

Un TP simple à monter, qui illustre le bilan de liaison hertzien en bande Ku.

Ou caractérisation d'une antenne à réflecteur en hyperfréquence.

par Jean Marie Mathieu.

Petit historique: le GEII de Marseille à pris le virage vers les hyperfréquences en 1989, à la création du diplôme **DURTS Diplôme Universitaire en Réseaux et Télécommunications Spatiales**, qui apportait une formation à spécifique à bac +3. Dans la partie **Télécommunications**, j'avais la responsabilité du cours de liaison hertzienne spatiale et bien entendu de ce qui l'accompagne, TD et TP. Partant de zéro, il fallait créer des TP illustrant le "bilan hertzien".

Deux paramètres caractérisent le bilan hertzien : la **puissance reçue Pr en bout de trajet** par l'antenne de réception et inévitablement la **puissance N des "bruits" cumulés**. Sachant modéliser et chiffrer toutes ces contributions de puissance utile et de puissance nuisible, on peut chiffrer la qualité du lien hertzien par **l'incontournable rapport signal à bruit C/N**. Selon sa valeur on peut espérer récupérer, après démodulation analogique ou numérique, un signal en bande de base aussi ressemblant que possible au message originel.

A la création du DURTS, **fondation éprouvée de l'actuelle licence de Télécommunication**, nous n'avions donc aucun recul, ni matériel hertzien spécifique, à part les très académiques guides d'ondes Sivers Lab. Voulant ajouter quelque réalisme au cours de propagation libre, ma première idée fut d'installer un source hyperfréquence rayonnant à partir d'un mat élevé dans les jardins entourant le département GEII. Pas forcément simple administrativement, j'optais pour l'utilisation gratuite de satellites bien classiques géosynchrones en bande Ku (10,7 à 12,5GHz) et qui à l'époque était parfaitement caractérisés par des organismes régionaux comme TDF Marseille. Les matériels bien caractérisés dans leur version distribution collective ou semi professionnelle, permettent une bonne corrélation entre théorie et mesures.

Voici donc pour les collègues intéressés, le menu du TP, étalé sur environ 6 heures.

Géométrie autour du globe terrestre latitude, longitude. Définition au lieu de réception, du plan méridien local (**PML**) etc..

Calcul de l'aire de captation, du gain, de l'ouverture à -3dB de l'antenne utilisée pour les mesures.

Calcul des angles de positionnement de la monture équatoriale dans le plan méridien local.

Analyse des fonctions d'un convertisseur faible bruit LNC.

Affinement du positionnement grâce à un satellite puissant.

Réglage de la polarisation du cornet. Estimation de la rejection de polarisation contrapolaire.

Mesure de la puissance disponible de l'antenne de réception **Pr**. Calcul du trajet et du gain d'espace libre. Mesure du flux de puissance au sol $\Phi(\mathbf{d})$.

Calcul et vérification de la **PIRE** émise par le satellite (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente).

Estimation de la puissance fournie à bord du satellite **Pf**.

Mesure de la température équivalente de bruit de l'antenne, **Ta**, et de la Densité Spectrale de Puissance Moyenne **DSPM** de bruit capté.

Estimation de l'atténuation atmosphérique **Gat**.

Estimation de la qualité de la liaison par le rapport signal à bruit, **C/N**.

Le rayonnement des corps entourant l'antenne.

Description du matériel nécessaire.

Il faut disposer d'une fenêtre "au sud" d'au moins deux mètres carré et sans obstacle au dessus d'un angle de ~ 35 à 40° par rapport au sol.

L'antenne doit être installée sur un pied stable que n'importe quel technicien peut réaliser. Ce pied doit être déplaçable, nous l'avons équipé de roulettes et d'un mas de 80 mm de diamètre libre en rotation mais blocable. Il est important de travailler avec une antenne dont on peut séparer le convertisseur faible bruit LNC du cornet d'antenne, car **il faut avoir accès à l'interface d'entrée E à la séparation antenne/récepteur**.

C'est à l'interface E que sont ramenées les mesures de puissance de signal utile **Pr** et de bruits cumulés **N**. Toutes les mesures sont faites avec l'analyseur de **spectre** (attention aux "analyseurs" qui ne sont que des instruments de visualisation peu performants et qui ne permettent pas de mesures précises).

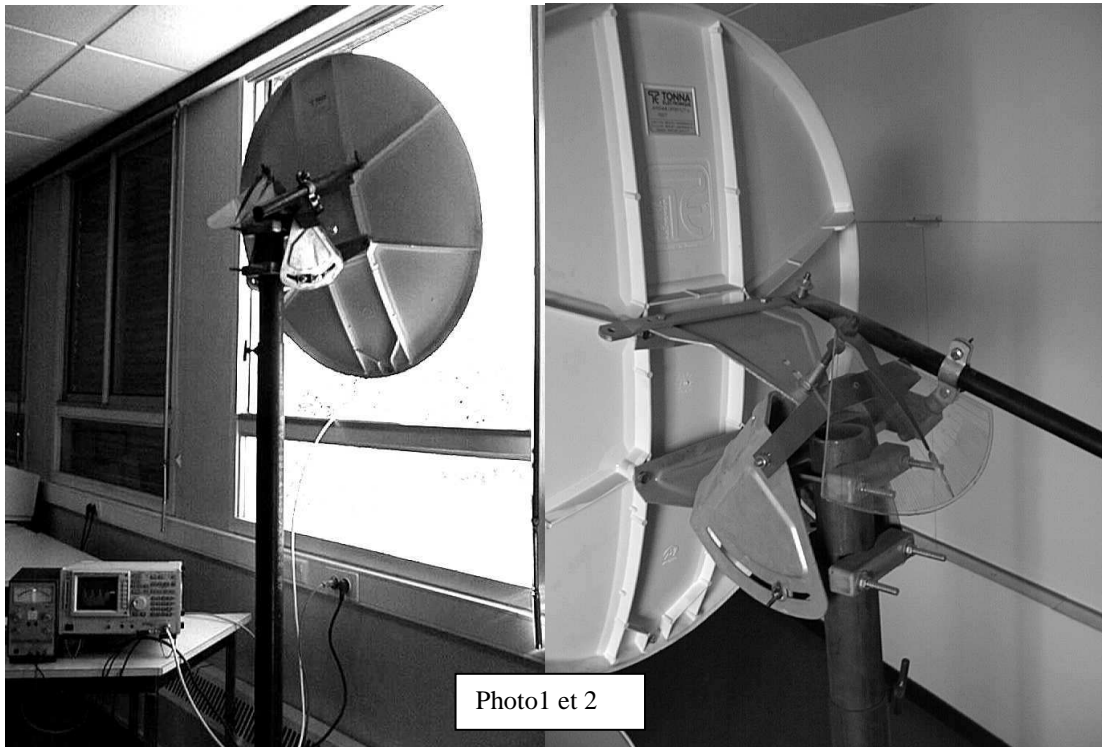


Photo1 et 2

Les photo 1 et 2 montrent le support roulant, le réflecteur parabolique et sa monture équatoriale d'origine. Nous avons ajouté un secteur transparent gradué en rotation autour de l'axe de la monture équatoriale. Cette rotation graduée est indispensable pour décrire la visée à l'est ou à l'ouest à partir de la position centrale de visée, dans le PML.

La photo 3 montre le cornet et comment est matérialisé l'interface E, qui définit le plan de sortie antenne.

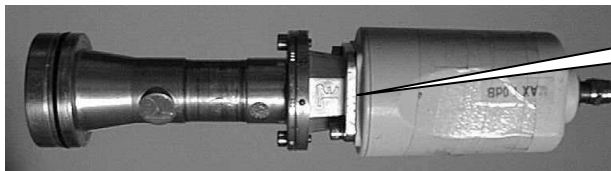
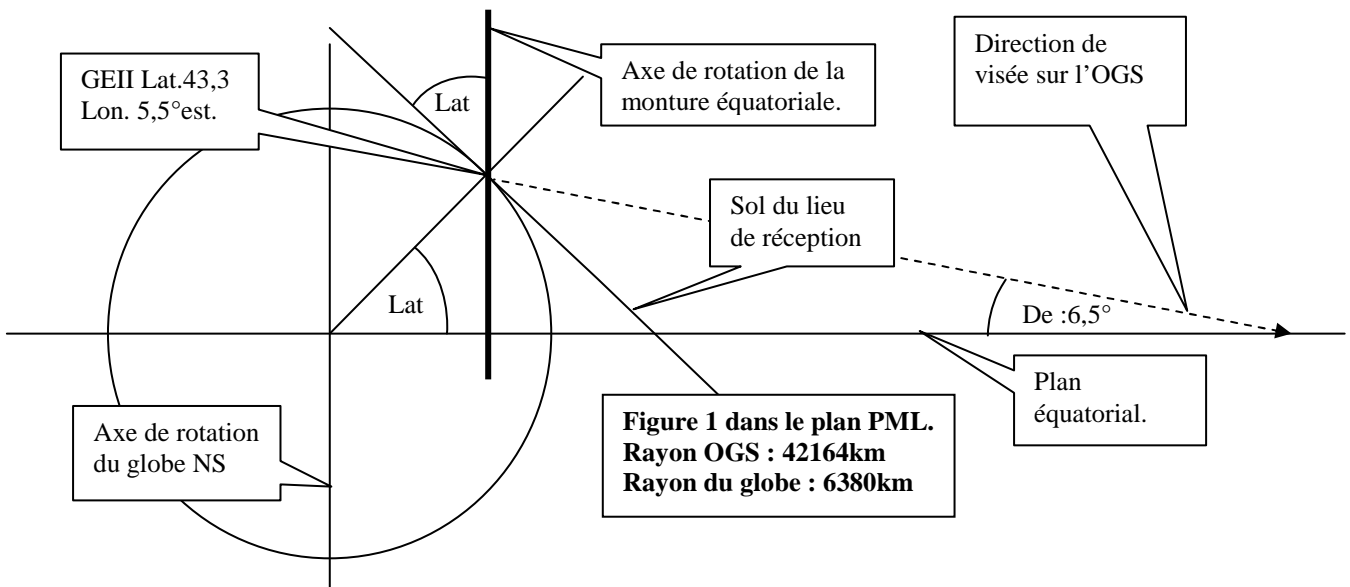


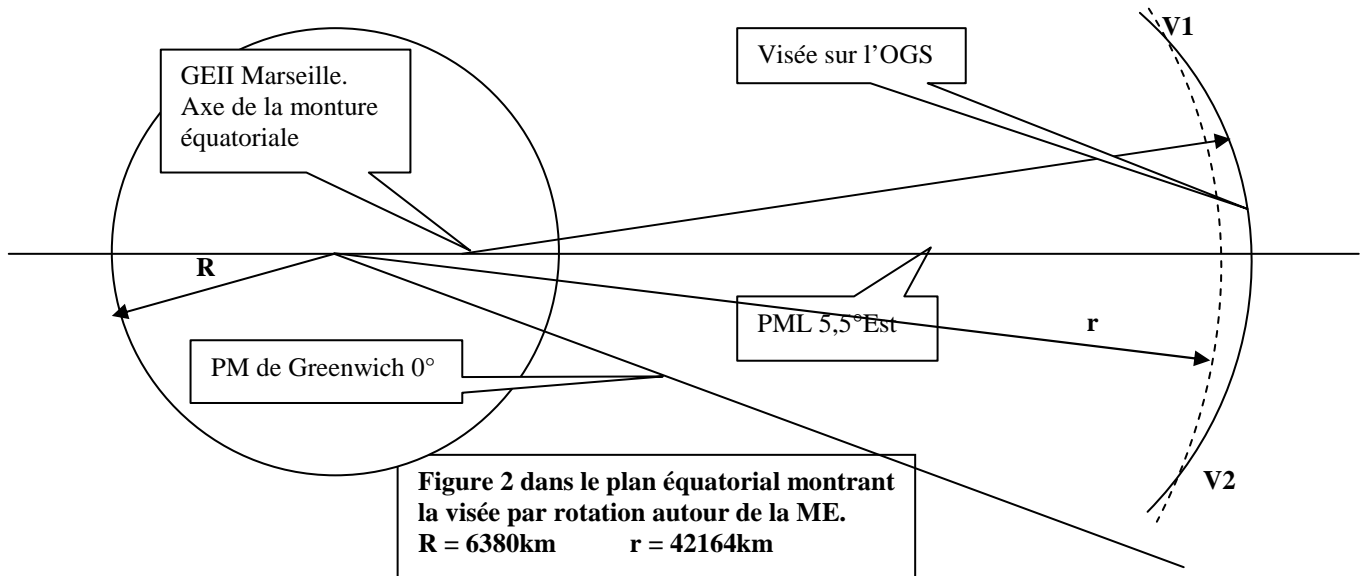
Photo 3 : l'interface E

**Déroulement du TP.
Présentation de l'environnement terrestre :**

Il s'agit de rappeler les définitions de l'OGS, du lieu de réception (LatGEII et LonGEII), du Plan Méridien Local **PML**. La figure 1 montre l'angle Lat que doit faire l'axe de la Monture Equatoriale avec le sol, ainsi que l'angle de visée De avec le plan équatorial.



La figure 2 illustre le principe de la monture équatoriale ME, qui par rotation définit la visée sur l'OGS. Cette visée décrit un cône très plat dont l'intersection avec le plan équatorial est le cercle "visée". Par conséquent le cercle "visée" coïncide avec l'OGS, en deux points symétriques V1 et V2 de part et d'autre du PML. On obtient une zone acceptable de balayage d'environ $\pm 30^\circ$ autour du PML.



Après ces petits rappels de géométrie, les élèves sont prêts à régler l'axe de la monture polaire à l'angle Lat, puis à régler la déclinaison De et enfin à placer celle-ci dans le PML.

Nous avons la chance que l'architecte ait placé le bâtiment plein sud, ce qui facilite la matérialisation du PML dans la pièce où nous faisons nos TP. (le PML est normal à la façade).

Calcul des caractéristiques de l'antenne de mesure.

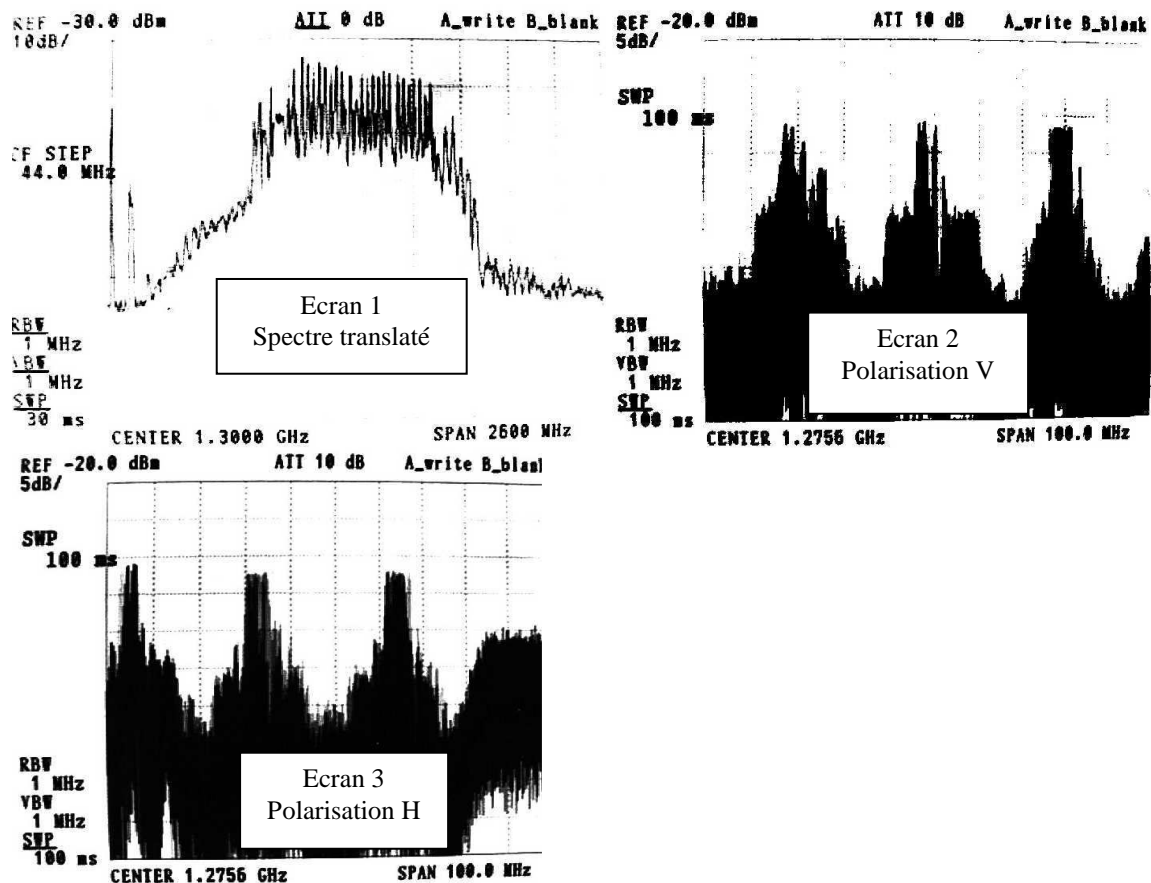
A partir de la mesure du diamètre équivalent du réflecteur (0,77 m), les élèves calculent la surface effective ($0,46\text{m}^2$) puis enfin l'aire de captation A_{cap} de $0,33\text{m}^2$. Puis cette aire de captation donne le gain absolu de l'antenne par application du principe de réciprocité, $G_a = A_{cap} / A_{iso}$ ($A_{iso} = \lambda^2 / 4\pi$) ainsi notre antenne présente un gain aux alentours de 11GHz de 38dB soit **environ 6300 fois le gain que l'antenne virtuelle de référence isotrope**. On retrouve parfaitement les valeurs annoncées par le constructeur de l'antenne.

L'ouverture angulaire liée au diamètre équivalent donne environ $1,8^\circ$ ($\gamma_{3dB} = 58 \lambda/D$), Ce qui se vérifie aisément au moment du pointage !

L'affinement du pointage, la rejection de polarisation, la puissance disponible reçue.

Bien entendu, après les calculs d'angle, on fait un premier positionnement de l'antenne, que l'on affine grâce à des satellites puissants comme Hot Bird à 13° Est ou Astra à 19° Est, dont les PIREs sont de l'ordre de 100 à 300kW.

Le convertisseur LNC adéquat (choix de la gamme de réception) et son cornet, sont placés au foyer F, puis raccordé par câble faible perte et connectique F, à l'analyseur. Un séparateur maison (ferrite et capacité CMS) permet d'alimenter le convertisseur, en isolant l'analyseur, et de voir immédiatement la gamme de fréquence restituée de 1 à 2GHz (bande BIS). Le bruit ajouté et fortement amplifié par le gain G_{LNC} de 55dB, montre parfaitement la bande satellite translatée par l'oscillateur local du convertisseur (fréquence OL de 10GHz) ; voir **écran 1**.



Les écrans 2 et 3 montrent après réglage fin de la visée deux canaux de largeur 27MHz, séparés de 19,8 MHz. Ces deux écrans 4 et 5 donnent la rejection de polarisation contrapolaire. On estime ainsi une rejection de l'ordre de 25dB entre deux canaux limitrophes. Bien entendu on passe de l'écran 4 au 5 après avoir tourné de 90° le guide d'entrée du LNC.

Après réglage soigné de la visée sur un calibre 2dB/carreaux, on obtient enfin la puissance P_r disponible reçue par l'antenne. Par beau temps on a généralement **-30dBm soit 1 μ W**, amplifié par un gain G_{LNC} de 320 000 (55dB), annoncé par le fabricant. Par conséquent, on obtient à l'interface E, c'est-à-dire à la sortie du cornet d'antenne, donc à l'entrée du récepteur, une puissance P_r , de environ **3pW**.

Le flux, la PIRE et la distance d du satellite.

Ici encore les étudiants font appel à leur compréhension du cours pour calculer en coordonnées sphériques la distance entre Astra et l'IUT de Marseille ($\approx 38000\text{km}$). ($d = r - R \sin \beta$ avec $\cos \beta = \cos \text{Lat} \cdot \cos \text{Lon}$). Ainsi le flux $\Phi(d)$ qui éclaire l'antenne est donné par P_r / A_{cap} soit **9pW/m²**, ce qui montre des ordres de grandeurs réalistes mais inhabituels aux élèves. (ils me demandent toujours s'ils n'ont pas fait une erreur de calcul !!).

Il ne reste plus qu'à remonter à la Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente du satellite que l'on suppose "naïvement" ISOTROPE. Ainsi on obtient une PIRE de $4\pi d^2 \Phi(d)$, soit environ **160kW** ou 52dB_w. On retrouve bien les valeurs annoncées. On peut estimer alors une P_f embarquée de l'ordre de 20W.

Origine du bruit capté par l'antenne et température équivalent de bruit de l'antenne, T_a .

Avec mon regard déformé d'enseignant, c'est la partie la plus amusante ou intéressante du TP ! Seule contrainte, acheter une charge adaptée de qualité pour la gamme 10 à 15GHz (en guide WR75). La deuxième difficulté est de **trouver un "point froid" dans le ciel**. Ceci donne l'occasion de faire un peu de météorologie et surtout un peu de philosophie sur l'origine du monde, et en particulier sur l'hypothèse du Big Bang.

Rappelons tout d'abord l'origine des bruits ou rayonnements captés par l'antenne.

Si notre antenne était parfaite, avec une grande directivité et pas de lobes secondaires du diagramme de rayonnement, elle capterait alors uniquement le rayonnement du fond de l'univers correspondant au résidu de Big Bang soit T_{BB} 3,8°Kelvin. Encore faudrait-il qu'elle soit embarquée très loin du système solaire ! Mais dans la réalité, la présence de lobes secondaire de réception ajoute un bruit de rayonnement de l'environnement terrestre (sol, murs, présence humaine) qui augmente la température équivalente de bruit capté de manière lourde, c'est même T_{lobes} qui est l'élément prédominant. Enfin la traversée de l'atmosphère de "gain" G_{AT} (défini en W/W) toujours inférieur à un, apporte, au même titre qu'un atténuateur, une contribution supplémentaire T_{AT} qui croit vite avec la teneur en eau du ciel traversé. **Finalem^{ent} $T_a = G_{AT} \cdot T_{BB} + T_{lobes} + T_o (1 - G_{AT})$.**

La mesure de la température équivalente de bruit de l'antenne.

La mesure de T_a se fait en deux temps, l'analyseur restant configuré de même pour les deux mesures successives de puissance, P1 et P2. L'analyseur est réglé avec une résolution moyenne, par exemple $B_{-3dB} = 100kHz$. Une fois le "point froid" du ciel trouvé (au minimum de bruit moyen sur l'analyseur), on note cette puissance **$P1 = (T_a + T_r) G_{LNC} \cdot G_{cable} \cdot k \cdot B_{-3dB}$** en W (valeur typique par temps sec $P1 = 30pW$ dans 100kHz). Avec k la constante universelle de Boltzmann $1,28 \cdot 10^{-23} J / ^\circ Kelvin$. Avec T_r qui représente la température équivalente du convertisseur LNC (on fait confiance au fabricant : $T_r = 75^\circ Kelvin$ pour un F_{LNC} de 1dB). Ensuite on remplace le cornet d'antenne par la charge adaptée, qui par définition génère une densité spectrale de puissance moyenne de bruit $k \cdot T_{phy}$ en W/Hz ou Joules (environ $4 \cdot 10^{-21}$ Joules). Ou T_{phy} est la température physique de la charge. Par conséquent l'analyseur affiche une puissance de bruit moyennée **$P2 = (T_{phy} + T_r) G_{LNC} \cdot G_{cable} \cdot k \cdot B_{-3dB}$** (valeur typique **$P2 = 100pW$ dans 100kHz) Le rapport $P1/P2 = (T_a + T_r) / (T_{phy} + T_r)$ donne la température équivalente de bruit capté par l'antenne T_a . Le fabricant annonce pour cette antenne une température minimum de $30^\circ Kelvin$, qui représente en fait **$T_{BB} + T_{lobes}$** . **Finalem^{ent} $T_a = T_{BB} + T_{lobes} + T_{AT}$ peut aller de 40° par temps très sec, à $100^\circ Kelvin$ par grosse pluie. Soit une contribution de l'atmosphère allant de 10 à $70^\circ Kelvin$.****

Conclusion sur l'effet de l'atmosphère sur le rapport Pr/N ou C/N.

On voit que l'effet de G_{AT} et par suite de T_a sur le rapport C/N agit évidemment dans le mauvais sens simultanément au numérateur et au dénominateur : $C/N = G_{AT} Pr / (T_a + T_r) k B_{-3dB}$

Toutes ces mesures donnent l'occasion aux élèves de réfléchir à la puissance de bruit qui croit comme la bande passante de l'analyseur ou du récepteur ! Il est important de leur faire estimer par exemple le rapport vu par le démodulateur TV analogique ou numérique qui présente une bande passante B_{-3dB} de 27 MHz. Les mesures de C/N à l'analyseur sont à ramener dans la bande passante effective de 27MHz ce qui revient à multiplier la puissance de bruit par 270, par conséquent cela revient à dégrader le C/N vu à l'analyseur de $10 \log 270$ soit 24dB. **On peut vérifier que le démodulateur restitue une image parfaite avec seulement 12dB de C/N.**

Pour finir, on peut vérifier le rayonnement du corps humain, ce qui amuse bien les élèves, on constate que ce rayonnement correspond à une température équivalente qui est celle de leur corps !

Conclusion .

Ce TP très près de la nature (par les notions de température de rayonnement) éclaire les étudiants sur un certain nombre de thèmes parfois abstraits comme :

Le modèle simplifié de la densité spectrale de bruit d'origine thermique, qui dit simplement que toute résistance à température physique T_{phy} génère une DSPM de bruit $k \cdot T_{phy}$. Cela permet d'introduire très simplement la température équivalente de bruit ajouté par le récepteur T_r , ou capté par l'antenne T_a .

La puissance de bruit est le produit de sa DSPM par la bande passante du récepteur. Pendant tout le TP il sont témoins de cette évidence, grâce à la résolution variable de l'analyseur!

Ce TP matérialise tous les concepts liés au trajet hertzien, depuis la source jusqu'au récepteur, en passant par le gain absolu et l'aire de captation.

Avec du matériel grand public, les mesures concordent avec une facilité déconcertante avec le cours ! Bien entendu je simplifie toutes les écritures théoriques, dans le sens ou les défauts d'adaptation ($75\Omega \rightarrow 50\Omega$) sont passés sous silence (-0,2 dB de pertes). Et de plus, je fais la confusion entre résolution de l'analyseur à -3dB, avec sa bande passante de bruit B_{bruit} , ce qui allège la présentation des calculs comme le lecteur s'en ait déjà rendu compte ! En effet un TP précédent permet la mesure de B_{bruit} de l'analyseur qui vaut

1,15 B_{-3dB}, contrairement à ce qu'annonce le constructeur !

Un peu de technologie.

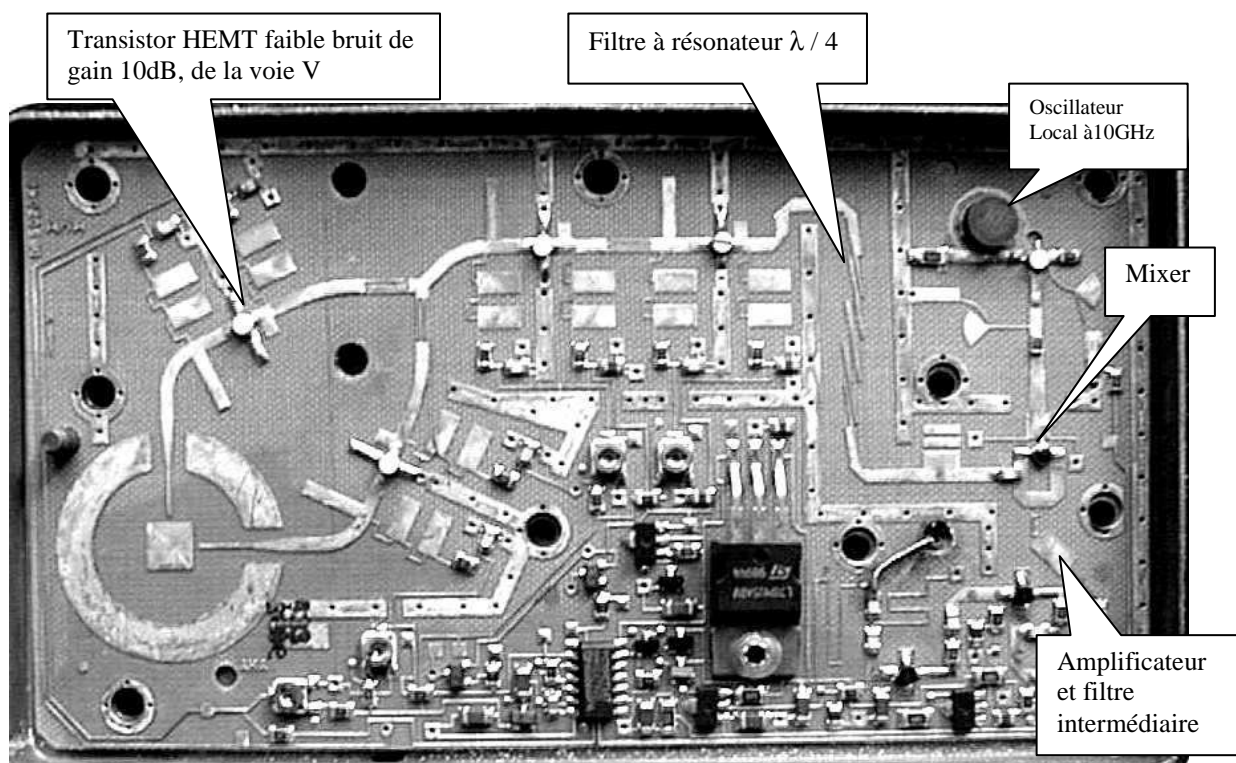
Quand le temps le permet on peut rentrer dans le détail du cornet à méplat.

Le champs orthogonal aux méplats circule plus rapidement que la composant parallèle.

La longueur des méplats (26mm) est telle que l'écart de phase des deux composantes orthogonales est de $\pi / 2$.

Ainsi toute onde à polarisation circulaire dextrogyre ou lévogyre se retrouve en phase et la résultante en sortie du cornet est à polarisation rectiligne à 45° des méplats. En orientant l'entrée le guide du LNC également à 45° toute la puissance de l'onde à polarisation circulaire est utilisée par le convertisseur.

Une analyse du convertisseur LNC, dont l'anatomie est sur la photo 5, apporte également une bonne illustration des technologies microstrip. Des réalisations simples dans ces domaines ont déjà été décrites dans



Quelques précisions concernant le matériel :

Réflecteur Tonna/Saditel de 0,77m, décentrée : offset de 26°.

Cornet toutes polarisations, CNET licence 87-149, dit cornet POTTER à méplats.

Charge en guide d'onde WR75 ORITEL reference TH75.

Analyseurs Advantest série R3261C ou plus récents.

PS mes remerciements très amicaux à Gino Gramaccia qui me fait confiance à ses risques et périls.