

# Télécommunications haut débit en ondes millimétriques

par **François MAGNE**

Directeur Technique de Thomson-CSF Communications

<b>1. Propriétés et particularités.....</b>	E 6 250 - 3
1.1 Bandes passantes disponibles .....	— 3
1.2 Propagation de nature « optique » .....	— 3
<b>2. Explosion des besoins en capacité.....</b>	— 4
2.1 Le civil.....	— 4
2.2 Le militaire .....	— 5
<b>3. Architectures. Paramètres. Performances.....</b>	— 6
3.1 Architecture générale.....	— 6
3.2 Dimensionnement des paramètres.....	— 6
<b>4. Modules millimétriques .....</b>	— 8
4.1 Émetteurs .....	— 8
4.2 Récepteurs .....	— 9
4.3 Sources ou oscillateur local.....	— 9
4.4 Exemple de réalisation d'émetteur récepteur semi-duplex en bande Ka	— 10
4.5 Antennes .....	— 10
<b>5. Technologie .....</b>	— 12
5.1 MMIC .....	— 12
5.2 Technologies de report .....	— 12
<b>6. Conclusion .....</b>	— 13

**L**es ondes millimétriques sont les ondes radioélectriques couvrant les fréquences de 30 à 300 GHz. Leur usage dans les télécommunications s'étend typiquement de 30 à 70 GHz. On examinera, ci-après la bande de 27 à 65 GHz, qui correspond au haut de la bande nommée Ka et la partie basse de l'EHF (Extremely High Frequency).

Les propriétés particulières de propagation et de bande passante confèrent à ces ondes de larges possibilités d'utilisation tant variées qu'importantes au début du troisième millénaire.

Les applications civiles et militaires concernent des transmissions point à point type faisceaux hertziens et ponts, les réseaux d'accès point à multipoint MMDS (Multichannel Multipoint Distribution System), MVDS (Microwave Video Distribution System) pour l'image et LMDS (Local Multipoints Distribution) (système de distribution locale point multipoint), WBLL (Wireless Broadband Local Loop) pour les télécommunications, les réseaux locaux sans fil ou WLAN (Wireless Local Aera Network) et les transmissions par satellite.

Quelques exemples d'applications civiles et militaires sont donnés ci-après (tableau A).

Dès les années 70, les militaires se sont intéressés aux ondes millimétriques pour faire des transmissions. Leur objectif était surtout la discréetion : la limitation de la propagation et le confinement par de petites antennes permettent en effet de faire des transmissions à courte portée indétectables. Ce n'est que dans

Tableau A – Gammes de fréquence pour applications civiles et militaires en ondes millimétriques						
Fréquences (GHz)	Point à point		Point multipoint		Réseau local fixe	Réseau local mobile
	Satellite	Sol	Satellite	Sol		
Civil.....	20-30	38-40	28-31	27 et 40	60	65
Militaire	44 et 60	55 et 60	44			37,5

les années 80 que les prototypes commencèrent à voir le jour. Et finalement les Américains les mirent en œuvre sur les satellites militaires vers 45 GHz.

La raie d'absorption de l'oxygène à 60 GHz fut aussi utilisée pour accroître la discréption par des faisceaux hertziens expérimentaux à la fin des années 80. En définitive, les militaires ont maintenant deux grands types d'applications en cours : les **télécommunications par satellite**, les **liaisons courte portée** sur le terrain pour les centres de commandement et pour l'identification.

Le civil devait prendre le relais dès le début des années 90. Il se développe alors des petits faisceaux hertziens pour le dépôt de données sur 5 à 10 km dans les 38 GHz. Une offre nombreuse de « ponts » existe maintenant offrant 2, 4 et 8 Mbit/s dont l'application principale est le relais des stations de base de la radio mobile.

Puis c'est le bas de la bande qui est maintenant largement convoitée et bientôt encombrée avec les communications satellites géostationnaires et le LMDS dans la bande Ka (27 à 30 GHz).

Aujourd'hui avec l'arrivée du multimédia et d'Internet les systèmes se développent dans les 40 GHz. Déjà, les attributions de bandes sont limitées autour des 46-48 GHz.

#### Bandes millimétriques pour les télécommunications (tableau B)

Les attributions générales sont assez vagues. En dehors de la radionavigation et de la radioastronomie, la situation pratique est globalement la suivante (cependant elle évolue en fonction des régions du monde, de la pression et des besoins des opérateurs et des nombreux projets en cours).

- La première remarque est que le confinement de ces ondes devrait permettre de s'affranchir des séparations trop rigoureuses entre civils et militaires, entre détection et communication, etc. Seule la recherche dans la radioastronomie pourrait réclamer un silence radio absolu.
- La seconde est que plusieurs services peuvent se faire sur le même système, les instances de régulation voient donc se compliquer leurs problèmes entre la TV, la VOD (Video On Demand) et les communications (l'administration française se dote de trois organismes : l'Agence Nationale des fréquences (ANF), le Conseil Supérieur d'Audiovisuel (CSA) et l'Agence de Régulation des Télécommunications (ART)).
- La troisième c'est que l'éther est payant et que les ondes millimétriques vont être une source de revenu important pour les États.

Tableau B – Attribution des bandes de fréquence millimétriques (en GHz) pour les télécommunications							
27,5 à 29,5	28,5 à 31	37,5 à 40	40,5 à 42,5	43 à 44	45 à 50	50 à 60	65
LMDS		Faisceau hertzien	MMDS		Com aéro	Faisceau hertzien	MBS
	Satellites Ka	Ponts	MVDS	Satellites	Ballon	LAN hyperfréquence	HIPERLAN in-door
		IFF		Militaire		Militaire	

IFF Identification Friend or Foe  
LAN Local Area Network  
MBS Mobile Broad-band System

# 1. Propriétés et particularités

Les propriétés particulières des ondes millimétriques doivent se comparer aux ondes centimétriques couramment utilisées pour la radio mobile, les faisceaux hertziens et les satellites, il n'y a pas de révolution physique mais un continuum d'évolutions qui finit par présenter des différences profondes avec les ondes habituellement utilisées en télécommunications.

## 1.1 Bandes passantes disponibles

Les ondes millimétriques offrent plus de bandes que toutes les gammes de fréquence jusqu'ici réunies. Dans une gamme de fréquence (domaine d'un type d'application utilisant la même technologie, où l'on peut utiliser quasiment les mêmes équipements, typiquement 5 % de la fréquence), on dispose de dix fois plus de capacité. Là où, dans l'UHF (*Ultra High Frequency*), on a des difficultés à trouver 10 MHz, où dans la bande S 30 MHz seulement ont été trouvés pour le WLAN. On dispose facilement de 2 GHz, par exemple, pour la distribution multimédia à 40 GHz, soit près de 100 fois plus.

## 1.2 Propagation de nature « optique »

La propagation en ligne droite est la principale caractéristique peu différente en cela des ondes centimétriques. Les grandes différences viennent de l'absorption, de la scintillation et de la diffraction.

**L'absorption :** à ces fréquences, l'influence de la pluie et des brouillards se fait plus sentir. Bien que la propagation soit bien meilleure que dans l'optique (notamment dans les brouillards), la pluie est un problème sérieux pour les systèmes terrestres large bande au-delà 3 km de portée.

Le tableau 1 donne des points de repère d'affaiblissement vers 40 GHz.

Un autre phénomène est celui de la raie d'absorption de l'oxygène à 60 GHz : 10dB/km. Cette propriété a commencé par intéresser les militaires qui voyaient là un moyen de faire des liaisons courtes portées discrètes et d'adapter la portée en changeant la fréquence le long de la raie d'absorption. D'autres pensent l'utiliser avec l'HIPER-LAN (*high performance local area network*) *in-door* pour relier les

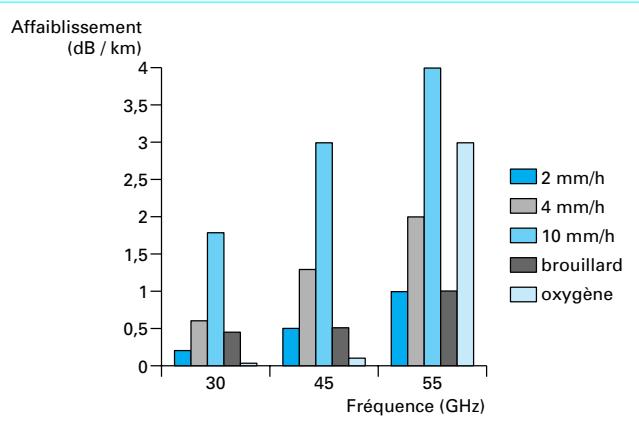


Figure 1 – Effet des différents phénomènes

stations de travail et les gros ordinateurs : la faible portée permettant de réutiliser la fréquence à proximité (projets américains et japonais). Une application voit le jour actuellement, elle concerne les liaisons haut débit entre satellites (où précisément il n'y a pas d'absorption).

Pour conclure sur l'absorption, la figure 1 résume l'effet des différents phénomènes.

Autant les ondes millimétriques seront largement utilisées dans les zones sèches ou tempérées autant les zones tropicales seront défavorisées.

**Scintillation :** les modifications de l'indice de l'atmosphère peuvent conduire à la dispersion du front d'onde au niveau de la station de réception et donc à une diminution du gain (tableau 2).

### Diffraction

- Sur les constructions : il ne faut pas s'attendre aux bonnes propriétés qui existent dans la radio mobile et qui permettent de joindre les mobiles hors de visibilité des antennes des bases.

La longueur d'onde permet cependant la diffraction sur les bâtiments si les arêtes y sont vives, on peut espérer pouvoir utiliser la diffraction en deçà de 20° avec des valeurs d'atténuation de -30dB, tout dépend en fait de la géométrie fine de l'obstacle.

Tableau 1 – Points de repère d'affaiblissement vers 40 GHz

Phénomène	Oxygène	Vapeur d'eau	Brouillard	Pluie fine	Pluie moyenne	Forte pluie
Densités		10 g/m <sup>3</sup>	Visibilité : 50 m	1 mm/heure	3 mm/h	15 mm/h
Affaiblissement (dB/km) à 40 GHz	0,05	0,15	0,5	0,2	1	3

Tableau 2 – Fluctuations de l'indice de l'atmosphère (en dB)

Fréquence (GHz)	Distance			
	1 km	3 km	10 km	20 km
35	0	± 1	± 3	± 5
55	± 0,5	± 1,5	± 4	non pertinent

**Sur la végétation :** l'effet des diffractions sur les feuilles et les branches constitue par recombinaison des affaiblissements fluctuants. L'absorption qui en découle dépend des essences et de l'humidité : plus les feuilles sont grandes ou la densité forte, plus l'effet est important (tableau 3).

**Nota :** il est possible de limiter les efforts de diffraction/diffusion sur un rideau d'arbre proche du récepteur par traitement spatial.

En conclusion, les ondes millimétriques s'utilisent donc majoritairement à vue directe ce qui n'empêche pas les militaires de travailler dans les sous-bois en prenant les bonnes marges ou en jouant sur la diversité d'espace.

Tableau 3 – Effet de diffraction sur la végétation			
Atténuation de végétation (dB/m)	Arbre nu	Feuilles sèches	Feuilles mouillées
Bouleau, peuplier .....	0	1	3
Chêne .....	0,8	1,7	5
Érable .....	1	3	5

■ **Réflexion, diffusion et chemins multiples** : alors que les propriétés précédentes étaient plutôt des inconvénients, les réflexions en millimétrique sont rares surtout en tout- terrain, en effet la longueur d'onde étant faible en regard de la planéité des surfaces non absorbantes il n'y a que rarement des réflexions mais essentiellement de la diffusion ; ce qui fait que les liaisons hertziennes ne souffrent pas de trajets multiples importants ; le *fading* est donc moins marqué qu'aux ondes centimétriques. On ne s'occupe plus de la fameuse ellipse de Fresnel dans ce type de liaison (sauf au ras du sol pour les mobiles ou les fluctuations de l'affaiblissement en ville peuvent atteindre 30dB, mais beaucoup moins en tout terrain). Pour des installations fixes en ville, on déplacera l'aérien si l'on doit éviter une réflexion gênante.

En conclusion, la marge à prendre est moins grande pour ce phénomène que dans les ondes décimétriques et centimétriques (mais il faudra en revanche en prendre une pour la pluie).

Le tableau 4 résume les propriétés des ondes millimétriques.

Tableau 4 – Propriétés des ondes millimétriques	
Paramètre	Commentaire
Capacité	<b>Importante</b> $n \times$ Mbit/s
Portée	Limitée en <b>terrestre</b> à 3-10 km, <b>bon</b> en sol-satellite, <b>idéal</b> en satellite-satellite
<i>Fading</i>	
Confinement (1). Discréption	<b>Fort</b> >> réutilisation des fréquences <b>importante</b>
Diffraction	<b>Faible</b> >> vue directe
Végétation	1 à 10 dB/m selon essences et humidité
Absorption	La pluie limite la portée en terrestre ou satellite rasant
Encombrement	Faible notamment les antennes : intérêt pour les satellites, les militaires et les particuliers

(1) Le confinement résulte des propriétés de propagation et de la qualité des antennes, c'est un avantage exploité pour les communications à grande densité d'abonnés.

## 2. Explosion des besoins en capacité

### 2.1 Le civil

#### 2.1.1 Le besoin : de l'image à Internet

■ L'image : au départ c'est l'image qui tire les projets. La télévision numérique diffusée par satellite a un franc succès. À partir du MMDS, système terrestre local analogique à 2,5 GHz, on passe au numérique, on introduit l'accès en retour sur Internet, puis, en

Europe, la bande 40-42 GHz est retenue pour la diffusion locale de dizaines de chaînes.

La construction locale de « bouquets » à partir de programmes nationaux, satellite, etc., peut être proposée avec des films à la demande. L'intérêt des collectivités locales et des câblo-opérateurs pour l'extension de leur réseau à la périphérie des agglomérations « the last mile » est manifeste. De plus on peut éviter la prolifération des laides paraboles individuelles, et, dans certains pays on pense ainsi mieux contrôler l'information.

Le MMDS peut, à partir d'une base, offrir par exemple 5 bouquets de 34 Mbit/s soit une capacité de 170 Mbit/s.

Développement de la « voie de retour ». Initialement la voie de retour utilisait le téléphone. Mais disposant d'une liaison radio, l'accès direct à la station de base pour la demande de vidéo devient possible (contrôlée de plus par l'opérateur). Cette voie de retour est cependant de capacité faible (quelques kbit/s suffisent), le système est très dissymétrique. Mais on constate que l'on a la possibilité d'accès à Internet.

■ Internet : les besoins sont très importants. À partir des bases du MMDS on peut construire des réseaux d'accès haut débit, que certains appellent *boucle locale*. Au départ le besoin semble dissymétrique les particuliers vont visiter des sites offerts par des ISP (*Internet Service Providers*). Typiquement, le besoin en voie descendante est de l'ordre de 8 Mbit/s par cellule couvrant 2 000 abonnés et pour la voie de retour ou montante le besoin est de :  $N \times P \times 64$  kbit/s où  $N$  est le nombre d'abonnés,  $P$  le taux d'utilisation ou probabilité de collision (de l'ordre du %) soit une capacité montante de 2 à 3 Mbit/s.

Évolution d'Internet : la télé-activité ne se limite pas aux visites de sites et d'accès aux banques d'information : en effet de nombreux services plus ou moins symétriques se développent :

- le télé-enseignement ;
- le télé-travail et travail coopératif ;
- la télé-médecine ;
- le télé-achat qui devient le service le plus important ;
- la télé-conférence à *the desktop* depuis son PC.

■ Intranet est le réseau interne de communications numériques des entreprises, des organismes ou des administrations. Ces services sont plus symétriques et de plus en plus gourmands en débit. Typiquement une PME ou un établissement local d'une entreprise, doit disposer de 2 Mbit/s et les centres plus importants des entreprises (exemple : centre Recherche et développement de 500 à 1 000 personnes) de 8 Mbit/s. Et c'est en fait ce besoin et le besoin d'image qui tirent le marché.

Le tableau 5 résume les besoins par abonné et l'évolution.

Tableau 5 – Réseau Intranet : besoins par abonné et évolution

Abonné	Voie descendante	Voie montante	Paramètres
Particulier TV .....	$n \times$ Mbit/s vidéo	32 kbit/s	$n = 1$ à 3
SOHO (1).....	256 à 512 kbit/s	$n \times 64$ kbit/s	$n = 1$ à 3
SME (2).....	512 kbit/s à 2 Mbit/s	$N \times 64$ kbit/s	$N = 2,4$ à 8
Grands établissements ..	2 à 8 Mbit/s	2 à 8 Mbit/s	

(1) SOHO (*Small Home Office*) : ceci comprend les particuliers disposant de plus d'un PC effectuant du télétravail ou des téléséances et du télé-achat pour les familles, ou encore du télé-enseignement pour les étudiants, mais encore les bureaux comme les petites agences (agences de voyage, agences immobilières) ou les bureaux de médecins, avocats, etc. Ce marché est à terme le plus important, le tertiaire se développant et s'informatisant.

(2) SME (*small and middle size enterprises*) : qualifie aussi un site déporté d'une entreprise moyenne ou grande, ou encore un cabinet important 25/40 personnes.

## 2.1.2 Classes de réponse : du satellite GEO (géostationnaire à 35 000 km) au terrestre LMDS

### Les satellites

Nombreux sont les programmes en cours de satellites géostationnaires en bande Ka 28 à 30 GHz.

Dans cette bande l'attribution mondiale des fréquences pose déjà problème, avec un taux de réutilisation des fréquences de 3 (organisation en cellules hexagonales jouant sur la fréquence la directivité des antennes et la polarisation) on peut disposer de 50 MHz par cellule ou faisceaux. Le satellite arrosant une région, le marché est plutôt celui des grandes entreprises et des « ponts » hauts débits à longue distance. De plus le terminal est évidemment onéreux comme la part satellite. Typiquement il faut à l'abonné un TOP de 20 W et une antenne de 90 cm pour un débit de 2 Mbit/s.

L'idée de se rapprocher pour améliorer le bilan et réduire les tailles de cellules conduit aux satellites LEO telle la constellation IRIDIUM pour la radio mobile, ou encore le projet Skybridge pour les entreprises. En millimétrique, le projet TELEDESIC, est fort complexe (poursuite des satellites défilants et hand-over) et fort onéreux même pour l'équipement d'abonné. Sans compter le remplacement de 2 satellites par semaine. Ce projet a peu de chance d'être rentable à moyen terme, malgré les milliards de Bill Gates & Dow.

### Les ballons

Dans le genre original, la solution des ballons peut paraître attrayante. Il s'agit de mettre un Zeppelin de 150 m dans la stratosphère (vers 27 km d'altitude) avec plusieurs centaines de petites antennes réparties sur une portion de sphère, chaque faisceau offrant une capacité de 8 Mbit/s. Par rapport au géostationnaire on gagne 60 dB sur le bilan de liaison, ce qui permet d'utiliser des émetteurs à état solide et des aériens de taille raisonnable ( $d = 10$  cm), de plus on place le ballon au-dessus des agglomérations ce qui évite de perdre l'essentiel de son énergie sur des espaces vides comme dans le cas des satellites. Les fréquences utilisées sont 46 et 47 GHz. La figure 2 donne une ébauche de quelques éléments de ce projet. À l'exception de la commutation à bord du ballon (600 × 8 Mbit/s), la difficulté provient du maintien à poste et de la stabilisation du ballon dans le vent, certes assez constant, dans la stratosphère et de la production d'énergie électrique.

### Le LMDS

Les stations terrestres sont une autre réponse au problème, le principe en est le suivant : on utilise des stations de base [comme dans le GSM (Groupe Special Mobile)] mais de portée plus réduite typiquement 3 km de rayon. Ces bases sont sectorisées, en 4 ou 6 secteurs en gisement, offrant chacun 34 Mbit/s ; on dispose donc de 4 ou 6 fois 34 Mbit/s soit 130 à 200 Mbit/s pour environ 2 000 abonnés. La capacité d'accès par abonné ou le nombre d'abonnés sont d'autant plus grands que les cellules sont petites, ce qu'avaient déjà constaté les opérateurs de radio mobile.

La figure 3 ne peut montrer la taille des équipements et notamment des antennes : les équipements à mettre en place ne font que quelques kilogrammes et les antennes ne dépassent pas 12 cm de haut. On les installe donc sur les sites élevés équipés pour les bases et sur l'antenne de télévision pour les particuliers. Pour une ville moyenne on disposera d'une dizaine de stations de base à la périphérie ou sur les axes à équiper ; une station centrale avec un centre de commutation suffira pour l'ensemble.

## 2.2 Le militaire

Les études sur le champ de bataille numérisé, suite aux expériences de la guerre du Golfe ont d'abord fait apparaître le besoin

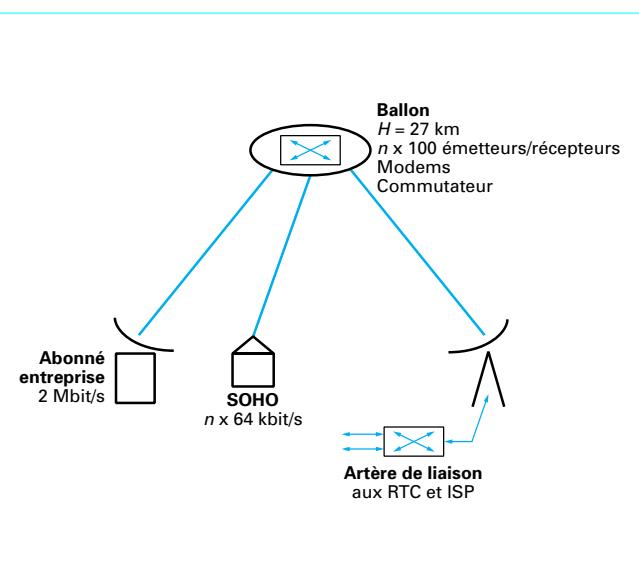


Figure 2 – Ballon stratosphérique de réseau d'accès d'agglomération

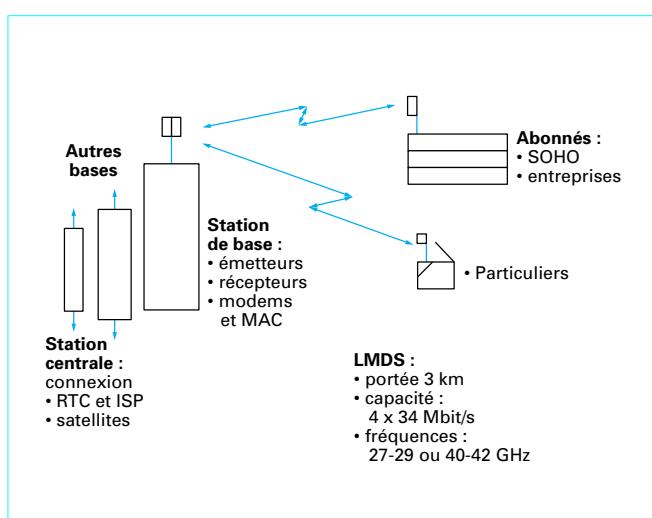


Figure 3 – Schéma d'un système terrestre LMDS

d'identification ami-ennemi, puis le besoin d'échanges locaux d'informations à haut débit et en temps réel pour les systèmes d'arme. De plus, le matériel devait être petit, les antennes peu encombrantes et le rayonnement discret. Toutes ces qualités sont réunies dans le millimétrique pourvu qu'on ne demande pas trop de portée, à l'exception du satellite).

On distingue plusieurs classes d'application dans le militaire : les satellites, les bases et grands PC, les réseaux mobiles terrestres ou aéroportés. Le tableau 6 résume les caractéristiques des principaux projets ou développements.

Tableau 6 – Caractéristiques des principaux projets ou développements dans le militaire

Systèmes	Type	Débit (Mbit/s)	Capacité (Mbit/s)	Fréquence (GHz)	Portée (km)
Satellites .....	point-multipoint	variable	80	22 et 44	35 000
Déports hertziens .....	point à point	1 ; 2 ; 4		55 et 60	1 à 5
Réseau sol (pour sol-air).....	point-multipoint	4	40	37	0,5 à 2
Base aérienne ou grand PC .....	point-multipoint	8 variable	155	37 et 55	3
PC mobile.....	réseau	0,5 ; 1 ; 2 ; 4	40	37 et 55	0,5
Blindés .....	réseau	variable	25	37	0,5
Hélicoptères .....	réseau	variable	25	37	1
Avions .....	réseau	2	25	37	1 à 10
IFF .....	point à point	0,25		37	6

Pour des raisons évidentes les valeurs données ne sont qu'approximatives mais les ordres de grandeurs permettent d'apprécier les besoins.

### 3. Architectures. Paramètres. Performances

#### 3.1 Architecture générale

Les systèmes de télécommunications millimétriques (figure 4) comprennent quatre grands sous-ensembles. En cela ils ne se distinguent pas fondamentalement des autres systèmes sans fil, mais les performances sont d'un autre ordre de grandeur. Aussi les machines numériques temps réel pour la transmission et la gestion des accès demandent des capacités de plusieurs centaines de mégopérations par seconde (Mops) typiquement 500 Mops voire des Gops. De plus les ensembles millimétriques sont totalement originaux.

- Un premier sous-ensemble radio comprenant :
  - le *front-end* millimétrique avec antennes, émetteurs et récepteurs ;
  - la radio avec les fréquences intermédiaires (FI), les synthétiseurs et les Convertisseurs Analogiques Numériques (CAN).
- Un deuxième sous-ensemble de traitement de signal numérique ou modem assurant la modulation du train binaire et la démodulation, la récupération du train de bits avec correction des erreurs (FEC, Forward Error Correcting Codes) et la synchronisation.
- Un troisième sous-ensemble gérant la demande de ressources et l'accès aux transmissions appelé MAC (medium access control) basé sur des protocoles temporels fréquentiels ou spatiaux.
- Une interface au réseau de transport [SDH (Synchronous Data Hierarchy), ATM (Asynchronous Transfert Mode), Ethernet...].

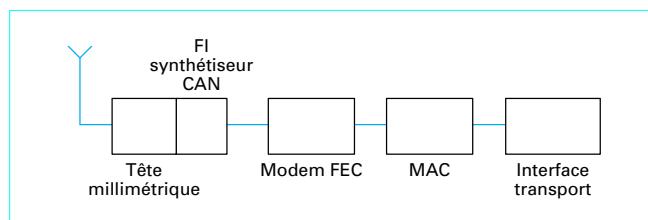


Figure 4 – Architecture d'un système de télécommunications millimétriques

#### 3.2 Dimensionnement des paramètres

##### 3.2.1 Bilan de liaison et couverture

Les spécificités du millimétrique portent sur deux points pour obtenir les performances attendues : la prise en compte des conditions de propagation surtout d'absorption, le compromis entre la couverture angulaire et la nécessité de gain d'antenne.

L'équation des télécommunications nous fournit la puissance reçue  $P_r$  :

$$P_r = P_e \cdot G_e \cdot G_r \cdot \lambda^2 / (4\pi)^2 D^2 \cdot L_h \cdot L_a$$

avec  $P_e$  puissance d'émission limitée, comme on le verra, au watt avec des composantes « état solide » et à des dizaines de watts (voire 100 W) avec les TOP (tubes à ondes progressives),

$G_e$  et  $G_r$  gains d'émission et de réception (rarement identiques),

$D$  distance,

$L_h$  pertes hyper. Ces systèmes doivent être de conception très intégrée, il y a peu de marge pour laisser *traîner* des pertes hyperfréquences,

$L_a$  pertes atmosphériques (et éventuellement de végétation). Plus la portée est grande plus ce paramètre compte notamment pour la pluie et la scintillation et, bien sûr également pour l'oxygène dans le cas des 60 GHz et autour ( $\pm 8\%$ ).

Afin d'illustrer l'influence de ces paramètres 3 exemples de communications millimétriques sont fournis :

— le premier est un pont ou un faisceau hertzien : artère locale point à point en bande Ka, il permet d'échanger 8 Mbit/s dans les deux sens à 10 km ;

— le deuxième est le LMDS à 40 GHz avec le même objectif en point multipoint, plus proche, et par secteur ;

— le troisième est une liaison à 56 GHz proche de la bande d'absorption de l'oxygène, encore à plus courte portée et plus faible débit, est un HIPERLAN militaire avec les mêmes dimensions d'antennes donc plus directives.

On a retenu des émetteurs à l'état solide raisonnables face à l'état de l'art et qui fournissent respectivement 1 W, 0,5 W et 200 mW.

Les antennes, comme il sera vu, par la suite, sont de l'ordre de 6 cm de diamètre donc très légères et discrètes.

La modulation choisie est à 4 états de phase cohérent ou QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) qui dans ce genre de transmission est la plus robuste vis-à-vis d'un rapport signal sur bruit fluctuant. On a, avec les codes correcteurs d'erreurs, une performance de 1 bit utile par hertz (ce qui est indiqué par un U).

La pluie est celle que l'on peut avoir dans la région parisienne, la marge permet de supporter une pluie plus forte mais pas les phases maximales de précipitation des orages ni les pluies tropicales.

On constate que les besoins et compromis nous conduisent à des marges acceptables pour les ponts (la permanence est assurée à mieux que 99,99 % dans les régions tempérées). Pour le LMDS à mieux que 99,9 % dans les mêmes régions plus faibles pour l'exemple militaire où la végétation s'ajoute à la pluie. Bien que le *fading* soit réduit et qu'il soit possible de s'en affranchir facilement par diversité d'espace, car les antennes sont petites et les déplacements pour éviter un *fading* aussi, il n'en reste pas moins que la pluie peut être gênante si la permanence absolue de la liaison est requise. Il ne reste alors qu'à réduire le débit, réduire le service pour ne pas perdre les liaisons (cette stratégie néanmoins n'est pas applicable pour la transmission de télévision).

Le tableau 7 donne des exemples de bilans types.

### 3.2.2 Formes d'onde

■ Le choix de la forme d'onde est assez simple : on a vu que les bilans n'étaient pas confortables, des modulations *M*-aires où  $M > 8$  tel que 16 QAM (modulation d'amplitude en quadrature) ou au-delà pourraient en principe fournir une meilleure efficacité spectrale compte tenu de l'amplitude de variation du *S/B* en fonction de la météo des exigences importantes de taux d'erreur, de la bande disponible, les formes d'onde les plus robustes avec les codes correcteurs les plus efficaces sont ce qu'il y a lieu de retenir.

■ C'est pourquoi le QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) a été majoritairement retenu pour les satellites, les ballons et dans la norme DAVIC du LMDS. Ces choix finissent par créer une forte synergie sur les composants qui permettent d'atteindre des prix intéressants, si l'on s'en tient à ces choix.

**Nota :** DAVIC est une norme de-facto créée par de nombreux industriels pour les réseaux d'accès haut débit de distribution et communication multimédia terrestre dits LMDS.

■ Dans le cas de l'IFF (*Identification Friend or Foe*) du champ de bataille on a même pris la modulation la plus économique le BPSK (2 états de phase). En revanche sur un « pont » haut débit à courte distance, dégagé avec du gain d'antenne on pourra aller vers du 16 voire 64 QAM.

Afin d'avoir plus de rendement des émetteurs de puissance on utilise de l'OQPSK (QPSK avec *off-set*) permettant de faire travailler l'émetteur à niveau plus constant et d'exiger ainsi moins de *back-off*. Le *back-off* désigne le recul qu'il faut prendre sur la caractéristique du transistor pour rester dans la zone linéaire. En effet, si l'amplification n'est pas linéaire la séparation des états devient plus hasardeuse et donc le taux d'erreurs se dégrade.

■ Les modulations OFDM (modulation conjointe sur multiporteur) ont la faveur de certains, elles ont une efficacité certaine contre les chemins multiples mais elles conduisent à un modem plus complexe. Les chemins multiples ne sont importants qu'en « *in-door* » ou au ras du sol (pour les mobiles). Le choix des modulations les mieux adaptées parmi les modulations telles que QPSK, 8PSK ou OFDM est effectué par modélisation et simulation sur des outils comme SPW ou PTOLEMY.

■ Les codes Reed-Solomon associés aux codes convolutifs Viterbi, constituent une bonne panoplie pour atteindre des taux d'erreurs (BER *bit-error-rate*) satisfaisants de l'ordre de  $10^{-8}$  à partir de taux de base accessibles (BER brut de  $\approx 10^{-4}$ ) avec les bilans radio raisonnables tels que ceux présentés dans les exemples ci-dessus. Là encore la simulation permet de trouver les meilleurs compromis sur la valeur des paramètres.

Tableau 7 – Exemples de bilans type

	Pont	LMDS	HIPERLAN militaire
	30 GHz	40 GHz	56 GHz
Débits ..... (Mbit/s)	8	8	2
Directivité émission ..... (°)	8 × 8	90 × 12	12 × 12
Directivité réception ..... (°)	8 × 8	6 × 6	12 × 12
Portées ..... (km)	10	3	2
Fréquences ..... (dB)	– 40	– 42,5	– 45,5
Gain aérien émission..... (dB)	26	12	23
Gain aérien réception ....(dB)	26	29	23
Puissance.....(dBm)	30	27	23
ATT/portée.....(dB)	– 102	– 92	– 88
Pertes atmosphériques .....	– 0,5	– 0,5	– 10
Pertes pluie (4 mm/h) .....	– 3	– 3,5	– 5
Pertes hyper .....	– 2	– 2	– 2
Pertes dépointage .....	– 1	– 2	– 2
Puissance reçue .....	– 66,5	– 74,5	– 83,5
KT.....(dBm)	– 174	– 174	– 174
Facteur de bruit du récepteur .....	3	4	5
Δf: QPSK 1 bitU/Hz .....	69	69	63
Pertes process .....	1	1	1
S/N (BER) > 10-8 avec FEC ....	8	8	8
Sensibilité .....	– 93	– 92	– 97
Marge .....	26,5	17,5	13,5

■ Les égaliseurs, compte tenu des faibles réflexions, peuvent être assez simples voire superflus. On doit néanmoins, dans les débits élevés comme les 34 Mbit/s des bouquets d'images, s'attendre à la présence d'inter-symbole si l'une des antennes au moins n'est pas assez directive.

Dans la plupart des cas de liaisons fixes, il suffit d'un égalisateur simple comprenant quelques retards et poids calculés sur une séquence d'apprentissage pour traiter l'intersymbole. Ce qui ne serait pas le cas avec des modulations *M*-aires de rang supérieur à 8.

Dans les systèmes millimétriques, étant donné l'influence brutale de la pluie, il est souhaitable de pouvoir régler les paramètres des codes correcteurs afin de subvenir aux écarts d'atténuation : en acceptant de réduire le débit on peut augmenter l'efficacité des codes et conserver à un taux d'erreur acceptable assurant un service à moindre capacité pendant quelques instants. Cette réduction de débit peut convenir pour des services Internet ou Intranet. Elle n'est pas applicable à la diffusion de vidéo ou pour des systèmes d'arme. Les marges à prendre dans ces cas sont donc plus importantes, elles conduisent à utiliser des antennes à plus grand gain (donc à des problèmes de pointage) et d'aller à la limite des émetteurs de puissance. Ces éléments sont donc clés dans le paramétrage des systèmes millimétriques.

### 3.2.3 MAC (*Medium Access Control*)

La plupart des systèmes millimétriques (à l'exception des faisceaux hertziens ou de l'IFF du champ de bataille) sont des réseaux d'accès ou des LAN sans-fil.

Ce qui veut dire que plusieurs abonnés peuvent réclamer des ressources plus ou moins importantes aux mêmes instants. Ces contraintes vont évidemment jouer sur la bande passante nécessaire des liaisons et donc sur leurs performances.

Notons que le MAC est très imbriqué d'une part à la forme d'onde, d'autre part à la couche transport, par exemple l'ATM. Notons aussi que la large bande des systèmes millimétriques et les services possibles à de nombreux abonnés rendent cette fonction essentielle.

Une station centrale peut gérer le réseau par exemple attribuer aux utilisateurs les ressources à leur demande (mode centralisé) ou le réseau peut être conçu sans qu'une des stations ait un rôle privilégié (mode décentralisé). Ce mode est particulièrement intéressant pour les réseaux mobiles.

#### ■ En mode centralisé :

- Les multiplex fréquentiels et/ou temporels (FDM et TDM) sont bien adaptés pour la diffusion d'images et d'informations, on les trouvera donc majoritairement sur la voie descendante (satellite - abonné ou base - abonné) : FDM par bouquets de 34 Mbit/s en TV, TDM de 8 Mbit/s en données, dans ce dernier cas la base « empile en série » au fur et à mesure les données à transmettre dans des intervalles de temps, chaque abonné récupère son information ; ceci fonctionne simplement pour les données mais si la voix ou l'image pour lesquelles le délai de transmission est important, doivent être transmises il faut réservé des cellules de façon continue et procurer ainsi des « canaux temporels » à débit garanti. On notera aussi le couplage à la couche transport puisque l'ATM par exemple offre cette possibilité multi-service.

- Pour la voie montante le problème est différent, il faut donner accès à de multiples demandeurs. Soit par des canaux fréquentiels ou des lois de saut de fréquences (*frequency hopping*) c'est le FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), soit par des intervalles de temps attribuées à la demande : TDMA (*Time Division Multiple Access*), soit encore par de l'étalement de spectre avec des lois orthogonales [par séquences de chips pseudo-aléatoires ou codes PN (*pseudo-noise*)] c'est le CDMA (*Code Division Multiple Access*). L'accès peut-être aussi spatial et tout système multi-point utilise des antennes directives pour du multiplexage spatial. Actuellement (pour les militaires) l'élaboration du traitement d'antenne permet de faire des accès angulaires : le SDMA (*Spatial Division Multiple Access*). Les procédés ou protocoles peuvent de plus se combiner. On constate alors le couplage avec la forme d'onde : par la vitesse de modulation en TDM ou TDMA, par les lois de fréquence dans le FDMA et les codes d'étalement dans le CDMA.

#### ■ En mode décentralisé

La prise de communication peut se faire sur un canal fréquentiel par un message d'appel assez court occupant peu de temps et permettant à plusieurs abonnés d'y accéder en aléatoire ou ALOHA. Pour être plus efficace on utilise des protocoles CSMA (*Collision Sensing Multiple Access*), CA (*Collision Avoidance*) ou CD (*Collision Detection*). Ces protocoles écoutent l'activité des autres abonnés sur le réseau avant de s'introduire dans le réseau. La prise de communications étant opérée, des modulations « temps-fréquence » telles que le CDMA, l'OFDM, le saut de fréquence ou encore la FM/CW permettent l'utilisation simultanée du domaine temps fréquence.

L'intérêt de telles procédures apparaît lorsqu'il y a de la bande ce qui est précisément le cas en millimétrique.

Enfin, comme précédemment, dès que l'on souhaite pouvoir travailler en voies données, image, on a intérêt à intégrer une structure de trame ATM, pour la voie et l'image les cellules ATM permettent de conserver l'isochronisme nécessaire à la restitution de ces médias.

Le tableau 8 donne un résumé correspondant au MAC et modulation associée.

**Nota :** la mise en œuvre des modems haut débit avec leurs codes correcteurs d'erreurs, et des couches de protocoles d'accès (MAC) requièrent des ASICs (Circuits intégrés pour applications spécifiques) et des machines à base de DSP permettant de réaliser de l'ordre de 500 Mops (millions d'opérations par seconde).

**Tableau 8 – Résumé correspondant aux protocoles MAC et modulations associées**

Application	Voie montante	Voie descendante	Modulation
Satellites .....	FDMA TDMA	SDM TDM	FSK QPSK
Ballons.....	FDMA TDMA	SDM TDM	QPSK
Ponts.....	TDM ou F1	TDM ou F2	QPSK OQPSK
LMDS .....	FDM SDM TDMA	SDM TDM	QPSK
HIPERLAN .....	CDMA TDMA FDM + CSMA/CA	CDMA TDMA FDM	QPSK/FM OFDM

## 4. Modules millimétriques

La particularité des équipements millimétriques provient des émetteurs, des récepteurs et des sources. À ces fréquences il est nécessaire de pousser l'intégration des composants et de la microélectronique, de choisir des architectures simples permettant la répartition judicieuse du filtrage, les lignes minimales, les meilleurs découplages. En effet, sans technologie et sans les plus grands soins, les pertes, les TOS (taux d'ondes stationnaires), les couplages dégradent très rapidement les performances.

### 4.1 Émetteurs

#### ■ Paramètres, tubes ou état solide ?

La classe de puissance est déterminante pour le choix des solutions parmi deux grandes classes : de 50 mW à 2 W de l'état solide, de 10 à 300 W des TOP (tubes à ondes progressives).

Les paramètres-clés sont les suivants :

- la puissance efficace, en tenant compte du *back-off* nécessaire à la linéarité requise par la démodulation ;
- le rendement de l'émetteur ;
- les dimensions (chez l'abonné) ;
- le coût.

Le tableau 9 fournit quelques exemples type.

**Tableau 9 – Caractéristiques des émetteurs**

Gamme de fréquence (GHz)	Tube ou état solide	Puissance saturée (W)	Back-off pour QPSK (dB)	Puissance utile (W)	Rendement (%)
30	état solide	0,5	3	0,25	20
30	TOP	120	6	30	25
38	état solide	0,2	3	0,1	16
41	état solide	1	3	0,5	15
41	TOP	80	8	12	25
45	TOP	200	8	32	22
48	état solide	0,5	4	0,25	12
48	TOP	35	9	4	20
60	état solide	0,02	3	0,01	10
60	TOP	25	10	2,5	19

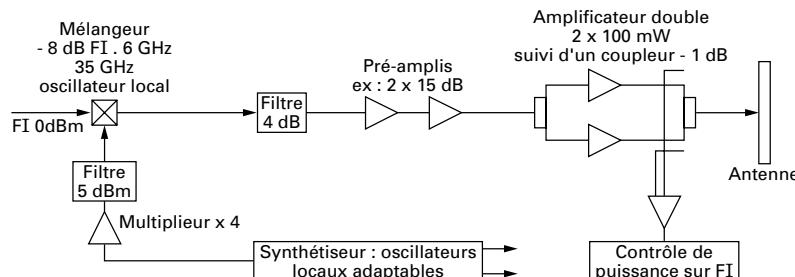


Figure 5 – Architecture d'émetteur à état solide

#### ■ Description (figure 5)

Le signal modulé en large bande sur une fréquence intermédiaire (FI) vers 5 à 6 GHz, attaque un mélangeur (*up-converter*) dont l'oscillateur local provient de la multiplication par 4 (par exemple) du synthétiseur, ce dernier est adaptable et délivre des fréquences de 7 à 9 GHz. Le filtre à la sortie du mélangeur permet de sélectionner la gamme intéressante. Selon la sélection du battement supérieur ou inférieur et les valeurs du synthétiseur on voit que l'on pourra couvrir les bandes de 27 à 31 et 37 à 42 GHz.

Le filtre est suivi d'une chaîne de préamplificateurs de puissance fournissant quelques dizaines de milliwatts. L'amplificateur de puissance proprement dit est constitué du couplage de deux puces de puissance de 100 à 500 mW. Un coupleur de sortie adapté à l'antenne fournira une puissance finale allant de 200 mW à 1 W.

Les différents paramètres à optimiser sont les suivants :

- la qualité du mélangeur et du multiplicateur de l'oscillateur local ;
- la conception des filtres : circuits imprimés, finesse de la gravure ;
- la linéarité de la chaîne d'amplification ;
- le couplage des transistors de puissance ;
- le couplage à l'antenne : pertes et TOS ;
- l'adaptation entre chaque élément.

Les difficultés se rencontrent essentiellement : dans la conception des MMIC (puissance notamment) réalisant les éléments actifs et sur la micro-électronique réalisant les circuits et leurs connections. On notera que sur l'exemple donné on a couplé deux transistors de puissance et gagné 2 dB seulement. Il ne semble pas très rentable d'aller au-delà, le rendement global de l'amplificateur n'étant déjà que de 12 % environ.

#### ■ Architecture d'émetteur à tube

L'architecture à tube à ondes progressives est presque identique. On remplace la chaîne d'amplification précédente qui comprenait 4 MMIC et deux coupleurs par un TOP dont le gain est d'environ 50 dB soit à 3 dB près ce que donne la chaîne précédente, pour atteindre la puissance on aura, après le filtre placé après le mélangeur ou *up-converter*, un seul MMIC de pré-amplification ou *driver* nécessaire pour attaquer le tube au bon niveau.

En revanche, on trouvera en parallèle une alimentation spécifique haute tension pour alimenter le tube.

## 4.2 Récepteurs

La difficulté principale est d'obtenir un facteur de bruit acceptable : de l'ordre de 5 dB global vers 40 GHz. La seconde difficulté est d'obtenir un filtrage efficace de la bande reçue avec des éléments passifs gravés sur les circuits. Les architectures performantes sont données sur la figure 6.

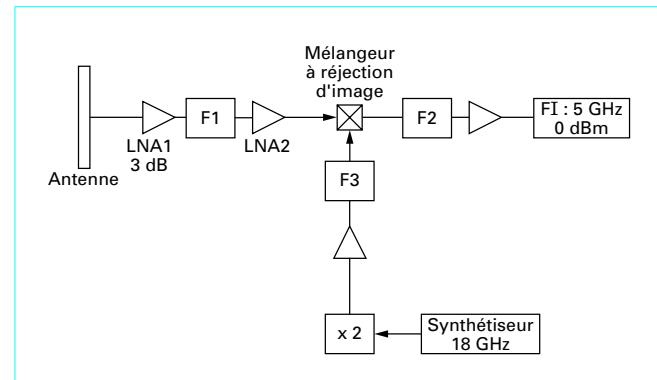


Figure 6 – Architecture d'un récepteur

La sortie de l'antenne est adaptée à un premier LNA (*Low Noise Amplifier*) de 3 dB de facteur de bruit pour 38 GHz par exemple ; si le découplage des antennes émission-réception est suffisant (typiquement 50-60 dB) et si l'antenne est sélective on évitera un premier filtre d'entrée toujours générateur de pertes. Après un premier filtrage de bande, un deuxième LNA permet d'atteindre un facteur de bruit total de 5 dB environ. La sortie est mélangée à l'oscillateur local issu de la multiplication et du filtrage d'une des sorties du synthétiseur, par un mélangeur à réjection d'image dans le but d'une meilleure sélectivité et d'une simplification du premier filtre de sortie sur la fréquence intermédiaire haute.

Les différents paramètres à optimiser sont les suivants :

- la qualité du mélangeur à réjection d'image (nécessaire pour un filtrage simple et efficace en fréquence intermédiaire haute) ;
- la conception des filtres : circuits imprimés ;
- la conception des préamplificateurs faible bruit (MMIC circuit intégré monolithique micro-ondes) ;
- le couplage à l'antenne TOS ;
- l'adaptation entre chaque élément.

Les difficultés se localisent sur la conception des MMIC réalisant les éléments actifs et sur la micro-électronique réalisant les circuits et leurs liaisons.

## 4.3 Sources ou oscillateur local

Le point essentiel est le bruit de phase autour de la porteuse et le bruit plancher afin d'obtenir une bonne séparation des canaux. Le tableau 10 donne les points-clé typiques obtenus et suffisants.

**Tableau 10 – Bruit de phase autour de la porteuse**

Écart de la porteuse ..... (kHz)	1	10	100	1 000
Bruit de phase ..... (dBc/Hz)	- 65	- 80	- 90	- 100

On trouvera trois architectures :

- **source à DRO** : le plus simple, pour l'équipement d'abonné en réception, consiste à utiliser un DRO : oscillateur résonnant directement sur la fréquence d'attaque du mélangeur. Les progrès faits dans ce domaine conduisent à des solutions bas coût, il faut faire cependant attention à leur stabilité en température ;
- **source contrôlée** : avec, par exemple, des émissions en semi-duplex, une plus grande stabilité est nécessaire, celle-ci peut être obtenue en contrôlant le DRO selon le schéma de la figure 7 ;
- **source synthétisée** : lorsqu'il est nécessaire de disposer de plusieurs fréquences d'oscillateur local on joue alors sur les multiplieurs et les diviseurs programmables par exemple avec le schéma de la figure 8.

#### 4.4 Exemple de réalisation d'émetteur-récepteur semi-duplex en bande Ka

La figure 9 donne un schéma d'émetteur-récepteur semi-duplex en bande Ka.

#### 4.5 Antennes

Le domaine des antennes est très large, et donne lieu à de nombreuses innovations. En particulier le millimétrique permet de mettre en œuvre autre chose que les réflecteurs classiques. La faible longueur d'onde autorise des structures 3D de dimensions acceptables et l'emploi des diélectriques permet de faire des lentilles comme en optique.

##### 4.5.1 Antennes « classiques »

En tout premier lieu le bon cornet circulaire permet d'obtenir, avec un diamètre de 20 cm, 35 dB à 40 GHz.

Le réflecteur parabolique a toujours cours soit avec la source en off-set (par exemple sur les satellites) soit en Cassegrain pour des stations sol des systèmes satellitaires. Ces antennes à réflecteur seront largement utilisées dès qu'un besoin de gain important est nécessaire, typiquement au-delà de 35 dB de gain : exemple à une fréquence de 30 GHz, une antenne de 50 cm de diamètre à un gain de 41dB. Pour les artères vers les satellites GEO il faut des gains de 50 dB ils sont, par exemple, obtenus avec des réflecteurs de 1,5 m. La disponibilité de large bande est un autre avantage des réflecteurs.

Les antennes à fentes fonctionnent aussi très bien, elles ont deux inconvénients : elles sont en bande étroite et la précision mécanique de distribution est onéreuse.

Dans le millimétrique on s'intéressera donc plus volontiers aux antennes bas coût et compactes.

##### 4.5.2 Antennes patch

Il s'agit de réseaux d'éléments imprimés sur un diélectrique. L'élément rayonnant est le premier dispositif à étudier, le réseau de distribution est le second point clé. La figure 10 montre, à titre d'exemple, un réseau  $4 \times 4$ .

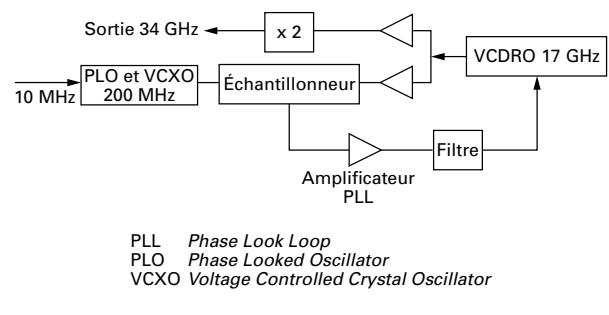


Figure 7 – Source contrôlée

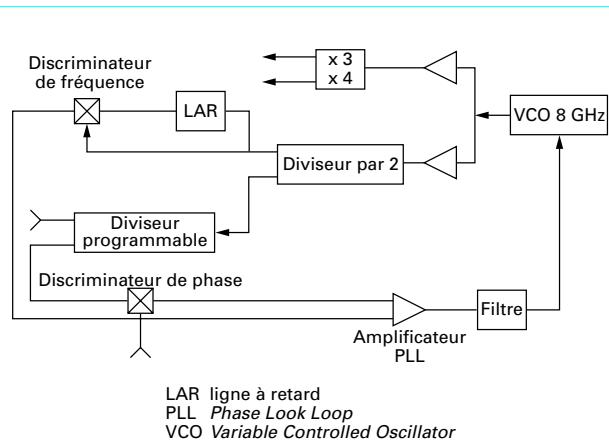


Figure 8 – Source synthétisée

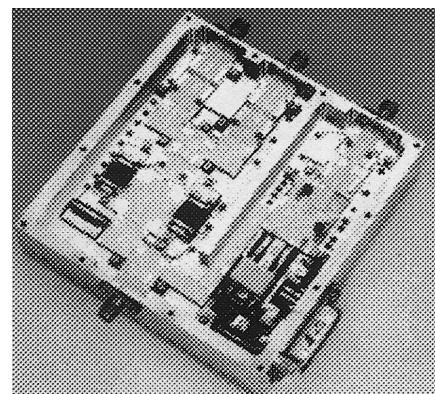
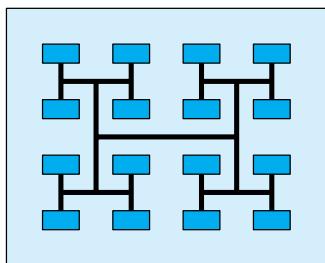


Figure 9 – Émetteur-récepteur semi-duplex BPSK 38 GHz

Le tableau 11 donne les paramètres de calcul des caractéristiques une fois l'optimisation des éléments rayonnants et de leur alimentation calculés et vérifiés sur le substrat.

Comme les antennes à fente les patchs sont à bande étroite, une façon d'élargir la bande dans un réseau est de mélanger des patchs



Circuit imprimé  
Cu sur verre *Teflon*  
Distribution face avant  
Alimentation arrière  
Ouverture : 30 x 30 °  
Gain : 17 dB

Figure 10 – Exemple de réseau 4 × 4

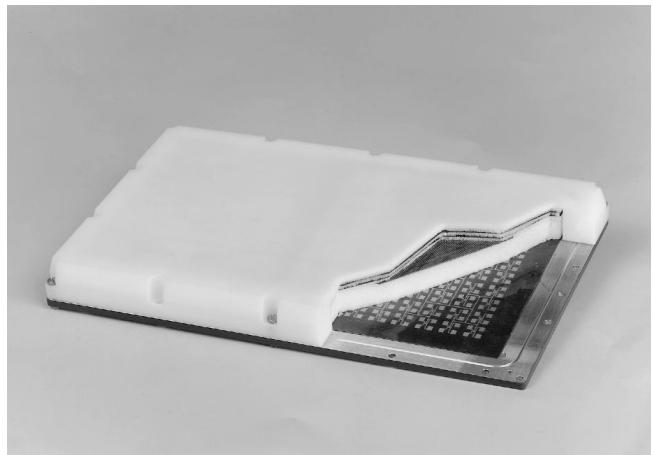


Figure 11 – Antenne patch 16 × 32 avec polariseur

Tableau 11 – Paramètres de calcul des caractéristiques des antennes *patch*

Caractéristiques	Formule	Remarque
Éléments .....	$d = \lambda/2$ espacement = 0,55 $\lambda$	
Ouverture ..... (°)	$\theta = 120/n$	$n$ = nombre de patch en ligne
Gain (1)..... (dB)	$G = 6 + 10 \log N$	$N$ nombre total de patch
Dimensions .....	$L = 0,55(n + 4)\lambda$	

(1) Le gain dépend de la conception de l'antenne.

Au-delà de 8 éléments en ligne les pertes du réseau de distribution sont à prendre en compte. En pratique on recommande de se limiter à 16 × 16 patchs soit un gain de 28 dB compte-tenu des pertes.

adaptés à des fréquences proches, mais alors dans ce cas il y a réduction du gain associé et de la directivité.

Un découplage élevé entre antennes patch peut être conçu, ce qui permet de travailler en émission-réception proche, ou de faire du multiplex de fréquence en faisant simplement travailler Maxwell.

La figure 11 représente une antenne patch avec polariseur.

#### 4.5.3 Antennes à réseau réflecteur

Ce type d'antenne (figure 12) s'inspire de l'antenne Cassegrain.

La source polarisée linéairement se réfléchit sur un diélectrique incluant un réseau de filaments parallèles, l'onde en retour se réfléchit de nouveau sur un réseau plan dépolarisant, cette onde traverse alors le plan, réfléchissant pour l'onde émise de la source, transparent pour l'onde dépolarisée.

#### 4.5.4 Antennes lentilles

Dans les ondes millimétriques, l'usage des lentilles en plastique est tout à fait pertinent (par exemple les polyuréthannes) notamment parce qu'à ces dimensions les conditions mécaniques et surtout le poids deviennent tolérables, de plus les caractéristiques

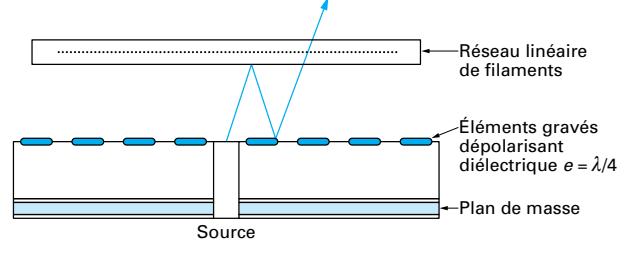


Figure 12 – Principe de l'antenne à réseau réflecteur

électriques conviennent bien. On peut donc concevoir des dispositifs comme en optique.

Le gain et l'ouverture dérivent directement de la taille de la lentille :

$$G = 4\pi S/\lambda^2$$

et

$$\theta = 60 \lambda/d$$

avec  $S$  surface de la lentille,

$d$  diamètre de la lentille.

On notera que ces antennes sont, comme les réflecteurs, à plus large bande que les *patchs* ou les antennes à fentes.

La source est placée dans le plan focal de la lentille (figure 13), la loi d'éclairage (se travaille sur la source) est, par exemple, en cosinus surélevé afin d'apodiser les lobes secondaires (on perd alors 1 dB sur le gain et on élargit légèrement le lobe à 3 dB). La lentille doit être usinée avec une précision meilleure que le dixième de millimètre (% de  $\lambda$ ).

Les caractéristiques obtenues sont, par exemple, les suivantes :

$F$ (GHz)	$d$ (cm)	$G$ (dB)	$\theta$ (°)
42	10	30	5

La figure 14 montre une antenne lentille multilobes.

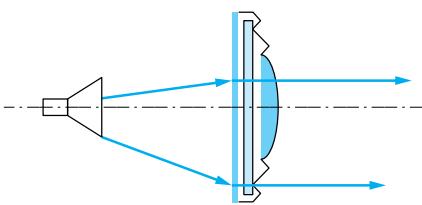


Figure 13 – Principe de l'antenne lentille

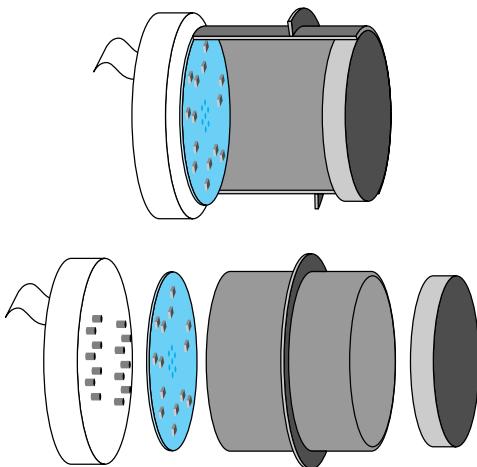


Figure 14 – Antenne lentille multilobes

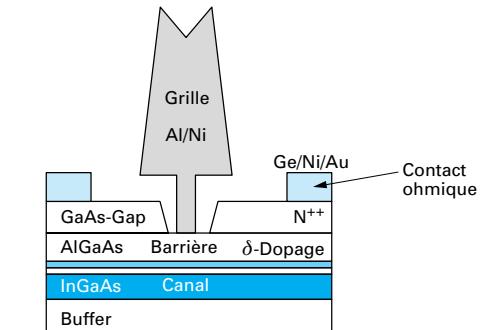


Figure 15 – Structure PHEMT PH 25 d'UMS

filière PH 25 est aussi acceptable pour la petite puissance nécessaire au marché (évoluant vers 1 W à 40 GHz) (figure 15).

■ La conception et la modélisation des éléments de base : transistor, diode, inductance, résistance et capacité, permettent au concepteur de réaliser son circuit en CAO avec une très bonne chance de succès (après une bonne formation).

Les puces constitutives typiques sont les suivantes :

- amplificateurs de puissance ;
- amplificateurs « drivers » pour attaquer l'amplificateur de puissance au bon niveau ;
- amplificateur faible bruit de réception ou LNA ;
- mélangeur d'émission (*up-converter*) ;
- mélangeur de réception (souvent à réjection d'image) (*down-converter*) ;
- multiplicateurs par 2 ou 4 ;
- commutateur d'émission/réception ;
- circuits de contrôle de la puissance d'émission.

L'intégration comprend, pour les mélangeurs et multiplicateurs, les amplificateurs de sortie.

Pour les grandes séries on a intérêt à intégrer davantage en groupant plusieurs fonctions, une fois les fonctions de base bien maîtrisées. L'intérêt est cependant parfois limité si on doit ressortir de la puce, pour aller sur un filtre par exemple. De plus, il vaut mieux limiter la surface d'AsGa pour des raisons de rendement et donc du nombre de puces bonnes par wafer ; notamment réaliser un bon ampli de puissance est déjà un objectif en soi. Ce sont donc les fonctions bas niveau que l'on peut regrouper par deux (exemple : multiplicateur - mélangeur ou mélangeur - driver).

C'est en fait un compromis qu'il faut faire entre le coût de l'AsGa, les risques et le coût de la filière industrielle de report (cf. § 5.2).

## 5. Technologie

### 5.1 MMIC

L'extension du millimétrique ne pouvait se faire sans les progrès faits dans l'AsGa. D'une part les sous-ensembles doivent être intégrés pour obtenir des conditions de production économiques, d'autre part les performances doivent être optimisées pour chaque fonction. Le minimum requis pour l'intégration est le niveau des fonctions présentées sur les schémas précédents, même dans ce cas les coûts recherchés ne sont pas toujours atteints.

■ Les performances des filières AsGa se sont grandement améliorées. Grâce :

- aux longueurs de grille des transistors dans l'AsGa : pas de 0,25 µm pour les fréquences inférieures à 60 GHz, pas de 0,15 µm pour les fréquences de 60 à 100 GHz ;
- aux structures et architectures fines et au procédé les réalisant : HEMT (*High Electron-Mobility Transistor*) ;
- à la « métallurgie » des différentes couches de la filière : pseudo-morphique.

On dispose ainsi de filières dites PHEMT. Notamment les filières PH 25 et PH 15 d'UMS figurent parmi les plus performantes. La

### 5.2 Technologies de report

Le prix et la reproductibilité, donc la possibilité de grande série, dépendent essentiellement des filières de report des puces et des éléments passifs sur les substrats adaptés et du packaging de l'ensemble. Notons que pour le packaging on est enfin sorti (sauf cas très particulier) du syndrome du boîtier hermétique.

■ **Substrat** : le premier point est le choix du substrat en fonction des caractéristiques :

- propriétés électriques pour notamment réaliser des filtres gravés de faible dimension ;

— propriétés mécaniques (notamment pour la taille acceptable des circuits ou la découpe), thermiques et enfin métallurgiques soudabilité et collage ;

— enfin le coût.

Si les céramiques ont au départ été utilisées (elles le sont encore soit pour les prototypes soit pour les applications spatiales et militaires, pour l'espace) on dispose maintenant de substrats moins onéreux, plus légers plus maniables comme les verres-Téflon, duroïds 5580, ou les thermodurcissables (RO 4003) certes d'ε inférieurs à la céramique mais ils permettent d'imprimer des éléments passifs tels les filtres et la soudabilité est bonne.

**Boîtier** : les fondeurs ne fournissent pas les puces AsGa millimétriques spécifiques « custom » en boîtier. Pour des séries inférieures à quelques milliers on peut travailler sans boîtier, les puces AsGa sont correctement passivées ; on câble donc les *puces nues* sur les circuits par *bonding*. Les technologies « puce nue » nécessitent des machines particulières de pose et de câblage, en revanche les boîtiers peuvent se reporter avec les machines modernes de pose CMS (composants montés en surface) (pose à mieux de 50 µm).

Pour les grandes séries on a économiquement intérêt à étudier un ou plusieurs boîtiers, préférentiellement en plastique, dans lequel seront insérés la puce et quelques éléments passifs tels que les capacités de découplage et les résistances de polarisation.

**Microconnectique** : c'est le point clé, il s'agit de relier le plot de sortie de la puce à la ligne imprimée ou gravée du circuit et là Maxwell intervient : les modes changent entre plots fils et pistes d'où des pertes. Le bonding est la technique courante, il existe aussi le flip-tab avec des microrubans ou le *flip-chip* qui sont des *billes de soudure* reliant les plots de sortie de la puce aux pistes du substrat ; dans ces deux derniers cas la puce est retournée (d'où le nom de *flip*) au-dessus du substrat d'assemblage. Tout ce qui est *flip* peut poser des problèmes si l'on doit évacuer des calories ainsi pour la puissance la puce doit être en contact thermique avec le fond de boîtier du module.

Le tableau 12 indique une comparaison des technologies employées ou testées.

## 6. Conclusion

Les ondes millimétriques par leur discréetion due à leur propagation et leur confinement spatial aisément, par leur bande passante et leurs antennes et les circuits compacts ont très tôt intéressé les militaires qui en ont tiré parti pour leurs liaisons satellite, leurs réseaux d'information « de proximité », leur nouveau système d'identification et de tenue de situation.

Le développement des technologies qui ont été présentées a fait que, dans le civil, les ondes millimétriques se déploient rapidement car elles présentent l'avantage énorme d'offrir des bandes passantes à la mesure des besoins actuels.

La première application intéressante concerne les satellites où l'on peut réaliser de nombreux liens à haut débit (pour l'hertzien), la courte longueur d'onde procure du matériel compact à bord et des antennes de taille réduite en comparaison de celles des bandes centimétriques. De plus les satellites peuvent transférer entre eux de grandes capacités de données vers les 60 GHz (l'absorption dans l'espace étant nulle) avec un matériel encore plus réduit, établissant ainsi autour de la terre un réseau d'artères original.

Au sol les opérateurs peuvent disposer localement chacun de quelques centaines de mégahertz permettant d'établir un « chevelu » de liaisons courtes portées (à quelques km) et touchant environ 2 000 abonnés par cellule. La capacité offerte va de 64 kbit/s à 8 Mbit/s. Les équipements de petites dimensions permettent de s'installer avec économie et discréetion (sur les bases de radio mobile par exemple pour la station de base et sur l'antenne de télévision pour l'équipement d'abonné). Les partisans de l'esthétique seront donc satisfaits. L'avantage considérable de ce type de système est la facilité du déploiement progressif : on peut considérer le LMDS comme le « capillaire » du câble, là où les travaux d'infrastructure sont trop importants : sur un habitat ou une zone d'activité un peu plus dispersés que le « centre-ville ». En complément de l'ADSL (haut débit pour le câble local), le LMDS répond au besoin d'accès à haut débit que demande le développement d'Internet et des Intranets.

Ainsi, en marge de la révolution de société que le WEB et les capacités de communication entraînent, on aura au-dessus des agglomérations et de la planète un treillis ou WEB hyper de liaisons d'ondes millimétriques transportant des milliards d'informations entre les hommes.

En ce début 98, date de l'article, beaucoup de systèmes et de technologies décrites sont encore en développement dans les grandes entreprises de plus haute technicité. Nul doute que la recherche importante dans le domaine modifiera certains paramètres au début du prochain millénaire.

Tableau 12 – Comparaison des technologies employées ou testées

Composant	Substrat	Câblage	Liaison	Performances	Coût
Puce nue	Céramique	Bonding	Fil classique	Très bon	Élevé
Puce nue	Duroïd	Bonding	Fil « tendu »	Bon	Moyen
Puce nue	Duroïd	Flip-tab	Ruban	Moyen	Moyen
Puce nue	Duroïd	Flip-chip	Bille	Bon	Élevé
Boîtier	Duroïd	CMS	Pattes	Moyen/bon	Faible (1)
Boîtier	Duroïd	CMS BGA	Bille	Moyen/bon	Moyen (1)

(1) + coût de développement du boîtier.