

# Antennes de radioastronomie basses fréquences

Didier Charrier

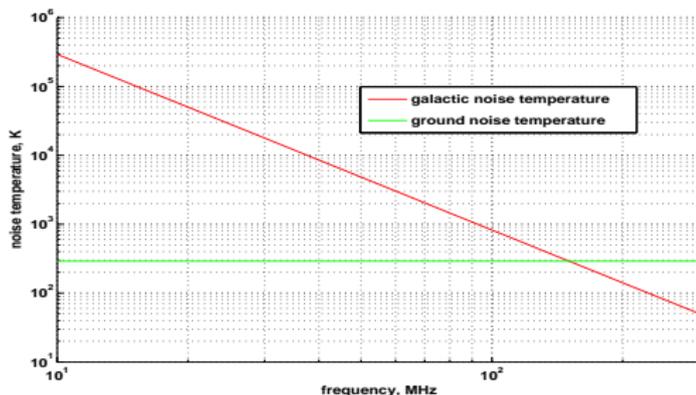
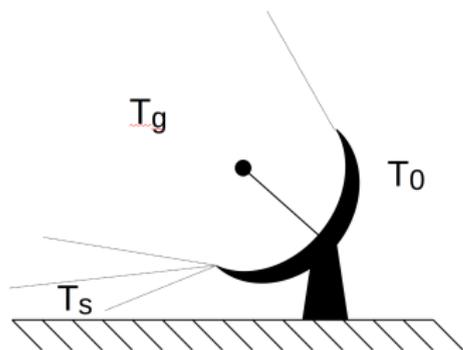
SUBATECH UMR 6457, CNRS/IN2P3, IMT-Atlantique, université de Nantes

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  $\sim 10$  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

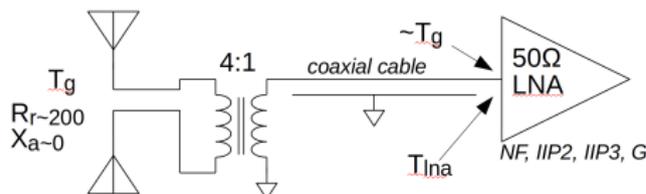


- antenne spirale conique log-périodique du réseau décamétrique de Nançay
- avantages/inconvénients : similaire LPDA

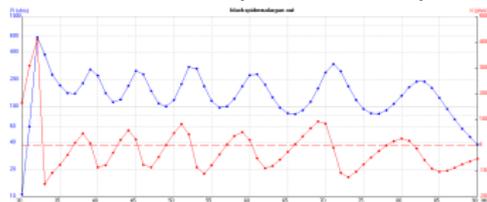
(1) *arXiv:1512.01453 E. de Lera Acedo, N. Razavi-Ghods, N. Troop, N. Drought, A.J. Faulkner*

# 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

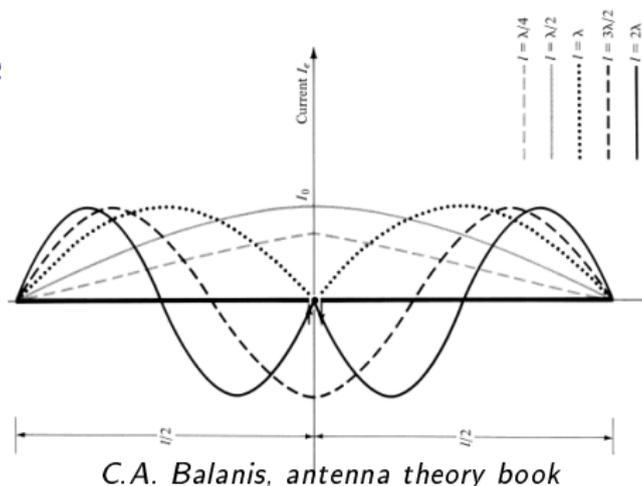


- antenne décimétrique Nançay :  $R_r \sim 200 \Omega$ ,  $X_a \sim 0 \Omega$
- long câble coaxial de l'antenne au LNA  $\Rightarrow$  **adaptation de puissance** par BALUN 4:1 au feedpoint de l'antenne
- LNA commercial  $50 \Omega$  bien caractérisés possible
- en négligeant les pertes d'insertion et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

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

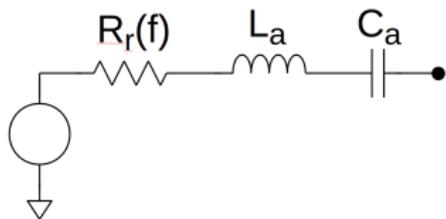
- linéarité!  $\Rightarrow$  filtre passe bande LC en entrée de LNA et IIP2/3 élevé
- ref mini-circuit : TSS-13HLN+, NF=1.4dB, IIP3=23dBm, 1.9W!
- $\Rightarrow$  **antenne complexe, LNA 'simple'**

# 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<sup>re</sup> résonance =  $f_0$
  - ▶ : mode supérieur,  $l \sim \lambda$ , 1<sup>re</sup> anti-résonance
  - ▶ : mode supérieur,  $l \sim 3\lambda/2$ , 2<sup>nd</sup> 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

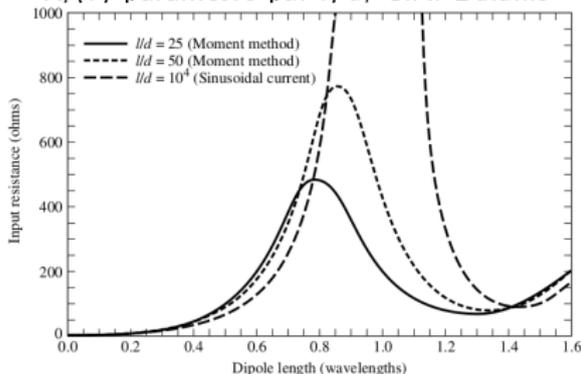


Modélisation RLC simplifiée de l'impédance d'antenne

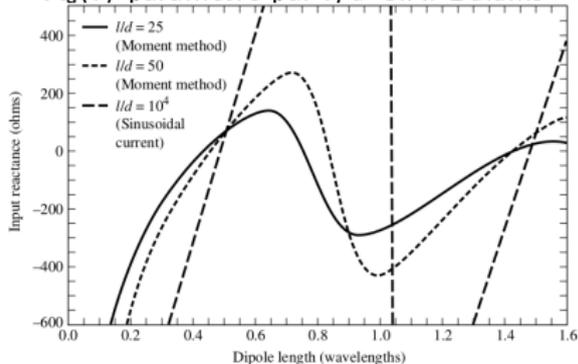
- facteur de qualité  $Q$  : 
$$Q = \frac{1}{R_r} \sqrt{\frac{L_a}{C_a}} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

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

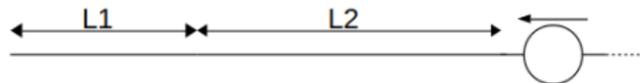
$R_r(f)$  paramétré par  $l/d$ , C.A. Balanis



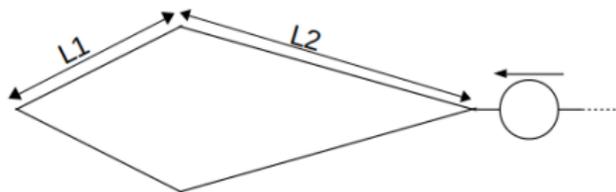
$X_a(f)$  paramétré par  $l/d$  C.A. Balanis



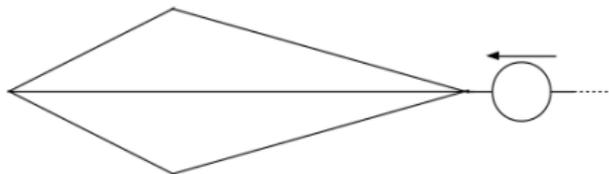
- $\Delta R_r$  et  $\Delta X_a \searrow$  par  $\searrow l/d$



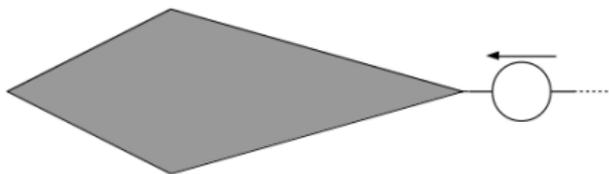
radiateur filaire fin , 1D



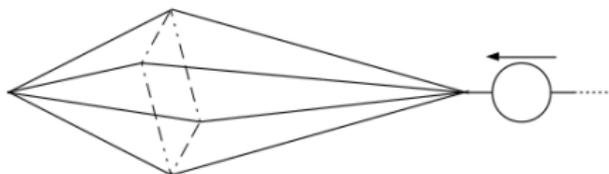
contour , 2D



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



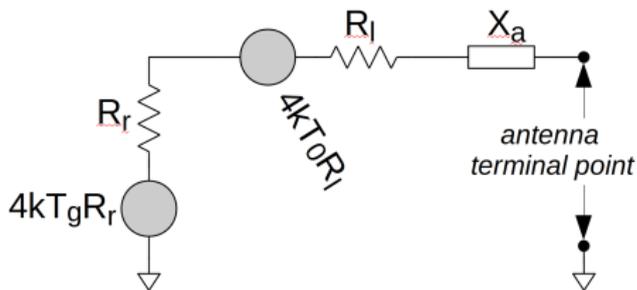
2D surface pleine : LWDA  
 $\sim 15\text{-}85$  MHz



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



## Modélisation électrique de bruit dans 10-90 MHz



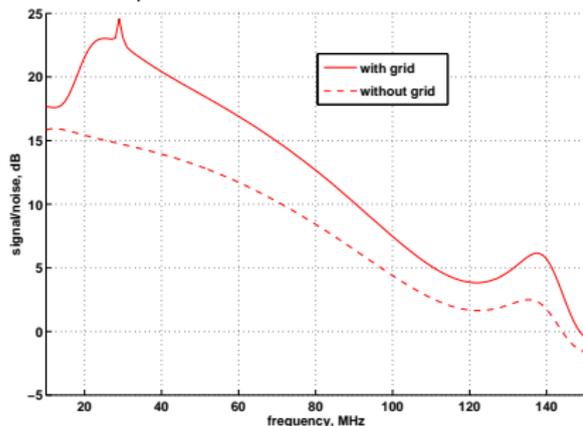
- impédance d'antenne  $Z_a = R_r + R_l + X_a$ 
  - ▶  $R_r$  : résistance de rayonnement 'voit'  $T_g$  dans  $\Omega = 2\pi S_r$ , hyp. antenne au dessus un plan infini
  - ▶  $R_l$  : résistance modélisant les pertes 'voit'  $T_0 = 290$  K
  - ▶  $X_a$  : réactance de l'impédance d'antenne (énergie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

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

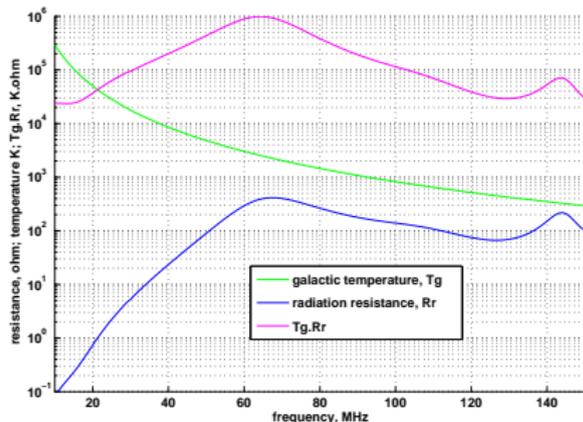
- ▶  $S/B_e$  est une limite asymptotique du rapport  $S/B$  du système
- modèle limité à une antenne isotrope mais suffisant car  $D$  faible

# Rapport S/B d'une antenne dipôle horizontale

S/B antenne NenuFAR



T<sub>g</sub>, R<sub>r</sub> and T<sub>g</sub>.R<sub>r</sub>



## ● pertes d'antenne

- ▶ pertes ohmiques, conductivité matériaux d'antenne et effet de peau, pertes négligeables
- ▶ pertes diélectrique et ohmique car sol réel( $\epsilon, \sigma$ ) 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

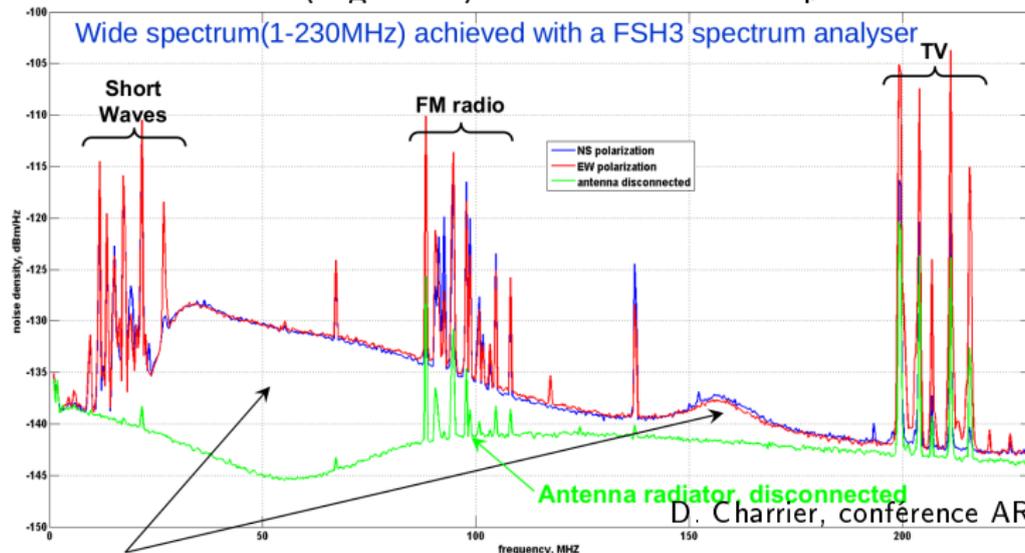
$$S/B_s = \frac{\frac{T_g \cdot R_r}{T_0 \cdot R_l}}{F_{min} + \frac{g_n}{R_r + R_l} ((R_r + R_l - R_{opt})^2 + (X_a - X_{opt})^2)}$$

- **objectif :  $S/B_s > 10$  dB sur toute la bande**
  - ▶ minimiser  $F_{min}$
  - ▶ minimiser  $g_n$
  - ▶  $\Rightarrow$  type, taille du transistor d'entrée, I<sub>dc</sub>
- 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"

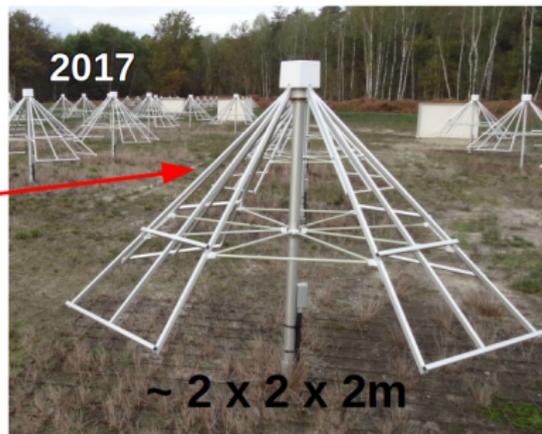
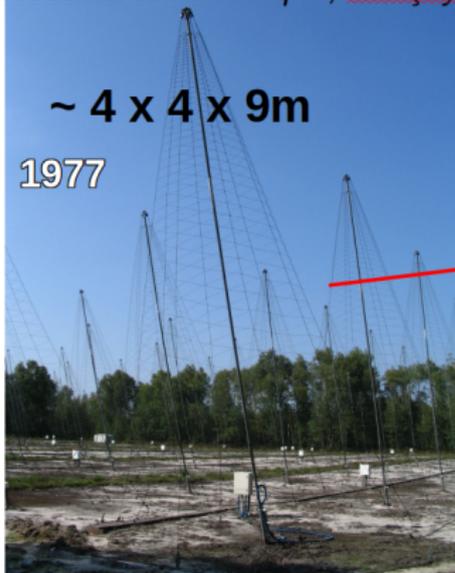


D. Charrier, conférence ARENA 2010

# Intérêts d'une antenne dipôle active

- à la station de radioastronomie de Nançay

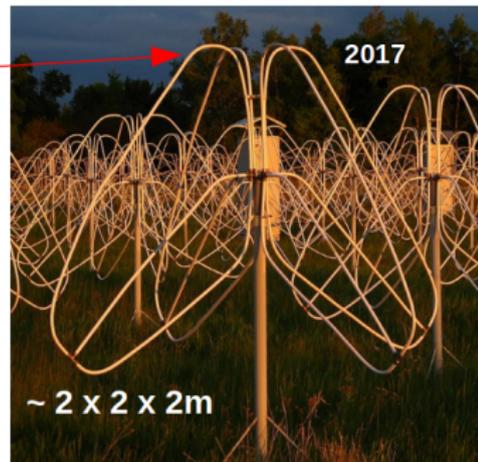
Réseau décamétrique, Nançay



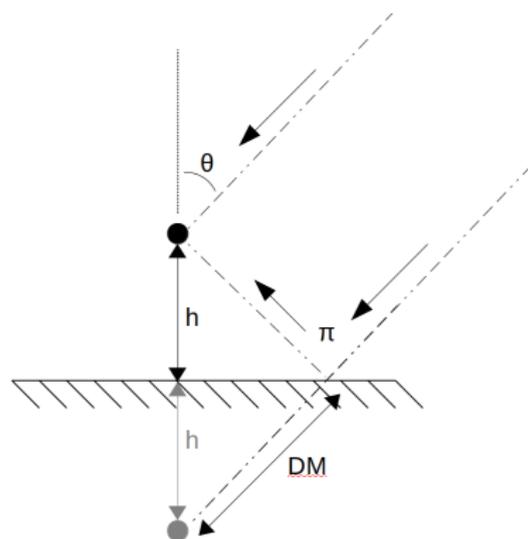
Réseau NenuFAR, Nançay

# Intérêts d'une antenne dipôle active

- à la station de radioastronomie de Kharkiv



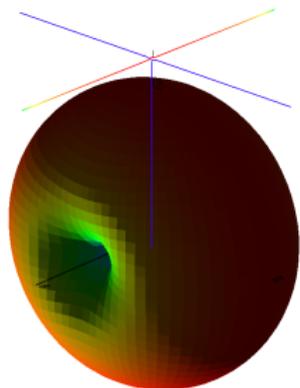
# Sol parfait et interférences



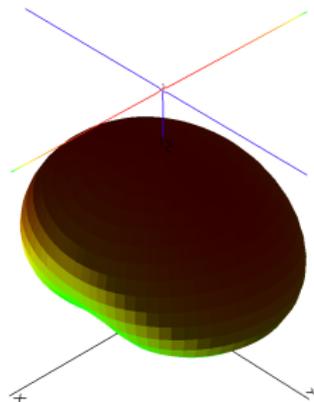
- antenne, hauteur  $h$  au dessus du sol , chemin direct et chemin réfléchi donc différence de marche  $DM$
  - $DM = \Phi_r - \Phi_d = \frac{4\pi h}{\lambda} \cos\theta + \pi$
  - interférence constructive si  $DM=0 \Rightarrow h = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow D \times 2 (+3dB)$
  - interférence destructive 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  $\pi$  sur le courant induit de l'antenne 'image'

# Conséquence sur la directivité $D$ de l'antenne

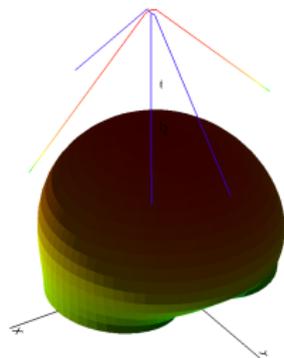
Dipole en champs libre, tore



Dipole au dessus un sol parfait, haricot

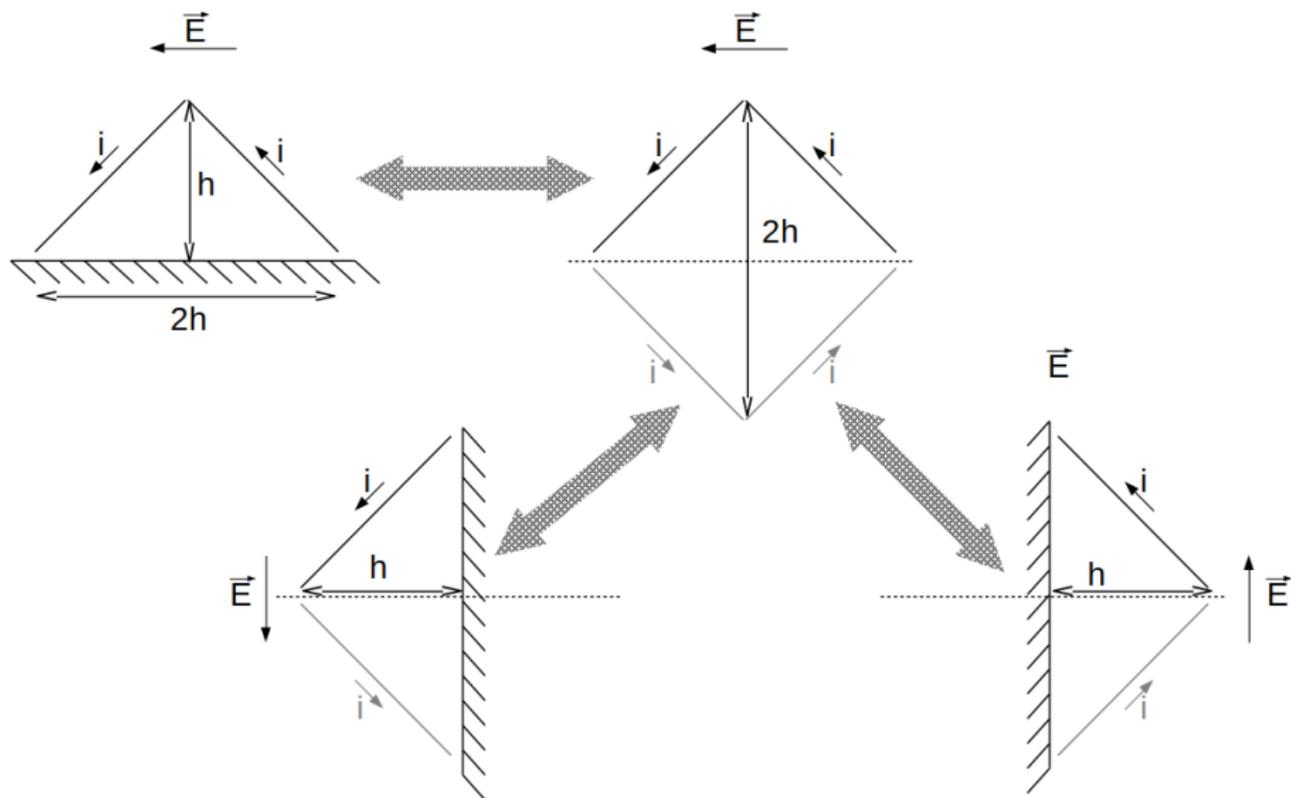


Dipole plié (V-shape) et sol parfait

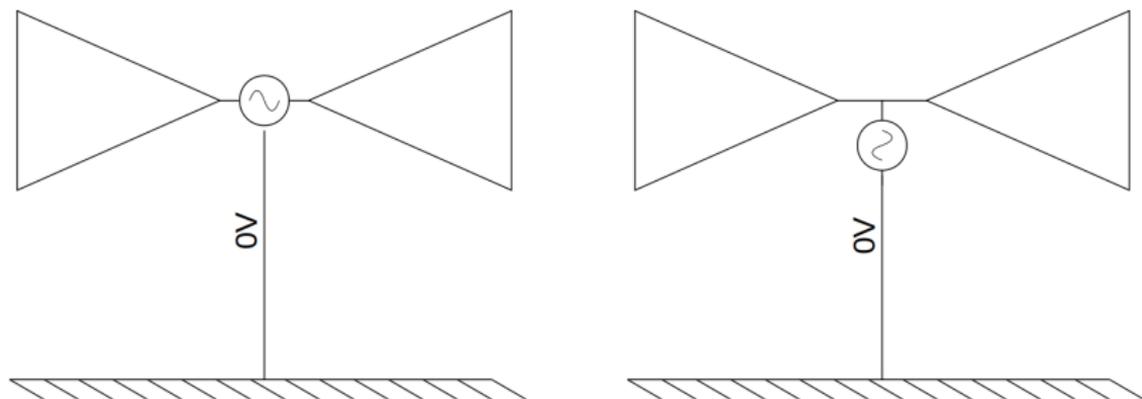


- le V-shape apporte de la sensibilité à la polarisation verticale dans le plan de l'antenne (plan E)
- $\Rightarrow$  **meilleure isotropie**

# Fonctionnement d'un V-shape



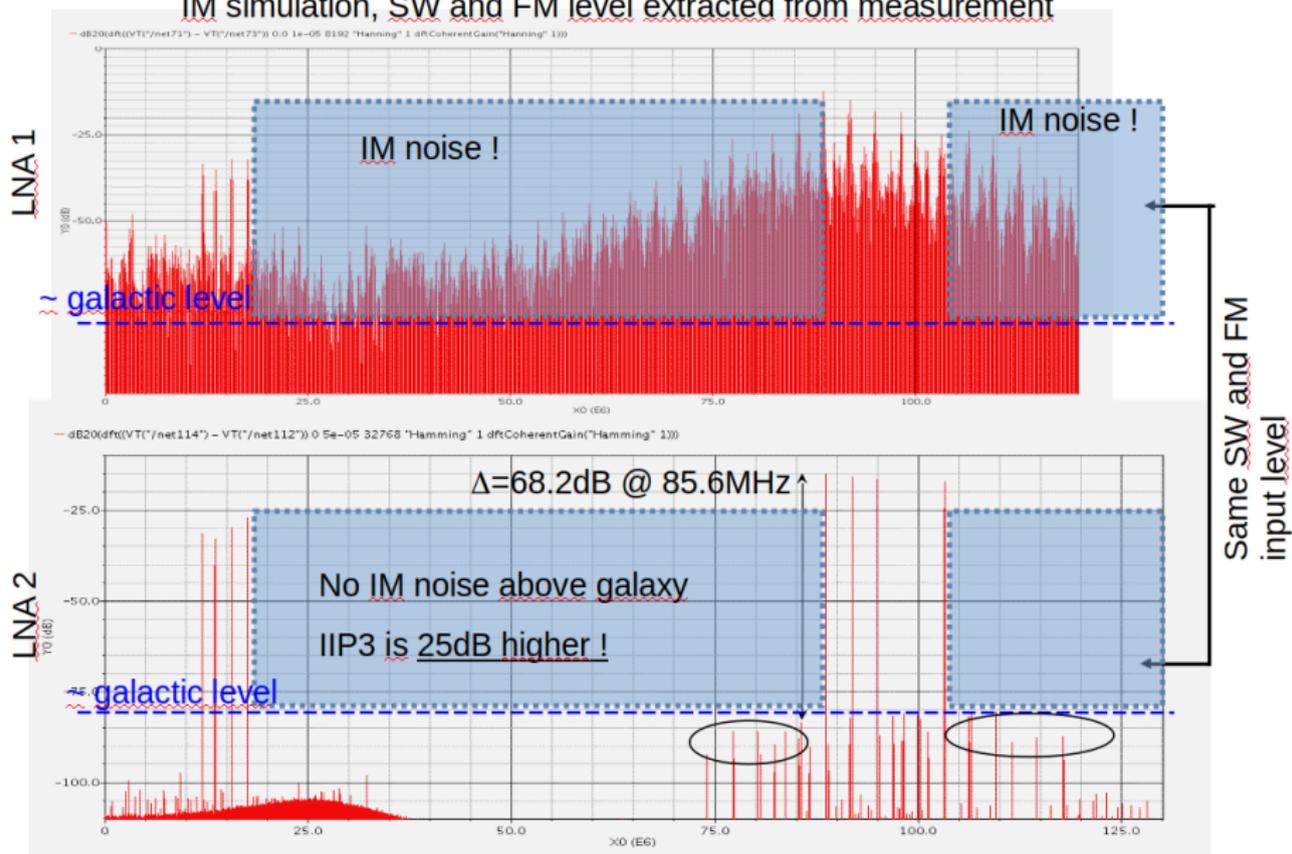
## Mode commun 'parasite' sur une antenne dipôle



- 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



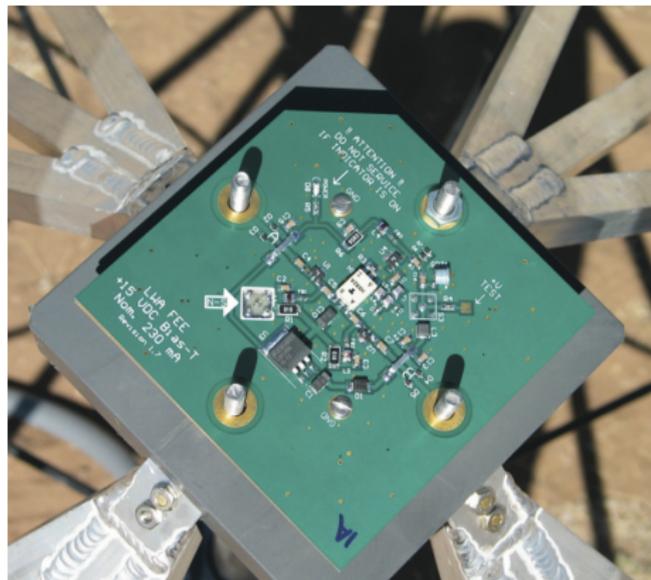
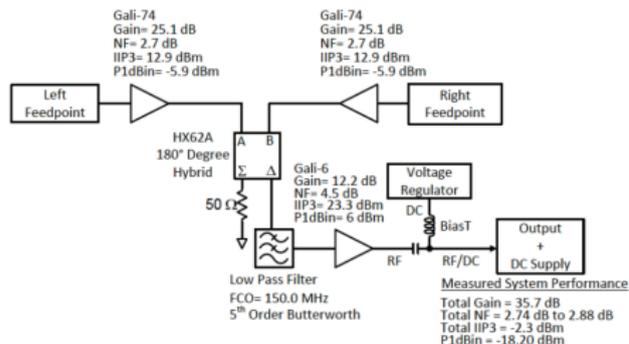
# LNA, structure des circuits

- 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  $50 \Omega$  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



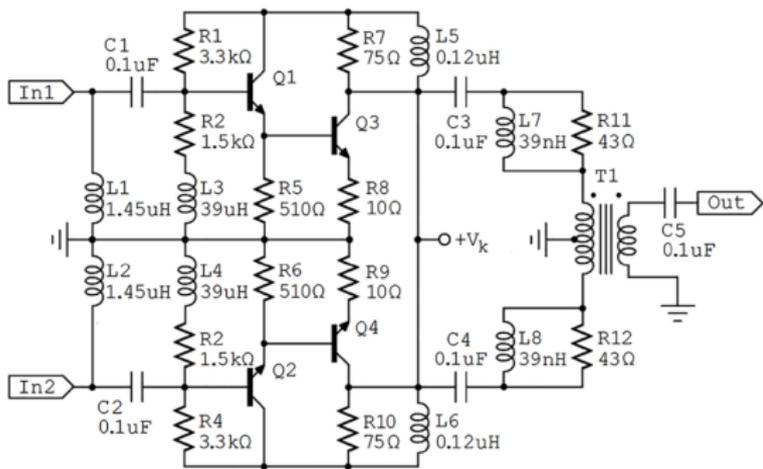
*A wide-band, active antenna system for long wavelength radio astronomy, Brian C. Hicks et al.*

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

# 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, $2\text{mm}^2$

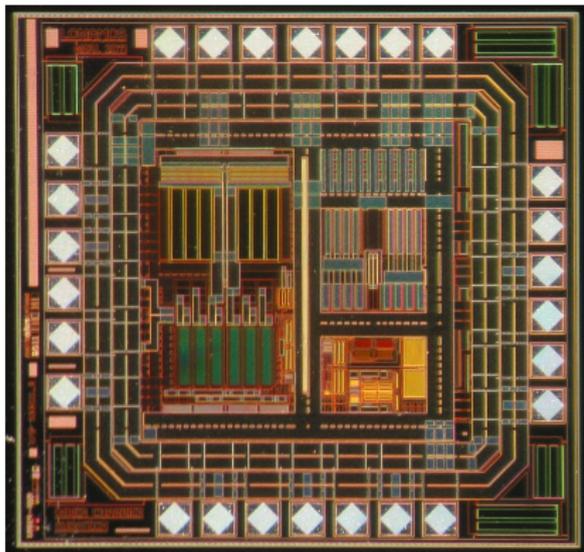
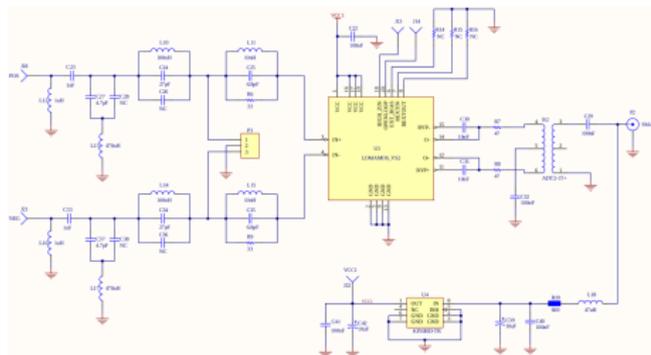


Schéma de la carte LNA NenuFAR



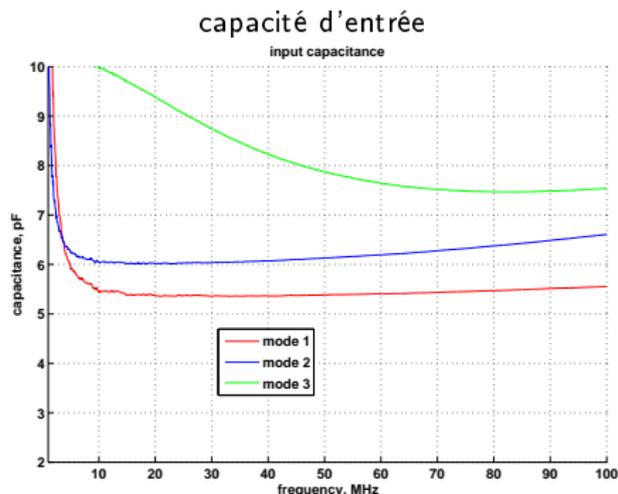
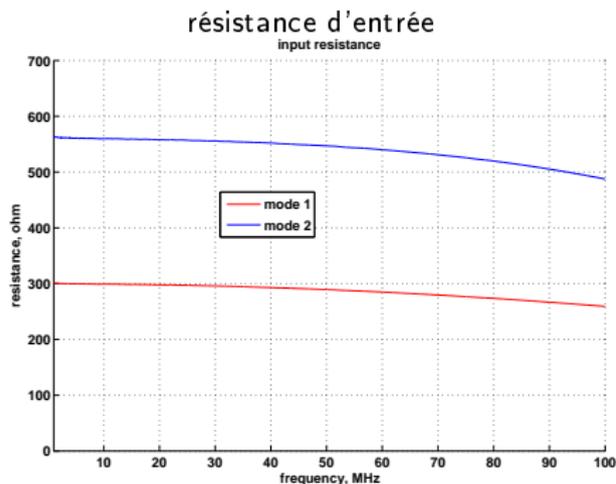
- LONAMOS : LOW Noise Amplifier in MOS technology
- structure différentielle à 2 étages, paire diff PMOS et push-pull
- contre-réaction résistive
- technologie AMS CMOS  $0.35\ \mu$
- $Z_{in}^{in} \sim 300\ \Omega$ ,  $IIP3=6\ \text{dBm}/1\text{dBV}$ ,  $G=27\ \text{dB}$ ,  $G_V=19\ \text{dB}$ ,  $P=0.33\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

# Comparatif discret/MMIC/ASIC

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

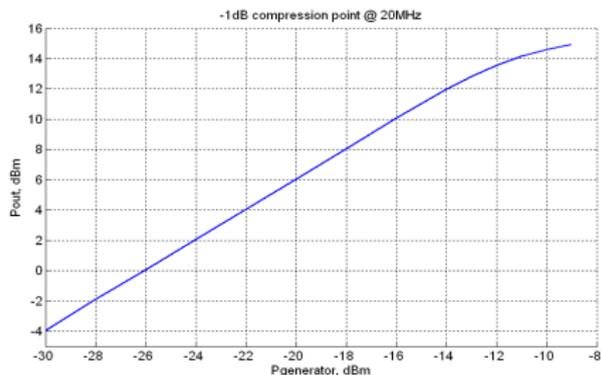
# Le LNA LONAMOS, mesures

- 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**

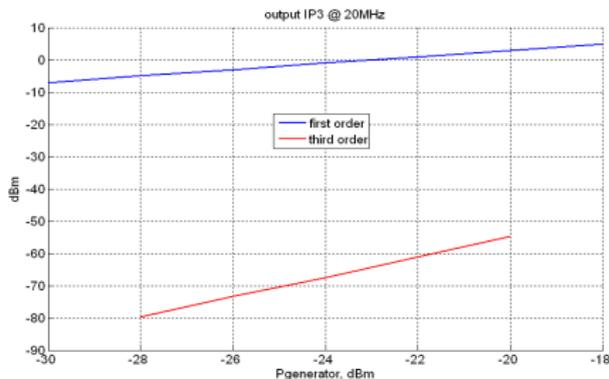


# Mesures de bruit et de linéarité

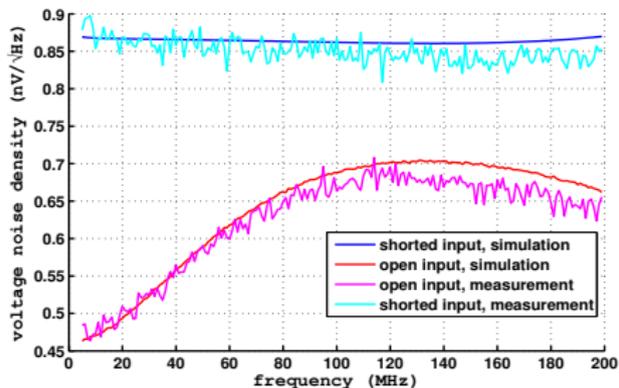
-1 dB OCP : 15dBm



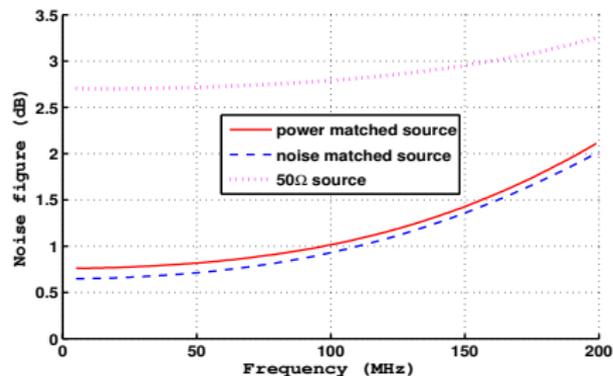
OIP3 : 33dBm



total input noise measure and simulation

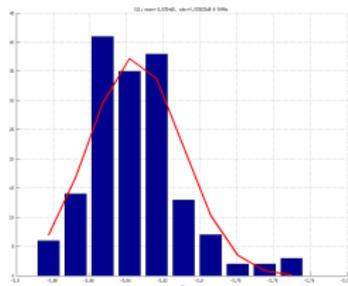


noise figure simulation

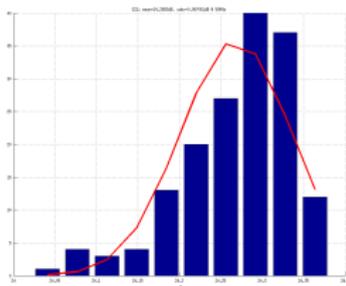


# Mesure des dispersions de caractéristique, N=160

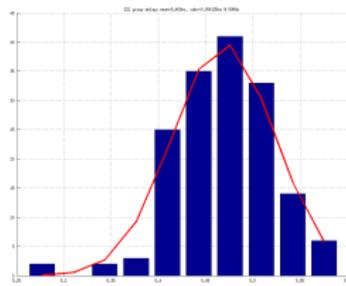
$|S_{11}|$ , 50 MHz



$|S_{21}|$ , 50 MHz



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



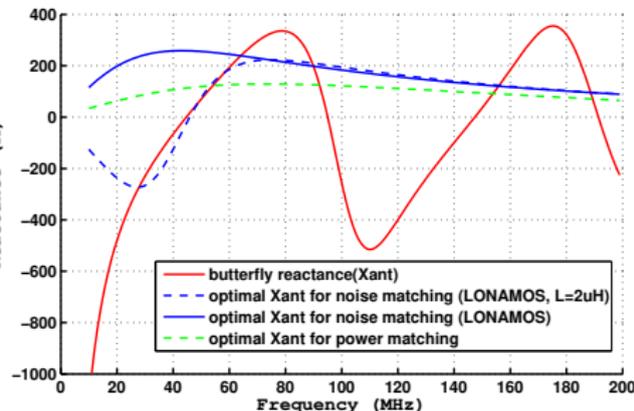
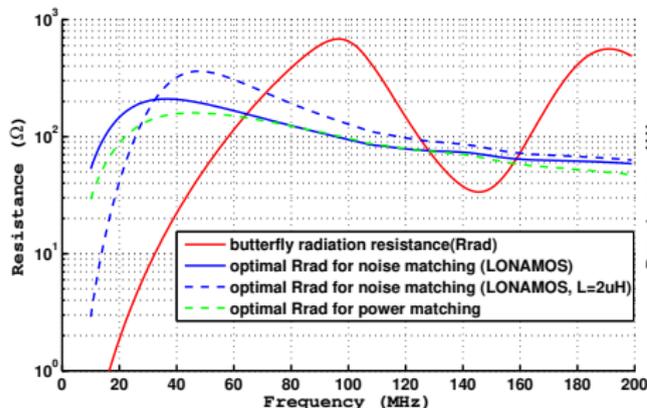
	20 MHz	50MHz	80MHz
$ S_{11} $ , dB mdB	$\mu=-2.94$ $\sigma=23$	$\mu=-3.84$ $\sigma=26$	$\mu=-2.34$ $\sigma=103$
$ S_{21} $ , dB mdB	$\mu=23.69$ $\sigma=64$	$\mu=24.27$ $\sigma=67$	$\mu=21.62$ $\sigma=206$
GD( $S_{21}$ ), ns ps	$\mu=5.87$ $\sigma=63$	$\mu=5.47$ $\sigma=54$	$\mu=13.2$ $\sigma=333$

- ces mesures incluent l'incertitude des composants passif externes

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

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

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

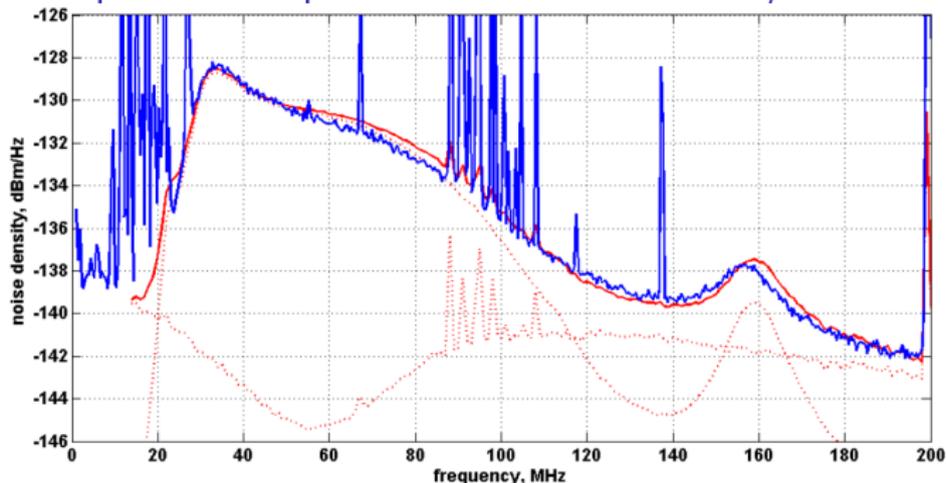


### • rôle de l'inductance de shunt en entrée de LNA

- ▶ 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](https://doi.org/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

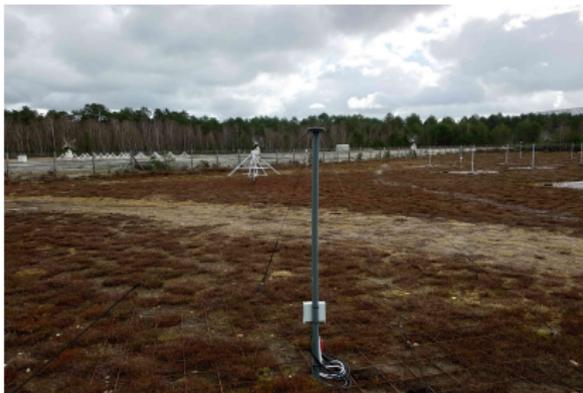
- comparaison mesure (minimum galactique) / calculé avec une antenne active dipôle ("Butterfly") en Argentine (AUGER / AERA)
- calcul : données de  $T_g$ , simulation NEC antenne et mesures du LNA

# 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  $\Omega$  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*



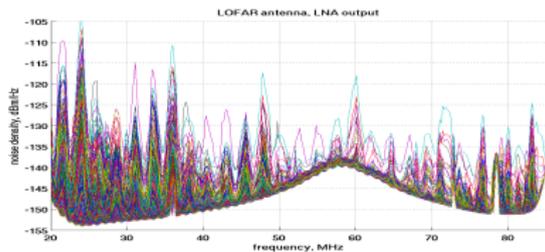
antenne NenuFAR (LONAMOS LNA)



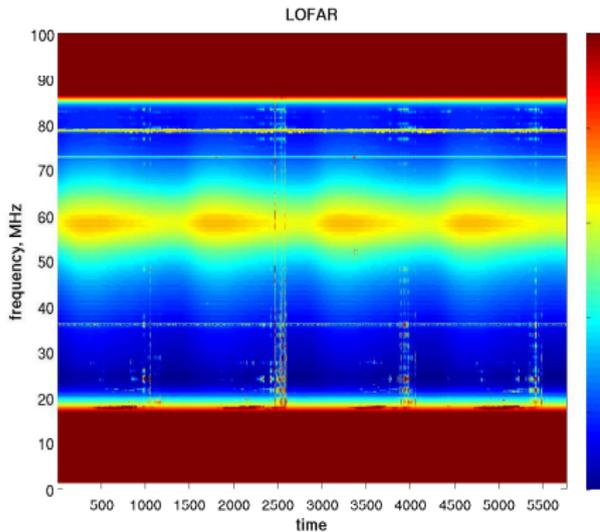
- même type d'antenne : dipôle V-shape
- dimensions comparables
- même orientation
- choix de la polarisation NW
- même grille au sol sous l'antenne

# PSD : LOFAR vs LOFARLONAMOS

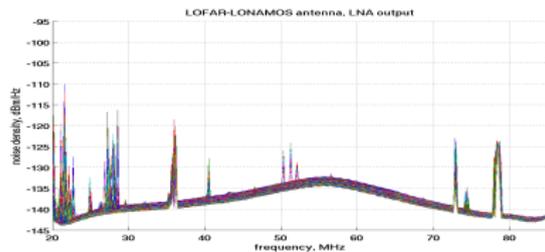
## LOFAR, spectres cumulés



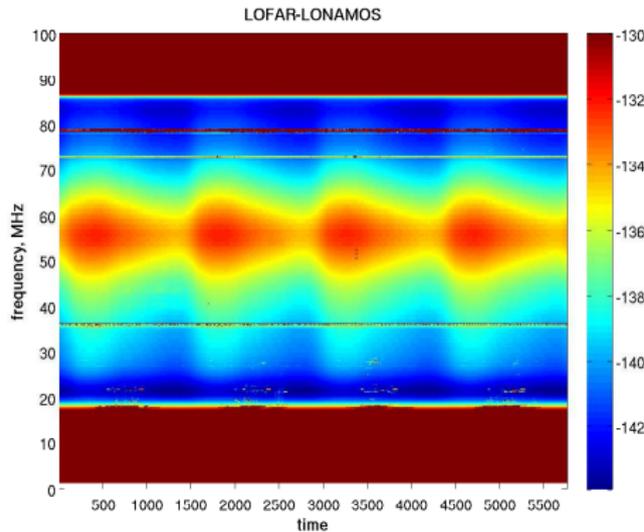
## LOFAR, spectre dynamique



## LOFARLONAMOS, spectres cumulés

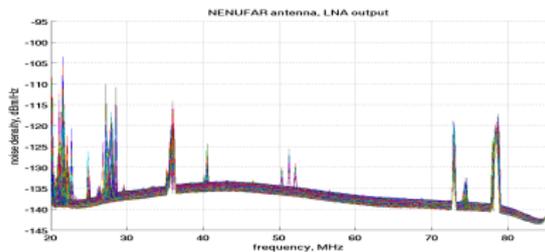


## LOFARLONAMOS, spectre dynamique

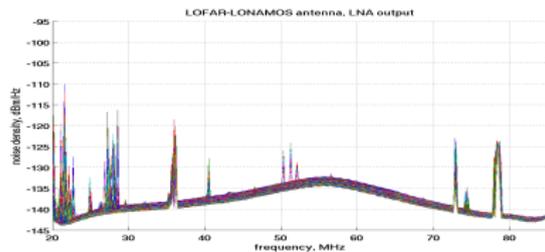


# PSD : NENUFAR vs LOFARLONAMOS

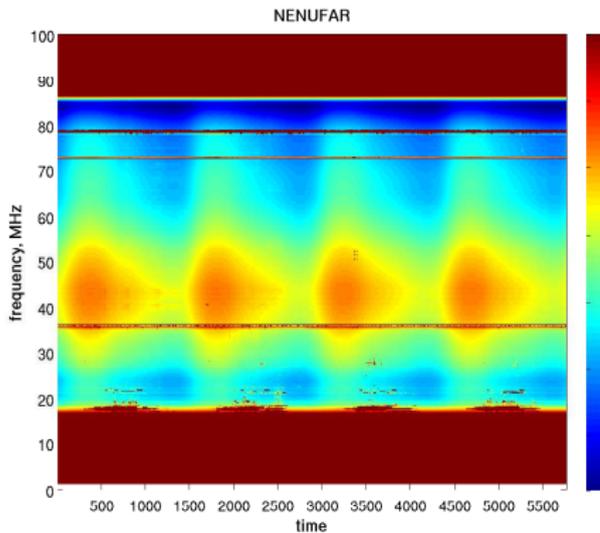
## NENUFAR, spectres cumulés



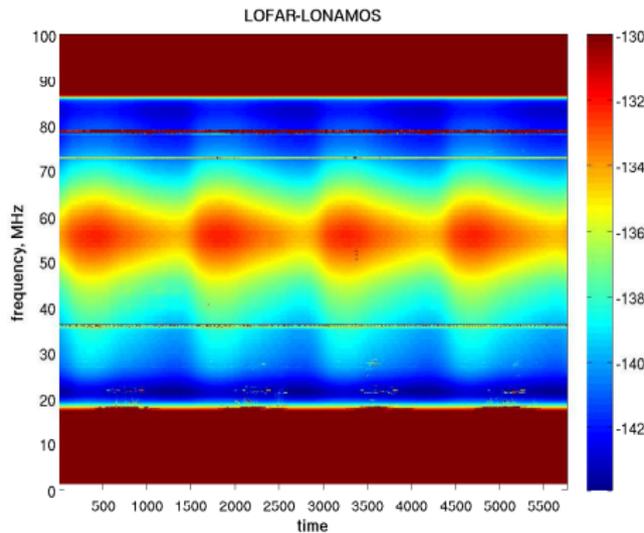
## LOFARLONAMOS, spectres cumulés



## NENUFAR, spectre dynamique



## LOFARLONAMOS, spectre dynamique

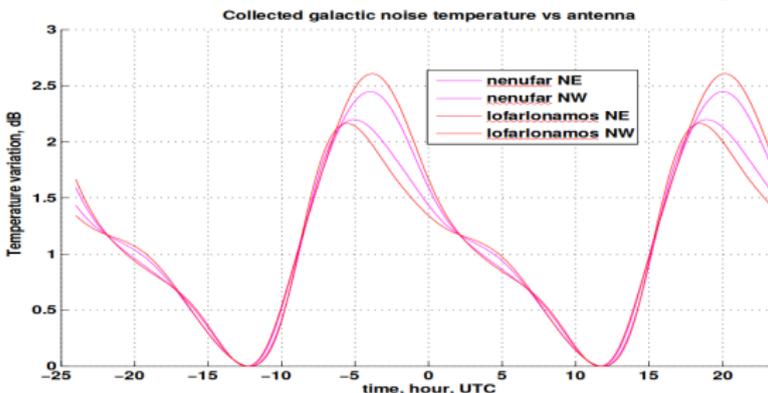


# Calcul de la température de bruit collectée par une antenne non isotrope sur un ciel inhomogène à 50 MHz

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

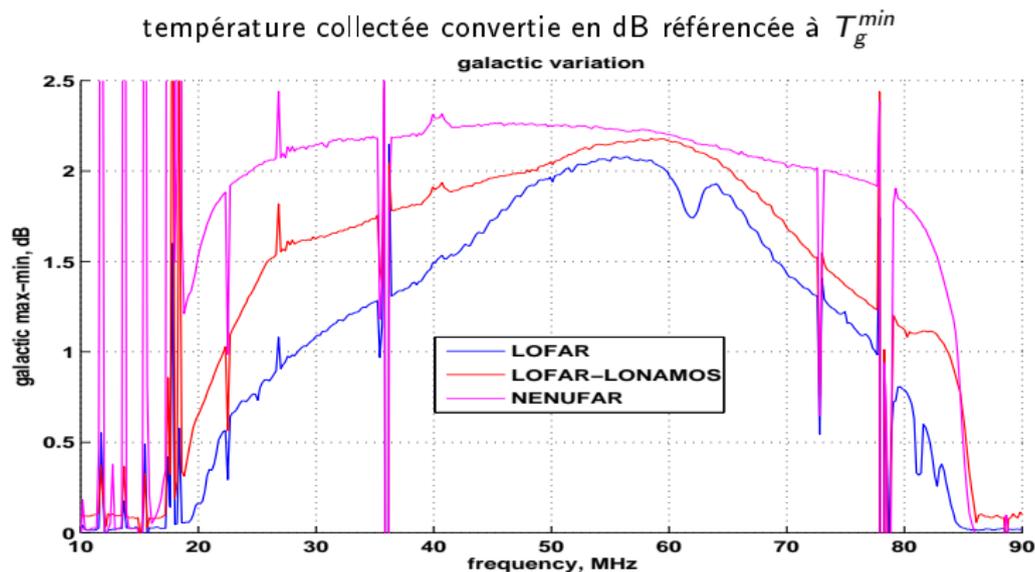
$$T_g^{ant}(f) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} G(\theta, \phi) \cdot T_g(\theta, \phi) \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi$$

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  $\sim 2.5$  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  $\lambda$
  - ▶ 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