

Antennes de radioastronomie basses fréquences

Didier Charrier

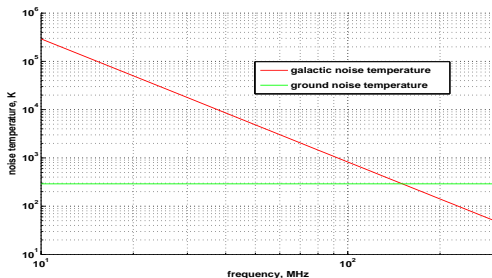
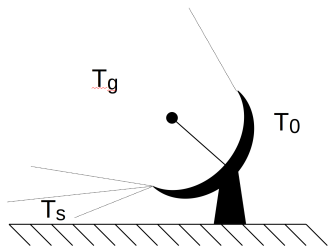
SUBATECH UMR 6457, CNRS/IN2P3, IMT-Atlantique, université de Nantes

Atelier virtuel Franco-Tunisien de Radioastronomie, 8-9 février 2021

L' antenne de réception idéale

- large bande passante : 10-90 MHz
- directivité constante et maximum sur une calotte sphérique pour $\phi \in [0^\circ 360^\circ]$, $\theta \in [0^\circ \sim 70^\circ]$, nul en dehors \Rightarrow faible directivité, $D \sim 3$ dBi
- bruit galactique - Bruit système (antenne et électronique) > 10 dB
- grande linéarité de l'électronique car présence de nombreux émetteurs en bordure de bande, OC, FM, voir TV en VHF
- discriminer deux polarisations orthogonales \Rightarrow 2 voies de lecture avec une bonne isolation
- contraintes de réseau
 - ▶ dimensions compactes (couplage inter-antenne, prise au vent, déploiement, coût)
 - ▶ faible dispersion des caractéristiques
- insensible aux variations de températures

Bruits vu par une antenne posée au sol



- bruits non anthropiques

- ▶ la température de bruit galactique, T_g au dessus de la coupure ionosphérique ~ 10 MHz
- ▶ la température de bruit rayonnée par le sol T_s (corps noir à 290 K) (et l'environnement)

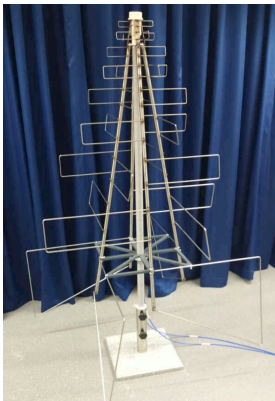
- on a $T_g = T_s = 290$ K vers 150 MHz

- ▶ \Rightarrow on néglige T_s dans 10-90 MHz
- ▶ \Rightarrow antennes directives ou écrantage du sol nécessaires à $f > 100$ MHz
- ▶ $T_g = 1250$ K à 85 MHz; $105 \cdot 10^3$ à 15 MHz

Antennes indépendantes de la fréquences

- gain, résistance de rayonnement R_r , réactance d'antenne X_a indépendants de la fréquence \Rightarrow antennes nativement large bande
- antennes log-périodiques à polarisation linéaire (LPDA)
- construites à bases d'antennes élémentaires dipôles demi-onde
- assemblage de dipôles de longueurs différentes \Rightarrow grande largeur de bande
 - ▶ \Rightarrow dipôle le plus long $\Rightarrow f_{\min}$; à 15 MHz $L_{dip} \sim 7.5\text{m}$!
 - ▶ \Rightarrow dipôle le plus court $\Rightarrow f_{\max}$; à 85 MHz $L_{dip} \sim 1.75\text{m}$
 - ▶ $\Rightarrow \nearrow$ nombre dipôle $\Rightarrow \searrow$ amplitude d'ondulation
 - ▶ avantages/inconvénients
 - ★ inconvénient : **gigantesque** à basse fréquence
 - ★ avantages : R_r quasi constante dans la bande, X_a quasi nul dans la bande \Rightarrow facilite le design du LNA
 - ★ moins sensible au bruit thermique du sol aux fréquences plus élevée. Dipôle long sous dipôle court, réflecteur
- antennes à privilégier à plus hautes fréquences

SKALA(1) antenna : 50-350MHz,
~1.2 x 1.2 x 1.8m



Nançay conical spiral log antenna :
10-100MHz, ~4 x 4 x 9m

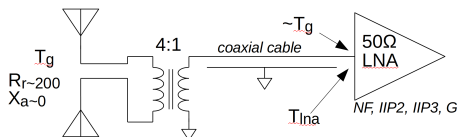


- antenne spirale conique log-périodique du réseau décimétrique de Nançay
- avantages/inconvénients : similaire LPDA

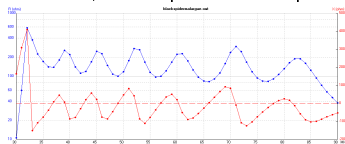
(1) *arXiv:1512.01453 E. de Lera Acedo, N. Razavi-Ghods, N. Troop, N. Drought, A.J. Faulkner*

Mise en œuvre d'une antenne passive large bande

Modèle simplifié, antenne log décimétrique et son LNA



Impédance d'antenne simulée d'une LPDA 30-80MHz, 'blackspider' AERA phase I

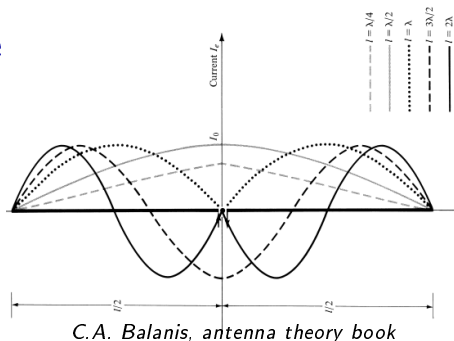


- antenne décimétrique Nançay : $R_r \sim 200 \Omega$, $X_a \sim 0 \Omega$
- long câble coaxial de l'antenne au LNA \Rightarrow **adaptation de puissance** par BALUN 4:1 au feedpoint de l'antenne
- LNA commercial 50Ω bien caractérisés possible
- en négligeant les pertes d'insertion et supposant une parfaite adaptation, il faut idéalement

$$T_{lna} < T_g^{80M} / 10, \quad T_{lna} < 140 K, \quad NF_{lna} < 1.7 dB$$

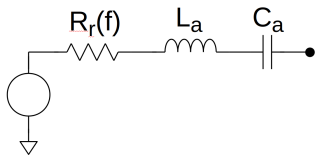
- linéarité! \Rightarrow filtre passe bande LC en entrée de LNA et IIP2/3 élevé
- ref mini-circuit : TSS-13HLN+, NF=1.4dB, IIP3=23dBm, 1.9W!
- \Rightarrow **antenne complexe, LNA 'simple'**

Antenne dipôle



- plusieurs modes de résonance possible, visible par la distribution de courant $I(z)$
 - ▶ : régime dipôle court, $l < \lambda / 10$
 - ▶ : mode fondamental demi-onde, $l \sim \lambda/2$, 1^{re} résonance = f_0
 - ▶ : mode supérieur, $l \sim \lambda$, 1^{re} anti-résonance
 - ▶ : mode supérieur, $l \sim 3\lambda/2$, 2nd résonance, etc ...
- conséquence en bande décamétrique $30 \text{ m} < \lambda < 3.3 \text{ m}$
⇒ Une antenne dipôle doit être utilisée **près du régime dipôle court et jusqu'à la première anti résonance.**

Dipôle faiblement résonnant

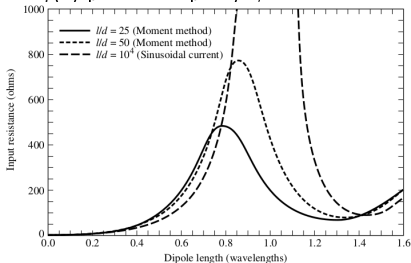


Modélisation RLC simplifiée de l'impédance d'antenne

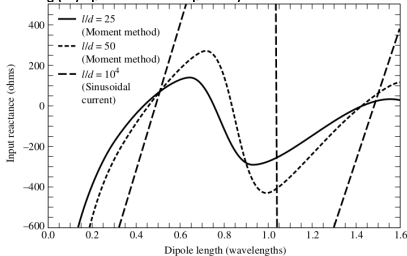
- facteur de qualité Q :
$$Q = \frac{1}{R_r} \sqrt{\frac{L_a}{C_a}} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

- $\Delta f \nearrow$: $\nearrow C_a$ et $\searrow L_a \Rightarrow$ dipôle 'épais' longueur/diamètre \searrow

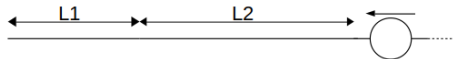
$R_r(f)$ paramétré par l/d , C.A. Balanis



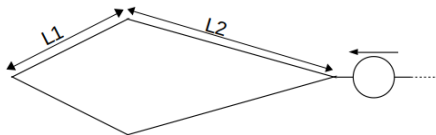
$X_a(f)$ paramétré par l/d C.A. Balanis



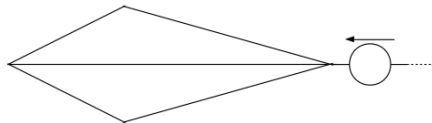
- ΔR_r et $\Delta X_a \searrow$ par $\searrow l/d$



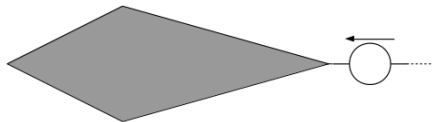
radiateur filaire fin , 1D



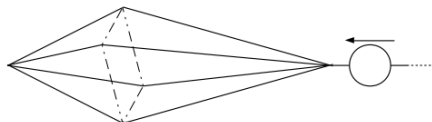
contour , 2D



surface discrétisée, 2D



surface, 2D



volume discrétisé, 3D

Quelques exemples

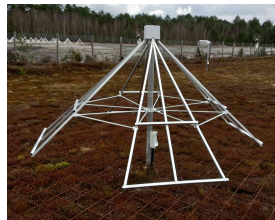
1D : LOFAR $\sim 15\text{-}85$ MHz



2D contour : prototype
GURT $\sim 8\text{-}80$ MHz



2D surface discrétisée :
NenuFAR $\sim 15\text{-}85$ MHz



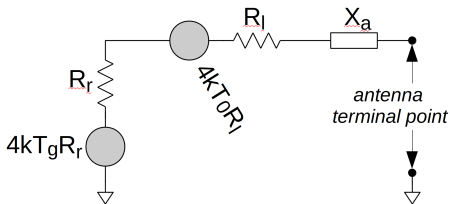
2D surface pleine : LWDA
 $\sim 15\text{-}85$ MHz



3D volume discrétisé : UTR-2
 $\sim 7\text{-}33$ MHz



Modélisation électrique de bruit dans 10-90 MHz



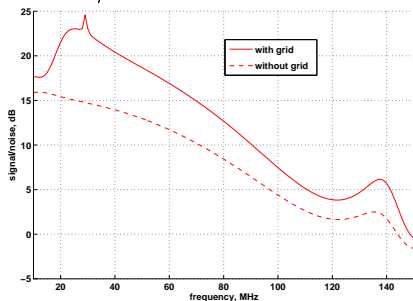
- impédance d'antenne $Z_a = R_r + R_l + X_a$
 - ▶ R_r : résistance de rayonnement 'voit' T_g dans $\Omega = 2\pi S_r$, hyp. antenne au dessus un plan infini
 - ▶ R_l : résistance modélisant les pertes 'voit' $T_0 = 290$ K
 - ▶ X_a : réactance de l'impédance d'antenne (énergie stockée en champs proche, puis rayonnée au delà)
- rapport S/B_e à 'l'entrée' intrinsèque à l'antenne

$$S/B_e = \frac{T_g \cdot R_r}{T_0 \cdot R_l} \quad , \quad (\text{remarque } \frac{R_r}{R_l} = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad \eta : \text{rendement d'antenne})$$

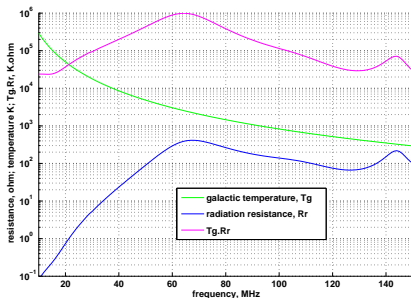
- ▶ S/B_e est une limite asymptotique du rapport **S/B** du système
- modèle limité à une antenne isotrope mais suffisant car D faible

Rapport S/B d'une antenne dipôle horizontale

S/B antenne NenuFAR



T_g, R_r and T_g.R_r



● pertes d'antenne

- ▶ pertes ohmiques, conductivité matériaux d'antenne et effet de peau, pertes négligeables
- ▶ pertes diélectrique et ohmique car sol réel(ϵ, σ) dans le champs proche de l'antenne en BF
- ▶ \Rightarrow mauvais rendement d'antenne en BF **mais T_g très forte en BF**
- ▶ $\Rightarrow S/B_e$ décroissant et **critique en HF**
- ▶ amélioration de S/B_e
 - ★ en éloignant l'antenne du sol
 - ★ par un grillage; >10 dB sous 90 MHz

Rapport S/B de l'antenne active

- le rapport S/B de l'antenne active est celui de l'antenne dégradé par le facteur de bruit du LNA F

$$S/B_s = (S/B_e)/F$$

- le Facteur de bruit d'un amplificateur est de la forme (équation du bruit) :

$$F = F_{min} + \frac{g_n}{\Re(Z_a)} |Z_a - Z_{opt}|^2$$

- avec les 4 paramètres de bruit **propre** au LNA

$g_n = i_n^2 / (4kT_0)$: bruit en courant

$Z_{opt} = R_{opt} + jX_{opt}$: l'impédance de source optimum

F_{min} : facteur de bruit optimum, contient $i_n^2 \cdot v_n^2$

Rapport S/B de l'antenne active

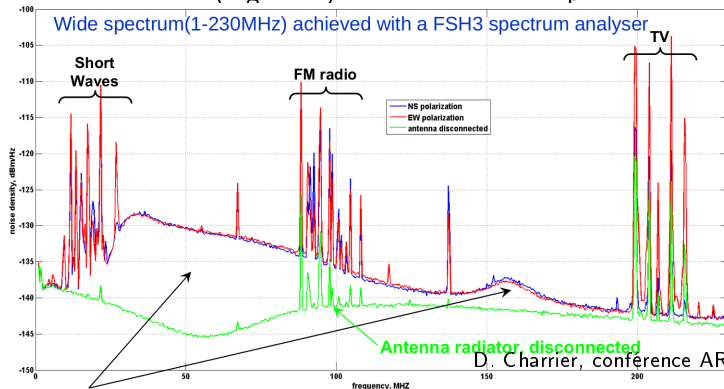
$$S/B_s = \frac{\frac{T_g \cdot R_r}{T_0 \cdot R_l}}{F_{min} + \frac{g_n}{R_r + R_l} ((R_r + R_l - R_{opt})^2 + (X_a - X_{opt})^2)}$$

- **objectif : $S/B_s > 10$ dB sur toute la bande**
 - ▶ minimiser F_{min}
 - ▶ minimiser g_n
 - ▶ \Rightarrow type, taille du transistor d'entrée, I_{dc}
- minimisation de $|Z_a - Z_{opt}|^2$ pour une antenne dipôle
 - ▶ tendre vers une **adaptation en bruit** sur les extrémités de la bande
 - ▶ intérêt d'un dipôle à faible Q sur $\Delta R_r(f)$ et $\Delta X_a(f)$
 - ▶ ajout éventuel d'un quadripôle passif de transformation de l'impédance d'antenne ("matching array")
- ces optimisations sont facilitées en se **libérant de la contrainte d'adaptation de puissance** $Z_{Ina} = Z_a^*$
- \Rightarrow nécessite de **placer le LNA au feedpoint de l'antenne**
- **antenne simple \Rightarrow LNA complexe**

Intérêts d'une antenne dipôle active

- bien que l'antenne dipôle soit à bande étroite, la croissance de $R_r(f)$ et la customisation des caractéristiques du LNA permettent d'obtenir une température galactique relativement plate en sortie de LNA et un rapport S/B important sur une grande largeur de bande

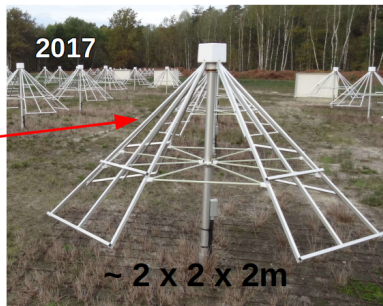
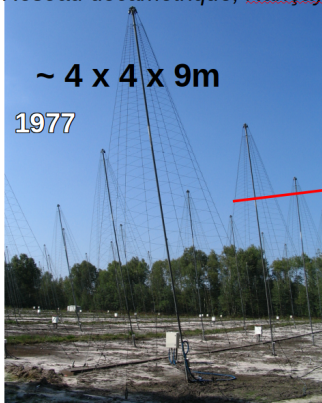
spectre sur le site d'AERA(argentine) avec une antenne dipôle active "Butterfly"



Intérêts d'une antenne dipôle active

- à la station de radioastronomie de Nançay

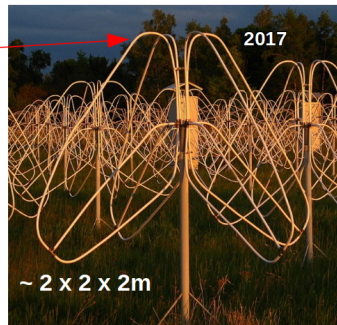
Réseau décamétrique, Nançay



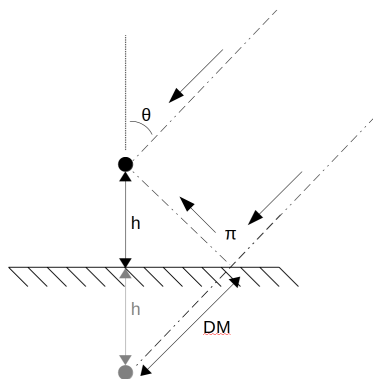
Réseau NenuFAR, Nançay

Intérêts d'une antenne dipôle active

- à la station de radioastronomie de Kharkiv



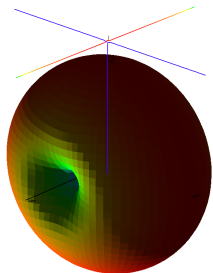
Sol parfait et interférences



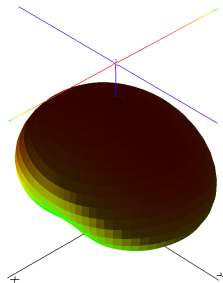
- antenne, hauteur h au dessus du sol , chemin direct et chemin réfléchi donc différence de marche DM
 - $DM = \Phi_r - \Phi_d = \frac{4\pi h}{\lambda} \cos\theta + \pi$
 - interférence constructive si $DM=0 \Rightarrow h = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow D \times 2 (+3dB)$
 - interférence destructive si $DM=\pi \Rightarrow h = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow D=0 \Rightarrow h_{max}$ ou $h=0 \Rightarrow$ plus de rayonnement !
 - pour $[15-85]MHz \Rightarrow h \sim 1.5 \text{ m}$
- antenne horizontale placée à une hauteur h au dessus d'un réflecteur parfait \iff réseau de deux antennes séparées par une distance $2h$ mais avec une phase de π sur le courant induit de l'antenne 'image'

Conséquence sur la directivité D de l'antenne

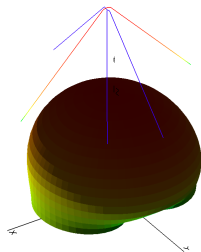
Dipole en champs libre, tore



Dipole au dessus un sol parfait, haricot

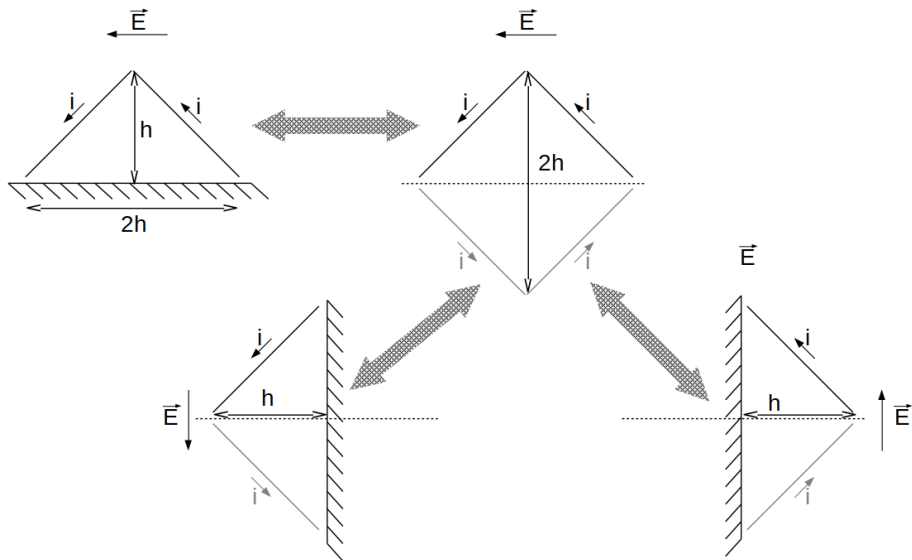


Dipole plié (V-shape) et sol parfait

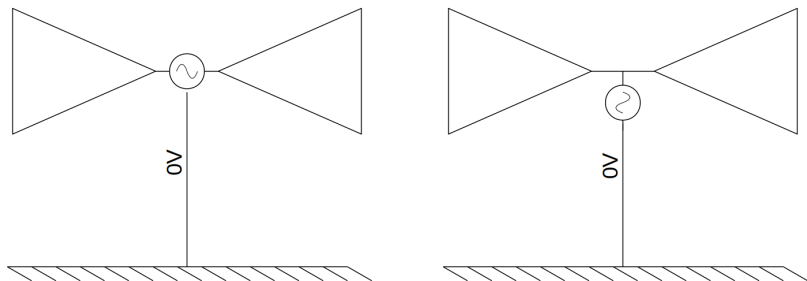


- le V-shape apporte de la sensibilité à la polarisation verticale dans le plan de l'antenne (plan E)
- \Rightarrow **meilleure isotropie**

Fonctionnement d'un V-shape



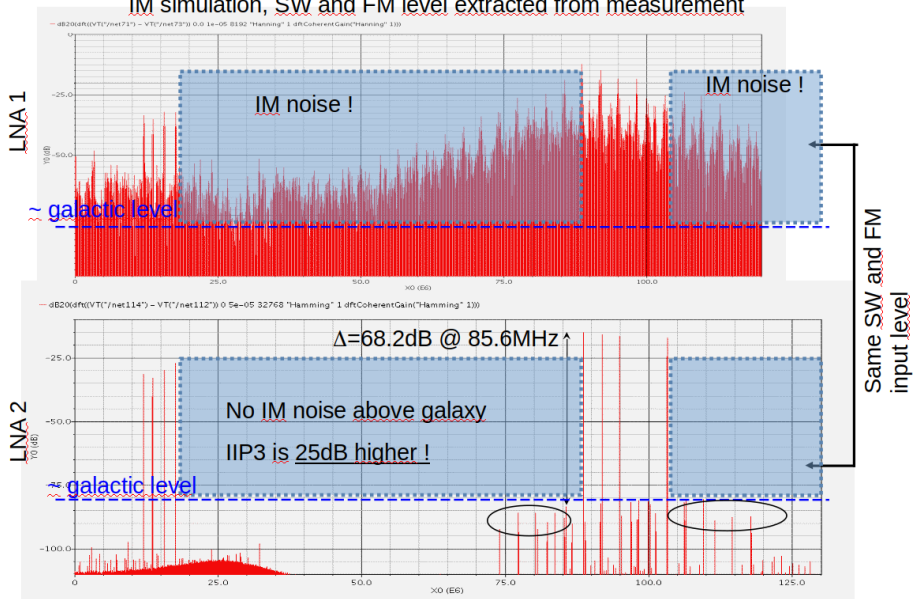
Mode commun 'parasite' sur une antenne dipôle



- mode différentiel : antenne dipôle horizontale
- mode commun
 - ▶ **'antenne' dipôle parasite sensible à la polarisation verticale**
 - ▶ pôle 1 : les 2 pôles de l'antenne
 - ▶ pôle 2 : la tresse du coaxial de sortie RF
 - ▶ ⇒ risque de saturation par des émetteurs locaux polarisés verticalement
 - ▶ solutions:
 - ★ câble coaxial à l'intérieur du mat et mât connecté au sol
 - ★ LNA avec réjection de mode commun

Importance de la linéarité

IM simulation, SW and FM level extracted from measurement



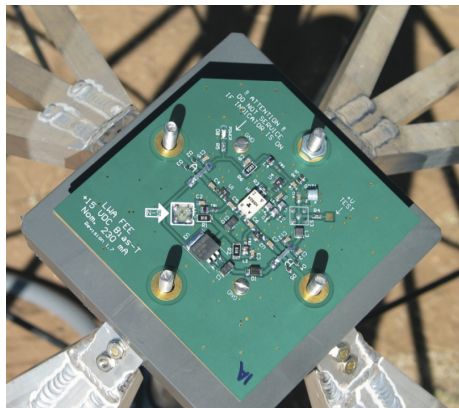
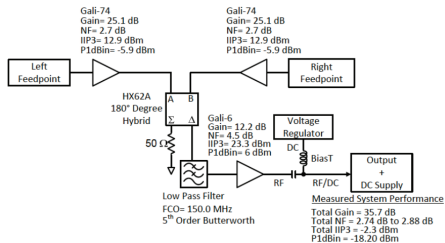
LNA, structure des circuits

- 2 étages : découpler bruit et linéarité, limiter la rotation de phase
 - ▶ étage d'entrée : optimisation du bruit
 - ▶ étage de sortie : optimisation de la linéarité
- complètement différentielle pour :
 - ▶ rejeter les harmoniques paires (IP2 ↗)
 - ▶ se passer d'un BALUN d'entrée
 - ▶ rejeter le mode commun : bruits et signal (antenne 'parasite')
- contrainte de linéarité, température, dispersions de caractéristiques
 - ▶ grand gain en boucle ouverte
 - ▶ contre réaction par un réseau linéaire
 - ★ idéalement transformateur car peu bruyant et large bande mais possible uniquement en discret
 - ★ capacités, car non bruyante mais largeur de bande ...
 - ★ résistance, large bande mais bruyant
- contrainte de point de compression élevé avec une faible tension d'alimentation si ASIC et de la 'puissance' (adaptation 50Ω en sortie)
 - ▶ maximiser le swing en sortant en différentiel
 - ▶ courant élevé dans l'étage de sortie
- **concilier bas bruit et grande linéarité**

Exemple de LNA semi discret à base de MMIC sur LWA

LWA LNA PCB

LWA LNA synoptic



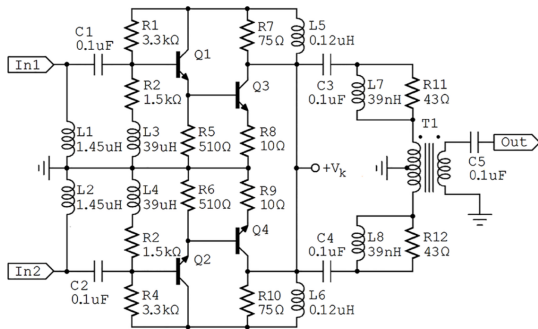
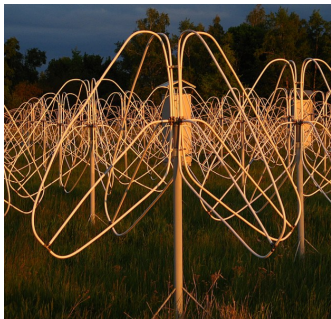
A wide-band, active antenna system for long wavelength radio astronomy, Brian C. Hicks et al.

- structure passe bande différentielle
- GALI74 - BALUN(Hybrid)180 - filtre passe bas - Gali6
- $Z_{Ina}^{in} = 100 \Omega$, IIP3=-2 dBm/-12dBV, $G=36$ dB, $G_v = 33$ dB, $P=2.7$ W

Exemple de LNA discret à base de transistor bipolaire

GURT LNA

GURT V-shape active antenna



*An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope
GURT—Part I: Design and Theoretical Model, P.L. Tokarsky et al.*

- structure pseudo différentielle Darlington
- transistor BFG67, BFG196
- $Z_{Ina}^{in} \sim 500 \Omega$, IIP3=24 dBm/21dBV, G=24 dB, $G_v=14$ dB

Exemple de LNA en technologie intégré ASIC

LONAMOS layout, 2mm^2

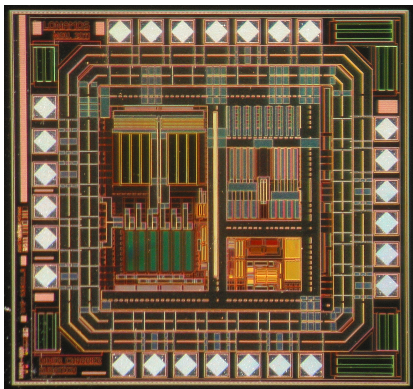
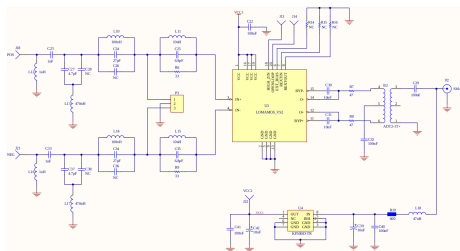


Schéma de la carte LNA NenuFAR



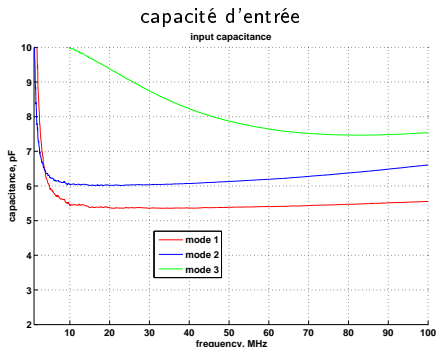
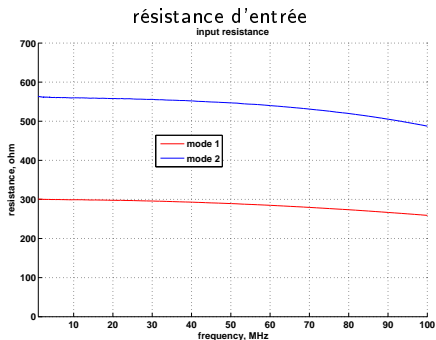
- LONAMOS : LOW Noise Amplifier in MOS technology
- structure différentielle à 2 étages, paire diff PMOS et push-pull
- contre-réaction résistive
- technologie AMS CMOS $0.35\ \mu$
- $Z_{Ina}^{in} \sim 300\ \Omega$, IIP3=6 dBm/1dBV, $G=27\ \text{dB}$, $G_V=19\ \text{dB}$, $P=0.33\ \text{W}$

Comparatif discret/MMIC/ASIC

	Avantages	Inconvénients
Discret	<ul style="list-style-type: none">● grande linéarité possible● coût prototype	<ul style="list-style-type: none">● absence de MOS● dispersion caractéristiques
MMIC	<ul style="list-style-type: none">● conception simplifiée● coût prototype	<ul style="list-style-type: none">● design non optimum ($Z_{in} = 50$ ou 75Ω)● consommation élevée● dispersion caractéristiques
ASIC	<ul style="list-style-type: none">● optimisation taille transistors● très faible bruit possible● transistors MOS● faible dispersion carac.● faible consommation● coût production de masse	<ul style="list-style-type: none">● tensions d'alimentation● temps de conception et fabrication● coût prototype● fondeur dépendant

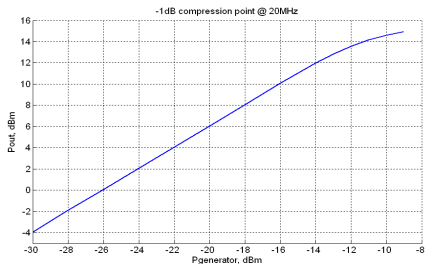
Le LNA LONAMOS, mesures

- consommation : 67 mA sous 5 V
- dérive du gain : -4m dB/K
- protection contre les décharges électrostatiques et surtensions induites par la foudre par diodes ESD internes
- **impédance d'entrée paramétrable, 3 modes**

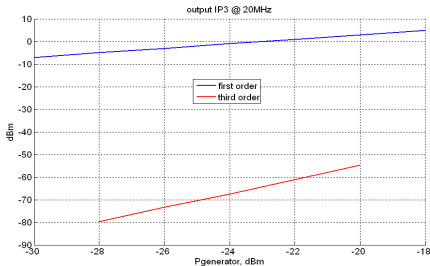


Mesures de bruit et de linéarité

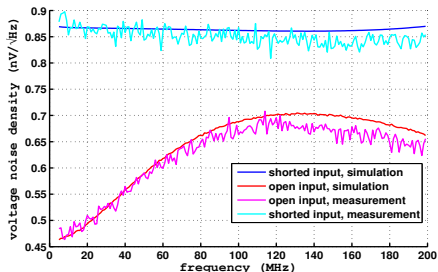
-1 dB OCP : 15dBm



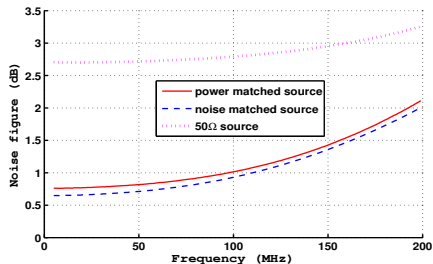
OIP3 : 33dBm



total input noise measure and simulation

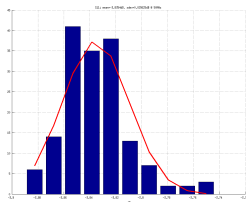


noise figure simulation

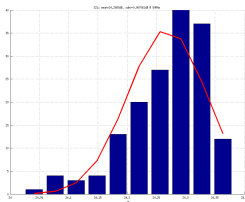


Mesure des dispersions de caractéristique, N=160

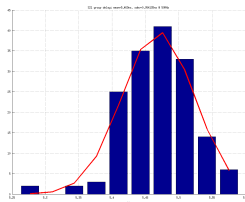
$|S_{11}|$, 50 MHz



$|S_{21}|$, 50 MHz



$-d(\text{Arg}(S_{21}))/d\Phi$, 50 MHz



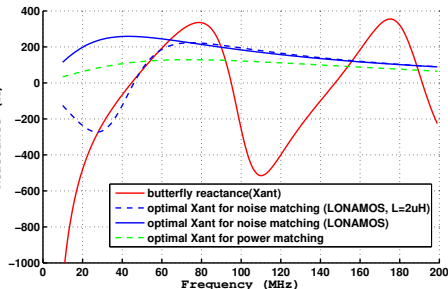
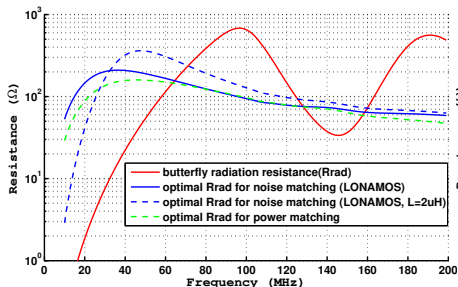
	20 MHz	50MHz	80MHz
$ S_{11} $, dB mdB	$\mu=-2.94$ $\sigma=23$	$\mu=-3.84$ $\sigma=26$	$\mu=-2.34$ $\sigma=103$
$ S_{21} $, dB mdB	$\mu=23.69$ $\sigma=64$	$\mu=24.27$ $\sigma=67$	$\mu=21.62$ $\sigma=206$
GD(S_{21}), ns ps	$\mu=5.87$ $\sigma=63$	$\mu=5.47$ $\sigma=54$	$\mu=13.2$ $\sigma=333$

- ces mesures incluent l'incertitude des composants passif externes

Z_a , Z_{opt} , LONAMOS et antenne dipôle 'Butterfly' (2)

R_r ; R_{opt} ; $R_{opt} - L_{match}$

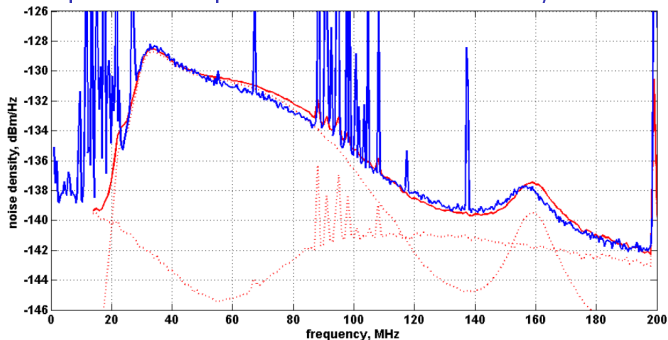
X_a ; X_{opt} ; $X_{opt} - L_{match}$



- rôle de l'inductance de shunt en entrée de LNA
 - ▶ filtre les émetteurs ondes courtes sous 15 MHz
 - ▶ rôle de 'matching array', améliore $|Z_a - Z_{opt}|$ donc le S/B
 - ▶ polarisation DC à 0 V des radiateurs pour écouler les charges accumulées vers la terre et éviter les claquages

(2) D. Charrier et al., 'Antenna development for astroparticle and radioastronomy experiments', conférence ARENA 2010, DOI : 10.1016/j.nima.2010.10.141

Bruit galactique : comparaison bruit mesuré/calculé



— **Simulation**: computed from typical values of galactic temperature (antenna directivity is neglected), simulated value of antenna impedance and measured value of LNA gain, input impedance and noise.

— **Measurement** of galactic background

Calculation is very similar to measurement without any adjustment !

Didier Charrier

ARENA 2010, June 29 – July 2, Université de Nantes

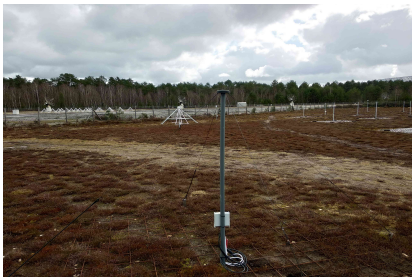
- comparaison mesure (minimum galactique) / calculé avec une antenne active dipôle ("Butterfly") en Argentine (AUGER / AERA)
- calcul : données de T_g , simulation NEC antenne et mesures du LNA

Mesures sur le ciel

- acquisition simultanée de 3 antennes différentes placées sur un banc de test comparatif à Nançay
- configuration matérielle
 - ▶ 100 m de câble coaxial, filtre passe-bande 24-82 MHz, ampli Wentek 22dB, atténuateurs d'uniformisation des niveaux, ADC NenuFAR 14b 200Ms/S 8voies
 - ▶ conversion 75/50 Ω en sortie d'antenne LOFAR
- **graphiques temps/fréquence** \Rightarrow comparer les linéarités des LNA en repérant les raies d'intermodulation
- **graphique max galactique - min galactique** \Rightarrow comparer les sensibilités des antennes actives
 \Rightarrow pour un Vshape à Nançay, $\Delta T_g \sim 2.2$ dB à 50 MHz en polarisation NW

Les 3 antennes actives en test

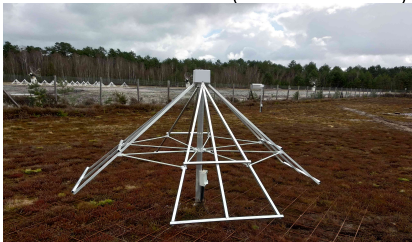
antenne LOFAR



antenne 'LOFAR' modifiée avec un LNA
LONAMOS alias *LOFARLONAMOS*



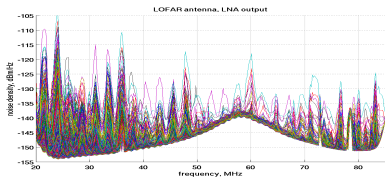
antenne NenuFAR (LONAMOS LNA)



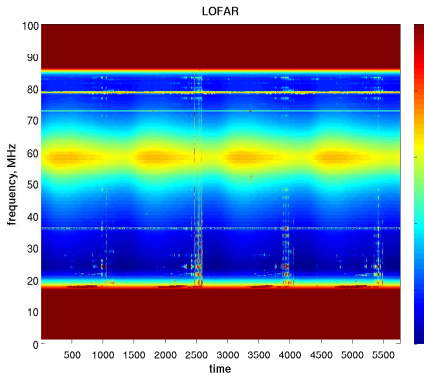
- même type d'antenne : dipôle V-shape
- dimensions comparables
- même orientation
- choix de la polarisation NW
- même grille au sol sous l'antenne

PSD : LOFAR vs LOFARLONAMOS

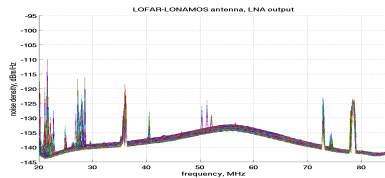
LOFAR, spectres cumulés



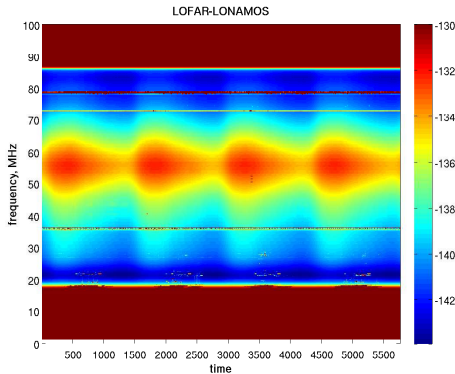
LOFAR, spectre dynamique



LOFARLONAMOS, spectres cumulés

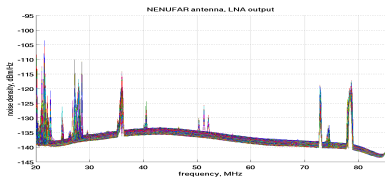


LOFARLONAMOS, spectre dynamique

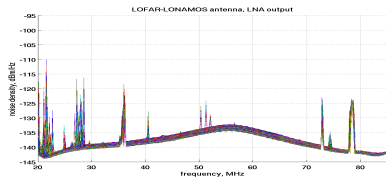


PSD : NENUFAR vs LOFARLONAMOS

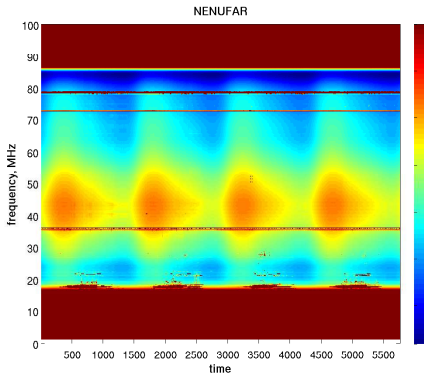
NENUFAR, spectres cumulés



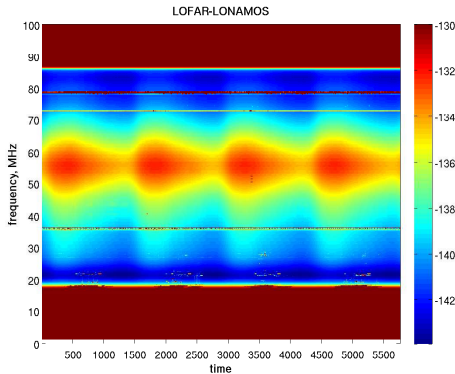
LOFARLONAMOS, spectres cumulés



NENUFAR, spectre dynamique



LOFARLONAMOS, spectre dynamique

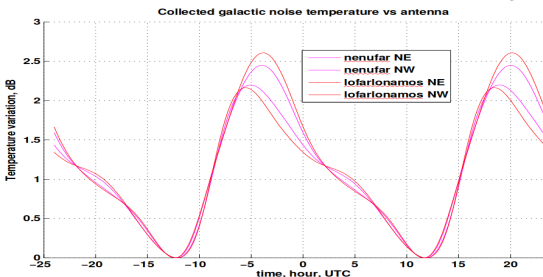


Calcul de la température de bruit collectée par une antenne non isotrope sur un ciel inhomogène à 50 MHz

- calcul à partir des données de ciel LFMAP, et du gain d'antenne simulé (NEC4)

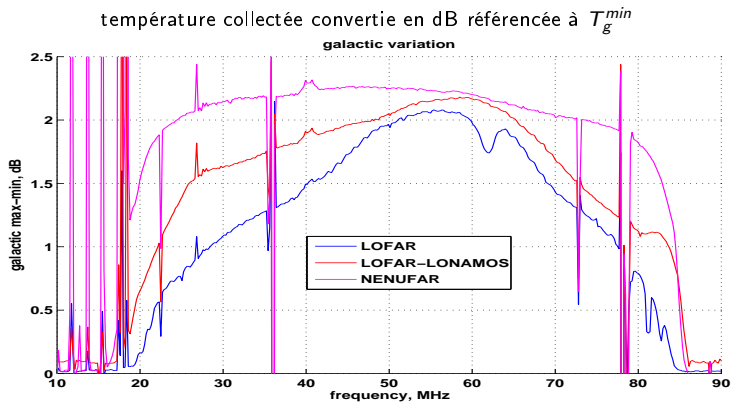
$$T_g^{ant}(f) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} G(\theta, \phi) \cdot T_g(\theta, \phi) \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi$$

température collectée convertie en dB référencée à T_{gal}^{min}



- en polarisation NW, $\Delta T_g \sim 2.2$ dB à 50 MHz avec les radiateurs LOFAR ou NENUFAR et ~ 2.5 dB en polarisation NE

Variations galactiques mesurées (max-min)dB



- la sensibilité de l'antenne LOFAR-LONAMOS n'est pas aussi élevée que celle de NENUFAR
- bien que les LNA soient identiques, le radiateur de NenuFAR est moins résonnant : Surface discrétisée au lieu d'un fil électrique fin.
- atteindre des performances similaires nécessiterait un LNA encore moins bruyant

Conclusion

- dans la bande 10-90 MHz, il est possible, avec des antennes actives d'obtenir des performances de signal/bruit aussi bonnes qu'avec des antennes ultra larges bandes passives
 - ▶ car T_g croit considérablement avec λ
 - ▶ car $T_{sol} < T_g$
- le V-shape améliore l'isotropie de l'antenne dipôle
- le LNA est crucial sur les performances de linéarité et de S/B
- mais la difficulté est de concilier faible bruit et grande linéarité
- la flexibilité de design apportée par les technologies ASIC permet d'atteindre un grand S/B
- la mécanique d'antenne est plus compacte et largement simplifiée avec une antenne active
- de futur LNAs avec des performances de bruits améliorées devraient permettre d'épurer au maximum les mécaniques d'antenne sans compromis sur les performances

Merci pour votre attention