des artères fut aussi augmentée en utilisant, en plus des canaux de la bande des 4 GHz (3,8 - 4,2 GHz) des canaux des " plans de fréquences " recommandés dans les bandes des 6 GHz (5,9 - 6,4 GHz) et des 6,5 GHz (6,4 - 7,1 GHz).

Un système à 1800 voies fut étudié pour la bande des 6 GHz puis, après expérimentation à partir de 1965, mis en service en 1969 sur la liaison Paris - Bordeaux (FH 693 de CSF) avec une nouvelle infrastructure, utilisant en particulier des guides d'ondes semi-rigides à faible affaiblissement pour relier les matériels au sol et les antennes.

La mise en point d'une antenne multibande, couvrant les bandes des 4 GHz, 6 GHz et 6,5 GHz, facilita l'emploi de ces matériels sur les artères les plus chargées (elle sera ensuite étendue à la bande des 11 GHz, dans laquelle ont été développés les premiers systèmes numériques à large bande).

L'emploi des semi-conducteurs, y compris en radiofréquence, procura aussi une amélioration de la fiabilité, les semi-conducteurs de puissance ayant un fonctionnement plus satisfaisant et une durée de vie plus longue que les tubes hyperfréquence (oscillateur à klystron et amplificateur à ondes progressives) malgré les progrès substantiels réalisés par ces derniers. La fiabilité fut aussi grandement améliorée par la conception des ateliers d'énergie utilisant une batterie, compte tenu de la faible consommation des composants à semi-conducteurs.

Des renseignements plus détaillés sur la transistorisation figurent dans l'annexe A1 " Transistorisation des faisceaux hertziens ".

Les matériels étaient construits principalement par la Compagnie Générale de TSF (CSF) dans les bandes des 4 GHz, 6 GHz et 6,5 GHz, en association avec la SAT pour les bandes des 6 et 6,5 GHz, puis par la Société Télécommunications radioélectriques et téléphoniques (TRT) dans la bande des 4 GHz, à la fois pour les PTT (3,8 - 4,2 GHz) et pour l'ORTF (3,4 - 3,8 GHz).

Dans les années 1970 ont été mis en service environ 1800 émetteurs-récepteurs à 4 GHz (960 / 1260 voies), 2000 à 6 GHz (1800 voies) et 1300 à 6,5 GHz (2700 voies).

Ainsi, la France disposait vers 1970 - 1975 de matériels de faisceaux hertziens analogiques à grande capacité, permettant de constituer des artères d'infrastructure. Un réseau hertzien à l'échelle nationale, différent et complémentaire du réseau national souterrain (câbles coaxiaux) a été progressivement constitué pour augmenter la souplesse d'exploitation et la disponibilité des circuits, le réseau hertzien assurant la sécurisation du réseau souterrain en cas d'incidents majeurs.

Des renseignements plus détaillés sur le développement du réseau national de faisceaux hertziens figurent dans l'annexe B1 " Développement du réseau ".

Le réseau national était complété, à l'échelon régional et local (réseau d'accès) par des faisceaux hertziens à faible et moyenne capacité, en particulier par des faisceaux hertziens régionaux numériques, qui se sont développés à partir de 1970 (voir paragraphe 9.). Il cohabitait par ailleurs avec le réseau national d'infrastructure pour transmission de télévision, mis en œuvre par l'ORTF avec du matériel construit par TRT (voir paragraphe 7.), lui aussi complété par des liaisons régionales et locales de contribution et de distribution, réalisées avec des matériels construits par CSF (TF 120) et par TRT.

A partir de 1980, les artères du réseau analogique de la DGT ont été progressivement équipées de matériels numériques (voir paragraphe 10.). La France était un des rares pays (sinon le seul) disposant de deux réseaux hertziens différents à l'échelle nationale, dont un spécialisé pour la transmission de programmes de télévision.

9. NUMERISATION - LIAISONS NUMERIQUES REGIONALES

Les progrès réalisés sur les composants numériques ont permis de mettre en œuvre la numérisation de la voie téléphonique résultant des processus d'échantillonnage (à une fréquence de 8 kHz), de quantification et de codage, ce qui conduit à la " modulation par impulsion et codage " (MIC) (avec un débit de 64 kbit/s).

Ceci a permis de substituer aux " multiplex à courants porteurs " (multiplexage à répartition en fréquence, MRF) des " multiplex à impulsions codées " (multiplexage à répartition dans le temps, MRT).

Les premières réalisations faites au CNET vers 1965 concernaient un multiplex à 36 voies codées à 6 moments, au débit de 1,776 Mbit/s puis en 1967, à la suite des discussions préparatoires à une normalisation, on s'orienta vers un système à 32 intervalles de temps transmettant 30 voies téléphoniques codées à 8 moments plus 2 voies de signalisation, avec un débit d'environ 2 Mbit/s.

Ces caractéristiques furent normalisées au niveau européen par la CEPT, alors que les Etats-Unis normalisaient un système à 24 voies au débit d'environ 1,5 Mbit/s déjà fabriqué et en cours d'installation sur le réseau américain, au moment où se décidait la normalisation européenne.

Le premier niveau de multiplexage défini par la CEPT (TN 1, 30 voies, débit voisin de 2 Mbit/s) fut bientôt suivi d'un deuxième niveau (TN 2, 120 voies, débit voisin de 8 Mbit/s). Les multiplex correspondants étaient faciles à transmettre sur une porteuse radioélectrique en utilisant une modulation par déplacement de phase à 2 ou 4 états (MDP 2 ou MDP 4), ce qui fut fait dans la bande des 2 GHz (2,1 à 2,3 GHz) peu utilisée en France.

Une telle capacité correspondait bien aux besoins des réseaux locaux et régionaux, dans lesquels ces systèmes furent introduits vers 1970. Les matériels correspondants avaient été étudiés vers 1965 par la SAT, en liaison avec la CSF et le CNET (matériels FHD 22 à 2 Mbit/s, puis FHD 28 à 8 Mbit/s).

Les premières liaisons numériques ont été installées dans les réseaux régionaux à partir de 1969, d'abord des systèmes à 36 voies dans le réseau dit " de Basse Normandie ", puis des matériels normalisés à 30 voies, multiplex TN 1). Dès 1973 fut installé du matériel FHD 28 à 120 voies.

En 1975 étaient déjà en service environ 150 matériels à 30 voies et 300 matériels à 120 voies, fonctionnant à 2 GHz. Plus tard fut réalisé, dans la même bande, du matériel à 480 voies (FHD 234 à 34 Mbit/s).

A cette date apparut aussi un nouveau matériel construit par TRT, baptisé FLD 15, avec une capacité de 30 ou 120 voies, mais fonctionnant dans la bande des 15 GHz

Pour les réseaux régionaux, pour lesquels une capacité plus importante était souhaitable, les progrès techniques ont permis la mise au point d'un système à 52 Mbit/s étudié au CNET et construit par CSF (FHN 13-06 transmettant 6 fois 120 voies, soit 720 voies téléphoniques, au voisinage de 13 GHz). Ce système équipa en particulier, à partir de 1975, le réseau nodal dit " Pharaon urbain " (Pharaon était explicité ainsi : Plate-forme hertzienne d'aiguillage pour réseau automatique à organisation numérique) destiné à écouler le trafic téléphonique entre le centre interurbain de Paris et les centres de transit de la grande banlieue parisienne (Vélizy, Le Blanc Mesnil, ...).

La station nodale de Paris était située au sommet de la Tour Montparnasse, et le réseau nodal permettait de recueillir une certaine compétence pour la mise au point d'un satellite à accès multiple (Eutelsat, puis Télécom 1).

Le débit de 52 Mbit/s fut utilisé au niveau régional dans la bande des 7 GHz pour prendre la suite de la transmission analogique à 600 voies ; il fut développé dans la bande des 13 GHz (12,75 à 13,25 GHz) ; dans les années 1970, environ 1000 émetteurs-récepteurs à 7 GHz et 400 à 13 GHz ont été utilisés à ce débit.

Mais le débit choisi pour la normalisation européenne fut fixé à 34 Mbit/s (soit 480 voies), et les réalisations françaises ultérieures furent faites avec un débit de 34 Mbit/s ou de 2 fois 34 Mbit/s (soit 960 voies), le premier matériel aux normes CEPT à 34 Mbit/s fut installé en 1976 dans un réseau local proche de Strasbourg.

A partir de 1980, des matériels à 2 x 34 Mbit/s furent utilisés dans les bandes des 7 et 13 Mbit/s (en MDP 4 ou MDP 8) ainsi que dans les bandes des 4 et 8 GHz (en MDP 8).

Les matériels fonctionnant dans la bande des 2 GHz (à 2, ou 8, ou 34 Mbit/s, soit 30, ou 120, ou 480 voies) convenaient bien aux besoins locaux et régionaux ; ils étaient économiques et faciles à mettre en œuvre, aussi ils se sont rapidement développés, en particulier en raison du développement de la commutation d'abonnés en technique temporelle, ce qui permit de constituer des zones numériques homogènes sans démodulation au niveau de la voie.

Vers 1990, environ 5000 émetteurs-récepteurs étaient en service dans la bande de 2 GHz, on prévoyait de les remplacer par des matériels à 13 ou 15 GHz, une partie de la bande des 2 GHz devant être libérée au profit des liaisons avec les mobiles.

10. RESEAU NUMERIQUE NATIONAL

Les progrès techniques réalisés sur les composants à semi-conducteurs permirent dès 1975 d'envisager d'utiliser les techniques numériques pour transmettre des capacités plus importantes. De telles liaisons numériques correspondaient bien aux transmissions entre centres de commutation, après qu'a été décidé en 1978 de généraliser la commutation temporelle.

Cela permettait d'établir des voies numériques directes entre abonnés en particulier pour la constitution de "réseau numérique à intégration de services" (RNIS/ISDN) que l'on souhaitait développer à cette période. La voie RNIS, résultant de l'association de deux voies A et B à 64 kbit/s et d'une voie D à 16 kbit/s, soit un débit total de 144 kbit/s, permet d'établir des connexions de téléphonie, télégraphie, vidéotex, ... sur les voies à 64 kbit/s et de transmettre des données sur la voie à 16 kbit/s (ainsi que les signalisations associées aux voies A et B).

Le débit de numérisation de la voie téléphonique restait fixé à 64 kbit/s, et les signaux numériques pouvaient être transmis aisément sur faisceau hertzien au moyen d'une modulation de phase à 4 ou 8 états (MDP 4, MDP 8), avec une capacité par canal radioélectrique de 1920 voies, ce qui correspond à environ 140 Mbit/s, et un espacement entre canaux de 60 MHz, permettant de transmettre dans la bande des 11 GHz (10,7 - 11,7 GHz) 8 canaux radioélectriques par artère (7 canaux en service, soit 13 440 voies, et un en secours).

Des caractéristiques améliorées ont pu être obtenues au moyen d'une modulation d'amplitude en quadrature, d'abord à 16 états (MAQ 16), permettant la transmission de canaux espacés de 40 MHz, selon les Recommandations du CCIR, dans les bandes des 11 GHz et des 6,5 GHz, puis à 64 états (MAQ 64) avec espacement de canaux voisin de 30 MHz recommandé pour la bande des 6 GHz (5,9 - 6,4 GHz) (ainsi que pour les bandes des 4 et 8 GHz), mais au prix d'une grande complexité des matériels.

Les premières liaisons à 140 Mbit/s dans la bande des 11 GHz, avec du matériel 11 - 14 réalisé par Thomson CSF et SAT, ont été expérimentées en 1973 près de Paris et de Lannion, puis installées progressivement sur les artères hertziennes.

Des matériels numériques à 140 Mbit/s ont été aussi développés par TRT dans les bandes des 4 et 6 GHz.

Des renseignements plus détaillés figurent dans l'annexe A3 sur les techniques de numérisation, et dans l'annexe B2 sur le développement du réseau numérique.

Les systèmes à 140 Mbit/s ont été généralisés sur toutes les artères d'infrastructure du réseau hertzien ; ils ont progressivement remplacé les systèmes analogiques, dont une partie a été conservée pour assurer des transmissions de programmes audiovisuels.

Vers 1990 fonctionnaient dans le réseau numérique environ 2000 émetteurs-récepteurs à 140 Mbit/s dans la bande 11 GHz, 1000 dans la bande 6,5 GHz. Ainsi était constitué un réseau national de faisceaux hertziens numériques à 140 Mbit/s, doublant le réseau sur câbles coaxiaux, également à 140 Mbit/s, assurant ainsi une excellente sécurisation et une très grande disponibilité.

Vers la fin du XXI^{ème} siècle, ces systèmes seront supplantés par des systèmes sur fibre optique, qui posent des problèmes d'installation (pose des câbles à fibre optique) mais assurent ensuite un fonctionnement fiable à grande disponibilité, si bien qu'il a été décidé en 1996 de supprimer progressivement (de 1996 à 1998) le réseau national de faisceaux hertziens, le réseau de câbles à fibre optique étant devenu auto sécurisé par l'utilisation de la structure en anneau. Les faisceaux hertziens restent utilisés pour les liaisons régionales et locales, ainsi que, à titre exceptionnel, pour des liaisons temporaires et des liaisons de secours, qui sont surtout assurées par satellite.

11. FAISCEAUX HERTZIENS TRANSHORIZON

L'emploi de systèmes transhorizon n'est pas nécessaire pour assurer des liaisons en France sur le continent. En plus des premières liaisons Continent - Corse à fréquence relativement basse (voir paragraphe 2.), des matériels transhorizon ont été étudiés et développés en France pour être utilisés Outre-Mer, en particulier en Algérie et au Sahara pour desservir les centres de production pétrolière (Hassi Messaoud et Edjelé) où ils rendirent de grands services en attendant l'utilisation de satellites.

En métropole, une station a été construite au Mont Artzamendi, près de Biarritz, pour constituer l'extrémité française d'une liaison France - Portugal, qui permettait de compléter la transmission à travers le réseau de câbles espagnols. La liaison a fonctionné vers 1965 et a permis de recueillir des enseignements sur la propagation transhorizon.

Une liaison à deux sections transhorizon (de plus de 300 km chacune) a été établie par l'ORTF pour transmettre en Algérie les programmes de télévision élaborés en métropole, avec une station d'émission à Fonfrède, près de Perpignan, une station relais à Majorque et une station de réception à Alger. Le matériel construit par TRT par extrapolation du matériel pour faisceaux hertziens dans la bande des 4 GHz a fonctionné à partir de 1960 avec une puissance d'émission de 500 W obtenue par un post amplificateur à klystron placé à la sortie du matériel normal ainsi qu'avec des antennes de grande dimension (diamètre 6 m) et une réception en diversité.

Une liaison de caractéristiques intermédiaires (puissance d'émission normale, 8W, mais grandes antennes et diversité) a fonctionné entre le Mont Agel et Bastia (190 km).

12. FAISCEAUX HERTZIENS DIVERS

En plus des systèmes de faisceaux hertziens qui ont connu un grand développement et ont assuré l'infrastructure du réseau national et des réseaux régionaux de télécommunications, il convient de mentionner un certain nombre de réalisations destinées à satisfaire des besoins particuliers, ou à expérimenter un nouveau système en attendant un développement plus systématique.

Il n'est pas nécessaire de revenir sur les liaisons expérimentales Paris - Montmorency (12 voies téléphoniques à 3 GHz) ou Le Havre - Deauville (24 voies à 1,5 GHz) (voir paragraphe 1.), ni sur les liaisons entre le continent et la Corse (12 puis 24 voies sur des fréquences comprises entre 50 et 100 MHz) (voir paragraphe 2.), ni sur les premières liaisons avec relais : Paris - Lille (1 voie de télévision à 1 GHz avec 2 relais), Dijon - Strasbourg (60 voies téléphoniques à 250 MHz avec 2 relais) (voir paragraphe 3.).

Parmi les autres systèmes correspondant à des usages particuliers, il convient de mentionner :

- dans la bande des 1,4 GHz des matériels pour liaisons régionales de type point - multipoint IRT 1500 à 10 voies et IRT 2000 à 30 voies, en accès multiple à répartition dans le temps (AMRT), construits par TRT, équipant une cinquantaine de réseaux régionaux et locaux pour le raccordement d'abonnés
- dans la bande des 8 GHz (8,025 - 8,5 GHz) des matériels pour transmission de télévision ou de multiplex AMRF à 960 voies, ou de multiplex AMRT à 34 Mbit/s dans des réseaux régionaux
- dans la bande des 10 GHz (10,5 - 10,68 GHz) des faisceaux hertziens dits " d'intervention " permettant d'assurer des liaisons temporaires (à l'occasion d'événements ponctuels ou en secours d'une liaison en panne) (matériel FLD 10 de TRT, pour 1 voie de télévision ou téléphonie numérique à 34 Mbit/s)
- dans la bande des 19 GHz (17,7 - 19,7 GHz) des matériels pour artères numériques à 140 Mbit/s destinées à la pénétration urbaine (matériel FHN 19 - 28 de CSF à 2 fois 140 Mbit/s en complément au matériel FHN 13 - 06 à 2 fois 34 Mbit/s dans la bande des 13 GHz, cité au paragraphe 9)
- dans la bande des 23 GHz (22 - 23,5 GHz) des matériels, principalement analogiques, pour transmission de télévision et de voies audio sur des distances inférieures à 10 km, compte tenu de l'affaiblissement élevé dans cette bande (à cause de la présence d'une raie d'absorption de l'eau à environ 23 GHz) par exemple pour des liaisons entre studios et émetteurs
- dans la bande des 30 GHz (31 - 31,3 GHz) des matériels numériques (2 Mbit/s) pour liaisons régionales ou locales
- dans la bande des 40 MHz (37,5 - 39,5 GHz) des matériels analogiques (TM 440 de Thomson CSF) pour transmission de programmes audiovisuels

Les fréquences supérieures à 15 GHz, encore peu utilisées vers 1990, le seront plus abondamment ultérieurement, avec le développement des réseaux d'accès hertziens, couramment appelés " boucles locales radioélectriques " (BLR).

Des renseignements plus complets que ceux figurant dans le texte ci-dessus ont été reçus de Philippe MAGNE et de Jacques VERRÉE, relatifs d'une part aux problèmes techniques liés à la transistorisation et à la numérisation, d'autre part au développement du réseau national, analogique puis numérique. Ils sont contenus dans les annexes A et B :

- annexe A : <http://www.colidre-ft.asso.fr/html/thue5magne.pdf> - Transistorisation et numérisation, par Philippe MAGNE

- annexe B : <http://www.colidre-ft.asso.fr/html/thue5verree.pdf> - Le réseau hertzien national, par Jacques VERRÉE.

Une bibliographie : <http://www.colidre-ft.asso.fr/html/thue5bibliogr.pdf> commentée (non exhaustive) donne la référence d'un certain nombre de textes dans lesquels ont été puisées la plupart des données figurant dans le texte ; une liste des principaux témoignages recueillis y est jointe, ainsi que la liste des documents de travail qui ont préparé le présent texte.