



Radio-fra-tun :
Atelier virtuel Franco-Tunisien de Radioastronomie

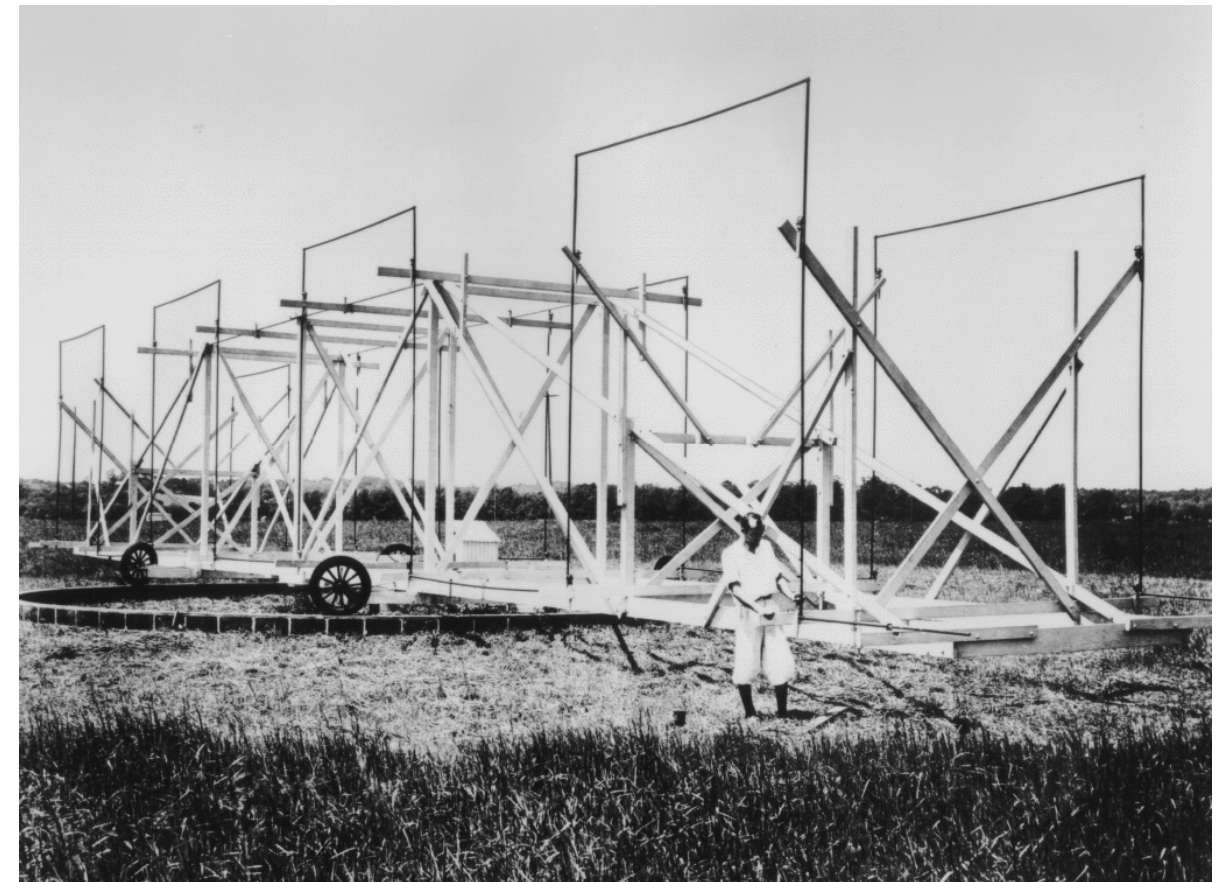
8-9 févr. 2021 Paris, Meudon, Nançay, Tunis ...

Radioastronomie métrique-décamétrique

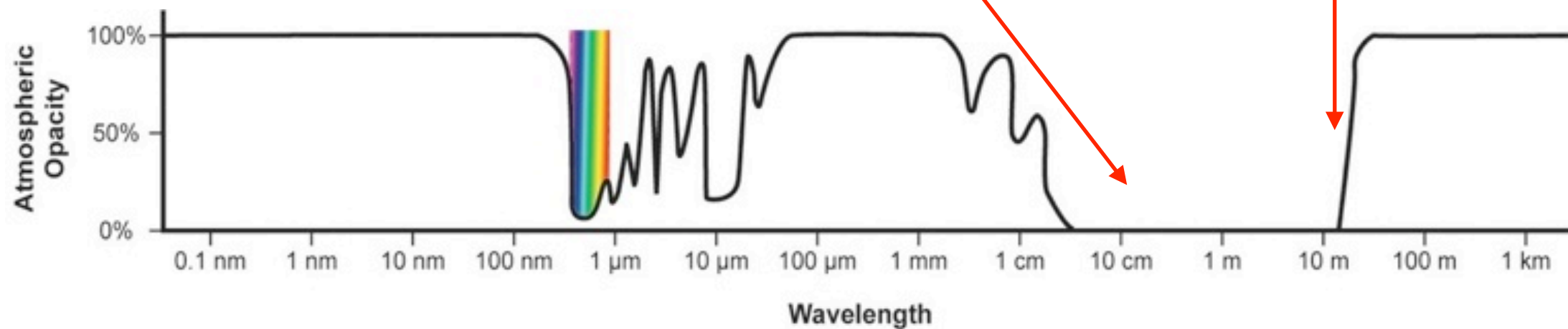
Philippe Zarka

LESIA & USN, Observatoire de Paris - CNRS - PSL

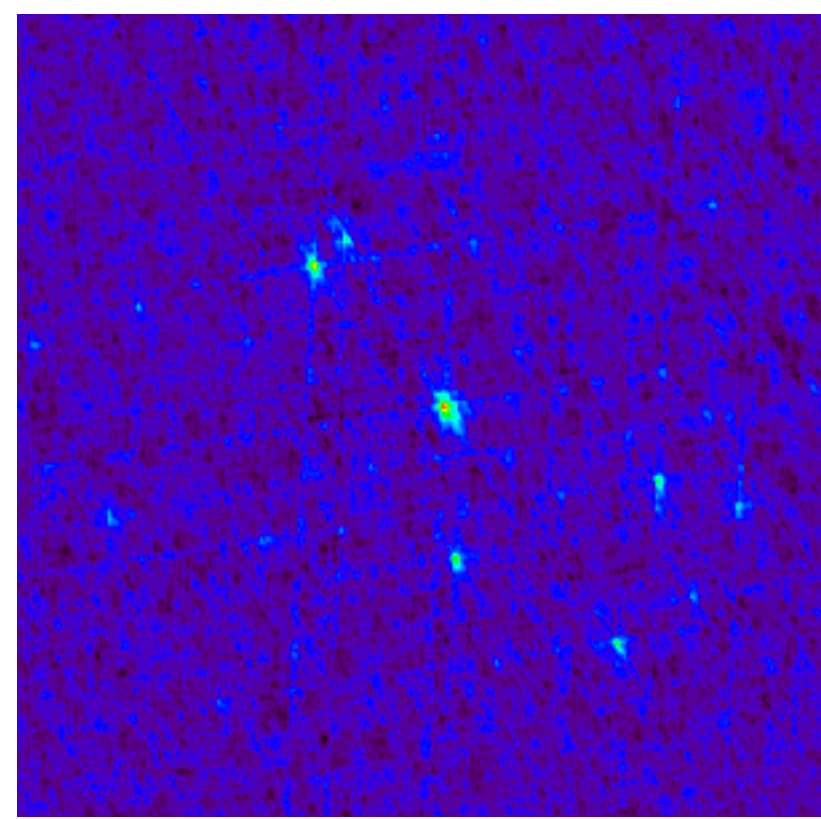
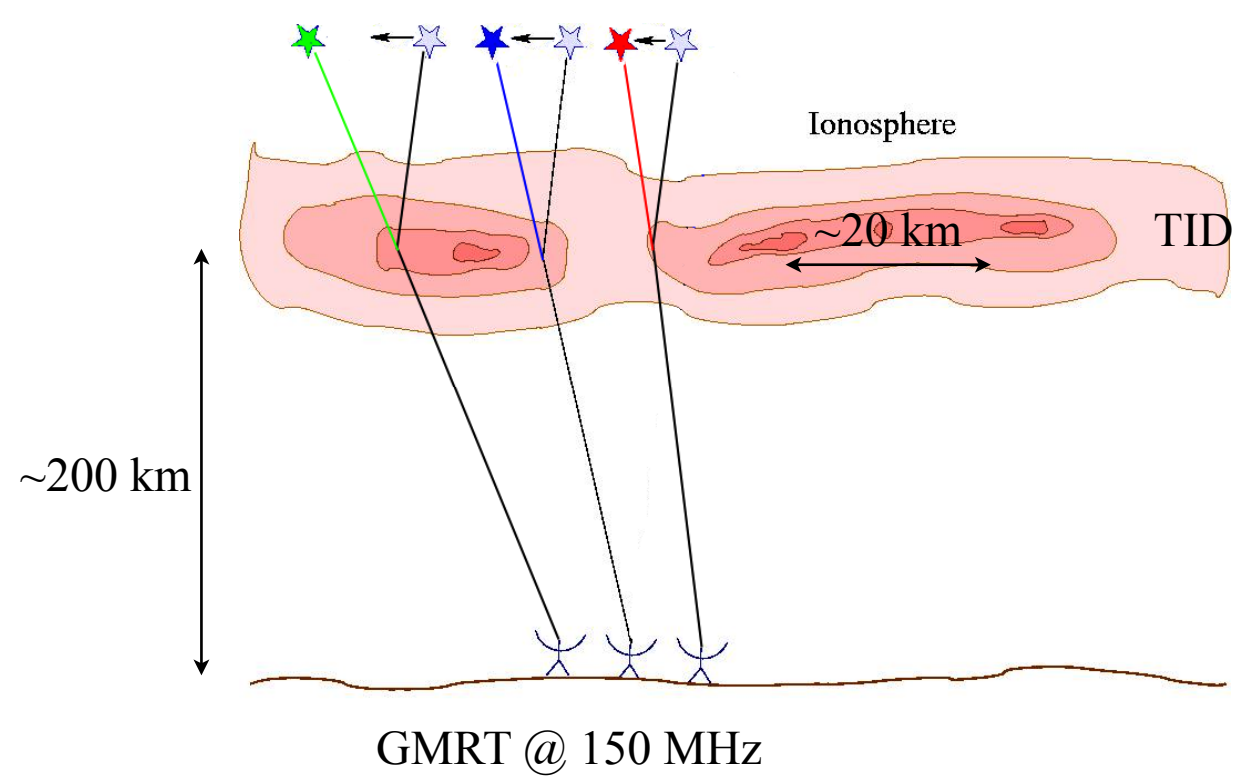
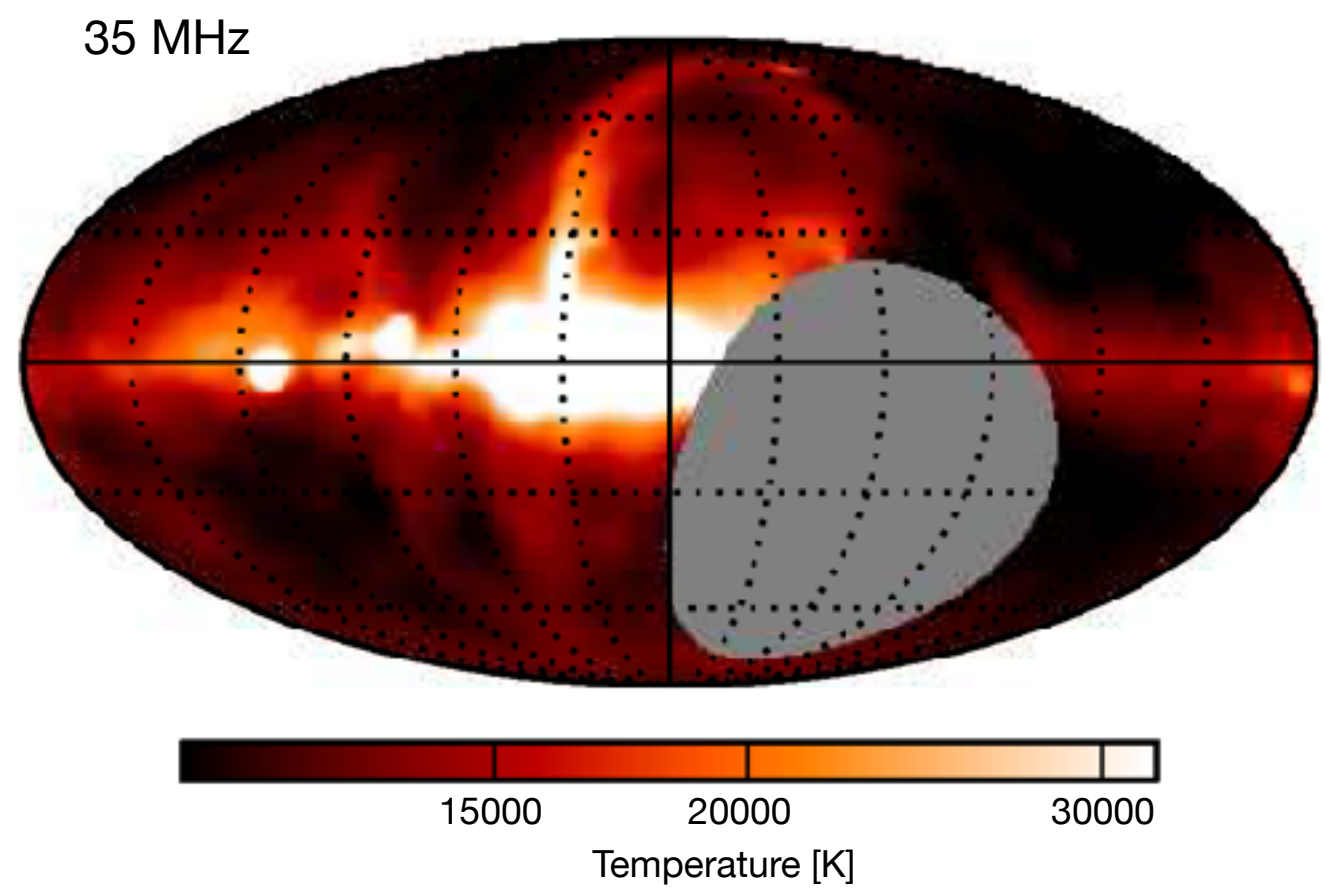
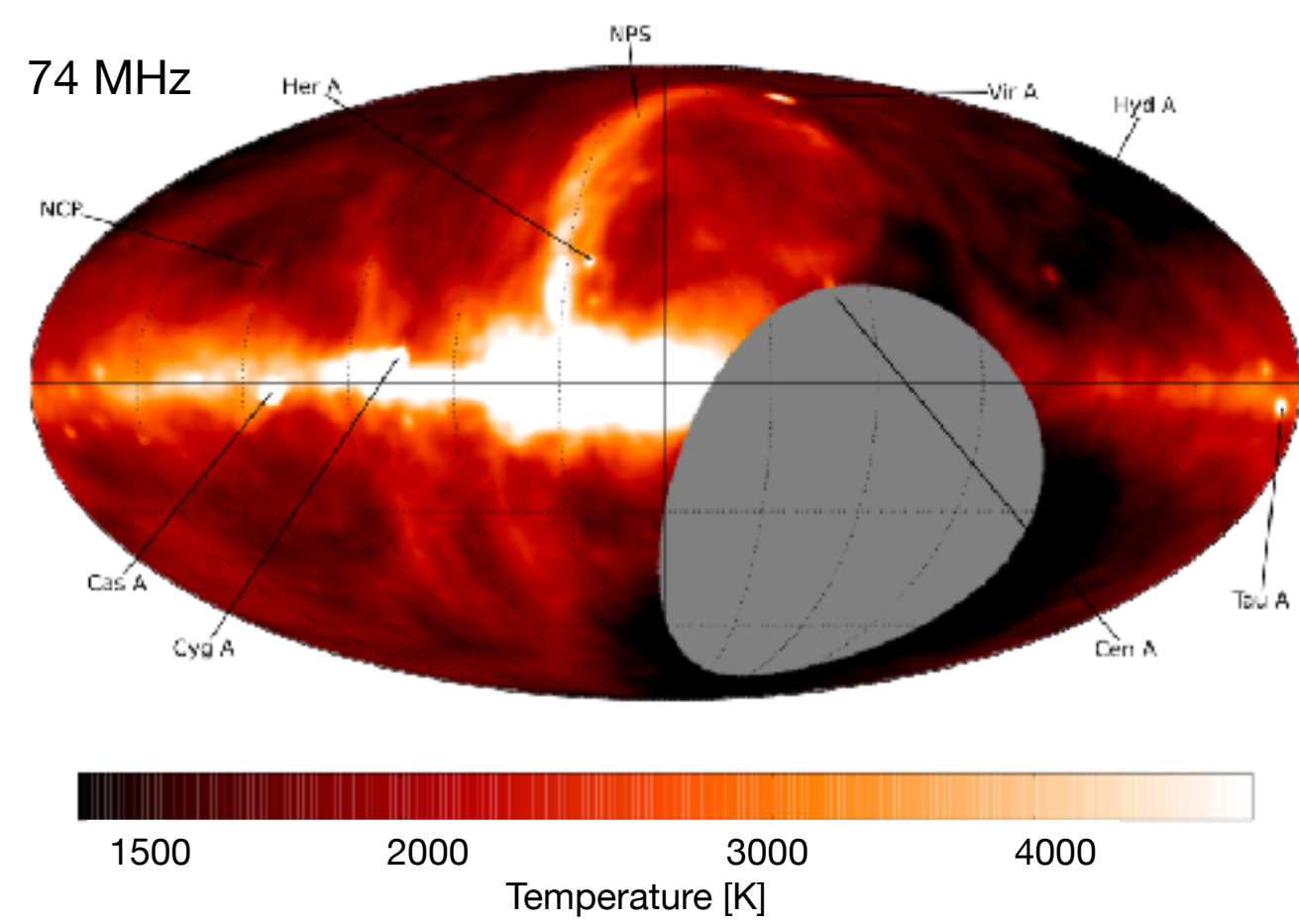
- Après sa naissance aux λ DAM vers 1930, la radioastronomie s'est développée aux λ dm-cm-mm = domaine des grandes paraboles



Jansky, 1930, à 20.55 MHz



- Difficultés aux basses fréquences : T_{ciel} , ionosphère, RFI, résolution (λ/D)



- Difficultés aux basses fréquences : T_{ciel} , ionosphère, **RFI**, résolution (λ/D)

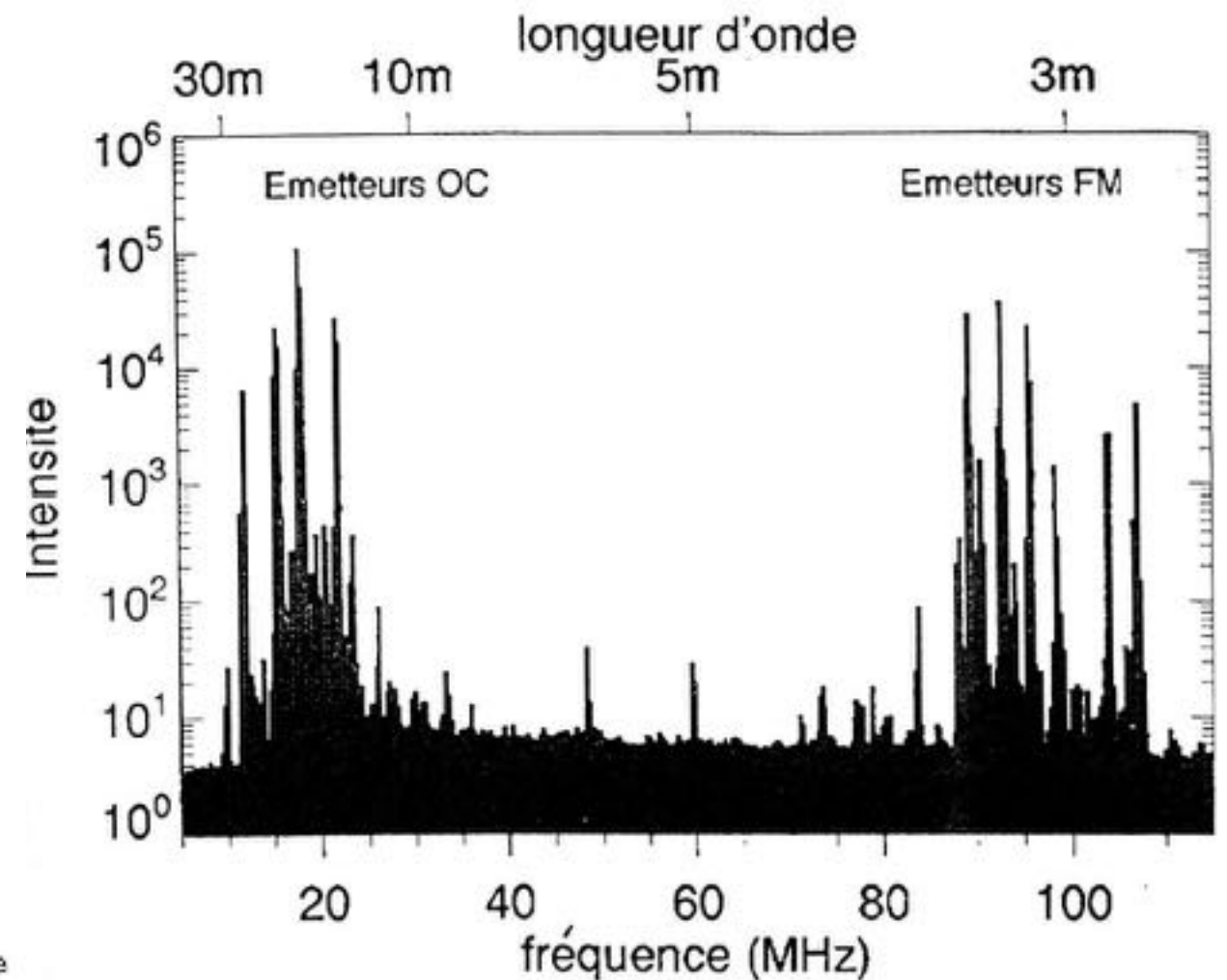
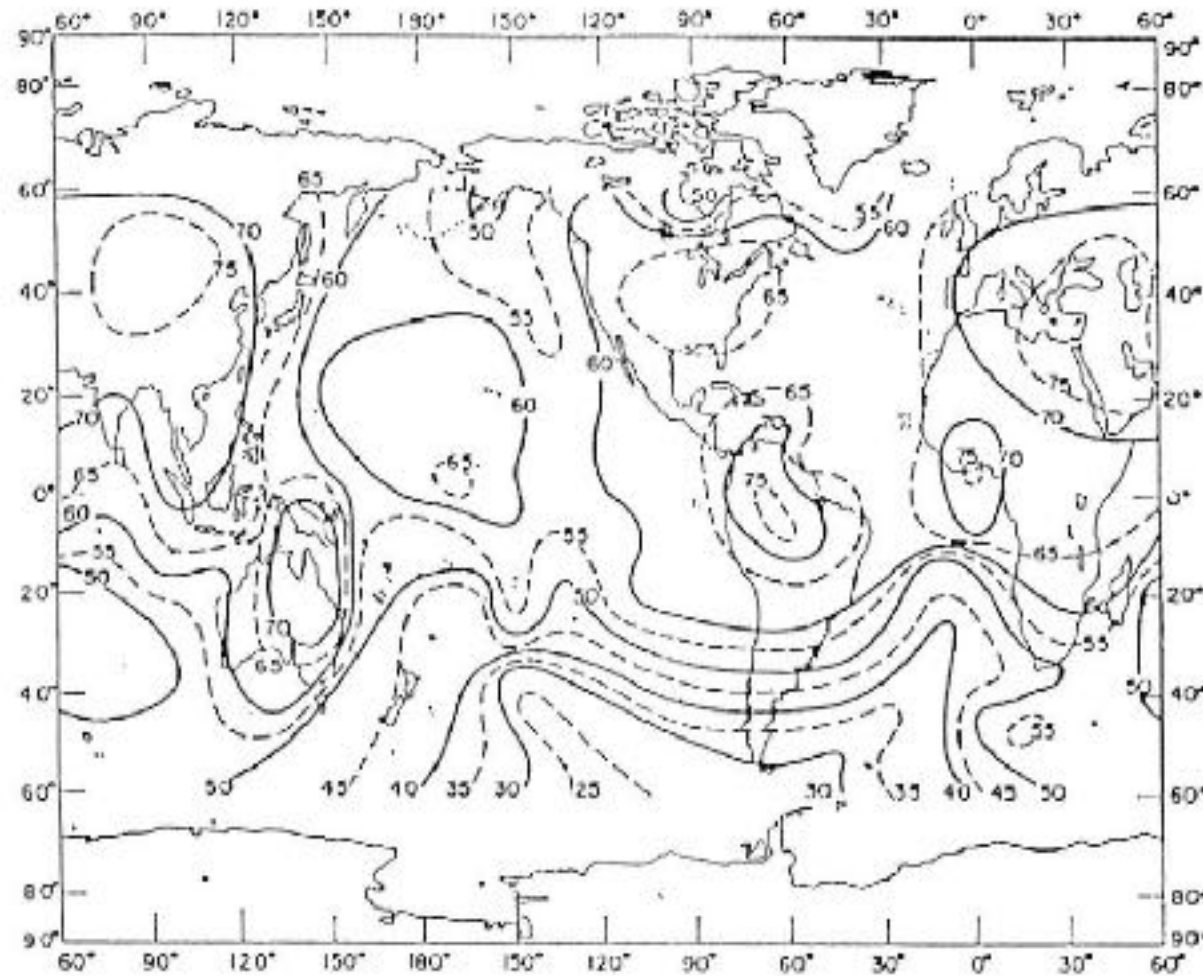
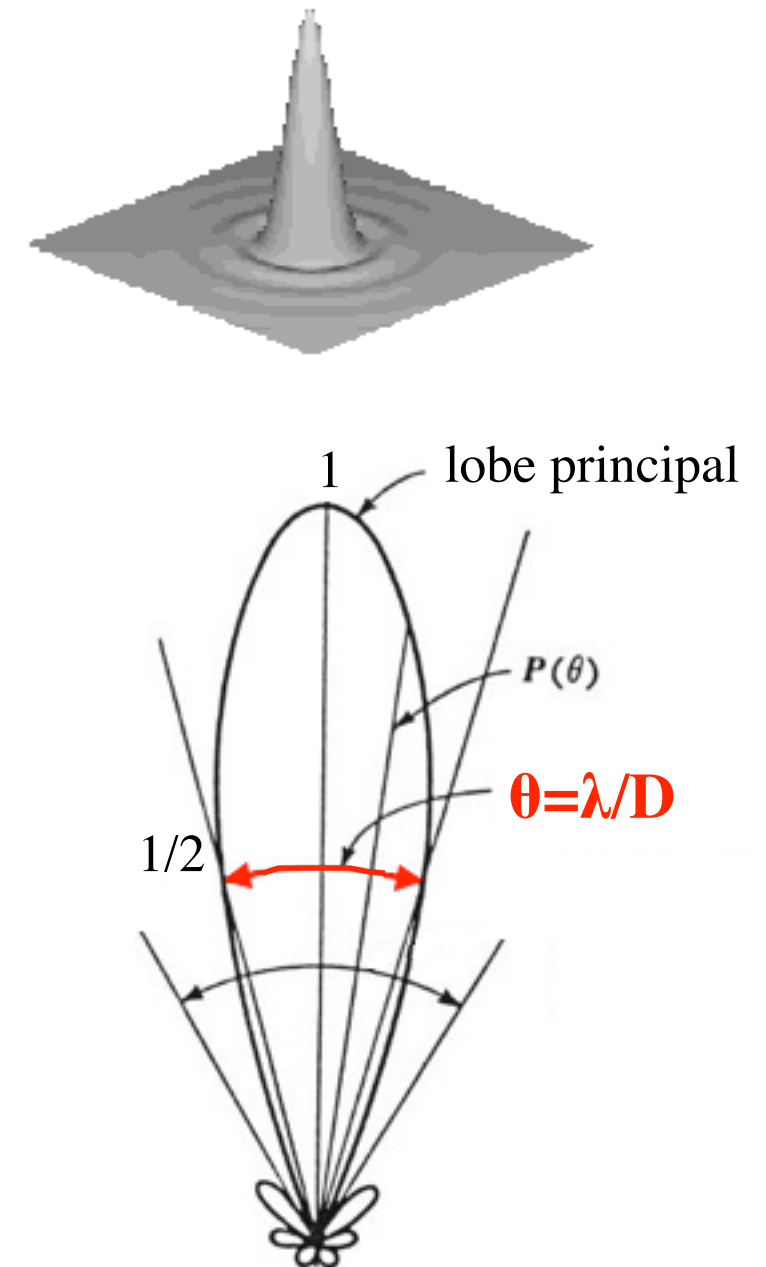


Figure 2. The terrestrial radio noise distribution derived from the RAE-1 (height 6000 km) lower "V" data at 9.18 MHz for December 2-6, 19-68. The secondary peaks in activity over the mid-Pacific and northern Australia are believed to be correlated with local thunderstorm activity. Contour levels are db above 288 K. The Galactic background on this scale would be about 31 db and the receiver saturated at 75 db. (from Herman et al, 1973)

- Difficultés aux basses fréquences : T_{ciel} , ionosphère, RFI, **résolution (λ/D)**



- Paraboles et interféromètres de paraboles : incursions aux BF
Arecibo (310 MHz), Westerbork, GMRT, VLA (74-300 MHz)

Westerbork

(ASTRON, Pays-Bas)

14 paraboles de 6m

Base max: 2.7 km

$\lambda \sim 10\text{cm} - 1\text{m}$

$A \sim 400 \text{ m}^2$



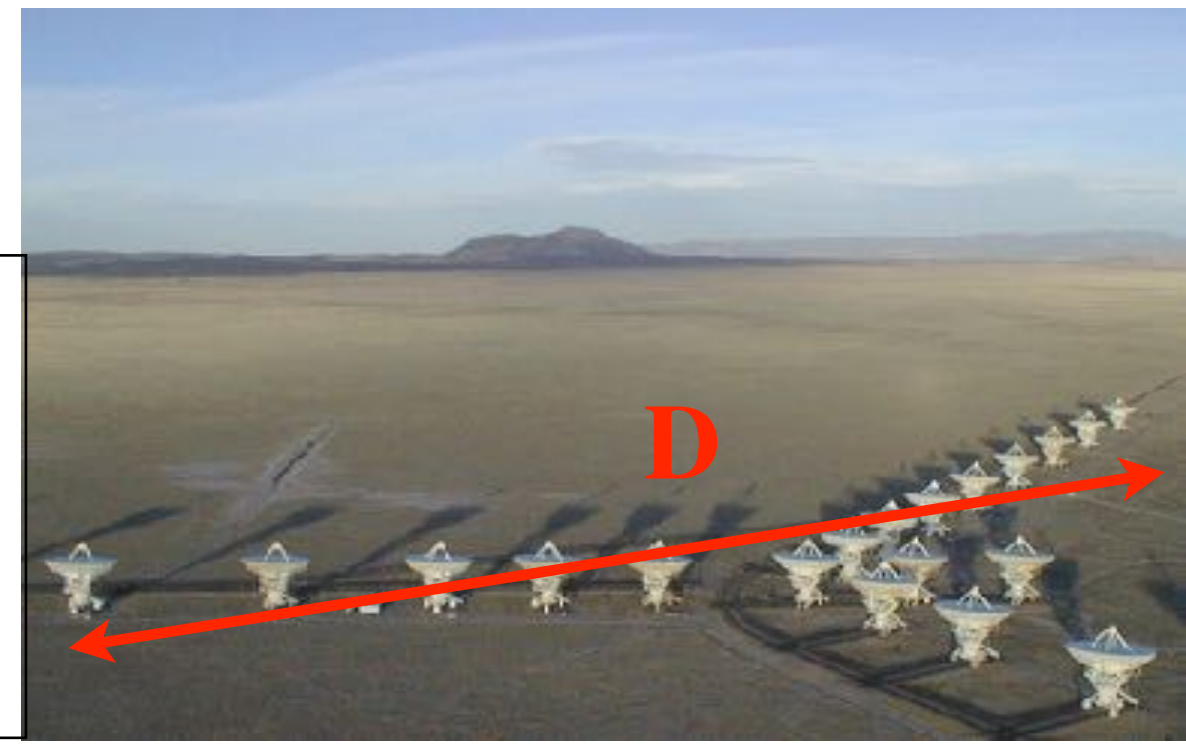
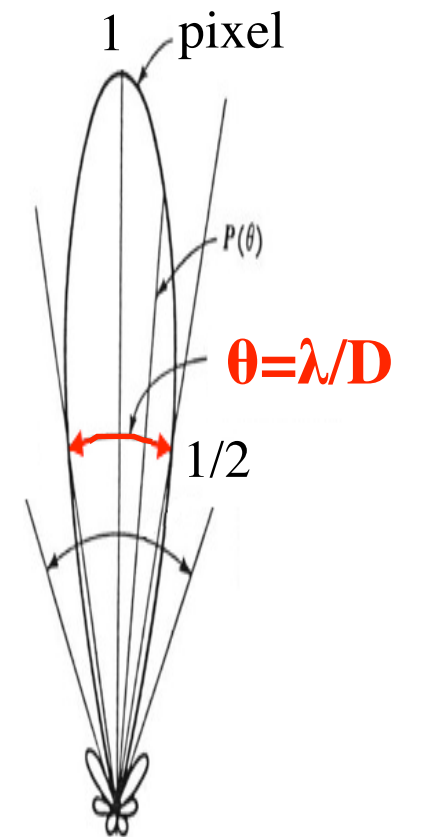
GMRT (Pune, Inde)

30 paraboles de 45 m

Base max: 25 km

$\lambda \sim 1\text{m}, f_{\min} = 153 \text{ MHz}$

$A \sim 50000 \text{ m}^2$



VLA (NRAO, Nouveau Mexique)

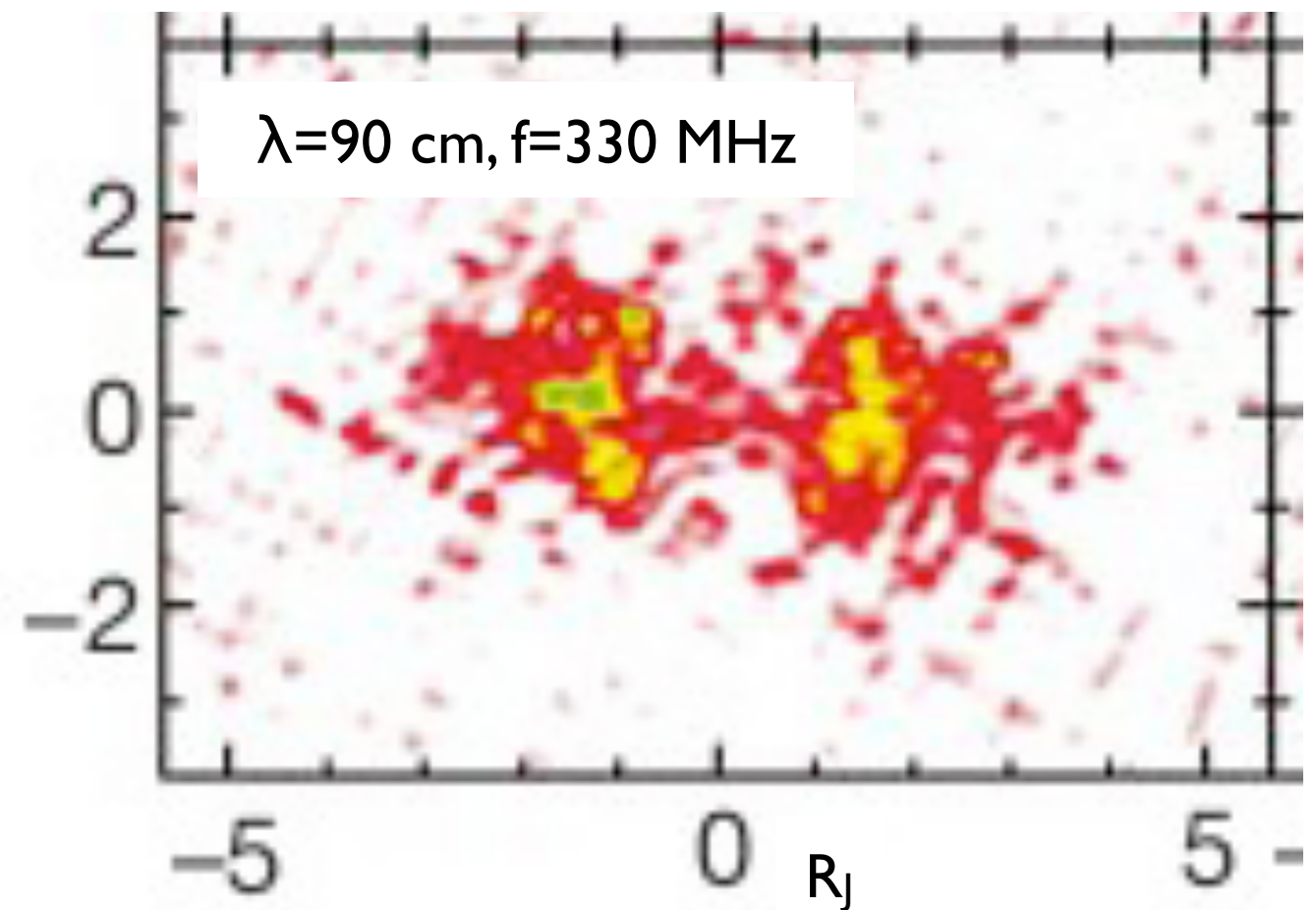
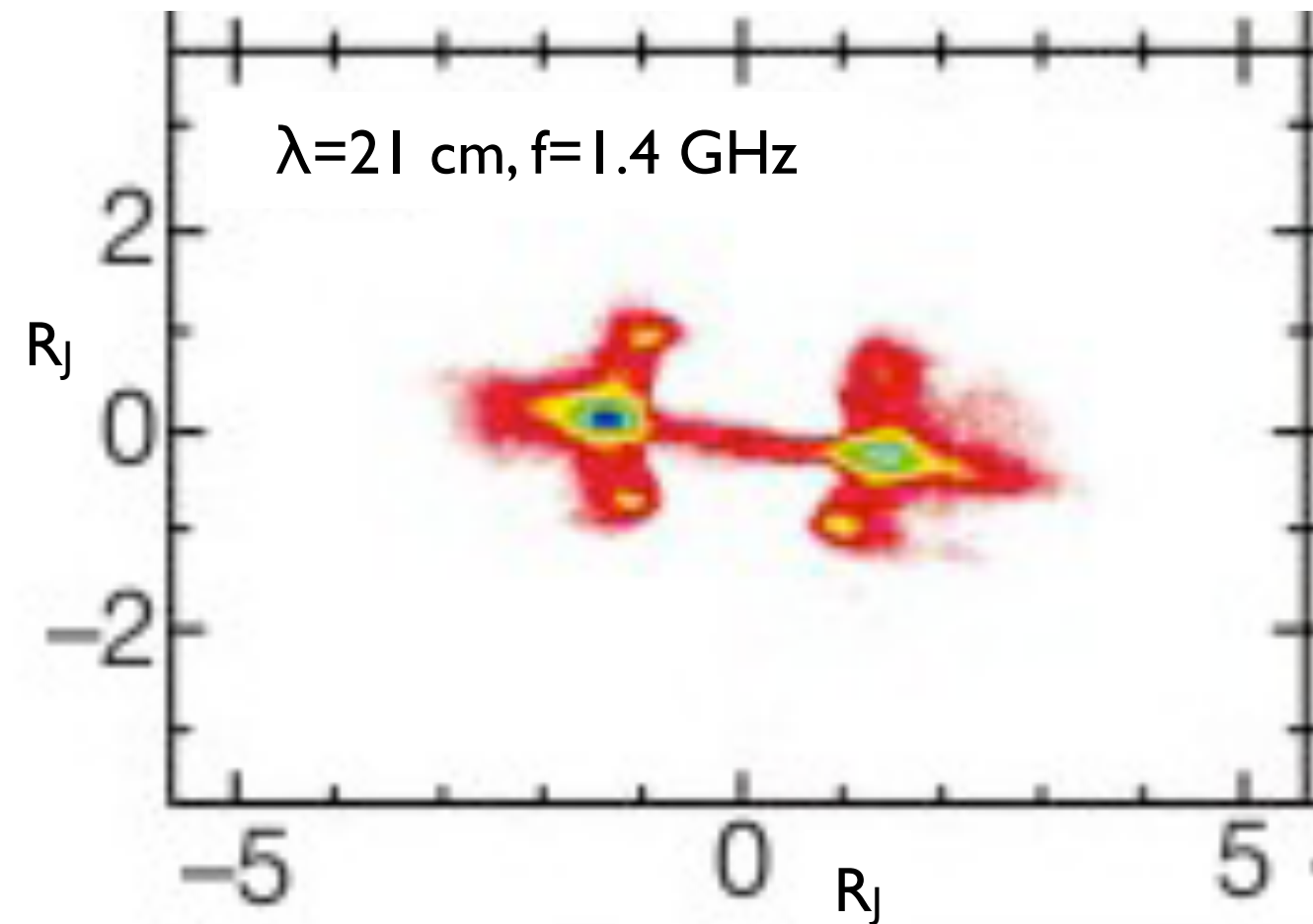
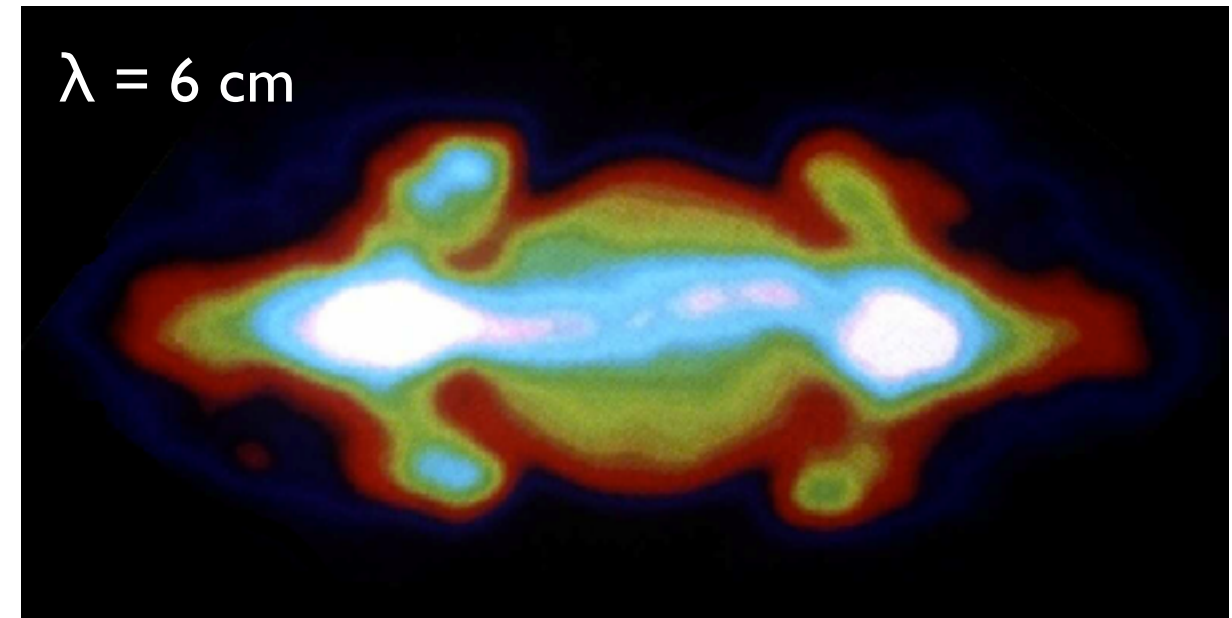
27 paraboles de 25 m

Base max: 36 km

$\lambda \sim 1\text{cm} - 1\text{m}, f_{\min} = 74 \text{ MHz}$

$A \sim 14000 \text{ m}^2$

- Paraboles et interféromètres de paraboles : incursions aux BF Arecibo (310 MHz), Westerbork, GMRT, VLA (74-300 MHz)



- Science aux BF: synchrotron, processus plasmas ...
- A faible sensibilité : Soleil & Jupiter = sources intenses & variables

Synchrotron

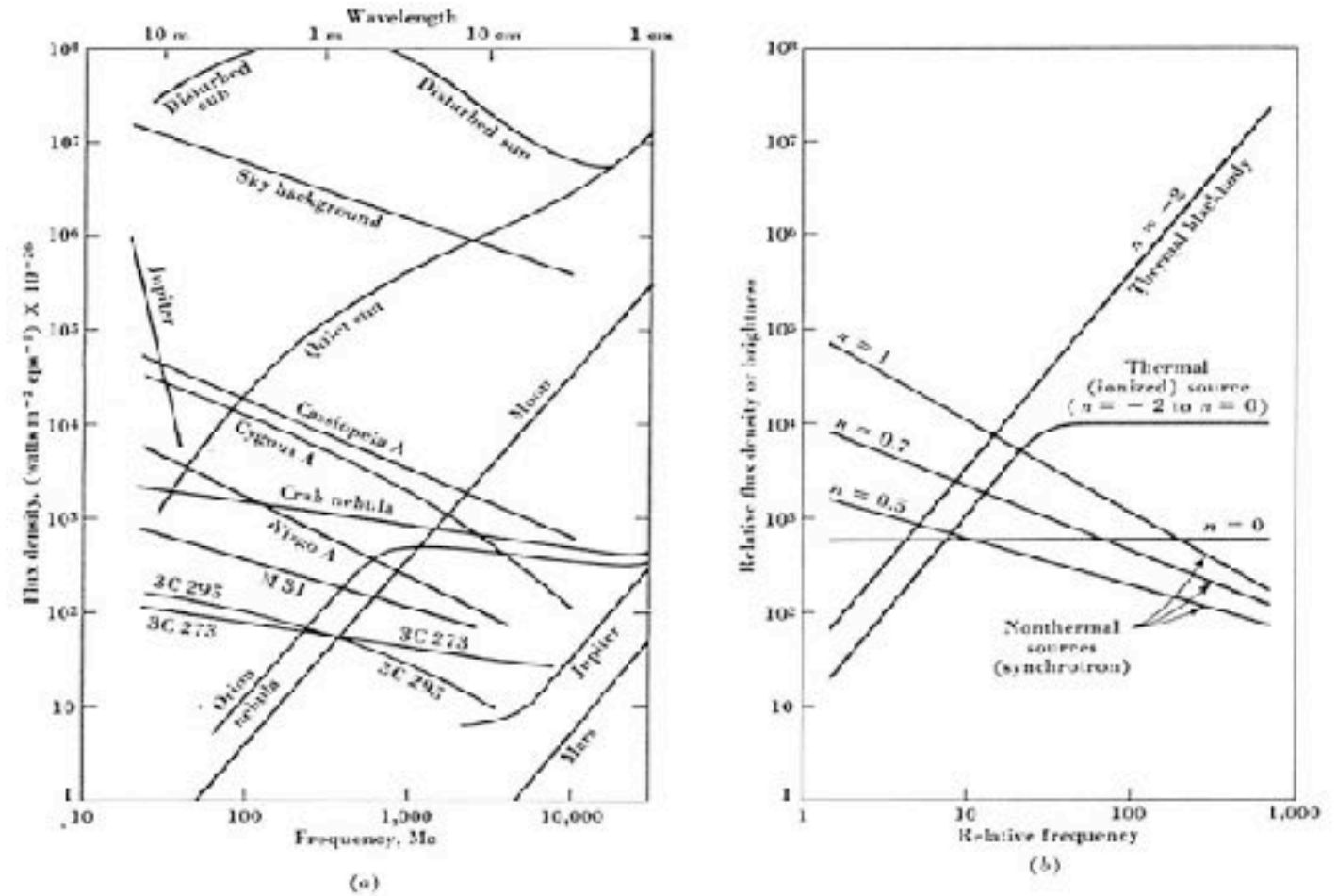
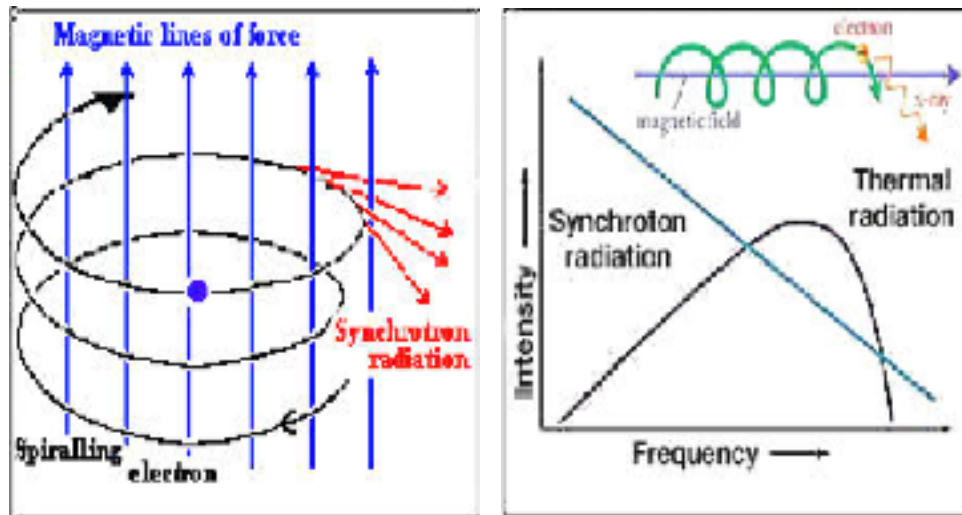
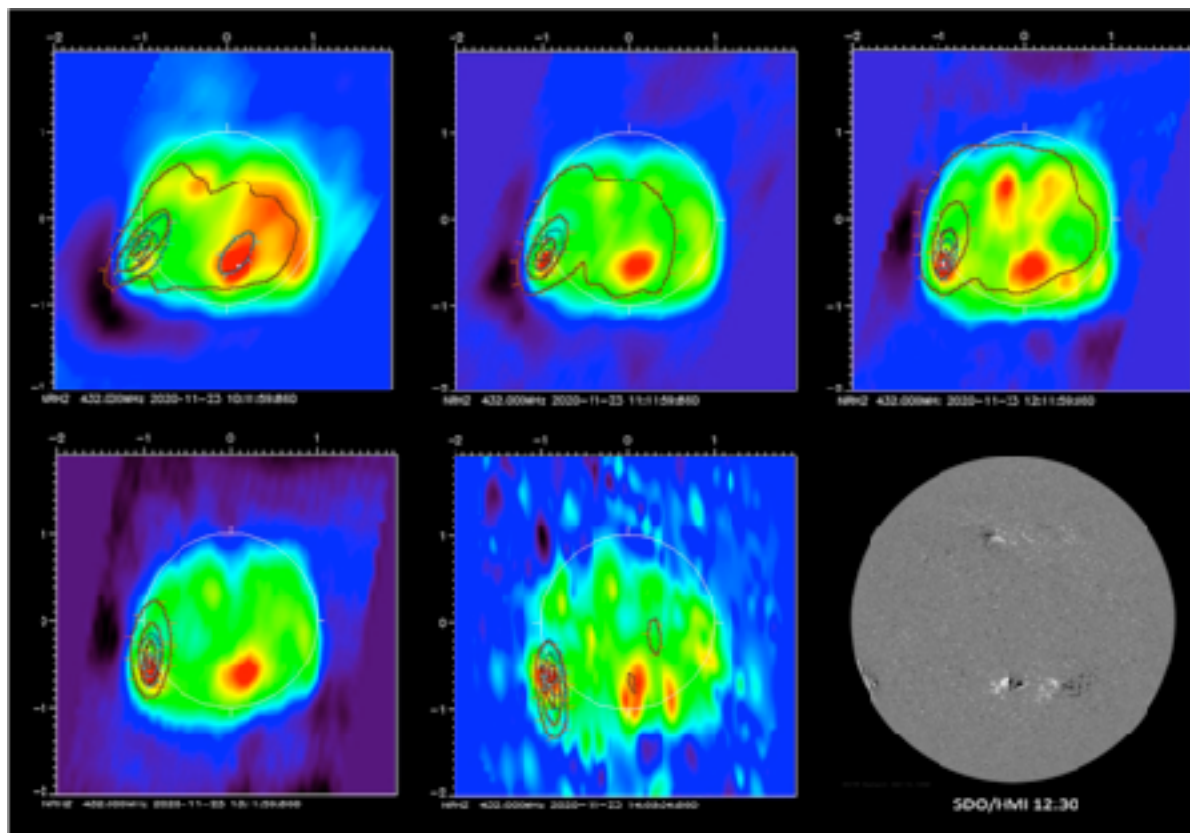
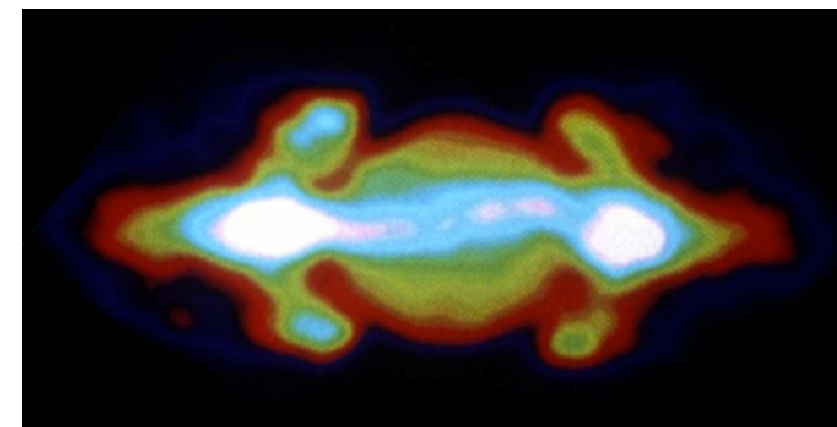


Fig. 8-6. (a) Spectra of typical radio sources; (b) calculated spectra for various values of spectral index n .



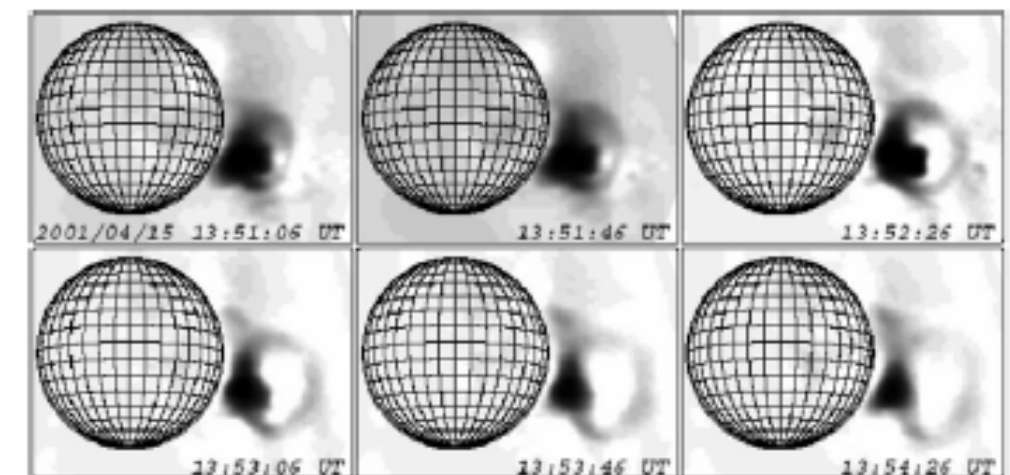
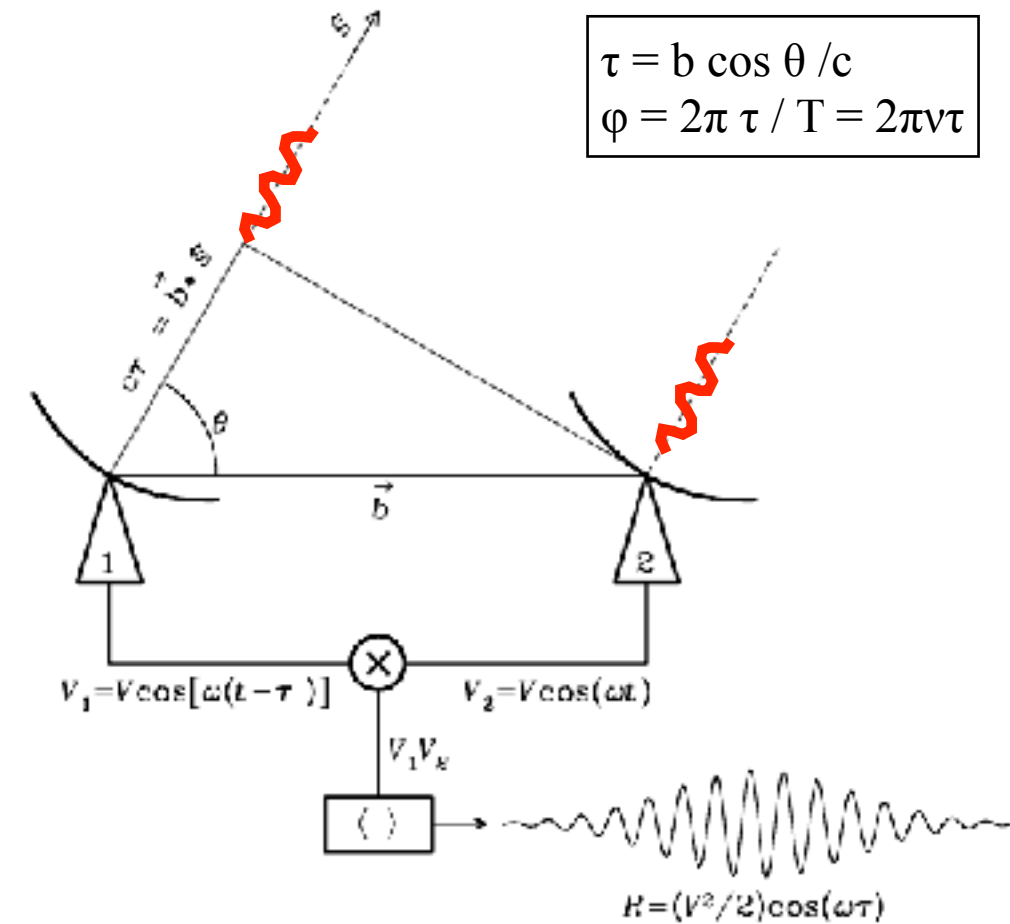
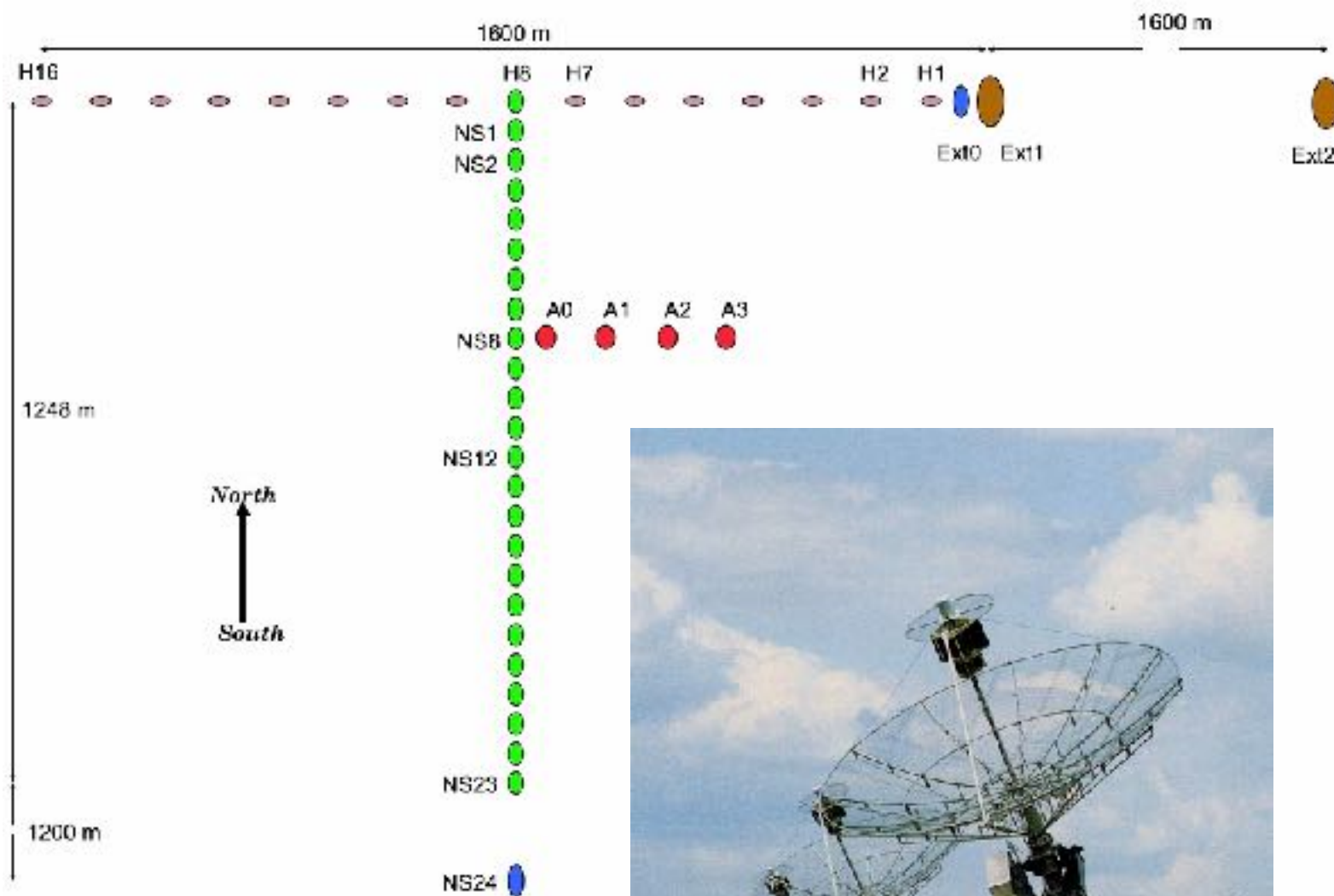
Emission plasma



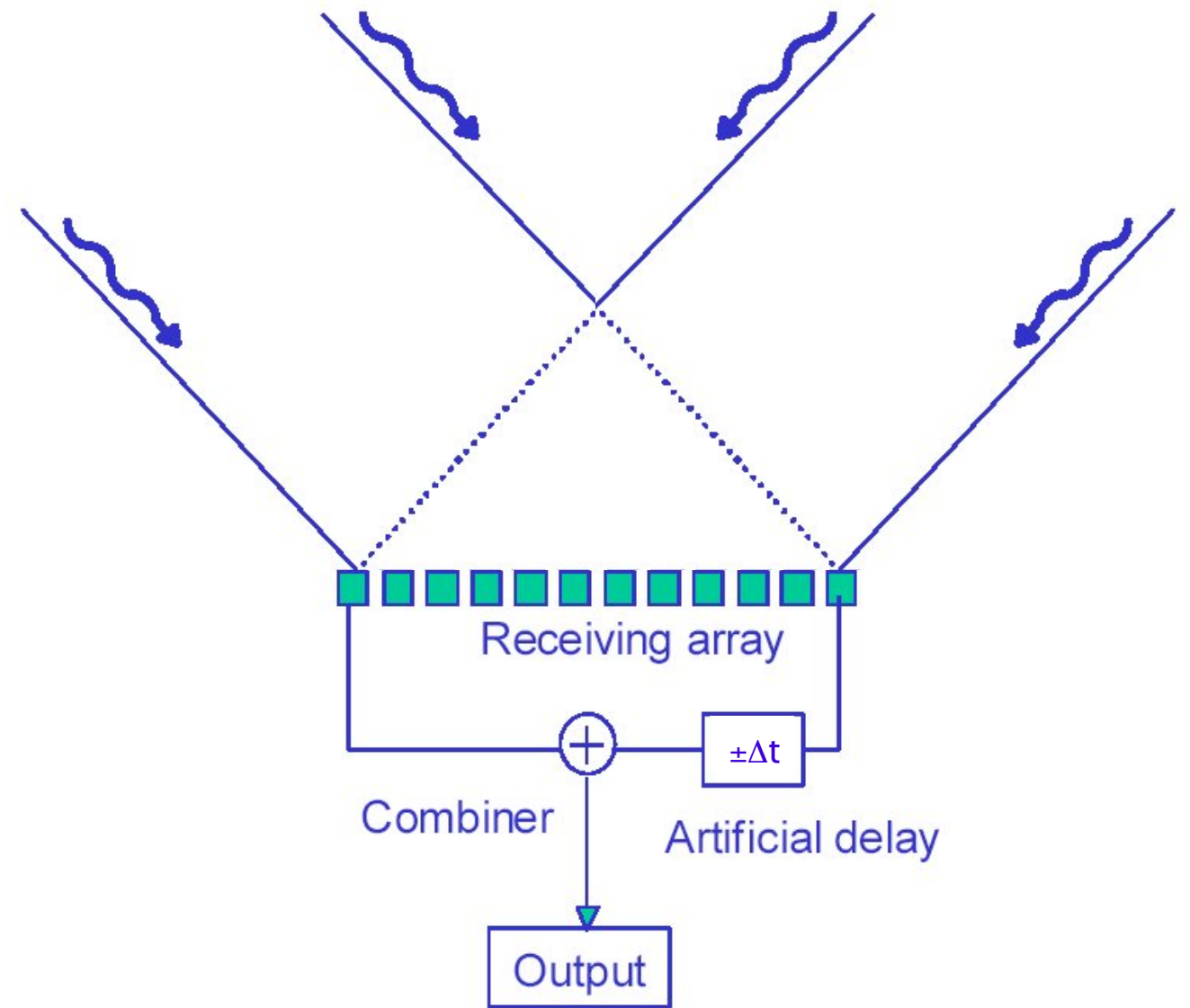
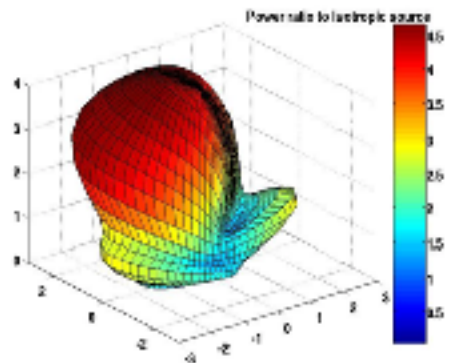
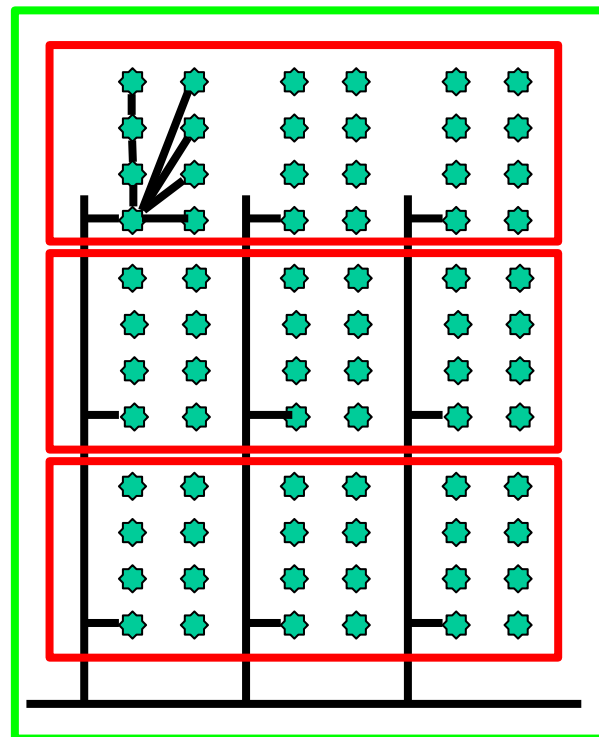
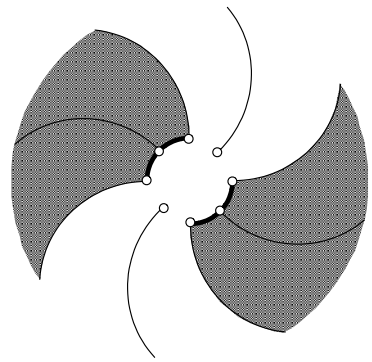
Emission synchrotron

→ "petits" instruments dédiés ≤ années 2000

- Radio Héliographe de Nançay (NRH) : interféromètre 150-450 MHz
 - ~50 paraboles de 5 (&10) m, ~1000 m², $\lambda/D \sim 1'-2'$
 - *cf. présentation de J. Girard*
 - produit (corrélation) des signaux des antennes, pour former des images (du Soleil)
 - localisation des sources, structure et activité magnétiques, // sondes spatiales

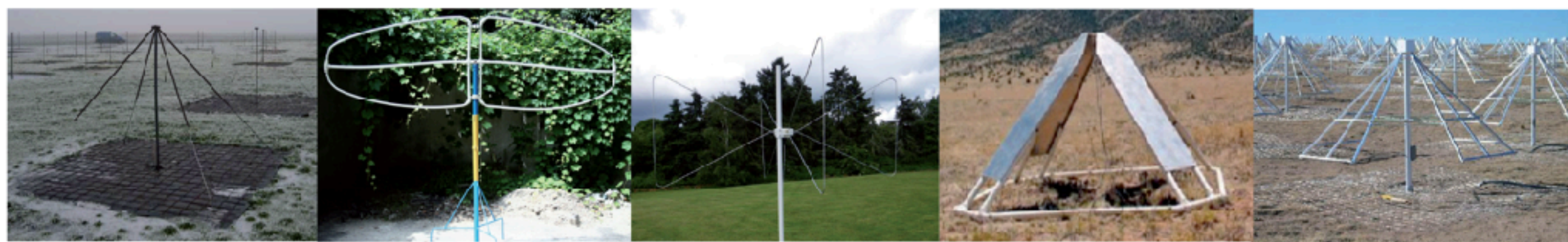


- Réseau Décamétrique de Nançay (NDA) : réseau phasé (analogique) 10-100 MHz
 2 x 72 antennes log-hélicoidales, $\sim 3500 \text{ m}^2$ par polarisation, $\lambda/D \sim 6^\circ$
 → somme des signaux des antennes pour synthétiser une antenne orientable



Pointage électronique par phasage (délais)

- Antennes dipoles $\rightarrow A_{\text{eff}}$ proportionnel à λ^2
 \rightarrow cf. *présentation de D. Charrier*



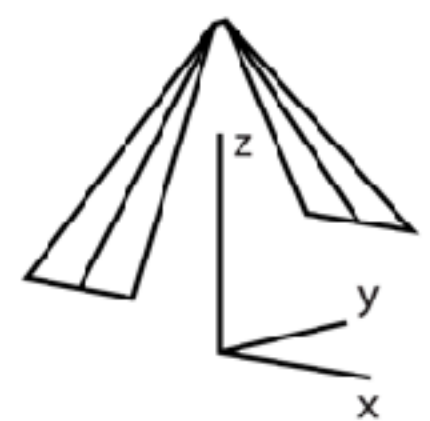
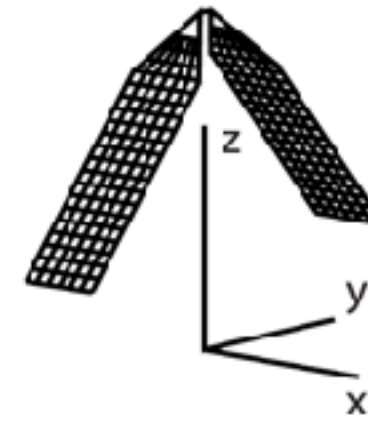
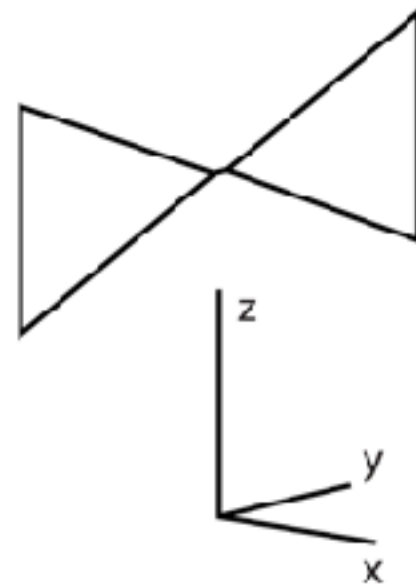
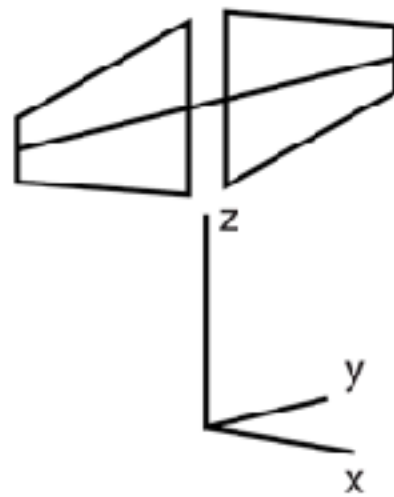
LOFAR LBA

GURT Butterfly

SUBATECH Butterfly

LWA Big Blade

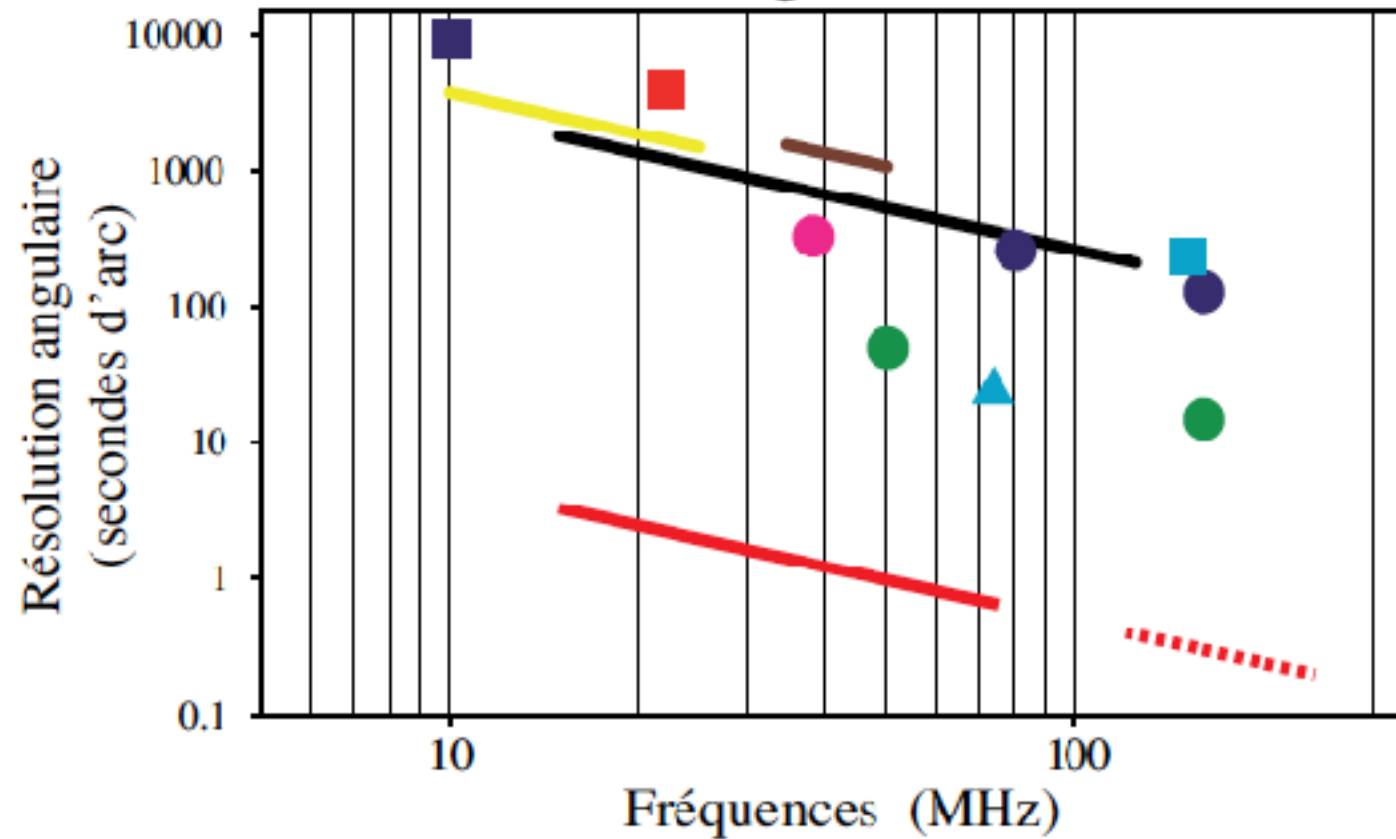
LWA Fork



Décennie 2000-2010 :

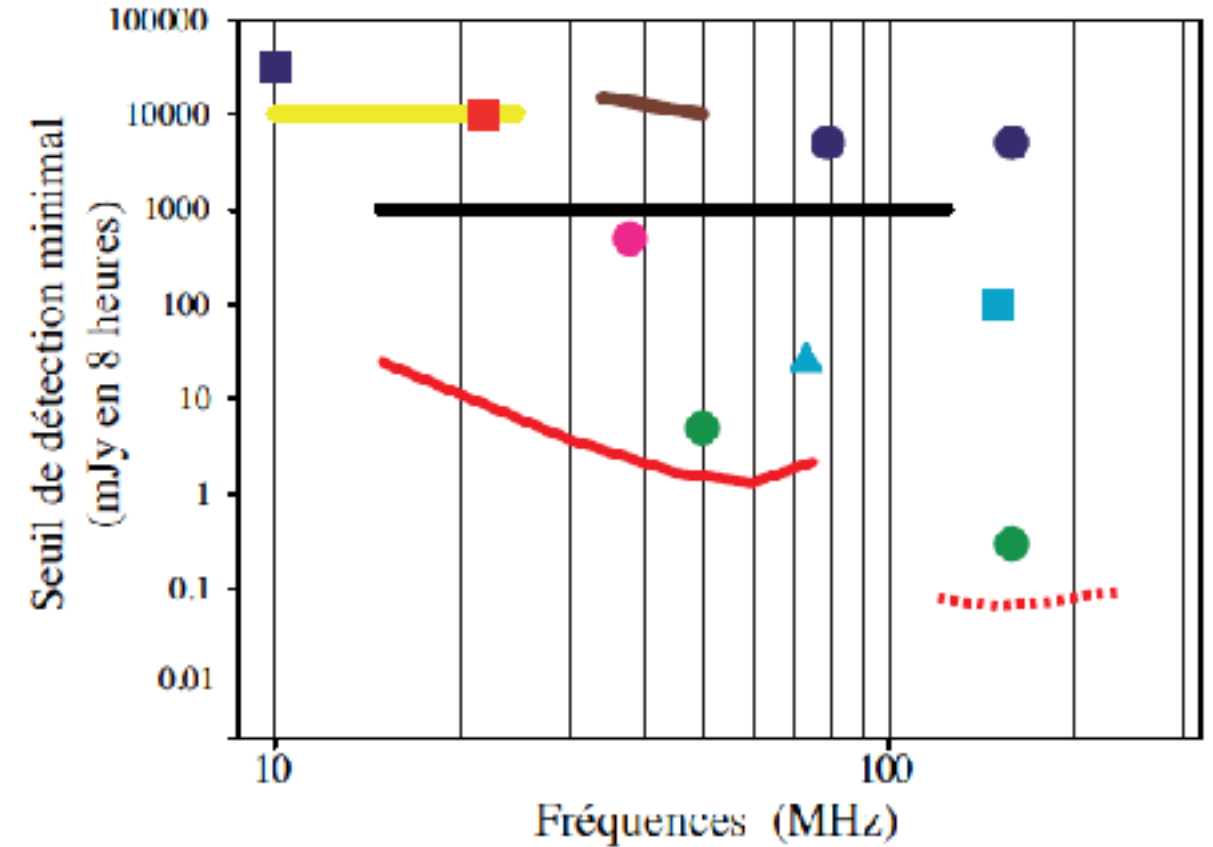
- Electronique & Informatique rapides → numérisation directe
→ *cf. présentation de C. Dumez-Viou*
- Réseaux d'antennes avec numérisation très proche des antennes
- Ouverture du domaine des BF (<300 MHz, $\lambda > 1$ m) avec hautes sensibilité et résolution

Résolution angulaire de LOFAR



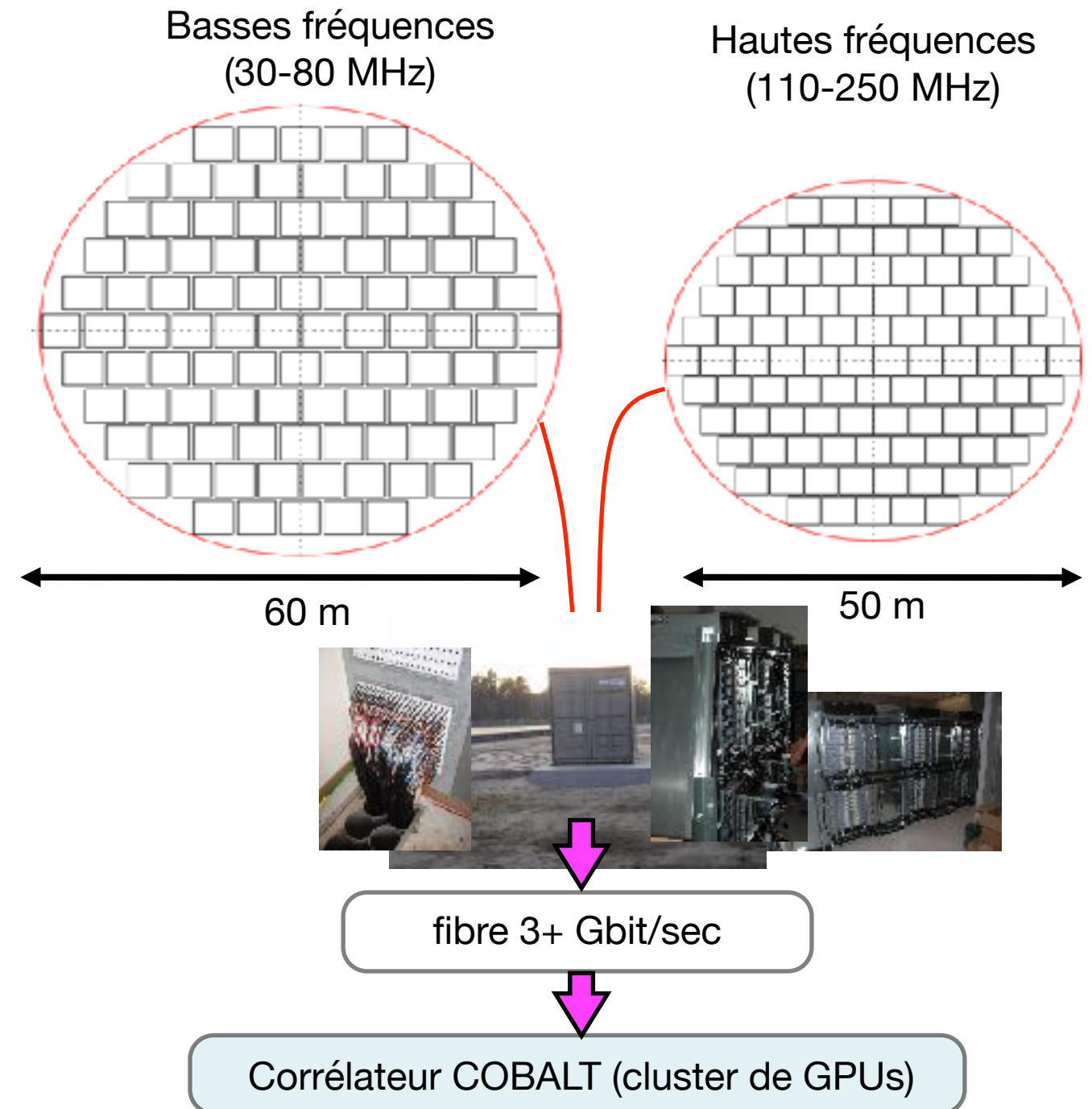
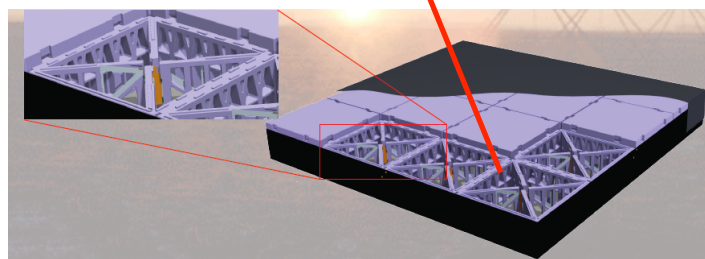
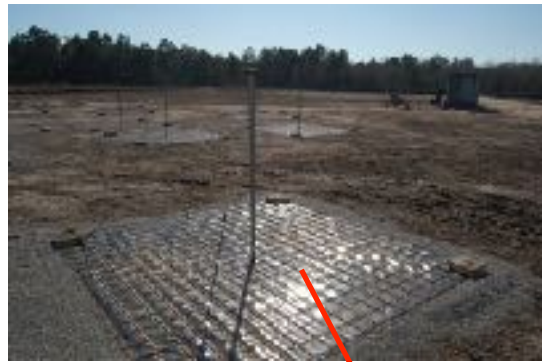
- LOFAR (LBA)
- ⋯ LOFAR (HBA)
- GMRT
- CLRO
- Culgoora
- ▲ 74 MHz VLA

Sensibilité de LOFAR



- Cambridge Polar Cap
- DRAO-10
- DRAO-22
- Gauribidanur
- Mauritius
- UTR-2

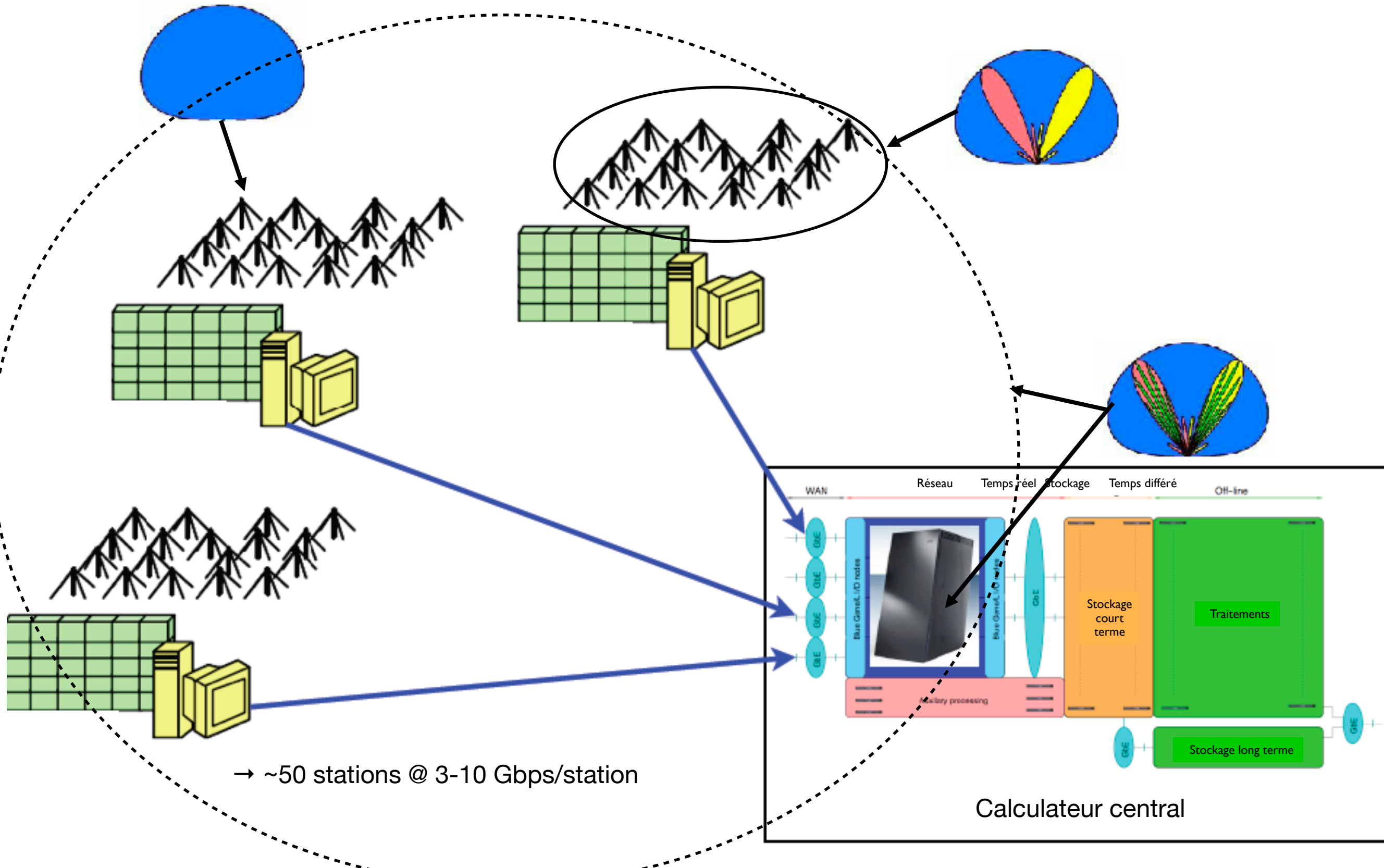
- Précurseur = LOFAR = interféromètre de réseaux phasés
 - LBA = réseau phasé d'antennes élémentaires
 - HBA = réseau phasé de tuiles analogique, beam orientable, FoV ↓, sensibilité
 Puis traitement entièrement numérique



- Le réseau LOFAR

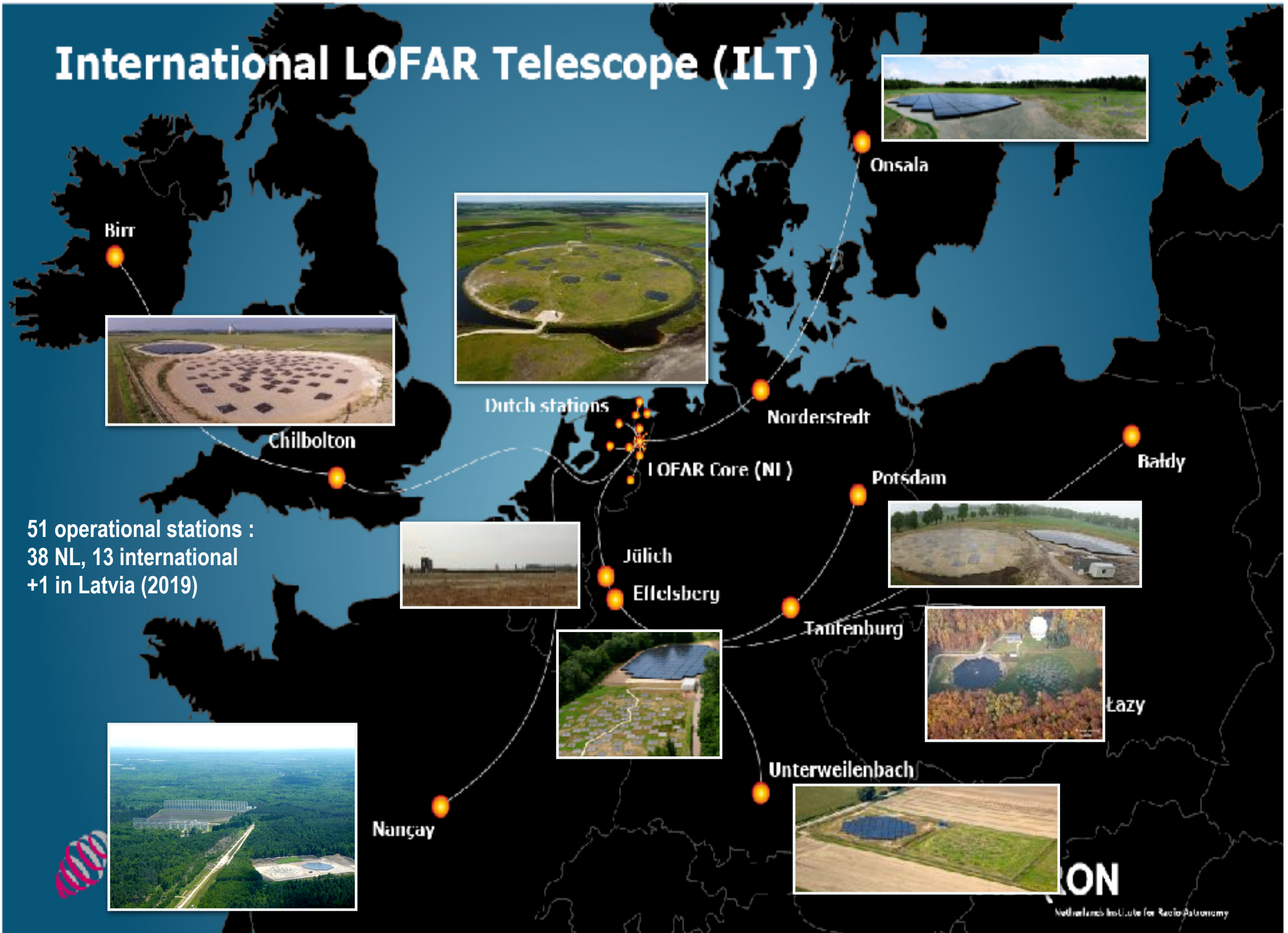
→ Traitements «station» : amplification, numérisation, filtrage, beam-forming, buffers «transitoires» (TBB)

→ Calculateur central : compensation des délais, corrélation / sommation, étalonnage, traitements scientifiques



- Le réseau LOFAR

International LOFAR Telescope (ILT)



51 operational stations :
 38 NL, 13 international
 +1 in Latvia (2019)

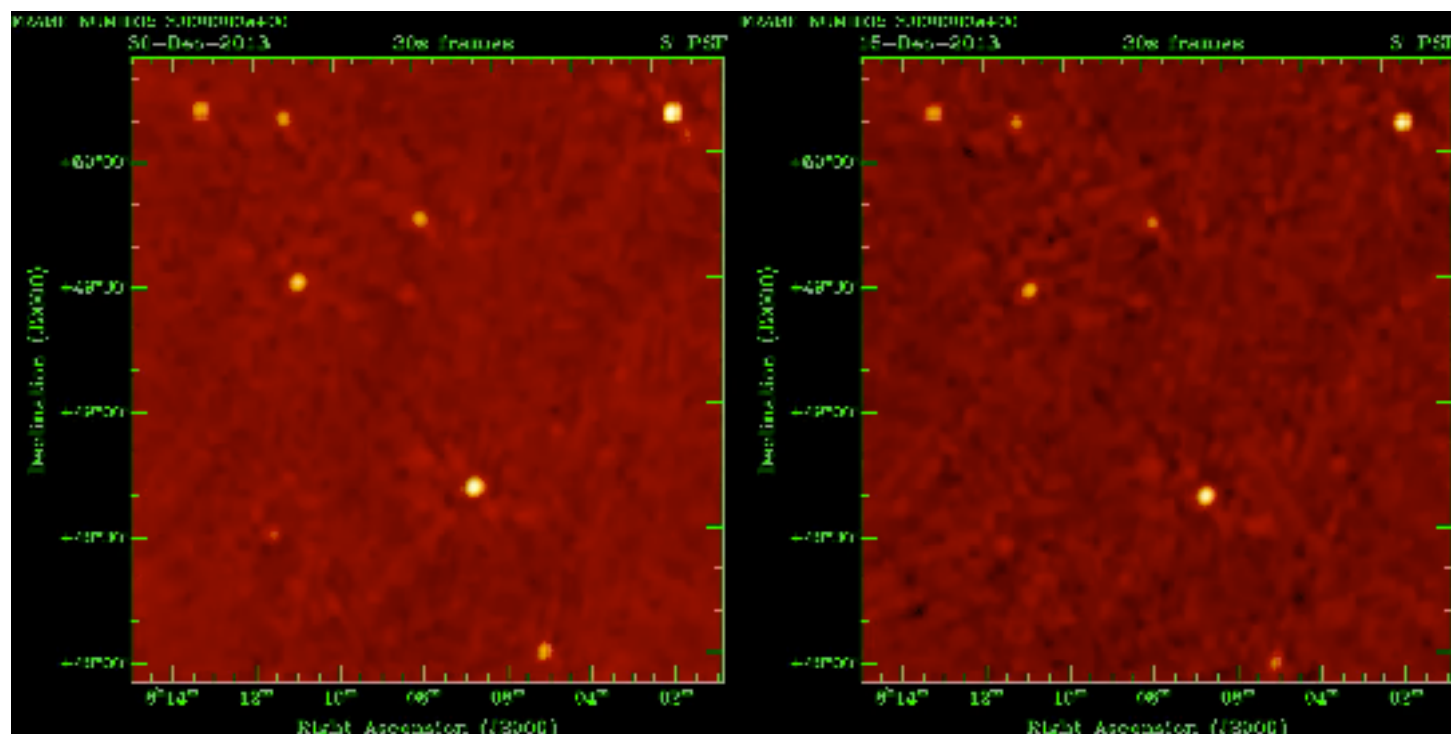
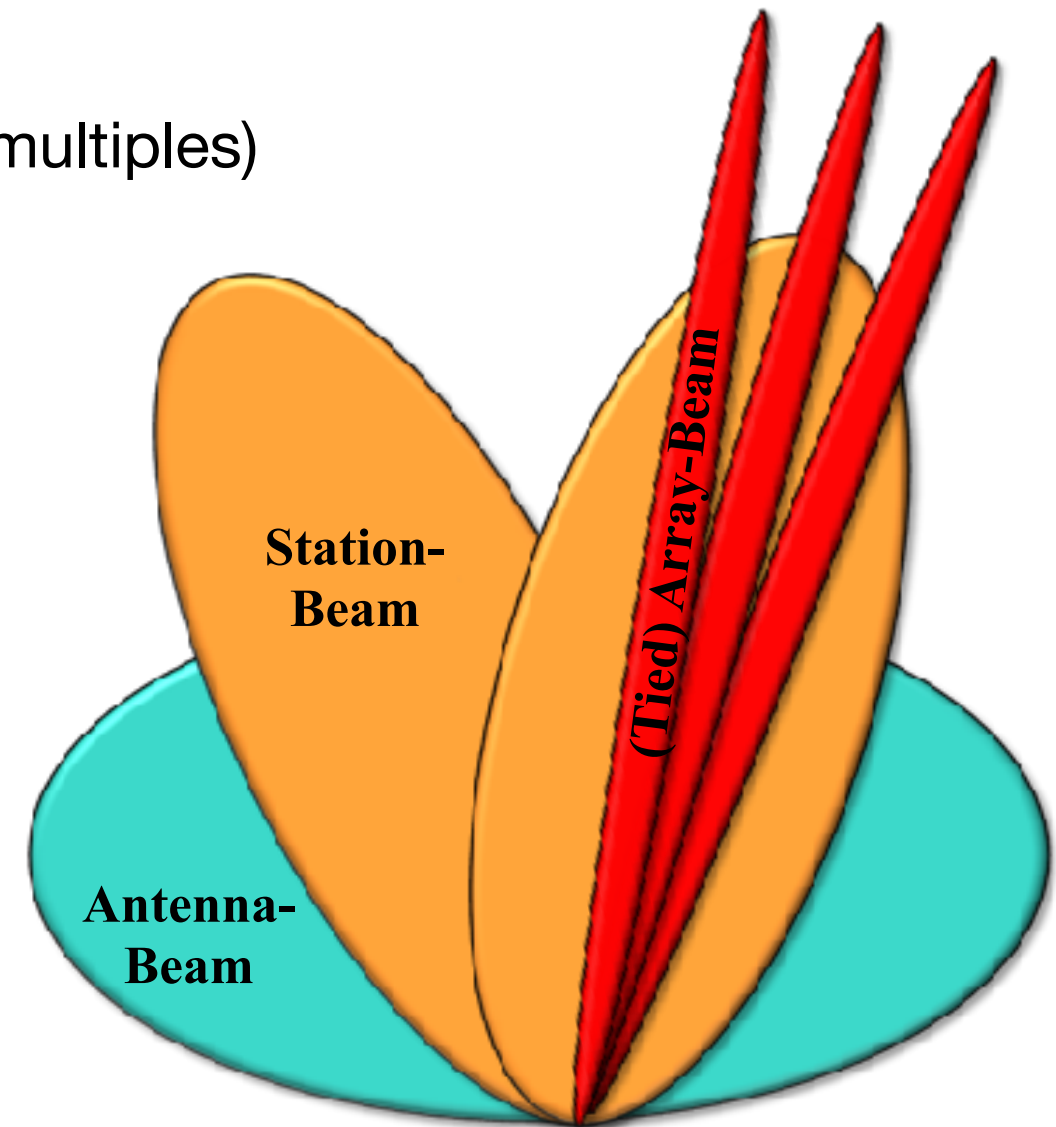
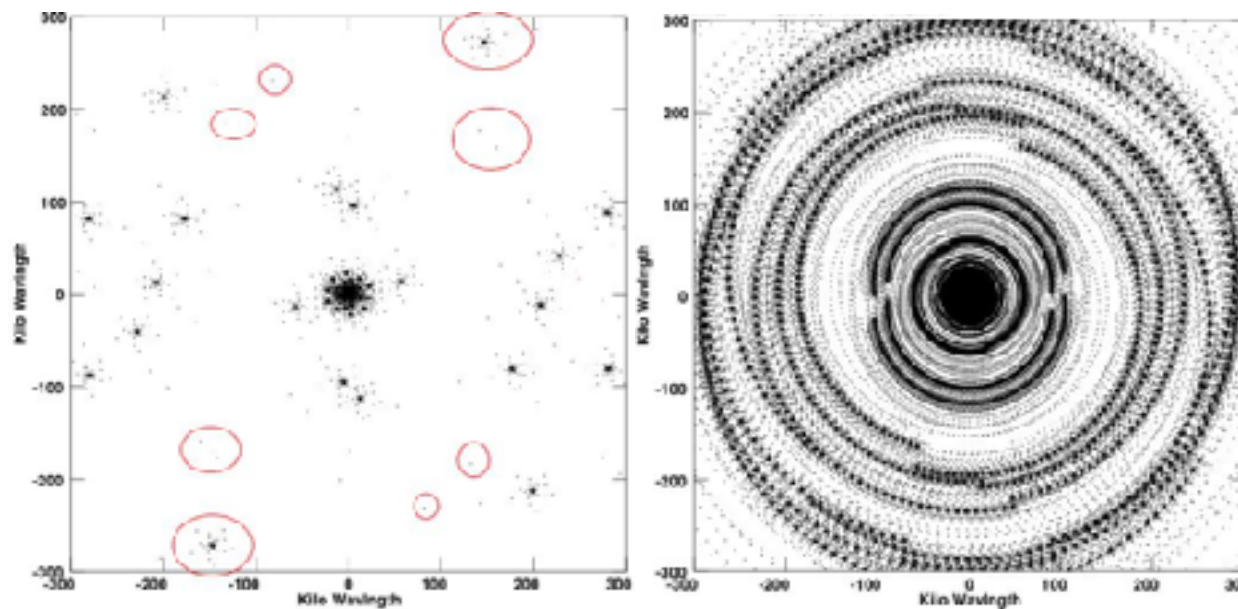


ION

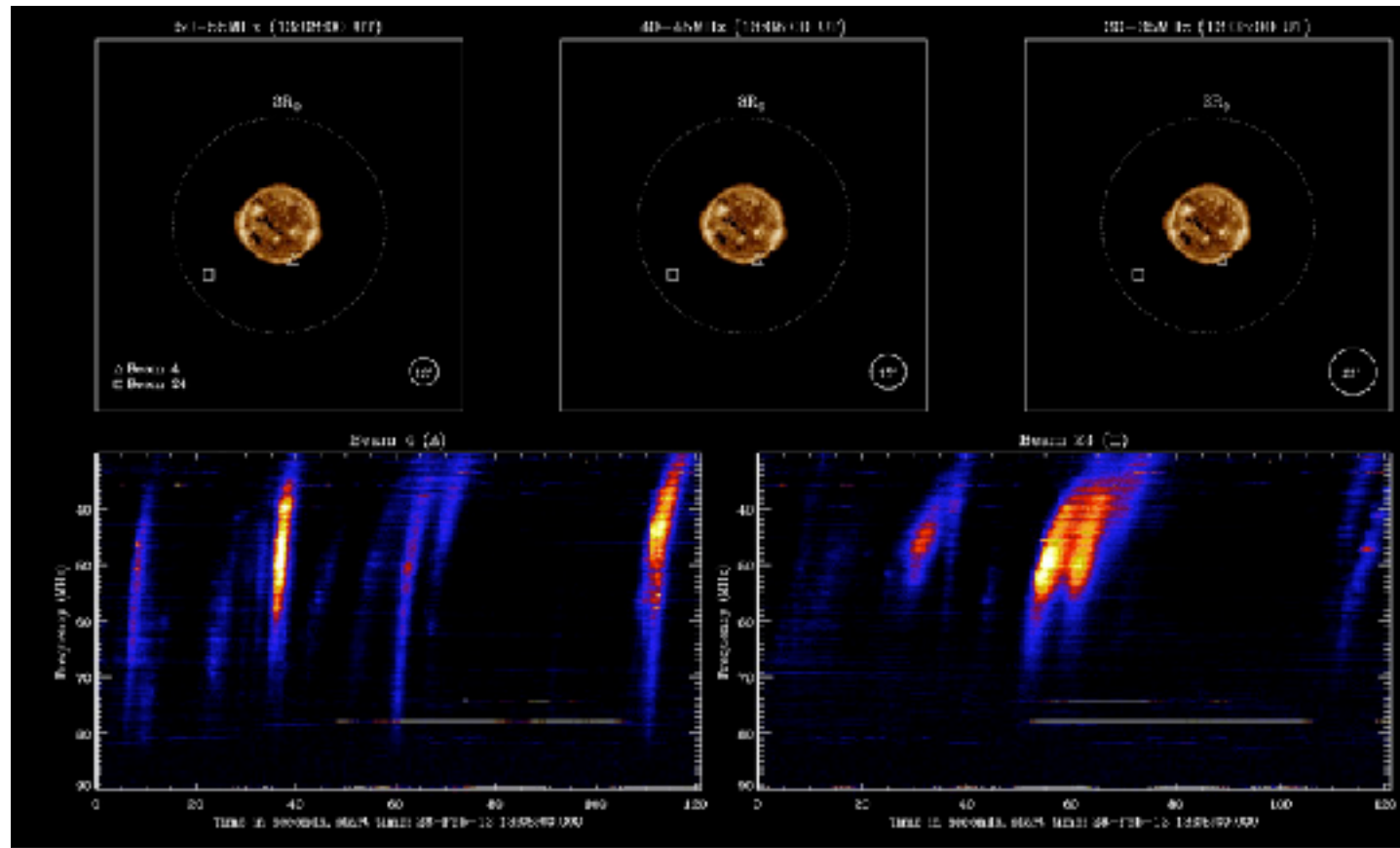
- Le réseau LOFAR : utilisation en réseau phasé (beamforming) ou imageur

→ Réseau phasé : faisceaux incohérents & cohérents (multiples)

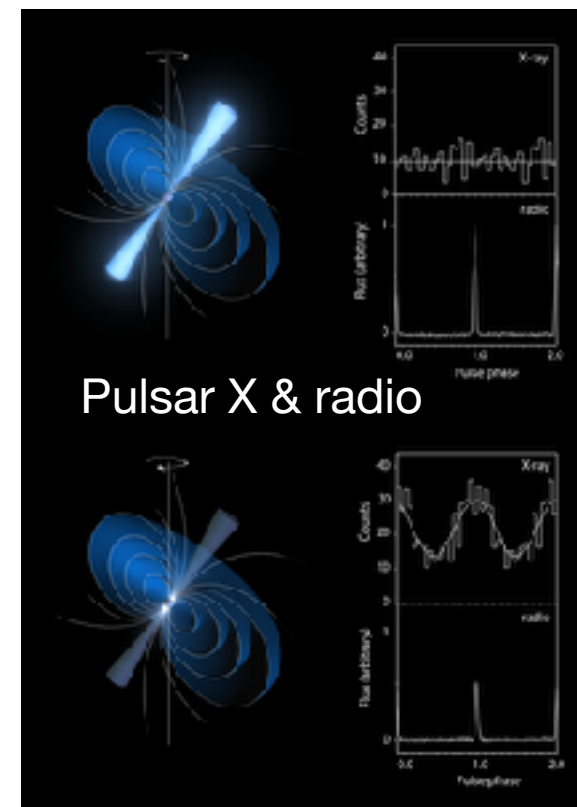
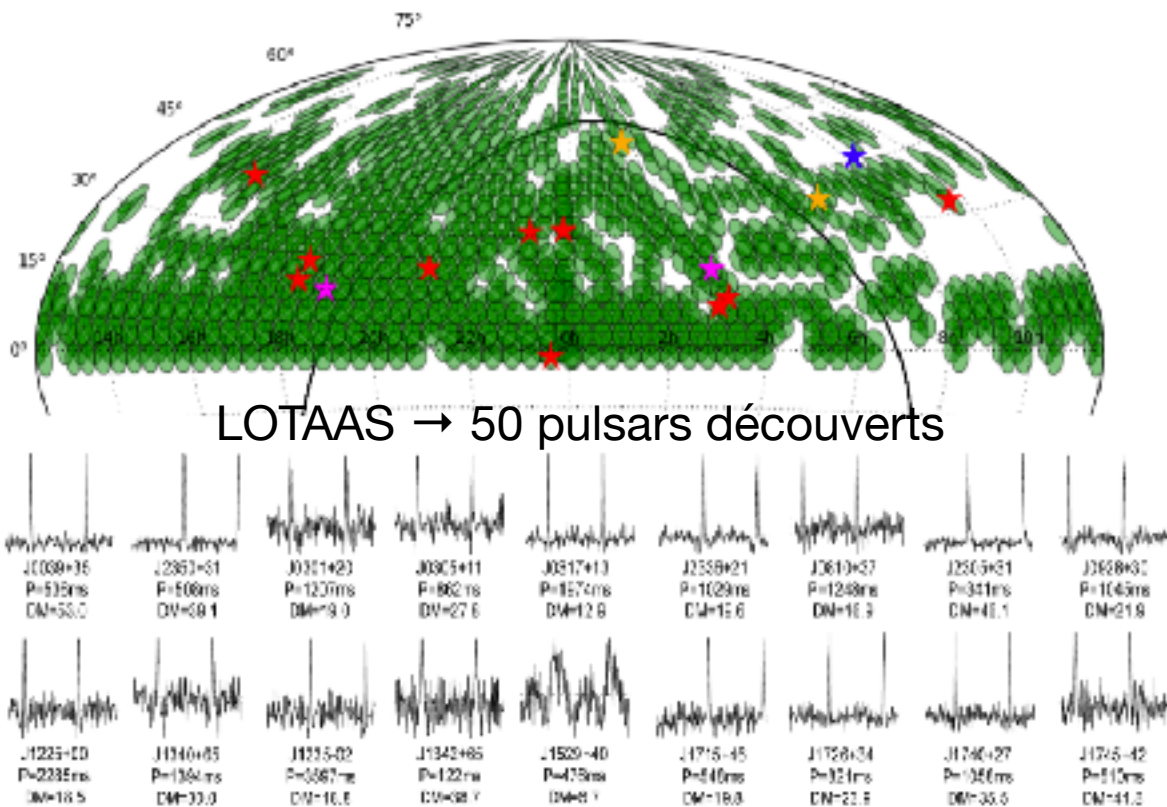
→ Imagerie interférométrique



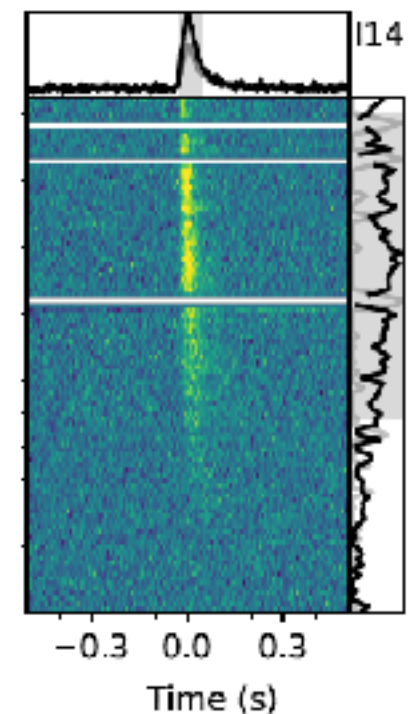
- Le réseau LOFAR : utilisation en réseau phasé (beamforming) ou imageur
 - Résultats scientifiques en mode réseau phasé



Sursauts radio solaires de type III

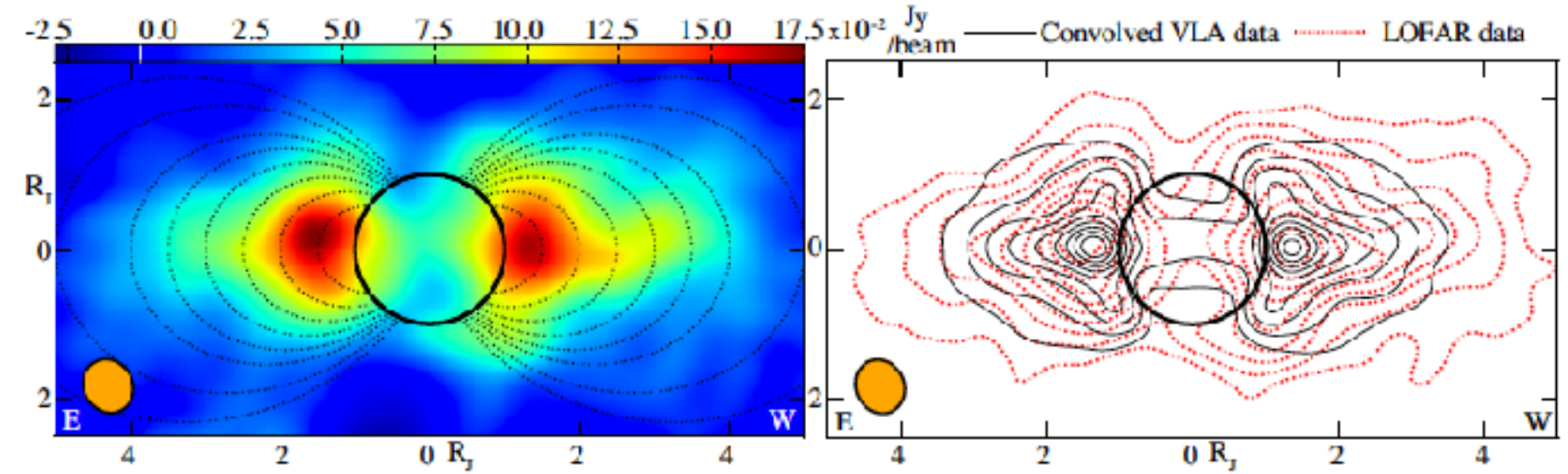


Fast Radio Burst 20180916

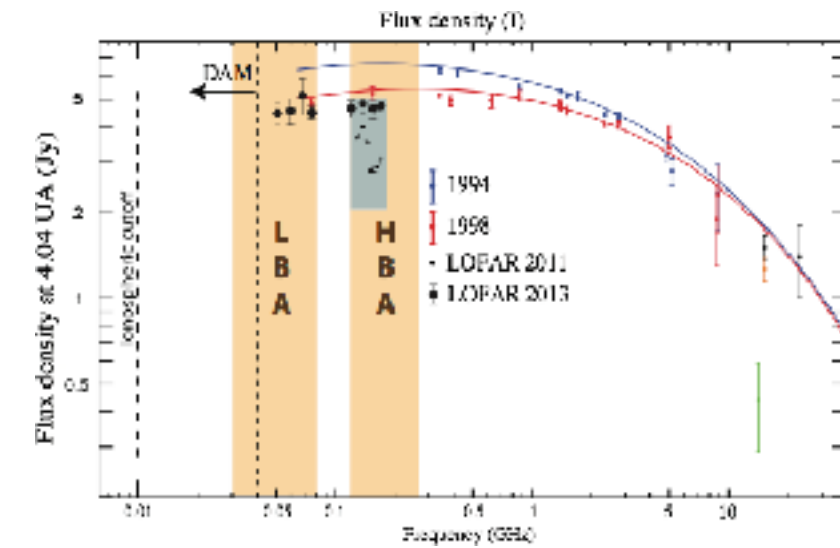


- Le réseau LOFAR : utilisation en réseau phasé (beamforming) ou imageur
 → Résultats scientifiques en mode imagerie

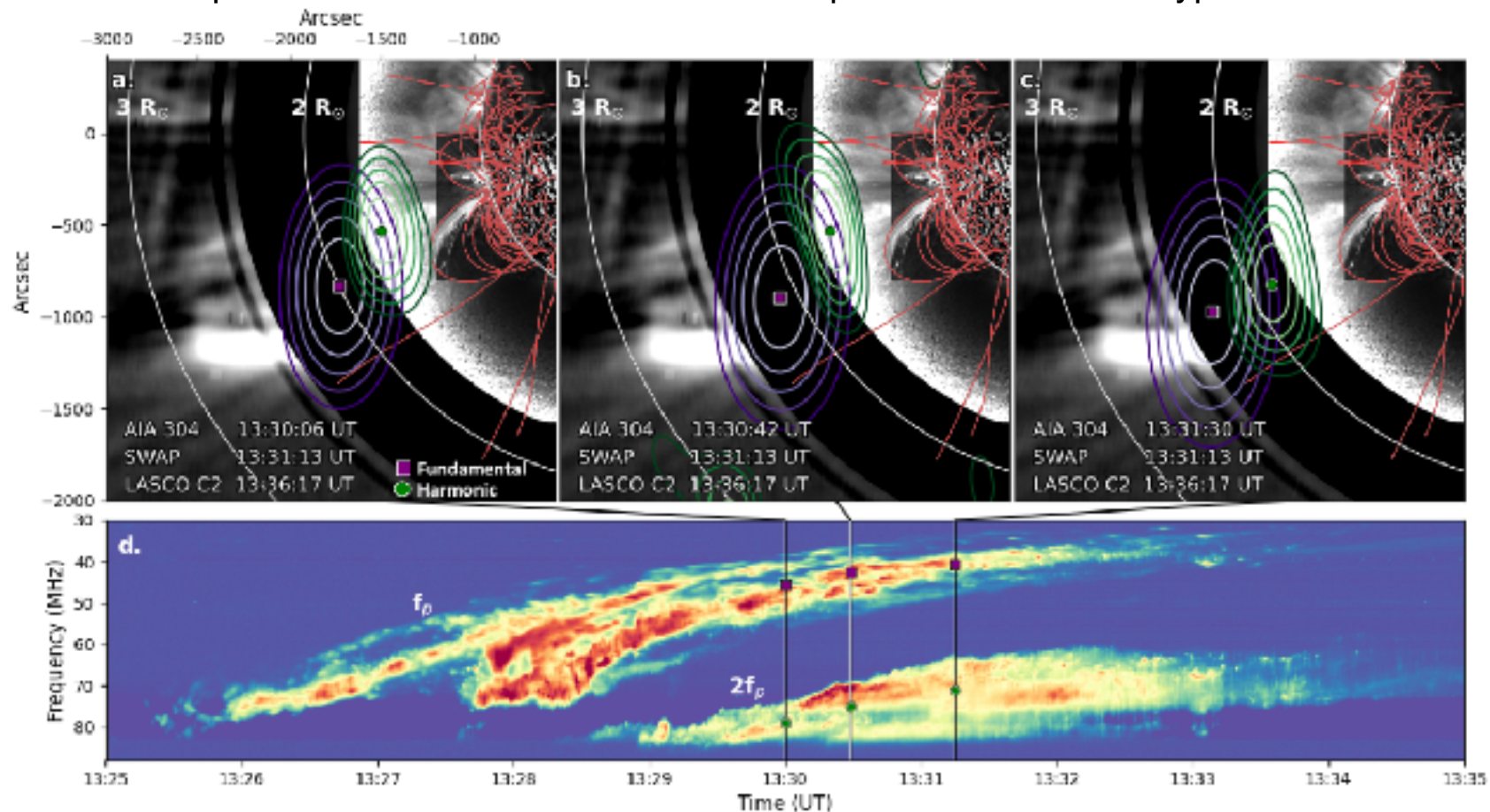
1^{ère} image à 150 MHz de Jupiter, comparée au VLA (distribution d'e- de 100's keV plus étendue)



Spectre basse fréquence



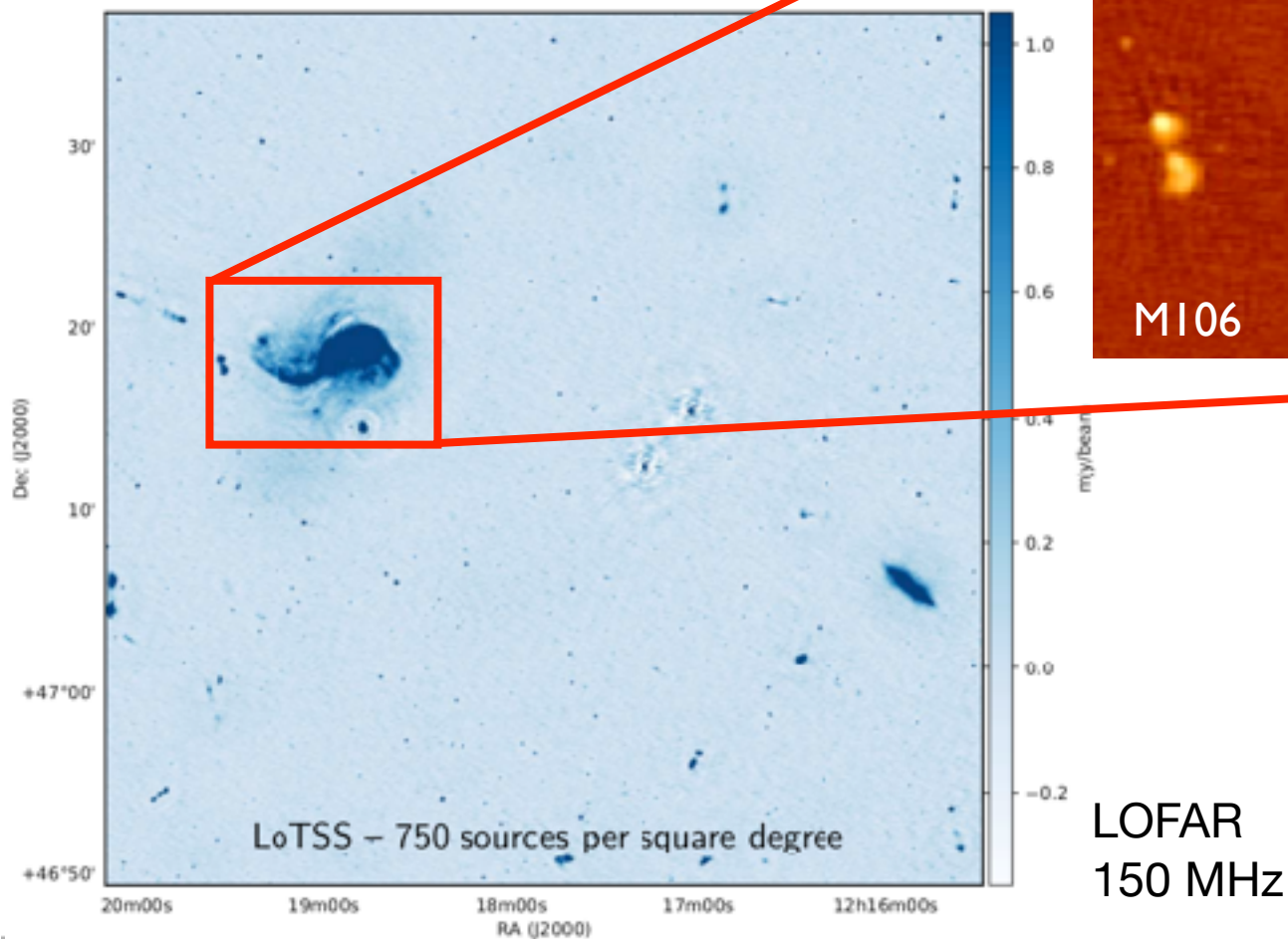
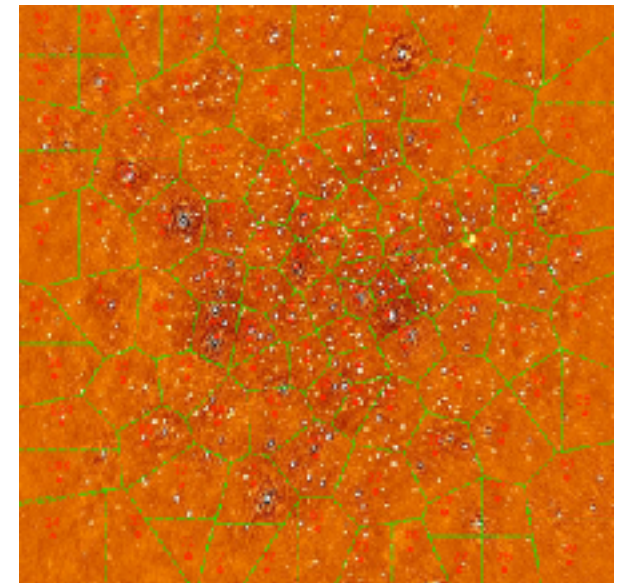
Composantes Fondamentale et Harmonique d'un sursaut de type II solaire



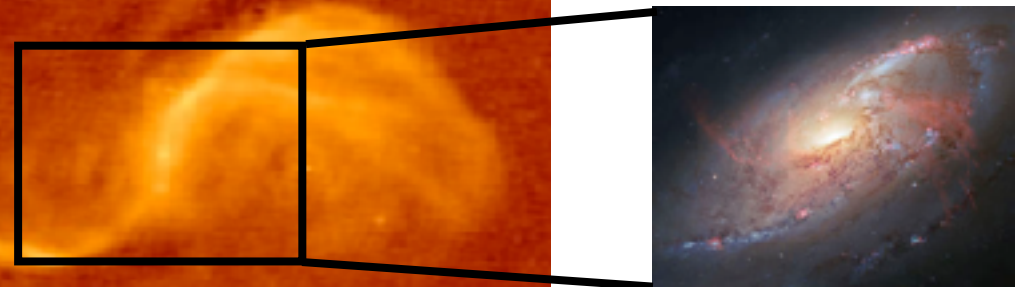
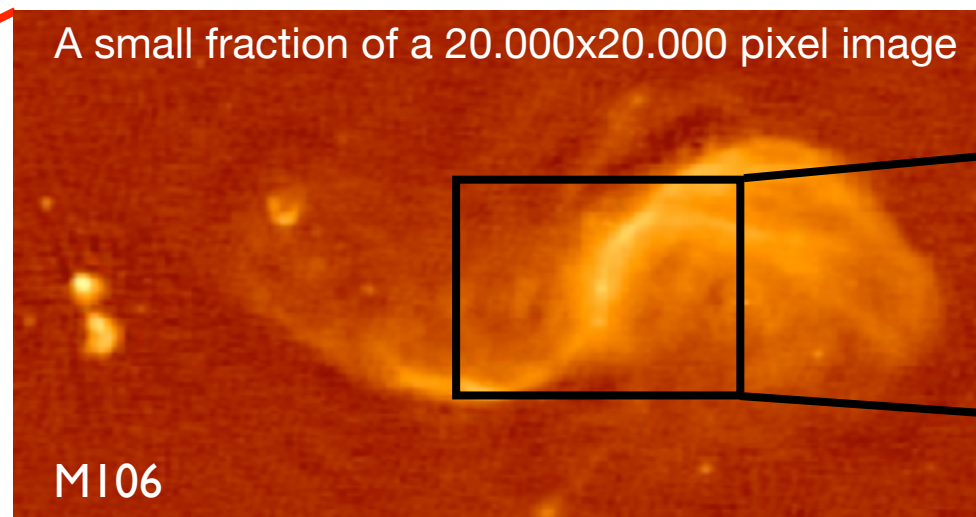
- Développements mathématiques de l'interférométrie avec polarisation (RIME)
→ *cf. présentation de J. Girard*
- Flagging des RFI, OA numérique, dépendant de la direction



VLA 1.4 GHz configuration compacte



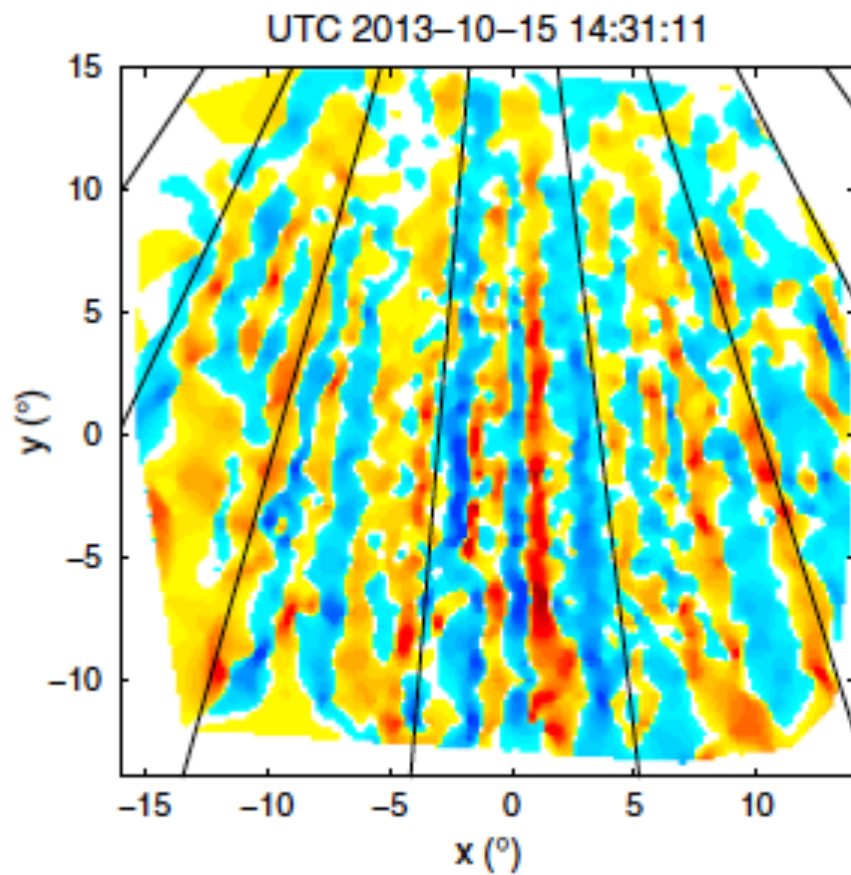
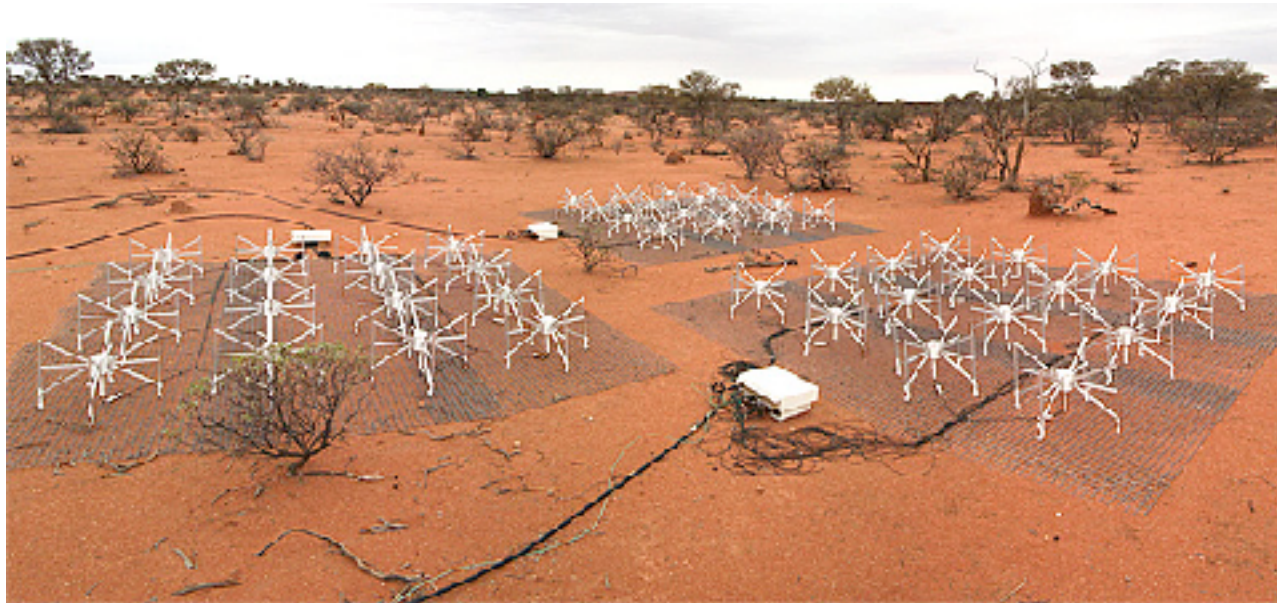
A small fraction of a 20.000x20.000 pixel image



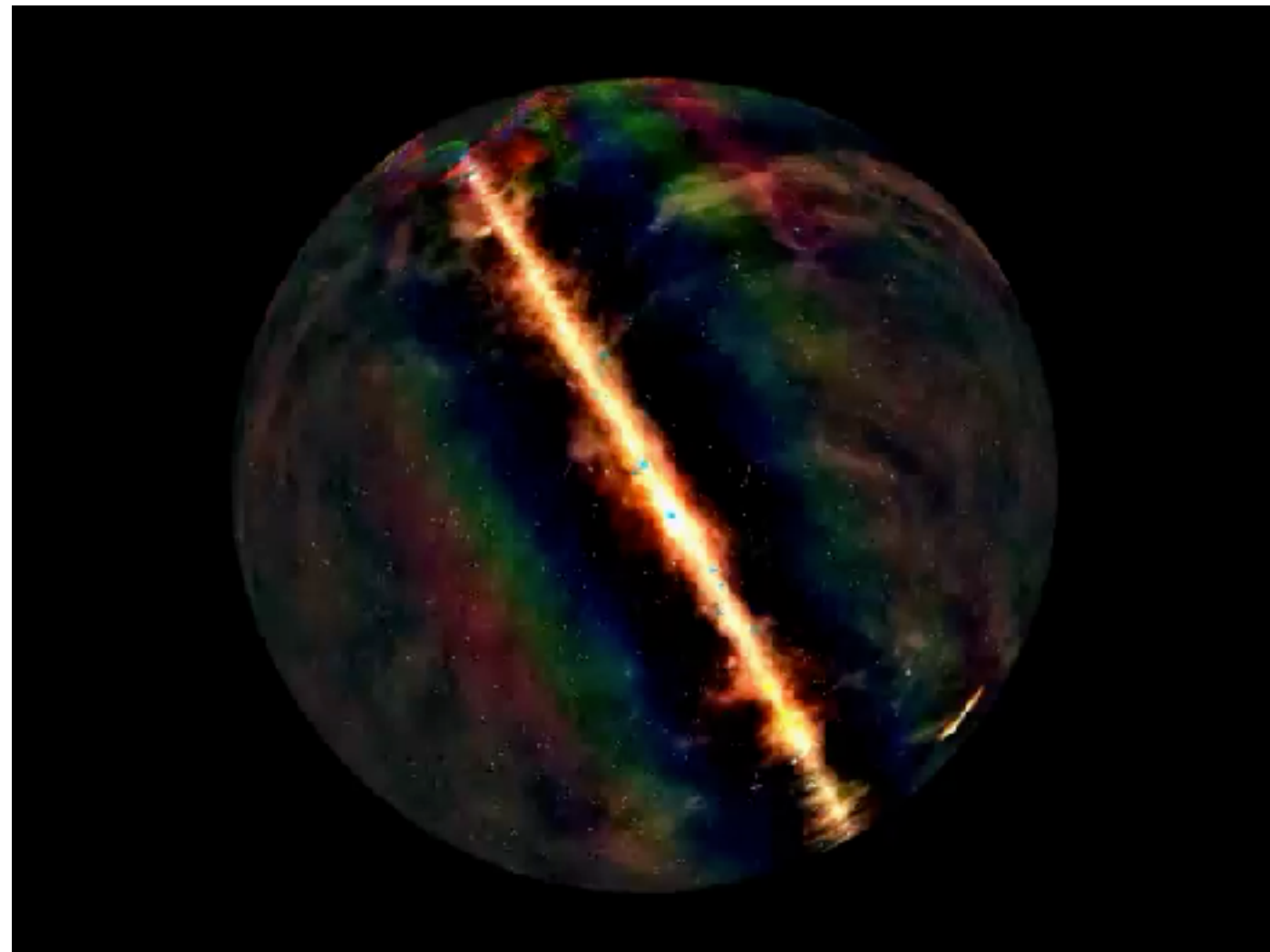
→ Au final, limitation ultime = $\sigma (T_{\text{ciel}})$

→ Résultats LOFAR principalement HBA (sensibilité limitée en LBA)

- MWA (70-300 MHz)



Canaux de plasma ionosphériques // B

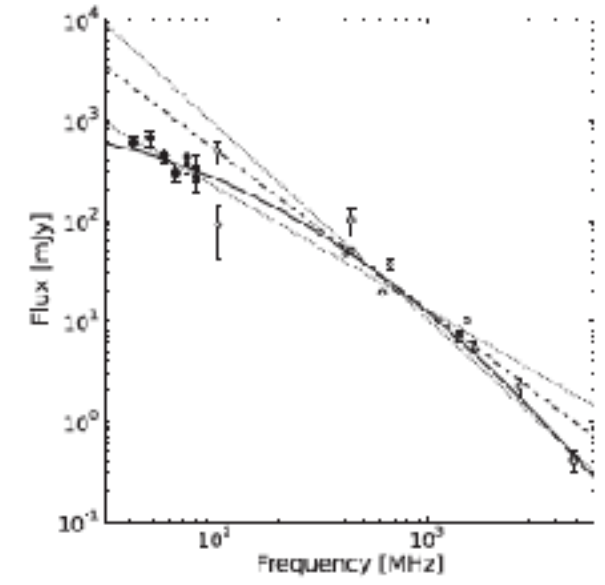
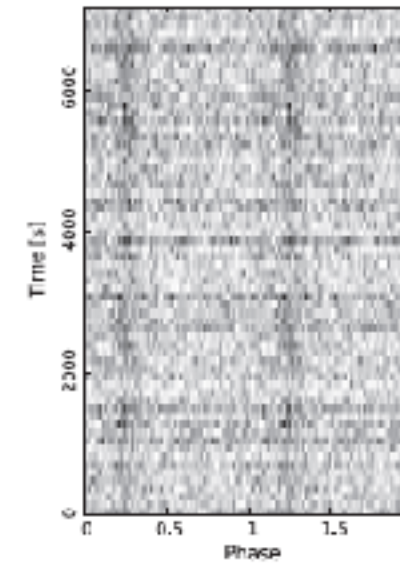
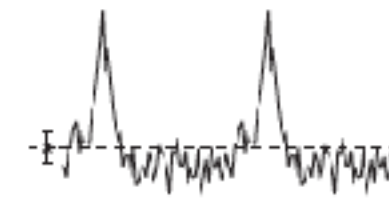


Survey multi-fréquences GLEAM

- LWA (10-88 MHz)



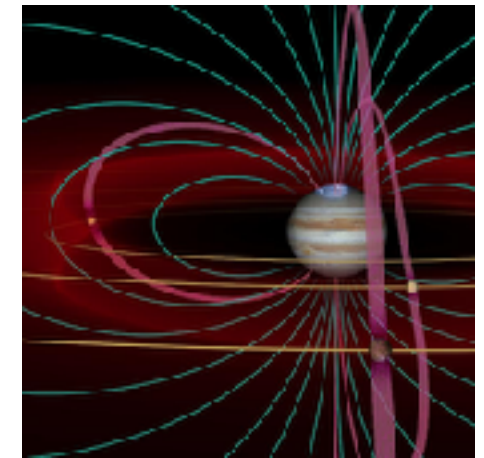
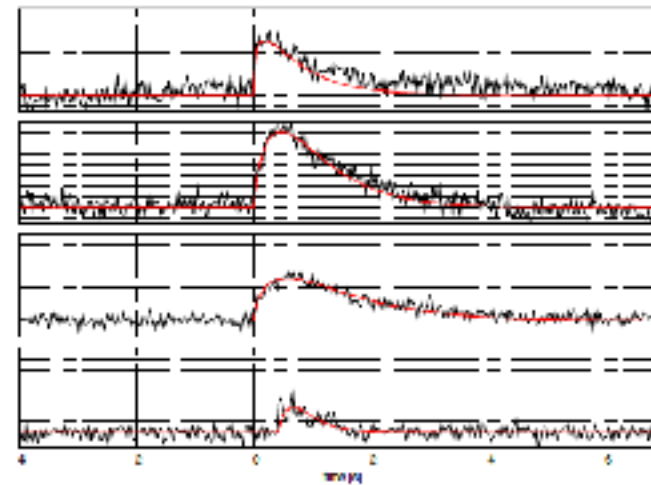
Survey



Pulsar milliseconde

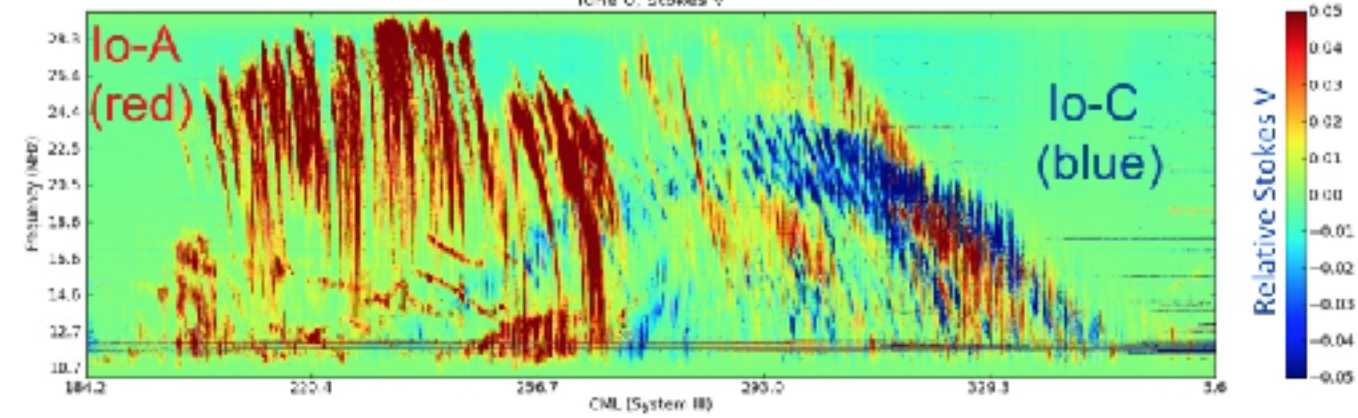
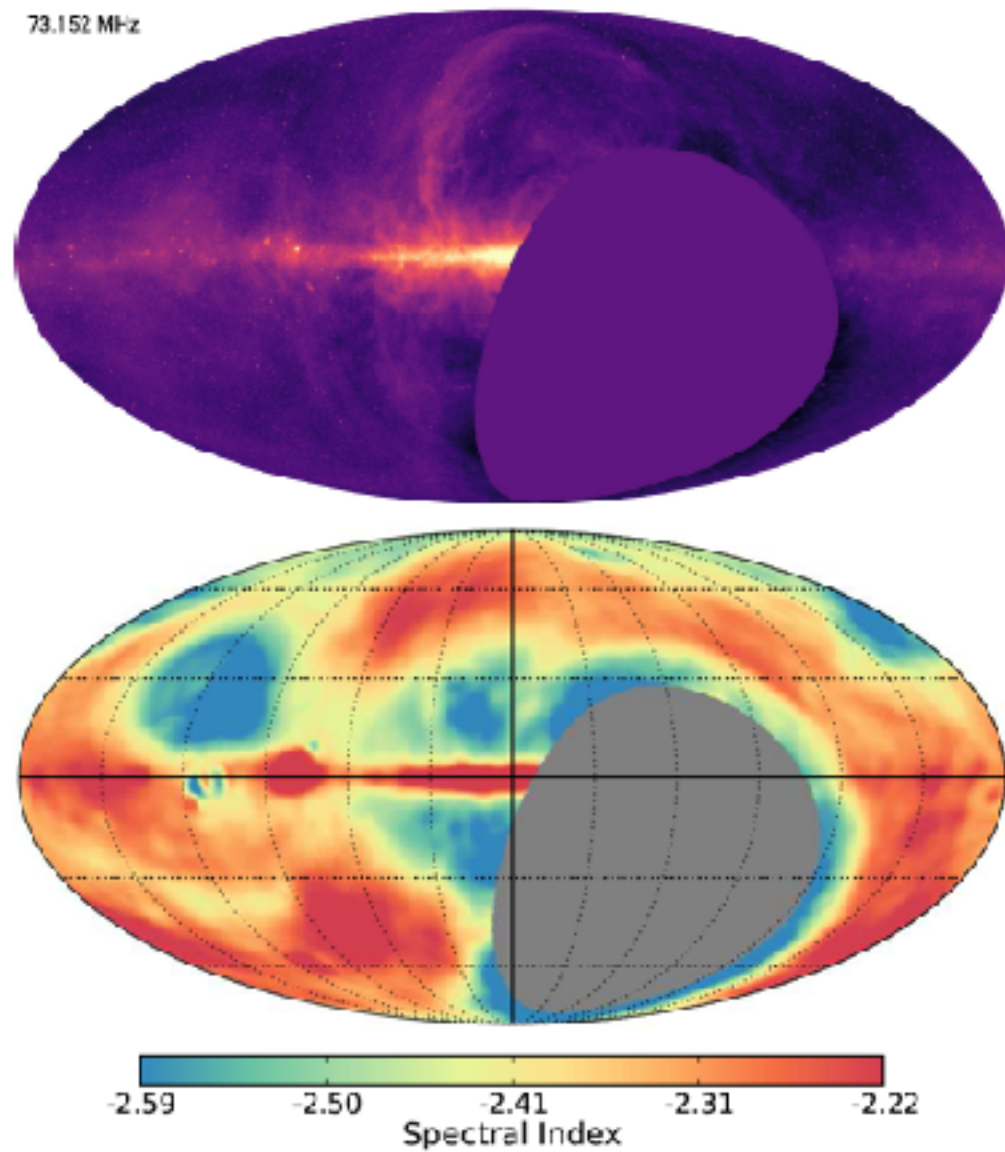
73.152 MHz

Pulses géants du Crabe

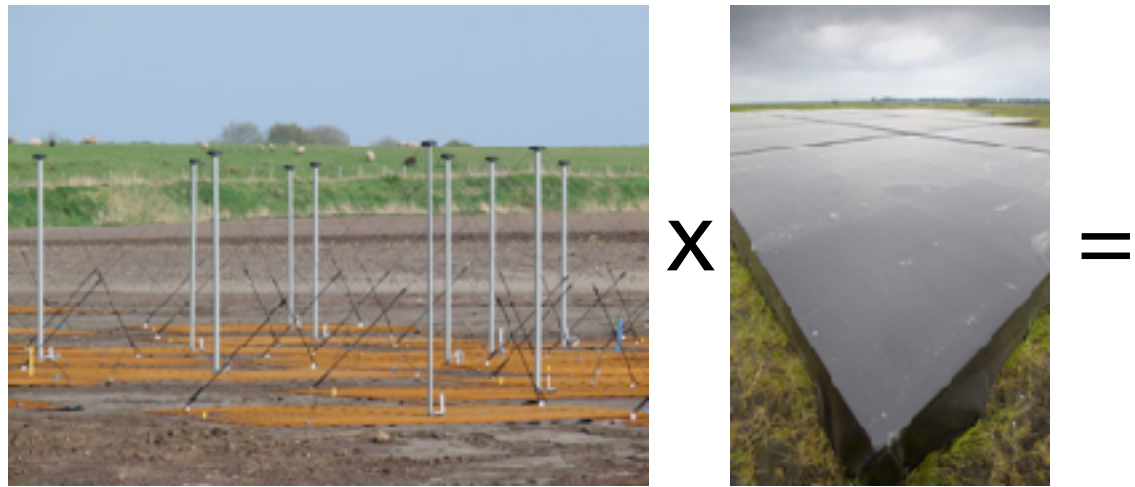


Jupiter

Time 0: Stokes V

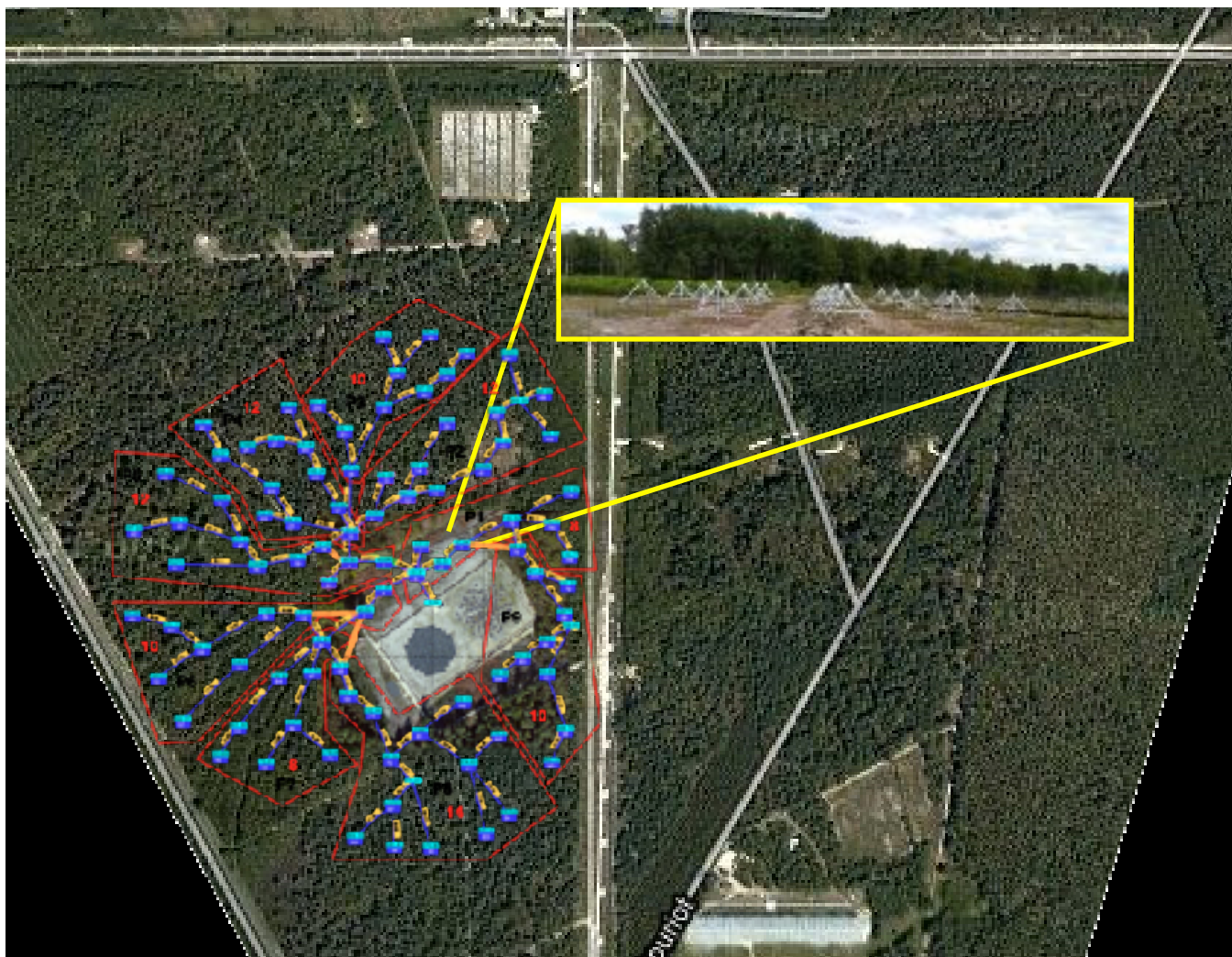


- NenuFAR (10-85 MHz), en fin de construction à Nançay



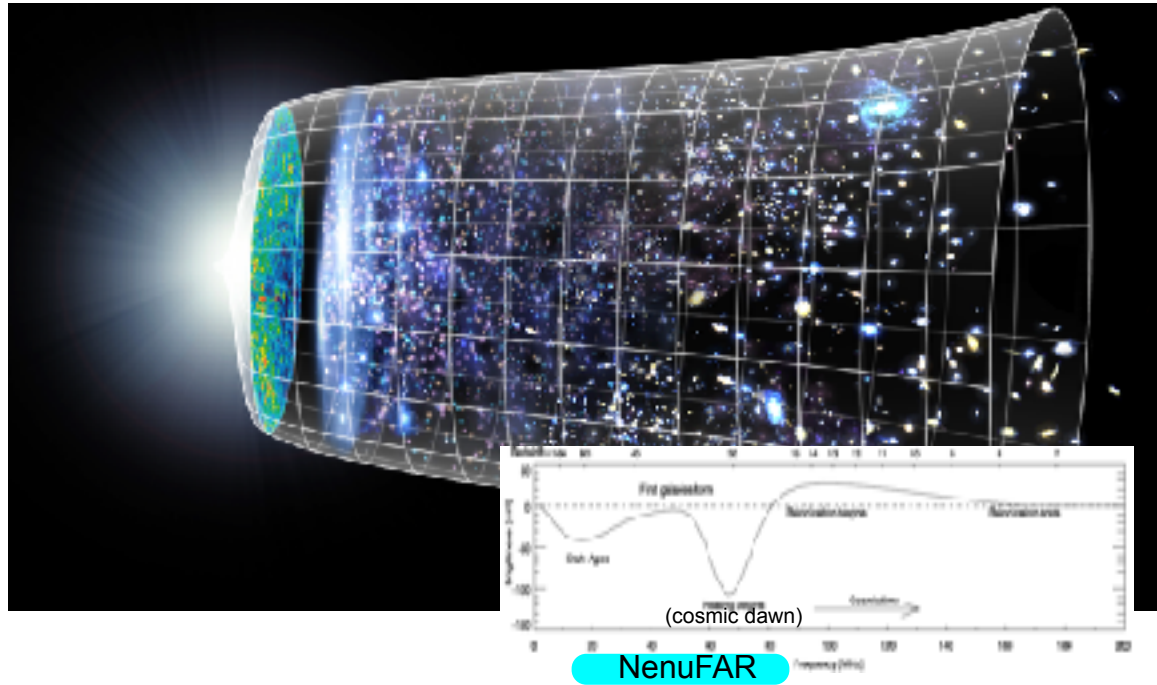
Antennes LBA+ x tuiles = Mini-Réseaux (19 antennes)

NenuFAR = 96 + 6 Mini-Réseaux

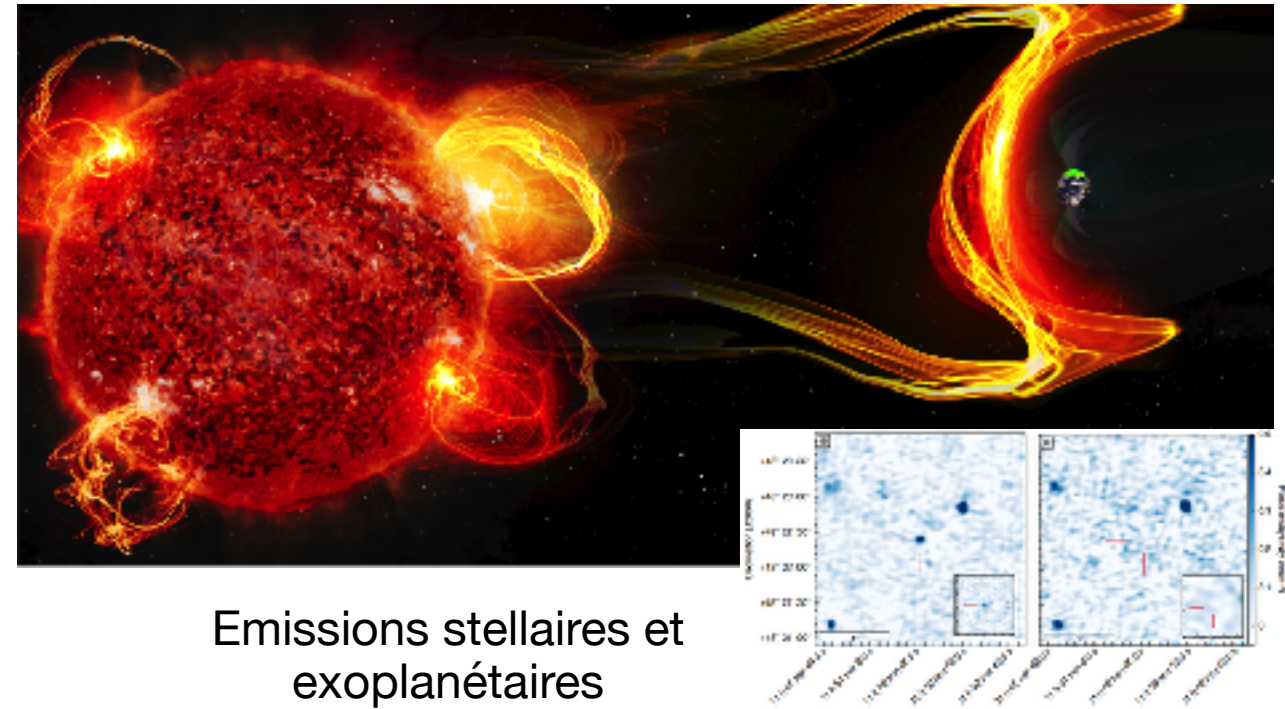


Radiotélescope BF autonome + Super Station LOFAR

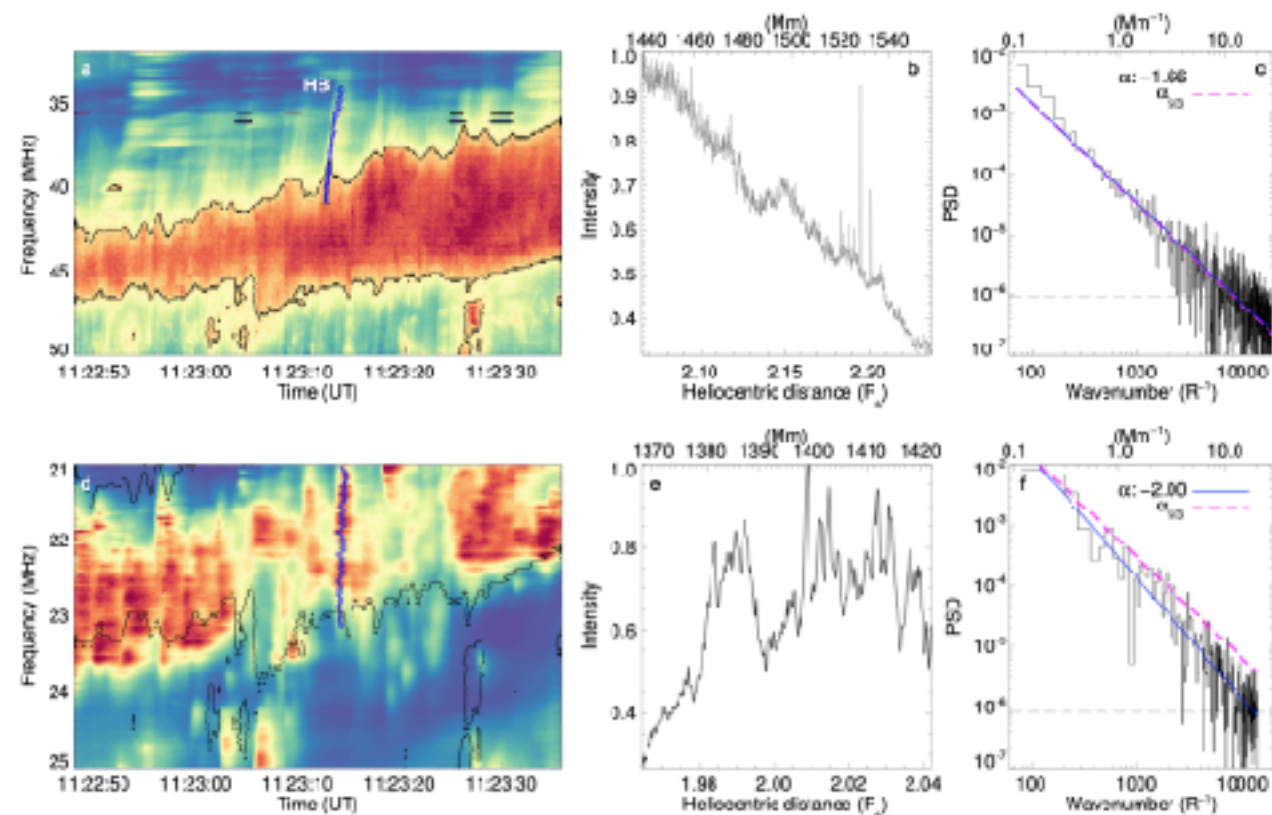
• NenuFAR : phase « Early Science » (Key Projects) → 1/1/2022



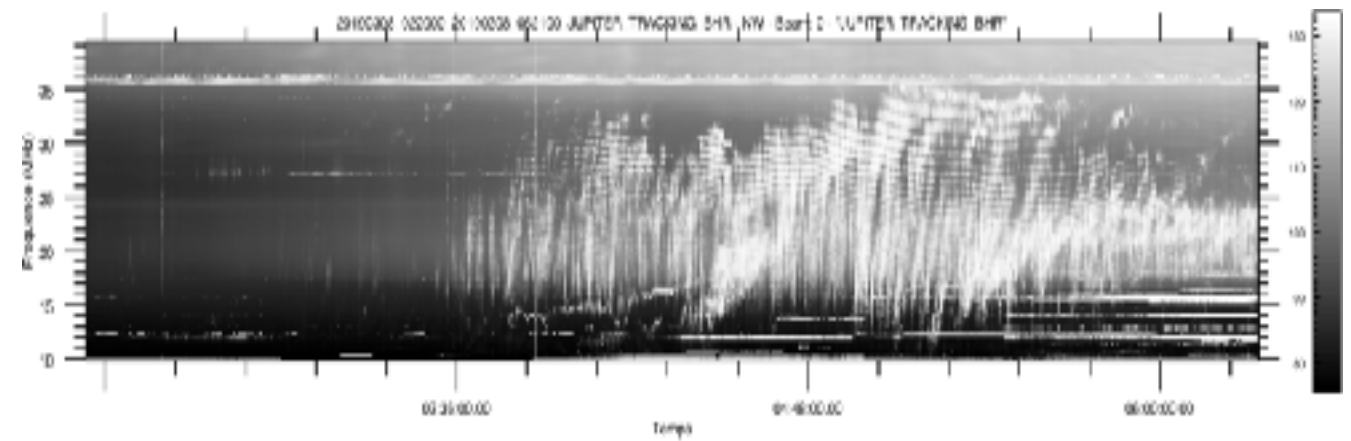
Signal de l'aube cosmique



Emissions stellaires et exoplanétaires

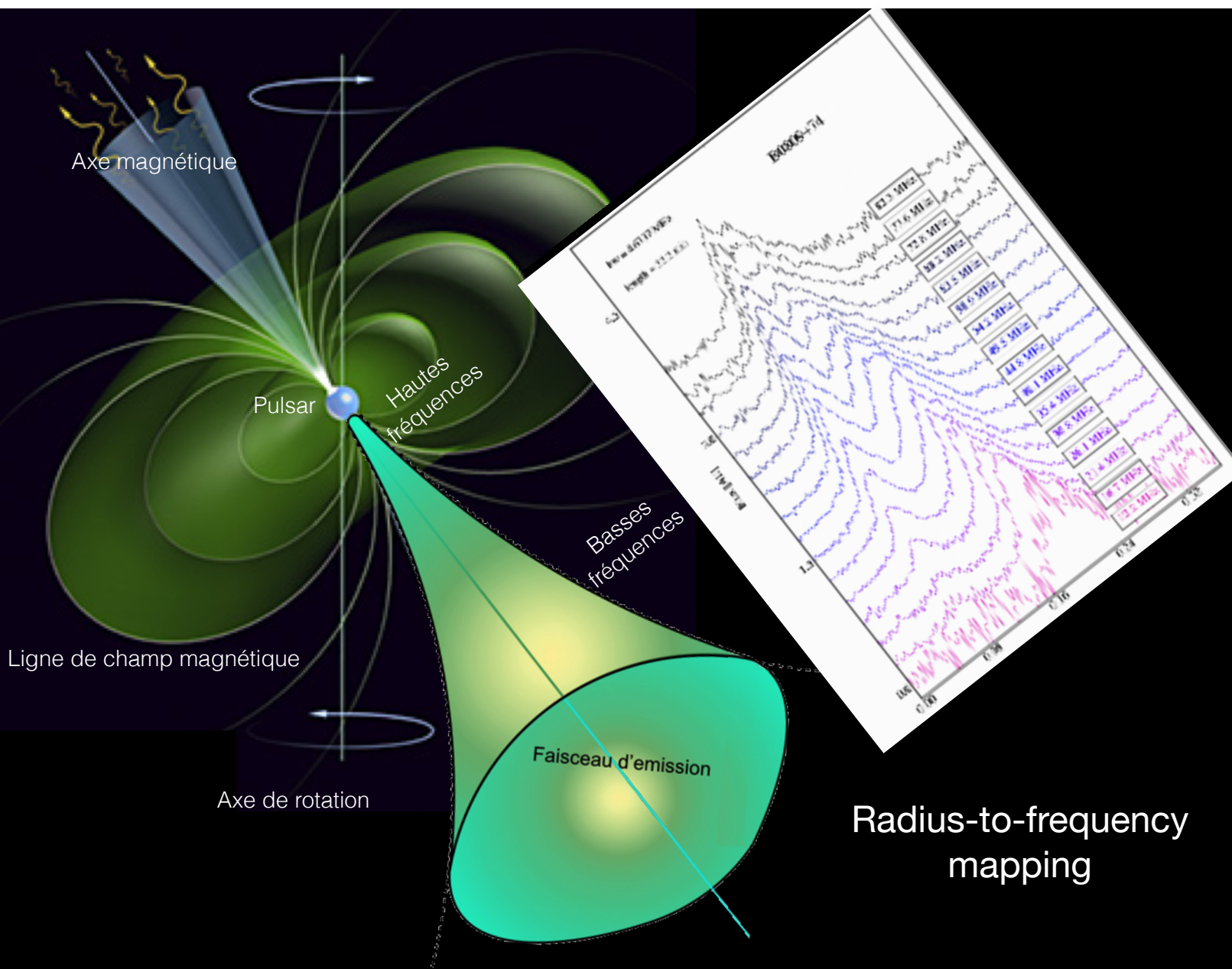


Structures fines (herringbones) type II solaires

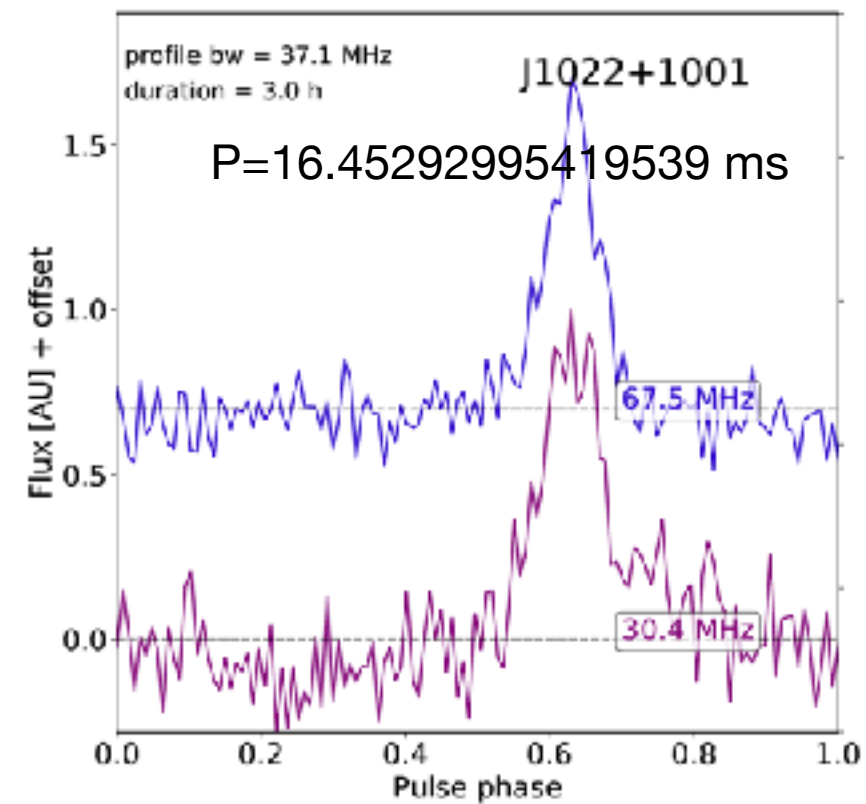


Structures fines et polarisation des émissions de Jupiter

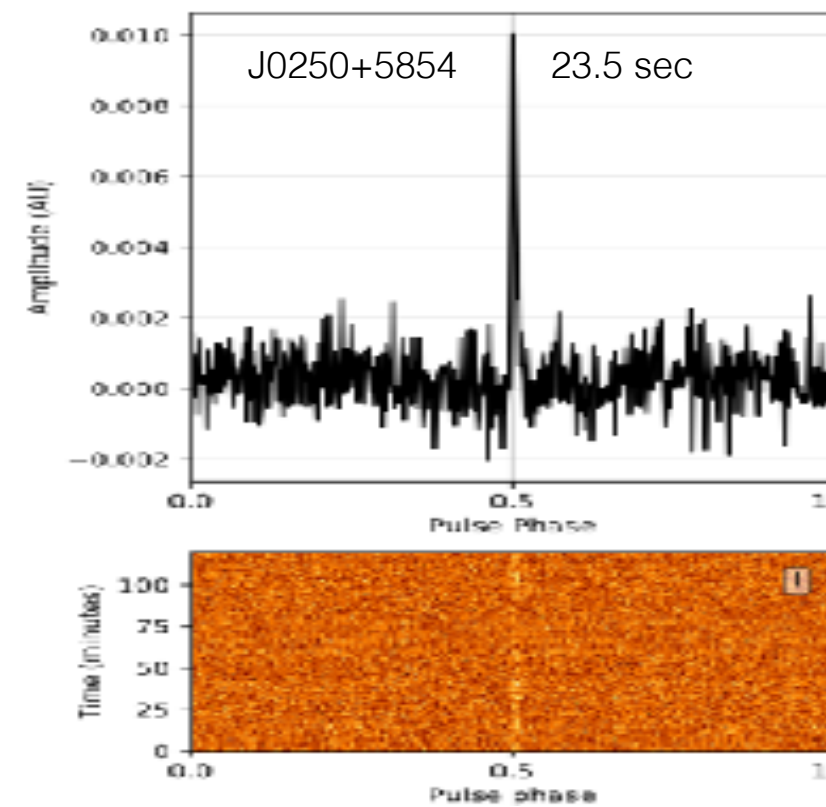
- NenuFAR : phase « Early Science » (Key Projects) → 1/1/2022



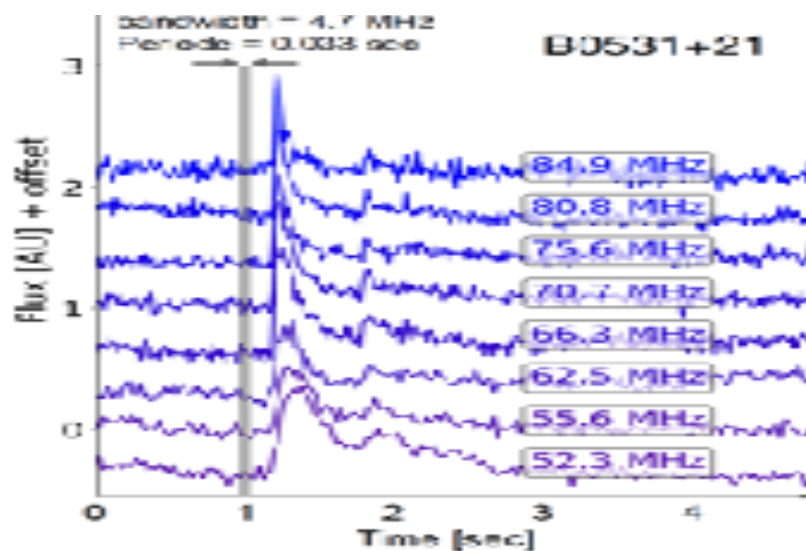
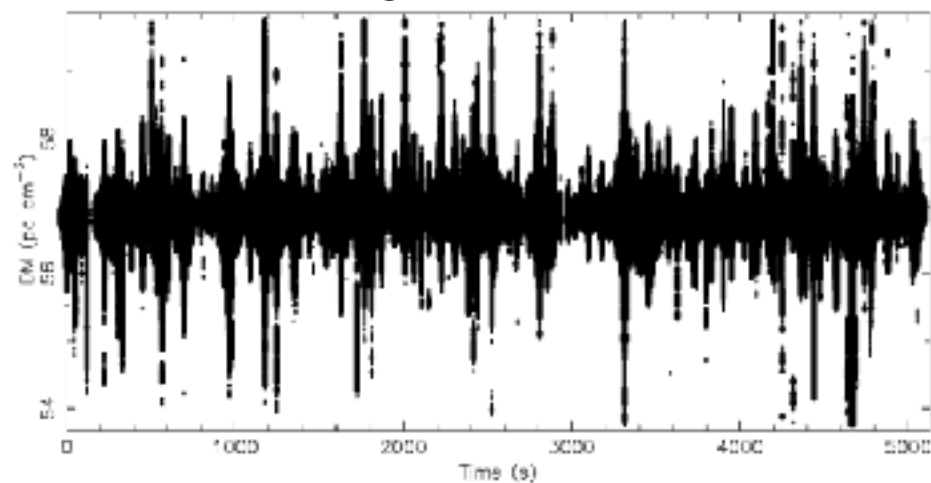
Un pulsar très rapide



Le pulsar le plus lent



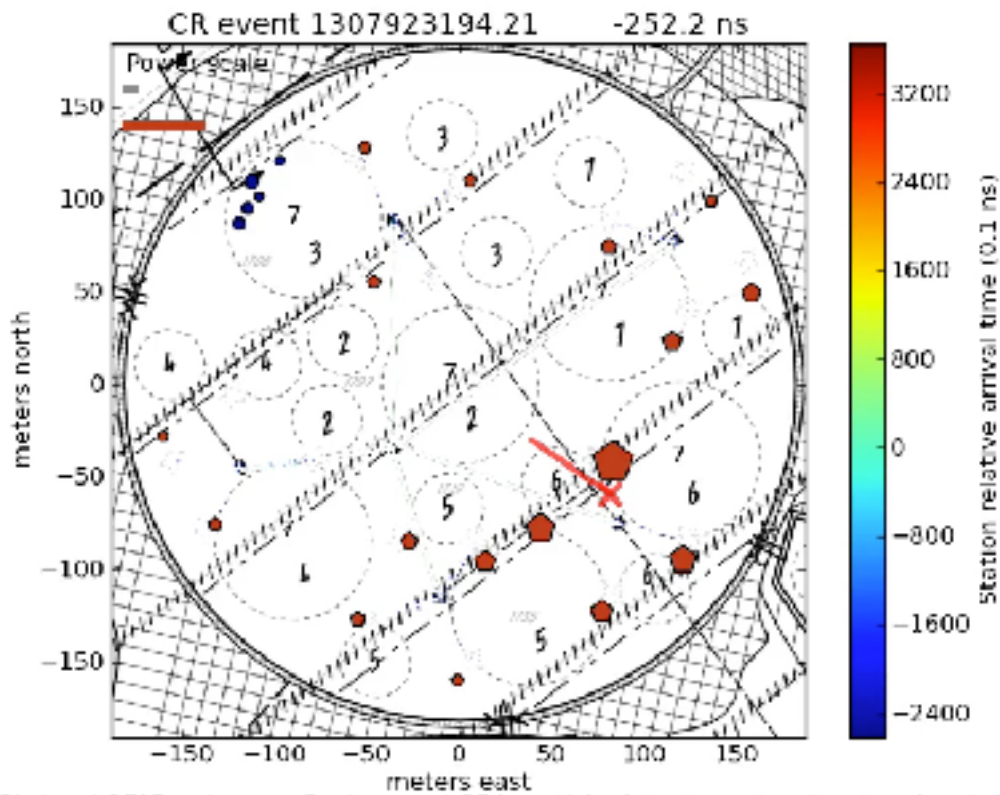
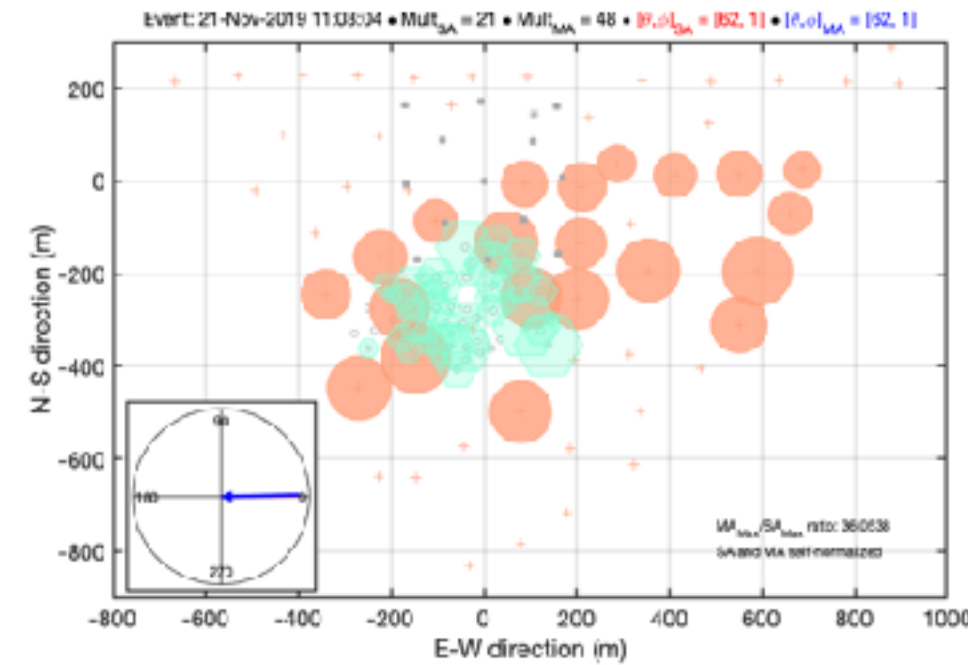
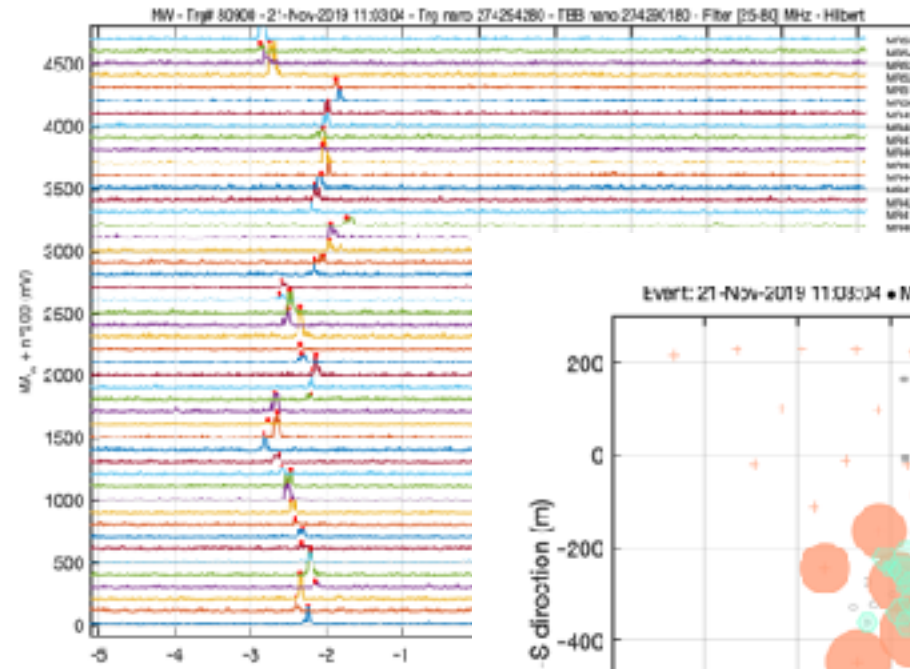
Pulses géants du Crabe



- NenuFAR : une interface utilisateurs très puissante

The screenshot displays the NenuFAR web interface. At the top, the browser address bar shows 'gui-nenufar.obs-nancay.fr'. The interface header includes the project name 'PSR_LOTAS_BEAM20' and a '6 hours' timer. A navigation sidebar on the left lists various functions like 'Stairway To Heaven', 'Planning', 'Coordinates', 'Dashboard', 'Real time', 'Google map', 'Survey', 'Reports', 'Maintenance', 'Tools', and 'Documentation'. The main area features a calendar for 'Aug 12 - 18, 2019' with a 'Booking' button and 'View only mine' option. The calendar grid shows observation events across seven days, with columns for Mon 8/12, Tue 8/13, Wed 8/14, Thu 8/15, Fri 8/16, Sat 8/17, and Sun 8/18. Events are color-coded and include details like 'NCP_COSMIC_DAWN', 'TAU_A_TRANSIT', 'CYG_A_TRANSIT', 'SOLAR_WIND-2019', and various 'BEAM' observations. A user profile for 'Philippe Administrator' is visible in the top left corner.

- Observations en forme d'onde (gerbes cosmiques, Jupiter, transitoires...)

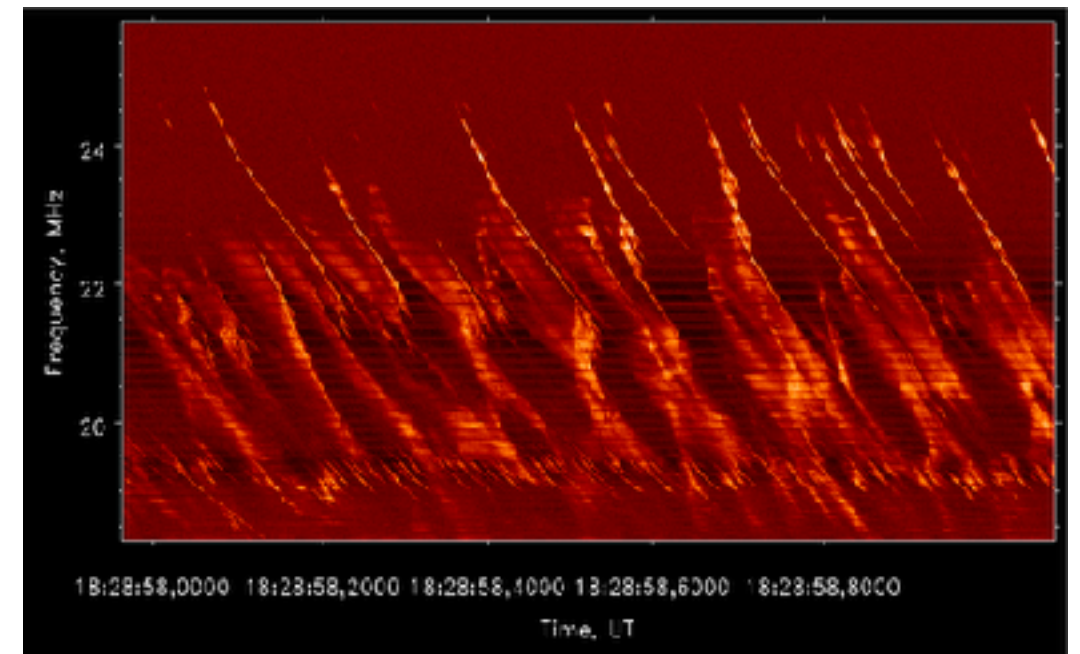


Circles: LOFAR antennas, Pentagons: LORA particle detectors, size denotes signal strength

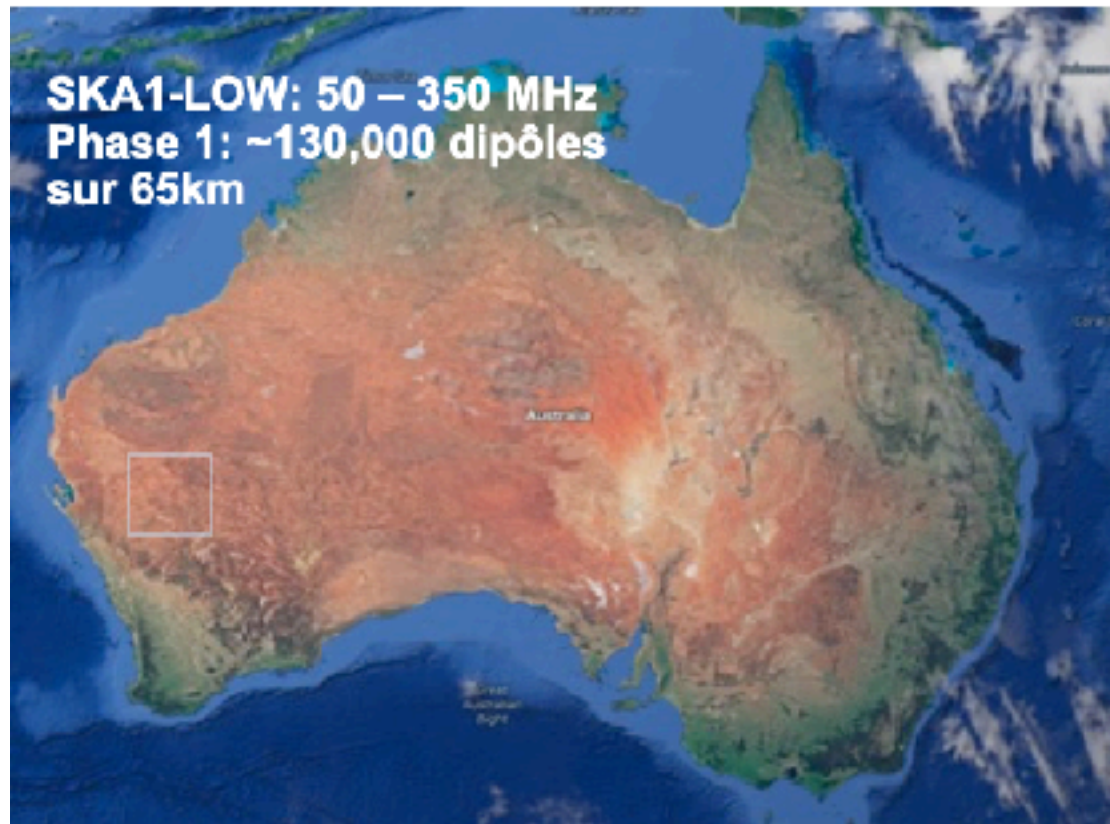
LOFAR : direction d'arrivée, énergie, profondeur de pénétration → composition des RC

NenuFAR : gerbes de RC & rayons γ

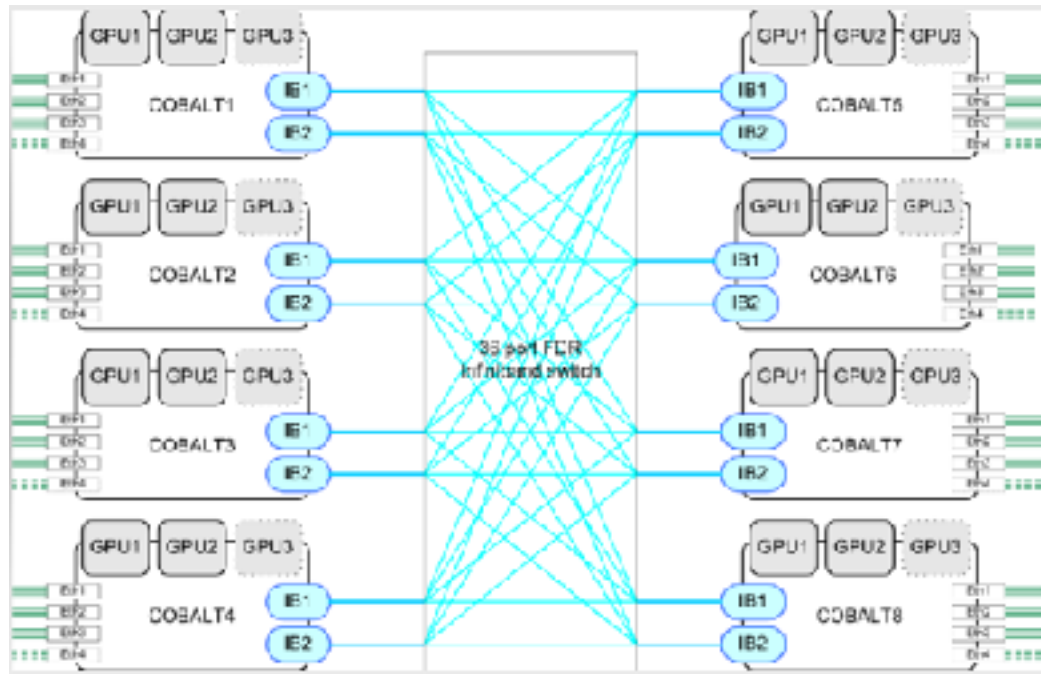
Jupiter :
microphysique des
radio sources



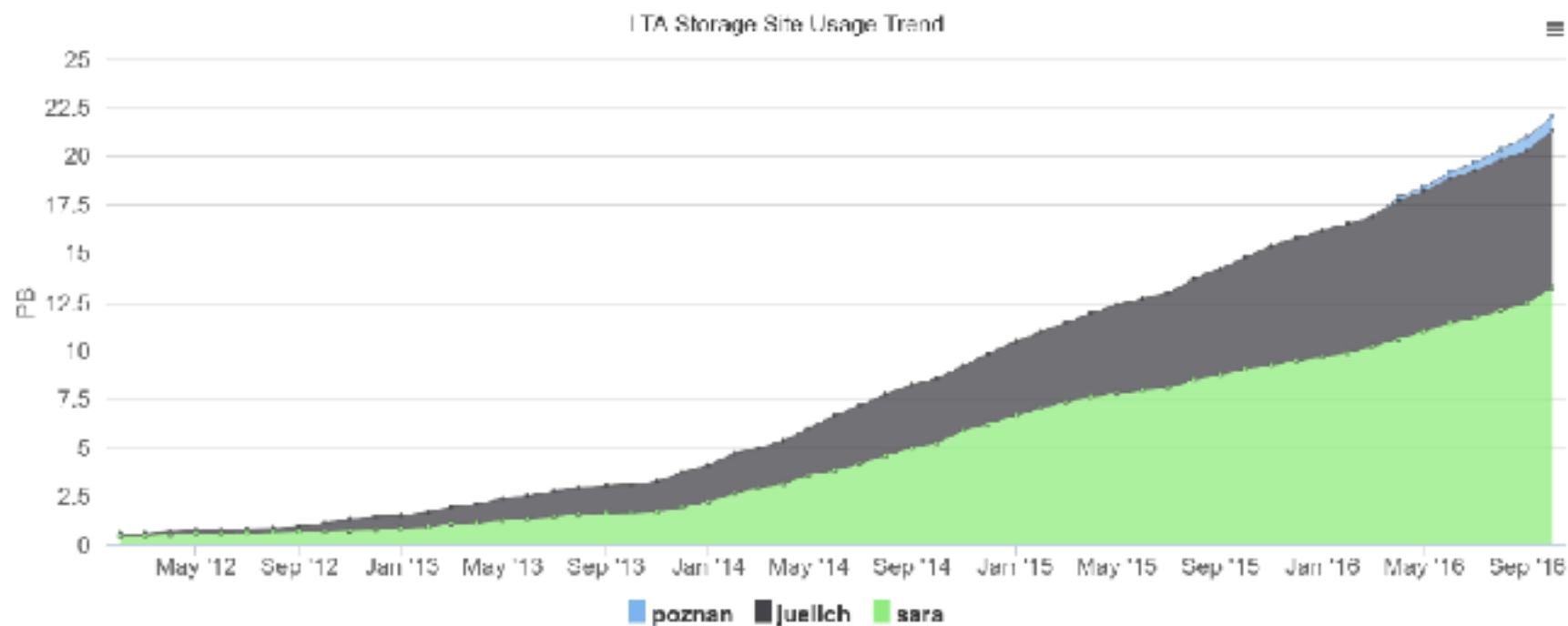
- Futur = SKA → *cf. présentation de C. Ferrari*



- Volume des données immense (Po) → centres de données



LOFAR & NenuFAR
COBALT



Archive LOFAR : 3 sites
>30 Po, >10 Millions de jeux de données
trafic permanent ~1 Go/sec

NenuFAR-data center en préparation
(technologies Cloud)

Quelques remarques

- En BF, électronique discrète ou ASIC, antennes dipolaires, pas de cryogénie car T_{ciel} = limitation principale, informatique rapide disponible/abordable
→ domaine privilégié pour démarrer l'instrumentation ?
- Besoin d'un environnement RFI calme
- 1 réseau phasé → sources intenses
- 2-3 réseaux phasés → interférométrie
- Bâtir une expertise
→ collaborations avec équipes existantes, sous-systèmes
→ propositions d'observations dans les instruments ouverts (LOFAR, NenuFAR: appels semestriels, sélection sur mérite scientifique, moyens/capacités d'analyse)
- Missions (voyages physiques) → Covid → rencontres virtuelles
→ opportunité (si réseau fiable !)

Liens

https://lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/CoursPZ/Th2-PZ-2018-19.pdf	Cours Radioastronomie M2 (PZ)
https://www.obs-nancay.fr/	Observatoire de Nançay
https://www.obs-nancay.fr/lofar/	LOFAR @ Nançay
https://nenufar.obs-nancay.fr/	NenuFAR @ Nançay
http://www.lofar.org/	LOFAR
http://www.phys.unm.edu/~lwa/	LWA
http://www.ece.vt.edu/swe/lwa/	LWA memos
https://www.mwatelescope.org	MWA
https://www.skatelescope.org	SKA
http://france.skatelescope.org/welcome/	SKA-France
https://ufe.obspm.fr/Ecole-Doctorale/Durant-la-these/6-International-Young-Astronomers-School/International-Young-Astronomers-School-on-Large-Ground-based-21st-Century-Radio/	IYAS 2015
https://salfconference.org	Science at Low Frequencies confs.

Quelques Références

- J. D. Kraus, *Radio Astronomy*, Mac Graw-Hill, 2^{ème} Éd., 1986.
- K. Rohlfs & T. L. Wilson, *Tools of Radio Astronomy*, Astronomy&Astrophysics Library, Springer, 2^{ème} Éd., 1996.
- B. Burke & F. Graham-Smith, *An Introduction to Radio Astronomy*, Cambridge University Press, 1997.
- P. Léna (+ Lebrun & Mignard), *Astrophysique: Méthodes Physiques de L'observation*, Savoirs Actuels, Interéditions / CNRS Éditions, 2^{ème} Éd., 1996.
- N. E. Kassim, M. R. Perez, W. Junor, P. A. Henning (Éditeurs), *From Clark Lake to the Long Wavelength Array*, ASP Conference series Vol. 345, 2005.
- R. G. Stone, K. W. Weiler, M. L. Goldstein & J.-L. Bougeret (Éditeurs), *Radio Astronomy at Long Wavelengths*, Geophysical Monograph 119, American Geophysical Union, Washington, USA, 2000.
- N. E. Kassim & K. W. Weiler (Éditeurs), *Low Frequency Astrophysics From Space*, Lecture Notes In Physics, Springer-Verlag, 1991.
- C.R. XXX^{ème} Ecole de Goutelas CNRS/INSU/SF2A, «Radioastronomie Basses Fréquences : Instrumentation, Thématiques scientifiques, Projets», 2007. <http://www.lesia.obspm.fr/plasma/Goutelas2007/Goutelas-2007-Final.pdf> (voir aussi les remerciements page suivante)