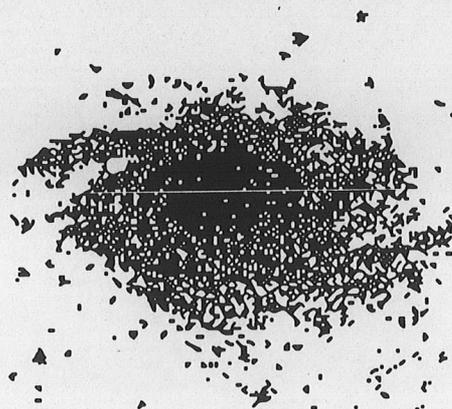


Détection hétérodyne

G. Beaudin



Détection hétérodyne dans le domaine millimétrique et submillimétrique

par G. Beaudin, P. Encrenaz et M. Gheudin

*Observatoire de Paris-Meudon (DEMIRM)
Ecole Normale Supérieure de Paris*

I - Introduction

II - Généralités

III - Domaine d'utilisation de la détection hétérodyne

**IV - Application de la détection hétérodyne à la Radioastronomie
millimétrique et submillimétrique**

V - Principe de la détection hétérodyne

VI - Principe de la mesure

VII - Dispositifs de réception hétérodyne

- Amplificateurs à faible bruit HEMT
- Mélangeurs à diode Schottky AsGa
- Mélangeurs à jonction supraconductrice SIS
- Dispositifs cryogéniques
- Oscillateurs locaux

VIII - Analyse spectrale des signaux radioélectriques

**IX - Exemples d'instruments hétérodynes en ondes submillimétriques :
PRONAOS - FIRST - EXPLORER**

X - Conclusion - Références

Détection hétérodyne dans le domaine millimétrique et submillimétrique

par G. Beaudin, P. Encrenaz et M. Gheudin

Observatoire de Paris-Meudon (DEMIRM)
Ecole Normale Supérieure de Paris

I - Introduction

Les ondes millimétriques couvrent la bande de 30 à 300 GHz, ce qui correspond à des longueurs d'ondes de 10 à 1 mm. Au sens large, on y ajoute la bande de 300 GHz à 3 THz (1 mm à 100 μm) : ce sont les ondes submillimétriques. Cette partie du spectre électromagnétique, surtout pour les ondes submillimétriques, reste relativement méconnue en raison d'une technologie très délicate et pas toujours maîtrisée : le problème majeur de ces faibles longueurs d'ondes est dû à la miniaturisation des composants.

Au cours des dix dernières années, des progrès considérables ont été réalisés dans la physique des récepteurs, en particulier pour la radioastronomie en ondes millimétriques : des gains en sensibilité d'un ordre de grandeur ont été obtenus et des observations de molécules interstellaires, dont on imaginait même pas la possibilité il y a dix ans, sont réalisées. De fait, les observations sont maintenant limitées par la qualité des sites (bruit et absorption atmosphérique). Les progrès réalisés justifient le choix de sites de haute montagne et l'emploi de ballons stratosphériques ou de satellites pour les instruments de la fin du siècle. Des plateformes spatiales en seront équipées au début du siècle prochain.

Les applications de ces radiomètres utilisant le principe de la détection hétérodyne dépassent largement le cadre de la radioastronomie : elles concernent également la prévision météorologique par satellite (sondage vertical de l'atmosphère en présence de couverture nuageuse), l'étude des composants mineurs de l'atmosphère (ozone, ClO), la télédétection et l'imagerie par satellite (végétation, nature du sol, humidité, salinité et hydrocarbures sur la mer, présence et déplacements d'icebergs), la physique atomique (sondage de plasma dans les accélérateurs)... Ils équipent également des radars et des systèmes de télécommunication.

Les retombées industrielles et militaires des développements purement orientés à l'origine vers la recherche fondamentale peuvent être considérables dans un avenir proche.

II - Généralités

1 - L'atmosphère et le spectre radioélectrique :

Dans le domaine des micro-ondes (figure 1), l'atmosphère est bien transparente pour les fréquences inférieures à 20 GHz ; vers 22 GHz il y a une raie d'absorption peu intense de la vapeur d'eau, puis autour de 60 GHz un complexe de raies de l'oxygène, une raie isolée de l'oxygène encore vers 118 GHz, et une forte raie d'absorption de la vapeur d'eau à 183 GHz. Les régions spectrales entre ces raies constituent des fenêtres qui sont de moins en moins transparentes à mesure que la fréquence augmente. Au-delà de 300 GHz il existe beaucoup de raies d'absorption, surtout dues à la vapeur d'eau (particulièrement à 380 GHz et 557 GHz).

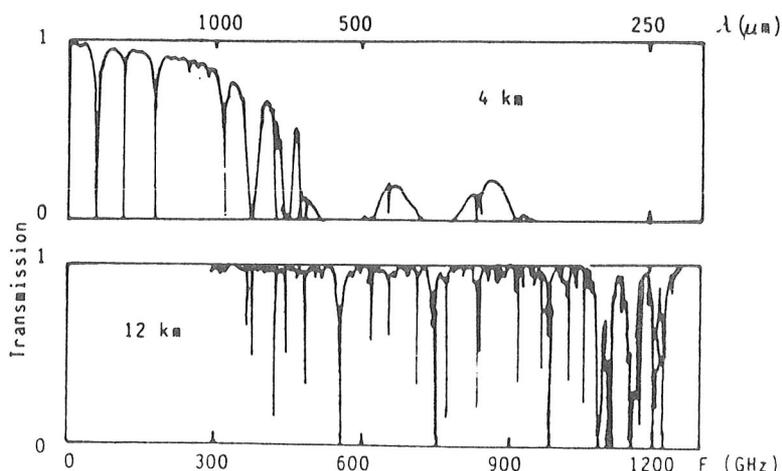


Figure 1 :
Facteur de transmission
de l'atmosphère pour les
hyperfréquences

nb : la détection de ces raies d'absorption telluriques (O_2 , H_2O) ainsi que celle des composants mineurs (O_3 , ClO) permettent l'étude de l'atmosphère pour des applications à la Météorologie et à l'environnement.

2 - Influence des nuages et de la pluie

Les radiations lumineuses et infrarouges sont arrêtées par une couverture nuageuse, même légère. En revanche, la propagation des micro-ondes, au moins jusque vers 10 GHz, n'est quasiment pas affectée par les nuages ou même la pluie. Au-dessus de 20 GHz la situation est plus complexe; on peut dire par avance que cet effet augmente rapidement avec la fréquence, la teneur en eau des nuages ou le taux de précipitation ; qu'il est plus sensible (relativement) pour les fréquences fenêtres ; et qu'enfin et surtout il n'est pas rédhibitoire dans le cas où la couverture nuageuse n'est pas trop lourde (nuages non précipitants). En revanche on ne peut pas en dire autant en ce qui concerne le domaine infrarouge, et c'est ce point qui fait l'avantage principal des hyperfréquences sur les infrarouges pour le sondage atmosphérique et la télédétection.

III - Domaine d'utilisation de la détection hétérodyne

Un système régulier et embrassant un vaste domaine de fréquences divise le spectre entre 3 kHz et 300 GHz en bandes contiguës, couvrant chacune un intervalle dont la fréquence haute est décuple de la fréquence basse. La bande 30-300 GHz est plus communément nommée "domaine millimétrique (une longueur d'onde de ce domaine s'exprimant facilement en millimètres).

Au-delà de 300 GHz on entre dans le domaine "submillimétrique". La frontière que l'on peut instaurer entre cette région et la région infrarouge est bien évidemment arbitraire et variable. Ce sont souvent les techniques de réception employées (détection superhétérodyne, bolomètres, etc...) qui distinguent le submillimétrique de "l'infrarouge lointain".

Dans le sens qui lui est donné le plus souvent, la radiométrie est la mesure de l'intensité d'un rayonnement magnétique incohérent. Un radiomètre mesure l'émission thermique de milieux naturels ; associé à un spectromètre à haute résolution, il permet grâce à une sélectivité élevée l'analyse des raies d'émission ou d'absorption moléculaires. Le choix de la technique de réception dans le domaine de longueurs d'ondes millimétriques et submillimétriques est lié aux grandeurs mesurées en terme de sensibilité et de résolution spectrale comme l'indique la figure 2 ci-dessous.

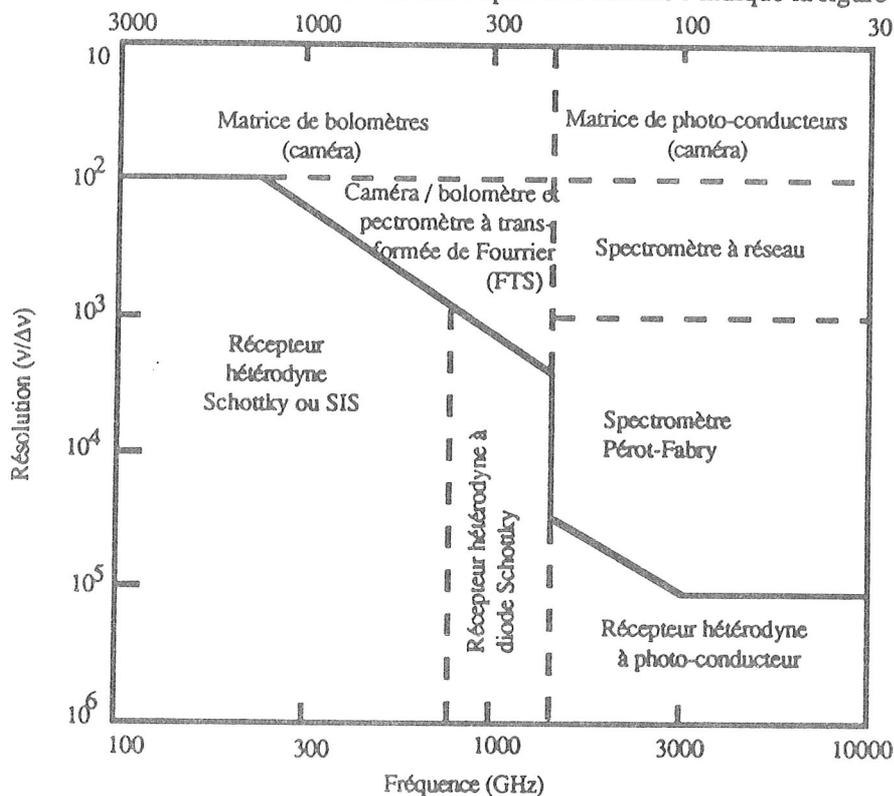


Figure 2

IV - Application de la détection hétérodyne à la Radioastronomie

L'observation dans le domaine millimétrique et submillimétrique permet d'atteindre des pouvoirs de résolution élevés à partir d'antennes uniques ou par interférométrie. Ses applications en radioastronomie utilisent principalement les techniques de détection hétérodyne fonctionnant à température cryogénique :

La radioastronomie en ondes métriques et centimétriques s'est développée de façon décisive après la fin de la deuxième guerre mondiale avec l'avènement des antennes radars équipées de récepteurs de plus en plus sophistiqués. Elle a contribué à d'importantes découvertes telles la détection des pulsars et la mise en évidence de la structure spirale de notre galaxie grâce à la raie 21cm de l'hydrogène atomique. La présence des molécules dans l'espace interstellaire longtemps soupçonnée a d'abord été mise en évidence dans le domaine visible avant que la raie du radical OH ne soit détectée vers 18cm de longueur d'onde (1963).

La radioastronomie millimétrique ne débutera que dans les années 70 après la découverte de la transition vers 2,6mm de la raie de la molécule CO. Jusqu'à présent, une centaine de molécules, sans compter leurs espèces isotopiques ont été détectées dans notre galaxie. La majorité d'entre elles émettent dans le domaine millimétrique et submillimétrique et leur découverte constitue une étape fondamentale dans l'étude de la composante froide et dense de la matière interstellaire. (Fig 3).

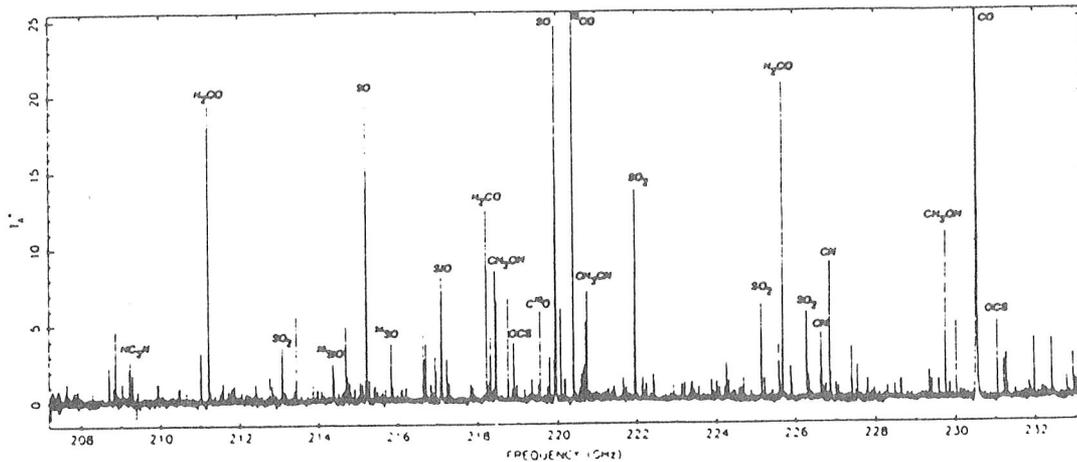


Fig.3 : Exemple de spectre de raies moléculaires dans la bande 208-235 GHz

L'observation de ces molécules est actuellement très importante pour l'astrophysique car elle permet principalement de déterminer la répartition et les mouvements de la matière au sein des nuages interstellaires. Dans ces nuages, les nouvelles étoiles naissent par concentration de matière suivant des processus encore mal connus. L'hydrogène moléculaire, qui est le composant principal de la matière interstellaire est difficilement observable. Seule l'observation de composants moins abondants permet une étude de l'intérieur de ces nuages. A partir du sol, les fenêtres de transparence de l'atmosphère limitent les bandes d'observations à :

30-45 GHz au niveau de la mer

75-115 GHz ; 140-160 GHz ; 210-270 GHz , pour des sites de montagne.

La radioastronomie en ondes submillimétriques est bien adaptée pour étudier le rayonnement fossile du corps noir cosmologique, l'émission des atmosphères des planètes géantes, les nuages denses du milieu interstellaire siège de la formation des étoiles.

Des instruments qui seront basés sur des sites de haute montagne (Chili, Hawaï à 4000m) sont en cours de développement dans des laboratoires universitaires (RFA, UK, USA) mais ceux-ci ne pourront être employés que dans des fenêtres atmosphériques très étroites 330-345 GHz ; 490 ; 620 GHz présentant toutefois une atténuation assez élevée.

L'alternative, pour s'affranchir de l'écran opaque que constitue l'atmosphère pour l'essentiel du spectre électromagnétique, consiste à embarquer les instruments à bord d'avion : KAO (JPL-USA) volant à 12km d'altitude ; de ballons stratosphériques PRONAOS (CNES) ou de plateformes spatiales : FIRST (ASE) ; Explorer (NASA).

Le KAO (Kuiper Airborne Observatory) a permis des observations de raies moléculaires interstellaires jusqu'à plusieurs THz. Toutefois, l'atmosphère atténue encore considérablement certaines parties du spectre qui présentent un grand intérêt astrophysique (voir fig.1).

Les instruments spatiaux, en cours d'étude où de développement sont présentés au chapitre IX.

V - Principe de la détection hétérodyne

Afin d'analyser les faibles rayonnements aux fréquences élevées, on dispose d'une antenne associée à des récepteurs à changement de fréquence, dits aussi "superhétérodynes". Au delà de 100 GHz par exemple, on ne peut pas amplifier directement (homodyne) sans introduire de bruit supplémentaire, le signal radio (RF) et alors "mêlé", par un composant à réponse non linéaire, à un signal de référence (l'Oscillateur Local) et c'est cette Fréquence Intermédiaire obtenue par battement "hétérodyne" que l'on analyse après amplification.

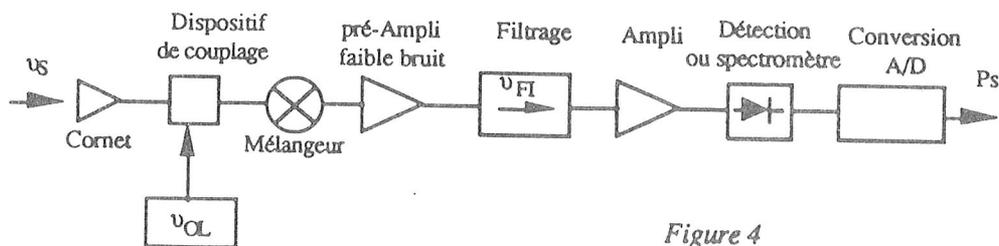


Figure 4

Dans le schéma simplifié (fig. 4), nous avons représenté ce type de récepteur avec ses différents circuits. En partant de l'antenne, on trouve :

- le cornet qui collecte le signal à détecter (et à analyser) de fréquence (ν_s).
- un générateur d'oscillateur local qui produit un signal de référence (ν_{OL}).
- un mélangeur vers lequel sont dirigés les deux signaux. Ce dispositif qui contient l'élément non linéaire doit être couplé à l'oscillateur local, au signal à analyser et au circuit de sortie à la fréquence intermédiaire : $\nu_{FI} = \nu_s - \nu_{OL}$ ou $\nu_{OL} - \nu_s$.

Ces trois éléments constituent le circuit (RF) alors que le circuit (FI) est composé essentiellement de plusieurs étages comprenant un préamplificateur à transistors à effet de champ. Il est souvent indispensable de refroidir le mélangeur ainsi que le préamplificateur caractérisé par son gain élevé et son faible bruit.

Les bandes de fréquence reçues sont :

$$\left. \begin{aligned} \nu_s &= \nu_{OL} + \nu_{FI} && \text{(signal)} \\ \nu_s' &= \nu_{OL} - \nu_{FI} && \text{(image)} \end{aligned} \right\} \text{(ou l'inverse)}$$

Double bande (DSB) : les 2 bandes sont détectées simultanément

Bande latérale unique (SSB) : une seule bande est détectée par un filtrage de ν_s .

Notons que les niveaux de puissance du signal (S) comme du signal (FI) sont très faibles (de l'ordre du pW et du μ W). En général, le niveau de puissance du signal (OL) est grand devant celui du signal S et la fréquence FI ne peut être générée que s'il y a non linéarité qui doit être très marquée.

Principales caractéristiques d'un récepteur

A la réception, on distingue un certain nombre de caractéristiques essentielles qui définissent la capacité du récepteur non seulement à recevoir convenablement le signal qui lui est destiné, mais aussi à éliminer les signaux indésirables.

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- *la sélectivité* : elle mesure l'aptitude du récepteur à sélectionner et analyser le signal utile en éliminant les autres signaux indésirables.
- *la sensibilité* : elle mesure l'aptitude du récepteur à recevoir des signaux faibles avec une qualité acceptable (température de bruit du récepteur minimale).
- *la stabilité* d'un récepteur est son aptitude à conserver ses caractéristiques avec le temps, et cela malgré les variations de température, de tension d'alimentation etc ..., qui agissent sur le gain et réduisent la sensibilité radiométrique. Différents types de récepteurs permettent de réduire ces effets mais au détriment d'une perte de sensibilité (radiomètres de Dicke...)

VI - Principe de la mesure

1- Le rayonnement radio électrique

En hyperfréquences, beaucoup de termes utilisés reprennent le mot "bruit" employé souvent pour radiation, intensité, ou énergie.

Avec l'approximation de Planck, ces auteurs montrent qu'une antenne sans perte, observant dans tous ses lobes un corps noir à la température T (en K), reçoit dans la bande de fréquence B (en Hz) (petite par rapport à la fréquence moyenne de réception) la puissance de bruit P (en W) :

$$P = kTB$$

k est la constante de Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)

La puissance du signal pour la raie moléculaire ^{13}CO par exemple, est de l'ordre de 10^{-17} watt si l'on considère l'énergie répartie sur une bande de 500 kHz.

Dans le cas où l'antenne n'observe pas un corps noir, ou alors observe plusieurs sources à des températures différentes, on appelle température radiométrique d'antenne la quantité T_A donnée par $T_A = P/kB$, P étant toujours la puissance reçue par l'antenne dans la bande B . La température de brillance d'un corps est la température radiométrique reçue par une antenne sans perte observant le corps en question dans tous ses lobes (on parle aussi de température apparente de la scène observée).

L'énergie disponible à l'entrée du récepteur dans le cas d'une antenne imparfaite peut être exprimée par $T_A = SAR/2k$, où S est la densité de flux de la radiosource, A la surface physique de l'antenne, R est son rendement.

2 - Bruit d'une chaîne de réception

En radiométrie, on exprime le bruit d'un récepteur par une température de bruit T_R (en K) tel que $P = kT_R B$. Nous distinguerons donc cette température et la température physique propre d'un élément de la chaîne de réception.

La température équivalente de bruit T_R d'un récepteur est définie comme la température additionnelle de bruit de toute la chaîne de réception, on parle alors de température de bruit *ramenée* à l'entrée du récepteur ; mais seulement le bruit des premiers éléments (T_1, \dots) est déterminant lorsque leur gain (G) est suffisamment élevé, car :

$$T_R = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 + G_2} + \dots$$

3 - Sensibilité radiométrique

La sensibilité (on dit aussi résolution radiométrique) ΔT est le plus petit changement dans la température d'antenne T_A pouvant être détecté à la sortie du récepteur. En d'autres termes, ΔT est l'écart-type de la fluctuation aléatoire de la température de bruit mesurée à la sortie du système.

$$\Delta T = \frac{\eta T_{sys}}{\sqrt{B\tau}}$$

T_{sys} : température de bruit du système, somme des température d'antenne (T_A) et température de bruit du récepteur (T_R)

B : bande équivalente de pré-détection

τ : temps d'intégration (temps d'observation)

η : facteur - supérieur ou égal à 1 - dépendant du type de radiomètre utilisé.

Donc, le temps d'observation nécessaire t est proportionnel à T_R^2 .

La sensibilité radiométrique n'est pas le seul critère de qualité d'un radiomètre : un radiomètre doit être étalonné pour connaître la relation entre la température de brillance qu'il reçoit et le niveau de sortie qu'il fournit (*linéarité*). Les sources de référence sont généralement des absorbants (corps noirs). La qualité de l'étalonnage est une composante importante de la précision des mesures. On peut, en fait, définir plusieurs "précisions" : sensibilité radiométrique, précision relative, précision absolue...

VII - Dispositifs de réception hétérodyne à faible bruit

La sensibilité d'un récepteur est principalement déterminée par les performances de bruit de ses étages d'entrée ; ainsi :

I - Au dessous de 100 GHz : les progrès réalisés dans la fabrication des transistors FET puis HEMT, permettent d'envisager leur utilisation dans un avenir proche en tête des chaînes de réception jusqu'à 100GHz et plus tant pour l'amplification à faible bruit que pour le mélange ou la génération de l'oscillateur local (source, multiplication de fréquence...). Actuellement, en ondes millimétriques et au delà, la plupart des récepteurs hétérodynes utilisent des pré-amplificateurs FI fonctionnant dans des bandes de fréquences situées entre 1 et 20 GHz. Le bruit propre des transistors à effet de champ, donc le bruit de l'amplificateur et sa contribution au bruit du récepteur, diminue avec la température physique. Il est donc important de les refroidir.

A température cryogénique, les performances des amplificateurs à FET ou HEMT se trouvent augmentées. En effet, la diminution de la température implique une réduction notable des sources de bruit (proportionnelles à kT) principalement T_g (température de grille). Cet effet constitue 80% de la réduction du facteur de bruit. Les 20% restant sont dus à l'amélioration de certains paramètres : dopage du matériau (AsGa et InP) ; de sa pureté ; de la température effective de la jonction, liée aux résistances thermiques de liaisons avec l'environnement.

La température minimale de bruit obtenue par la formule simplifiée ci-dessous, met en évidence la dépendance à la température de grille T_g . ($T_g \approx 300K$ à θ ambiante ; $\approx 14K$ à θ cryogénique)

$$T_{min} \approx 2 \frac{f}{f_t} \sqrt{g_{ds} r_{gs} T_g T_d}$$

avec f/f_t : fréquence d'utilisation / fréquence de transition.

Ainsi en refroidissant les transistors, la mobilité des électrons croît, entraînant une augmentation de la transductance (g), une diminution de la capacité d'entrée et des résistances parasites.

Ces effets conjugués produisent une amélioration du bruit et du gain (voir figure 5). Mais la température physique n'est pas très critique : la diminution du bruit est assez faible au dessous de 70K.

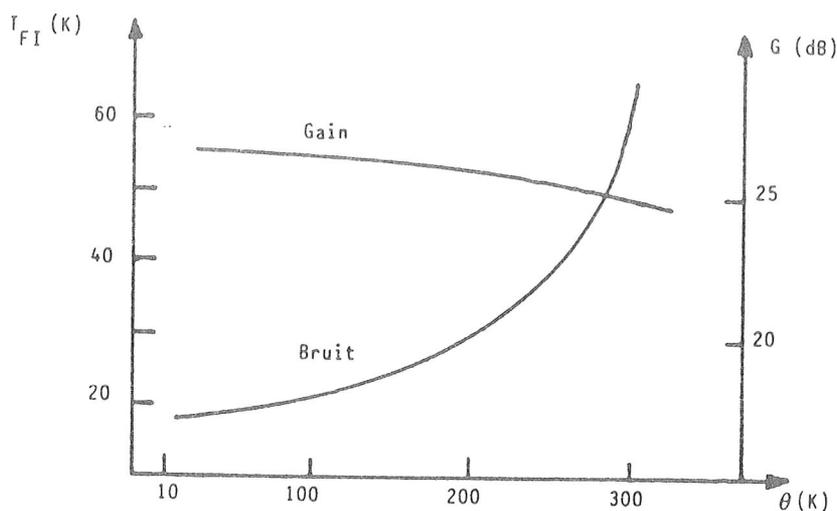


Figure 5

La courbe ci-dessous (fig 6) représente l'évolution des performances de bruit, à la température ambiante, des amplificateurs à transistors HEMT et l'extrapolation de celles-ci pour un fonctionnement à basse température :

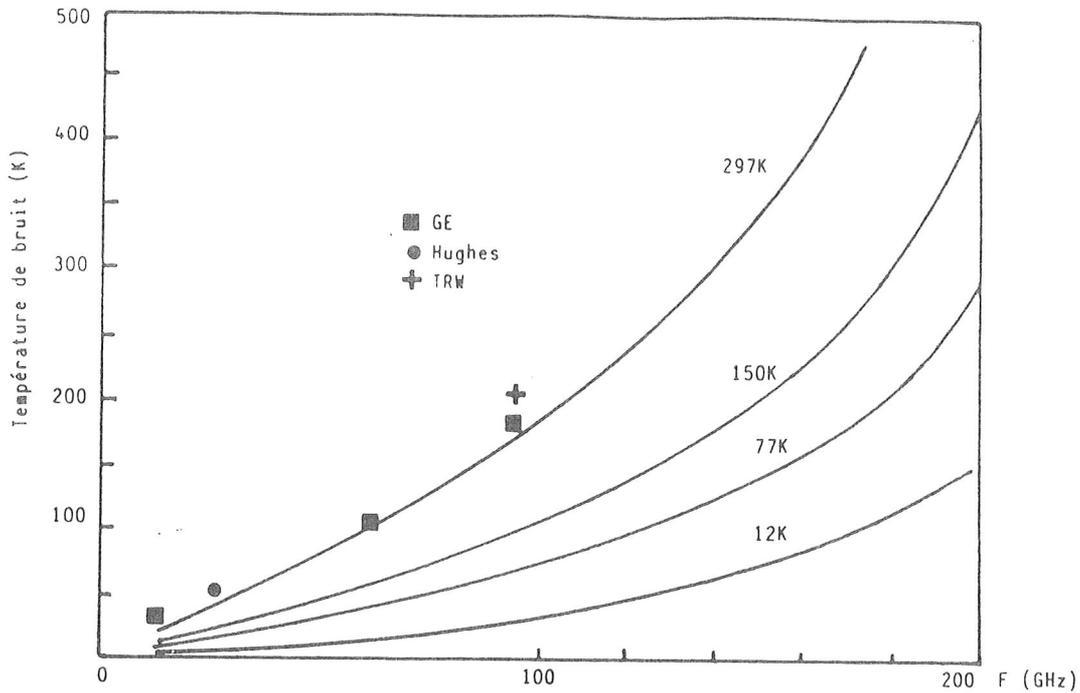


Figure 6 : Performance de bruit des HEMT

en 1984 : les MESFET atteignaient 30 GHz
 en 1991, avec les HEMT-InP des $F_t=250$ GHz (330 GHz intrinsèque) sont possibles avec des grilles de $0,15\mu\text{m}$. Dans les années à venir des F_t de 400/500 GHz pourront être atteints avec des grilles de 50nm.

2 - Au delà de 100 GHz il n'est pas encore envisageable d'amplifier le signal avant le changement de fréquence : le mélangeur doit être placé "en tête" du récepteur et le couplage entre cet élément et le signal doit être réalisé avec un minimum de pertes (les techniques quasi-optiques sont alors avantageusement employées) ; l'amplification à faible bruit est utilisée en fréquence intermédiaire (FI).

2.1 - Les mélangeurs :

La sensibilité de l'instrument en ondes millimétriques et submillimétriques est alors principalement obtenue par le choix judicieux de la technologie du mélangeur : à diode Schottky AsGa, refroidi (ou non) à température cryogénique ($\approx 20\text{K}$) ; à jonction SIS (supraconductrice), refroidie vers 4K car :

$$T_{sys} = T_A + [T_M + L_M T_{FI}]$$

avec T_M = bruit du mélangeur

L_M = pertes de conversion du mélangeur

T_{FI} = bruit du préamplificateur à la fréquence intermédiaire

A - Mélangeurs à diodes Schottky AsGa :

La résistance électrique de la jonction varie non linéairement ; la relation courant/tension est de la forme :

$$I_j = I_s \left(e^{\frac{V_j}{V_0}} - 1 \right)$$

Les sources de bruit sont principalement liées au bruit schott et au bruit d'électron chaud.

Le refroidissement à température cryogénique ($\approx 20\text{K}$) d'un mélangeur à diode Schottky AsGa permet de réduire la température de bruit d'un facteur 2 à 3. L'utilisation plus récente de matériau AsGa à couche épitaxiale faiblement dopée : $3 \cdot 10^{16}$ (réalisée par épitaxie à jet moléculaire) permet une réduction plus importante de la température de bruit pour une même variation de la température physique. Toutefois, les valeurs théoriques ne sont pas atteintes :

En effet, la température de bruit équivalente d'une diode (incluant le bruit Schott et le bruit thermique) est donné dans la relation suivante :

$$T_{eq} = \frac{q V_0}{2k} \cdot \frac{R}{R + R_s} + \frac{T R_s}{R + R_s}$$

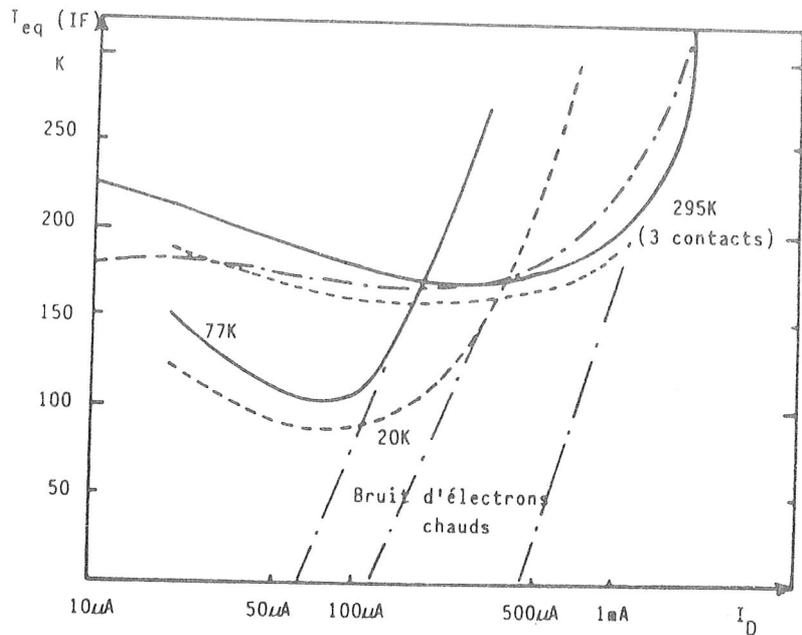
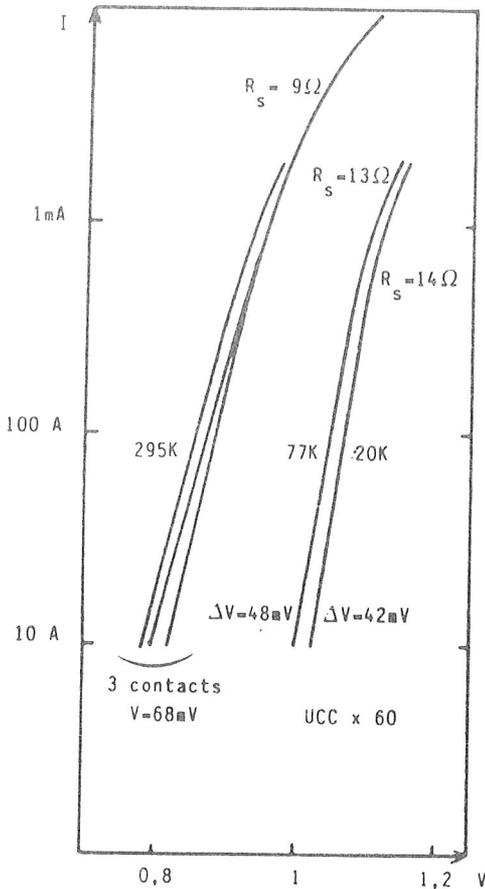
avec R = résistance de la jonction
 R_s = résistances séries de la diode
 T = température physique de la diode

et le bruit Schott : $qV_0 / 2k = \eta T/2$

V_0 ($= \Delta V/2,3 = \eta k T/q$) ne décroît pas au dessous d'une valeur qui dépend de la concentration du dopage (souvent $\geq 10^{16}$). En général, la diminution de V_0 (ou ΔV) est seulement d'un facteur 3 pour une réduction de la température physique de l'ambiante à 20K (facteur 15 pour la température physique).

Le second terme est relativement petit à la température cryogénique, bien que le phénomène "d'électrons chauds" affecte les propriétés statiques de la diode et augmente considérablement le bruit pour des courants de polarisation $> 100 \mu A$.

Les graphes suivants présentent les caractéristiques statiques et celles de bruit d'une diode Schottky. On peut y remarquer l'effet de la température physique sur la température de bruit T_{eq} (température équivalente de bruit de la diode à la fréquence FI). Ces graphes montrent également que la diminution du bruit de la diode n'est pas très sensible au dessous de 70K.
 nb : $T_M = T_{eq} (L_M - 1)$.



Principales technologies utilisées :

- *Mélangeur à simple diode en guide d'onde* : Ce sont les mélangeurs les plus souvent réalisés jusque vers 600 GHz (fig.7). Au-delà, les problèmes mécaniques deviennent rédhibitoires. Ce type de mélangeur était utilisé pour la radioastronomie au delà de 30 GHz, son application actuelle se situe dans le domaine submillimétrique proche ; l'utilisation à température cryogénique (20K/77K) permet d'obtenir des performances suivantes:

température de bruit de récepteur	140K dans la bande des	100 GHz
cryogénique T_R en DSB	250K vers	230 GHz
	350K	345 GHz
	550K	490 GHz
	1750K	650 GHz

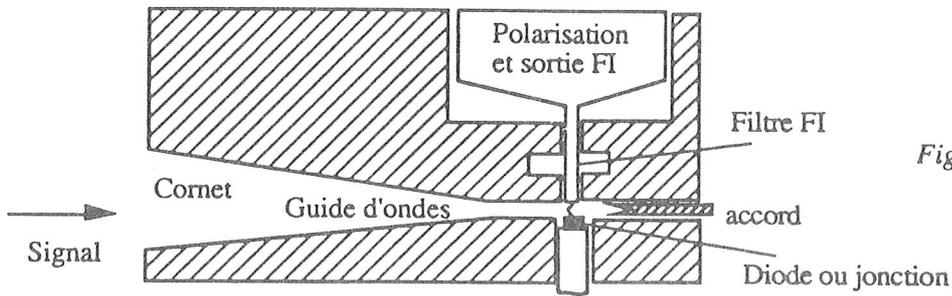


Figure 7

- *Mélangeurs équilibrés (cross-bar)* : utilisant des diodes beam-lead ou planar : application sol et espace permettant d'obtenir des performances satisfaisantes jusque vers 100 GHz.

- *Mélangeurs subharmoniques* : On évite l'emploi de source OL à trop hautes fréquences, en réalisant un "mélange harmonique", où la fréquence intermédiaire n'est plus $\nu_{OL} - \nu_s$, mais $2\nu_{OL} - \nu_s$, ou $4\nu_{OL} - \nu_s$.

- *Mélangeurs en structure ouverte* : On contourne la difficulté d'une micromécanique trop "pointue", en réalisant une structure sans guide d'onde, où la diode est alimentée par l'intermédiaire d'un long fil ("whisker") constituant l'antenne et collectant le rayonnement du signal et OL (Fig. 8).

Figure 9 : Cette figure représente le bruit du système de réception en fonction de la fréquence. Le récepteur comprend un mélangeur à structure ouverte pompé par un oscillateur local à laser submillimétrique : le fonctionnement est à température ambiante en raison de la difficulté de refroidir des dispositifs aussi complexes.

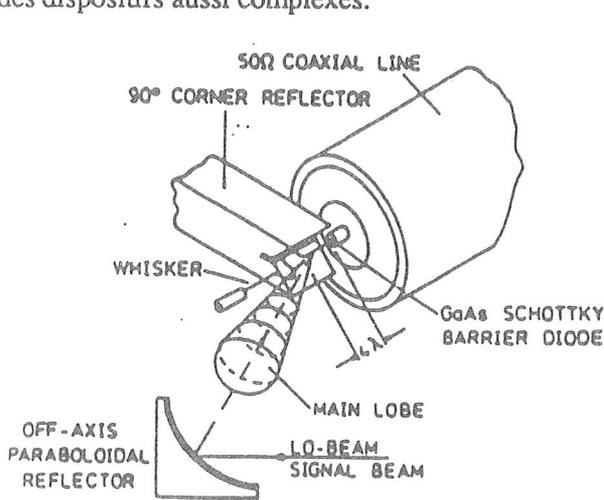


Figure 8

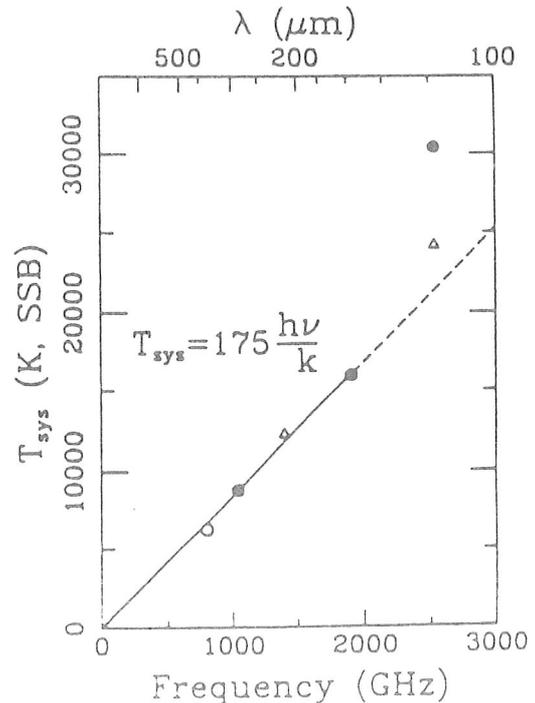


Figure 9

- Montage cryogénique d'un mélangeur à diode Schottky

Le mélangeur et le préamplificateur à TEC (HEMT) sont montés à l'intérieur d'un cryostat, et reliés à un étage dont la température physique peut être amenée à $\approx 20\text{K}$ par un cryogénérateur de type Gifford fonctionnant à partir d'un compresseur à circuit fermé d'hélium gazeux.

Ce procédé classique était utilisé pour les amplificateurs paramétriques de beaucoup de stations de télécommunication.

Un autre étage froid ($\approx 80\text{K}$) du cryogénérateur peut être relié à un écran antirayonnement qui permet d'éviter les échanges thermiques entre l'équipement à refroidir et l'enceinte externe. L'isolation (évitant la conduction par l'air) est obtenue par pompage primaire de l'enceinte : un vide $\approx 10^{-3}$ est nécessaire avant de mettre en fonctionnement le cryogénérateur. Celui-ci prend alors le relais à basse température (cryopompage) : le vide dans l'enceinte est alors de $\approx 10^{-5}$ à 10^{-6} torr.

le schéma ci-joint (Fig. 10) représente le principe d'un récepteur, à 230 GHz, cryogénique utilisant un appareil à 2 étages froids (75K et 15K), de type CTI 21. Ce cryogénérateur ne peut être utilisé en vol à cause de sa consommation électrique et la puissance thermique dissipée par le compresseur ($> 1\text{kW}$). Toutefois des cryogénérateurs à 80K et 20K développés par BAÉ pour des applications spatiales permettent de refroidir avec une dissipation thermique acceptable $\approx 35\text{W}$ en régime permanent.

Une autre possibilité de refroidir ce type de mélangeur - préamplificateur est l'utilisation d'un cryostat à azote liquide.

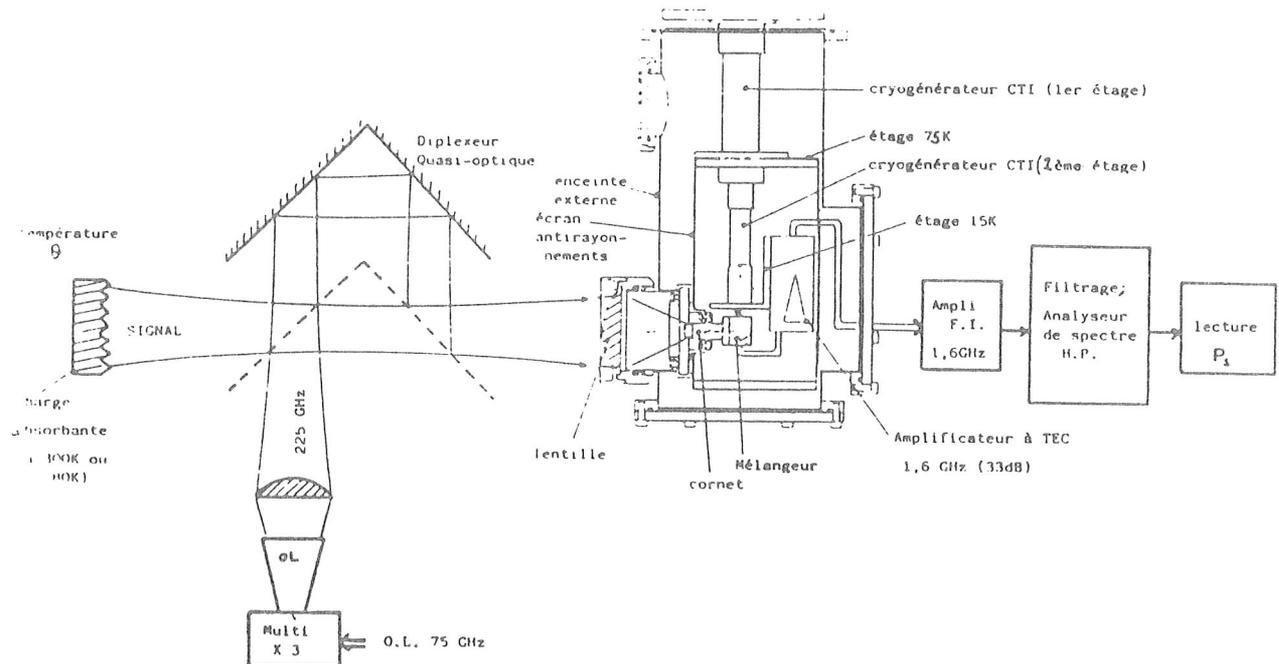


Figure 10 : Principe d'un récepteur cryogénique à 230 GHz

B - Mélangeurs à diode InSb :

Un mélangeur InSb (Indium-Antimoine) est un bolomètre refroidi à la température de l'hélium liquide (4K). La puissance absorbée module sa résistance : y appliquant simultanément deux fréquences, la puissance totale reçue a une composante variable suivant la fréquence différence. Cette composante module la résistance de l'élément si la fréquence est inférieure à l'inverse de ce qu'on appelle le temps de réponse du bolomètre. Cette variation de la résistance (non-linéaire) permet la détection hétérodyne. En refroidissant le cristal d'InSb en dessous de 4K, on peut abaisser son temps de réponse à environ $2 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-8} s, ce qui donne une fréquence intermédiaire maximale (largeur de bande FI) de l'ordre de quelques MHz voire maintenant d'une centaine de MHz.

Le barreau d'InSb est monté dans un guide rectangulaire en mode fondamental (fig 11). L'adaptation est obtenue en choisissant convenablement le diamètre du cristal, sa résistivité et par un court-circuit d'accord réglable qui annule la partie réactive.

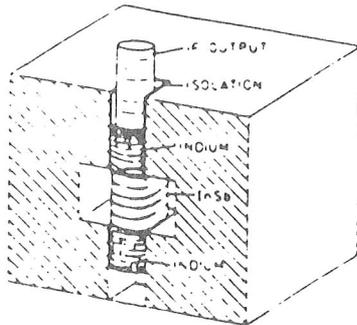


Figure 11 :

L'avantage de ce type de mélangeur est la faible puissance d'OL requise : moins d'un microwatt (contre 0,3 à 0,5 mW avec les mélangeurs Schottky). Les températures de bruit sont très basses (environ 5 fois plus faibles que les meilleurs Schottky). Par contre, sa bande passante FI est beaucoup trop faible pour la plupart des applications (analyse spectrale rapide).

C - Mélangeurs à jonctions SIS :

Dans ce type de mélangeur, l'élément non linéaire est une jonction tunnel formée de deux électrodes supraconductrices (S) en Pb-In, NbN, Sn, Nb..., séparées par une très fine couche d'oxyde isolant (I) d'épaisseur 20 Å environ. Les électrons peuvent, par effet tunnel, franchir la barrière d'énergie entre les deux métaux, soit par paires ("paires de Cooper"), soit électron par électron (ils sont alors appelés "quasi-particules"). Ces jonctions peuvent être montées dans des structures en guide d'onde ou sur des structures ouvertes de type planar, fin-line, quasi-optique. Les mélangeurs à jonction SIS sont les plus couramment utilisés pour la radioastronomie au sol au dessus de 100 GHz ; ils restent les plus performants en bruit jusque vers 500 GHz et au delà, les performances semblent être dégradées par le bruit Josephson et une tension de gap trop faible par rapport à $h\nu/e$:

Les jonctions en alliage de plomb : furent utilisées dans les premiers mélangeurs SIS, les performances obtenues sont très bonnes ($T_R \approx 20K$ à 100 GHz au Bell Labs).

Ses principaux défauts sont une grande sensibilité aux décharges électriques, aux cycles thermiques, aux attaques chimiques et la température critique (T_c) est faible $\approx 7K$.

Les jonctions au niobium ($T_c \approx 9K$) : permettent d'obtenir une grande fiabilité lors des recyclages thermiques et une durée de vie importante. Il est difficile d'obtenir des faibles capacités de jonction alliées à une densité de courant élevée. Une approche intéressante consiste à réaliser des réseaux de jonctions en série et d'accorder les capacités par des éléments réactifs. Des performances de bruit de 40 à 50K vers 100 GHz sont obtenues à l'IRAM avec des jonctions de l'ENS. D'excellents résultats (170K) sont obtenues vers 490 GHz à Caltech et à Groningen mais l'énergie de gap relativement petite, limite ses performances à haute fréquence (≈ 600 GHz).

Les jonctions en nitrure de niobium ($T_c \approx 12K$) : représentent un matériau idéal pour le submillimétrique (tension de gap élevée $\approx 5mV$) mais la difficulté de réaliser des jonctions de bonne qualité avec des petites surfaces et des densités de courant élevées est encore plus grande que pour le Nb pur.

- Dispositifs cryogéniques pour jonctions SIS

De part leur principe fondamental, les jonctions SIS ne fonctionnent que pour des températures $\leq T_c / 2$ soit $\approx 1,5$ à 4,5 K.

En effet la caractéristique I-V d'une telle jonction dépend fortement de la température (voir figure 12). Un coude (forte non linéarité) n'apparaît qu'en dessous de la température critique (T_c) de l'élément supraconducteur. Il est d'autant plus marqué que la température est basse : les pertes de conversion et le bruit s'en trouvent réduits.

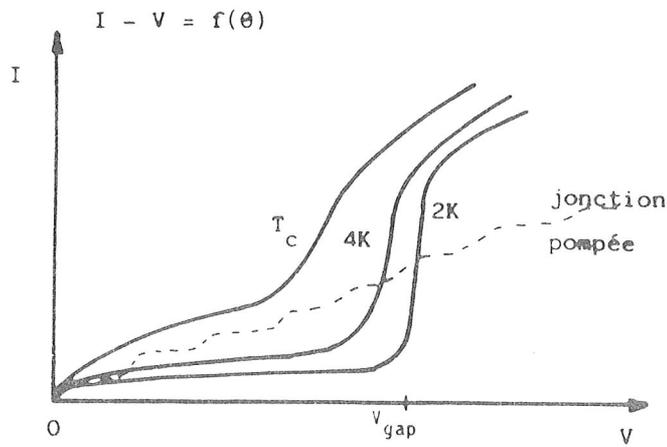


Figure 12:
Caractéristiques courant-tension
d'une jonction SIS dont les
électrodes sont de natures différentes

Le laboratoire de l'ENS a développé un cryogénérateur à circuit fermé d'hélium gazeux permettant d'atteindre des températures de 4 ou de 1,8K pour une puissance thermique disponible de 80 mW (commercialisation Cryophysics).

Ce dispositif peut être utilisé en laboratoire ou même sur antenne au sol : son autonomie est très grande > 2000h mais sa consommation, donc sa dissipation thermique atteint les 5 kW avec une masse et un encombrement non compatibles pour le moment avec un instrument spatial (ballon, satellite). Un cryogénérateur à tube à gaz pulsé est en développement pour une utilisation spatiale.

Toutefois des cryostats à Hélium liquide peuvent être utilisés comme l'indique la figure 13.

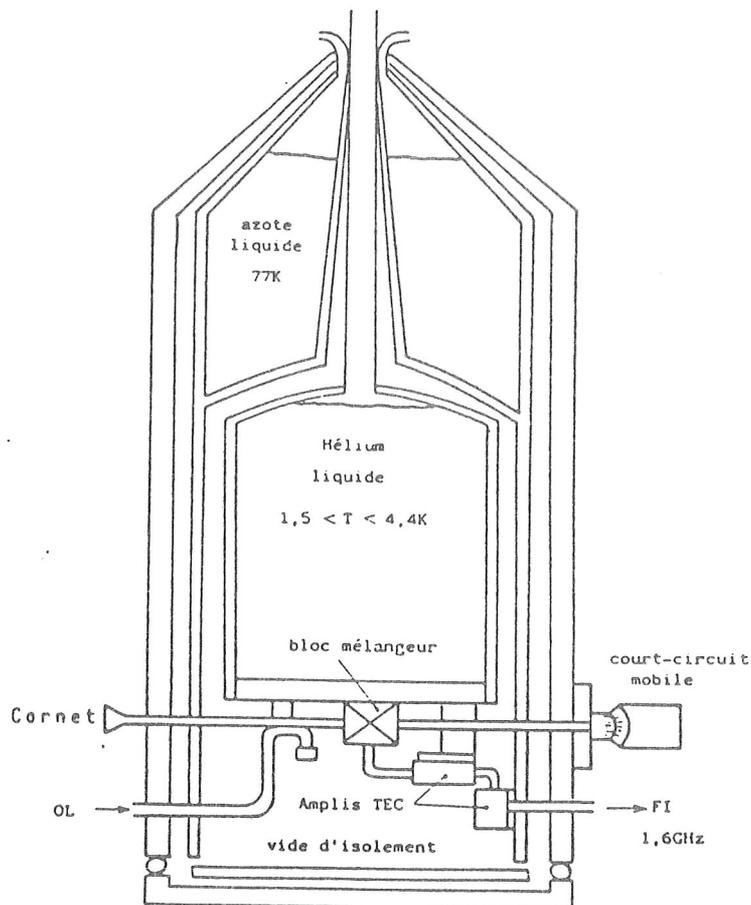


Figure 13 : Coupe verticale du cryostat à transfert d'hélium
pour mélangeur à jonction SIS

Le graphe figure 14 ci dessus résume les performances de bruit des différents types de récepteurs hétérodynes : au dessus de 500 GHz, se référer au texte des paragraphes précédents.

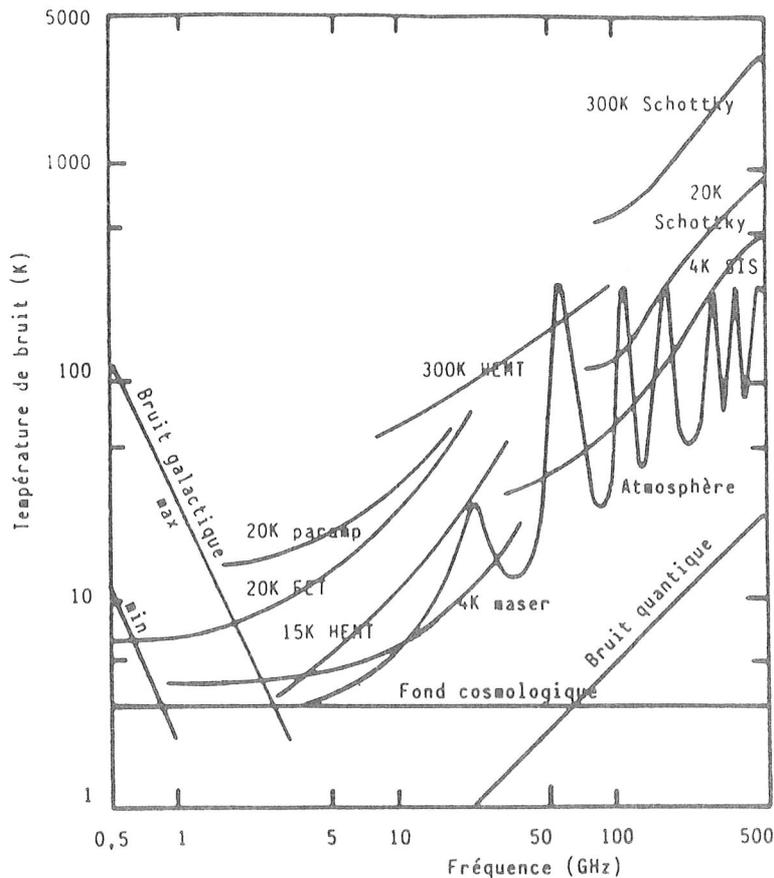


Figure 14 : Comparaison entre les températures de bruit des récepteurs et les sources de bruit naturelles

2.3 - Les oscillateurs locaux

Dans les domaines millimétrique et submillimétrique, pour réaliser le battement avec le signal, les récepteurs hétérodynes nécessitent l'emploi de sources d'oscillateur local qui doivent satisfaire à des conditions de puissance, de pureté spectrale, de possibilité d'accord en fréquence mécanique ou (et) électrique (stabilisation de fréquence et phase nécessitée pour la spectrométrie à haute résolution).

Les oscillateurs au dessous de 60 GHz utilisent couramment des diodes Gunn AsGa dont la puissance délivrée atteint 100 mW à cette fréquence. Toutefois, si la puissance consommée doit être réduite (application spatiale...), l'emploi d'un oscillateur à transistor suivi d'un multiplicateur à varactor peut devenir intéressant si le besoin en puissance de sortie est peu élevé (quelques milliwatts).

Au delà de 60 GHz et jusque vers 120 GHz : les sources Gunn fondamentales utilisent des diodes InP. En général les sources à diodes Impatt, trop génératrices de bruit, sont exclues des chaînes d'OL bien que la puissance délivrée à 100 GHz puisse atteindre 30 mW ; en comparaison avec 6 mW pour l'InP.

Les sources Gunn à diodes AsGa peuvent fonctionner sur l'harmonique 2 en fournissant une puissance de quelques milliwatts jusque vers 120 GHz.

Des jonctions à double barrière à effet Tunnel résonnant (puits quantiques) peuvent fonctionner à la fréquence fondamentale jusque vers 700 GHz. Ce type de composant est investigué

mais la puissance de sortie très faible (de l'ordre de quelques μW vers 500 GHz) de ces composants ne pourrait être suffisante pour alimenter une jonction SIS que dans le domaine millimétrique. Il en serait de même pour les oscillateurs à supraconducteur à effet Josephson.

Au delà de 100/120 GHz : les tubes, tels les klystrons, carcinotrons, lasers submillimétriques ne peuvent être employés aisément sur des instruments embarqués (taille, consommation) : il est souvent nécessaire de faire appel à la multiplication de fréquence permettant la réalisation d'une chaîne d'oscillateur local à état solide jusque dans le domaine submillimétrique :

Les diodes Schottky AsGa sont communément employées pour la génération d'harmoniques (varistors, varactors) ces derniers permettant une meilleure efficacité pour des rangs de multiplication peu élevés.

Au delà de 300 GHz : il s'avère souvent nécessaire d'associer plusieurs multiplicateurs en cascade (doubleur + doubleur ; doubleur + tripleur ...). On se heurte alors au peu d'efficacité du second étage, causé par la faible puissance disponible à son entrée .

Enfin, la figure 15 ci-dessous exprime les besoins en puissance du pompage OL des mélangeurs Schottky et SIS et présente les possibilités des différents types d'oscillateurs locaux.

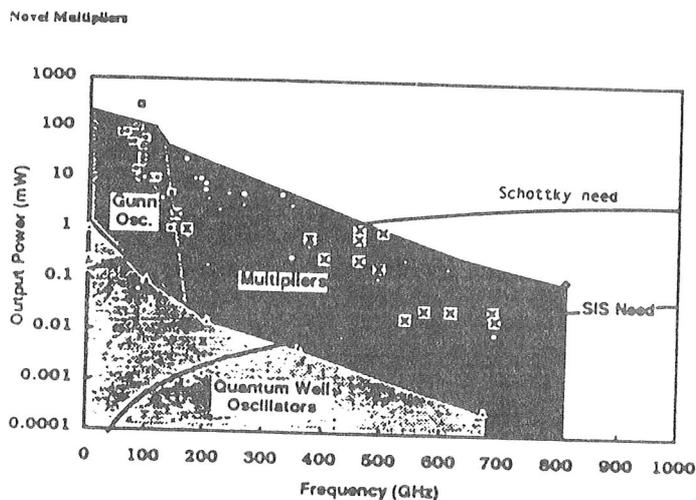


Figure 15

VIII - Analyse spectrale des signaux radio-électriques

Introduction

L'analyse spectrale des signaux détectés par un radiomètre hyperfréquence permet de connaître la nature du milieu émissif et sa vitesse par mesure du déplacement Doppler. Le spectromètre est donc une partie essentielle d'un récepteur hétérodyne ; il est situé en sortie des étages d'amplification FI. Nous passons, ci-dessous, rapidement en revue les différents types de spectromètres :

Analyseur à balayage

Le signal est mélangé à un oscillateur local dont la fréquence est accordable dans la bande à analyser. Puis le battement est filtré par un filtre de largeur variable qui fixe la résolution.

Les récepteurs sont réservés à des observations de signaux de longue durée et dont la fréquence est connue. Ces appareils sont utilisés au laboratoire ou pour la détection d'émissions puissantes (Soleil, Jupiter). Compte tenu de leur faible sensibilité, leur utilisation est exclue pour l'analyse de signaux trop faibles.

Batterie de filtres

C'est l'appareil dont le principe est le plus simple : la bande de fréquence FI est "découpée" par des filtres passe-bandes (canaux) suivis d'une détection quadratique. Au prix de la

multiplication des canaux (250/500) on peut obtenir de grandes bande-passantes et une bonne résolution. La dynamique est limitée mais la sensibilité est bonne et la résolution peut atteindre quelques kHz.

Ces appareils sont utilisés en radioastronomie pour détecter les raies moléculaires des nuages interstellaires.

Auto-corrélateurs digitaux

Ces appareils calculent la fonction d'autocorrélation dont la transformée de Fourier permet d'obtenir la répartition spectrale d'énergie.

La bande B analysée est limitée par la fréquence d'échantillonnage qui est égale à $2B$. La résolution dépend du nombre d'étages N dans le registre à décalage (elle peut donc être très grande).

Ces appareils sont très fiables mais limités en bande avec une dynamique faible (≈ 10 dB). En outre, ils nécessitent le calcul de la T.F. Ce qui n'est pas très gênant pour des temps d'intégration longs, mais le devient pour des poses courtes.

Analyseurs à ondes acoustiques de surface

Ce procédé utilise l'algorithme "Chirp Transform" qui permet de réaliser analogiquement la T.F. à l'aide de lignes à retard dispersives. Dans ce cas, contrairement aux autocorrélateurs, la ligne à retard est analogique et réalisée par la conversion du signal en ondes acoustiques se propageant à la surface d'un milieu élastique.

Analyseurs de spectres acousto-optiques

Le principe de fonctionnement d'un spectromètre acousto-optique (SAO) est lié à un système optique cohérent (où les longueurs d'onde sont en phase) qui module et défléchit la lumière d'un faisceau laser et la focalise sur un plan de sortie où est situé une barette de CCD.

Le signal à analyser est injecté dans une cellule de Bragg après avoir été converti en ondes acoustiques qui créent des variations d'indices de réfraction. La lumière laser est introduite dans le milieu transparent de la cellule acousto-optique sous un angle qui favorise l'addition en phase des réflexions issues des variations d'indices. En sortie de la cellule, le faisceau laser est donc modulé et défléchi en fonction des caractéristiques du signal injecté, puisque ce sont les ondes ultrasonores générées par le transducteur qui défléchissent la lumière incidente : l'amplitude de la sortie défléchie est proportionnelle à l'amplitude du signal R.F ; l'angle de déflexion est quasi-proportionnel à la fréquence du signal FI.

A chaque pixel du CCD (qui en comprend ≈ 1000 ou 2000), correspond donc une fréquence discrète et une amplitude : le signal est analysé.

La résolution peut atteindre 100 kHz pour des bandes d'analyse faible (< 100 MHz). Le domaine submillimétrique est analysé avec des résolutions de 1 à 2 MHz dans une bande de 1 à 2 GHz soit sur 1000 à 2000 canaux.

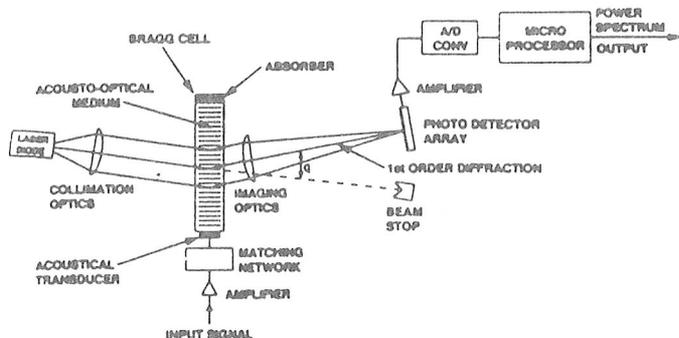


Figure 16 :

Schéma de principe
du SAO

IX - Exemples d'instruments hétérodynes en ondes submillimétriques

PRONAOS - SMH : Des observations à partir d'un ballon stratosphérique sont programmées en 1993-1994. Il s'agit d'un projet en cours de développement : PRONAOS (PROjet National d'AstrONomie Submillimétrique), géré par le CNES, comprenant un télescope de 2m de diamètre (réalisation MATRA) embarqué sur une nacelle de 2,5 tonnes stabilisée 3 axes, permettant un pointage diurne de 5" d'arc. Cette nacelle sera portée par un ballon stratosphérique de 10^6m^3 (diamètre 130m) qui permettra un vol de 20h au plafond à une altitude de 40km) - Fig.17 .

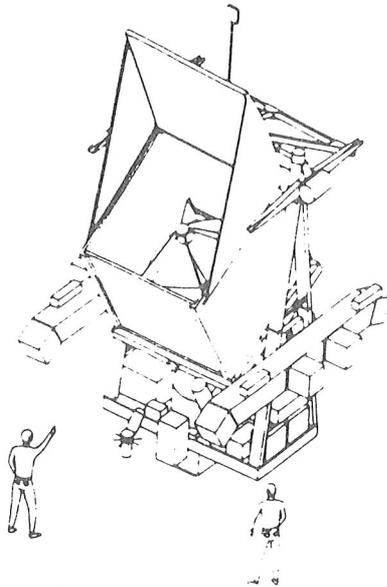


Figure 17
Configuration opérationnelle
de la nacelle

Deux instruments pourront fonctionner en alternance au foyer du télescope :

- SPM : (SpectroPhotomètre Multibandes) de résolution spectrale $v / \Delta v \approx 1$ à 10 dans la bande de $200\mu\text{m}$ à $1,5\text{mm}$ de longueur d'onde : il utilisera 4 photomètres refroidis à $0,3\text{K}$.

- SMH : (SpectroMètre Hétérodyne)

L'objectif de l'instrument SMH est l'observation simultanée des raies de H_2O à $380,197\text{ GHz}$ et de O_2 à $368,499\text{ GHz}$. Un réglage de fréquence permettra de détecter des sources de vitesse radiale comprises entre ± 10 et $\pm 120\text{ km/s}$. L'eau et l'oxygène moléculaire sont 2 composants essentiels du milieu interstellaire :

La molécule d'eau est observée à cette fréquence car la détermination de son abondance dans les nuages moléculaires repose sur l'observation de transitions situées presque exclusivement dans le domaine submillimétrique. Quant à la molécule d'oxygène, étant donné son importance vis-à-vis des modèles chimiques du milieu interstellaire, l'étude de la transition à 368 GHz -soit à 12 GHz seulement de la raie de l'eau- apportera une donnée supplémentaire essentielle aux modèles existants.

La spectrométrie de ces deux raies permettra de progresser dans la connaissance des éléments chimiques et de leur abondance dans les sources galactiques et les régions d'étoiles en formation. De telles observations requièrent une sensibilité élevée et une haute résolution spectrale : $v / \Delta v \approx 10^6$.

SMH : Caractéristiques techniques	
<i>Récepteur hétérodyne</i>	<i>Spectromètre</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Résolution angulaire : $1'35''$ d'arc - Fréquence de réception : 2 bandes centrées sur 368 GHz et 380 GHz - Bande passante : 500 MHz - Stabilité de fréquence : $\approx 10^{-8}$ - mélangeur à jonction supraconductrice (SIS) : $T_s \leq 300\text{K}$ - Sensibilité (température de bruit DSB) : $\Delta T = 0,5\text{K/s}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Type : acousto-optique à cellule de Bragg et CCD : - Bande d'analyse possible : 700 MHz - Résolution : 700 kHz - Nombre de canaux : ≈ 1000
	<i>Bilan général</i>
	<ul style="list-style-type: none"> - Masse totale : 190 kg - Encombrement : $\varnothing 0,9$ à $1,2$; $l = 1\text{m}$ - Consommation : $140\text{W} + 80\text{W}$ (thermique)

Brève description du système :

Le synoptique de l'instrument est présenté figure 18. Afin d'étalonner le récepteur, le faisceau incident est commuté entre une charge chaude et une charge froide par rotation d'un ensemble de miroirs. Compte-tenu des faibles longueurs d'onde, une propagation en espace libre de type quasi-optique est adoptée pour l'injection des signaux, la focalisation des faisceaux étant assurée par des lentilles et des miroirs. Une expérience ballon exclut les sources d'oscillateurs local du type klystron ou carcinotron, pénalisées par leur encombrement. Il convient dans ce cas de s'orienter vers une source à état solide associée à des multiplicateurs de fréquence. Aux fréquences mises en jeu, la technologie actuellement disponible exige de placer le mélangeur en tête de la chaîne

de réception : ses caractéristiques sont donc déterminantes dans le bilan de bruit total du récepteur. La fréquence intermédiaire est choisie égale à 5,85 GHz, permettant la détection simultanée des raies de O_2 et H_2O dans les bandes latérales inférieure et supérieure (respectivement à 368 et 380 GHz) (Fig. 19). Un amplificateur cryogénique à faible bruit suivi d'une chaîne d'amplification à température ambiante fourniront un niveau de signal compatible avec l'utilisation d'un spectromètre acousto-optique.

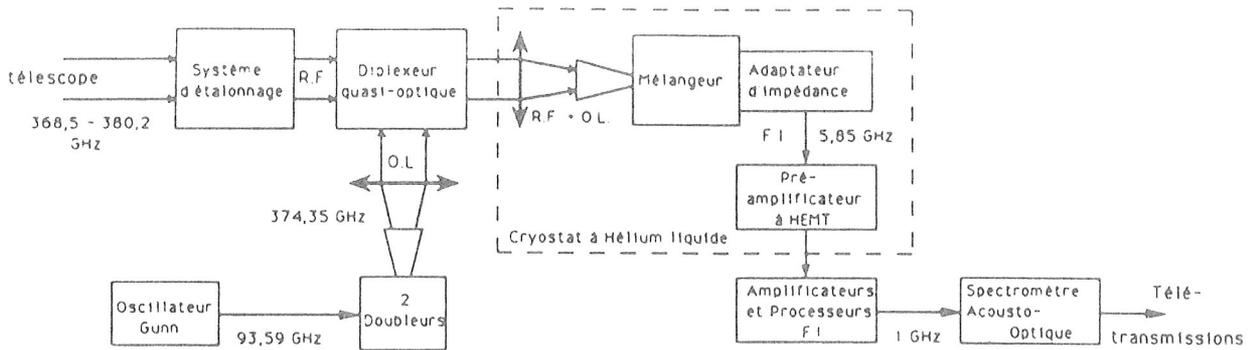


Fig.18 : Synoptique du récepteur

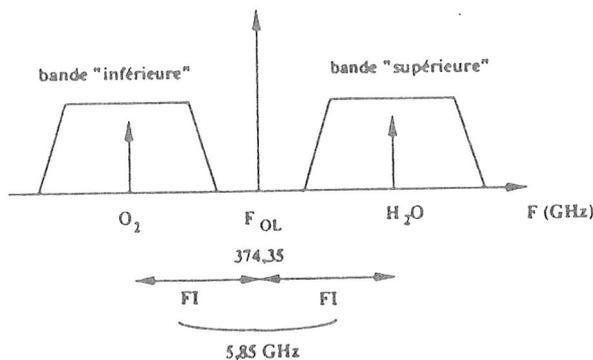


Fig.19 : utilisant le principe du DSB, le choix d'une fréquence FI à 5,85 GHz permet de détecter simultanément dans les 2 bandes latérales les deux molécules (si elles sont présentes dans la zone du ciel observée),

D'autres instruments appelés "EXPLORER" (proposés par le JPL, Cal Tech -USA- et la France : IAS-Observatoire de Meudon) ou FIRST (européen) sont soutenus par l'ASE et le CNES. Ils consistent en un télescope de 3 à 4m associé à un instrument non cohérent en infra-rouge lointain et à un instrument hétérodyne à haute résolution spectrale dans la bande 400-1200 GHz. Utilisés simultanément, ils seront tout deux refroidis dans un cryostat à l'He4 et He3.

Ces observatoires seront mis en orbite vers l'an 2000 sur satellite afin de s'affranchir de toute limitation atmosphérique. Ils permettront l'étude d'une centaines d'objets dans les nuages moléculaires en effectuant une couverture complète de la bande spectrale afin de les caractériser du point de vue de leur chimie et de la possibilité de formation d'étoiles. Les valeurs extrêmement faibles des flux à mesurer (de l'ordre du Jansky soit $\approx 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$) imposent de disposer d'une technologie très pointue.

le schéma général du récepteur hétérodyne est représenté sur la figure 20 .

Une charge à température ambiante et une référence sur le ciel froid seront utilisés pour les calibrations absolues des radiomètres. Les mélangeurs utiliseront des réseaux de jonctions tunnel à supraconducteurs (SIS) fonctionnant à une température physique comprise entre 1,5 et 4K. Les chaînes à fréquence intermédiaire comprendront des préamplificateurs à la température cryogénique. Les dispositifs d'oscillateurs locaux seront constitués d'éléments d'injection en quasi-optique, de multiplicateurs de fréquence pilotés par des sources oscillatrices à diode Gunn (stabilisées par une

boucle de fréquence et de phase). L'analyse spectrale sera réalisée par des batteries de spectromètres acousto-optiques (SAO).

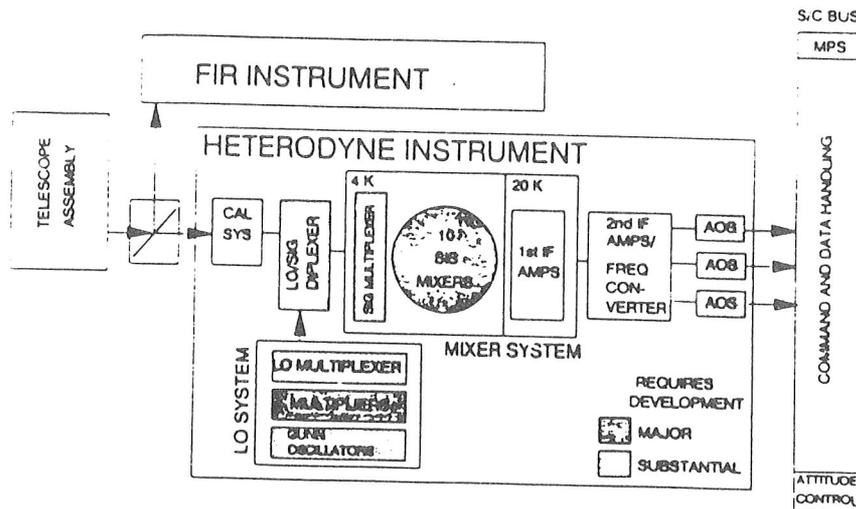


Fig.20 :
Schéma de l'instrument
hétérodyne dans la bande
500-1200 GHz

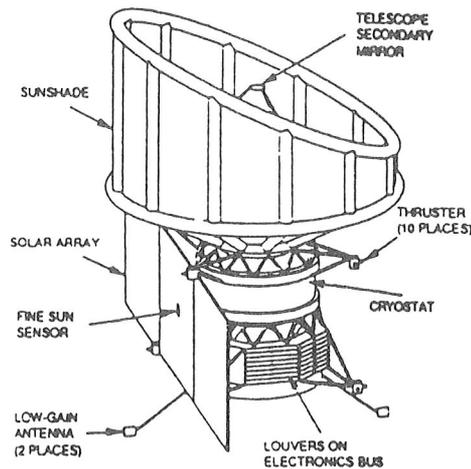


Fig.21 :
Dessin de l'explorateur et de
son véhicule

IX - Conclusions

La radiométrie dans le domaine millimétrique est en pleine expansion et les techniques hétérodynes associées se développent tant dans les laboratoires de recherche que dans l'industrie.

Les applications industrielles et commerciales en ondes millimétriques (30-100 GHz) sont liées au développement des diodes Schottky "beam-lead" et "planar" mais surtout des transistors de type "HEMT".

Nous n'avons pas abordé ici l'intérêt militaire de la radiométrie passive en ondes millimétriques bien que cette technique utilisée à titre expérimental à bord d'avions de reconnaissance a permis d'identifier des engins ou cibles au sol (camouflage, couverture de neige, ...) non détectés par les systèmes en infra-rouge et ceci avec une assez bonne résolution.

Les applications concernant l'environnement et l'observation de la terre (radiomètres pour la télédétection, le sondage atmosphérique, le sondage au limbe) non traités ici, utilisent des mélangeurs équilibrés ou harmoniques à diodes Schottky, non refroidis activement, dans les bandes 100 à 300 GHz.

Pour les applications scientifiques (radioastronomie au sol ou dans l'espace dans le domaine millimétrique et submillimétrique) la plus haute sensibilité doit être atteinte, aussi les mélangeurs, refroidis à basse température, seront de type SIS ; l'objectif étant d'atteindre 10 fois le bruit quantique soit 10K vers 100 GHz, avec le Nb, et d'approcher le THz peut être avec d'autres matériaux (NbN ou avec les supraconducteurs à haute Tc), ou avec les Schottky AsGa.

Le futur "concernera" les instruments imageurs à réseau bidimensionnel (matrice de récepteurs) ainsi que les interféromètres à très haute résolution spatiale.

Le développement de machines cryogéniques spatialisables permettra aux instruments embarqués d'atteindre des durées de vie importantes (> 3 à 5 ans).

Références

- Microwave Remote Sensing, F. T Ulaby et al. (1984), AR Tech House Inc.
- Infrared and Millimeter Waves vol 1-13 (1985), edited by Kenneth J. Button (MIT, USA), Academic Press Inc (London) LTD.
- RadioAstronomy, Kraus 2e edition (1986), Cygnus Quasar Books, Ohio (USA).
- Coherent detection at millimeter wavelengths and their applications, Nova science publications New York, Centre de physique des Houches, France, mars 90.
- Proceedings of the 29th Liege international colloquium held at the Institut d'Astrophysique, Liege, Belgium, july 90, ESA 8-10 rue Mario Nikis, 75738 Paris Cedex 15 - France
- 7e Journées Nationales Microondes, résumé des conférences, Grenoble, mars 91.
- International Symposium of Space Terahertz Technology, JPL-NASA, Pasadena California, february 26-28 1991 ; march 24-26 1992, University of Michigan
- Radiométrie en ondes millimétriques au sol et dans l'espace ; G. Beaudin , D. Scouarnec, G. Thomas, IEEE workshop millimétrique, Carry le Rouet novembre 1991.
- Un récepteur hétérodyne vers 400 GHz pour PRONAOS ; Beaudin G., Gheudin M., Deschamps A., Febvre P., Perrin O., Robert C., Ruffié G., Encrenaz P., Pernot J.C., Feautrier P., 2èmes Journées d'Etude Micro-Ondes et Espace, Toulouse 14-15 janvier 1992, p.207-217.
- Etat de l'art en détection cohérente dans le domaine millimétrique et submillimétrique ; G. Beaudin, M. Gheudin, G. Thomas, P. Encrenaz , 2èmes Journées d'Etude Micro-Ondes et Espace, Toulouse 14-15 janvier 1992.

