

RADIOASTRONOMIE

RECEPTEUR

J-J. MAINTOUX – F1EHN

Dernière mise à jour : Novembre 2008

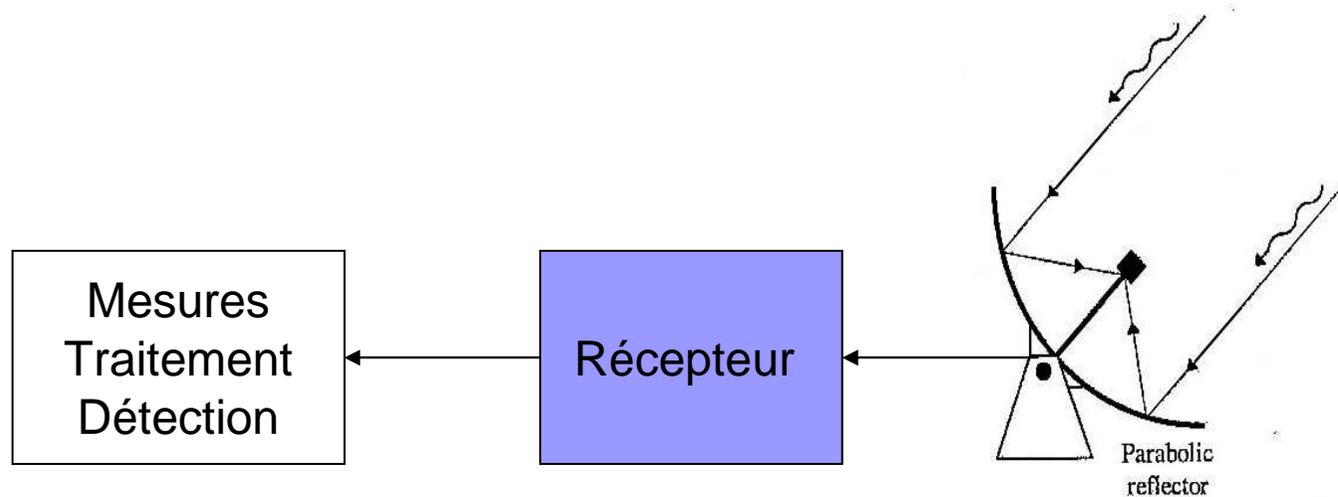


RECEPTEUR - Sommaire

- Rôle d'un récepteur
- Principales caractéristiques
- Architecture
- Principales fonctions
- Application à la radioastronomie
- Le bruit => limitation
- Bibliographie et sites web utilisés pour cette note:
 - [Wikipedia – Reception](#)
 - [Le bruit \(http://www.socard.fr/bruit0.htm\)](http://www.socard.fr/bruit0.htm)
 - [Wikipedia - Le bruit thermique](#)

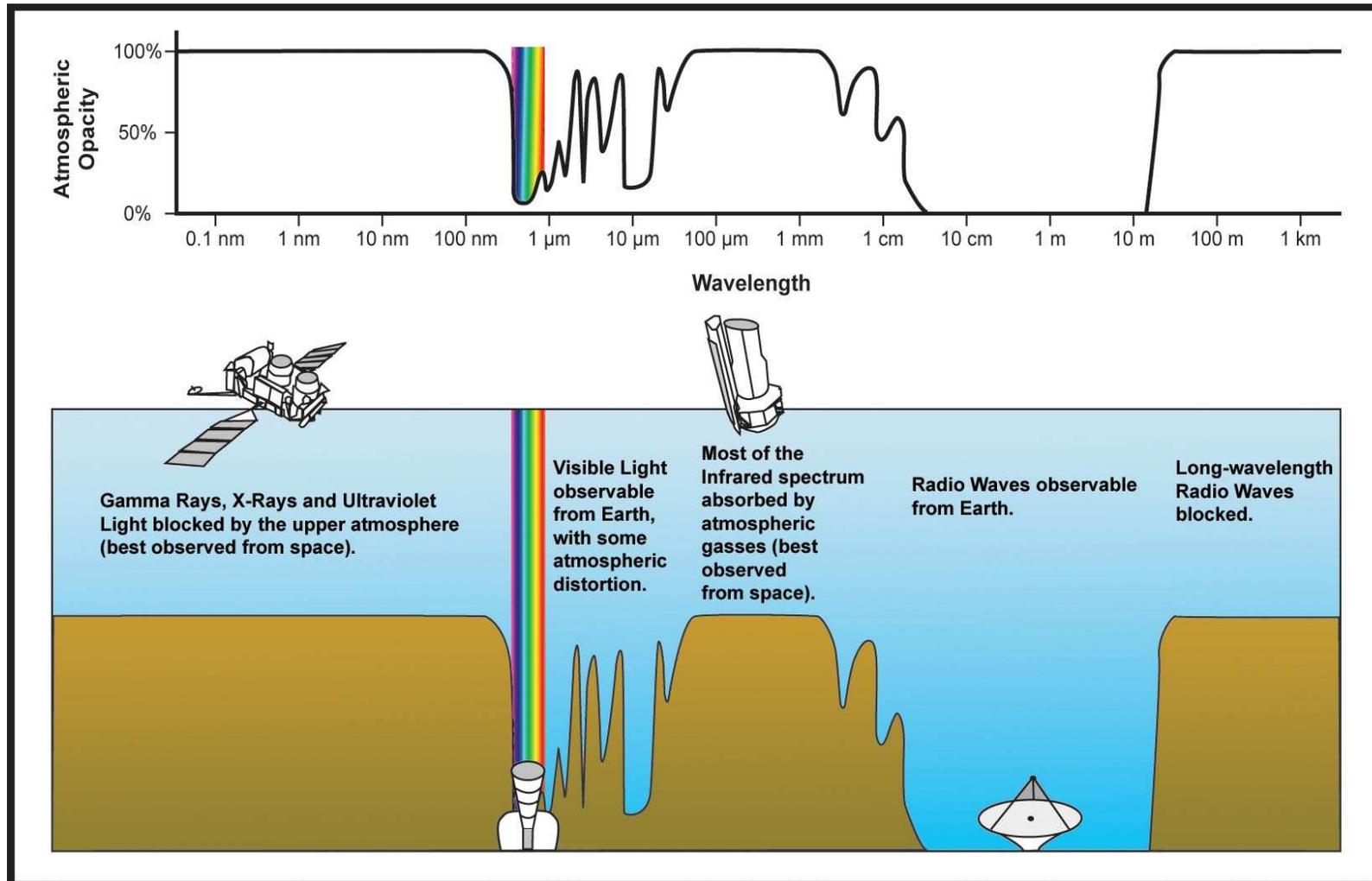
Rôle d'un récepteur

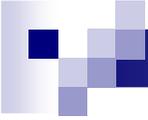
- Le rôle d'un récepteur est de permettre de restituer les informations portées par une onde électromagnétique
- Par habitude, le récepteur se situe entre l'antenne et le dispositif de sortie (détecteur / démodulateur) permettant la visualisation ou l'écoute des informations portées.



Principales caractéristiques

- Fréquence d'utilisation adaptée au besoin





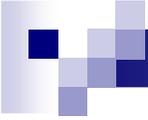
Principales caractéristiques

■ Sensibilité

- La sensibilité d'un récepteur définit sa capacité à recevoir des signaux plus ou moins faibles. Elle s'exprime de diverses façons selon les applications :
 - $0.1\mu\text{V}$ pour $S/B=10$ dB par ex
 - La sensibilité est définie en 1 point de la chaîne de réception. Elle peut varier en fonction du traitement apportée à l'information reçue.

■ Sélectivité

- La sélectivité d'un récepteur décrit l'aptitude du récepteur à séparer le signal désiré des signaux perturbateurs (tels que d'autres émetteurs à des fréquences voisines).
- Un récepteur idéal présenterait une réponse en fréquence « carrée » : réponse constante dans la largeur de bande utile, réjection totale hors du canal utile.
- Elle s'exprime en largeur de bande à -3 dB et en réjection hors-bande.



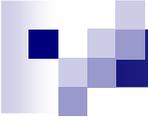
Principales caractéristiques

■ Dynamique

- La dynamique d'un récepteur s'exprime sous deux aspects :
 - Le rapport entre le signal le plus grand toléré à l'entrée avant apparition de distorsions et d'intermodulations, et le signal le plus faible (déterminé par le bruit du récepteur).
 - Le signal maximum hors bande toléré pour un niveau d'intermodulation donné sur le signal utile. Cette performance est liée à sa plage de linéarité et à sa sélectivité

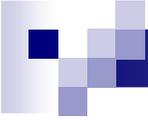
■ Stabilité

- Le terme stabilité regroupe plusieurs notions, liées aux variations des performances en fonction de la température, de la tension d'alimentation et du vieillissement.
- La stabilité s'applique généralement à la fréquence mais également au facteur d'amplification du récepteur.
- Elle s'exprime en Hz/°C ou en dB/°C et en fonction du temps (à court terme (chauffe), moyen terme (température/alimentation) et long terme (vieillesse)).



Architecture

- L'architecture des récepteurs a évolué progressivement depuis le simple détecteur, jusqu'aux schémas à multiple conversions et synthétiseurs. Les étapes principales de définition d'un récepteur pour une application sont :
 - l'analyse de la chaîne de gain : répartition, stabilité, etc.
 - l'analyse du plan de fréquence : fréquences images, fréquences parasites, etc.
 - L'analyse des filtrages: sélectivité, de réjection des images , des bandes proches, etc.
 - l'analyse de la sensibilité.
 - L'analyse des oscillateurs locaux et de leur méthode de génération : pureté spectrale, stabilité de fréquence, etc.



Architecture

■ Gain

- Le gain global du récepteur est défini par le rapport entre le niveau souhaité en sortie et le niveau le plus faible attendu en entrée.

■ Plan de fréquence

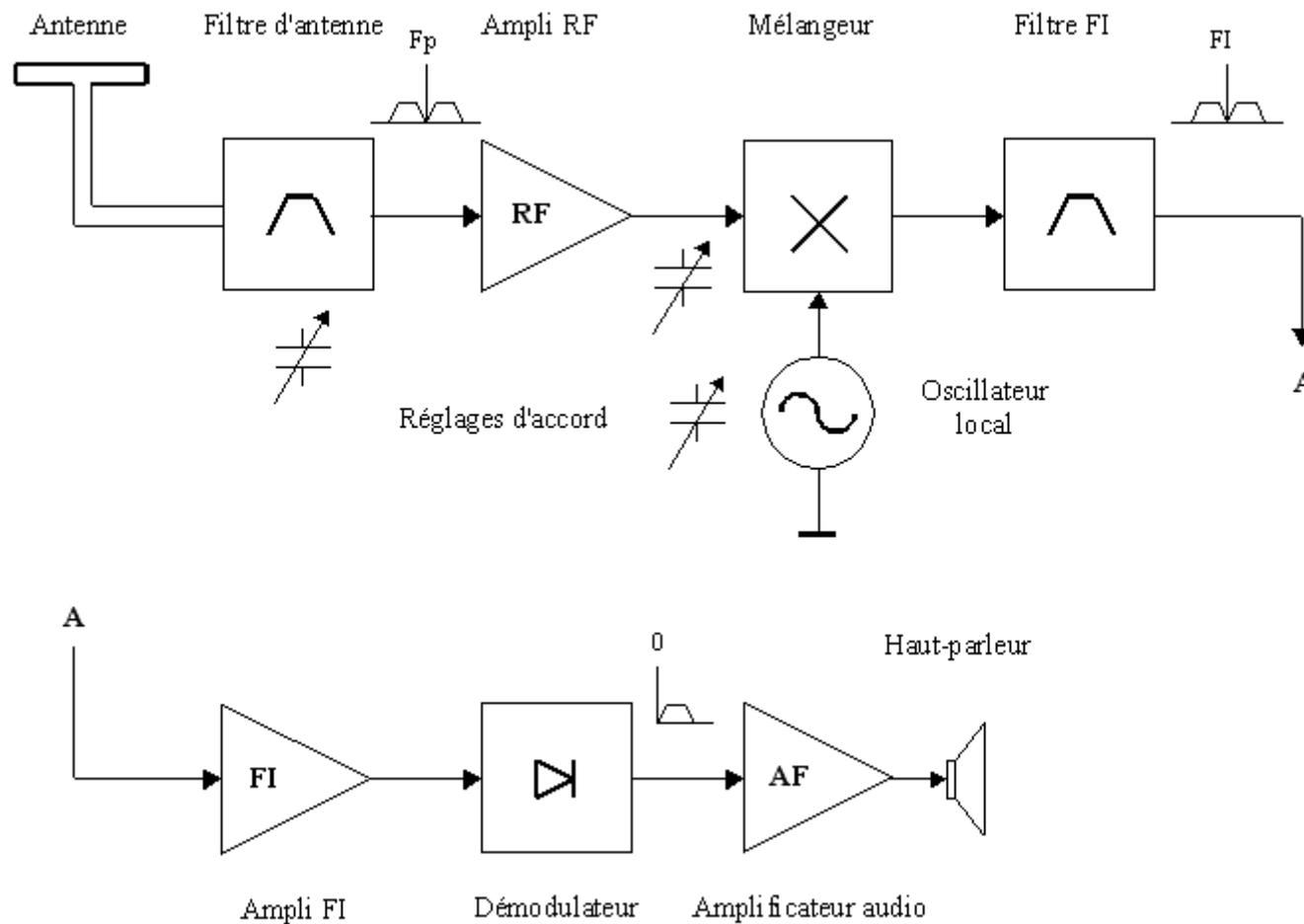
- Le plan de fréquence est le résultat des choix de changements de fréquence et de filtrage, permettant de garantir les performances de stabilité et de sélectivité de réception, avec un minimum de fréquences parasites. Il définit les méthodes de génération des oscillateurs locaux et les performances de filtrages des différents étages
- Cela peut conduire à des récepteurs à simple ou multiple changements de fréquence

■ La sensibilité

- Elle est définie à partir du signal le plus faible à recevoir et déterminée par les différents amplificateurs.

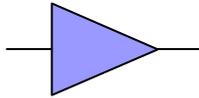
Architecture

- Schéma d'un récepteur classique à simple conversion



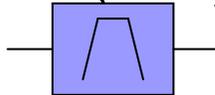
Principales Fonctions

■ Amplificateur



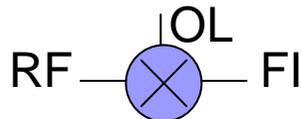
- Il est généralement conçu pour augmenter le niveau de puissance d'un signal tout en conservant le meilleur rapport signal à bruit possible (LNA) et la meilleure linéarité, si possible.

■ Filtre



- Suivant sa position dans la chaîne :
 - En étage d'entrée, il doit supprimer les signaux indésirables à des fréquences proches ou à la fréquence image
 - En fréquence intermédiaire, il doit supprimer les composantes indésirables générées par le mélangeur. D'une façon générale, il est responsable de la sélectivité de réception adaptée au signal à recevoir.

■ Le mélangeur

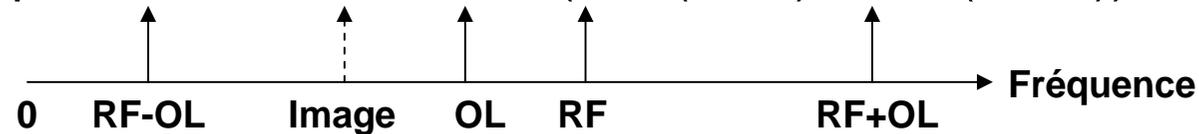


- Le mélangeur idéal est un multiplicateur. Il est utilisé pour transposer un signal en fréquence à partir d'un oscillateur local.

Principales Fonctions

■ Le mélangeur (suite)

- Rappel : $\sin a \times \sin b = 1/2 (\cos (a - b) - \cos (a + b))$



- La fréquence image RF est symétrique à l'OL et elle est souvent non désirée (éliminée par filtrage RF)

■ Oscillateur local

- Il pilote l'entrée OL du mélangeur. Sa fréquence F_o est choisie de façon à ce que la fréquence d'entrée RF soit convertie en fréquence intermédiaire FI. Il a donc deux fréquences possibles : $F_o = F_{RF} + FI$ ou $F_{RF} - FI$.
- Selon les fréquences, il peut être issu d'une chaîne multiplicatrice, d'un synthétiseur, ou d'un simple oscillateur à quartz. Son niveau de sortie doit permettre le fonctionnement du mélangeur (régime non linéaire).



APPLICATION A LA RADIOASTRONOMIE

- Préambule : La définition d'un récepteur est conduite en fonction des besoins mais aussi et surtout des moyens techniques et financiers pour une station amateur.
- En radioastronomie, la sensibilité est la caractéristique la plus importante du fait du faible niveau de puissance des signaux à recevoir. Toutefois, les autres caractéristiques (plan de fréquence, sélectivité..) doivent être définis de manière à ne pas dégrader la sensibilité.
- Un facteur important de limitation de la sensibilité est le bruit ...



Le bruit

- Le bruit est tout ce qui n'est pas le signal. Notion subjective – fautive en radioastronomie. Le rapport signal sur bruit est un indicateur pour mesurer la qualité de réception d'un signal. Ce nombre étant le rapport de deux puissances, est donc sans grandeur.
- Tout quadripôle physiquement réalisable possède des sources internes de bruit.
- Les bruits peuvent être classés selon leur aspect : c'est à dire, leur répartition statistique, leur forme oscillatoire ou le son qui leur correspond.
- Dans les circuits électriques, de manière générale, on trouve
 - le bruit blanc / gaussien; processus aléatoire dans lequel la densité spectrale de puissance est la même pour toutes les fréquences.
 - le bruit en $1/f$, ou bruit flicker, ou bruit rose; présent dans les composants actifs et dans certains composants passifs. Ses origines sont variées : il peut être dû à des impuretés dans le matériau pour un transistor.
 - le bruit en créneaux, également nommé « burst noise », ou « bruit popcorn » (l'origine est peut être dans l'imperfection des semi-conducteurs).

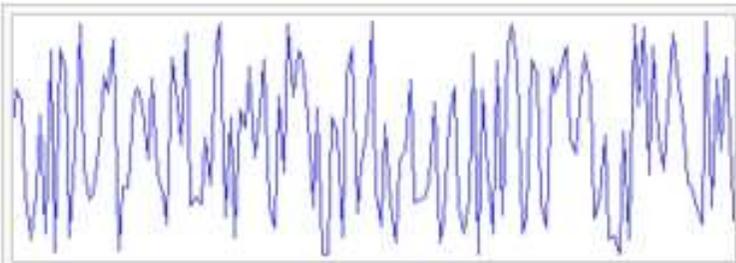


Le bruit

- Les bruits peuvent être classés suivant leur origine physique :
 - le bruit thermique (blanc, gaussien), lié aux événements de diffusion thermique ;
 - le bruit grenaille, lié au déplacement des porteurs dans un champ électrique ;
 - le bruit d'avalanche, causé par la génération en avalanche de porteurs ;
 - le bruit de génération-recombinaison, causé par la statistique de génération-recombinaison des porteurs et par extension à la statistique de piégeage-dépiégeage ;
 - le bruit quantique, qui désigne généralement le bruit lié à la statistique d'arrivée des photons dans un détecteur (CCD, détecteur infrarouge, détecteur X), en opposition au bruit électronique, causé par les électrons et trous ;
 - le bruit de quantification (causé par la numérisation d'un signal).
 - le bruit fantôme est un bruit qui n'est pas dû au milieu extérieur. Il s'agit en général d'un défaut du capteur ou dans l'électronique qui traite le signal.
- A haute fréquence, le bruit thermique est prépondérant.

Le bruit thermique

- le bruit thermique également nommé bruit de résistance, ou bruit Johnson ou bruit de Johnson-Nyquist est le bruit généré par l'agitation thermique des porteurs de charges, c'est-à-dire des électrons dans une résistance électrique en équilibre thermique. Ce phénomène existe indépendamment de toute tension appliquée.



L'agitation thermique dans une résistance se traduit par un **bruit blanc** que l'on peut mesurer, par exemple avec un oscilloscope à grande impédance d'entrée aux bornes de la résistance.



Si on analyse le même signal avec un analyseur de spectre, le bruit blanc se caractérise par un **spectre plat**.

- Le bruit thermique d'une résistance est indépendant de la valeur de cette résistance et de la fréquence, à condition que l'approximation de Rayleigh-Jeans soit valable. La puissance émise dans une bande B vaut:

$$P_b = k_B T \cdot \Delta f$$

k_B est la constante de Boltzmann, = $1,3806 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹,

T est la température en Kelvin

ΔF est la bande passante considérée (notée également B)

Le facteur de bruit

- le facteur de bruit est le rapport entre les rapports signal sur bruit (exprimés en puissance) en sortie et en entrée d'un étage. Il caractérise donc la dégradation apportée par cet étage.

$$F = \frac{S/N_{\text{entrée}}}{S/N_{\text{sortie}}}$$

- On exprime fréquemment le facteur de bruit et le rapport signal sur bruit en unités logarithmiques, les décibels. Les rapports prennent alors la forme de différences entre valeurs en dB.
- Lorsque plusieurs éléments électroniques sont mis en série, le bruit total est trouvé par la formule de Friis :

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}},$$

- On constate que le gain G_1 et le facteur de bruit F_1 du premier étage ont la plus grande influence sur le facteur de bruit global du récepteur
- Les éléments électroniques sans gain – passifs (exemple : atténuateur) ont un facteur de bruit égal à leur atténuation en dB

Facteur de bruit / Température de bruit

- En radiocommunication, en général, le signal d'entrée est fourni par une antenne, assimilée à source de résistance interne 50 ohms. La force électromotrice du bruit de la charge en entrée est donnée par la formule de Boltzman, ou par son application directe en radiocommunications: La puissance de bruit en entrée d'un récepteur chargé par une résistance à 290°K est de -174 dBm pour une bande passante de 1hz. Ainsi, un récepteur de bande passante 10 KHz recevra de la charge une puissance 40 dB supérieure, soit - 134 dBm, que l'on convertira aisément en tension sous 50 ohms.

$$P_b = k_B T \cdot \Delta f$$

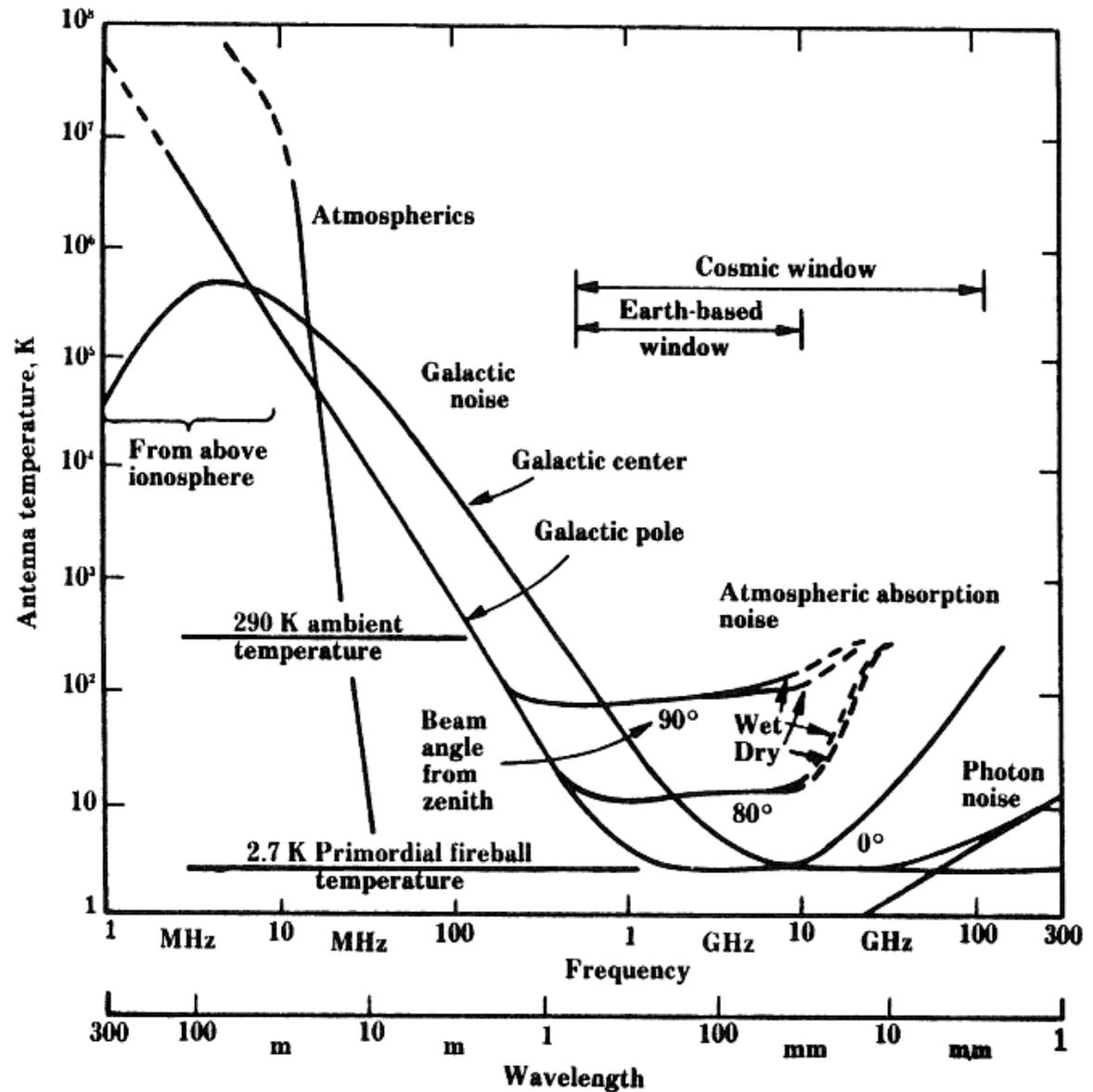
- En radioastronomie, l'antenne est dirigée vers le ciel et sa température équivalente de bruit n'est plus forcément de 290 K. Cette valeur dépend de l'orientation de l'antenne par rapport au ciel et de la fréquence de réception.

■ Conversion Facteur de bruit / Température de bruit

- Le facteur de bruit est exprimé en dB et souvent noté NF (Noise Figure).
- La Température de bruit est exprimée en K et noté T
- To est très souvent référencé à 290K
- $nf = 10^{(NF/10)} \Rightarrow T = (nf - 1) \cdot T_o$ Ex : NF = 1 dB $\Rightarrow T = 75K$
- $nf = (T + T_o) / T_o \Rightarrow NF = 10 \cdot \log_{10}(nf)$

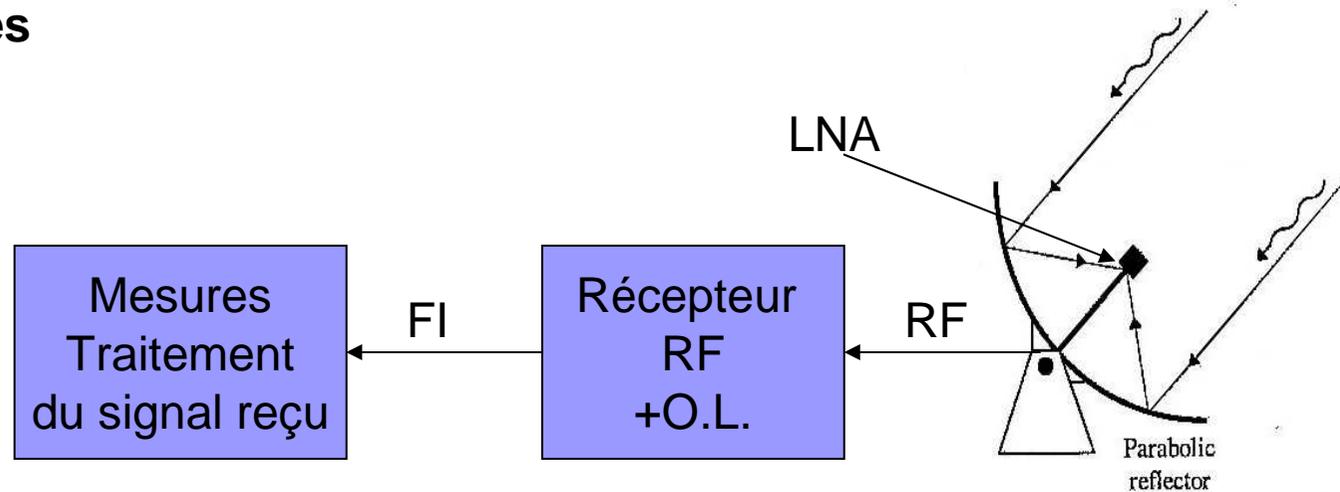
Température de bruit

- La température de bruit de l'antenne est fonction de la fréquence et de son angle par rapport au zénith. La figure donne un ordre de grandeur pour une ouverture de qq degrés (KRAUSS)



Récepteur de radioastronomie

- Le schéma synoptique reste identique pour les différentes fréquences reçues



O.L : Oscillateur local utilisé pour la conversion RF/FI => $FI = RF - OL$ par ex.

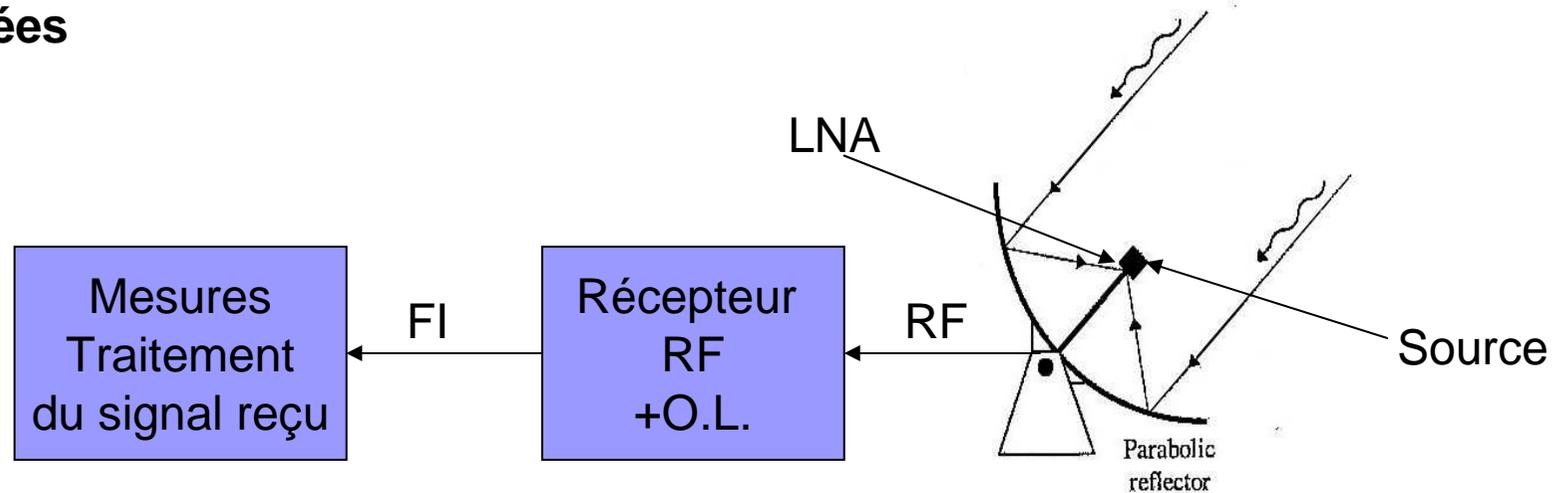
RF : Radio fréquence => correspond à la bande de fréquence utilisée

FI : Fréquence intermédiaire. Cette fréquence plus basse permet de véhiculer les signaux avec une atténuation réduite et autorise un filtrage plus sélectif adapté à la bande d'intérêt et facilite la détection et le traitement. Ces traitements sont difficiles à réaliser directement en RF.

La sensibilité de la station est déterminée par le diamètre de l'antenne (son gain) et sa température de bruit système (ici on néglige les imperfections de l'antenne tels les lobes secondaires par exemple).

Récepteur de radioastronomie

- Le schéma synoptique reste identique pour les différentes fréquences utilisées



LNA : Amplificateur à faible bruit et gain élevé. Il détermine la température de bruit du système T_{sys} en degrés Kelvin (K).

$$T_{sys} = T_{ant} + (L_r - 1) \cdot 290K + L_r T_r$$

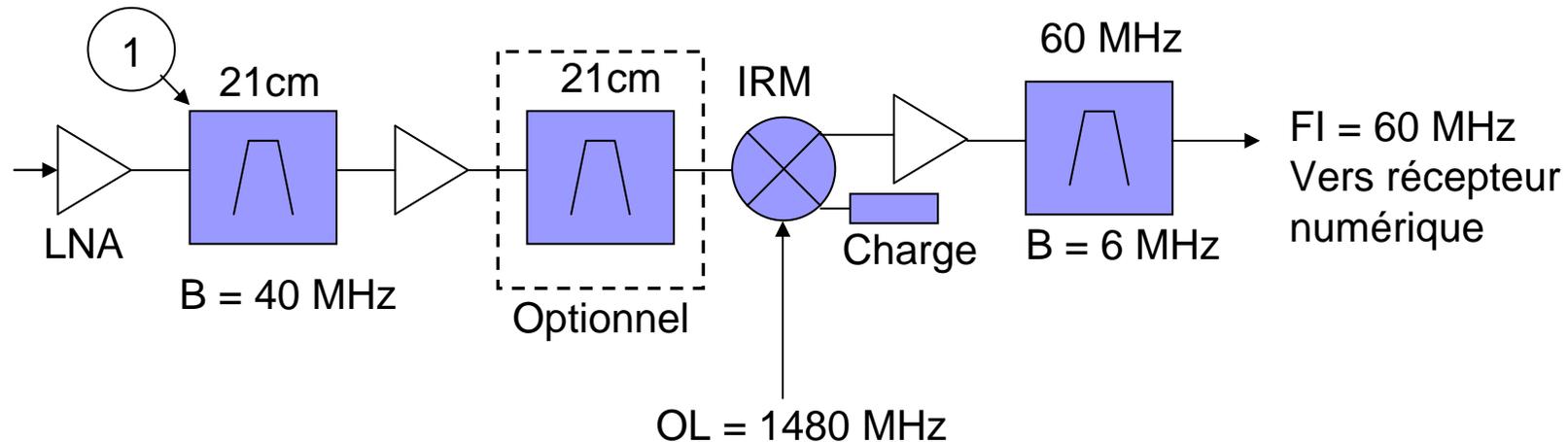
avec L_r : pertes liaisons source/LNA ex $L_r = 1.047$ (0.2dB) en 3cm
 T_r : température de bruit du récepteur (LNA si gain suffisant)
ex $T_r = T_o (nf - 1)$ soit $T_r = 75K$ (si $NF = 1dB$)
 $nf = 10^{(NF/10)}$ et $T_o = 290 K$

T_{sys} comporte donc 2 parties :

- Une partie fixe dépendant de la conception du récepteur
- Une partie variable (Température d'antenne = T_{ant}) dépendant de la direction visée par l'antenne et de ses performances (prochaine présentation).

Récepteur 21 cm

■ Schéma synoptique

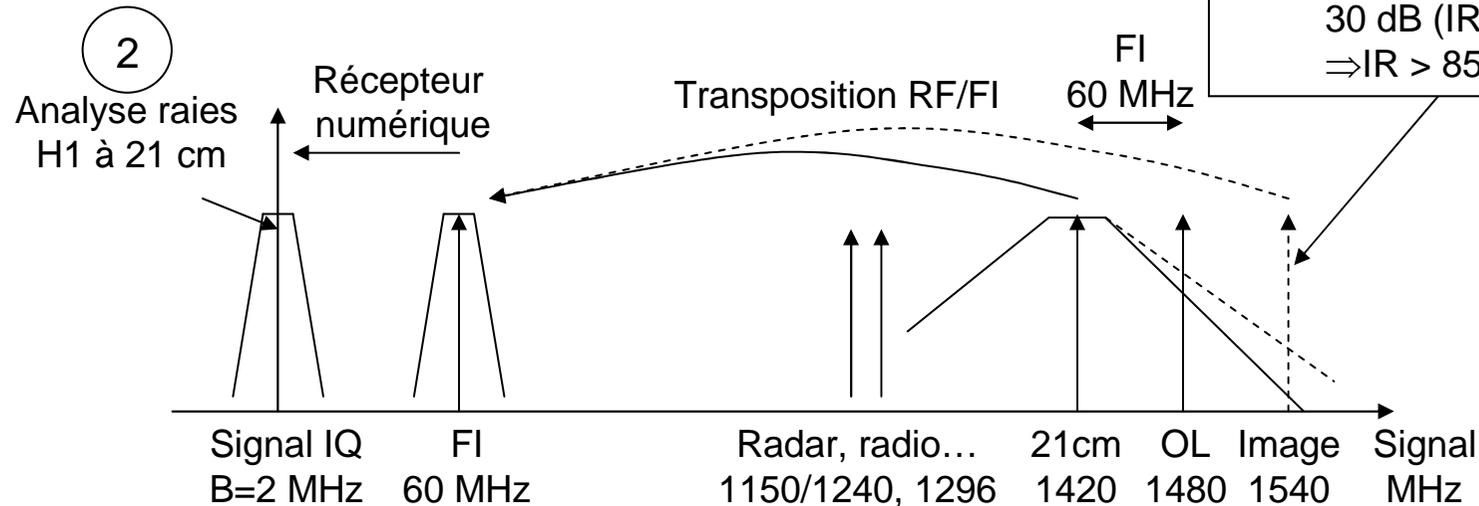


■ Gain

- Puissance d'entrée : $k.T.B - NF/LNA = 0.4 \text{ dB} \Rightarrow T_r = 30 \text{ K} - T_{\text{ant}} < 10\text{K}$
 - $T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + (L_r - 1) \cdot 290\text{K} + L_r T_r$ si $L_r = 1$ (pas de perte) alors $T_{\text{sys}} = 40 \text{ K}$
 - $P_{\text{entrée}} = 3.31 \cdot 10^{-15} \text{ W}$ soit -115 dBm
 - Puissance de sortie : définie par CAN du récepteur numérique ($P_{\text{max}} = 5\text{dBm}/14\text{bit}$)
 - Si l'on considère un codage du bruit sur 4 bits au total, le signal à coder vaut alors $5 \text{ dBm} - (10 \text{ bits} \cdot 6 \text{ dB}) \Rightarrow -55 \text{ dBm}$.
 - Le gain du récepteur est donc de $-55 + 115$ soit 60 dB .
- *Remarque : B représente la bande passante du récepteur analogique. La bande finale sera obtenue par filtrage numérique au niveau du récepteur numérique.*

Récepteur 21 cm

■ Plan de fréquence

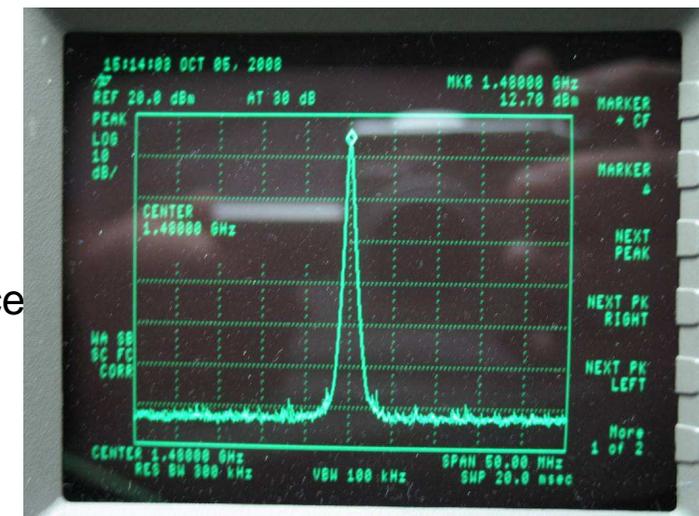
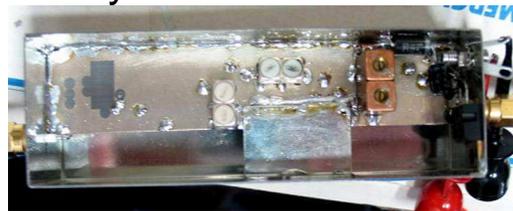


Réjection Image élevée

- Limite le risque de réception de signaux parasites
- Réjection obtenue :
 - 55 dB (filtre)
 - 30 dB (IRM)
 - ⇒ IR > 85 dB

■ Oscillateur local

- Sa fréquence est définie ci-dessus soit $RF(21cm) + FI \Rightarrow 1480$ MHz
- Elle est obtenue par multiplication par 12 d'un synthétiseur à 123.333333 MHz
- Le synthétiseur est synchronisé sur une référence GPS 10 MHz



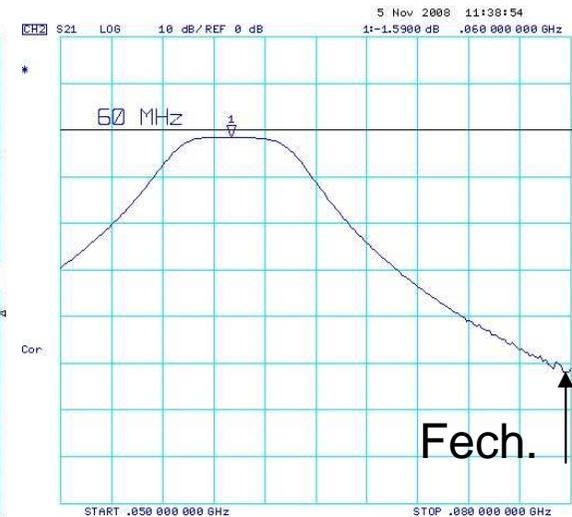
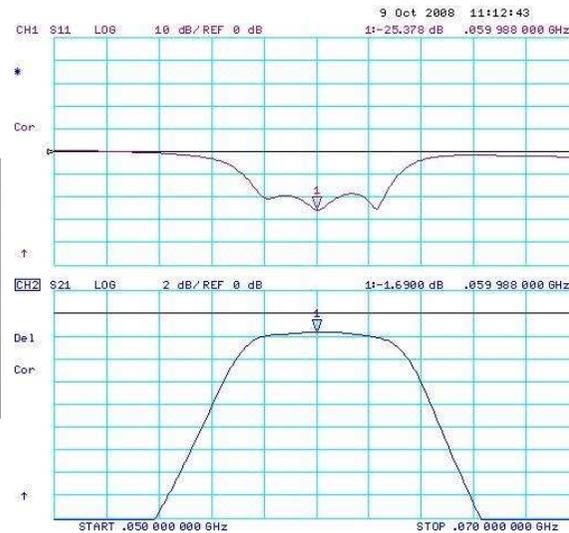
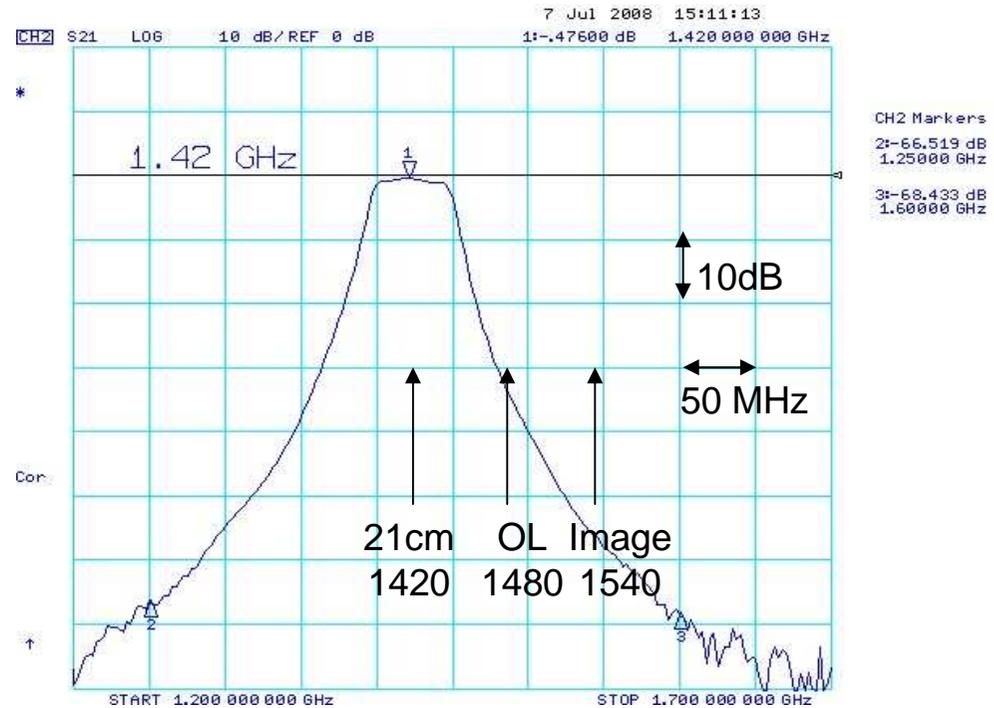
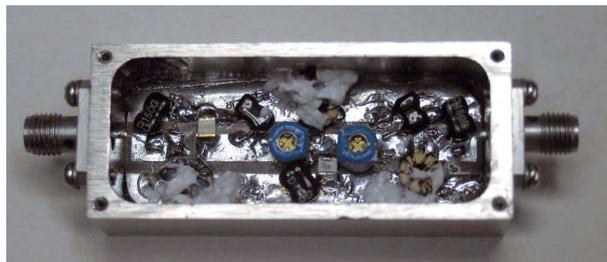
Récepteur 21 cm

■ Filtrage

- RF : réjection des signaux hors bande



- FI : bande utile et anti-repliement

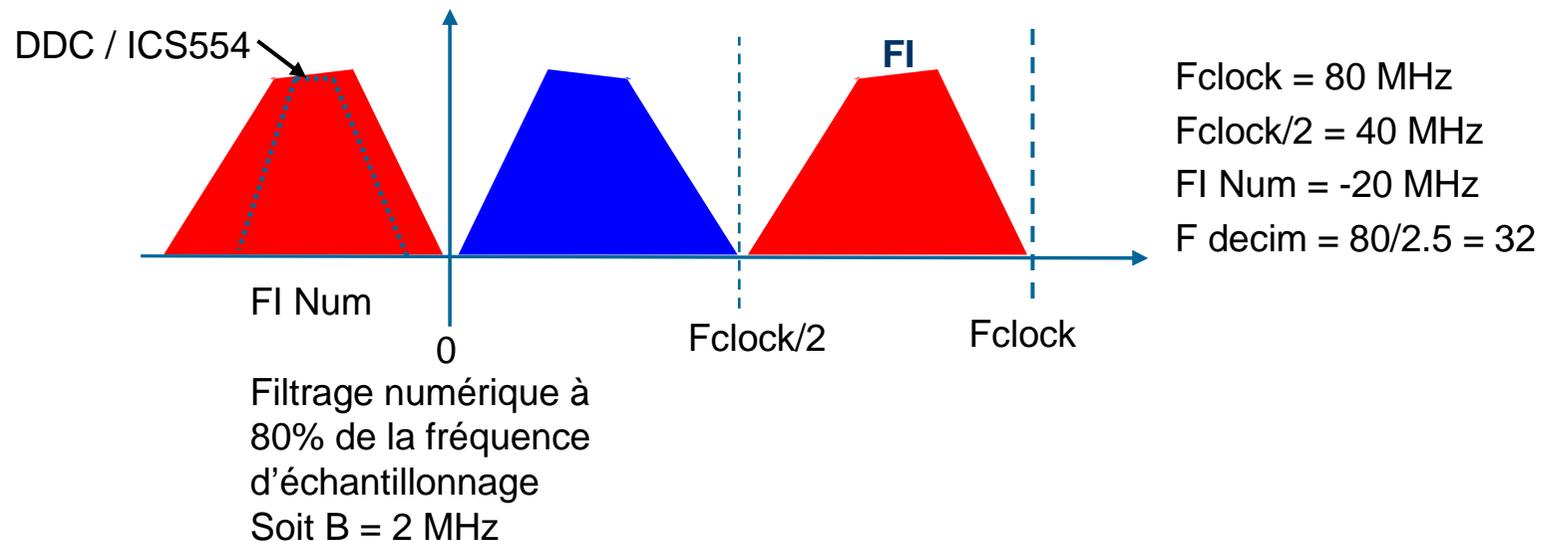


Récepteur 21 cm

- Récepteur numérique

- Identique à un récepteur analogique (gain, plan de fréquence, filtrage adapté au signal reçu).
- Travail dans le domaine complexe

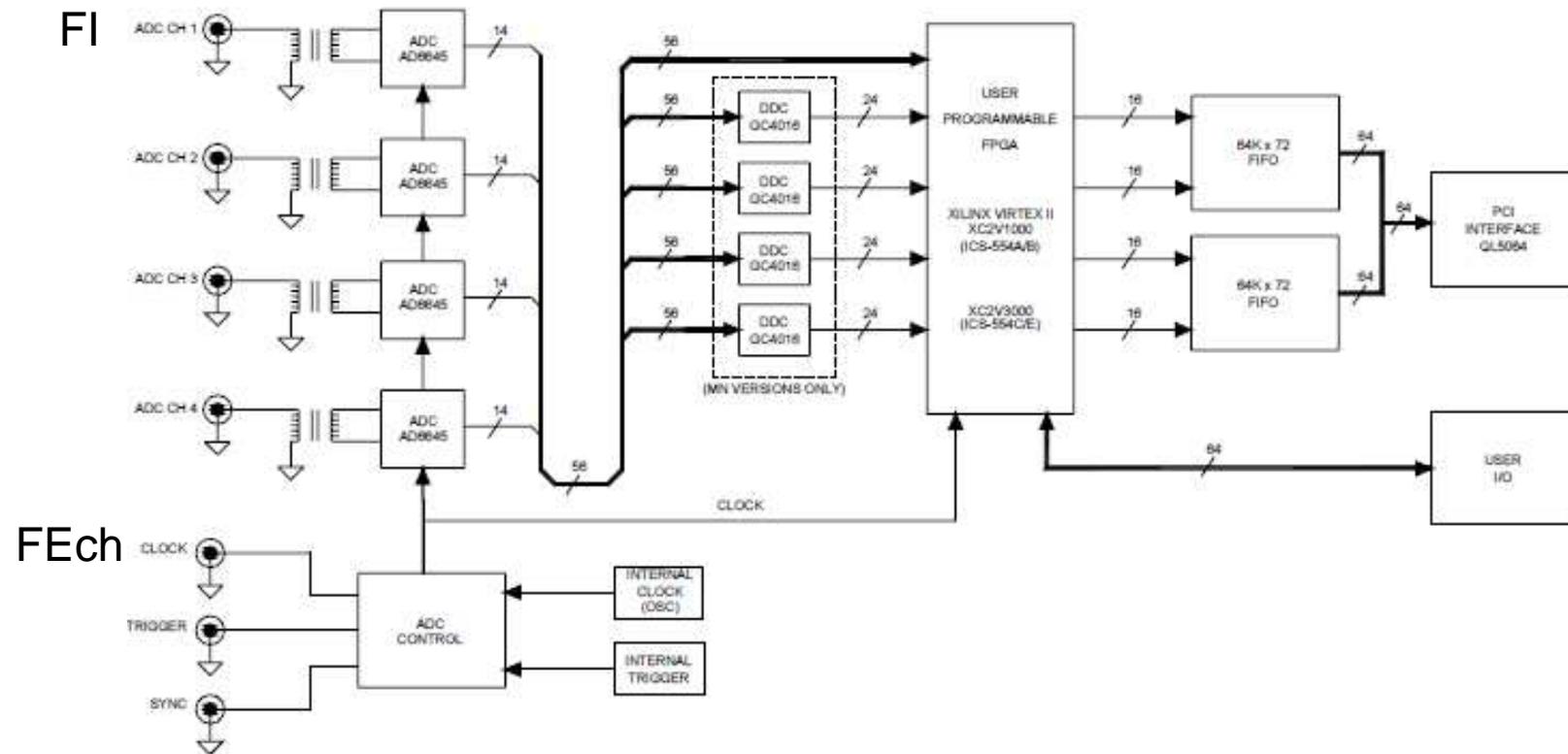
- Plan de fréquence



- La Fclock (Echantillonnage) est obtenue par une multiplication par 8 de la référence GPS à 10 MHz

Récepteur 21 cm

- Récepteur numérique



Récepteur 21 cm

- Récepteur numérique

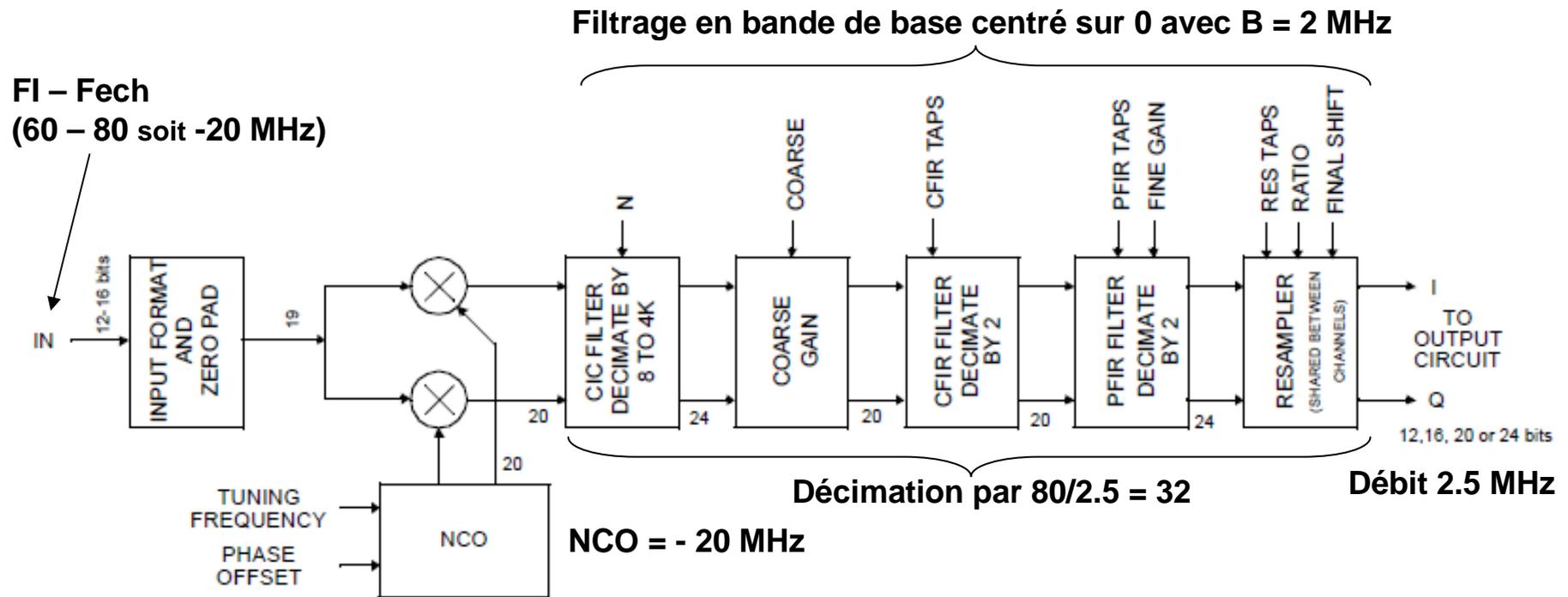


Figure 4. The Down Converter Channel



Récepteur 21 cm

- Voir Planches Station_RA_21cm