



## Bases et applications de l'imagerie interférométrique

**Julien Girard**  
julien.girard@cea.fr



**Université de Paris**



## Bases et applications de l'imagerie interférométrique

**Julien Girard**  
julien.girard@cea.fr



**Université de Paris**

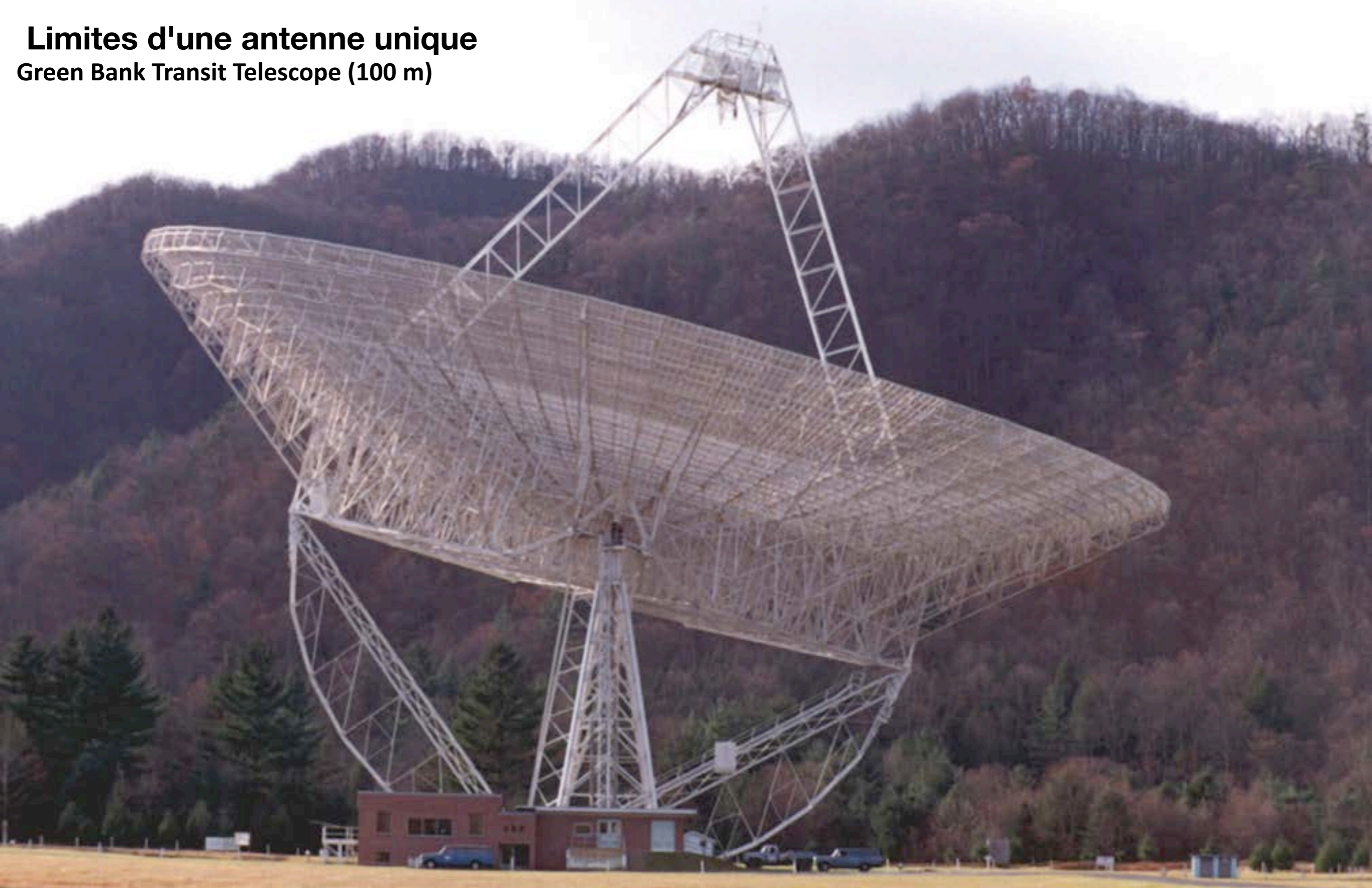
# Plan

- ❑ **Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?**
- ❑ **Principe de la mesure par interférométrie**
- ❑ **Imagerie**
- ❑ **Déconvolution**
- ❑ **Tour d'horizon de l'imagerie radio**
- ❑ **( Annexe: Étalonnage)**

# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

## Limites d'une antenne unique

Green Bank Transit Telescope (100 m)



# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

## Limites d'une antenne unique

Green Bank Transit Telescope (100 m)

November 15<sup>th</sup>, 1988



# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

Limites d'une antenne unique

Arecibo (300 m)

01/12/2020



[https://www.youtube.com/watch?v=b3AASKr\\_iHc](https://www.youtube.com/watch?v=b3AASKr_iHc)

<https://www.youtube.com/watch?v=ydjV-ZXcAOA>

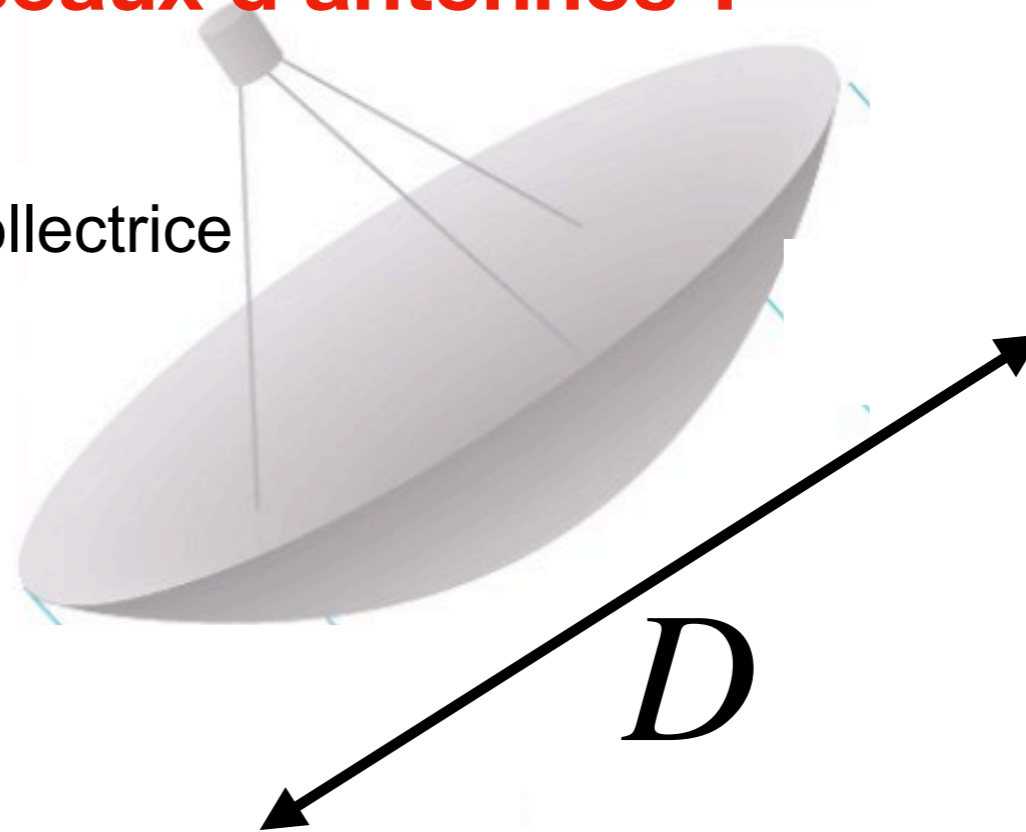
# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

- **Sensibilité** dépend de la surface collectrice

$$\propto D^2$$

- **La résolution angulaire** dépend de l'envergure maximale

$$\propto 1/D$$



# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

- **Sensibilité** dépend de la surface collectrice

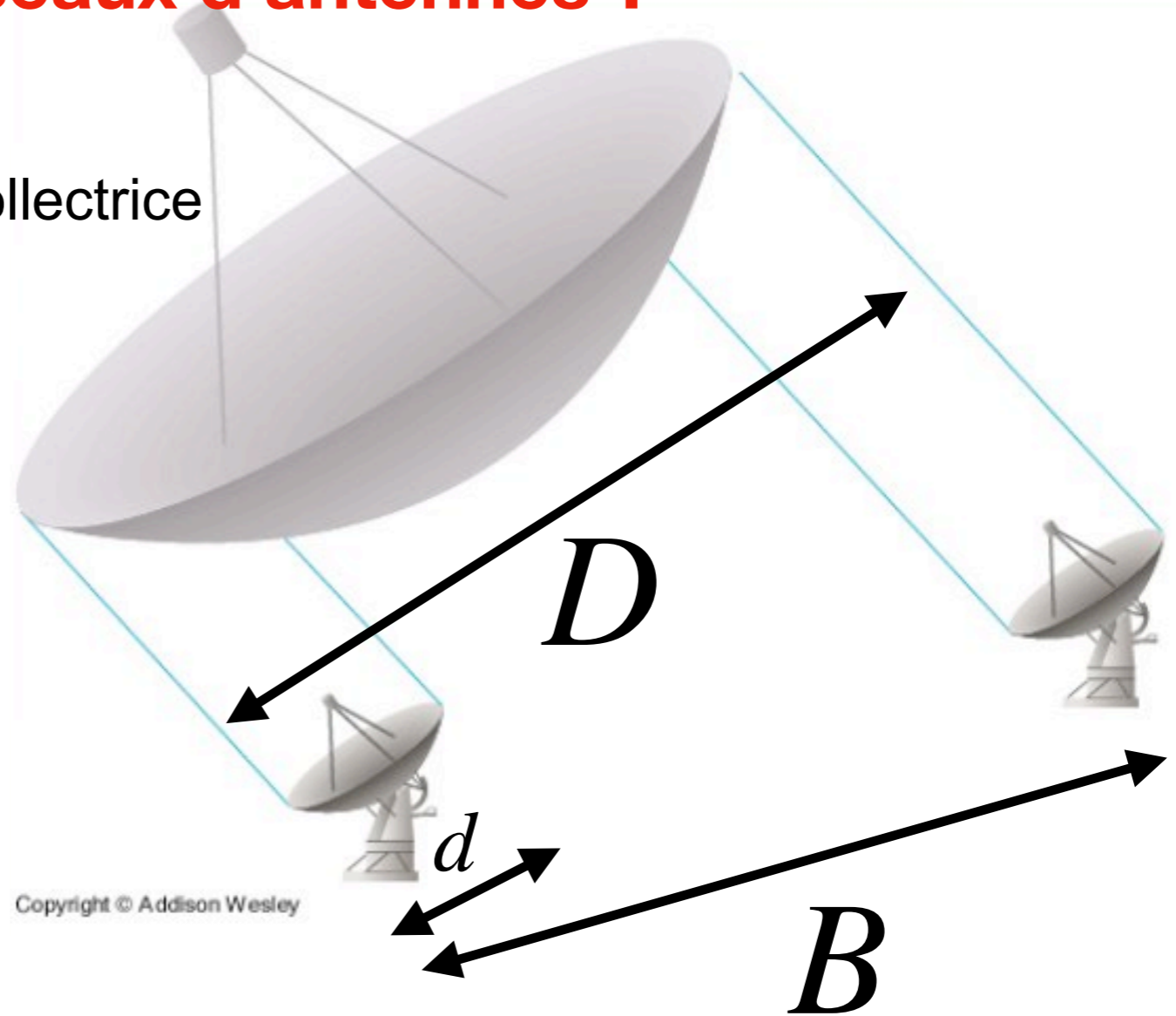
$$\propto D^2$$

$$\propto Nd^2$$

- **La résolution angulaire** dépend de l'envergure maximale

$$\propto 1/D$$

$$\propto 1/B$$





# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

- **Sensibilité** dépend de la surface collectrice

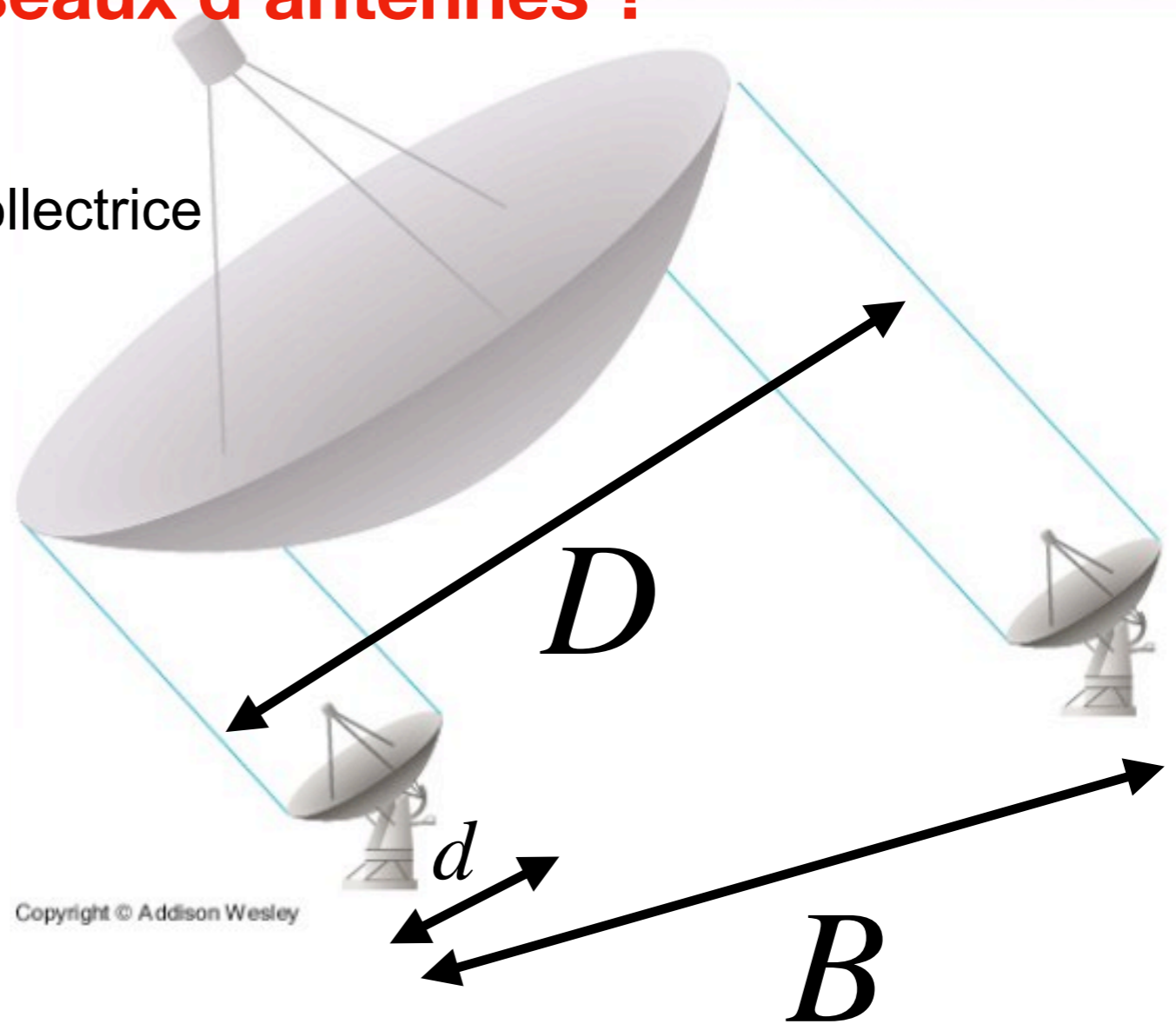
$$\propto D^2$$

$$\propto Nd^2$$

- **La résolution angulaire** dépend de l'envergure maximale

$$\propto 1/D$$

$$\propto 1/B$$



→ Réseaux d'antennes

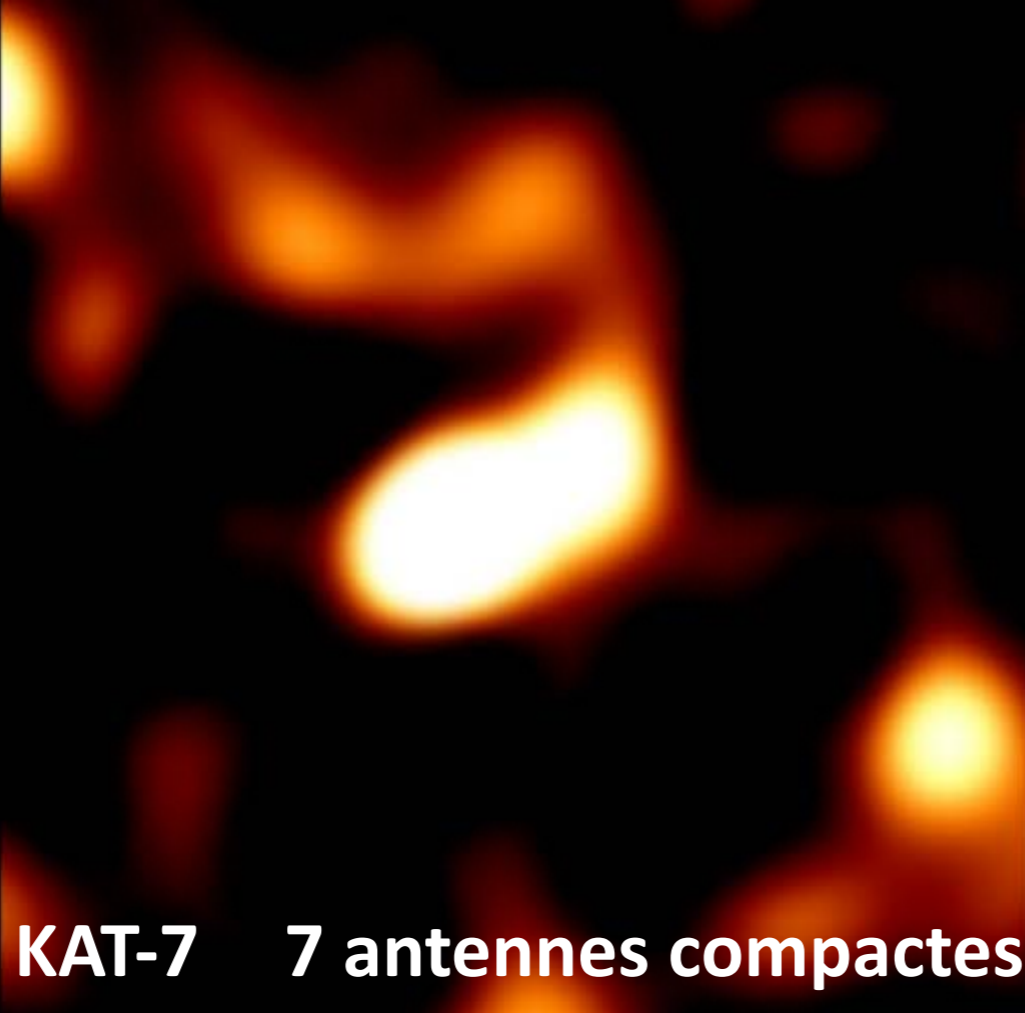


# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

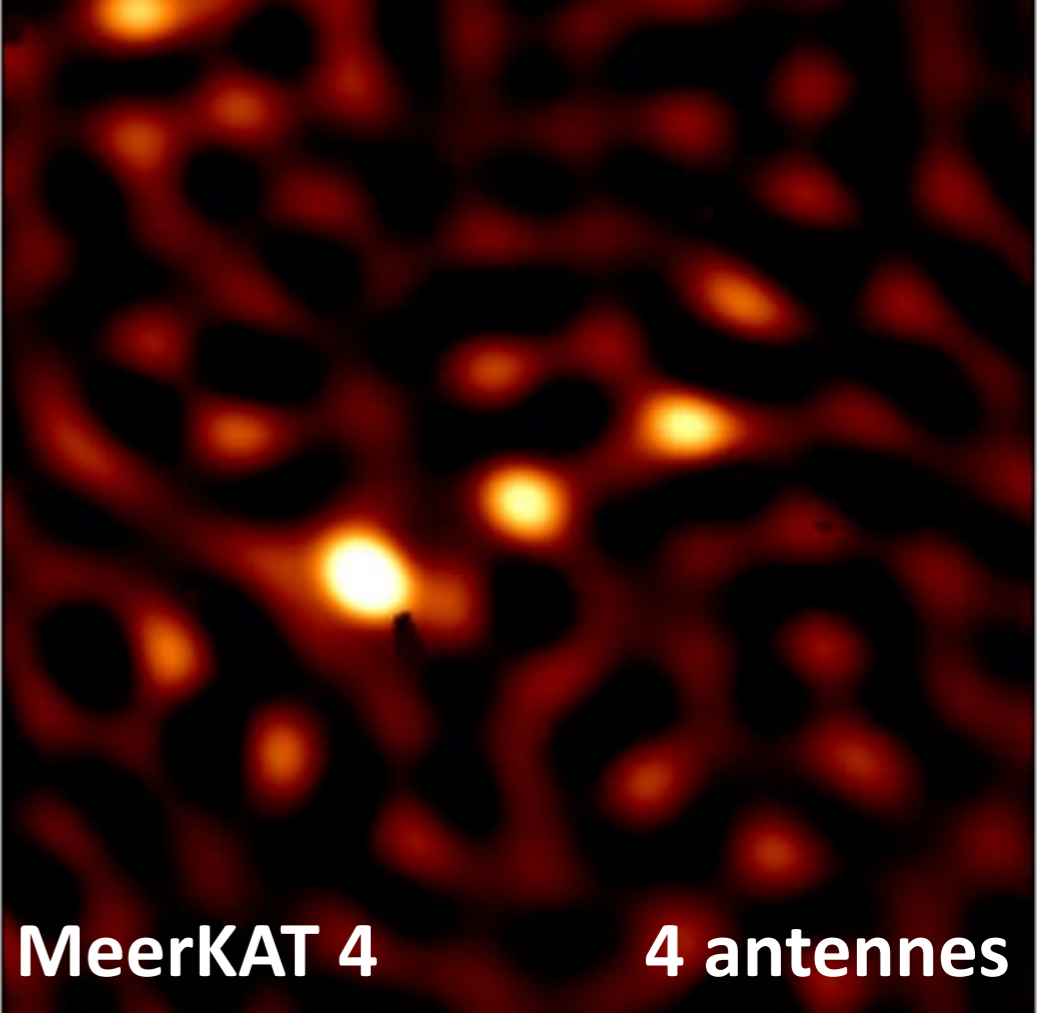
Résolution angulaire

**KAT-7**

Prototype  
MeerKAT

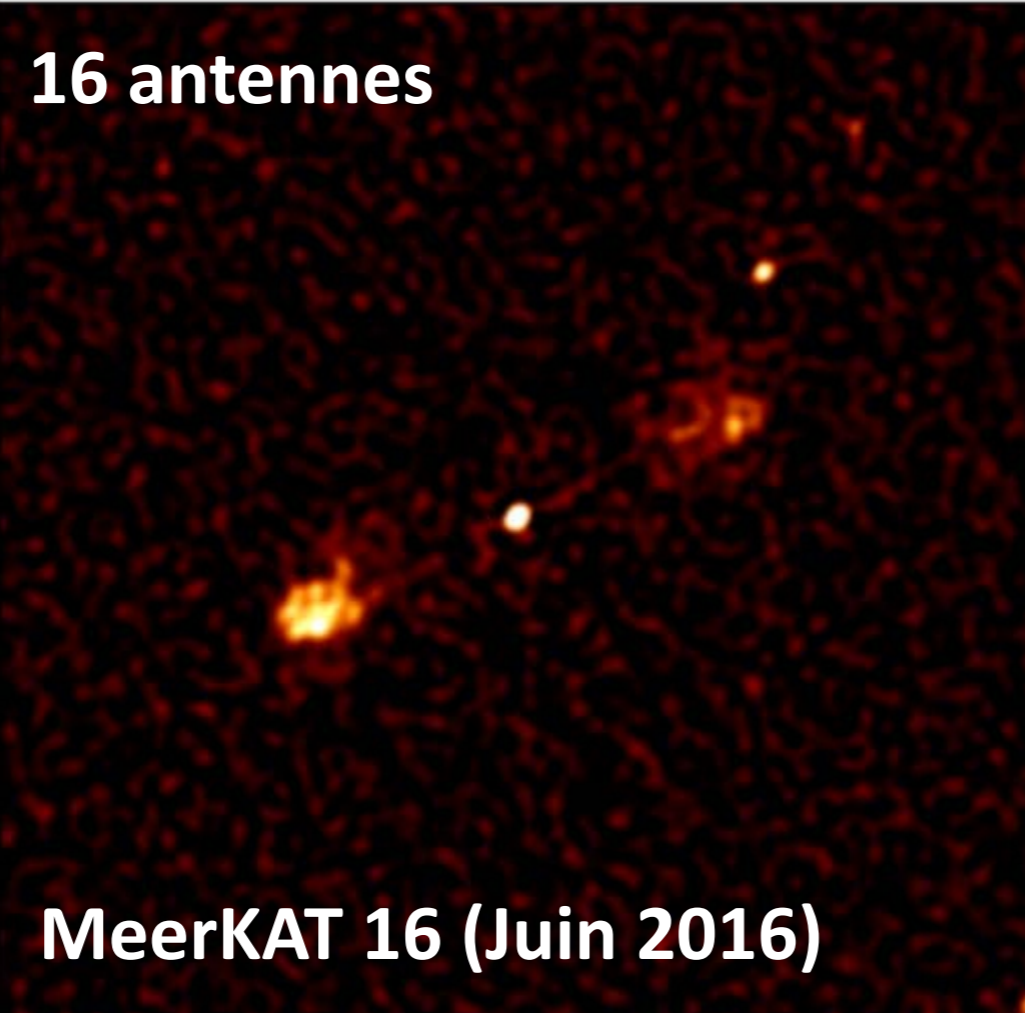


**KAT-7 7 antennes compactes**

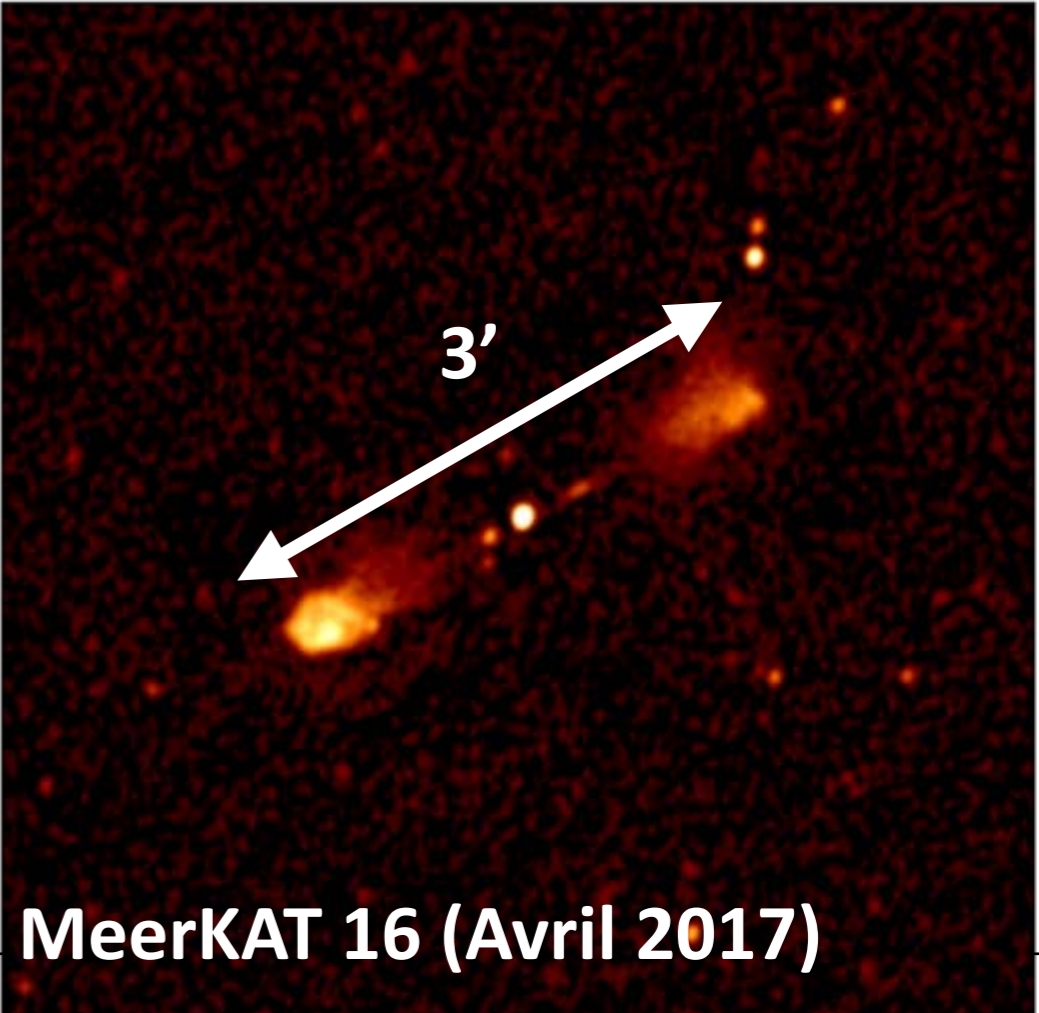


**MeerKAT 4 4 antennes**

**MeerKAT**  
avec 16  
antennes



**MeerKAT 16 (Juin 2016)**



**MeerKAT 16 (Avril 2017)**

# Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

Résolution angulaire

16 ant

$1.3^\circ \times 1.3^\circ$

1.4 GHz

r.m.s.  $\sim 6.5 \mu\text{Jy}$

With 64 ant

r.m.s.  $\sim 1 \mu\text{Jy}$

Priv. Com.  
Rob Fender

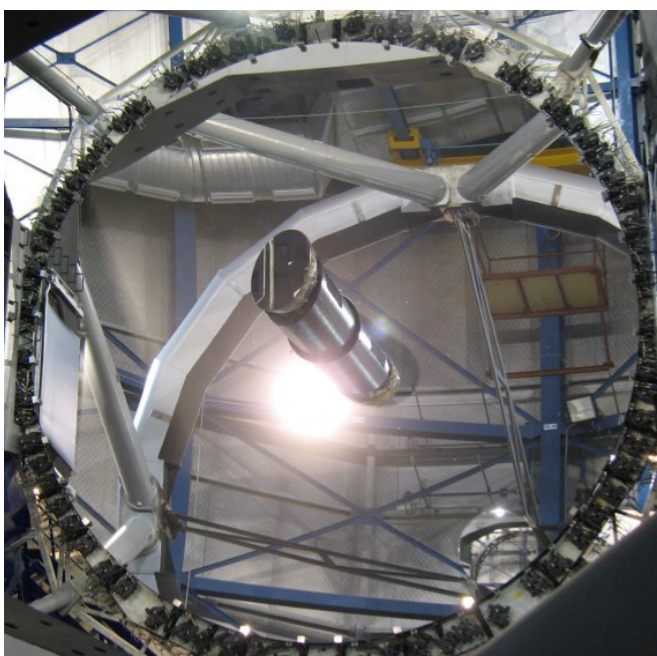


# Plan

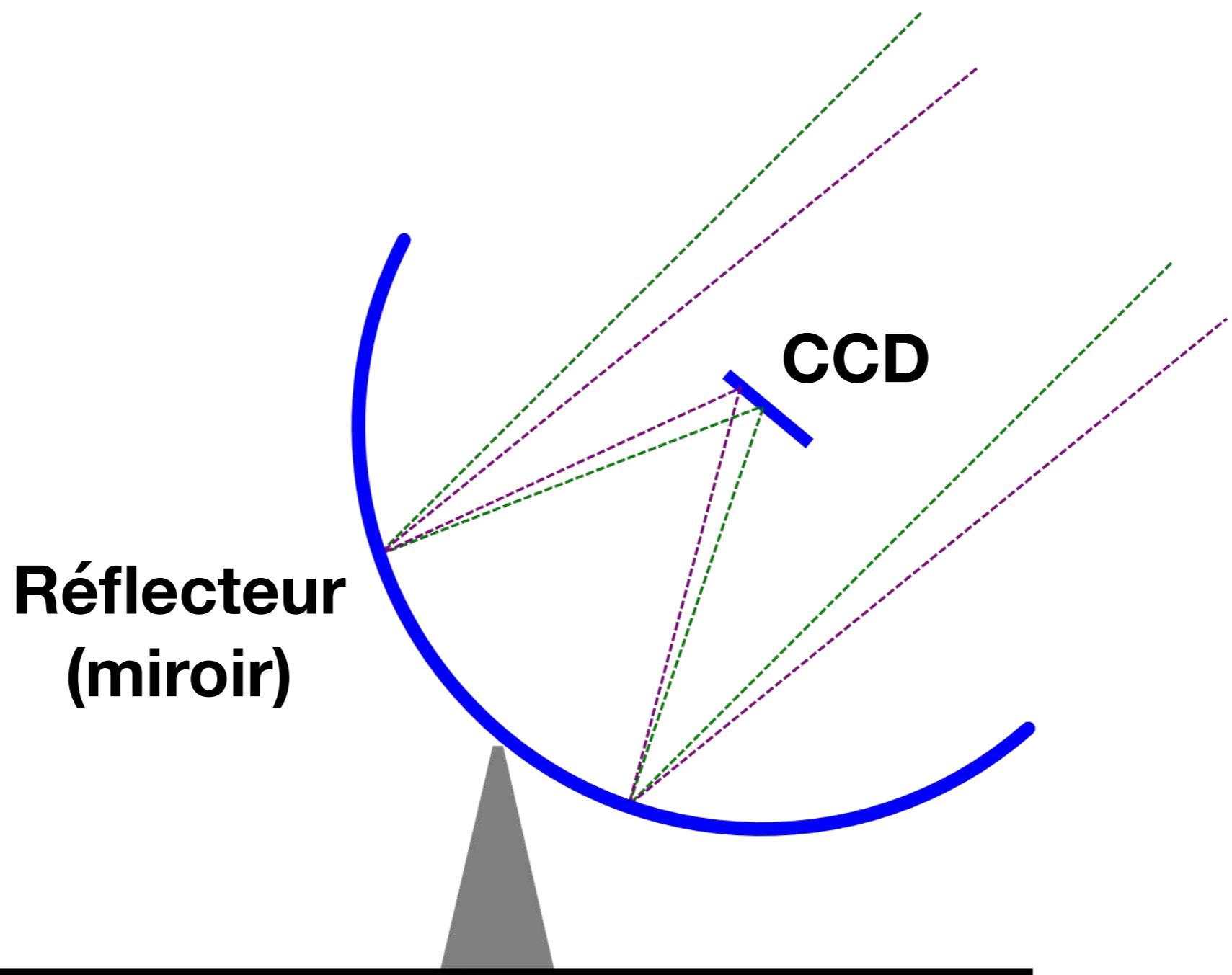
- Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?**
- Principe de la mesure par interférométrie**
- Imagerie**
- Déconvolution**
- Tour d'horizon de l'imagerie radio**

# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes



# Telescope visible



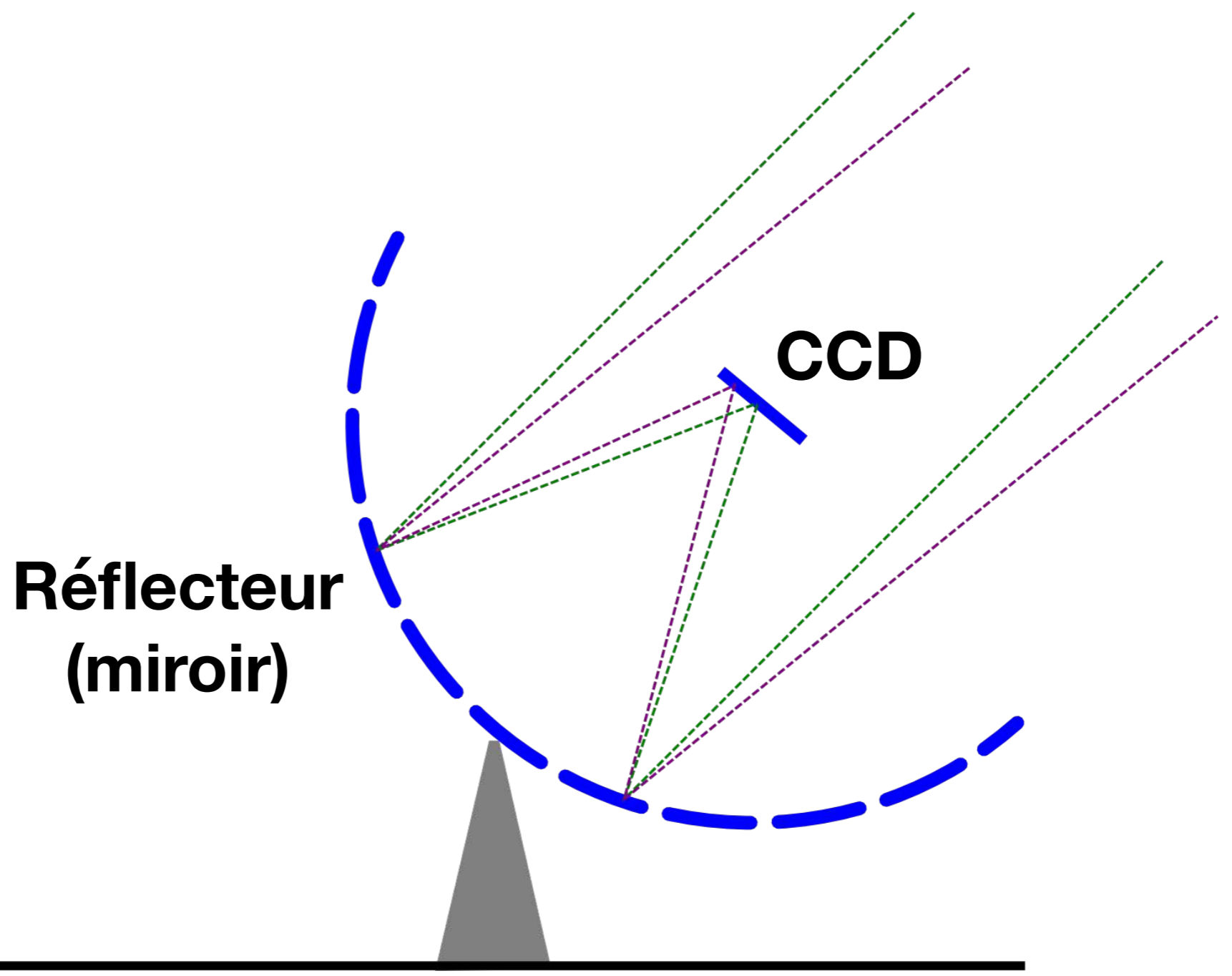
1) Commencer avec un télescope "normal"

# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes



# Telescope visible

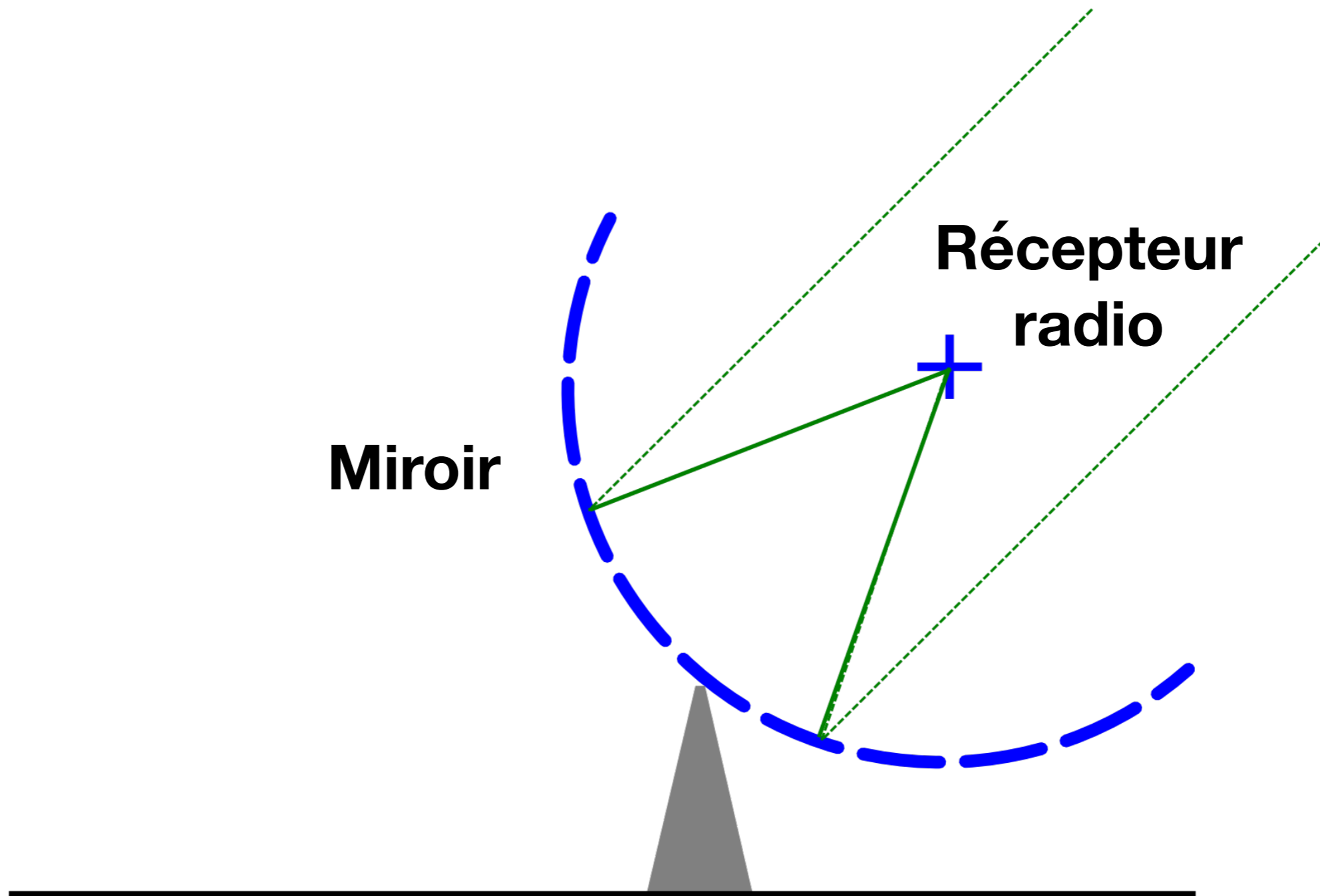


## 2) Découper le réflecteur en différent morceaux

# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

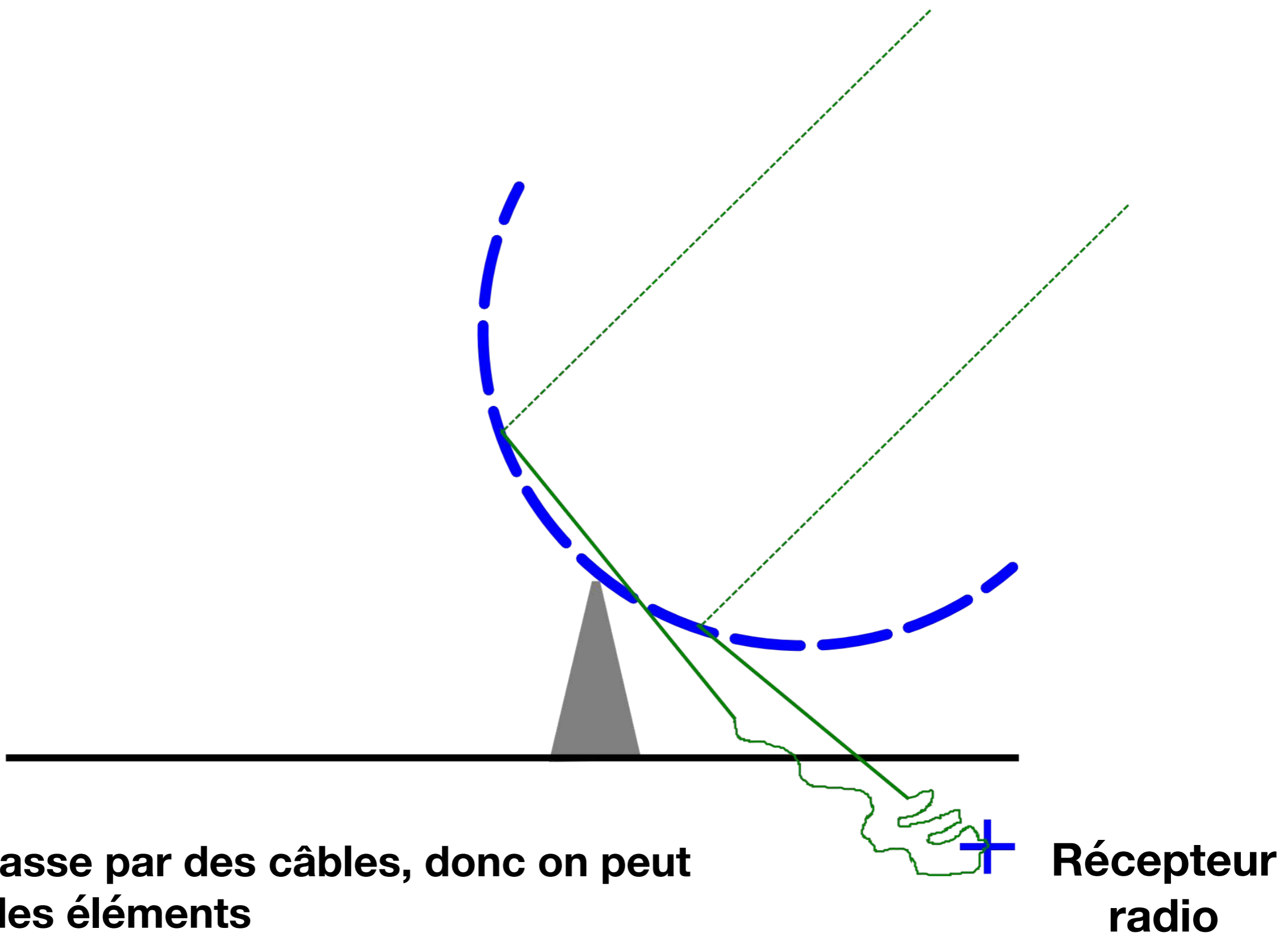
## Telescope radio



**3) Remplacer les miroirs et le capteur  
et tout relier par des fils**

# Mesure par interférométrie

## Fabrication d'un réseau d'antennes



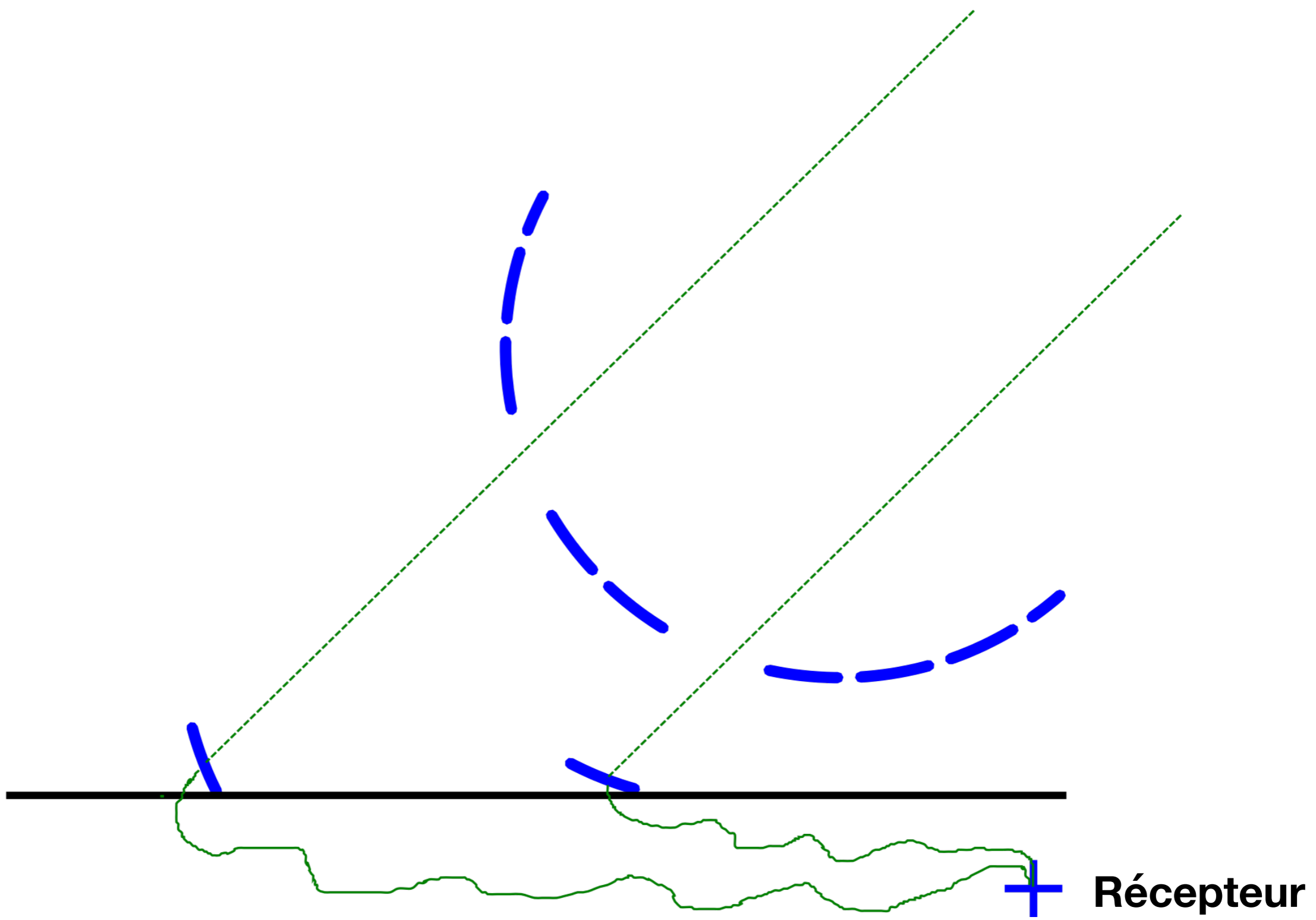
4) Tout passe par des câbles, donc on peut bouger des éléments

Récepteur radio



# Mesure par interférométrie

## Fabrication d'un réseau d'antennes

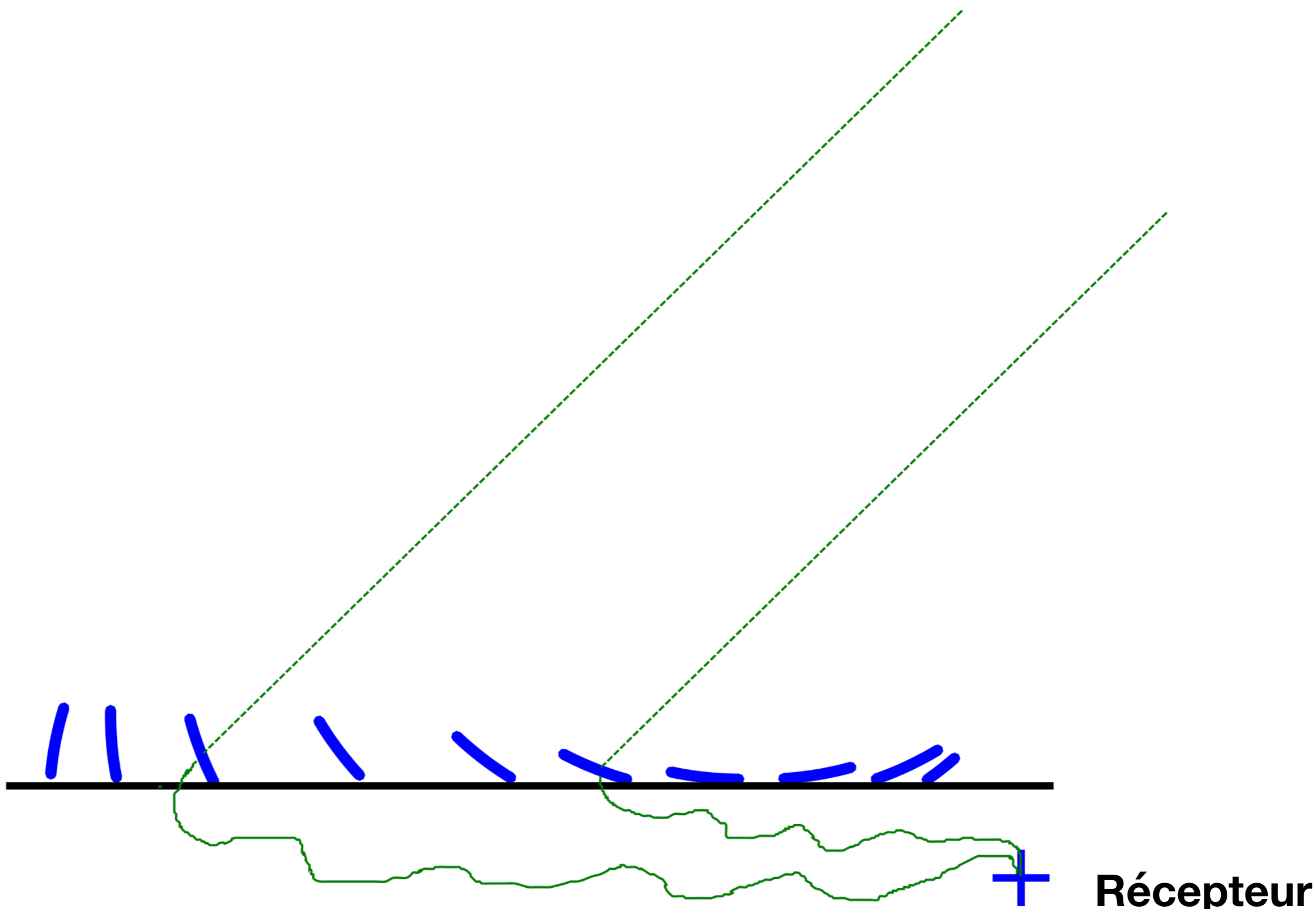


**+ Récepteur radio**

5) Pendant qu'on y est, on peut poser certains éléments au sol

# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

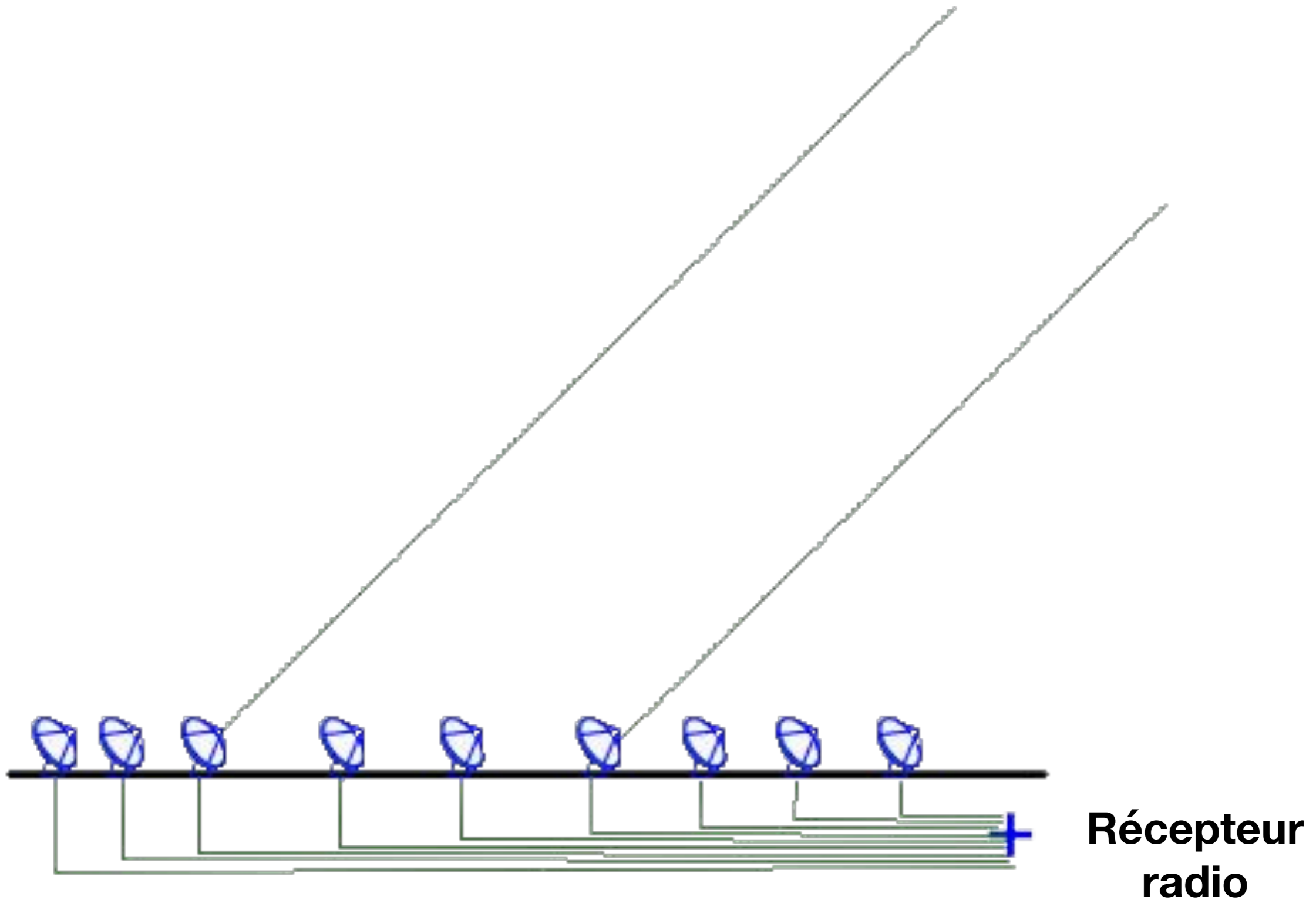


6) ... et pourquoi pas tout poser ...

**Récepteur  
radio**

# Mesure par interférométrie

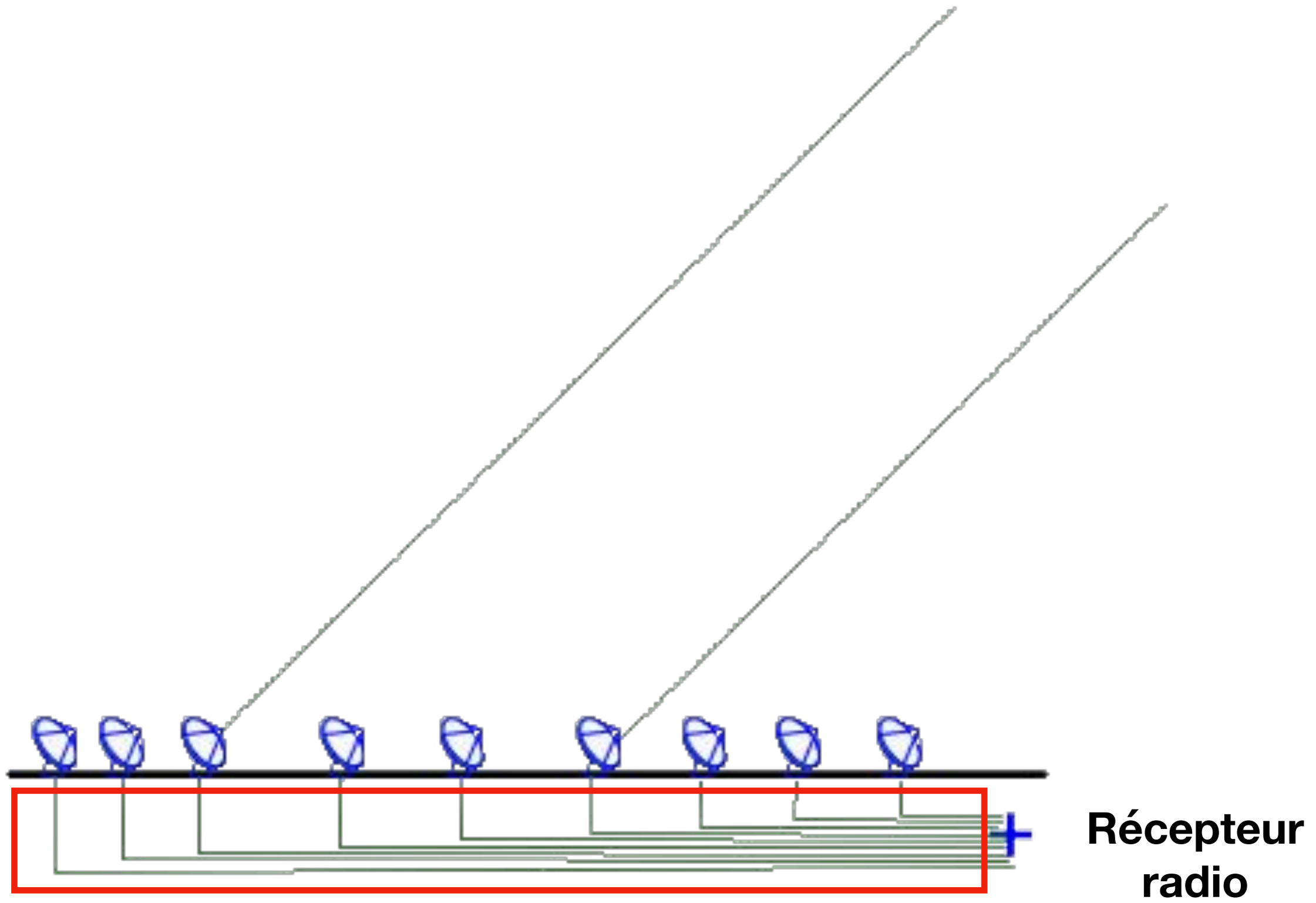
## Fabrication d'un réseau d'antennes



**7) Chaque morceaux est une antenne radio "facile" à gérer**

# Mesure par interférométrie

## Fabrication d'un réseau d'antennes



**Phasage !**

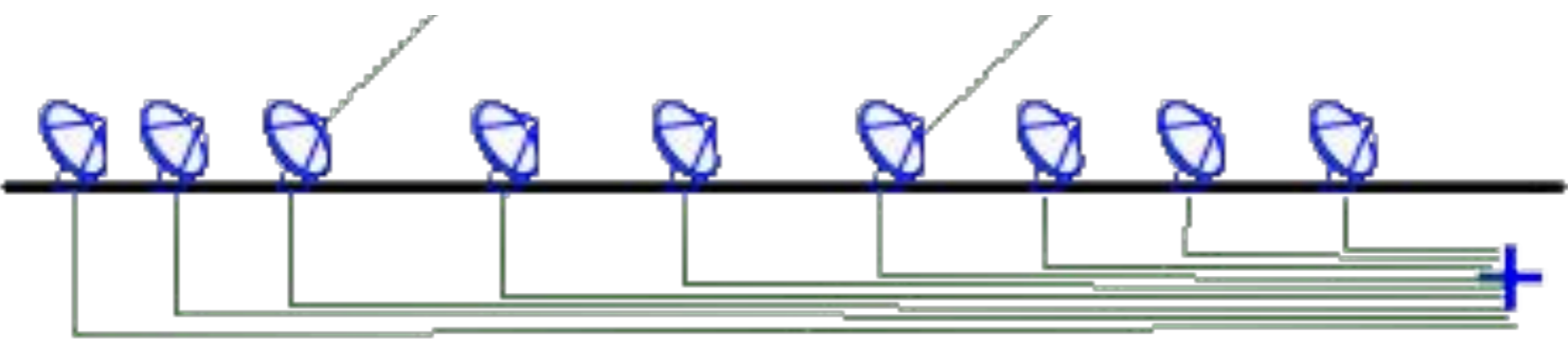
**Récepteur  
radio**

**7) Chaque morceaux est une antenne radio "facile" à gérer**

# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

Que faire du signalphasé ?



**Somme**

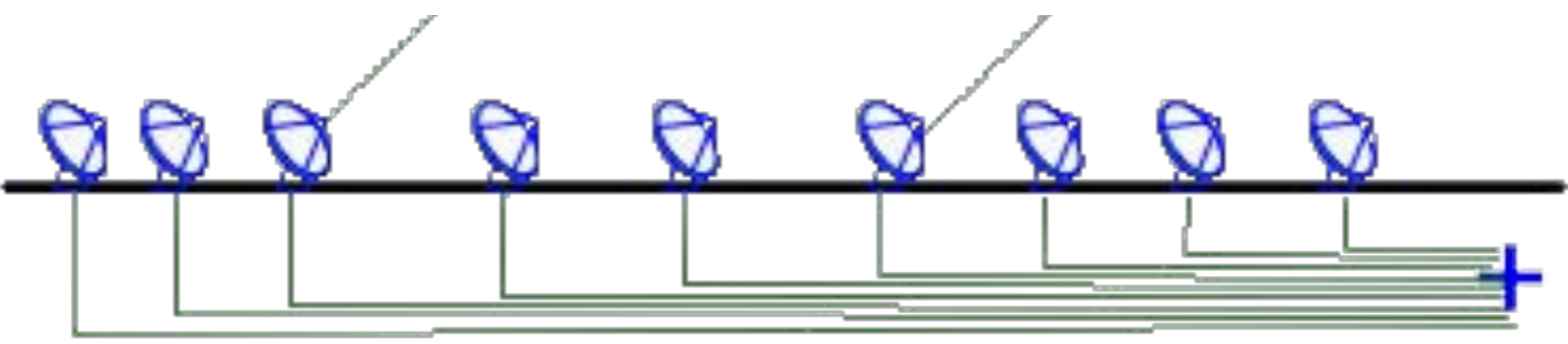
**Produit**



# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

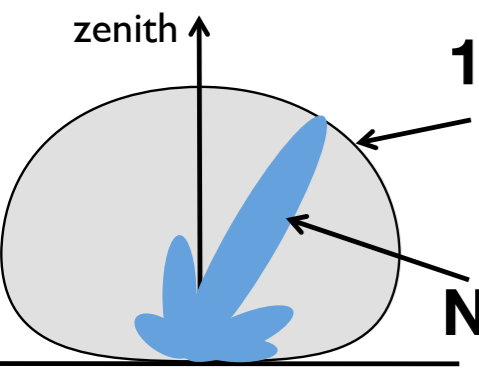
Que faire du signalphasé ?



**Somme**

**Produit**

« Réseau phasé »



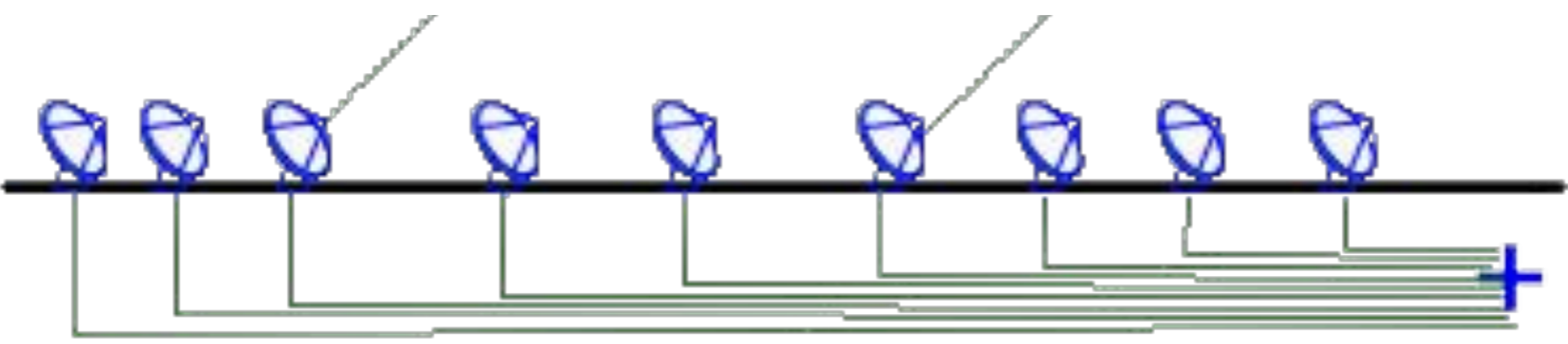
"1 pixel" mobile & sensible sur le ciel

- Séries temporelles
- Spectres dynamiques

# Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

Que faire du signalphasé ?



**Somme**

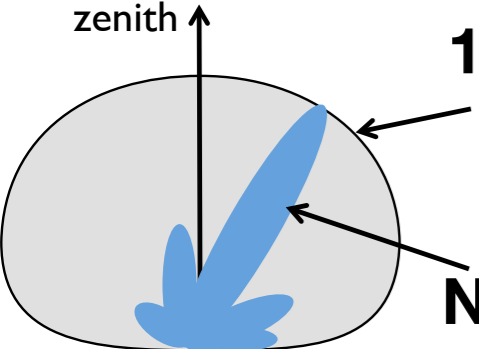
**Produit**

« Réseau phasé »

« Interféromètre »



Voir pres. C. Viou



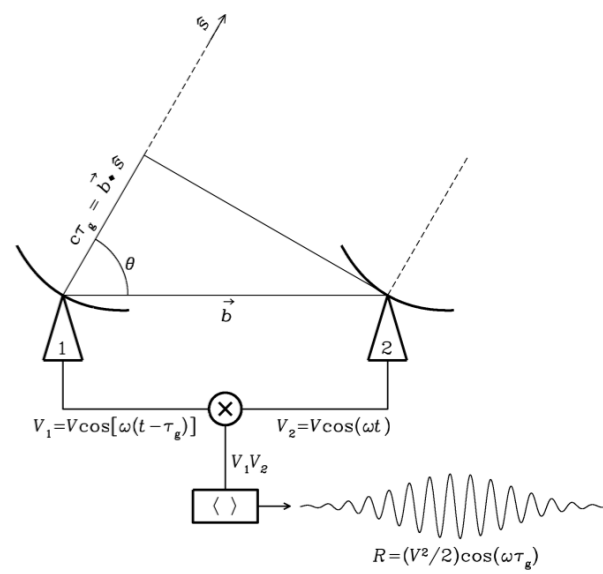
VLA

"1 pixel" mobile & sensible sur le ciel

- Séries temporelles
- Spectres dynamiques

Sensible aux "caractéristiques fréquentielles" du ciel

→ Imagerie



# Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D



# Mesure par interférométrie

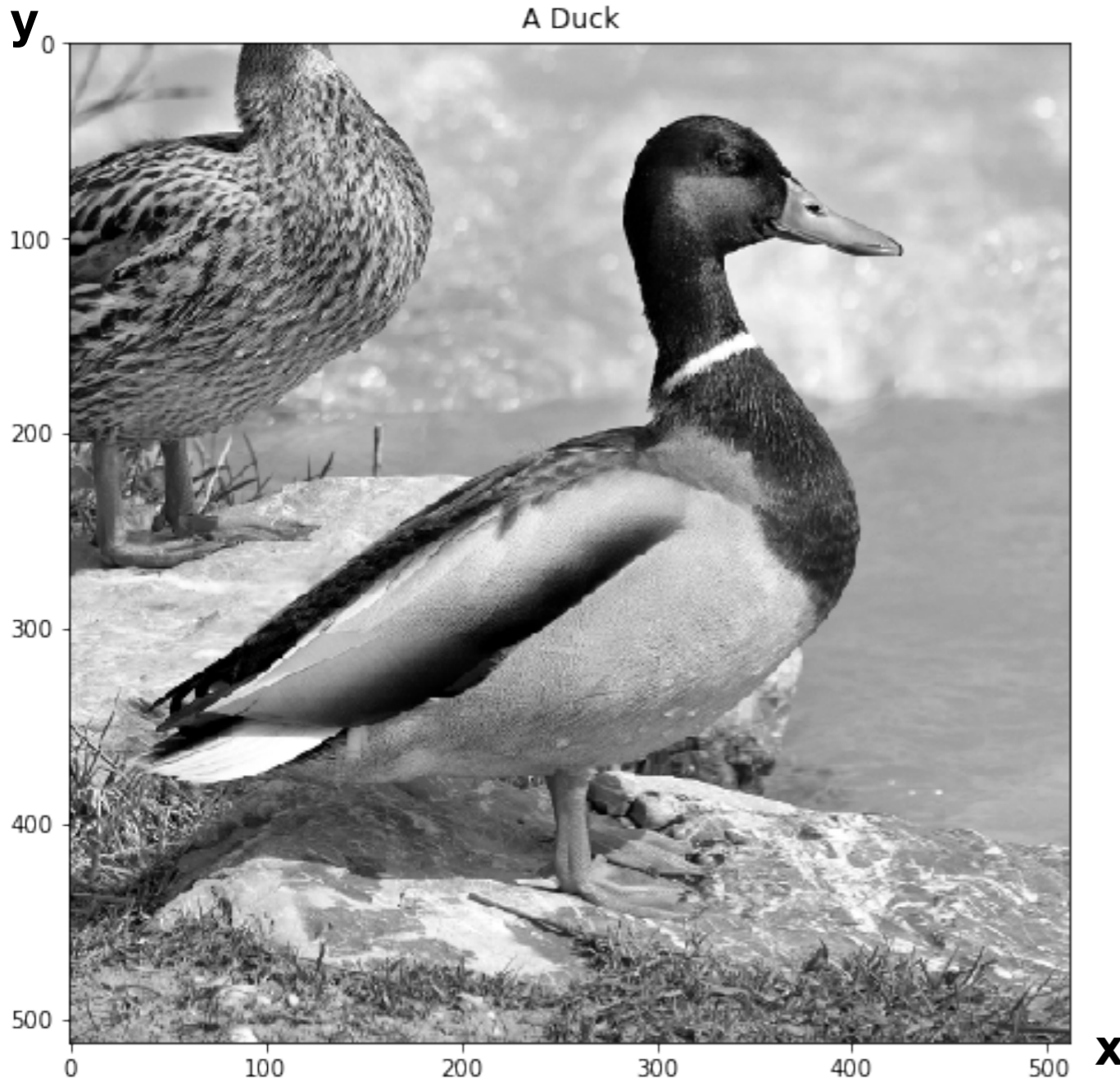
Transformée de Fourier à 2D

$$\text{TF 1D } \hat{S}(\nu) = \int s(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$$

# Mesure par interférométrie

## Transformée de Fourier à 2D

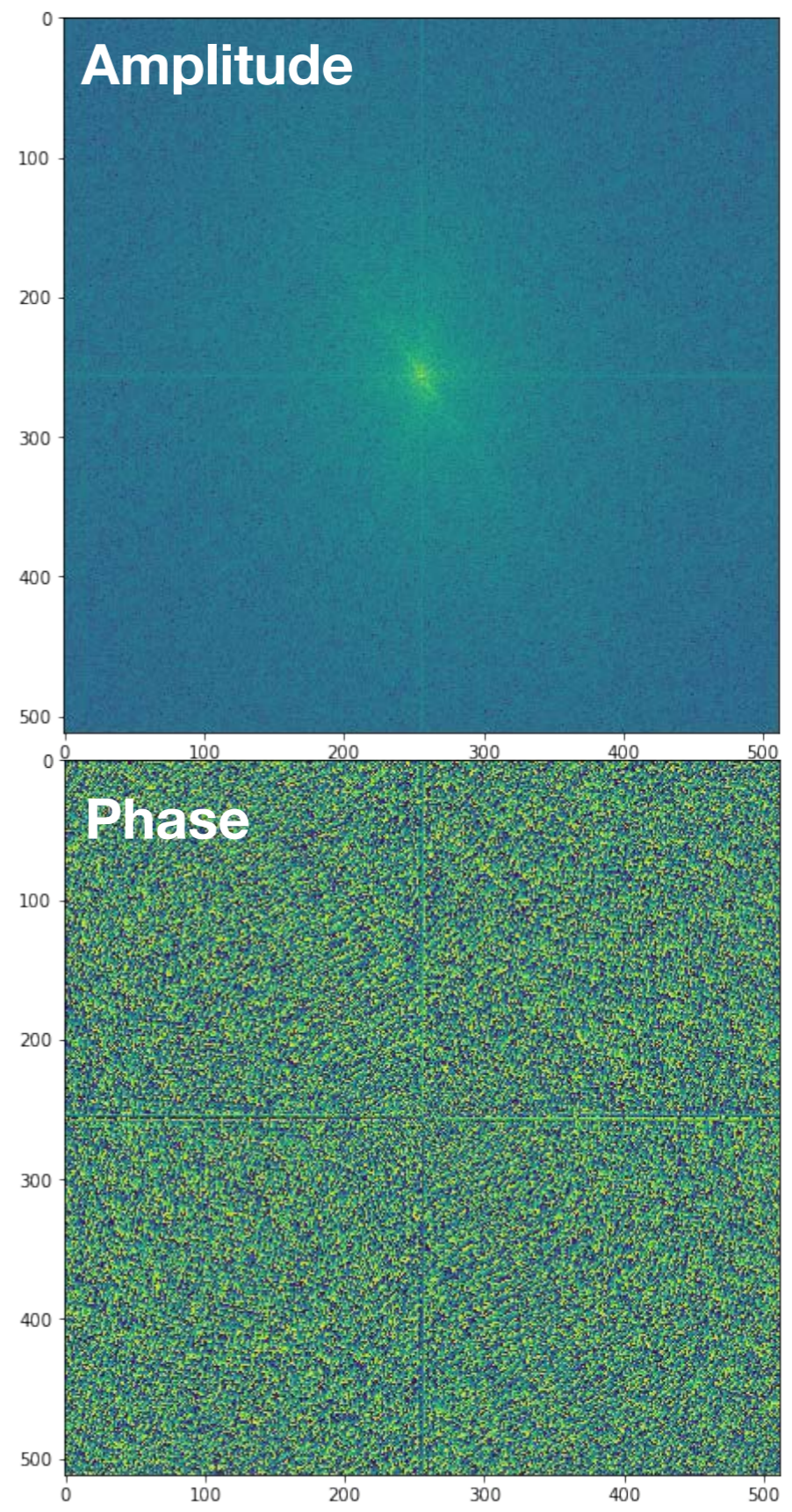
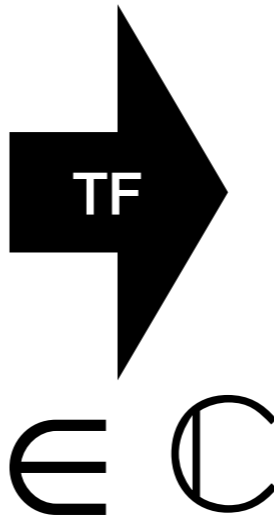
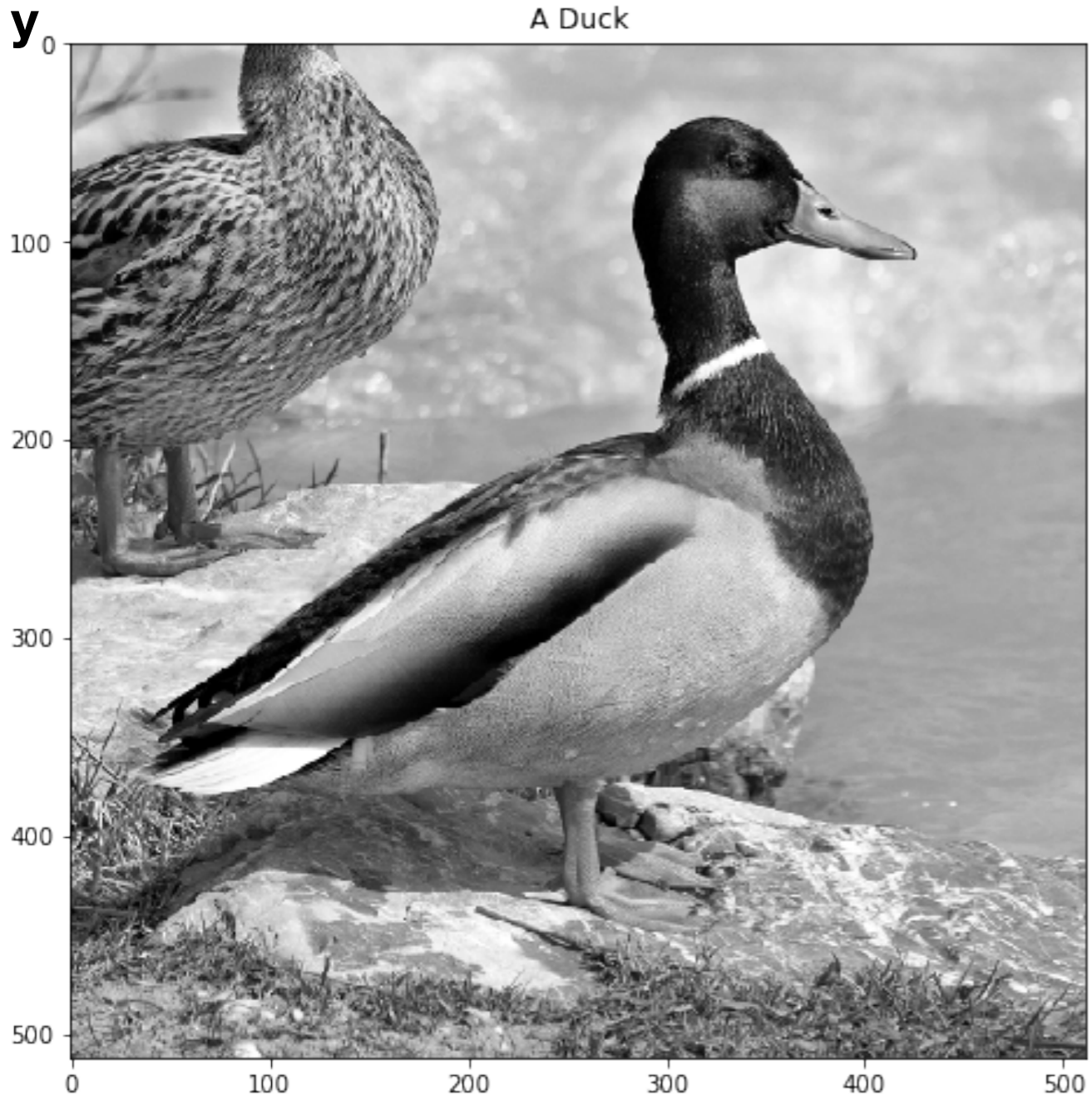
$$\text{TF 1D } \hat{S}(\nu) = \int s(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$$



# Mesure par interférométrie

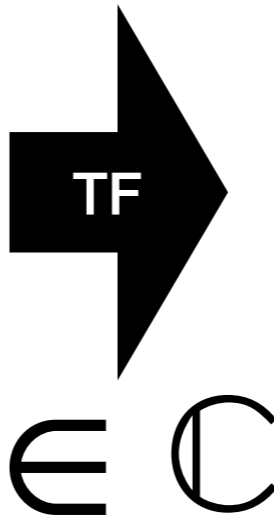
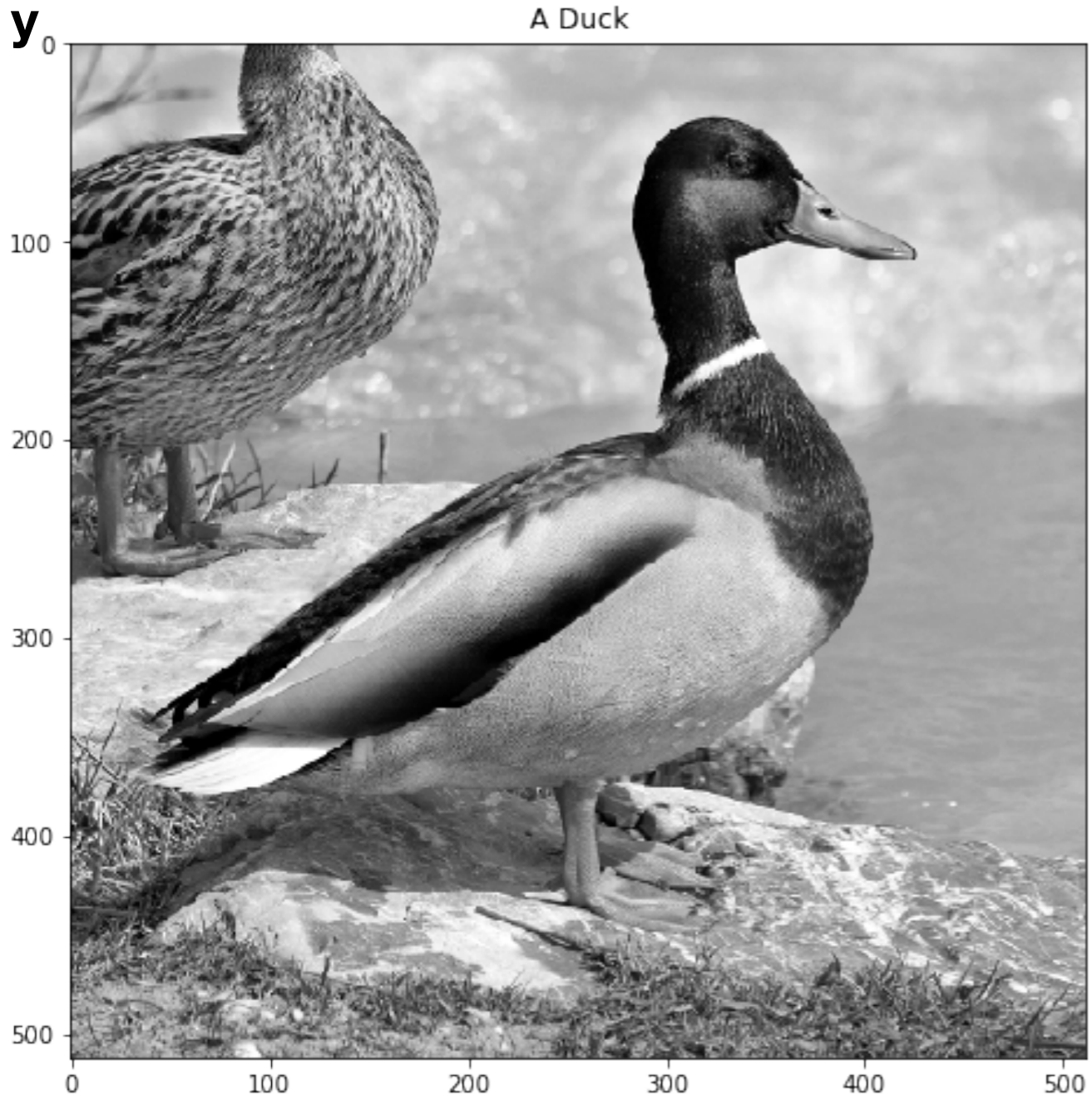
## Transformée de Fourier à 2D

$$\text{TF 1D } \hat{S}(\nu) = \int s(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$$

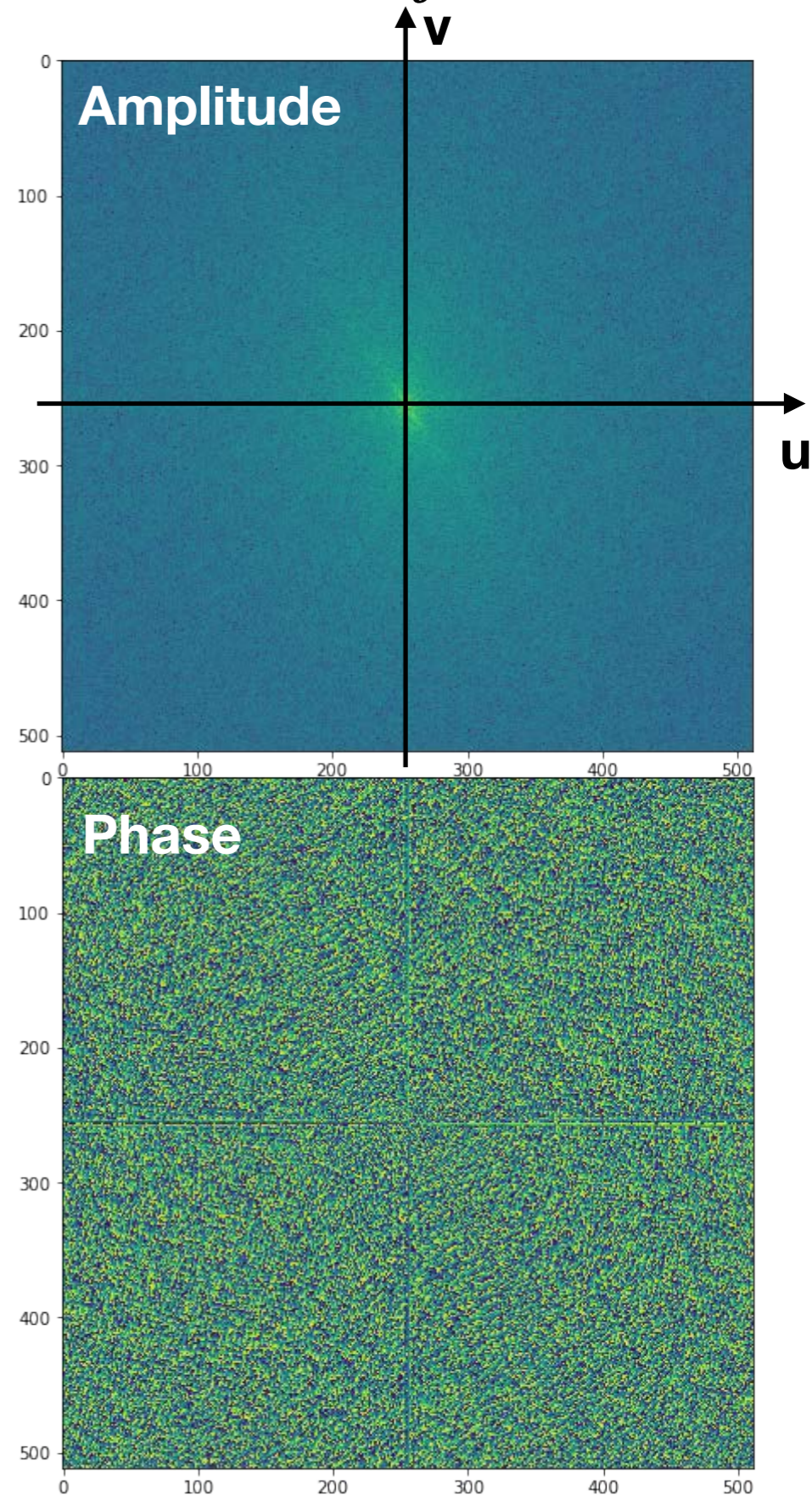


# Mesure par interférométrie

## Transformée de Fourier à 2D

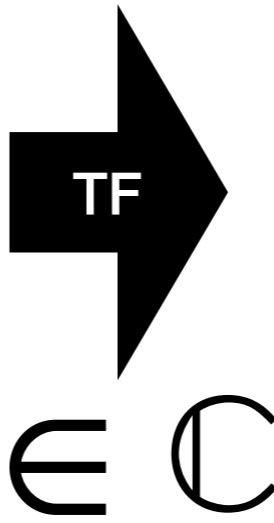
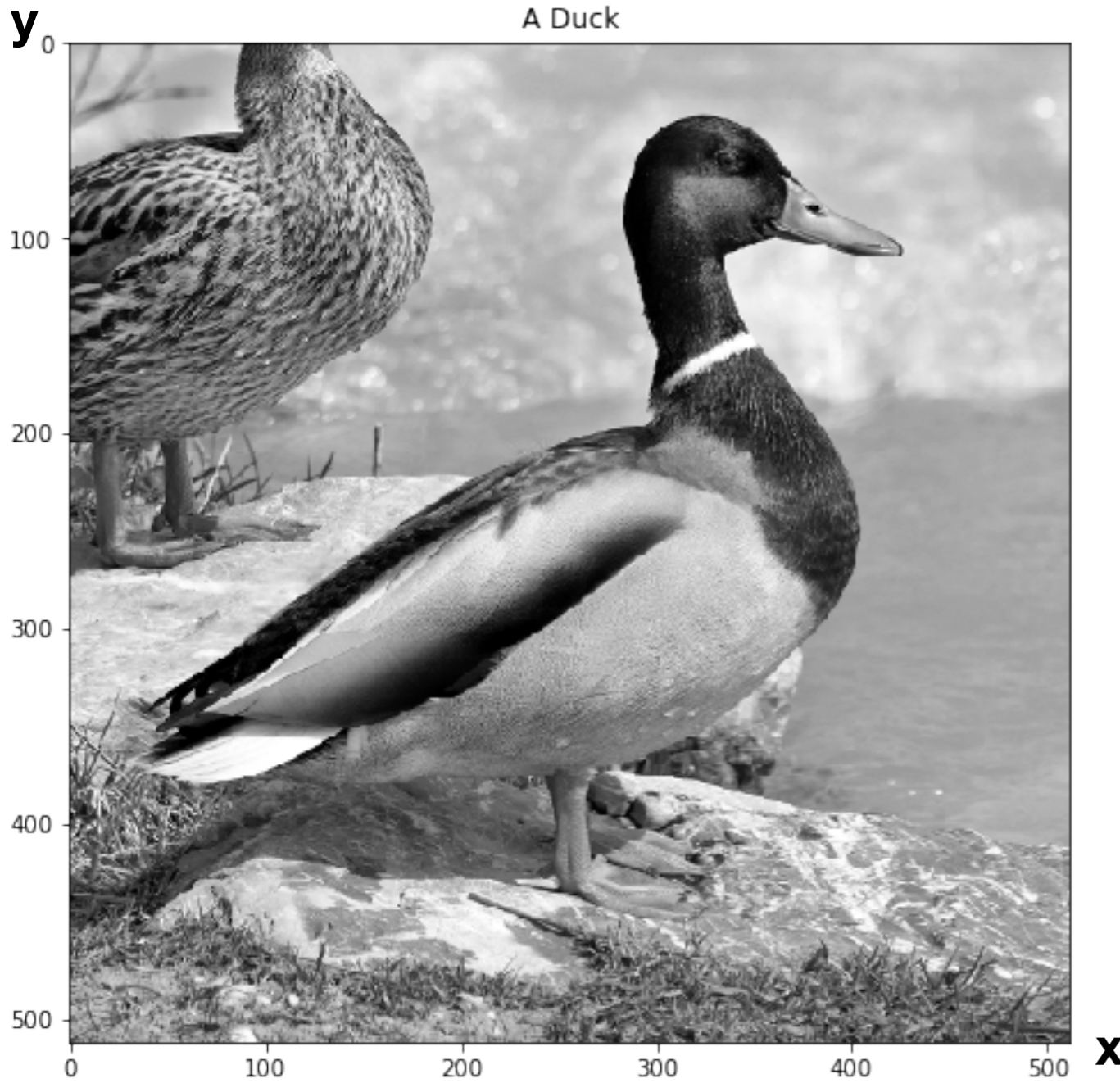


$$\text{TF 1D } \hat{S}(\nu) = \int s(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$$

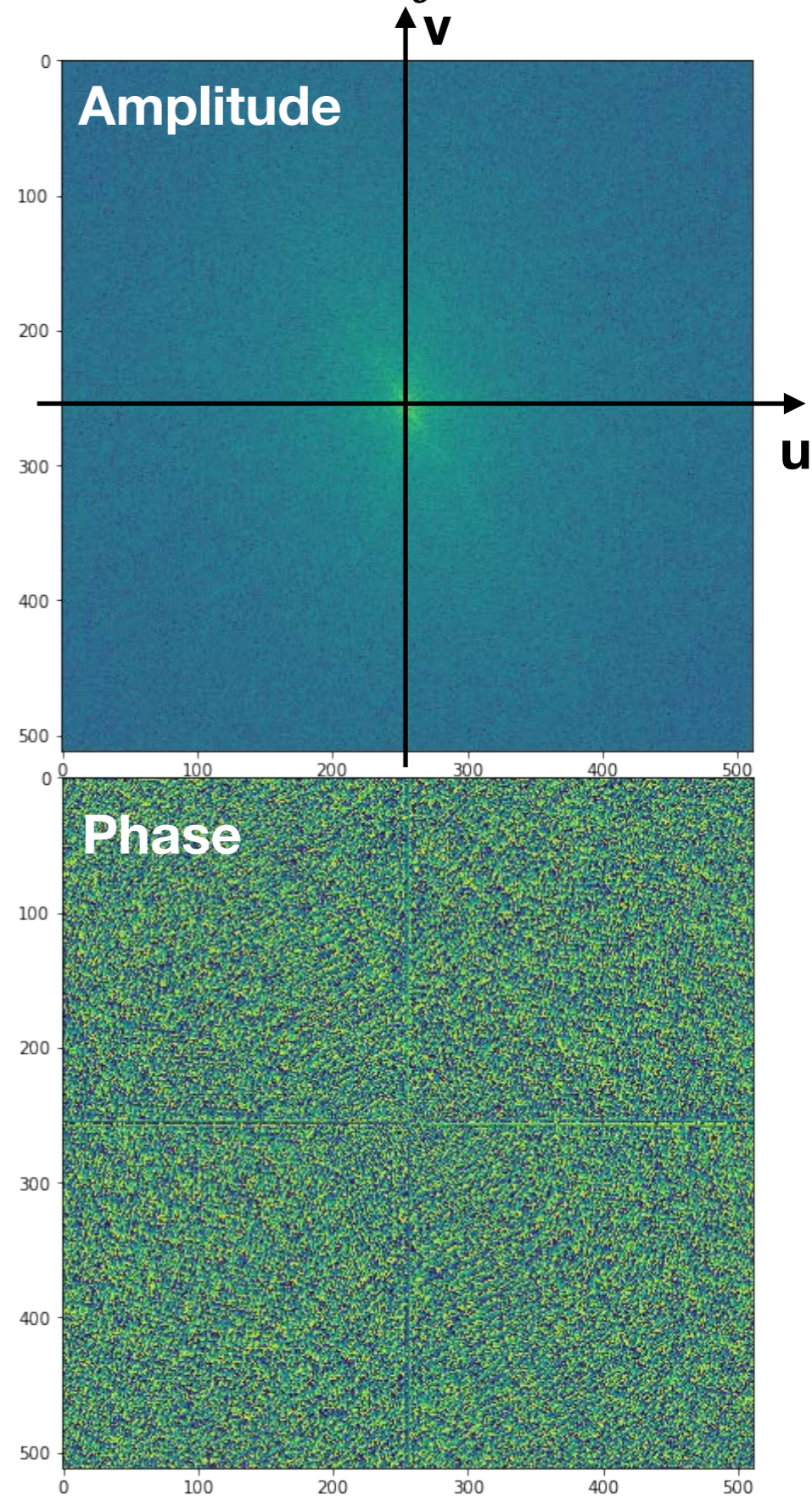


# Mesure par interférométrie

## Transformée de Fourier à 2D



$$\text{TF 1D } \hat{S}(v) = \int s(t) e^{-2i\pi vt} dt$$

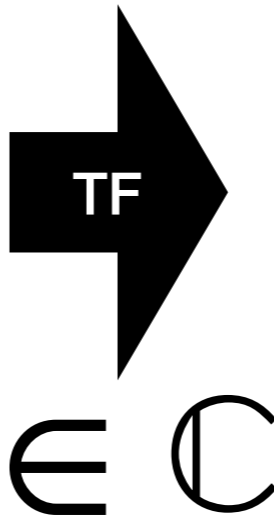
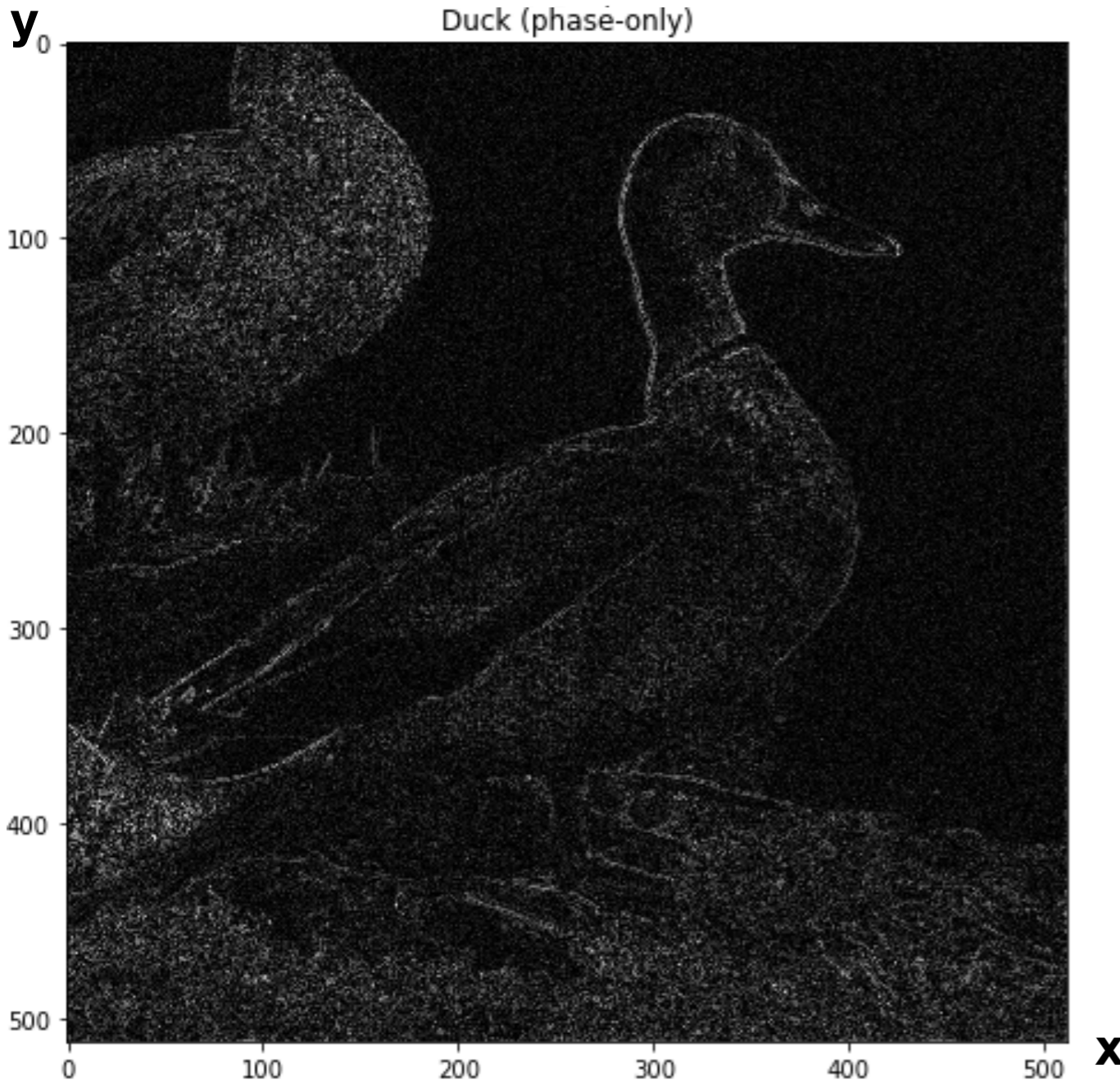


$$\hat{D}(u, v) = \iint D(x, y) e^{-2i\pi(xu+yv)} dx dy$$

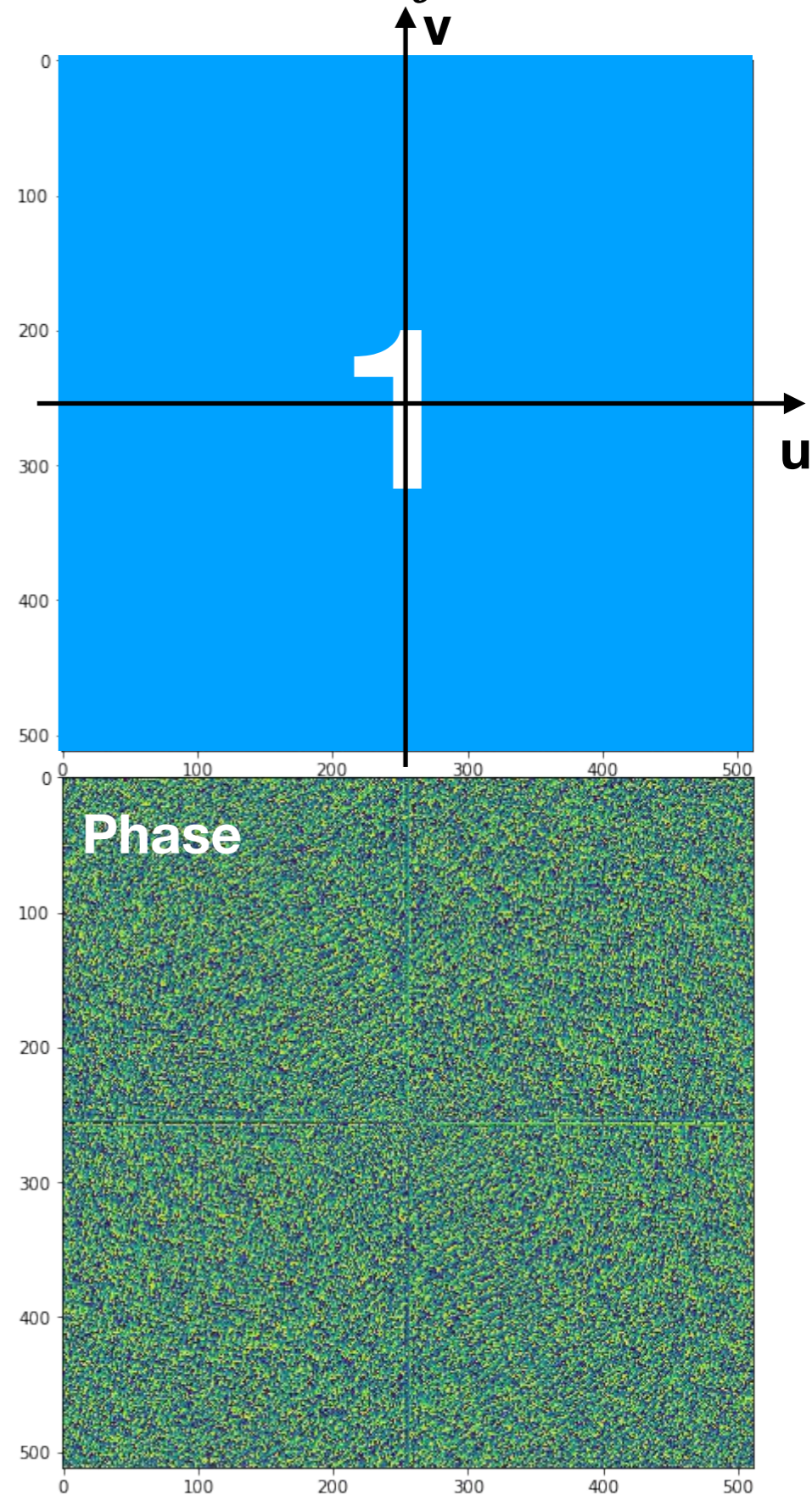
$(x, y) \leftrightarrow (u, v)$  Coordonnées conjuguées

# Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D



TF 1D  $\hat{S}(v) = \int s(t)e^{-2i\pi vt} dt$

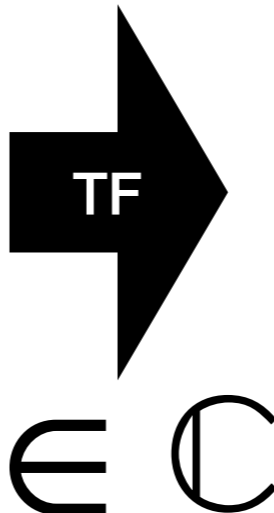
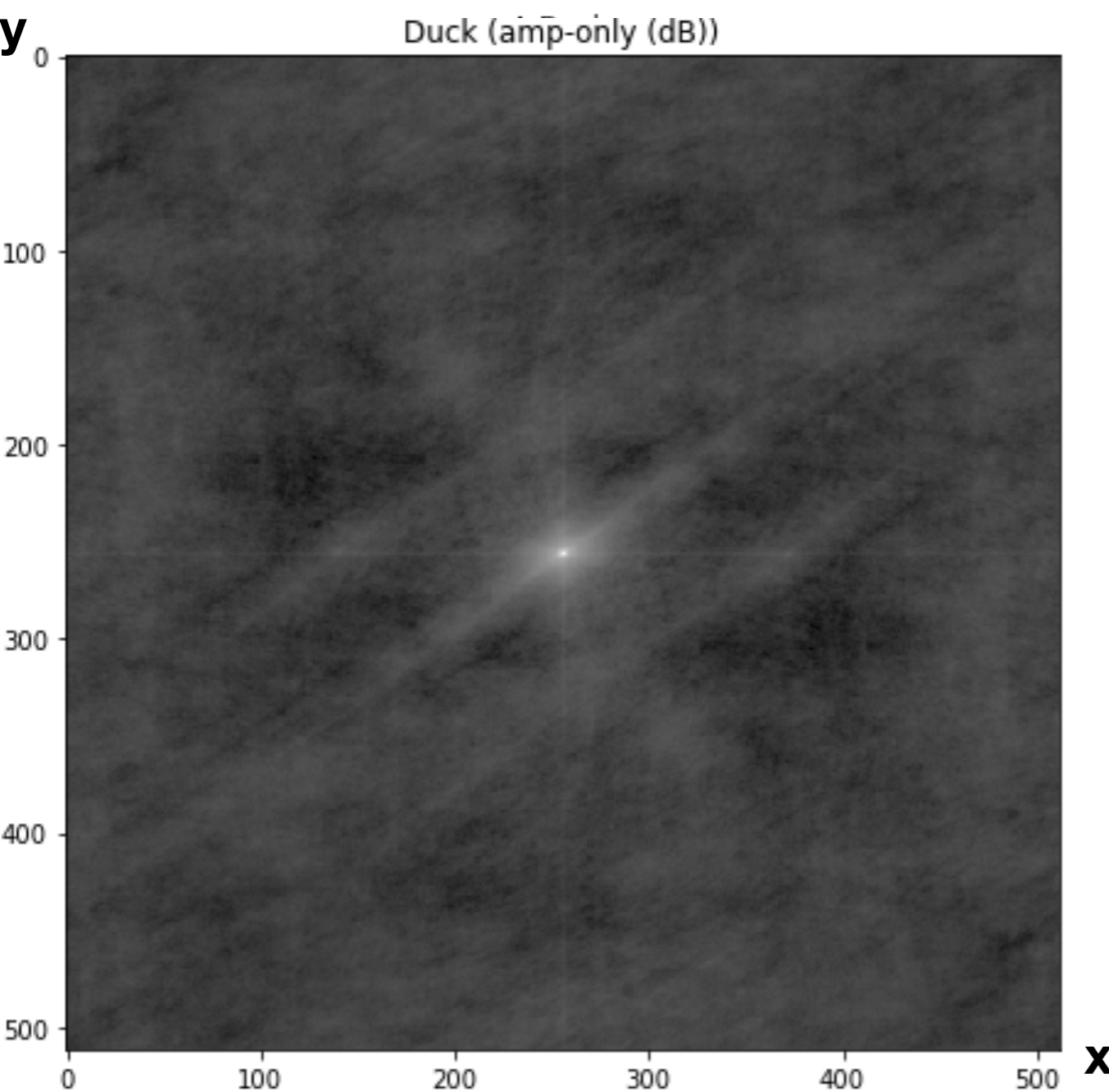


$$\hat{D}(u, v) = \iint D(x, y)e^{-2i\pi(xu+yv)} dx dy$$

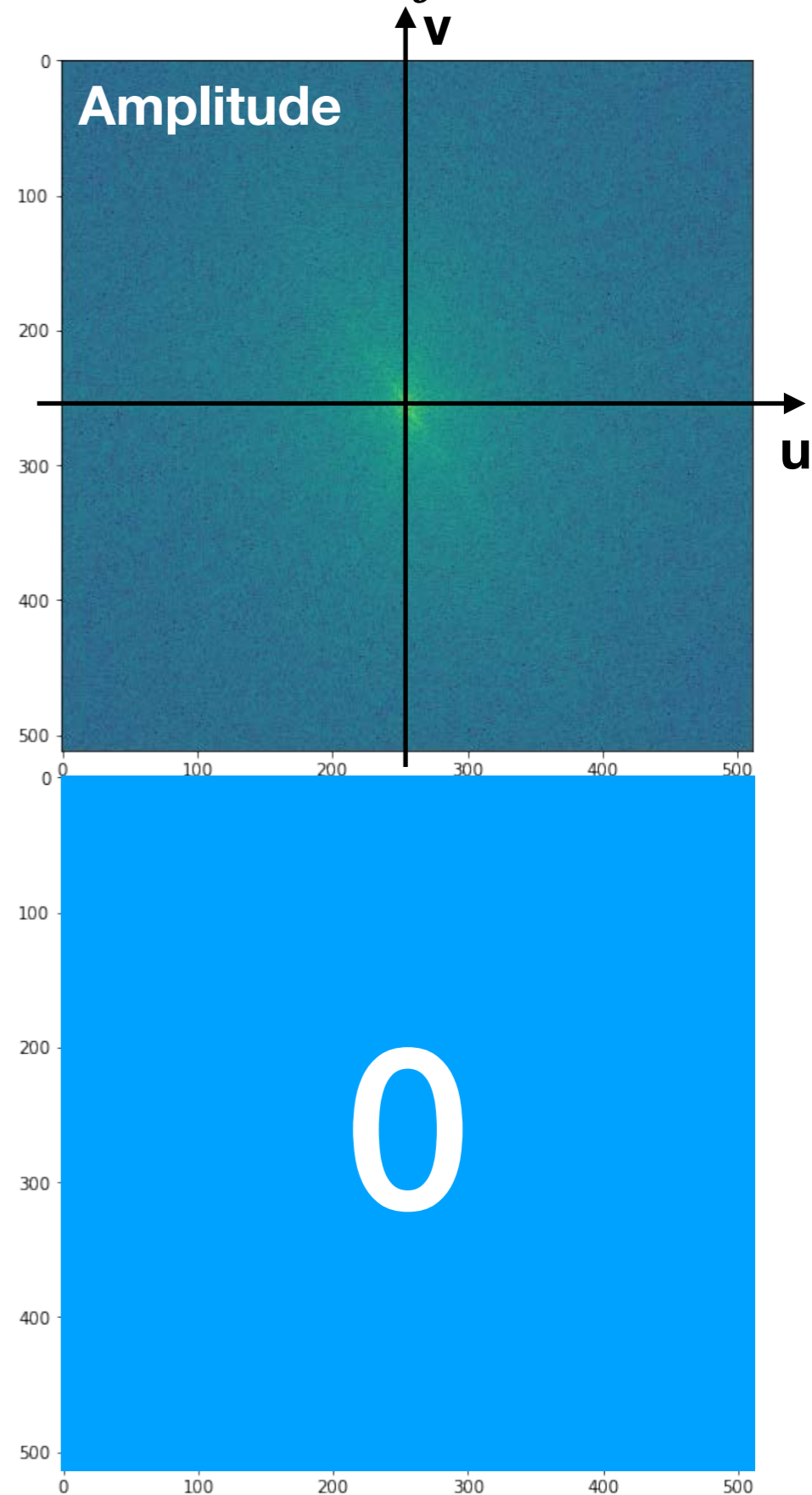
$(x, y) \leftrightarrow (u, v)$  Coordonnées conjuguées

# Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D



**TF 1D**  $\hat{S}(v) = \int s(t)e^{-2i\pi vt} dt$



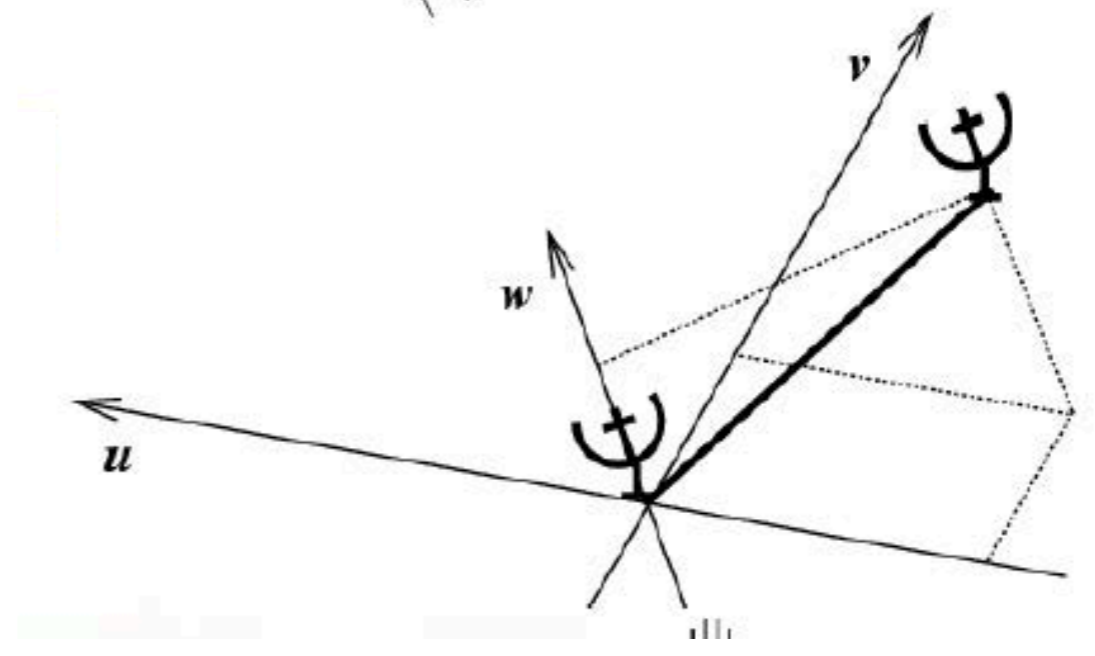
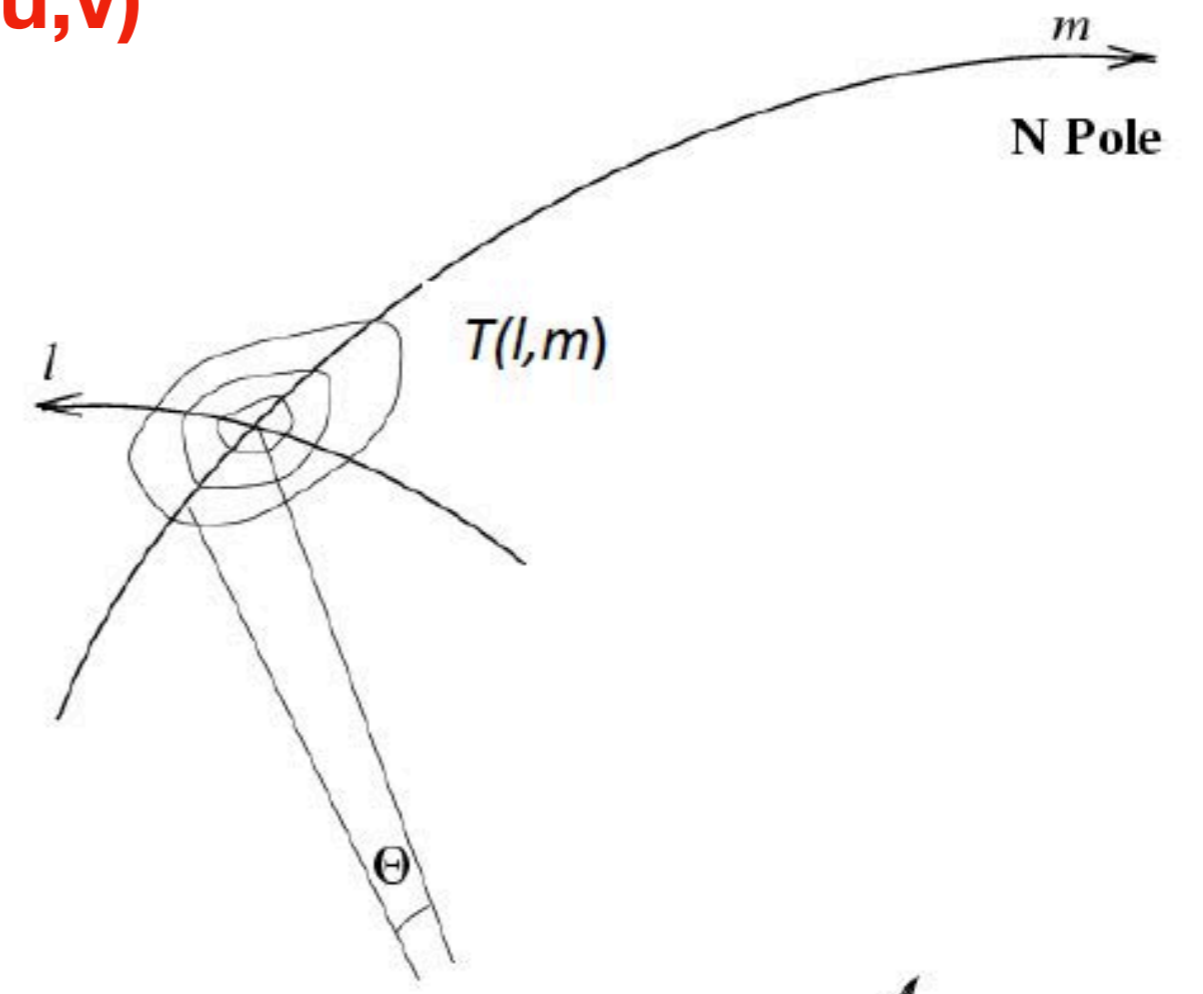
$$\hat{D}(u, v) = \iint D(x, y)e^{-2i\pi(xu+yv)} dx dy$$

$(x, y) \leftrightarrow (u, v)$  Coordonnées conjuguées

# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



**(l,m) Direction dans le ciel**

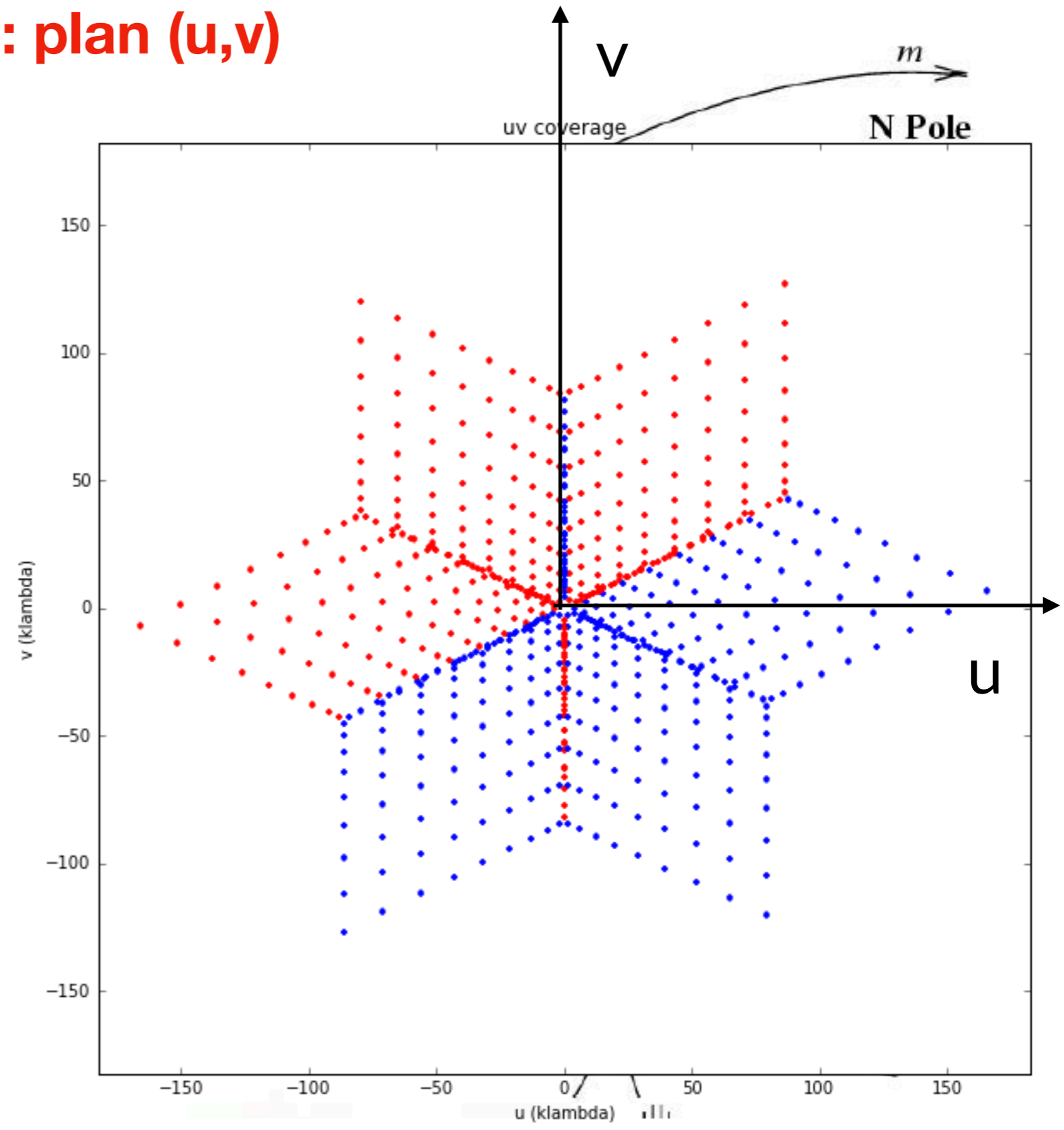




# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



(l,m) Direction dans le ciel



# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



**(l,m) Direction dans le ciel**

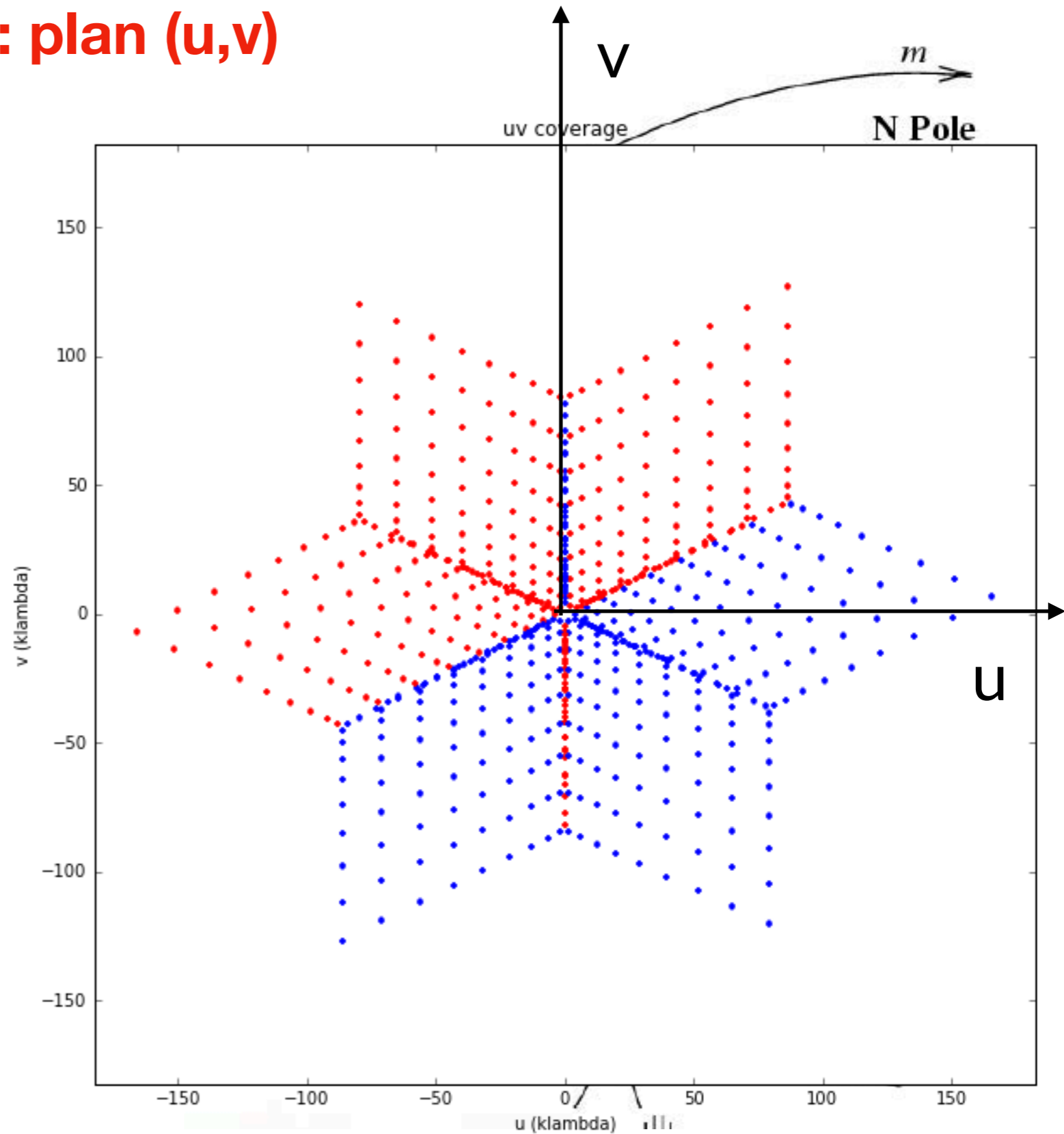
**(u,v) Fréquences spatiales**

**1 ligne de base projetée**

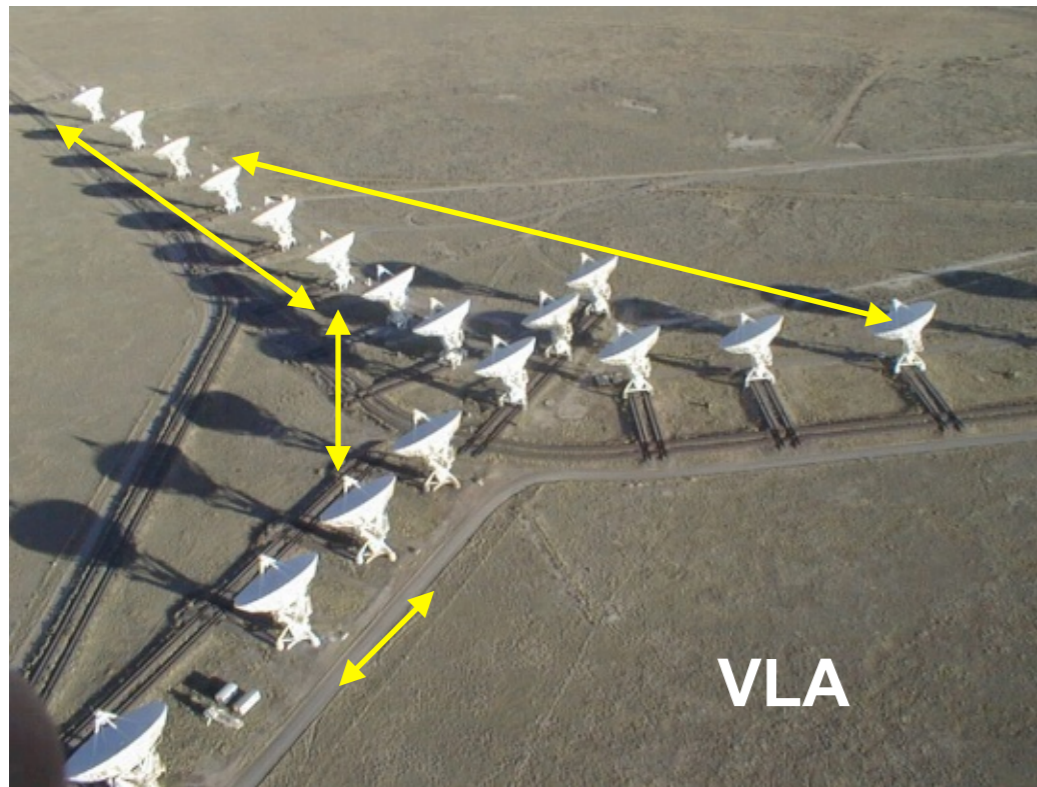
**= 1 échantillon du plan de**

**Fourier (plan « u,v »)**

**= 1 visibilité**



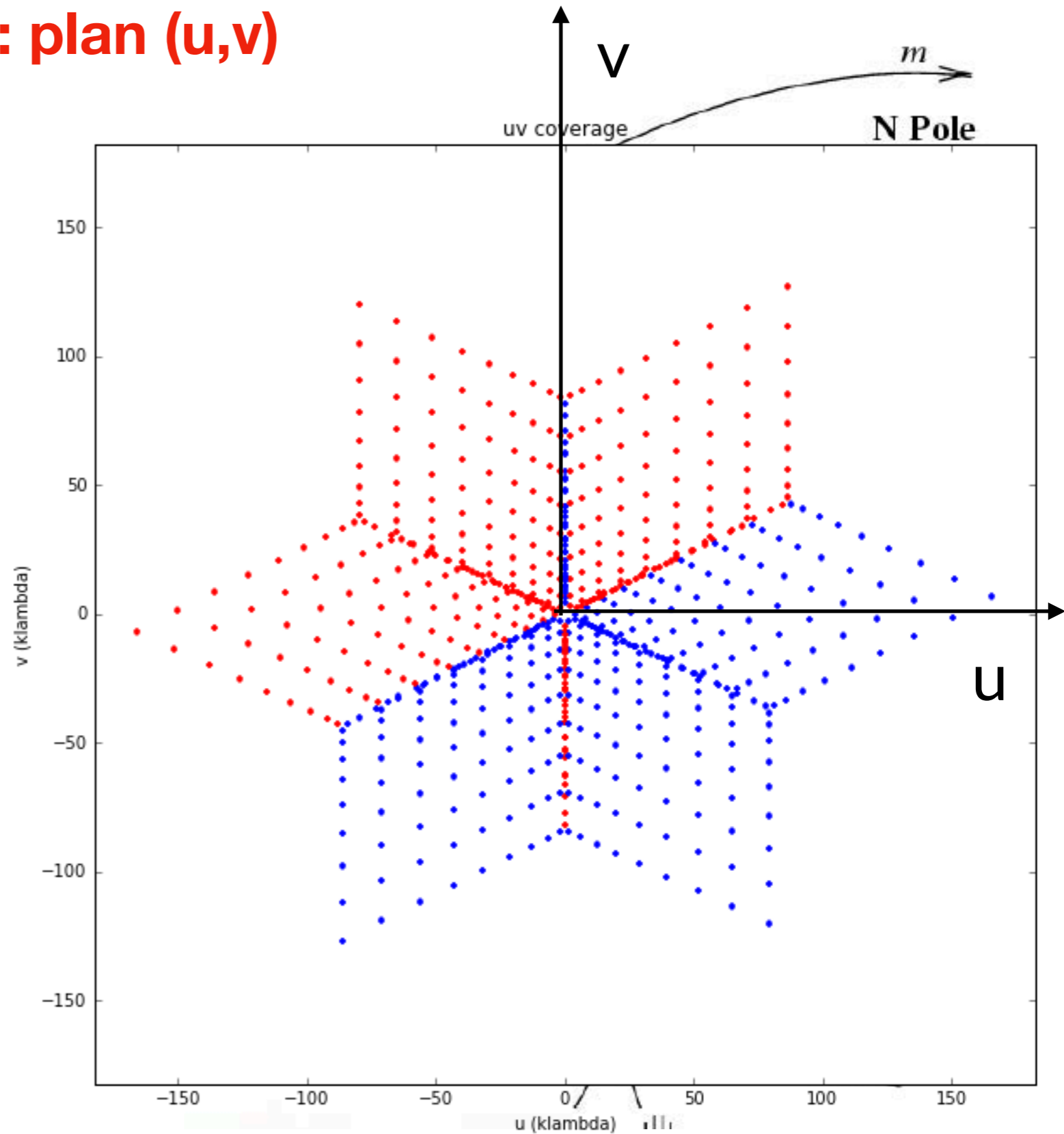
# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



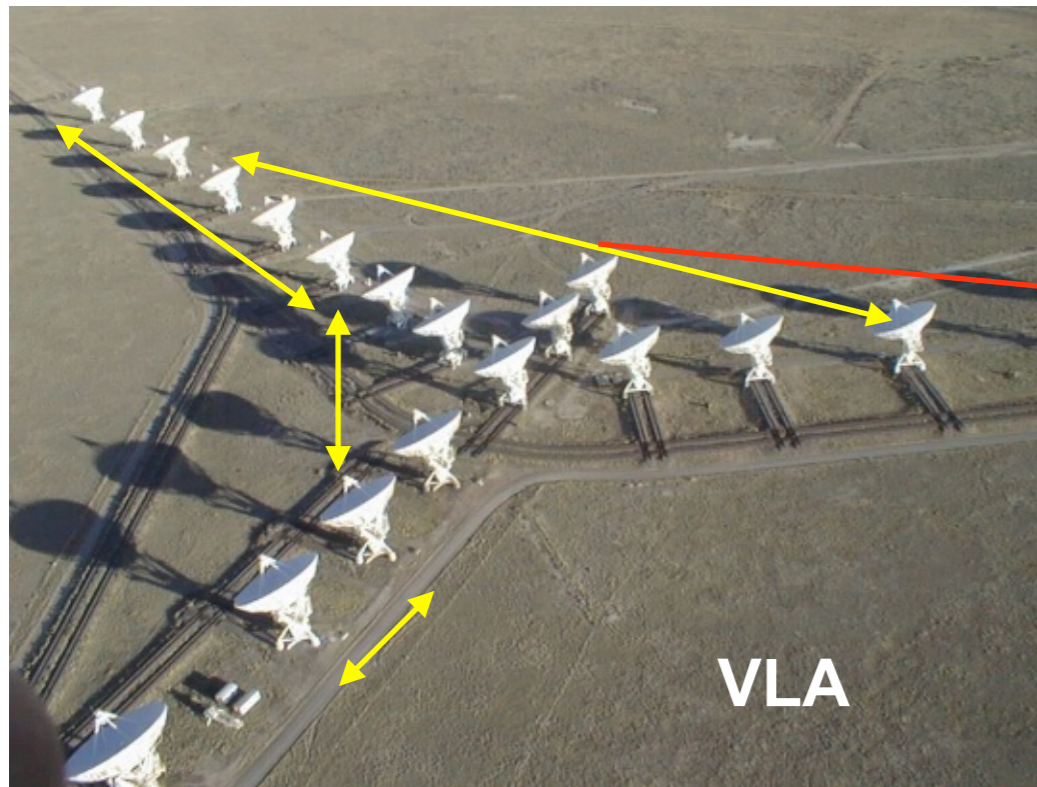
**(l,m) Direction dans le ciel**

**(u,v) Fréquences spatiales**

**1 ligne de base projetée  
= 1 échantillon du plan de  
Fourier (plan « u,v »)  
= 1 visibilité**



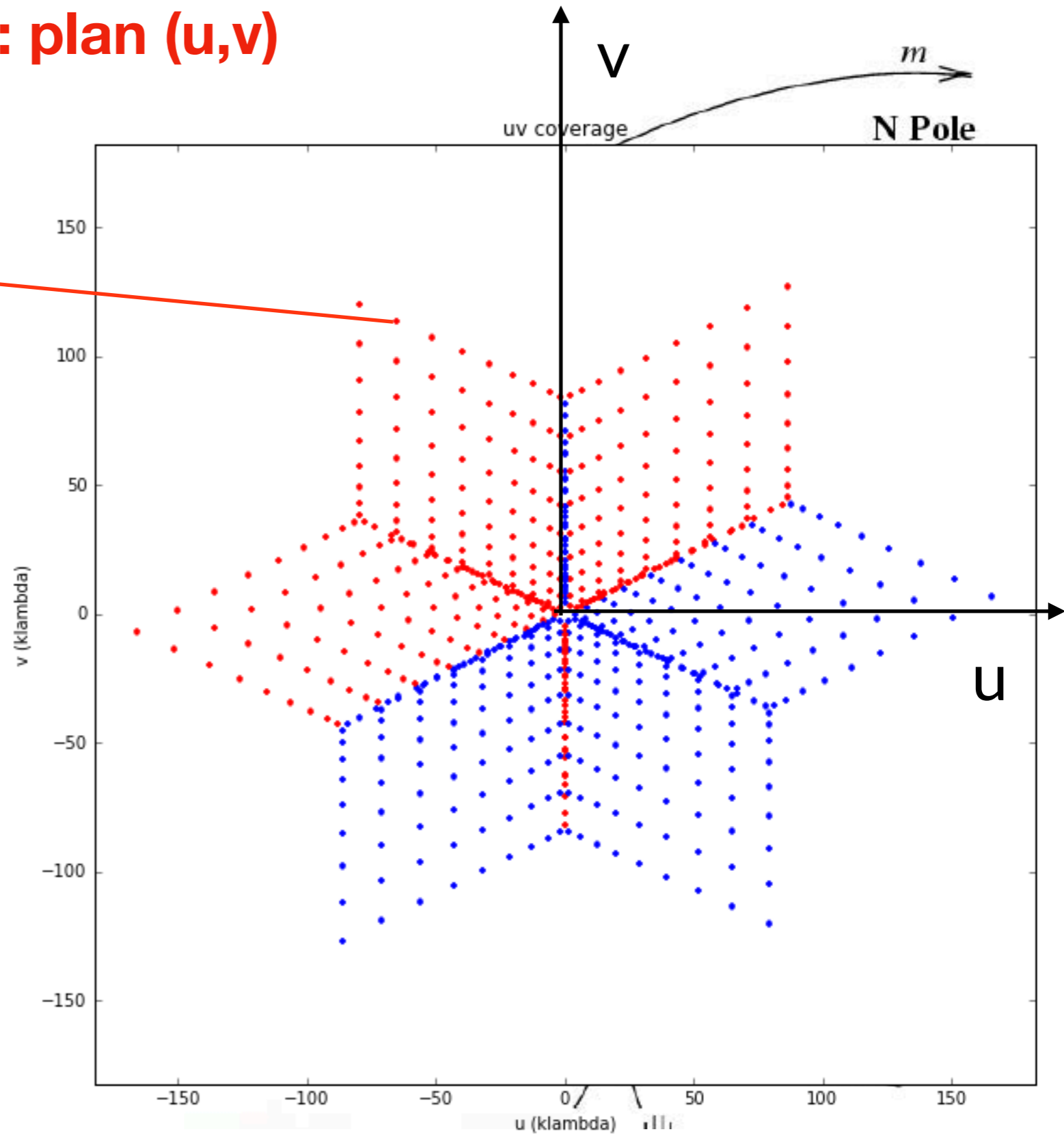
# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



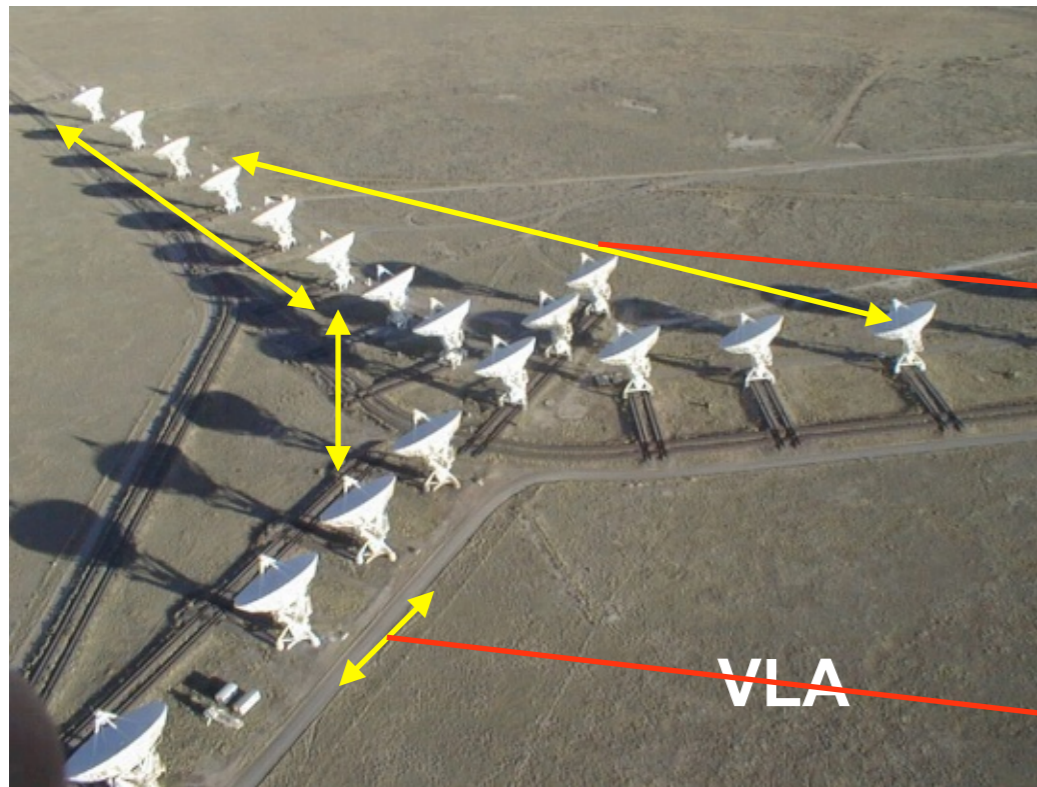
**(l,m) Direction dans le ciel**

**(u,v) Fréquences spatiales**

**1 ligne de base projetée  
= 1 échantillon du plan de  
Fourier (plan « u,v »)  
= 1 visibilité**



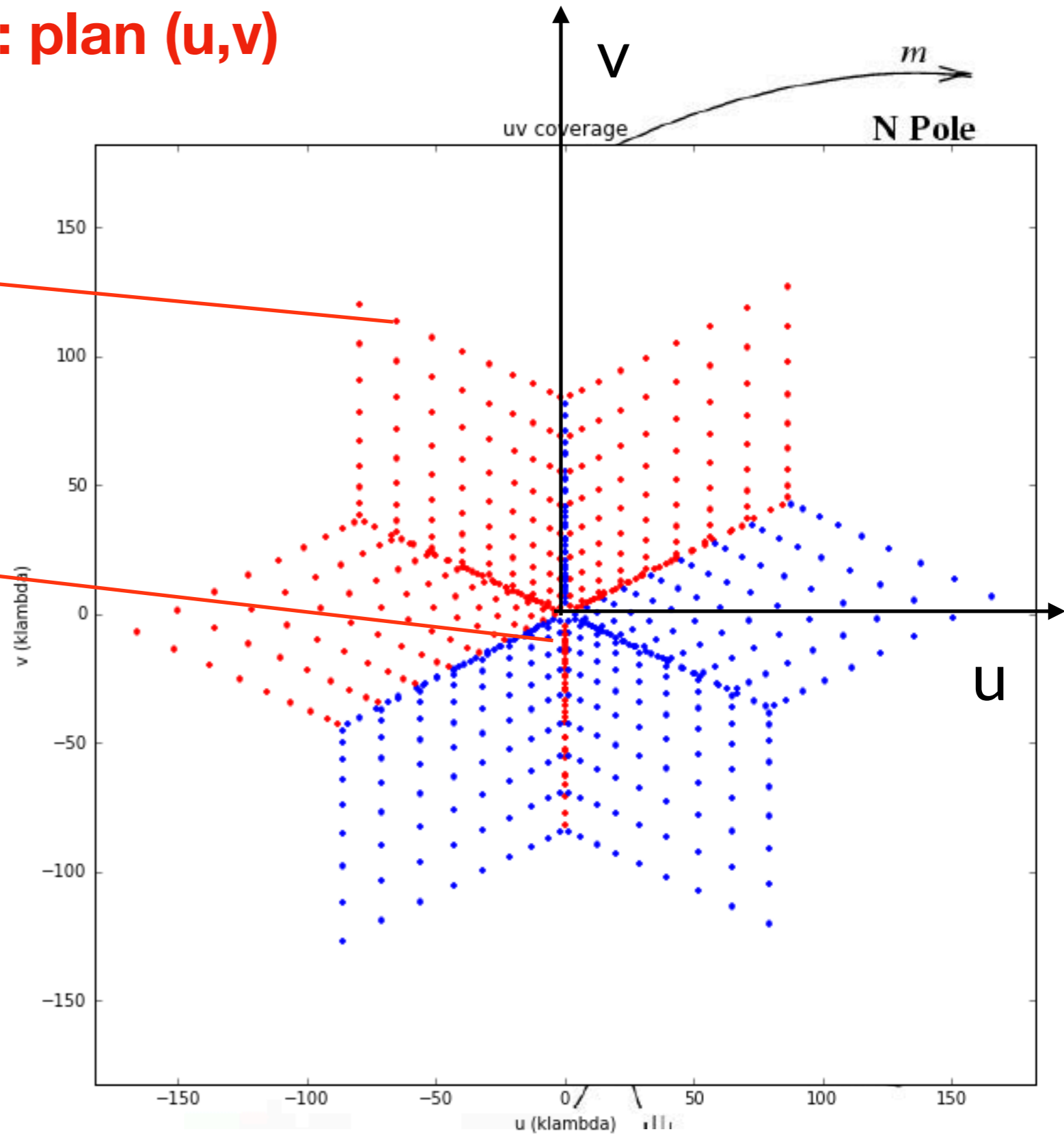
# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



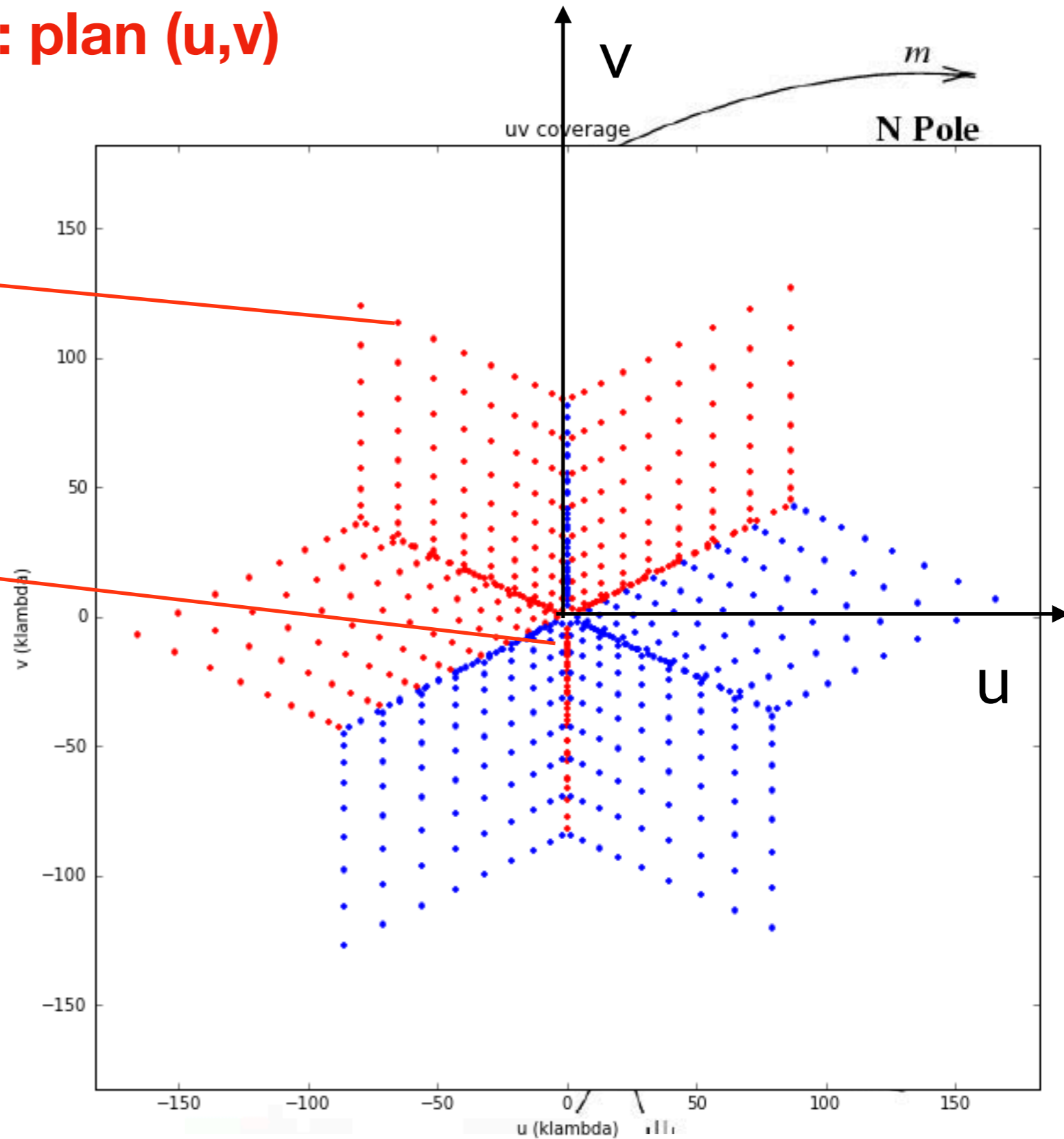
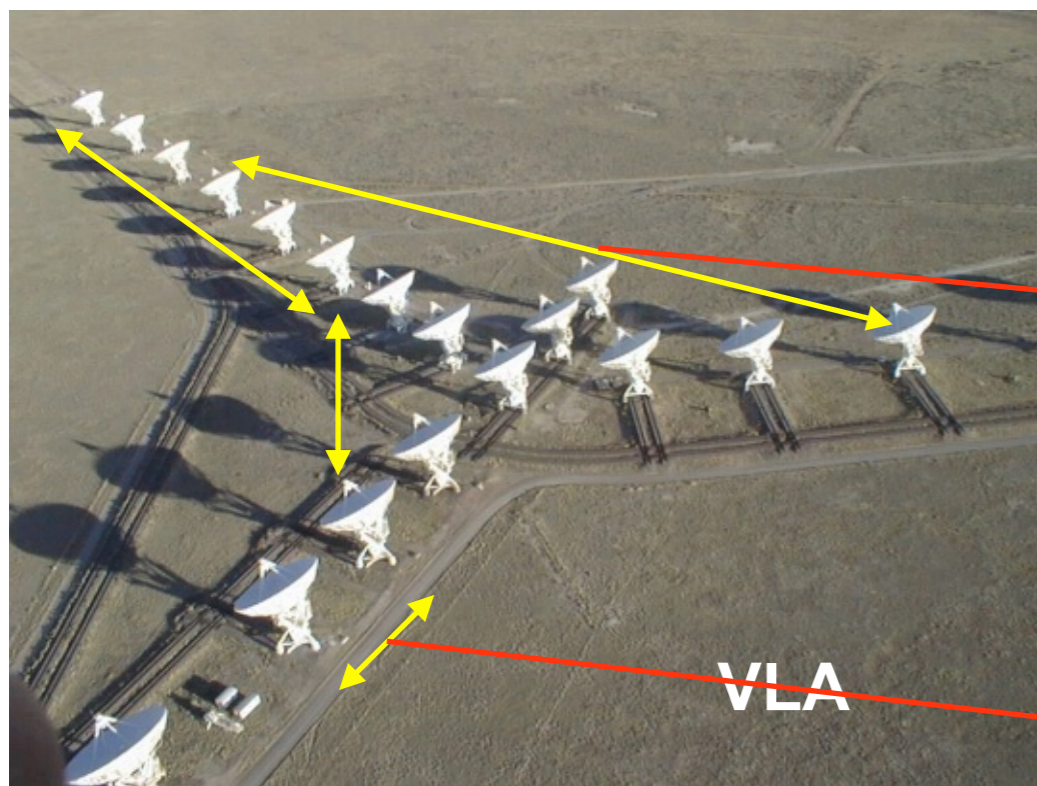
**(l,m) Direction dans le ciel**

**(u,v) Fréquences spatiales**

**1 ligne de base projetée  
= 1 échantillon du plan de  
Fourier (plan « u,v »)  
= 1 visibilité**



# Mesure par interférométrie: plan (u,v)



**(l,m) Direction dans le ciel**

**(u,v) Fréquences spatiales**

**1 ligne de base projetée  
= 1 échantillon du plan de  
Fourier (plan « u,v »)  
= 1 visibilité**

**En 1ère  
approximation**

$$V(u, v) = \iint T(l, m) e^{-2i\pi(ul+vm)} dl dm$$

**Fonction  
de visibilité**

# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

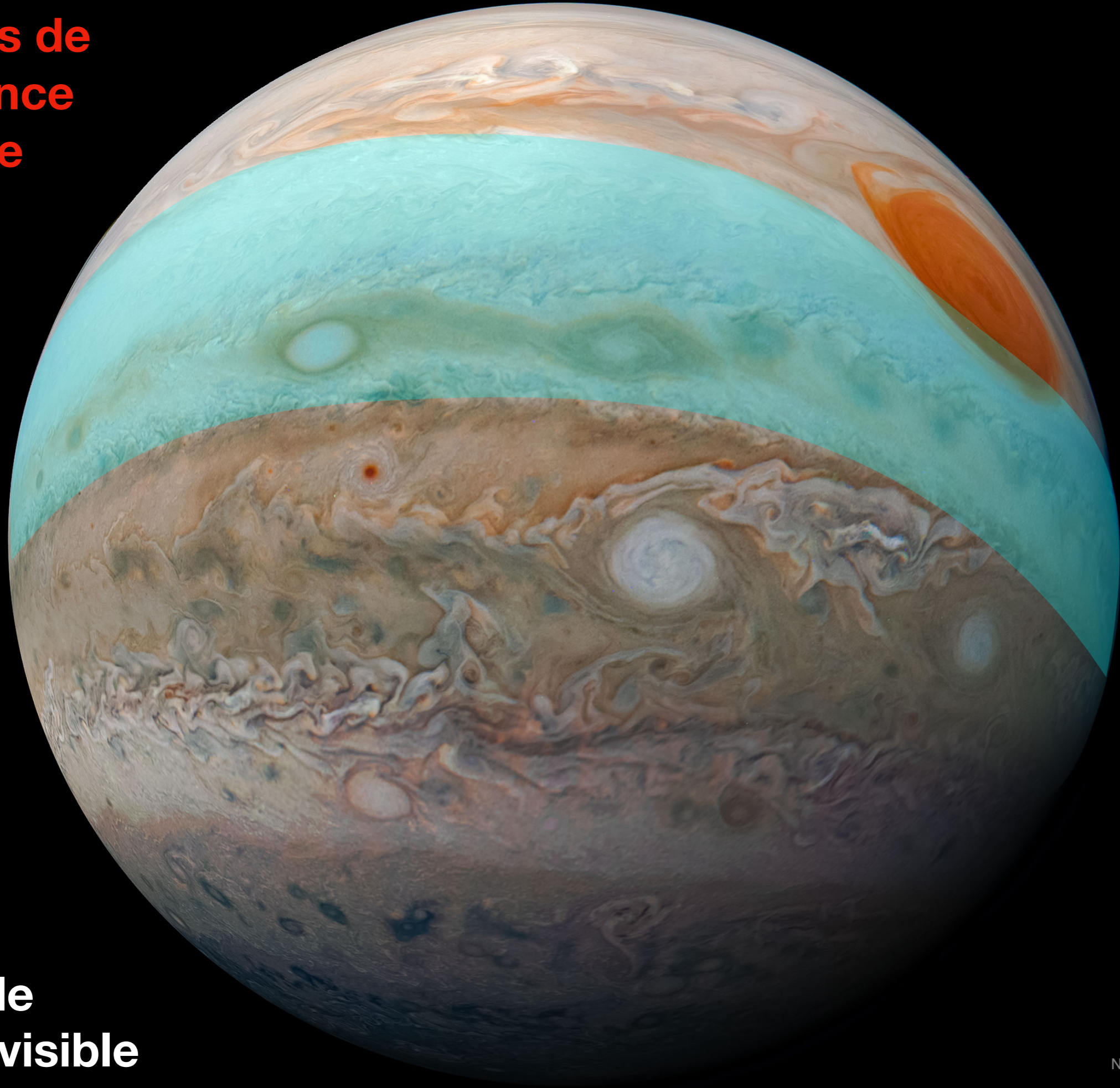
# Notions de fréquence spatiale



NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill



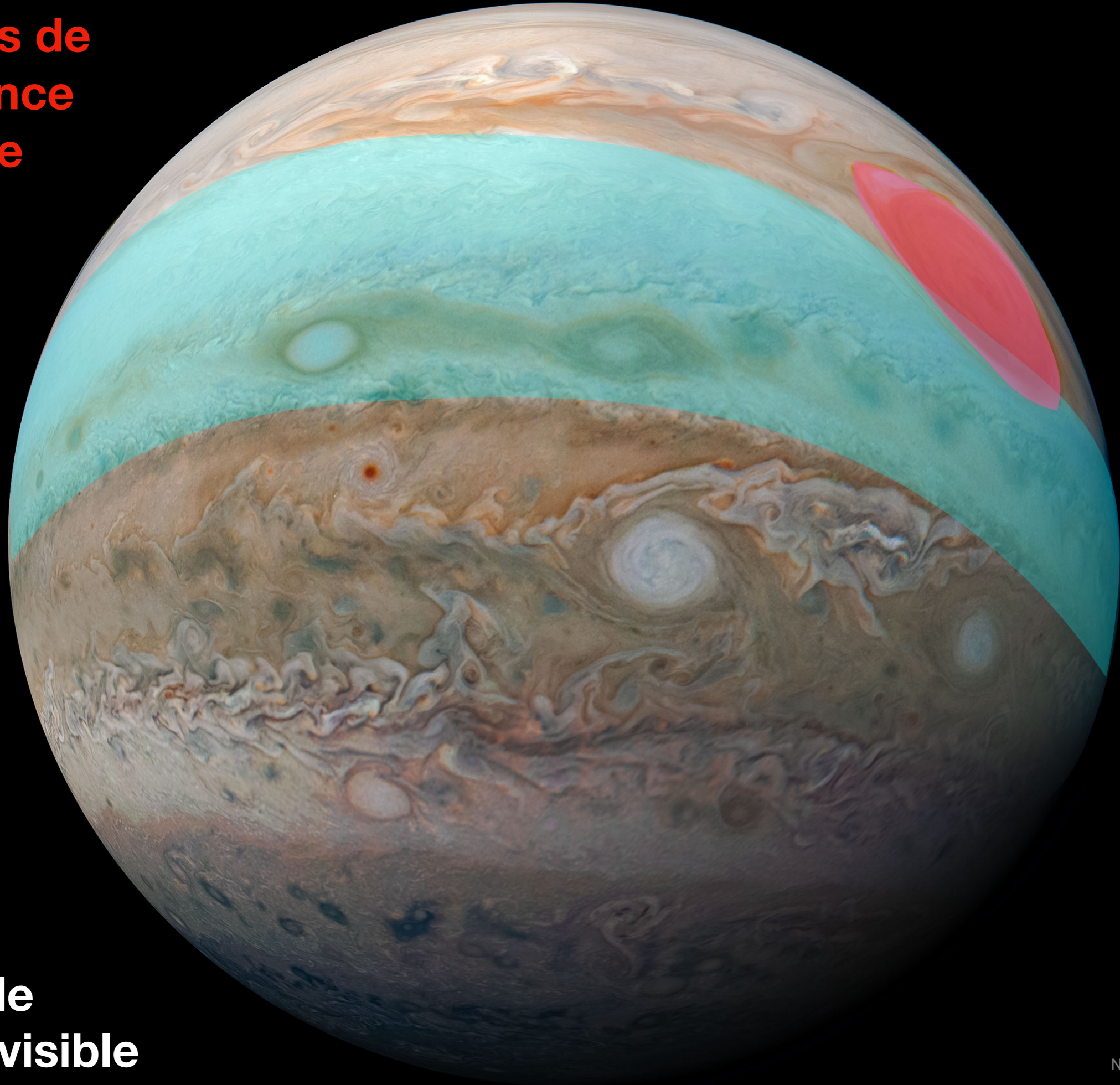
# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

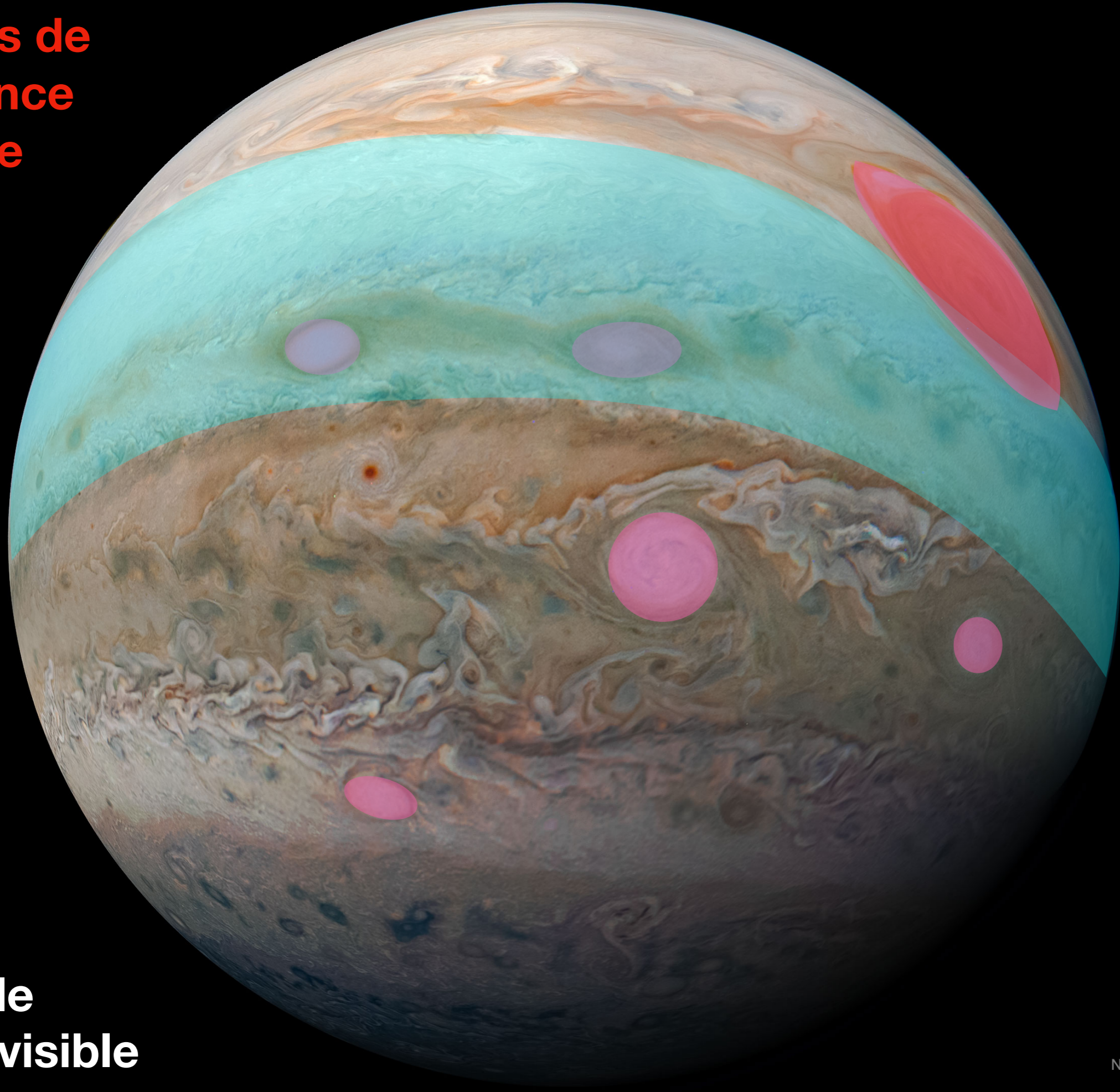
# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

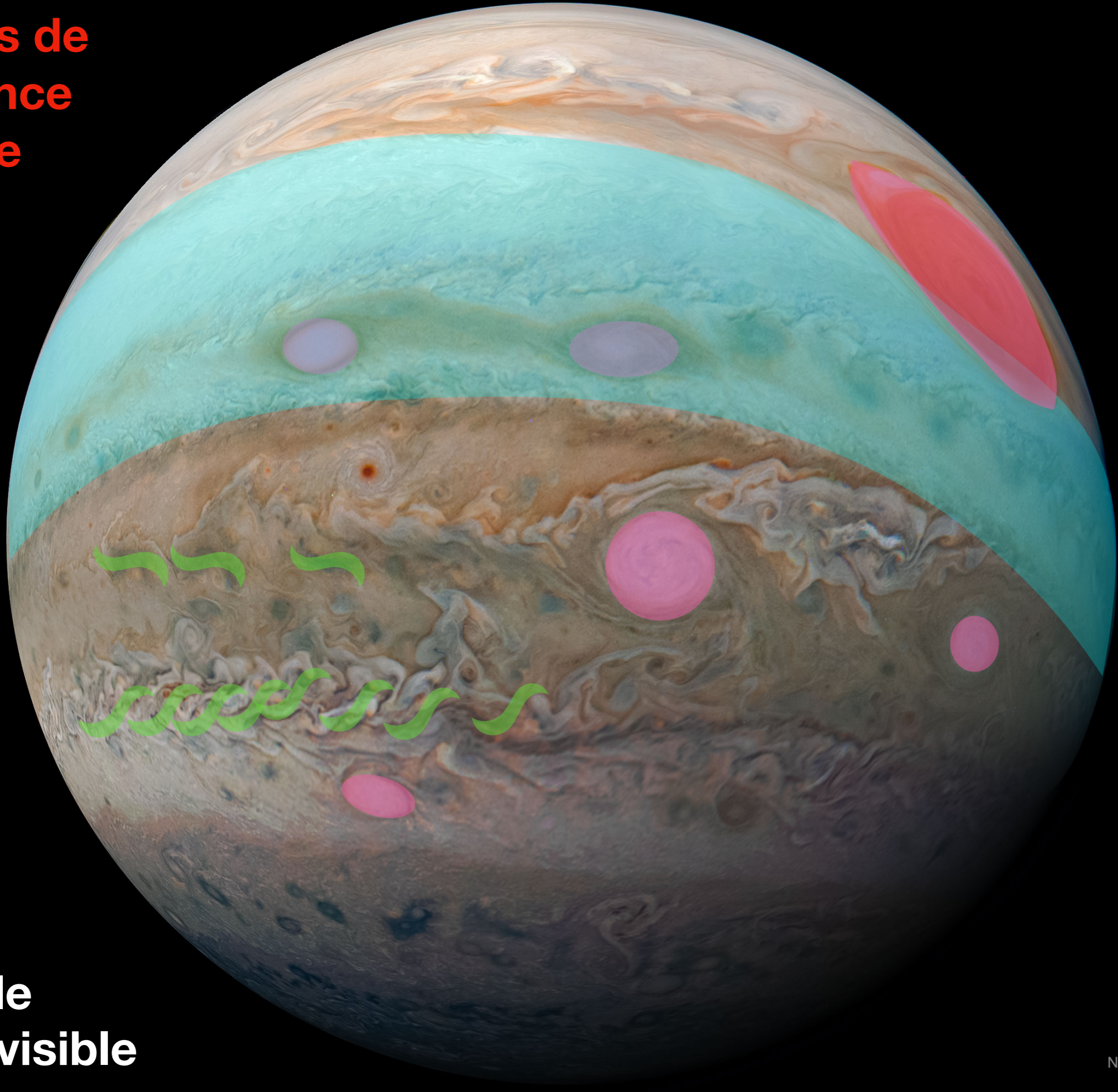
# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

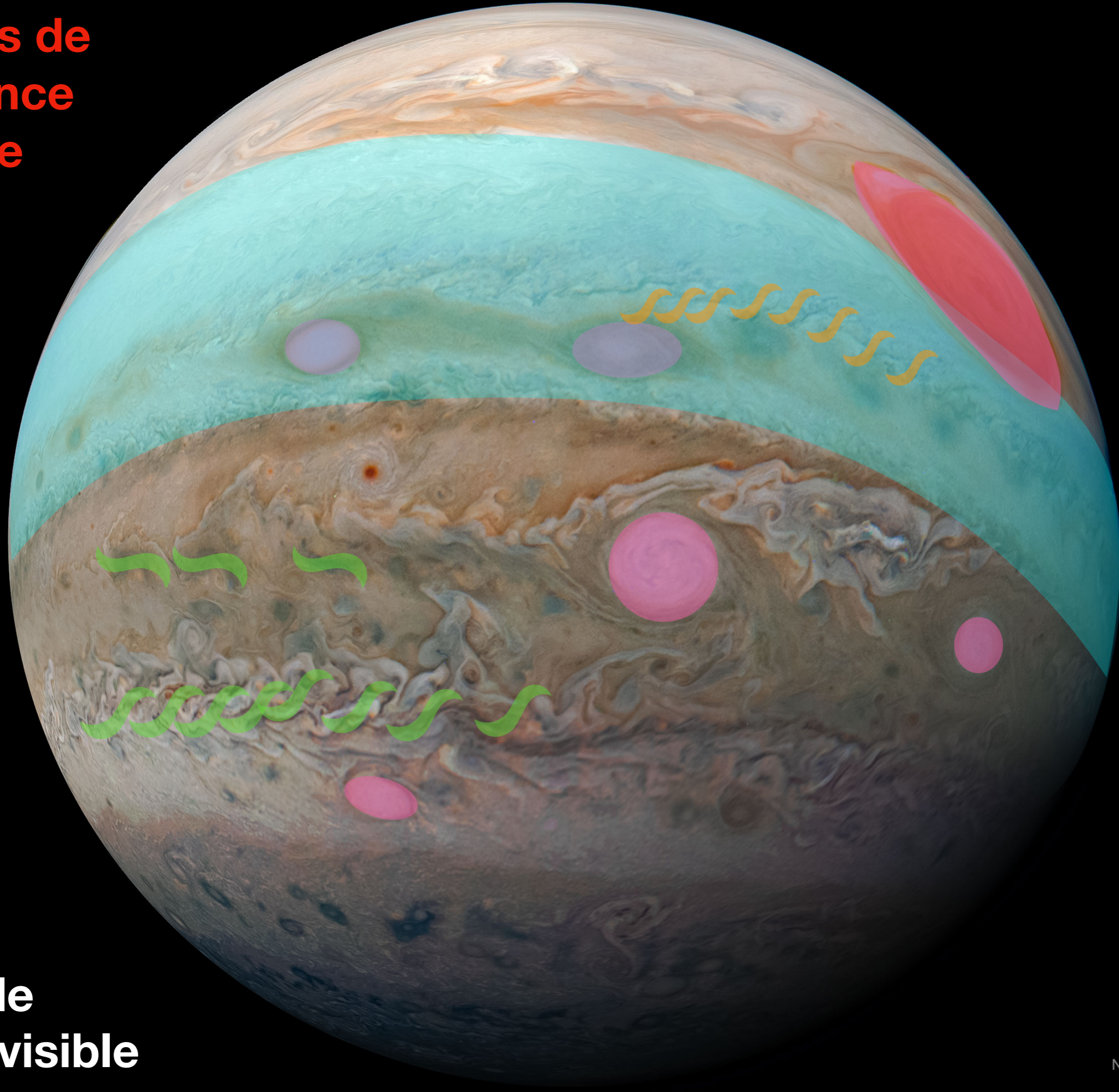
# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

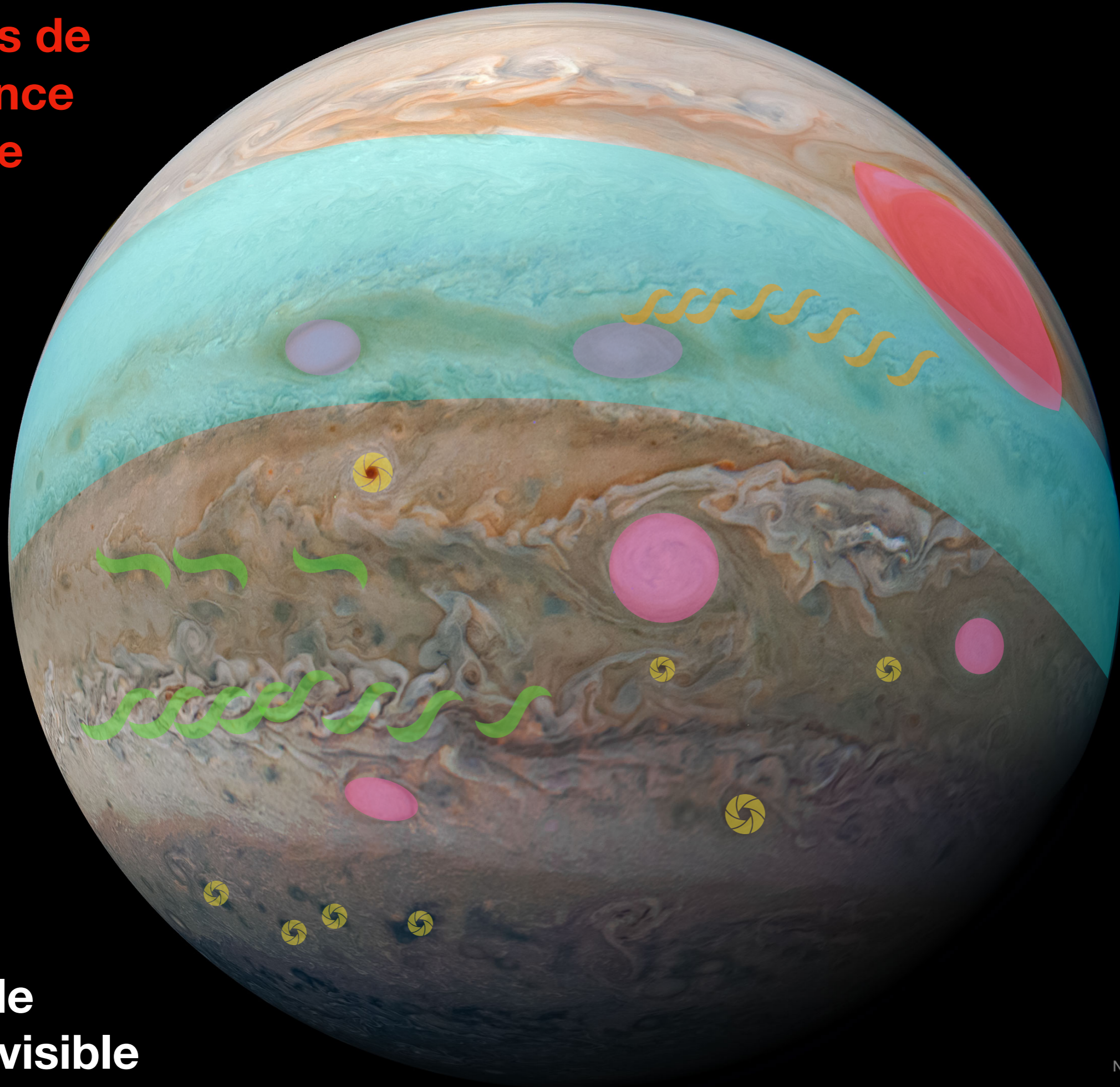
# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

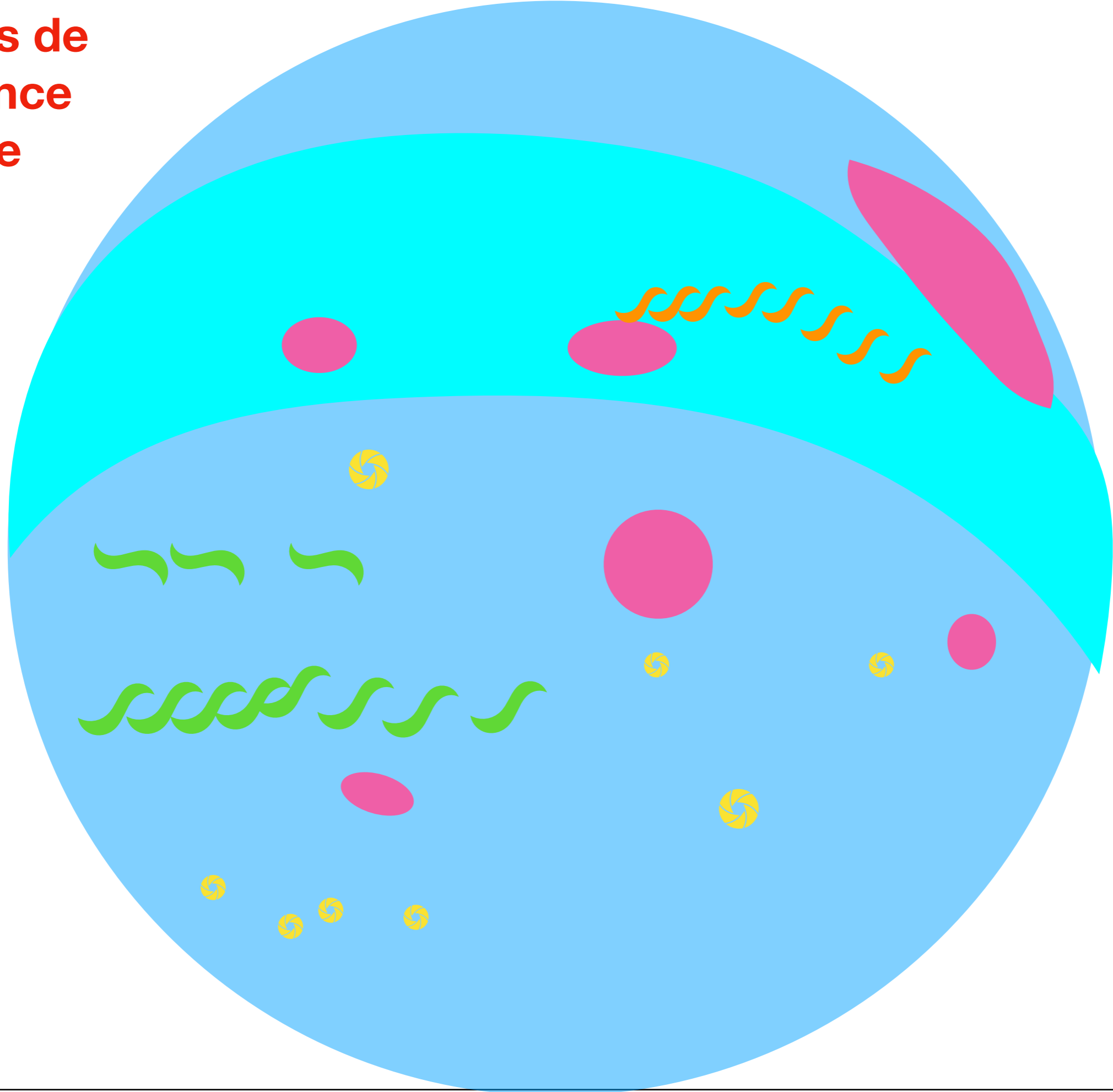
# Notions de fréquence spatiale



**Exemple  
Image visible**

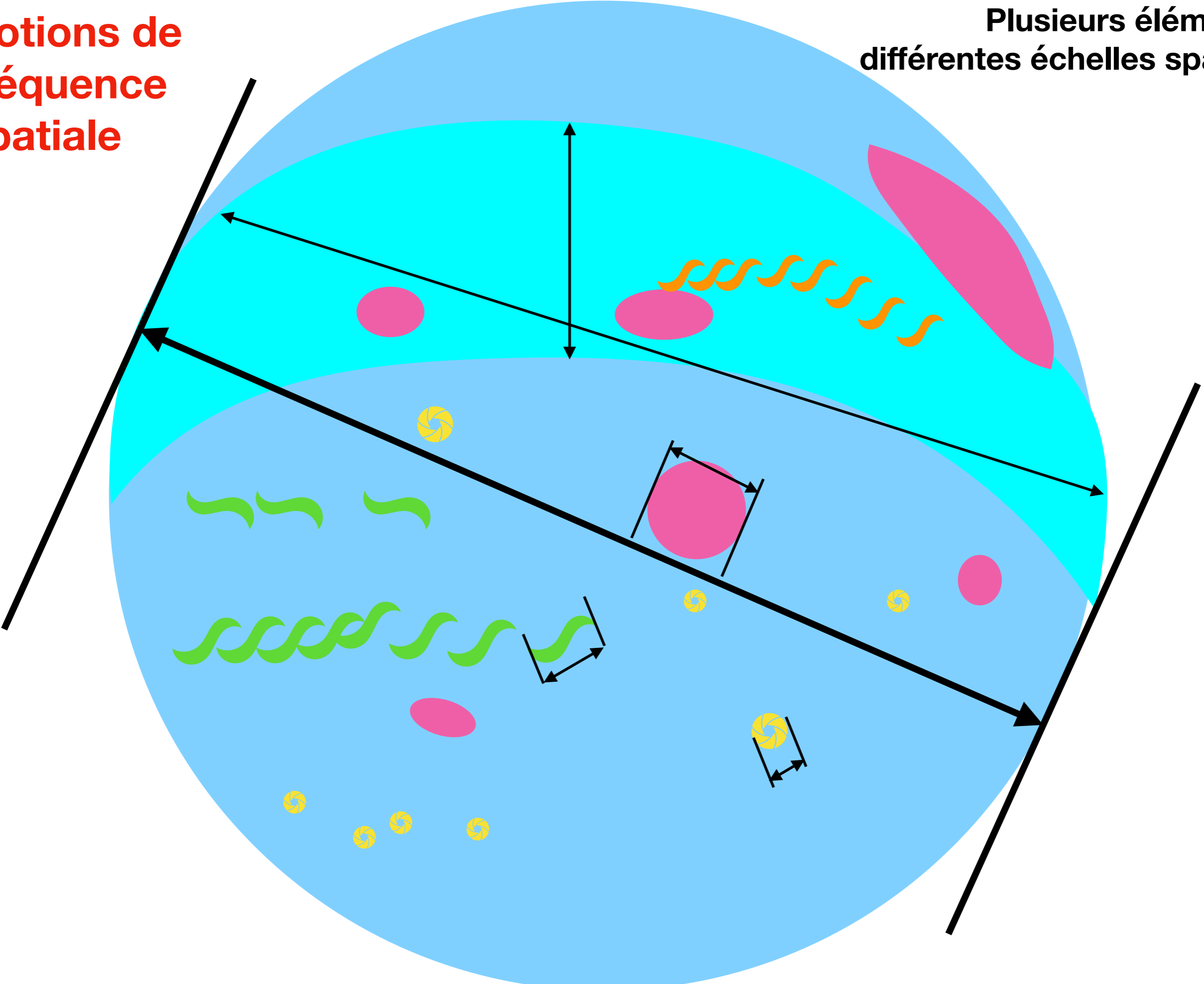
NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS  
Processing: Kevin M. Gill

# Notions de fréquence spatiale



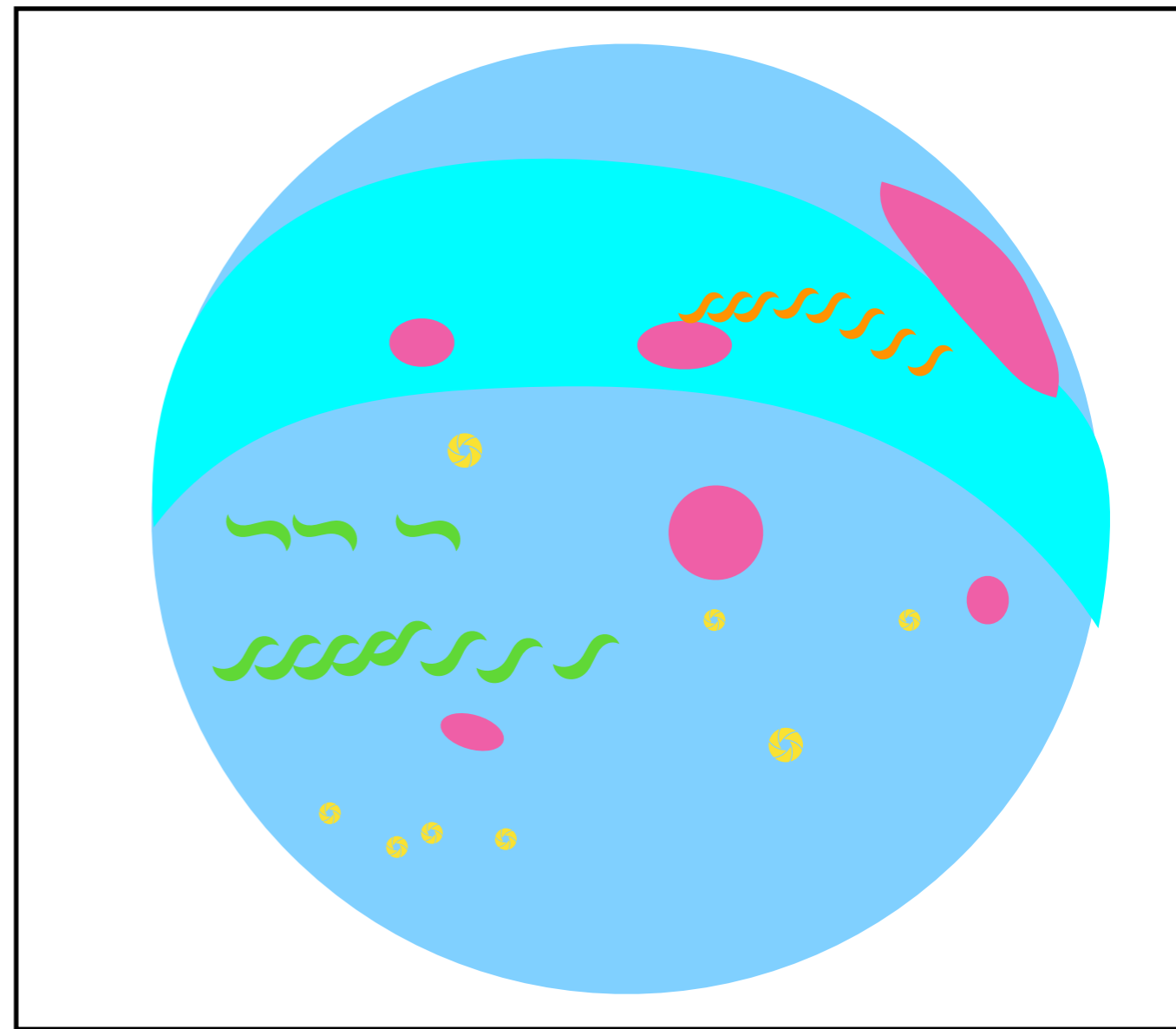
**Notions de fréquence spatiale**

**Plusieurs éléments à différentes échelles spatiales**

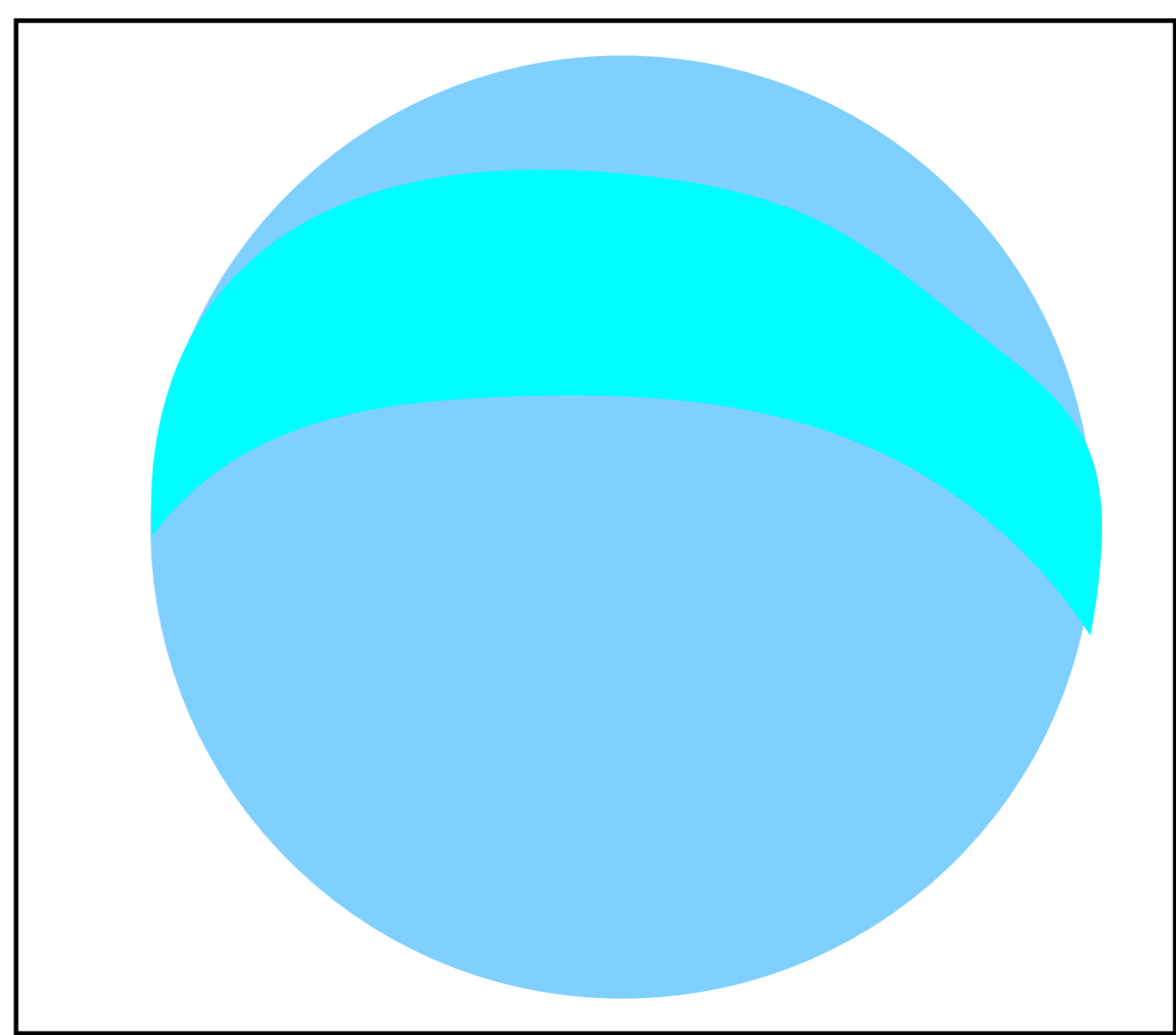




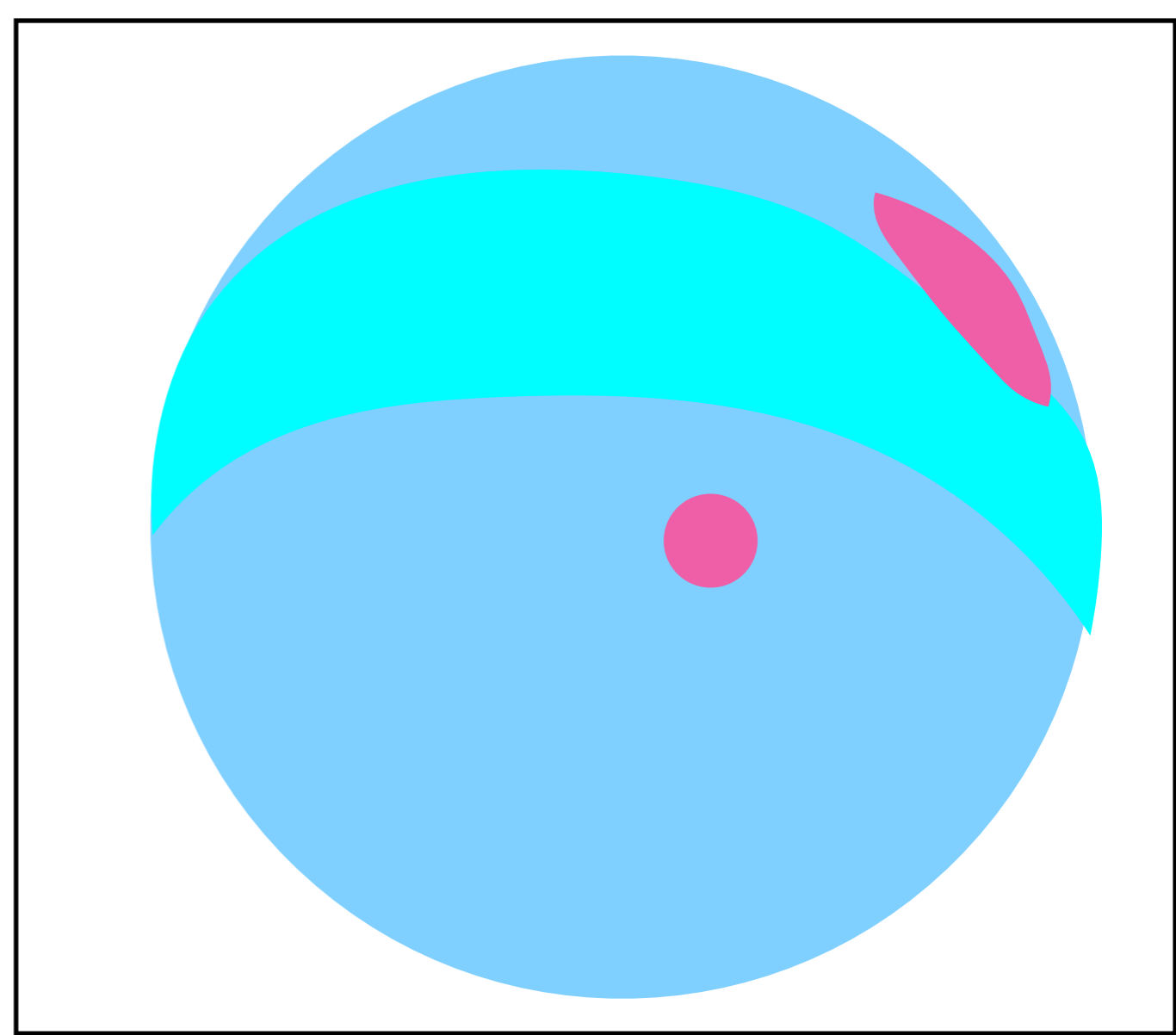
# Mesure par interférométrie



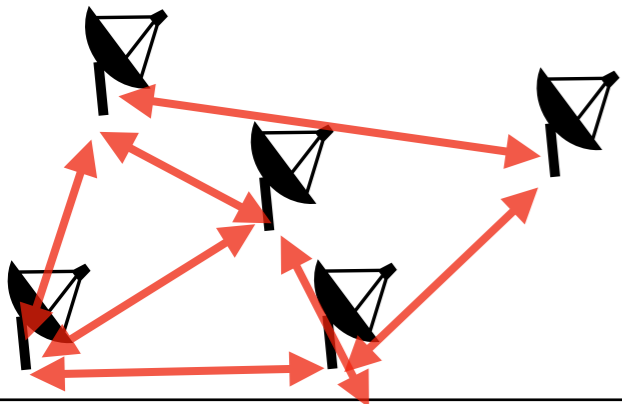
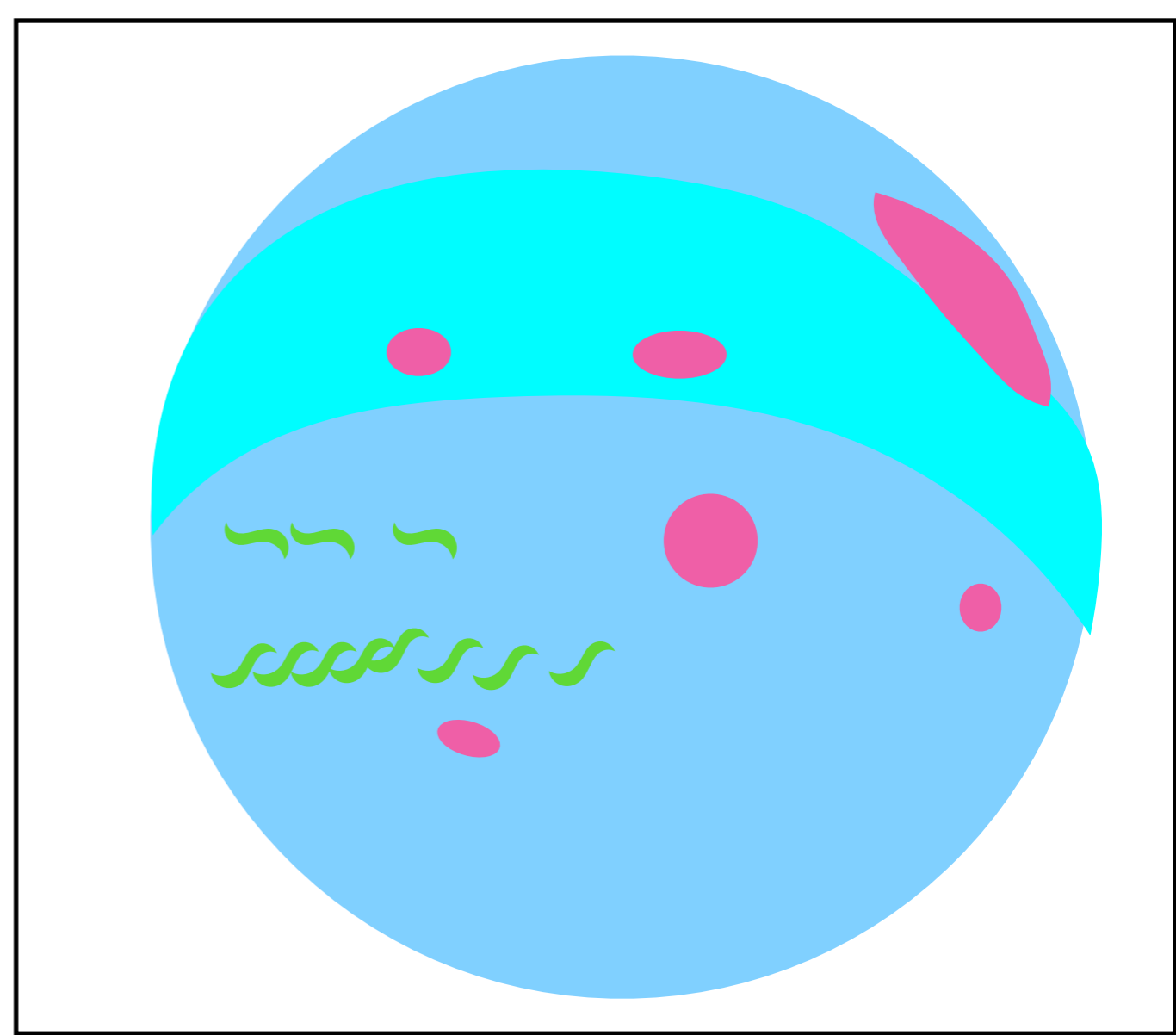
# Mesure par interférométrie



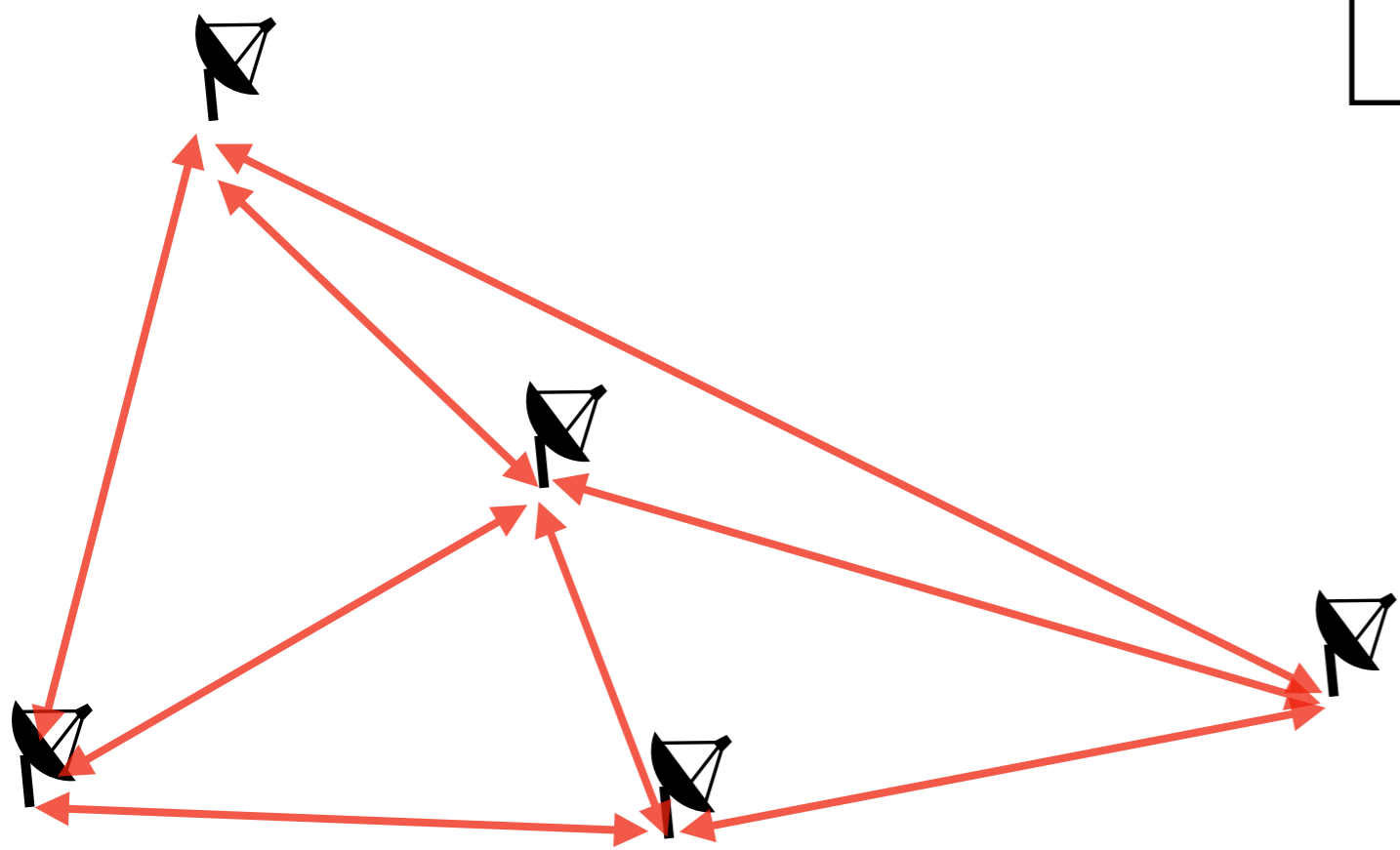
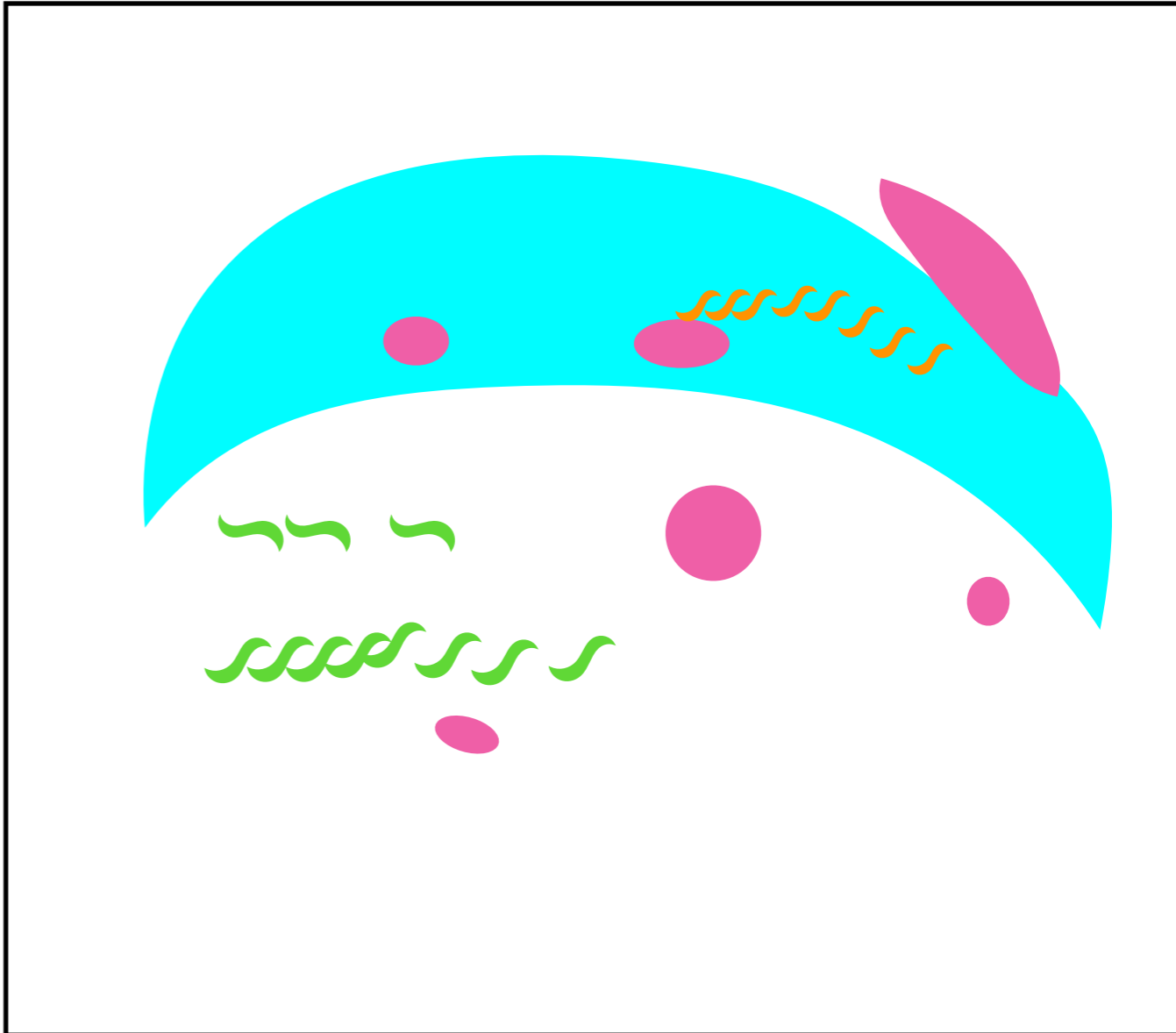
# Mesure par interférométrie



# Mesure par interférométrie

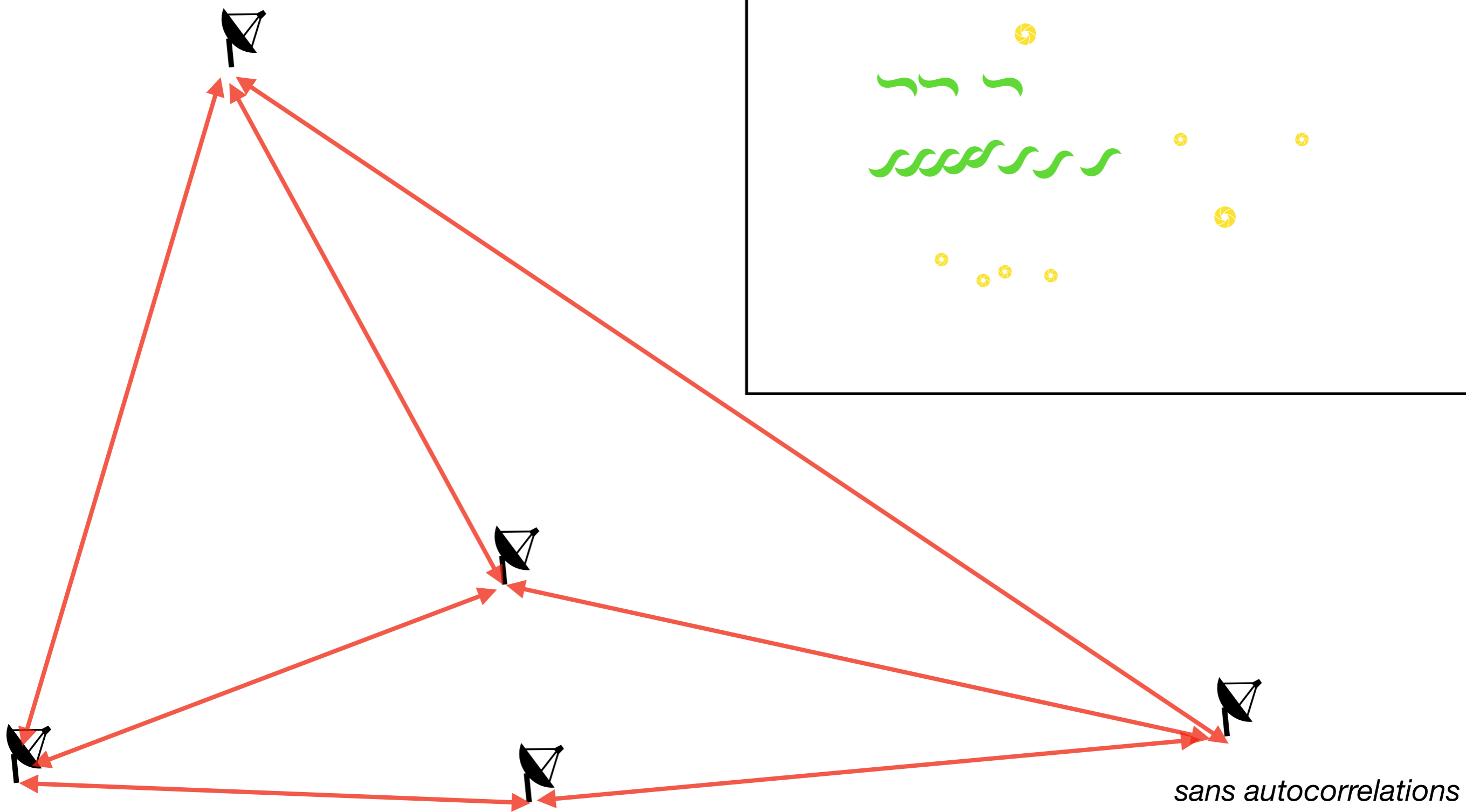


# Mesure par interférométrie



*sans autocorrelations*

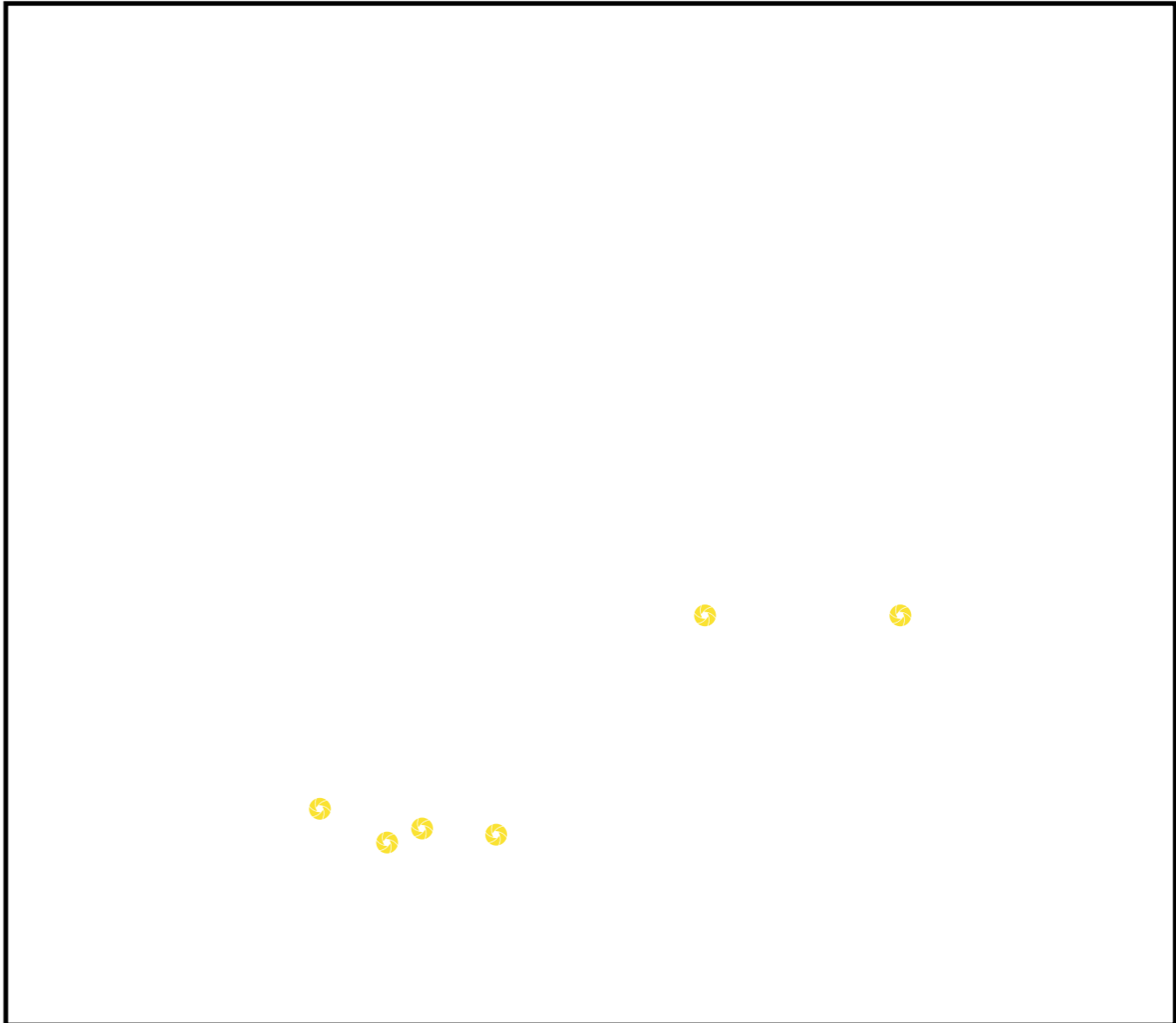
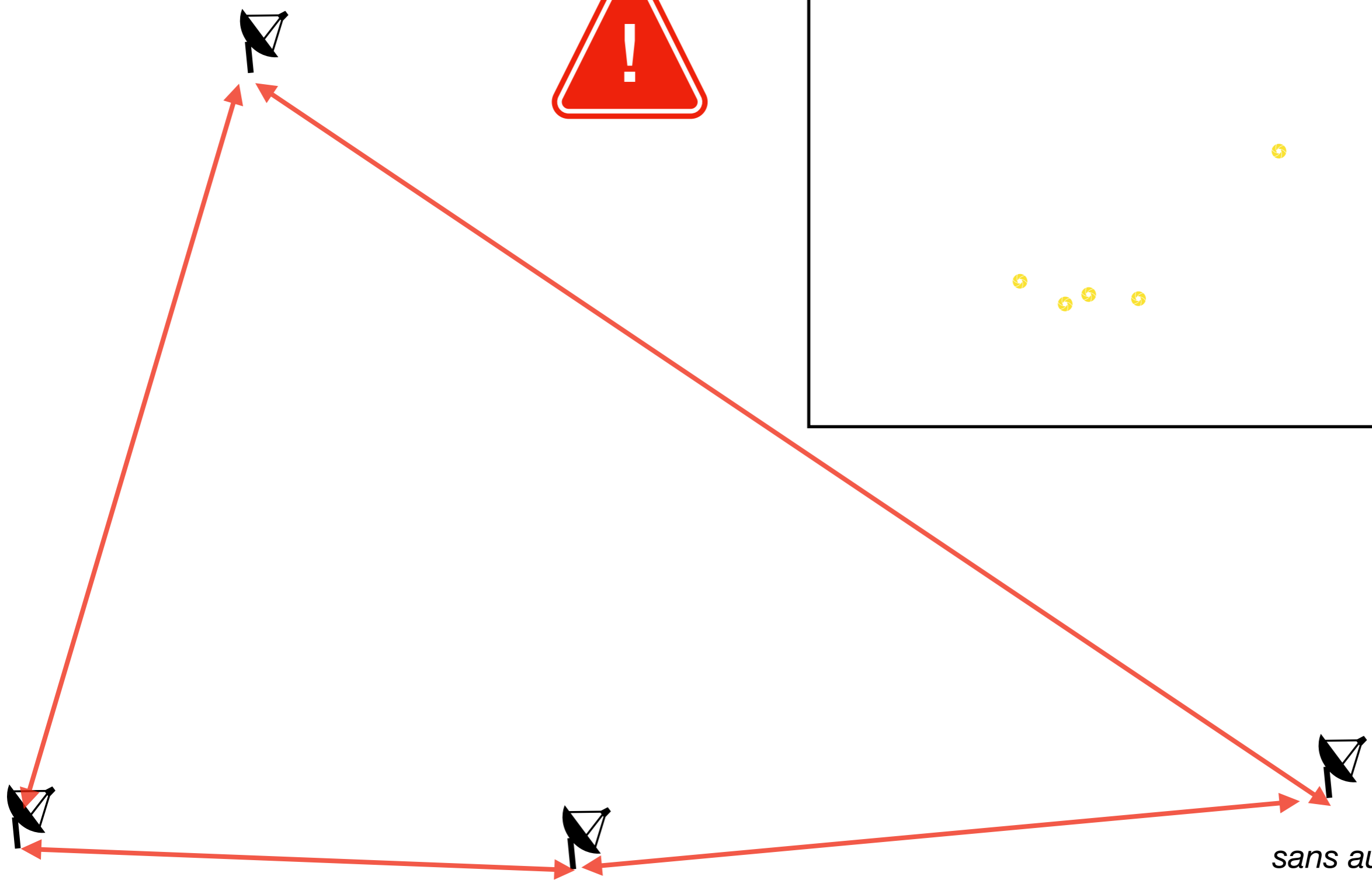
# Mesure par interférométrie



*sans autocorrelations*

# Mesure par interférométrie

**VLBI** Very Long  
Baseline  
Interferometry



*sans autocorrelations*

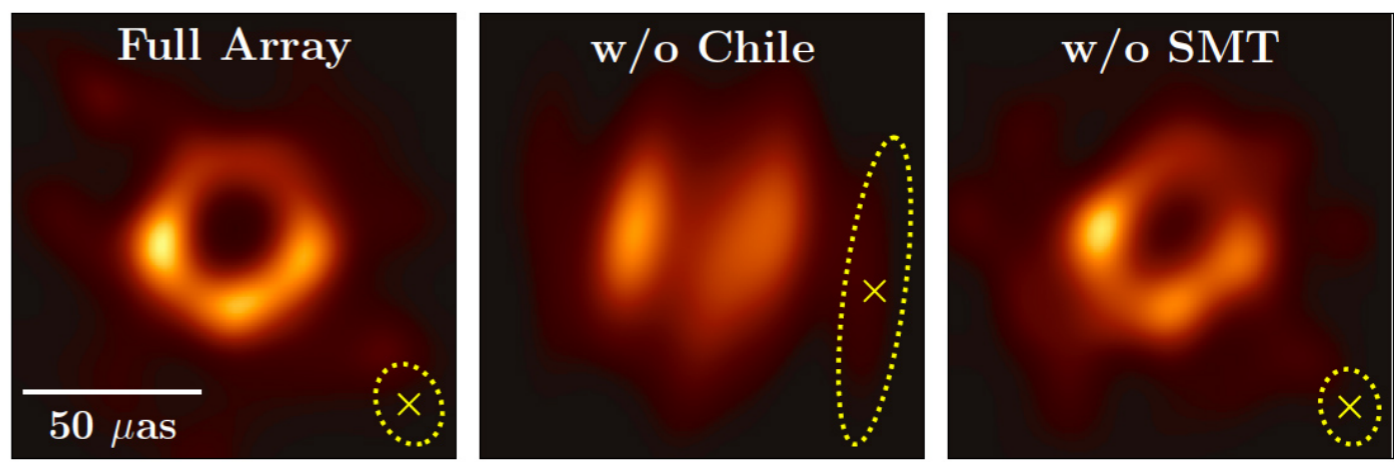
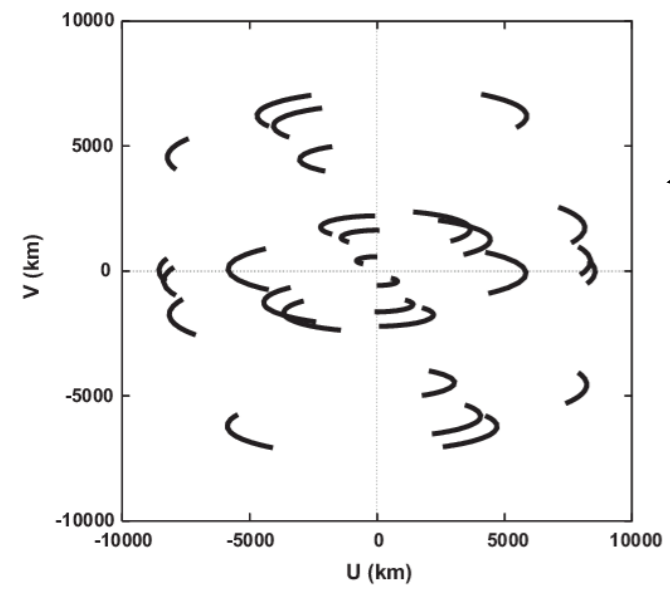
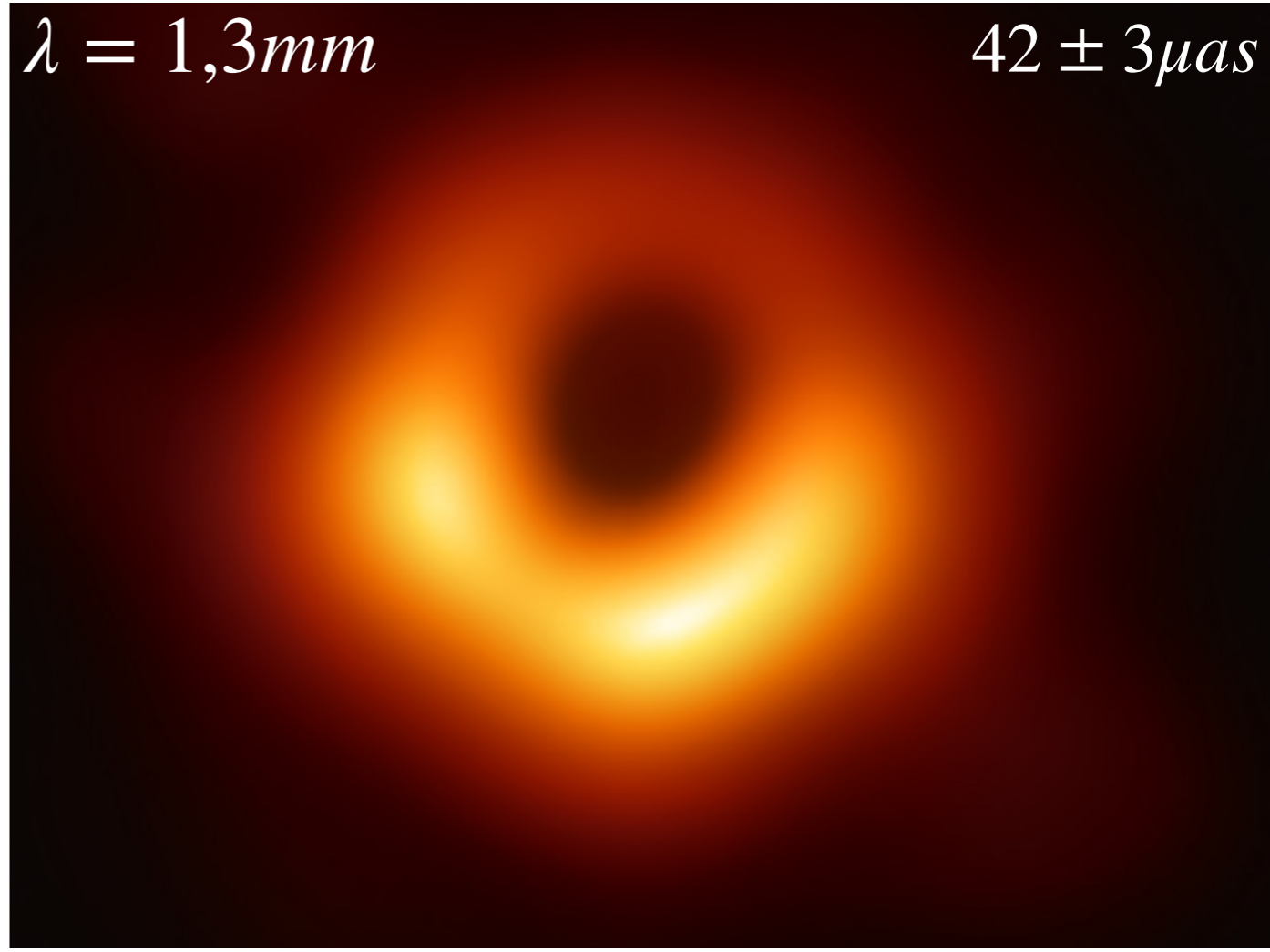
# Mesure par interférométrie

## EHT

M87\*

$\lambda = 1,3mm$

$42 \pm 3 \mu as$



**Il y a un lien fort entre la couverture (u,v) et l'aspect de l'image (via la PSF)**

The Event Horizon Telescope Collaboration *et al* 2019 *ApJL* **875** L1

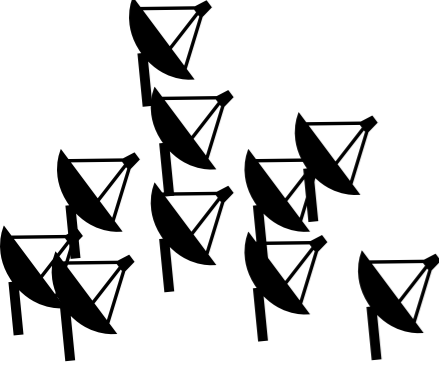
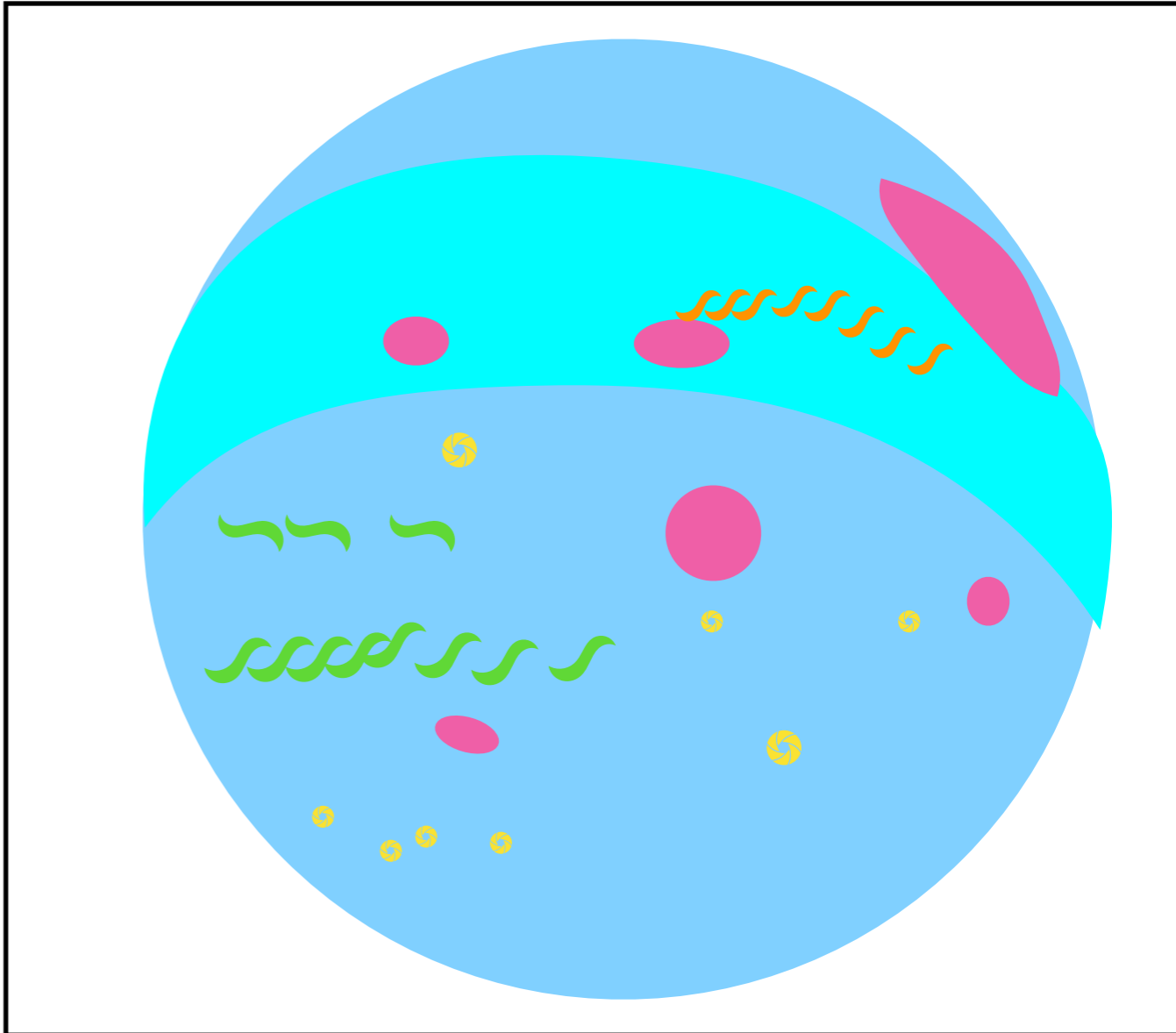


# Mesure par interférométrie



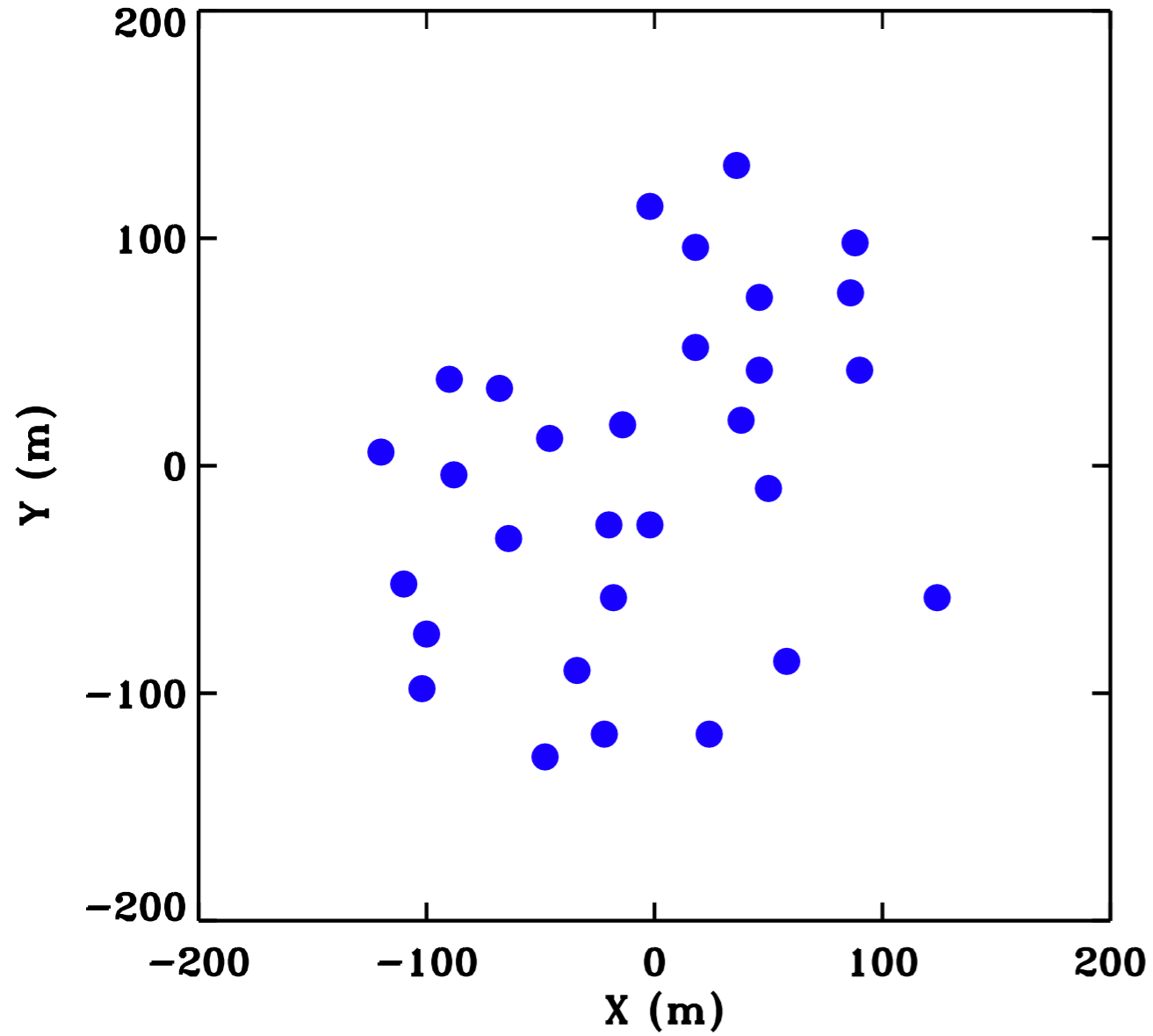
Interféromètre avec une bonne **diversité** de lignes de base

- Coeur dense
- Lignes de bases intermédiaires
- Longue lignes de bases

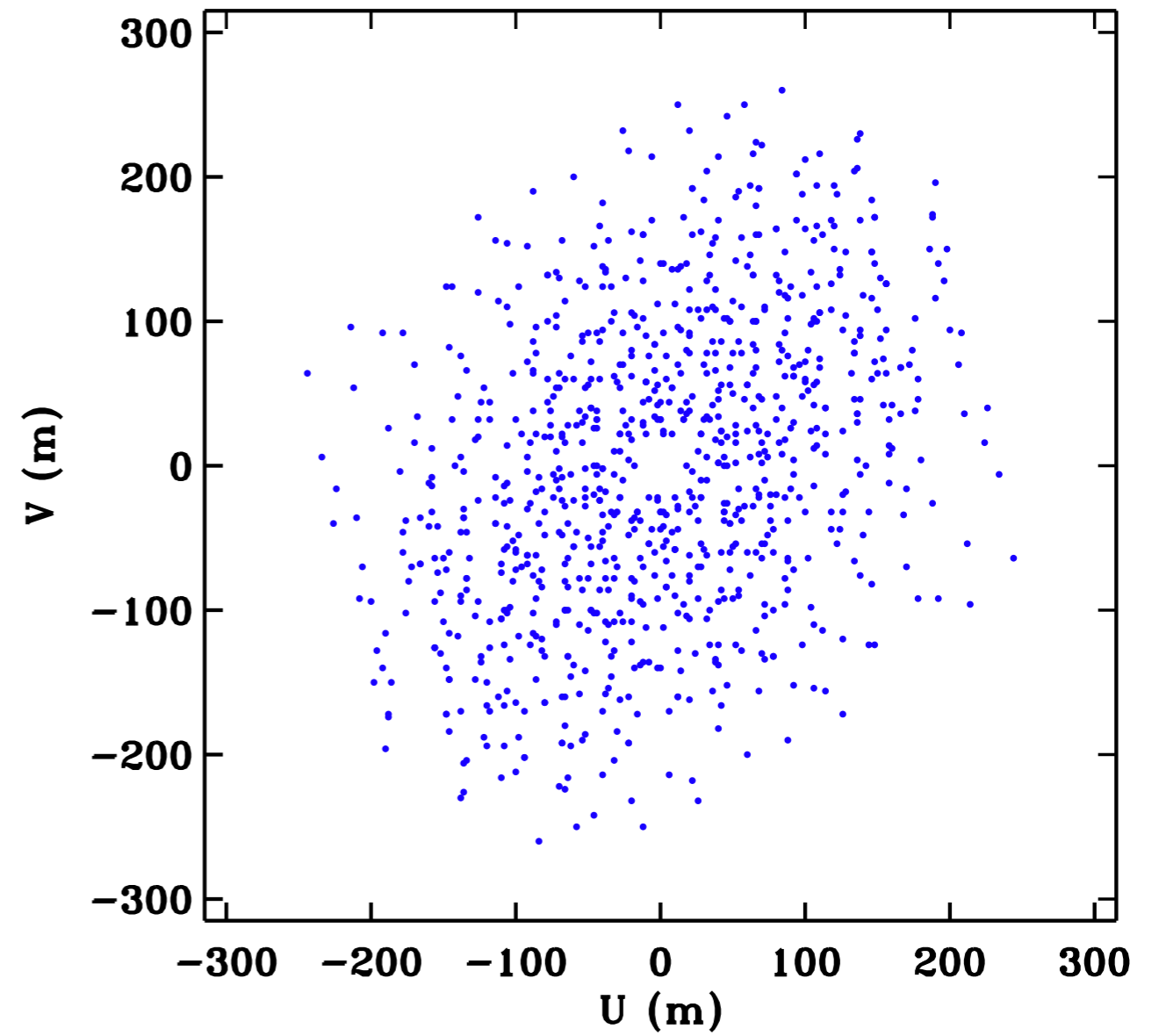


# Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes

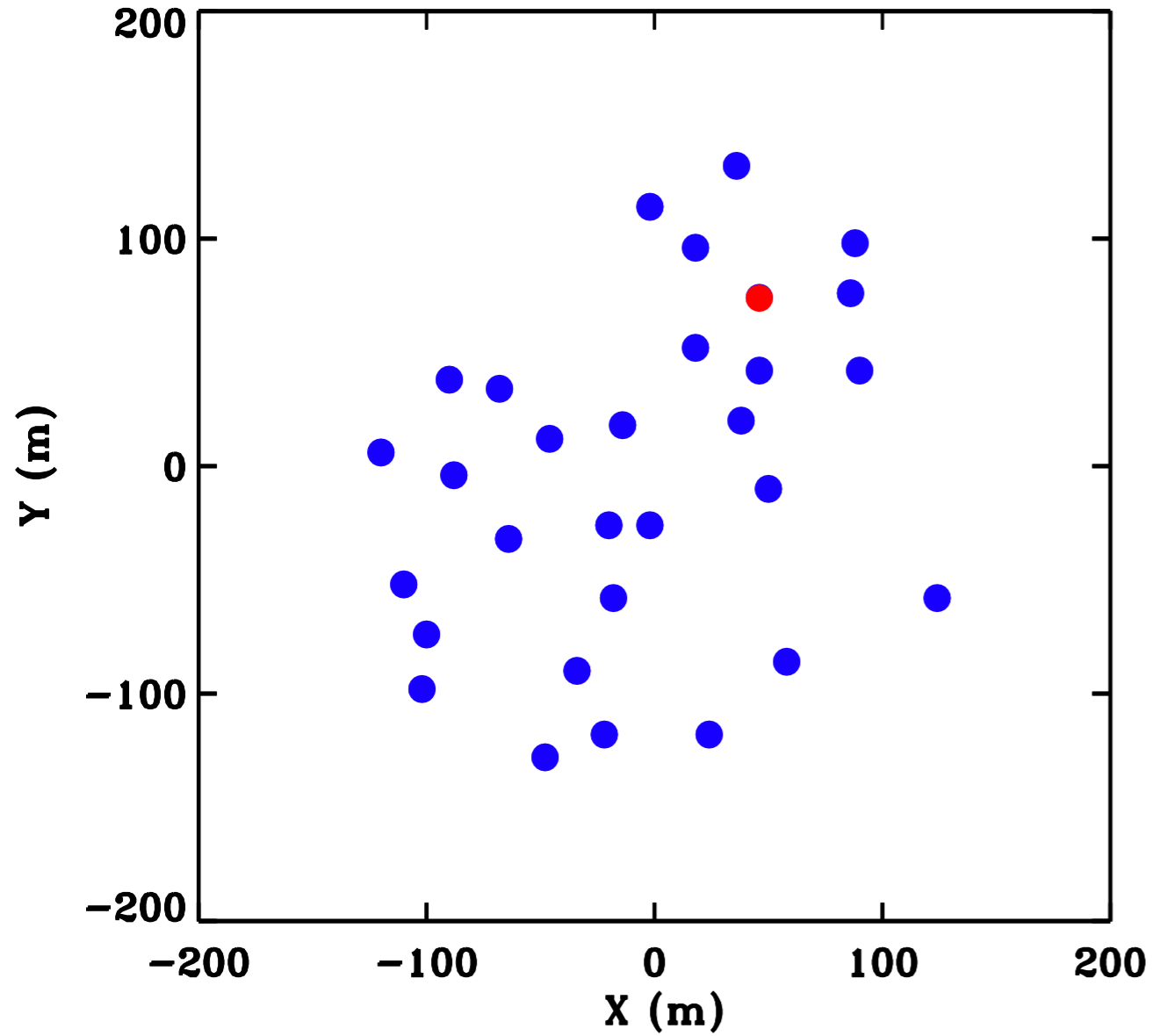


Couverture uv instantanée

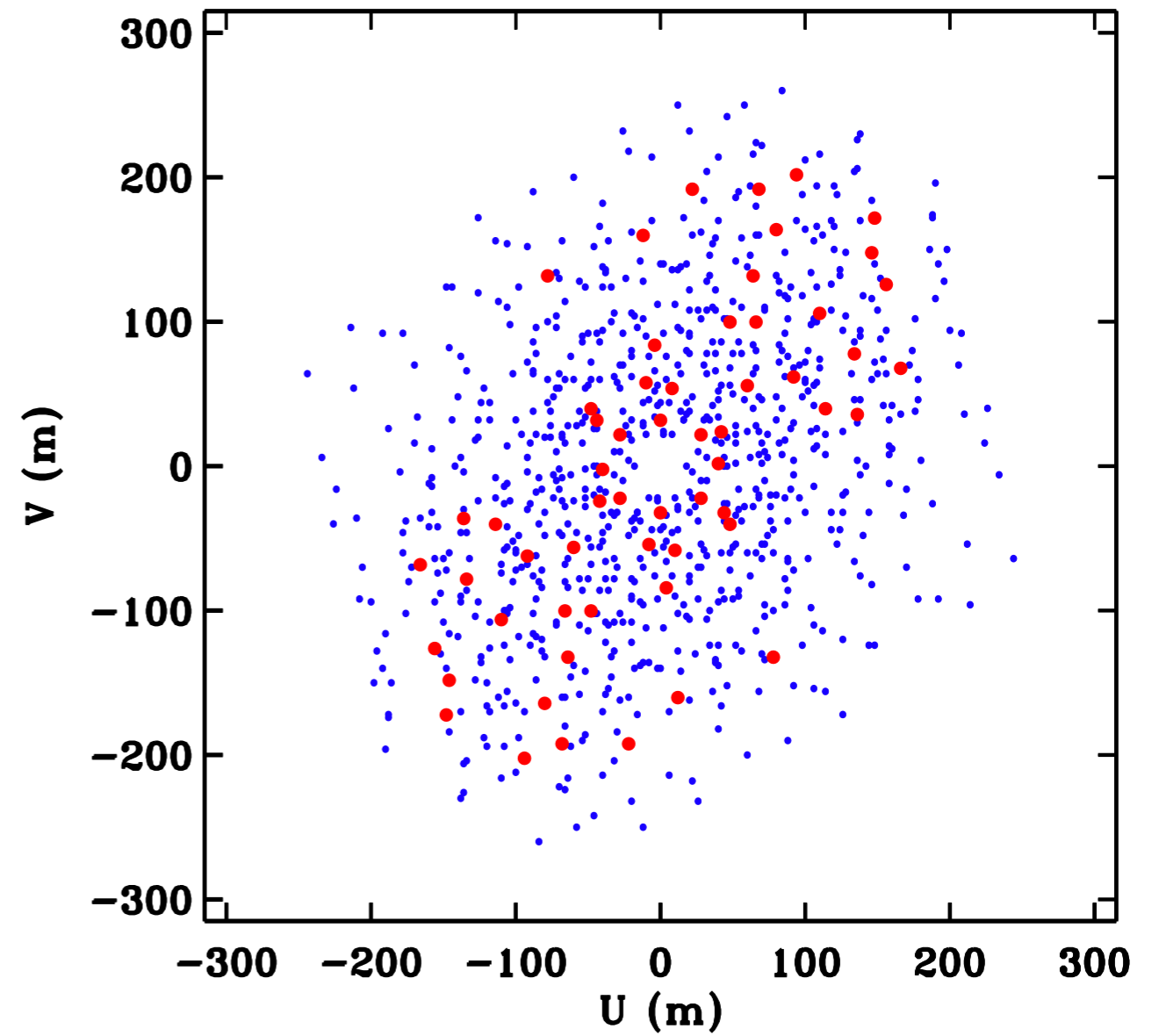


# Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes



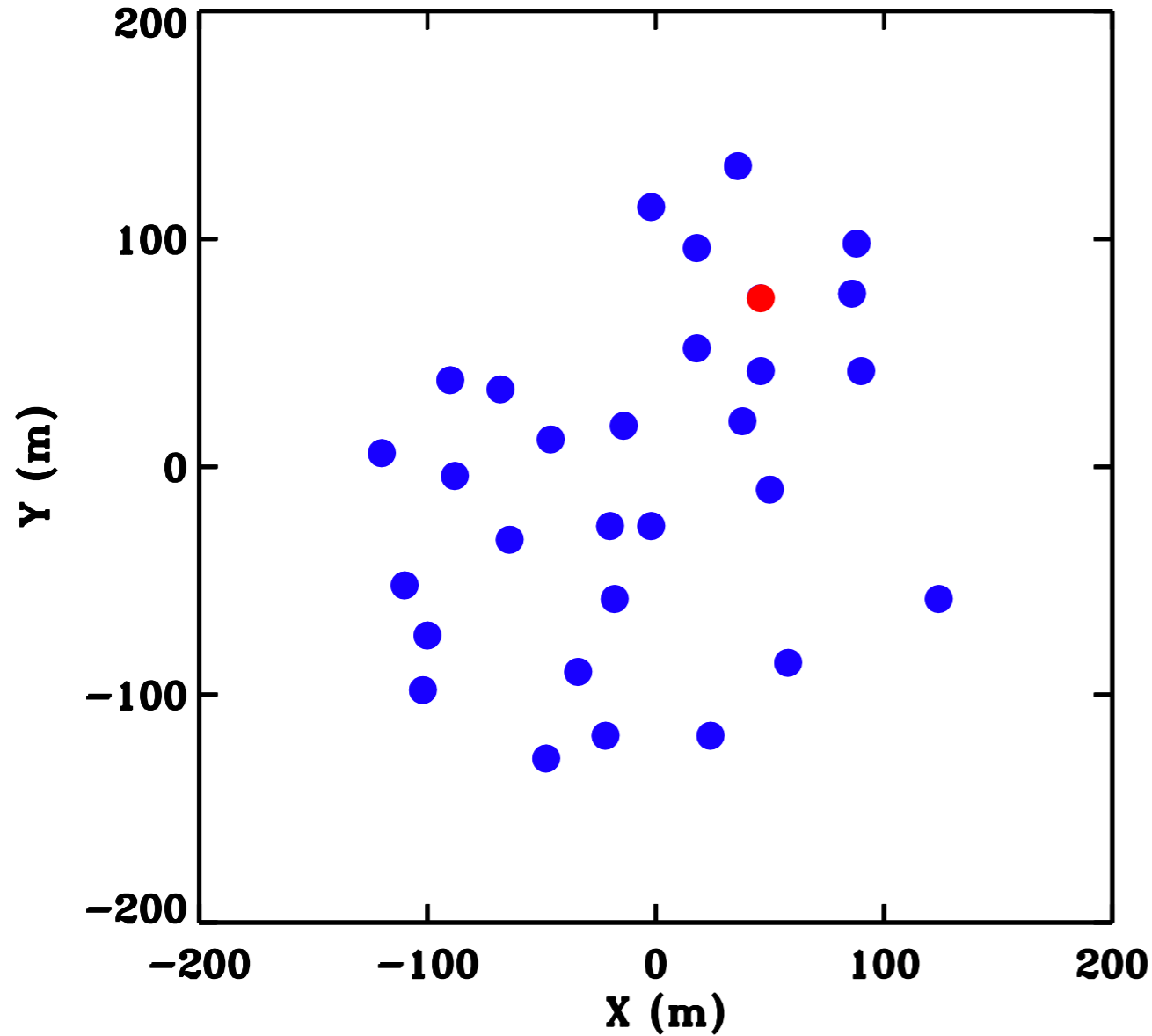
Couverture uv instantanée



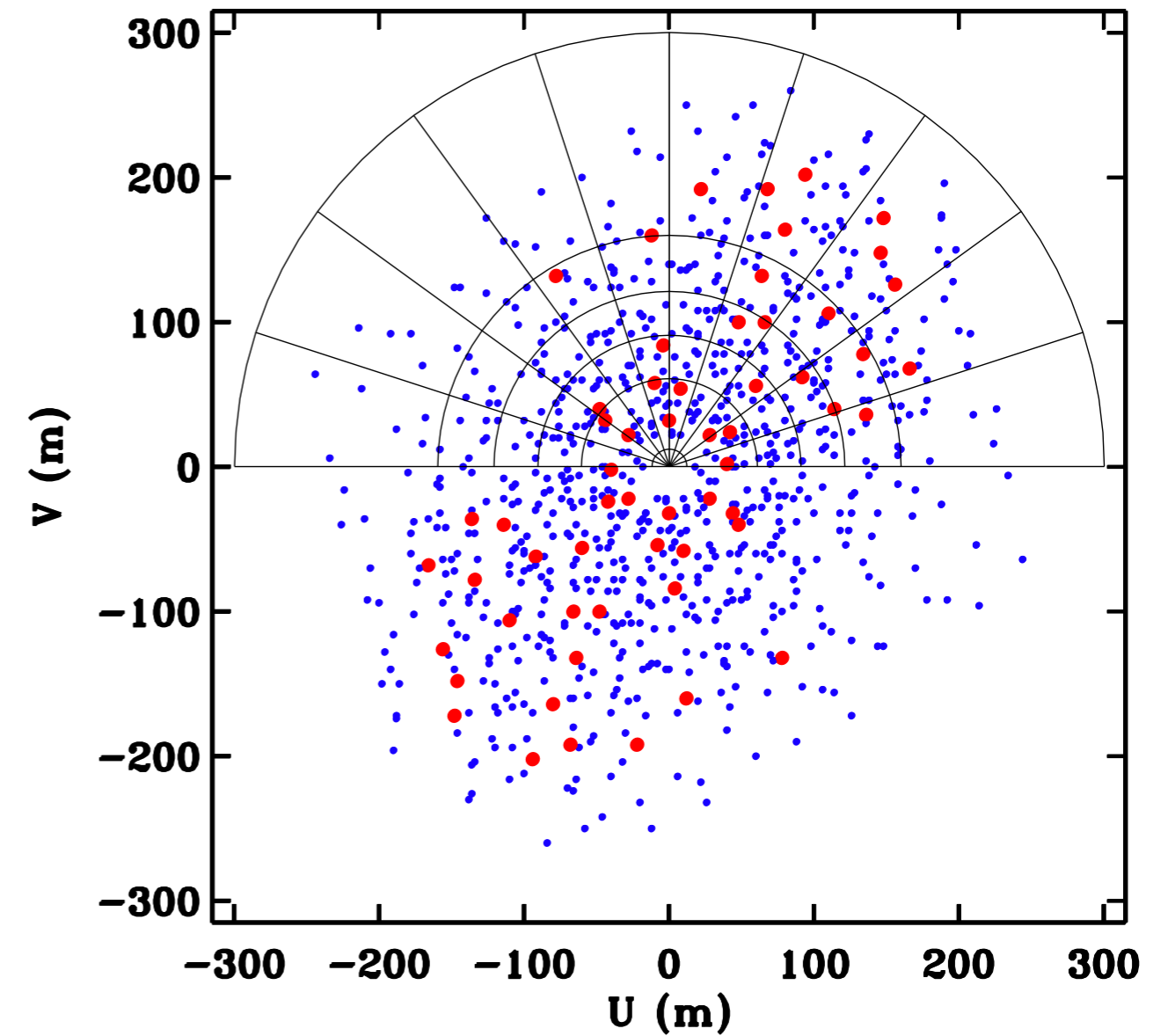
• visibilities involving the red antenna.

# Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes



Couverture uv instantanée

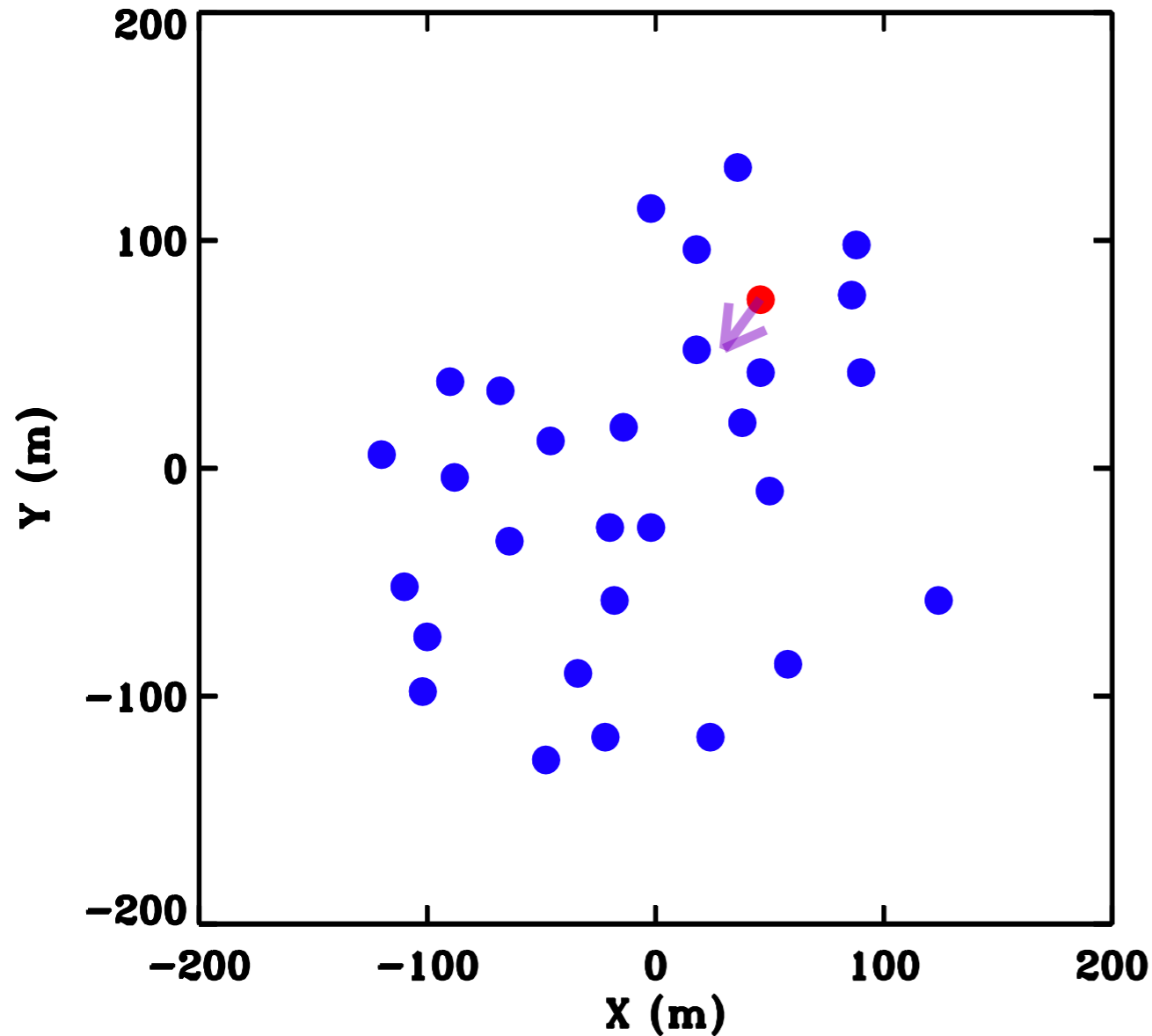


- visibilities involving the red antenna.
- adapted grid to compute local density of a gaussian distribution.

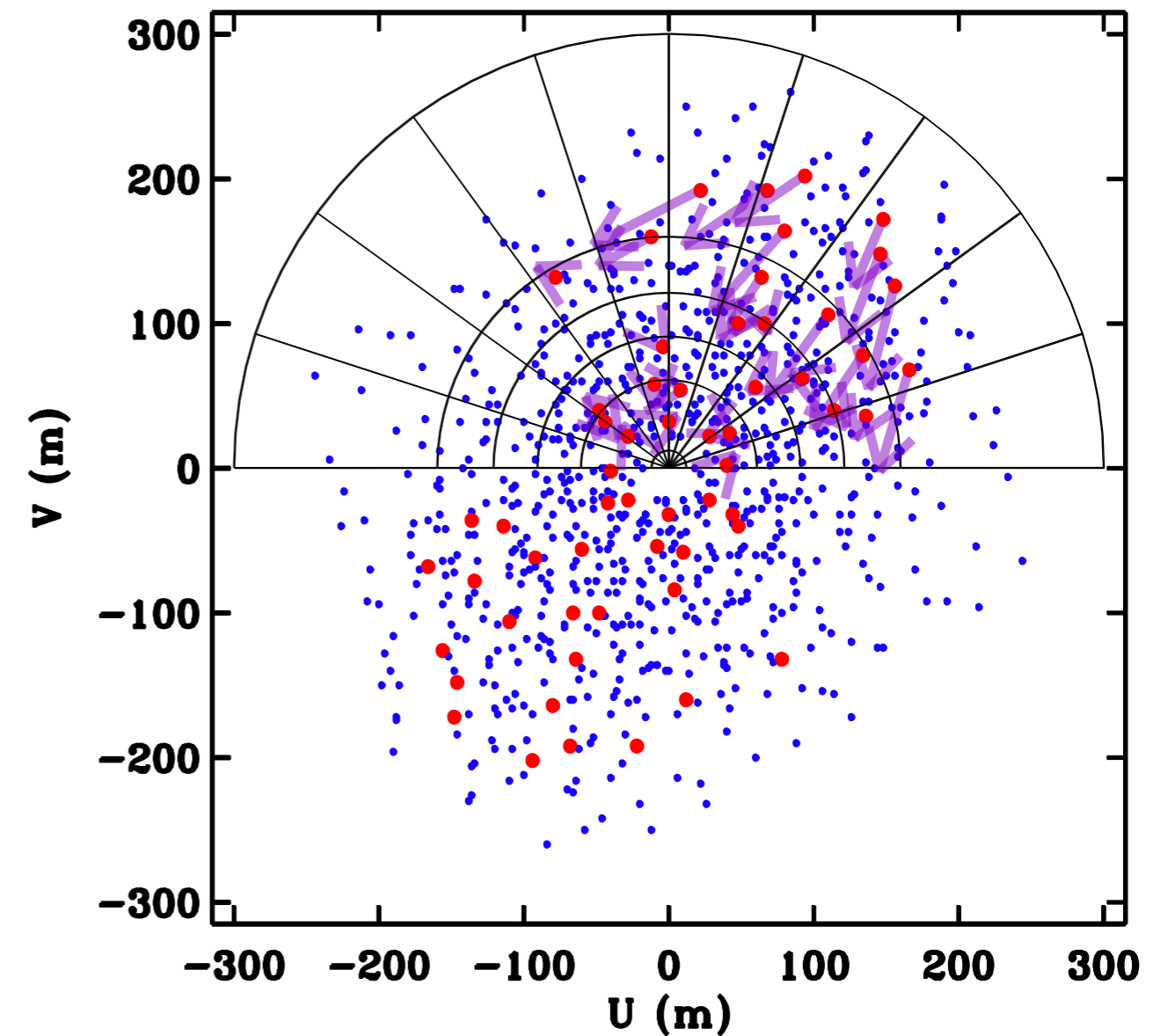
Densité (u,v) cible : distribution gaussienne radiale

# Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes



Couverture uv instantanée



→ **displacement of the antenna corresponding to the sum of the forces undergone by its  $n-1$  visibilities.**

• **visibilities involving the red antenna.**  
→ **pressure forces.**  
— **adapted grid to compute local density of a gaussian distribution.**

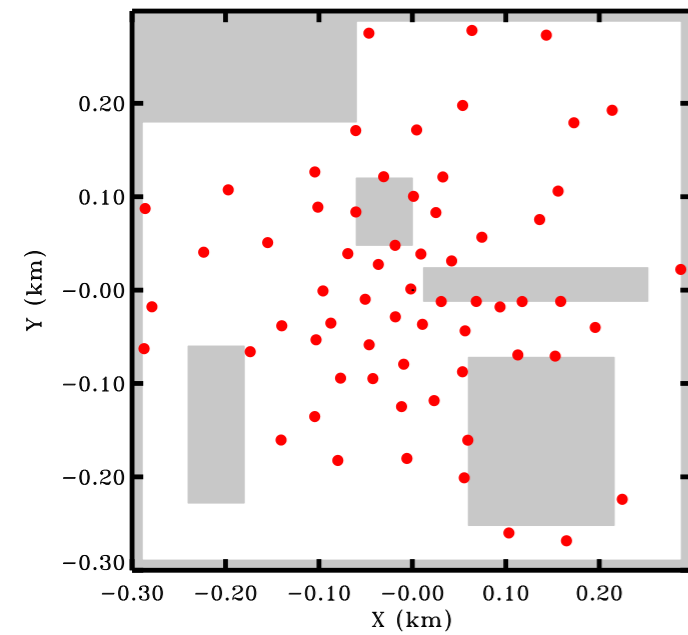
**Densité (u,v) cible : distribution gaussienne radiale**

**Antennes ~ Particules d'un gaz subissant la résultante de forces de pression**

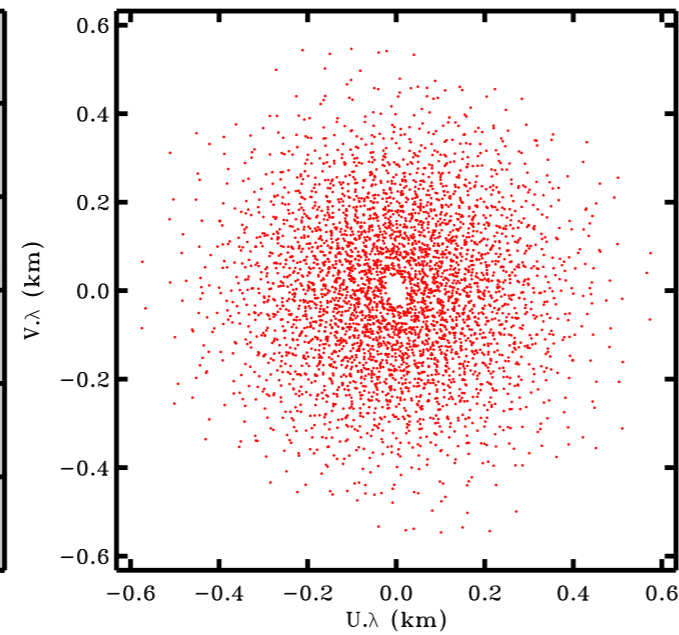
**Boone, 2001, 2002**

# Optimisation de la couverture ?

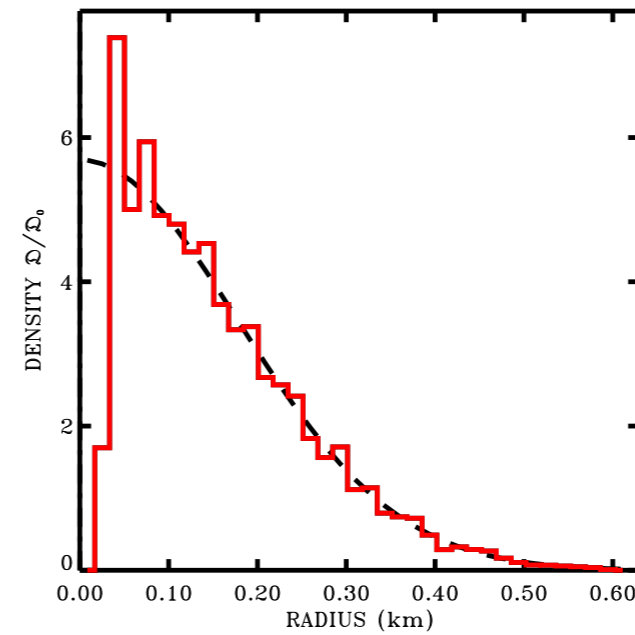
Position des antennes  
et obstacles



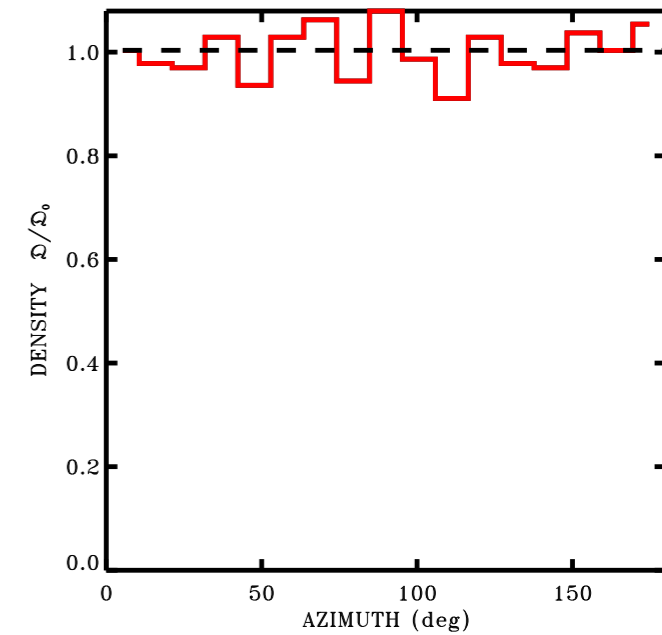
Couverture (u,v)  
Instantanée



Profil radial



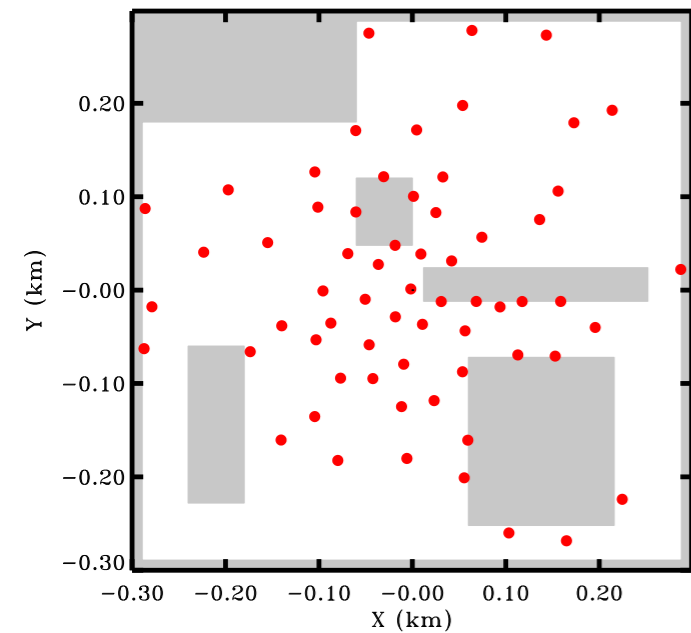
Profil azimuthal



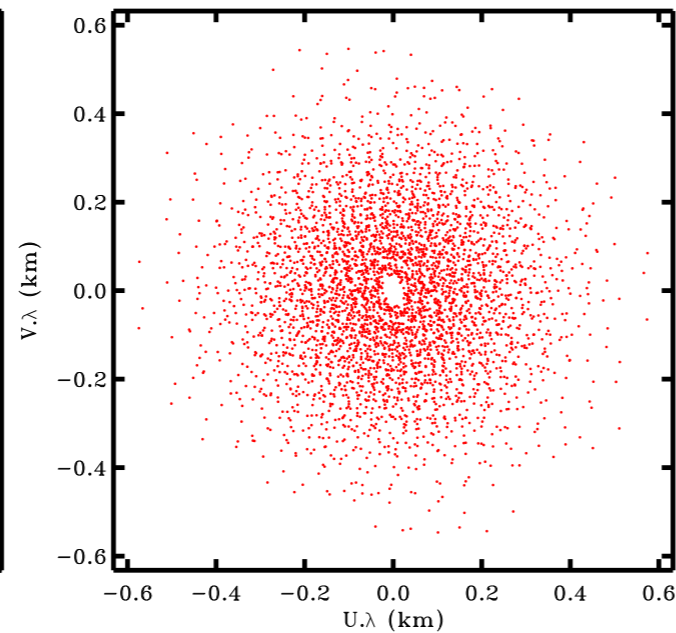
**Exemple avec contraintes de positionnement (bâtiments)**

# Optimisation de la couverture ?

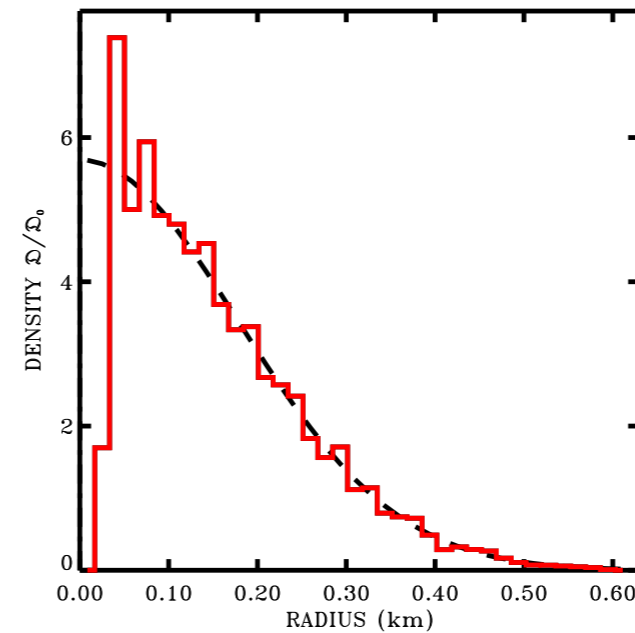
Position des antennes  
et obstacles



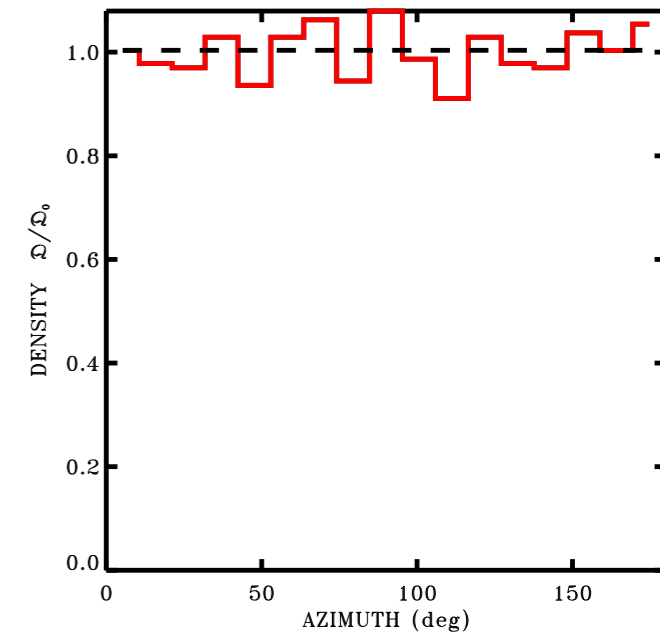
Couverture (u,v)  
Instantanée



Profil radial

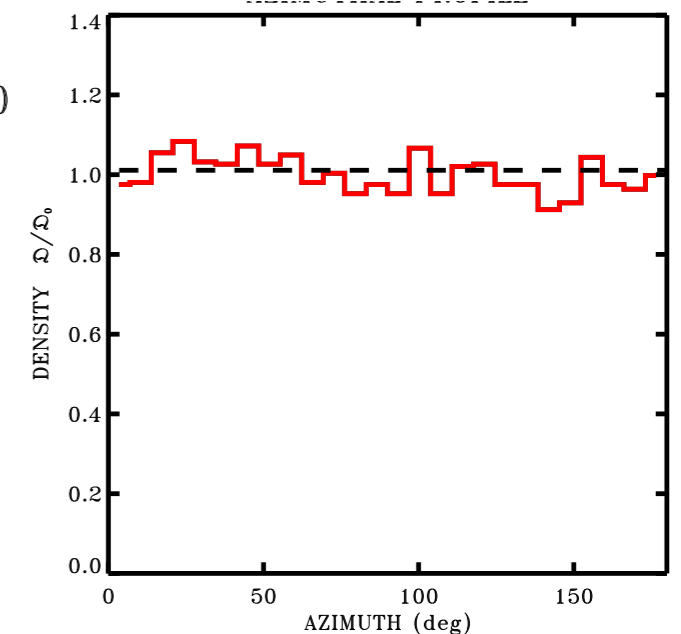
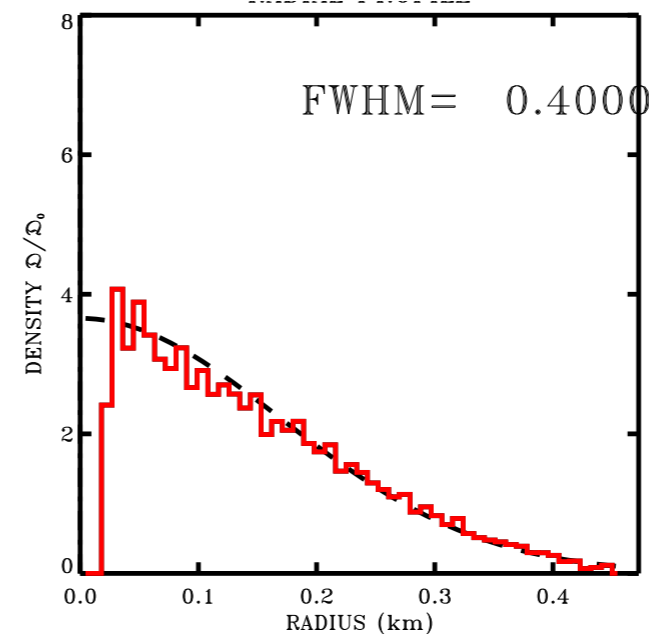
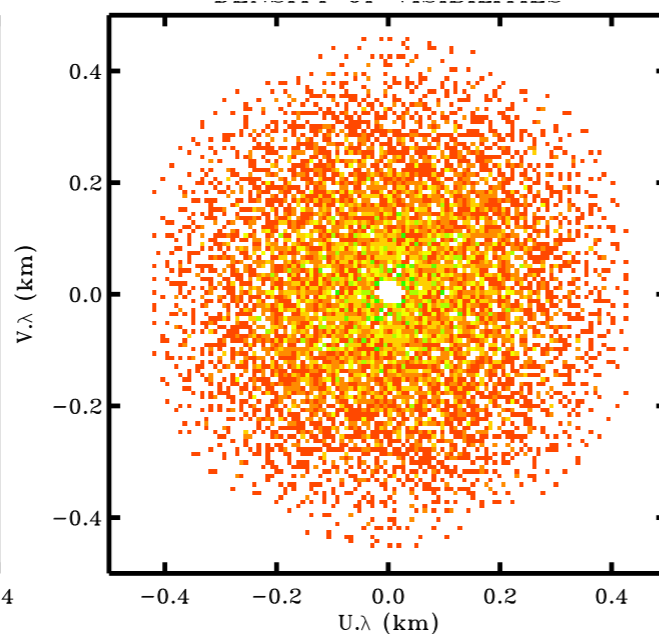
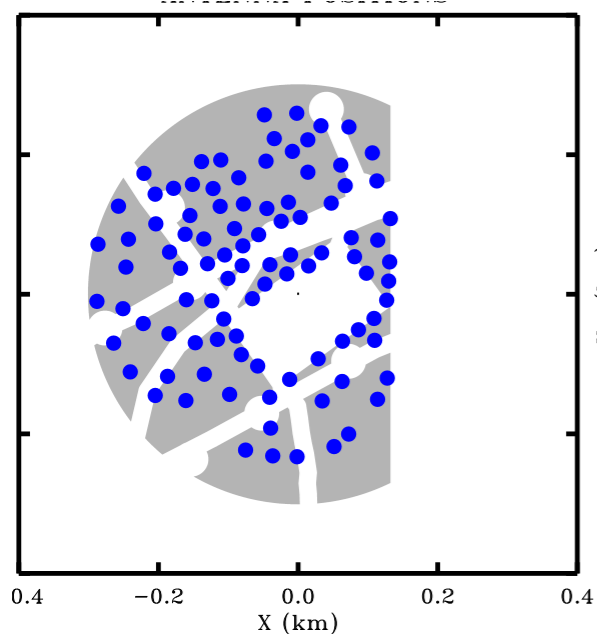


Profil azimuthal

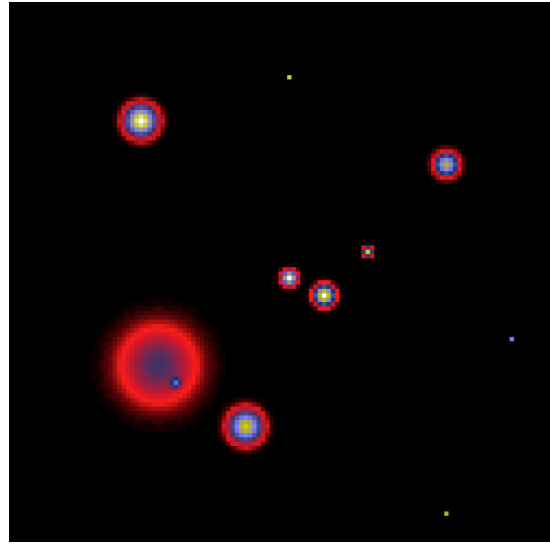


**Exemple avec contraintes de positionnement (bâtiments)**

## Solution NenuFAR



# Mesure par interférométrie: en résumé



**Brillance**

En 1ère approximation, un interféromètre échantillonne la TF du ciel

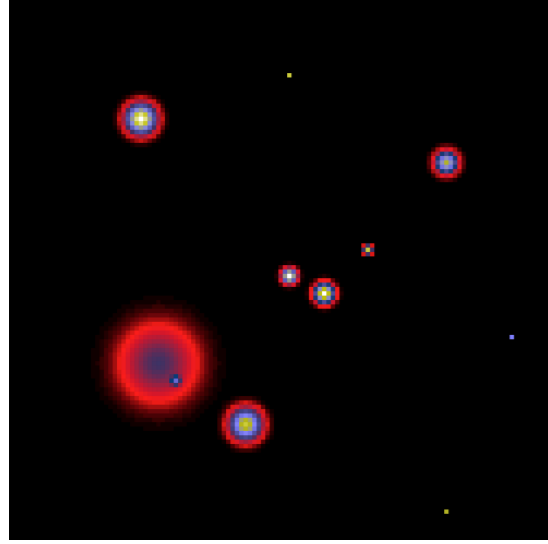




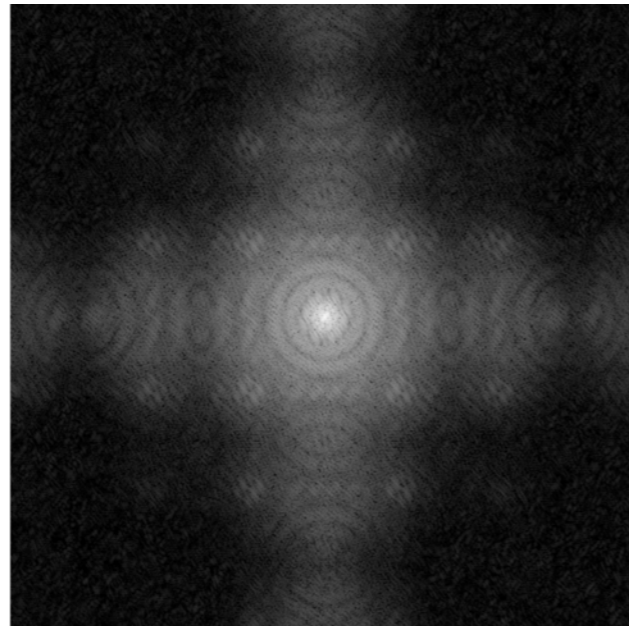
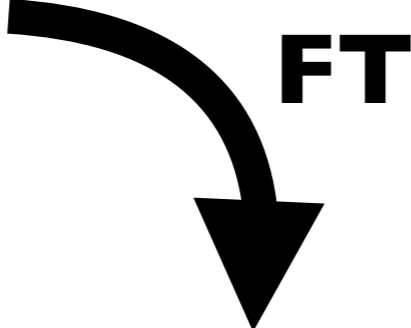
# Mesure par interférométrie: en résumé



En 1ère approximation, un interféromètre échantillonne la TF du ciel



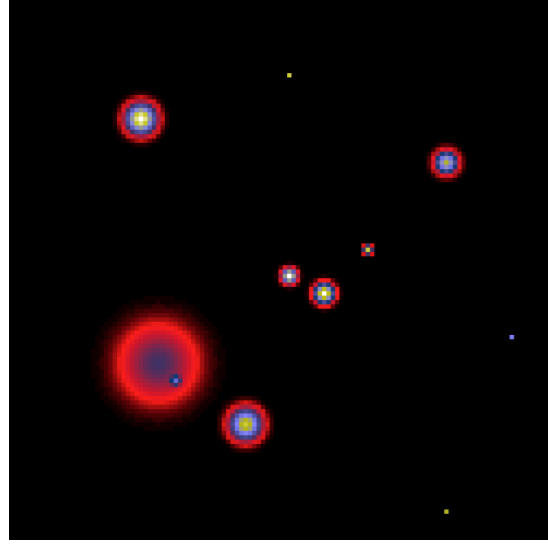
**Brillance**



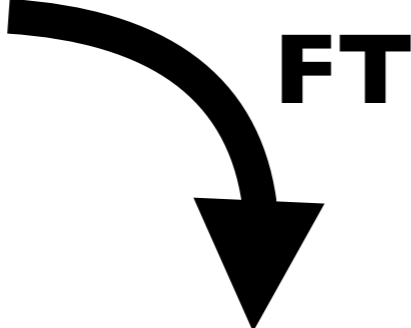
**FT(Brillance)**

*Fonction de "visibilité" continue*

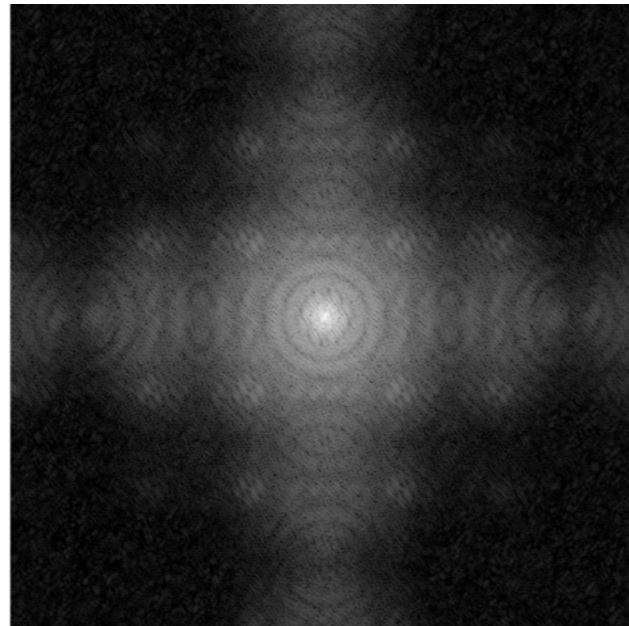
# Mesure par interférométrie: en résumé



En 1ère approximation, un interféromètre échantillonne la TF du ciel

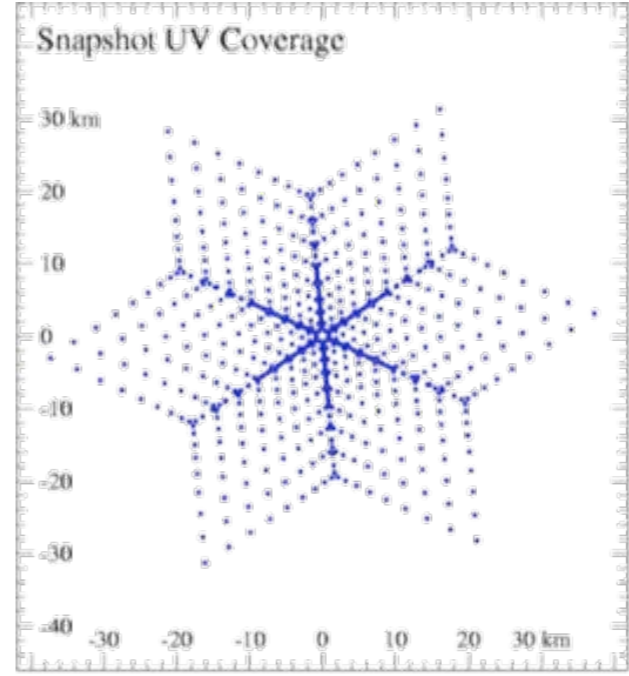
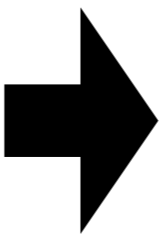


**Brillance**



**FT(Brillance)**

*Fonction de "visibilité" continue*



**Échantillonnage discret par l'interféromètre**

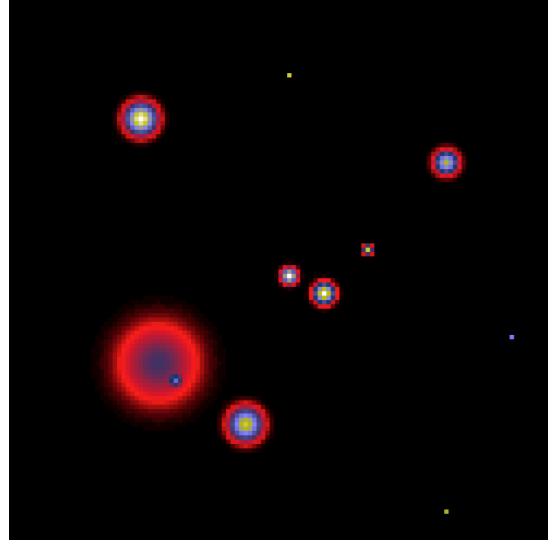
*FT<sup>-1</sup>(couverture uv) = PSF de l'interféromètre*

# Mesure par interférométrie: en résumé

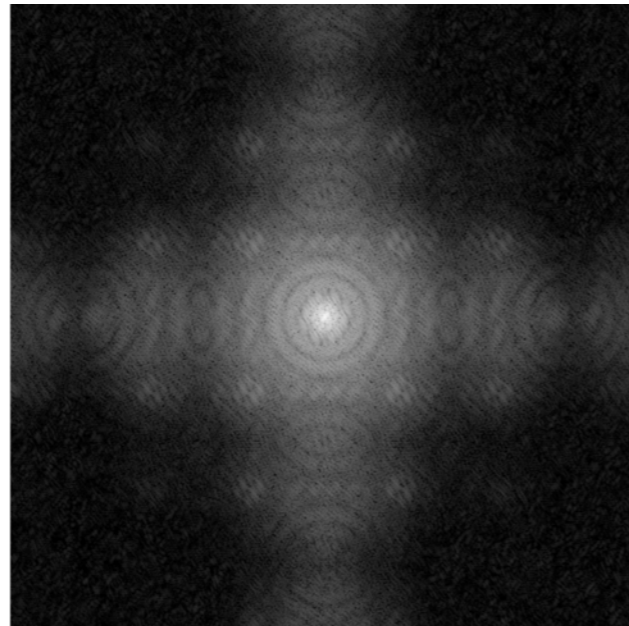
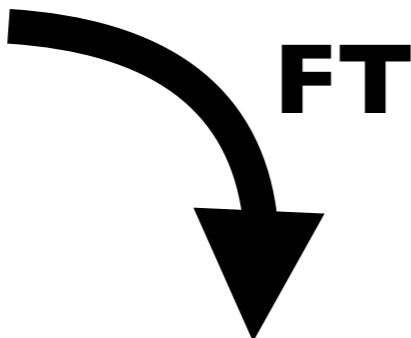


VLA

En 1ère approximation, un interféromètre échantillonne la TF du ciel

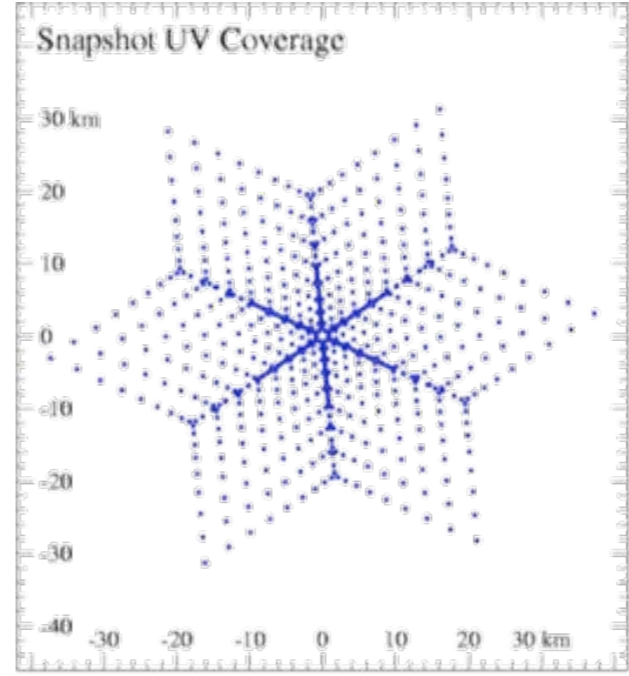
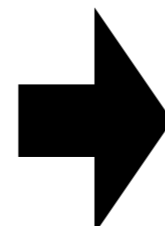


Brillance



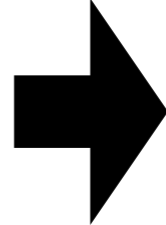
FT(Brillance)

*Fonction de "visibilité" continue*

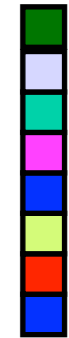


Échantillonnage discret par l'interféromètre

$FT^{-1}(\text{couverture uv}) = \text{PSF de l'interféromètre}$



**"Visibilités"**  
=  
**Composantes de Fourier**

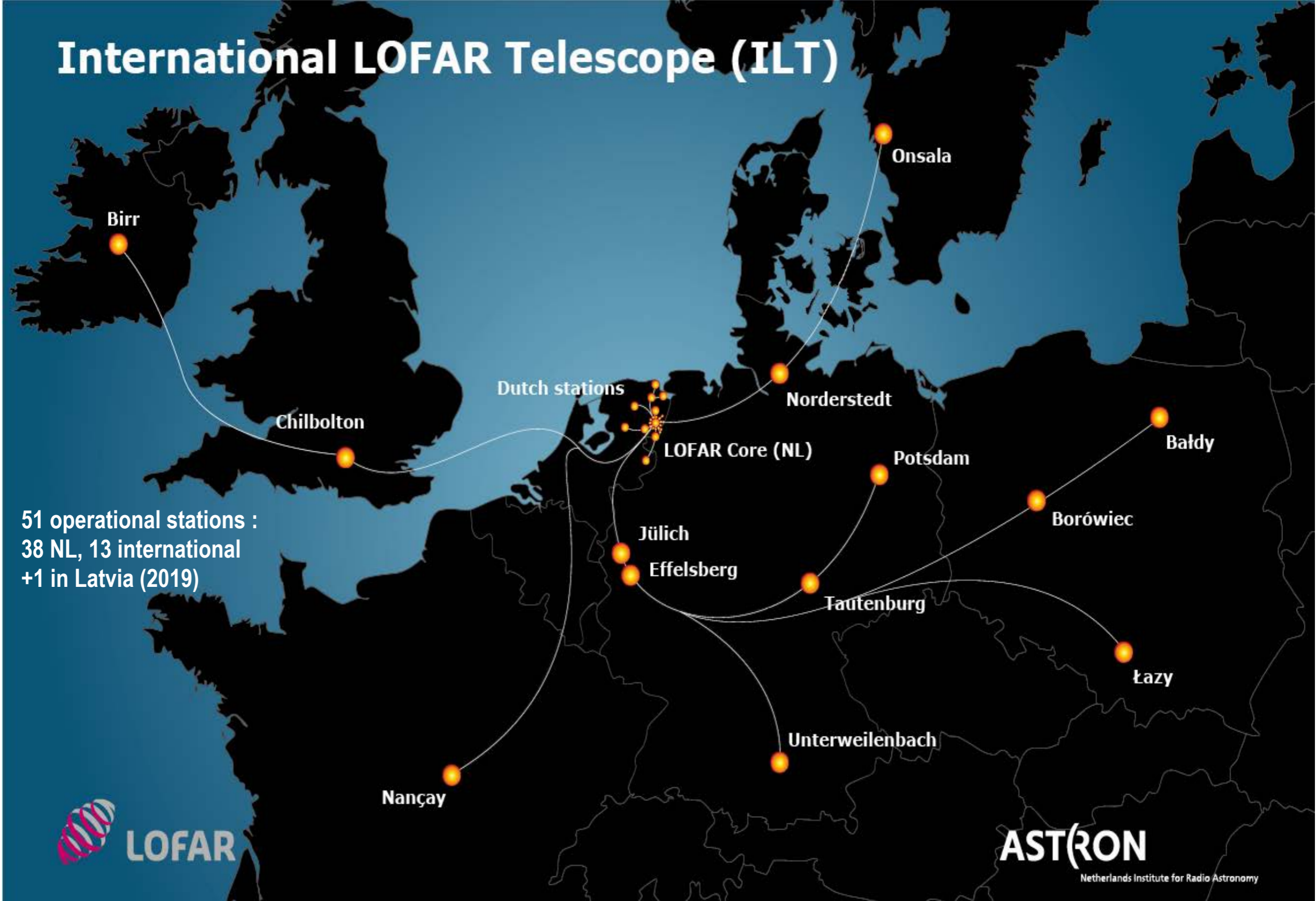


dataset

# Mesure par interférométrie: quelques instances

Radio interferomètre électronique - LOFAR

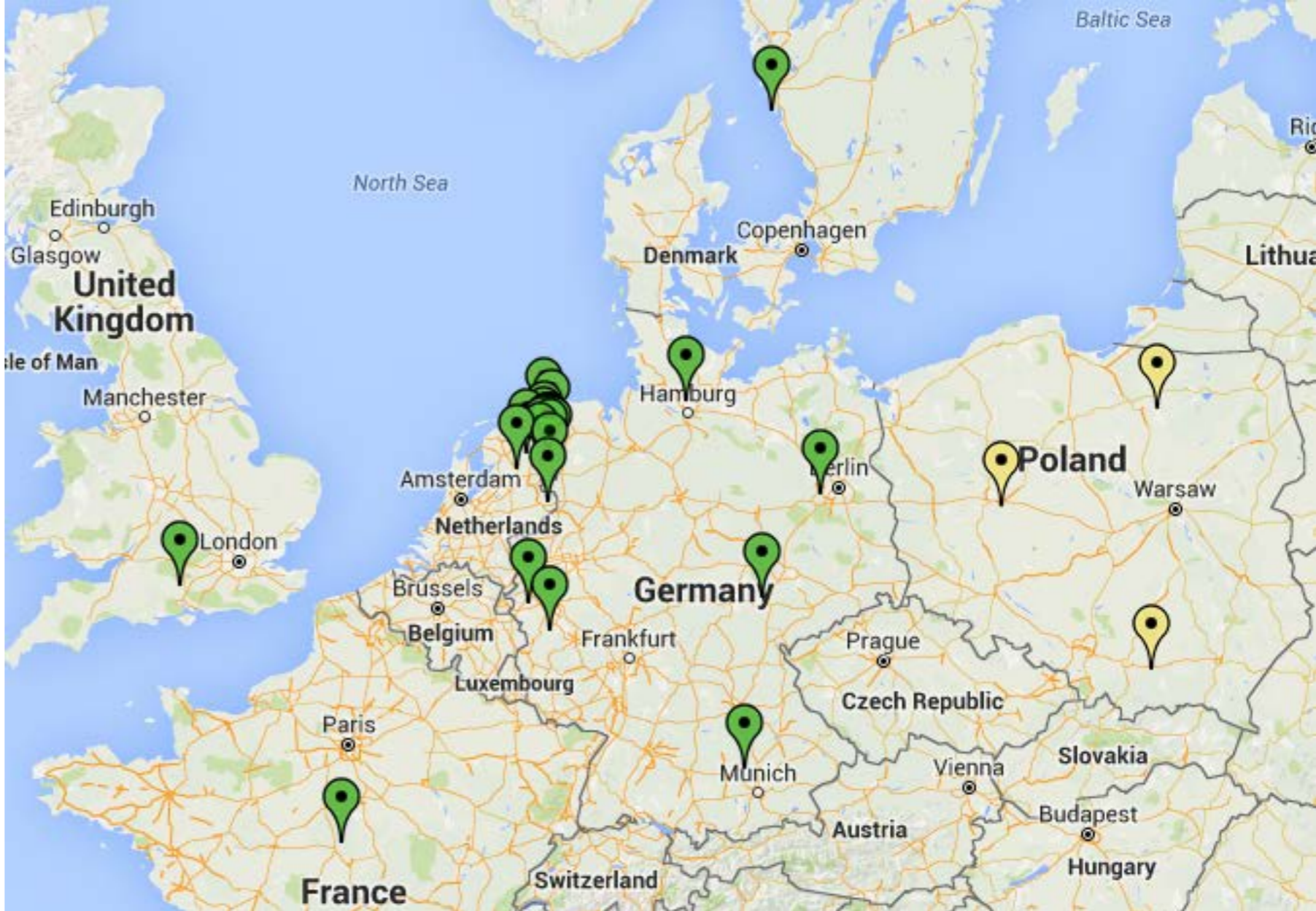
F=30-80 & 110-250 MHz



# Mesure par interférométrie: quelques instances

Radio interféromètre électronique - LOFAR

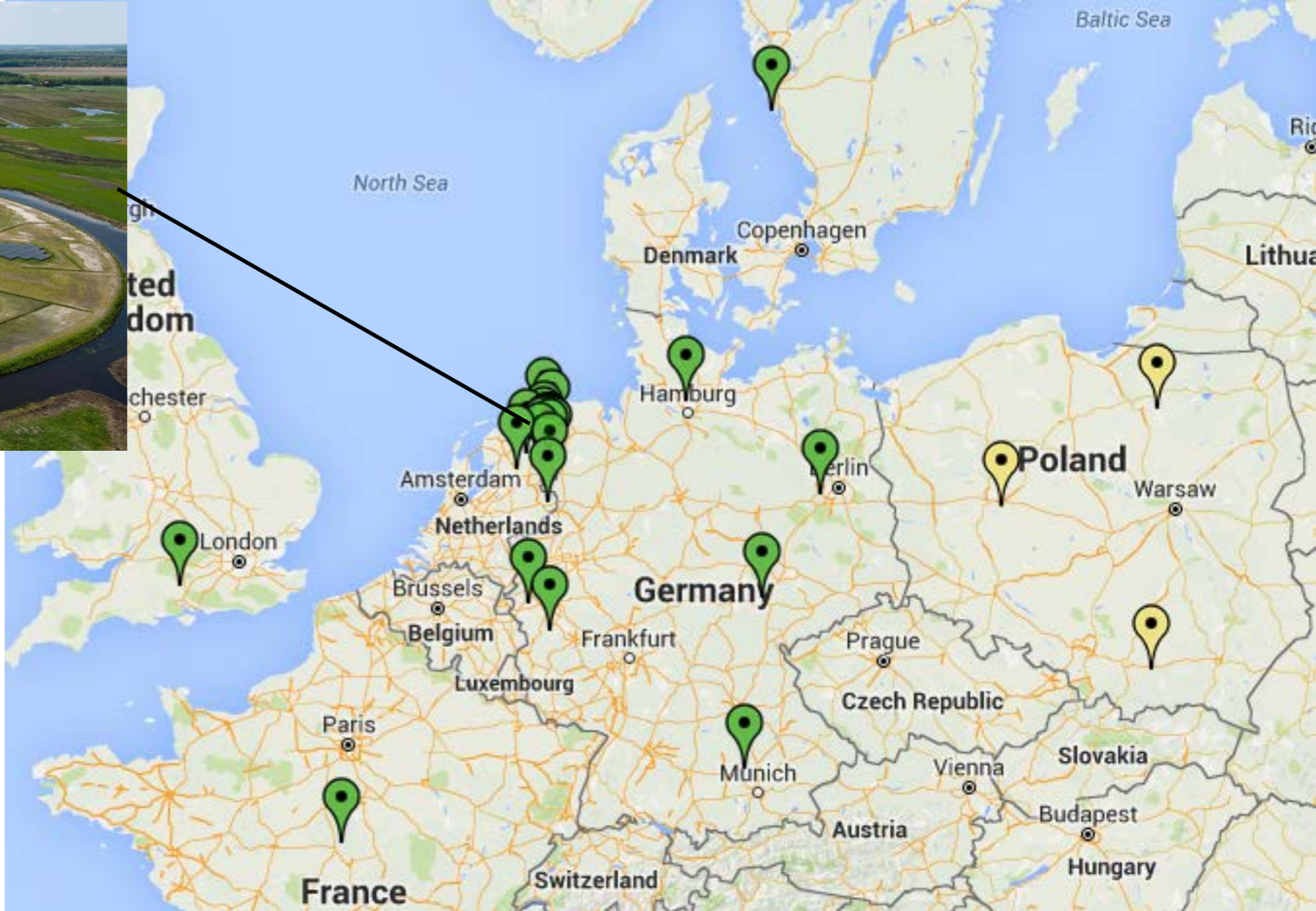
F=30-80 & 110-250 MHz



# Mesure par interférométrie: quelques instances

Radio interféromètre électronique - LOFAR

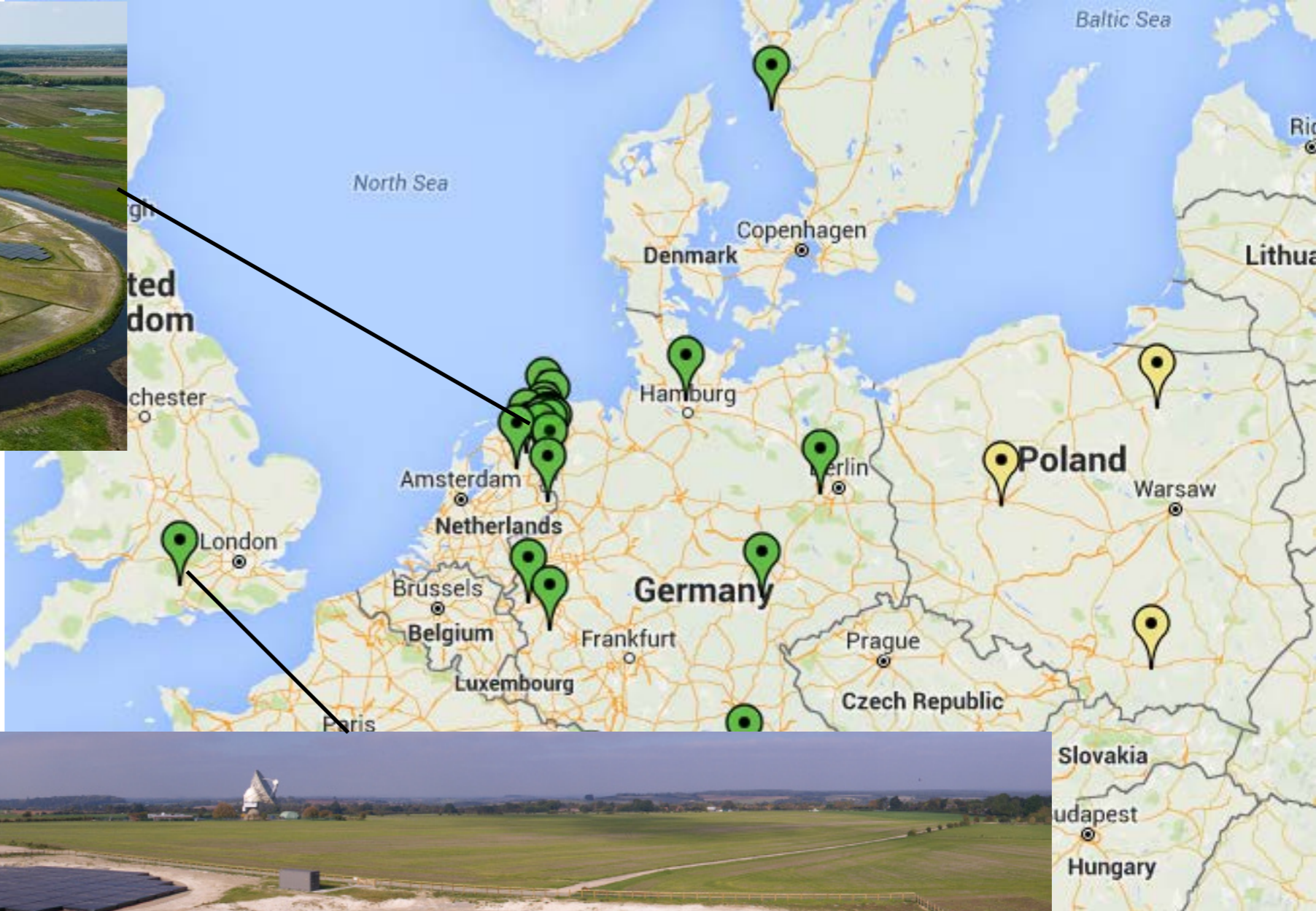
F=30-80 & 110-250 MHz



# Mesure par interférométrie: quelques instances

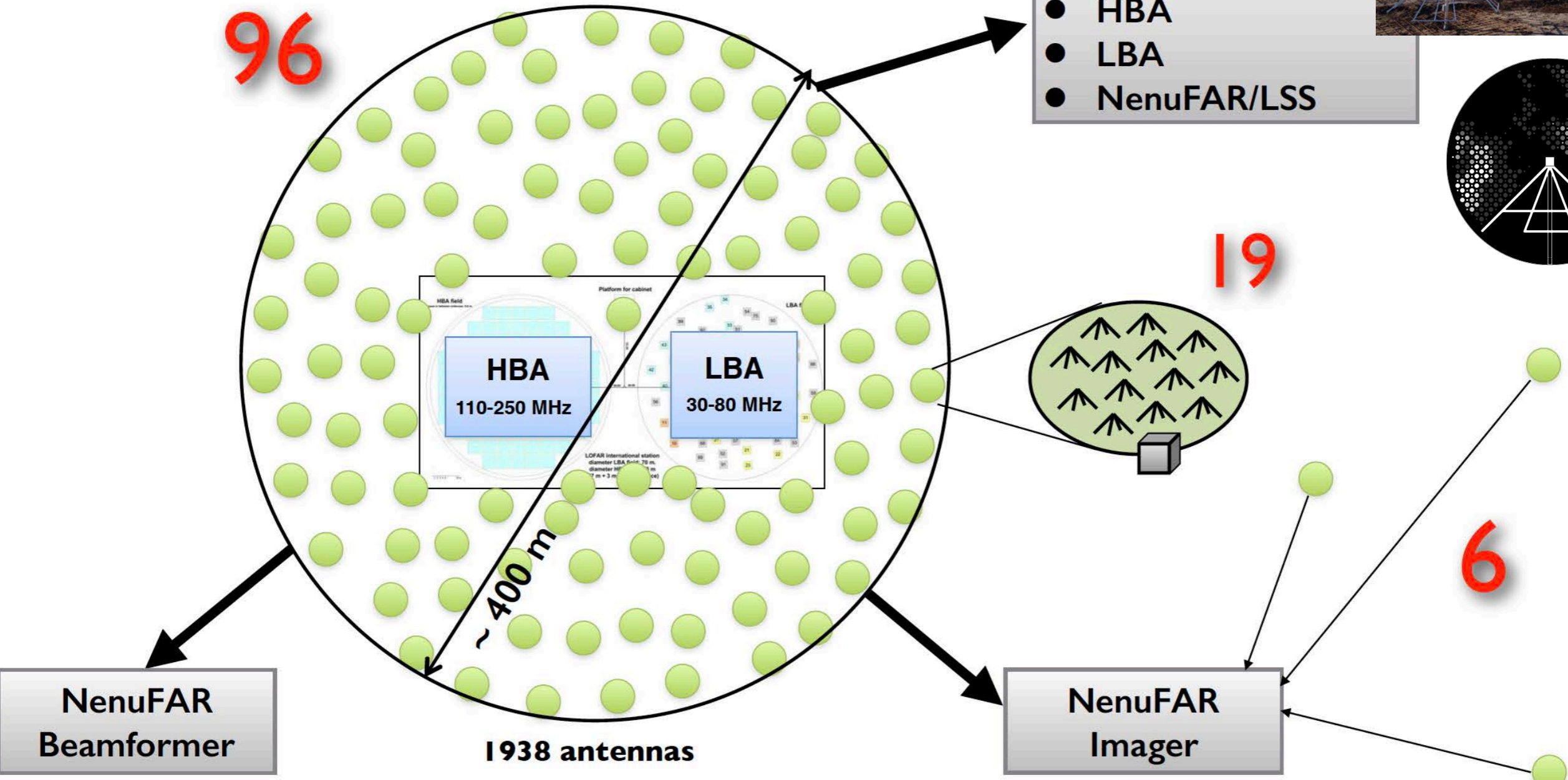
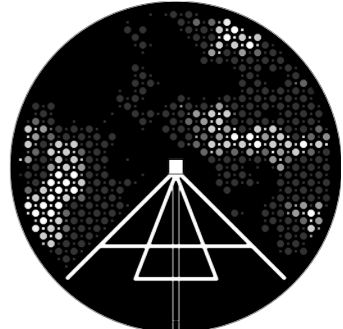
Radio interféromètre électronique - LOFAR

F=30-80 & 110-250 MHz



# Mesure par interférométrie: quelques instances

## "Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR



- Standalone Beamformer
- Standalone Transient Buffer
- Standalone Imager
- LOFAR "Super Station" mode

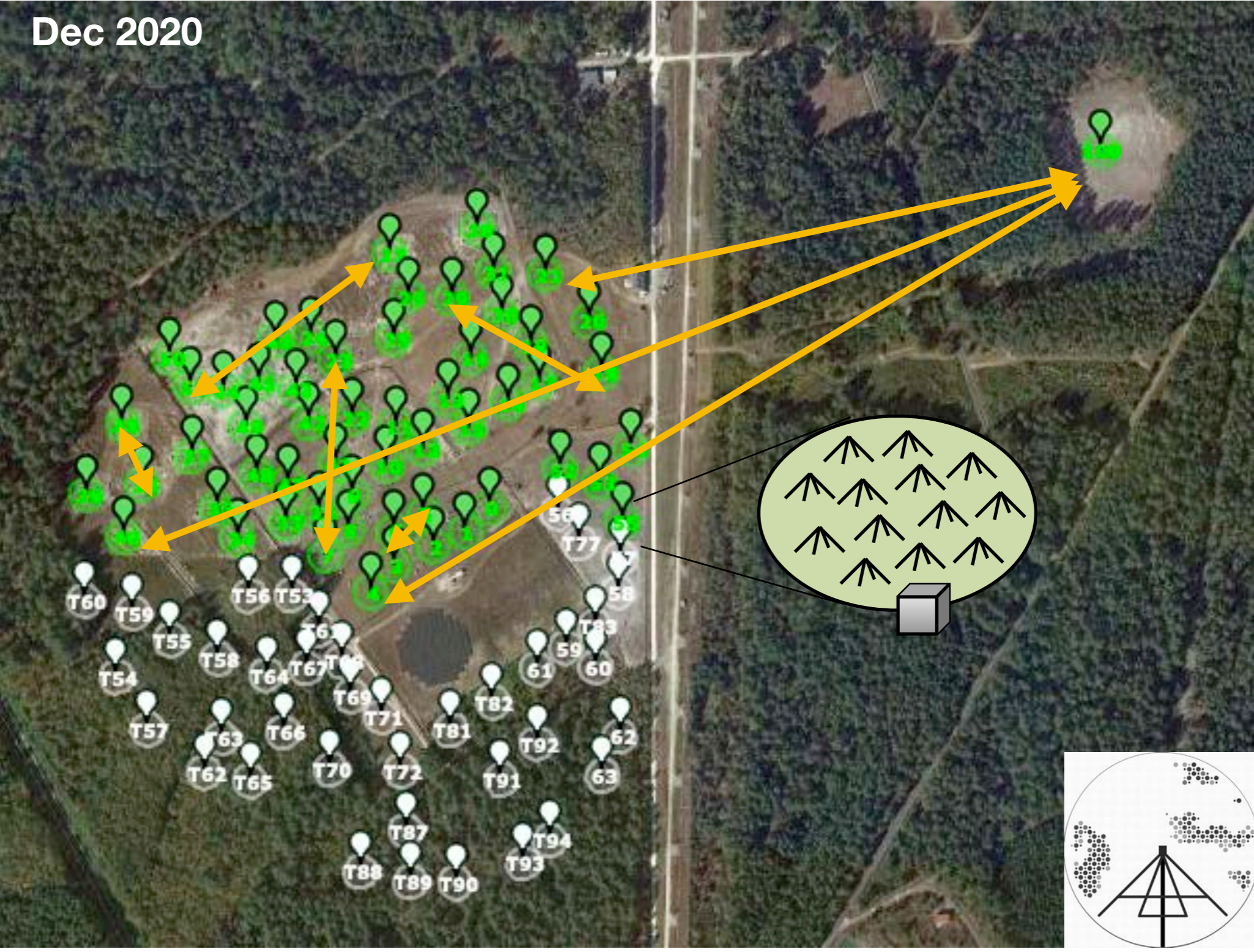
**Sensitivity 2-8 x LOFAR**  
**⇒ The world's most sensitive radiotelescope**  
**in the range 10-85 MHz**



# Mesure par interférométrie: quelques instances

## "Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR

- F = 20-88 MHz
- 56 + 1 remote Mini-arrays
- Introducing "longer" baselines
- Dedicated correlator



# Mesure par interférométrie: quelques instances

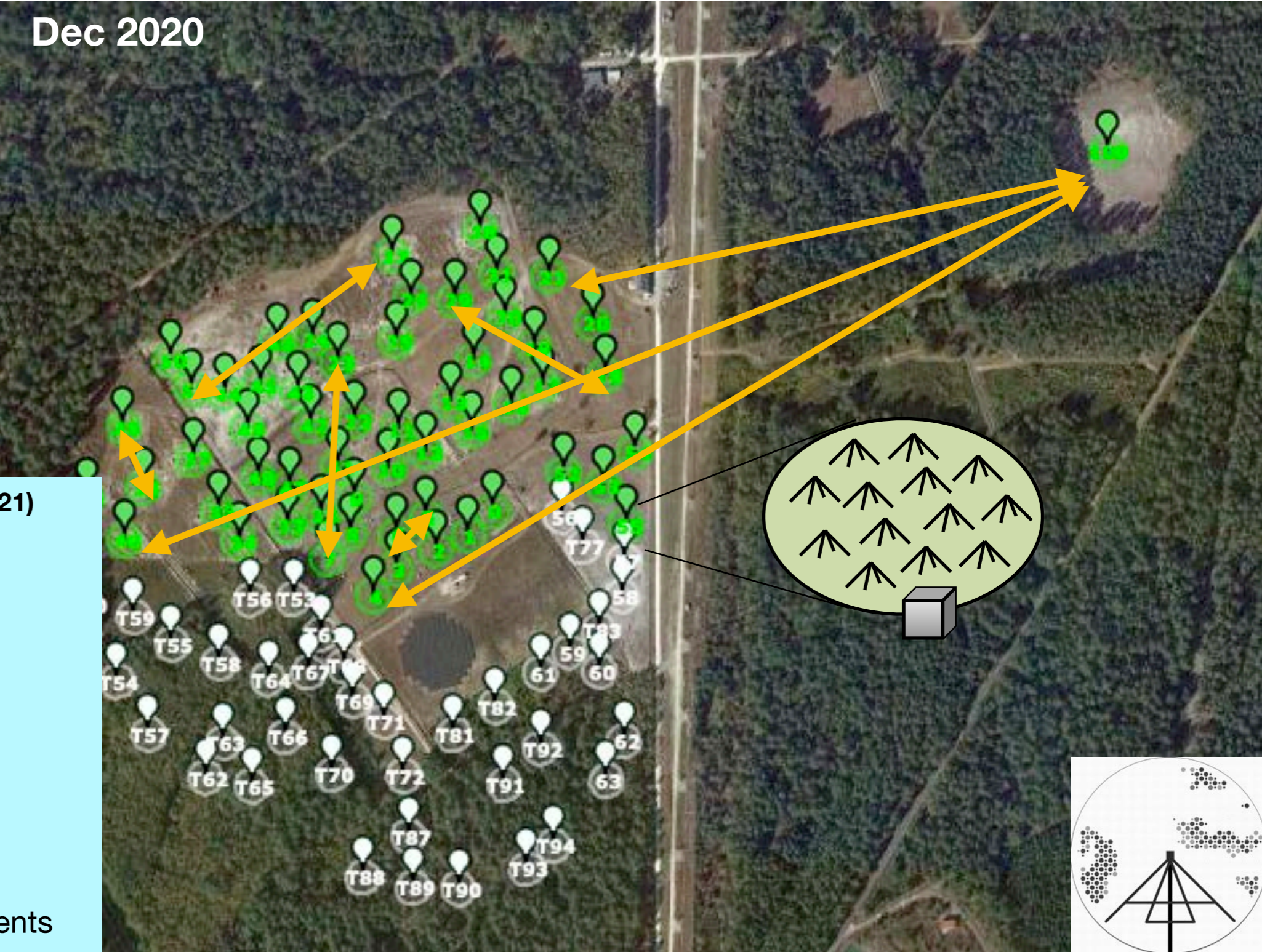
## "Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR

F = 20-88 MHz

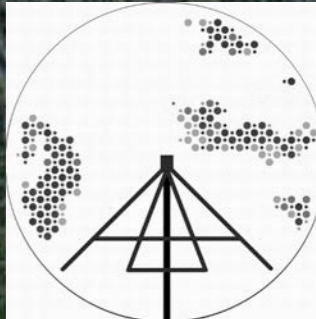
56 + 1 remote  
Mini-arrays

Introducing  
"longer" baselines

Dedicated correlator

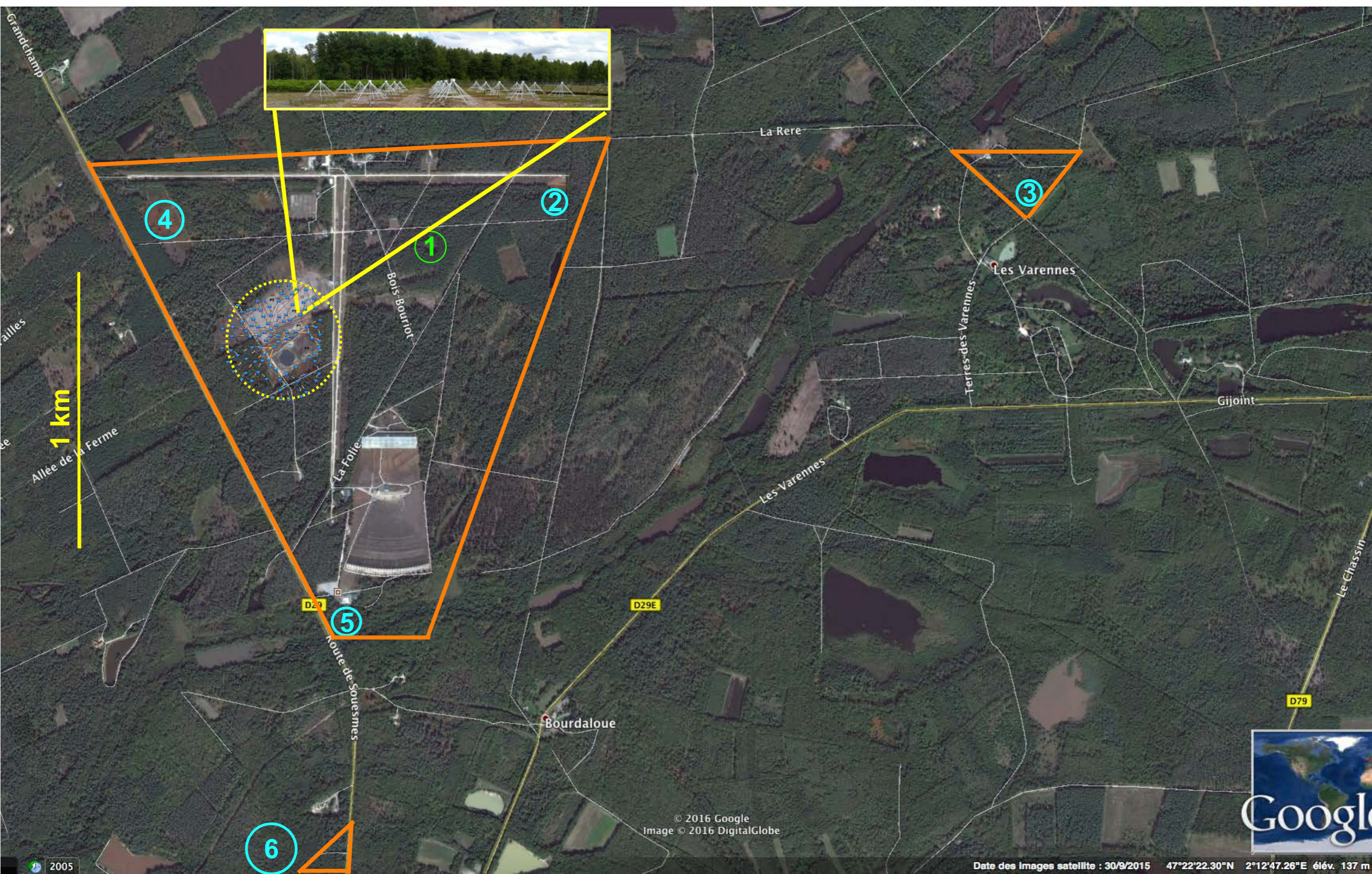


- Early Science phase (-> 2021)
- Cosmic Dawn
  - Exoplanets & Stars
  - Pulsars
  - Transients
  - FRB
  - Solar system
  - Clusters & AGNs & Filaments
  - RRL, ...

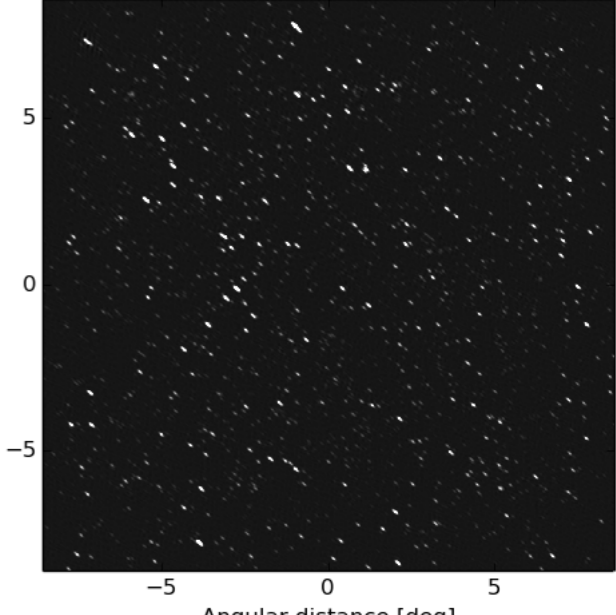
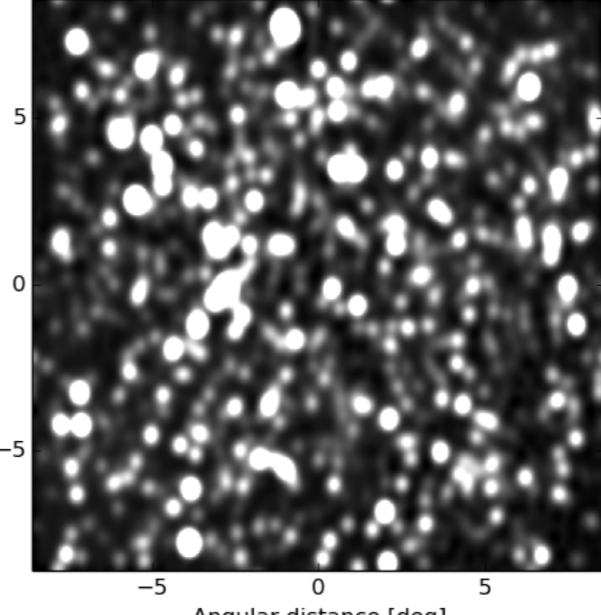
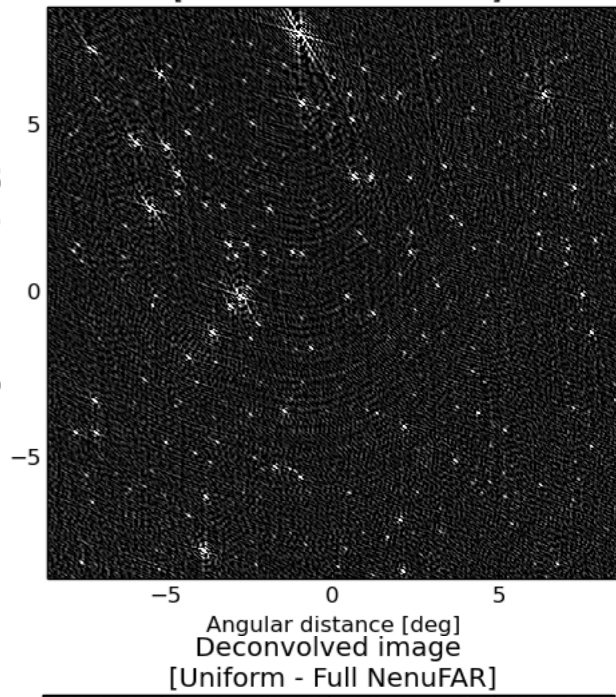
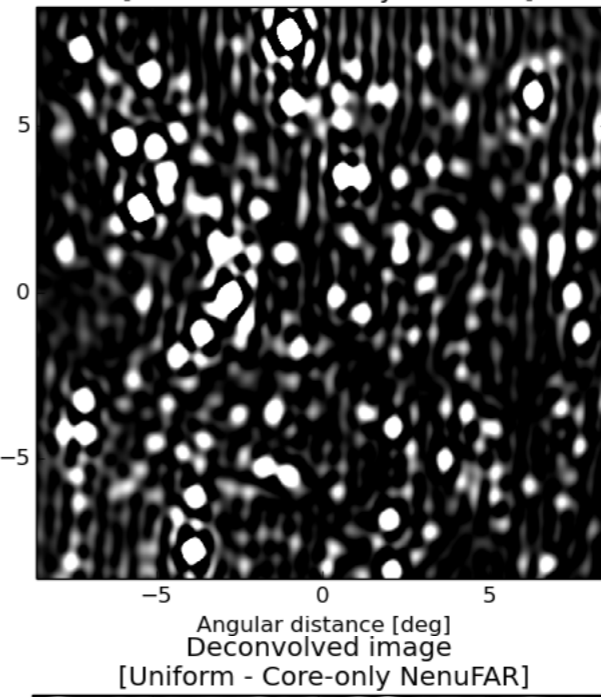
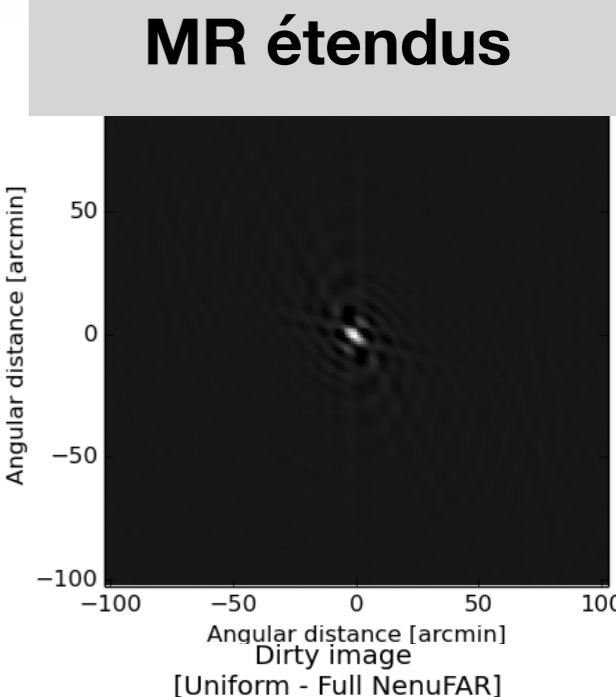
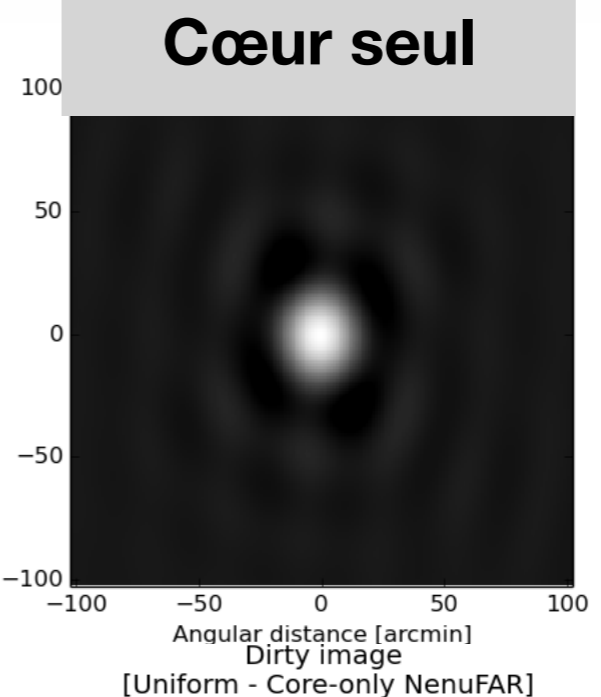
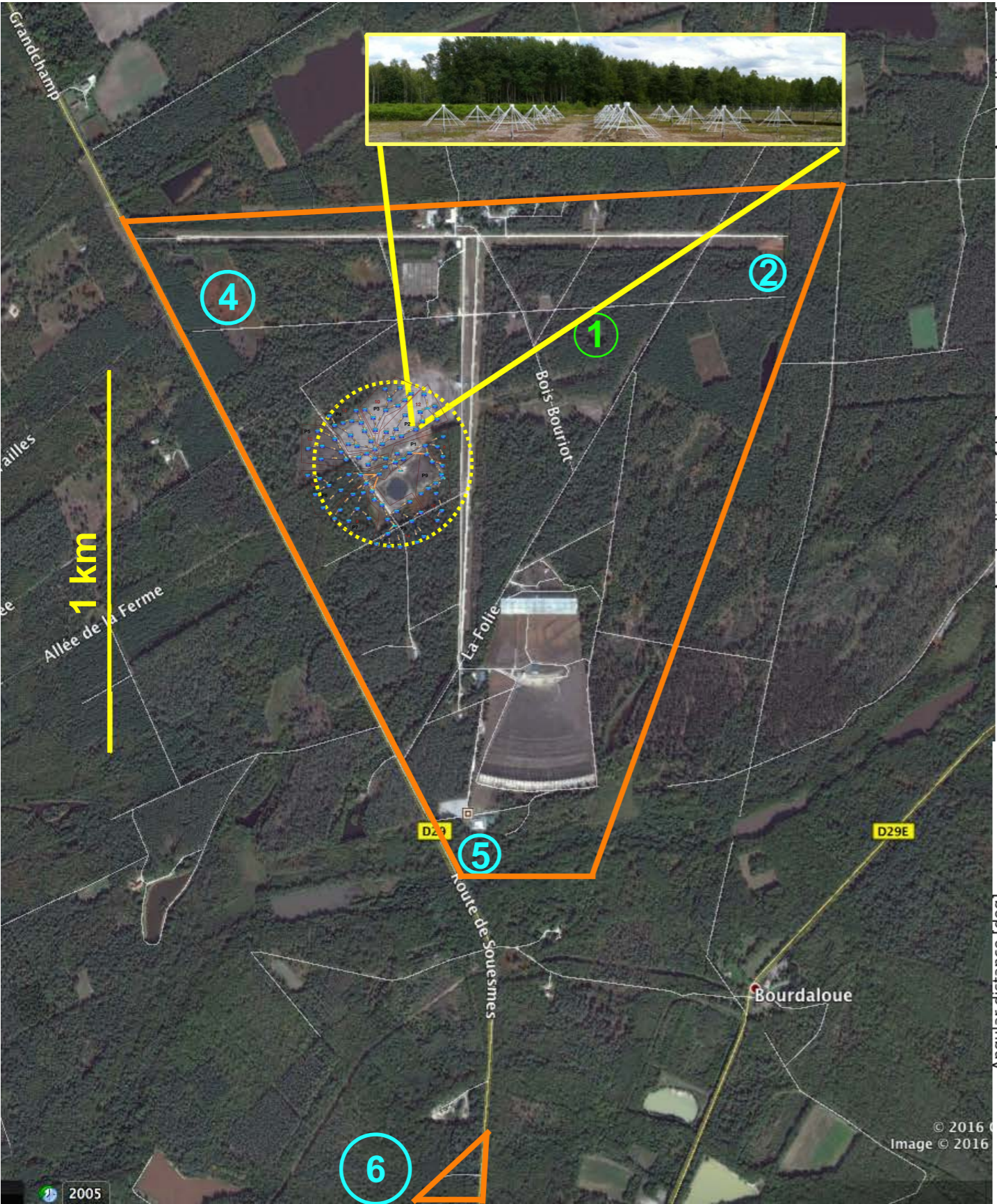


# Mesure par interférométrie: quelques instances

## "Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR

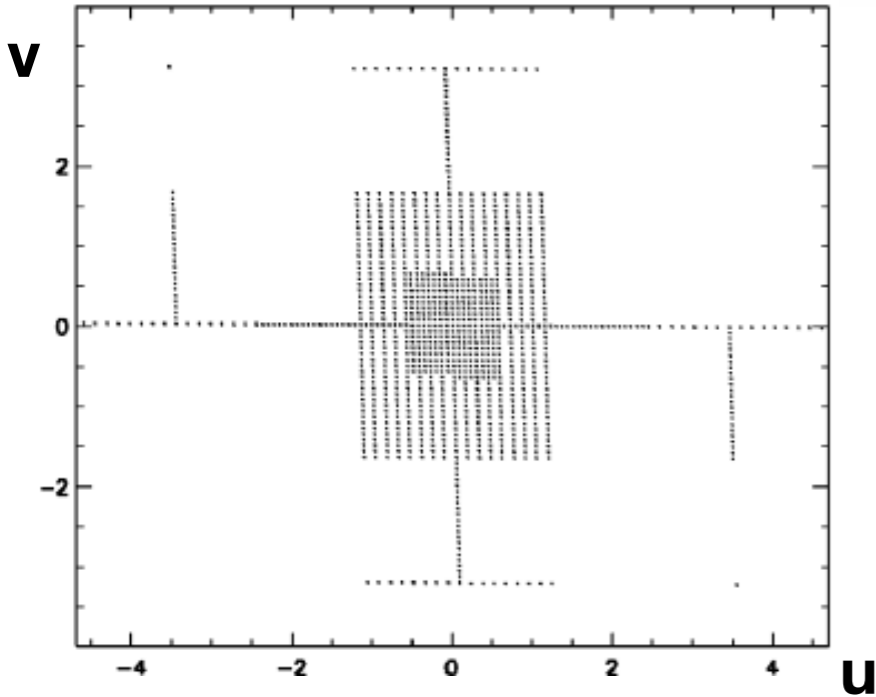
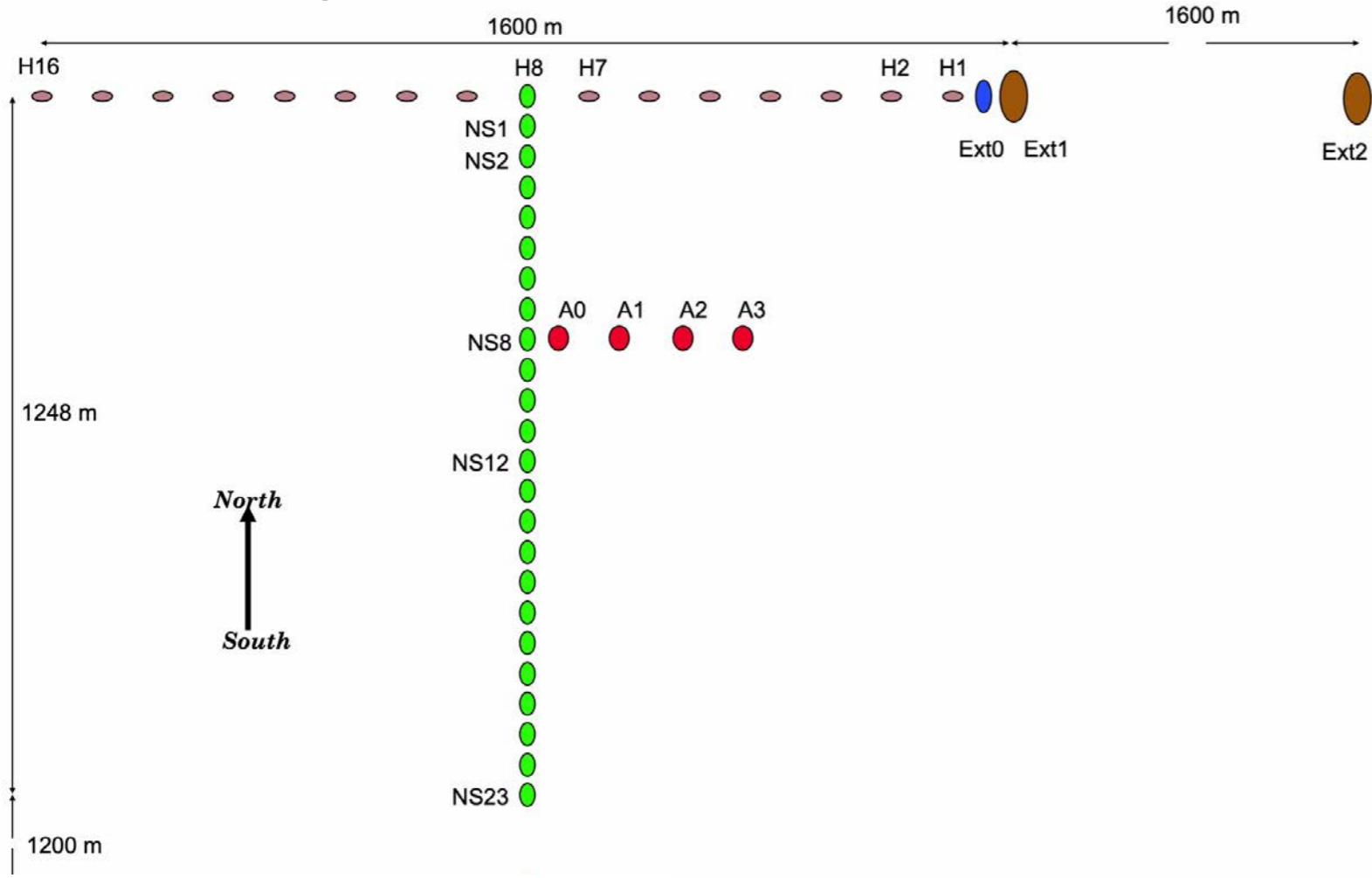


# Mesure par interférométrie: quelques "Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR



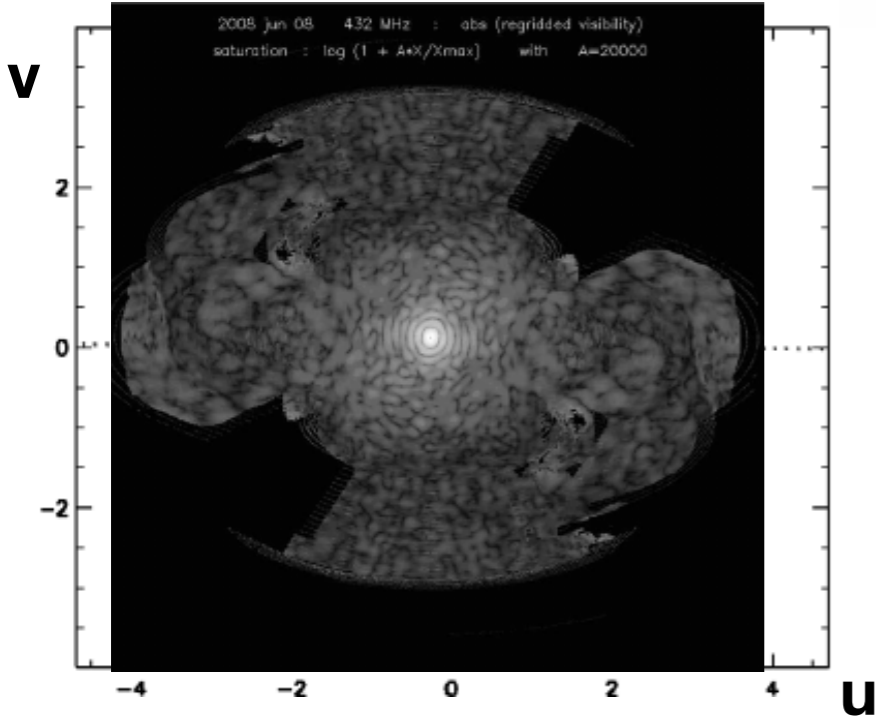
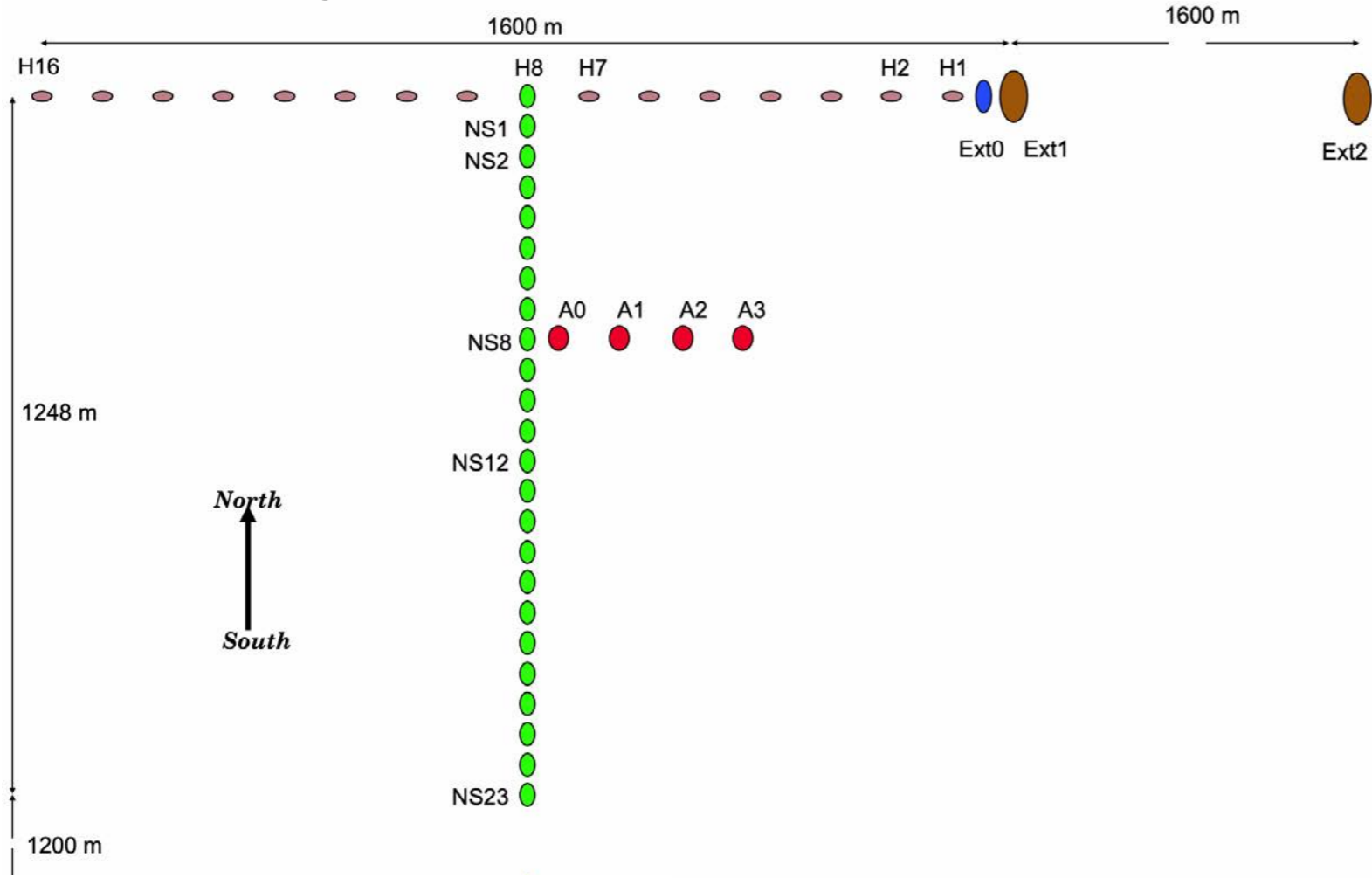
# Mesure par interférométrie: quelques instances

## Le radiohéliographe



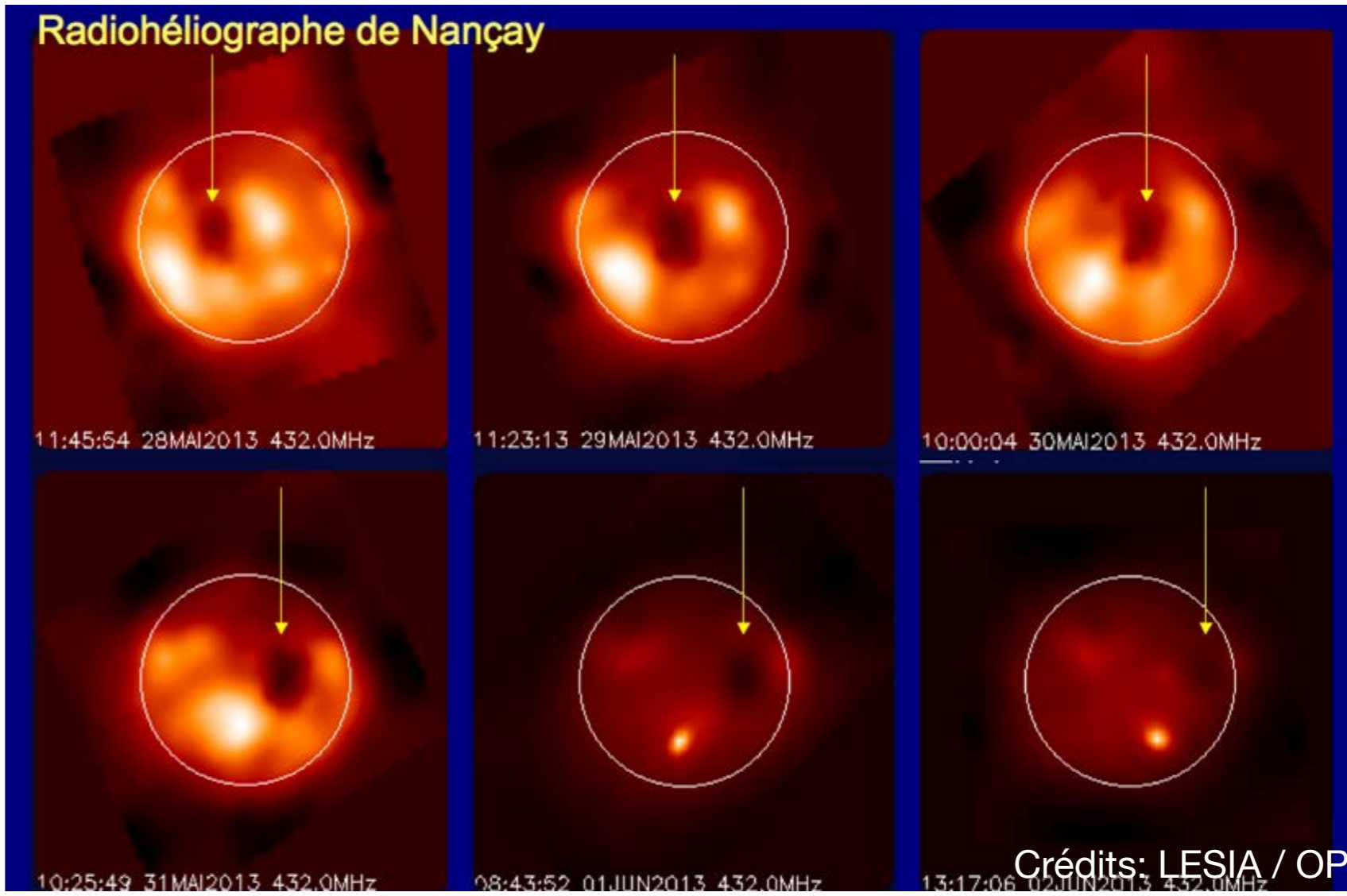
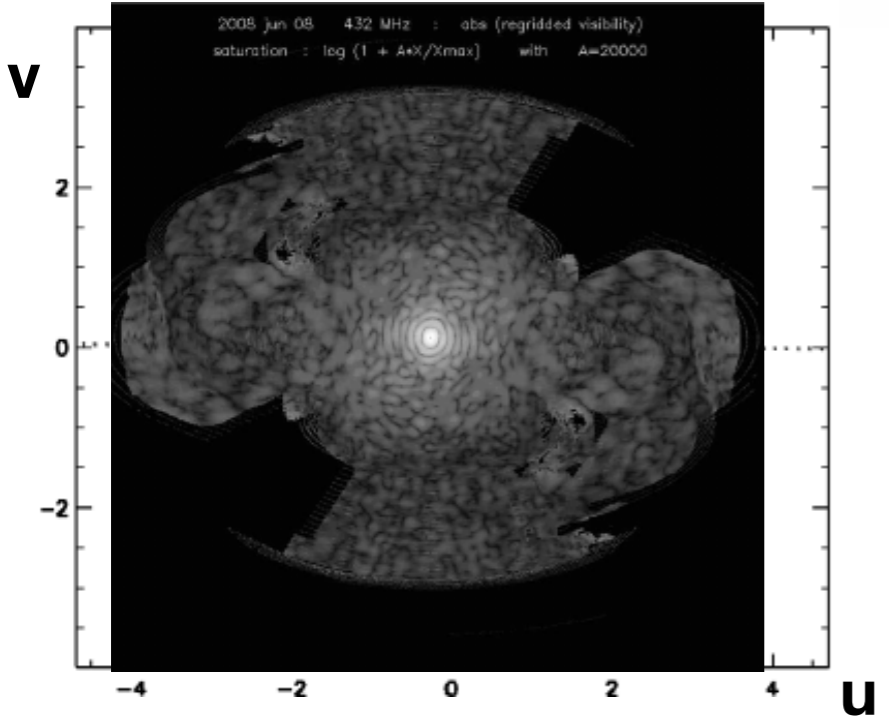
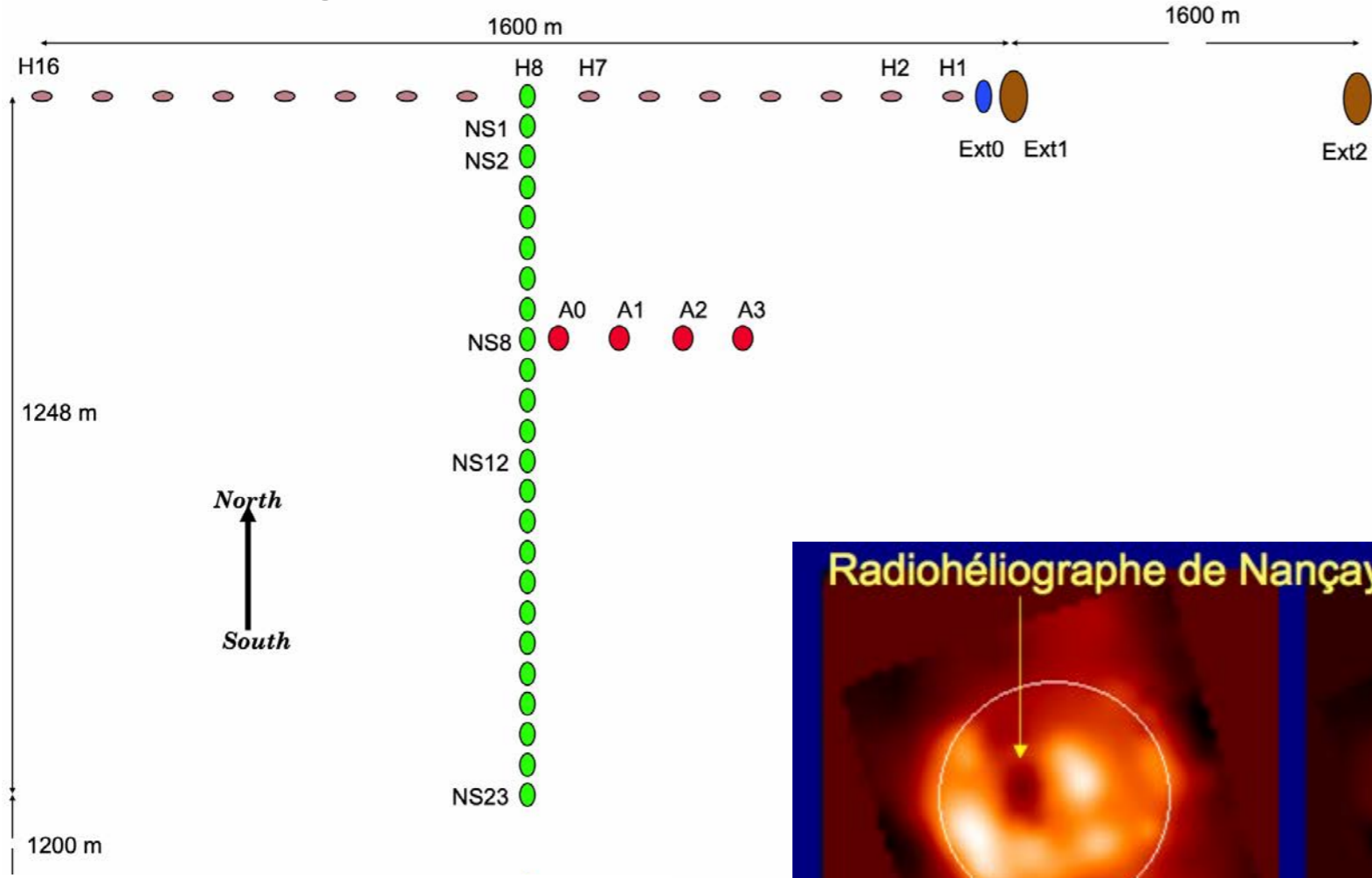
# Mesure par interférométrie: quelques instances

## Le radiohéliographe



# Mesure par interférométrie: quelques instances

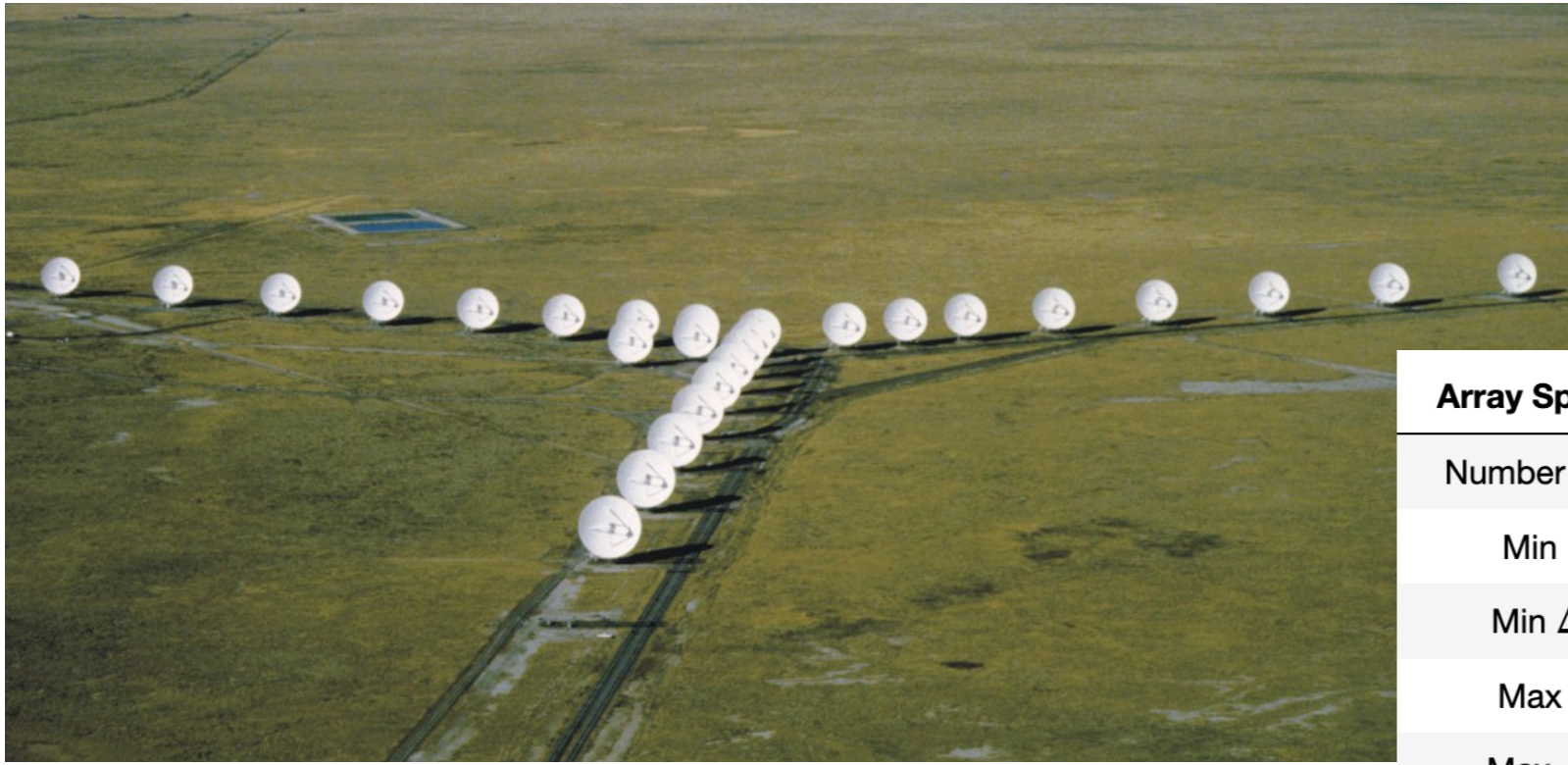
## Le radiohéliographe



Crédits: LESIA / OP

# Mesure par interférométrie: quelques instances

## Radio interféromètres reconfigurables - le Jansky VLA - Nouveau Mexique



Array Specifications	A	B	C	D
Number of Elements	27	27	27	27
Min Baseline	680 m	210 m	35 m	35 m
Min $\Delta\theta_{1.4GHz}$	1.3'	4.2'	25.2'	25.2'
Max Baseline	36.4 km	11.1 km	3.4 km	1.03 km
Max $\Delta\theta_{1.4GHz}$	1.5"	4.8"	15.5"	51.3"

## ALMA - Chili





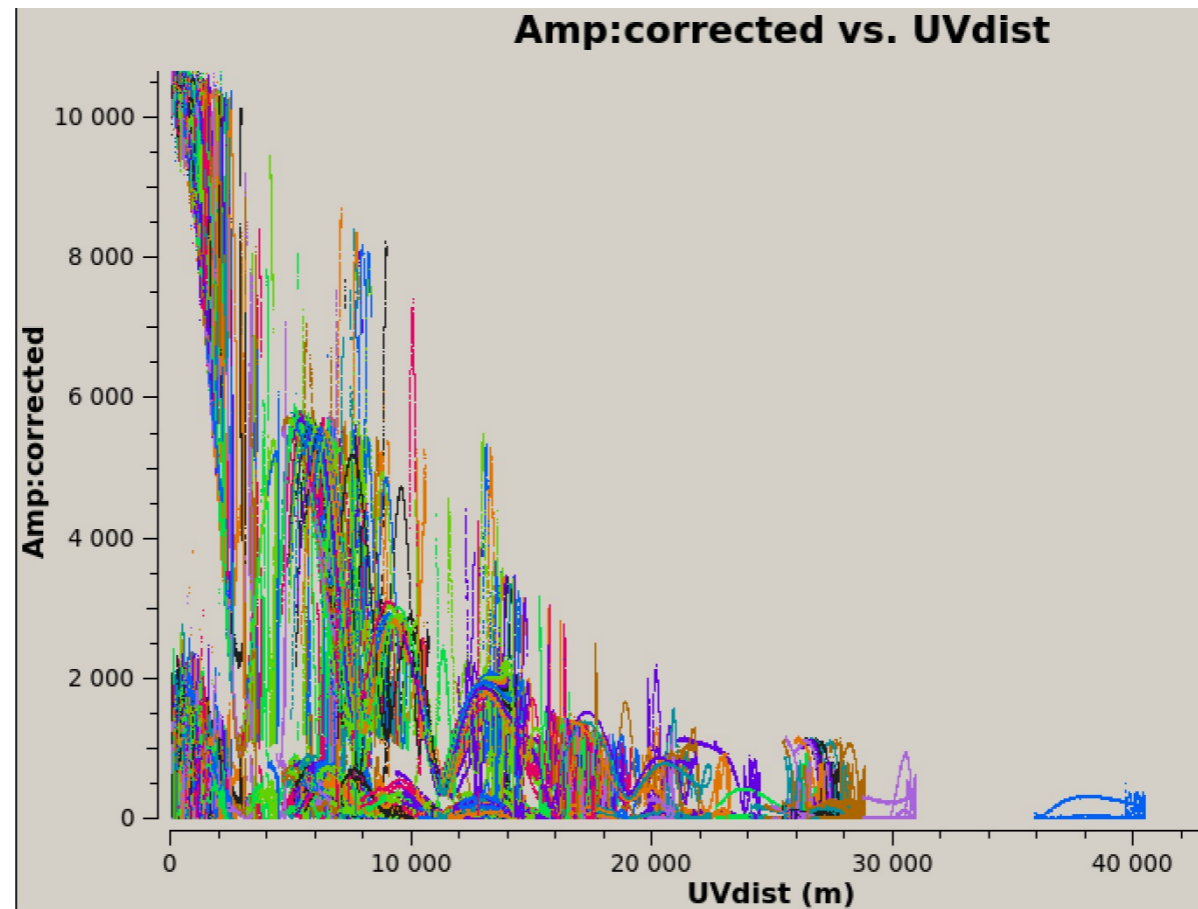
# Plan

- Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?**
- Principe de la mesure par interférométrie**
- Imagerie**
- Déconvolution**
- Tour d'horizon de l'imagerie radio**

# Imagerie par synthèse d'ouverture

Mesures de  
visibilités complexe  
en fonction de

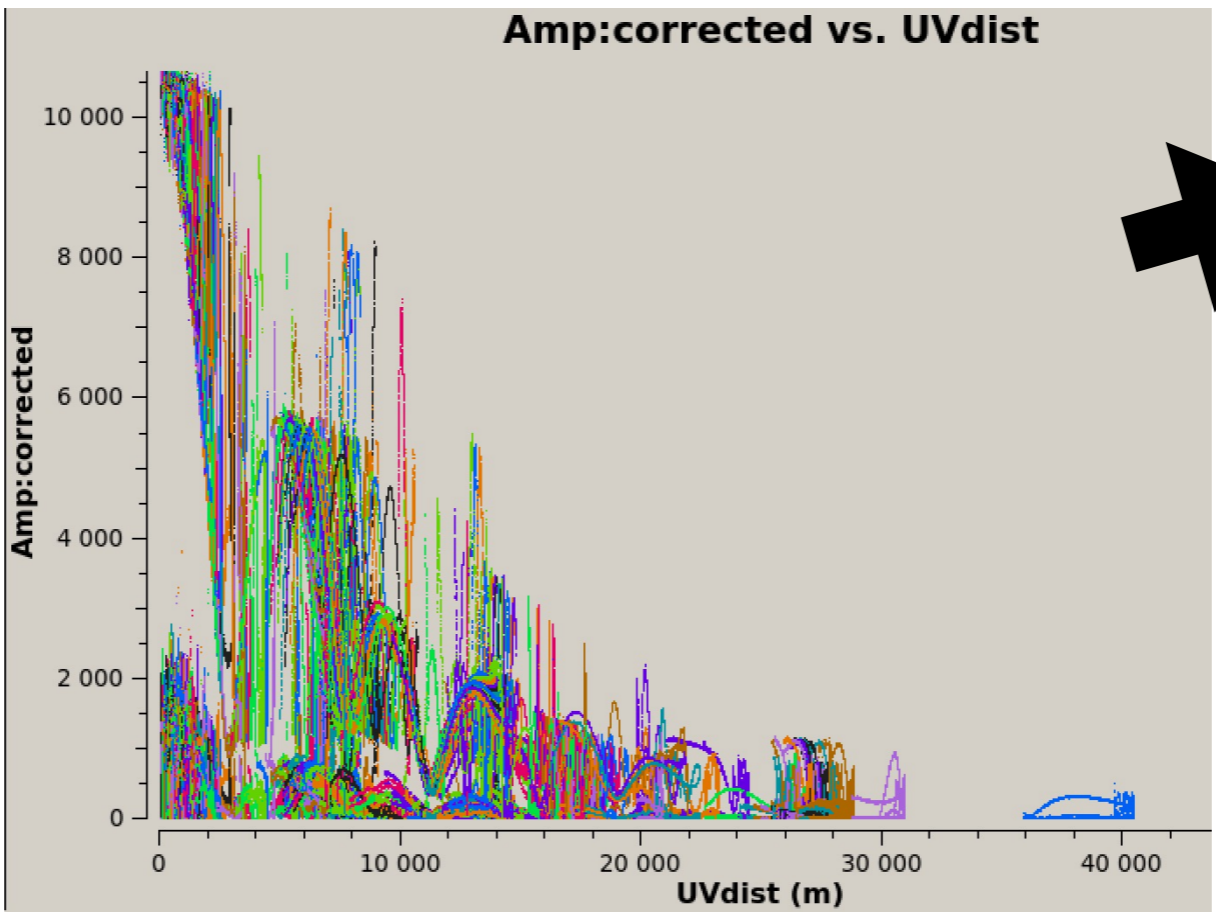
$$r_{uv} = \sqrt{u^2 + v^2}$$



# Imagerie par synthèse d'ouverture

Mesures de visibilités complexe en fonction de

$$r_{uv} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

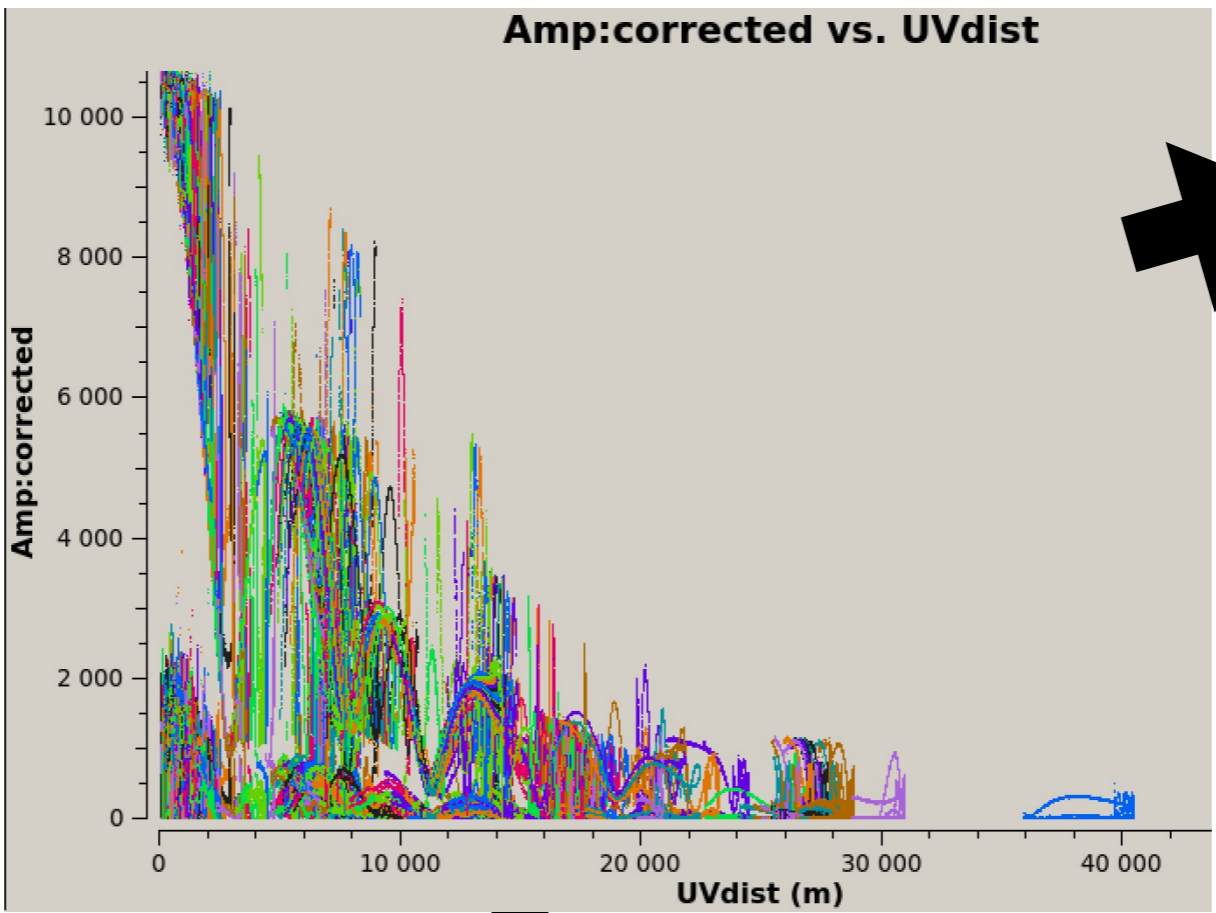


Début de l'interférométrie  
interprétation de la fonction de visibilité mesurée

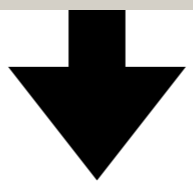
# Imagerie par synthèse d'ouverture

Mesures de visibilités complexe en fonction de

$$r_{uv} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

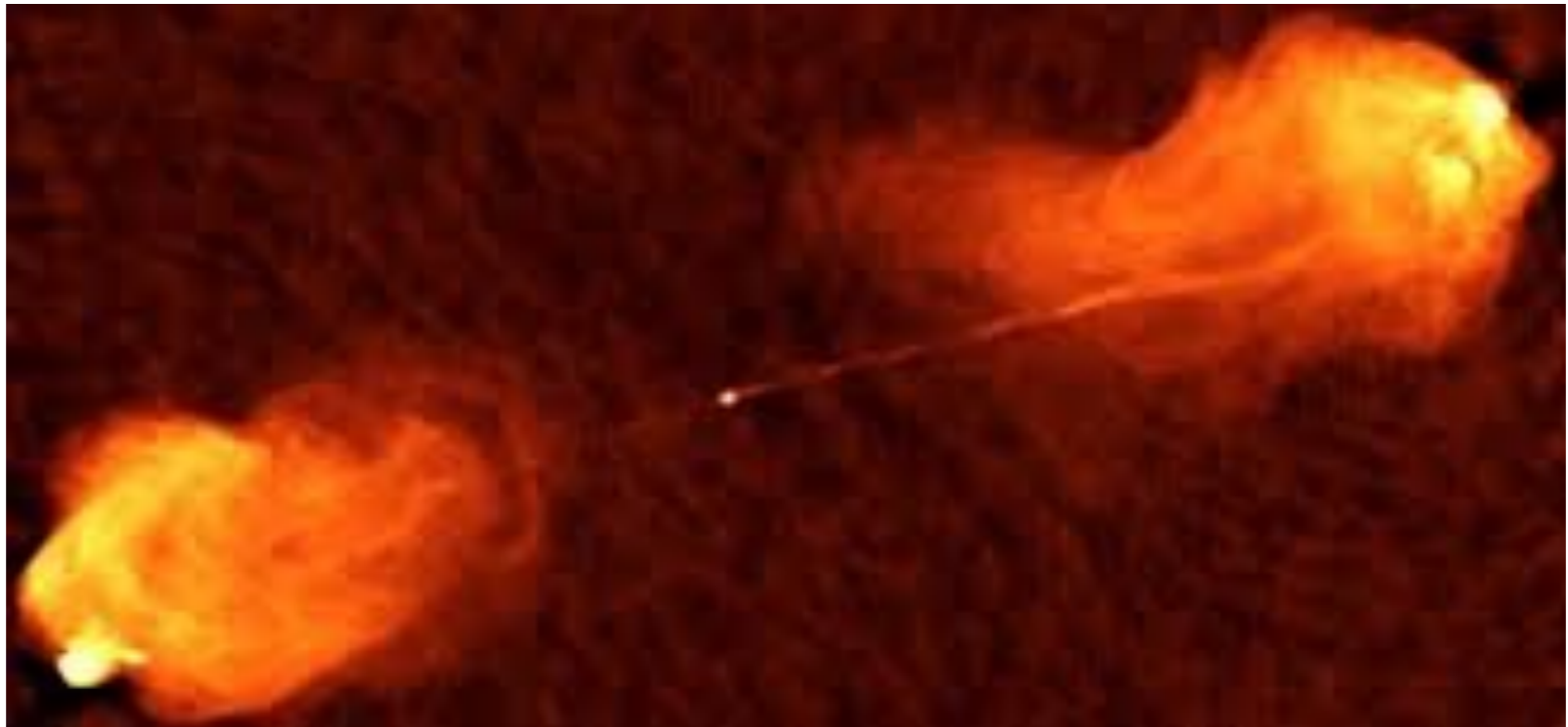


Début de l'interférométrie  
interprétation de la fonction de visibilité mesurée



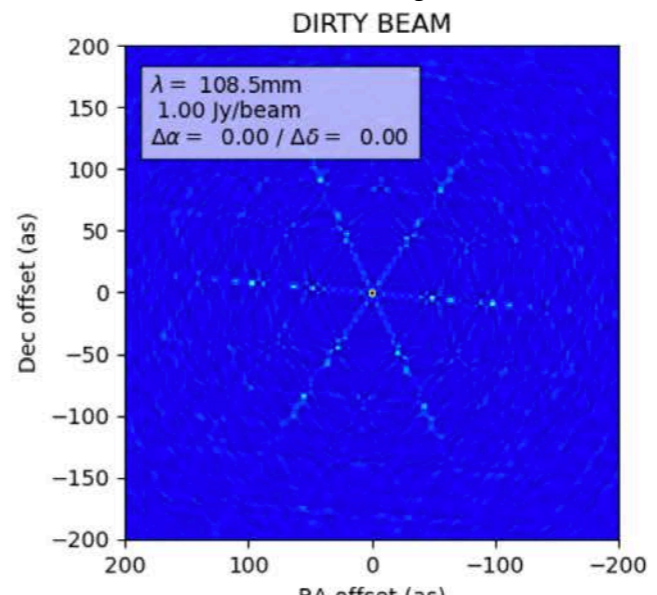
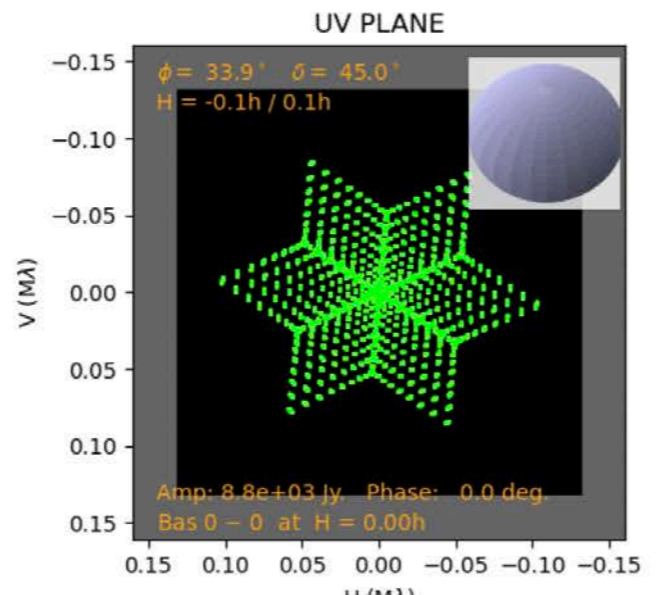
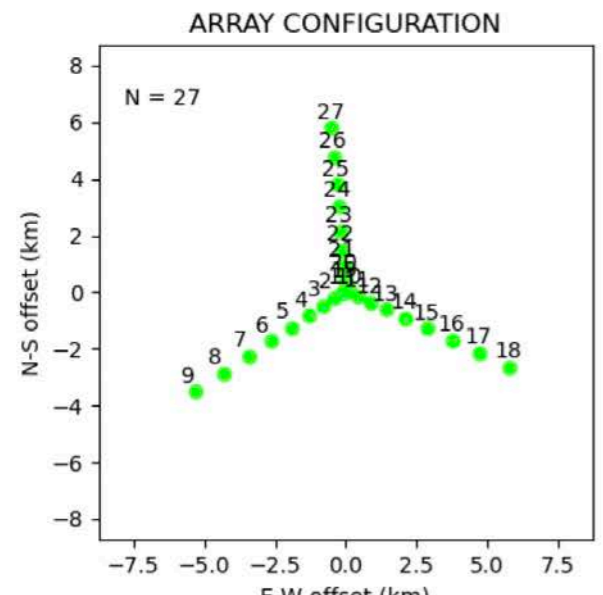
Imagerie + déconvolution

Distribution de brillance

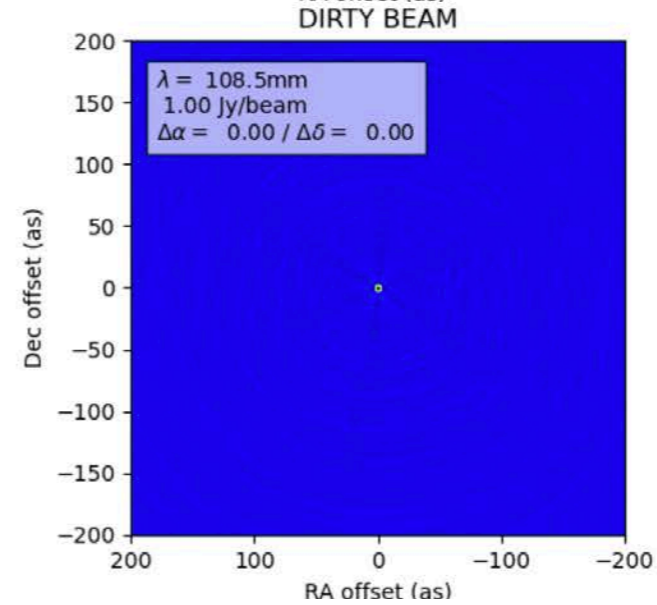
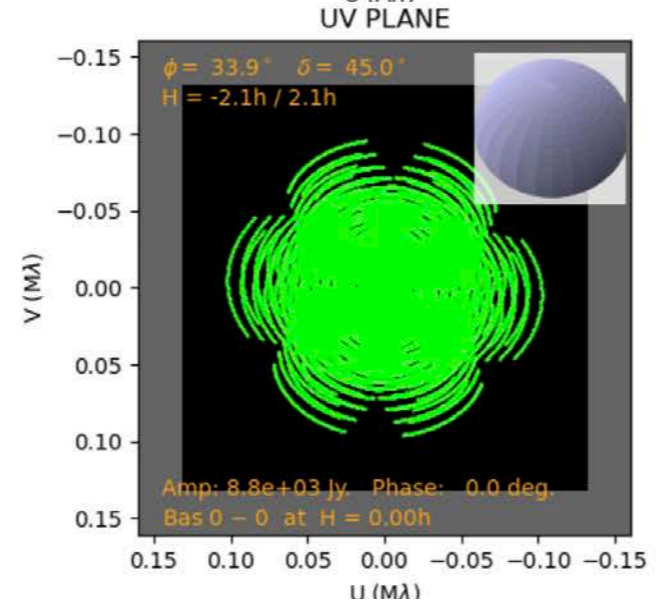
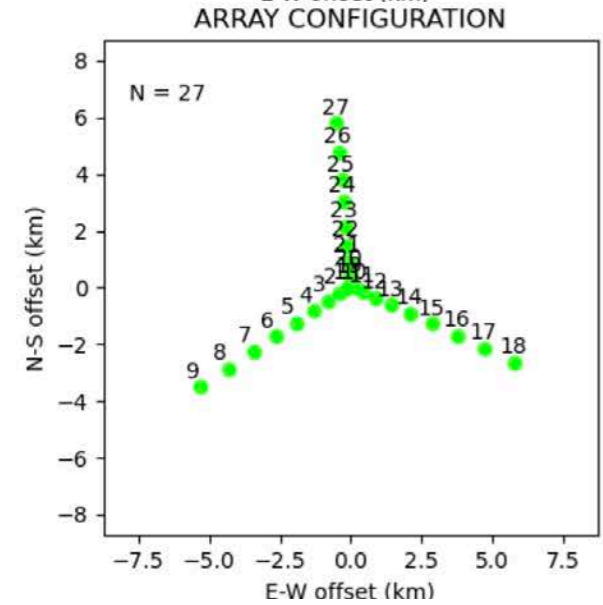


# Imagerie par synthèse d'ouverture

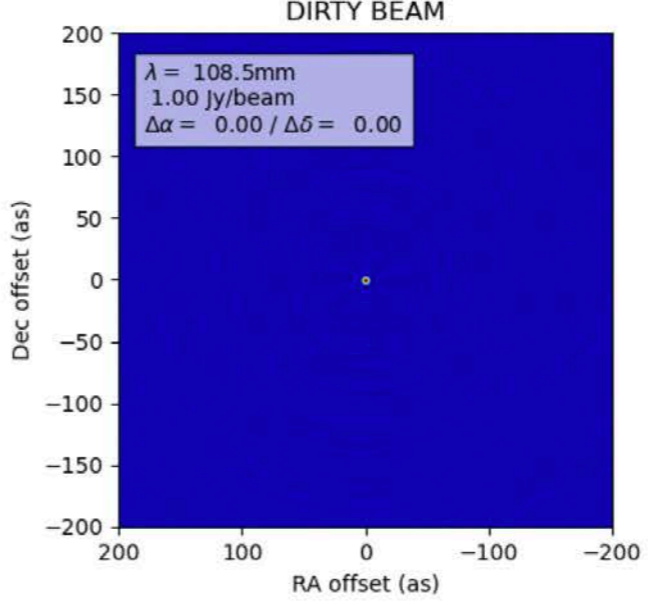
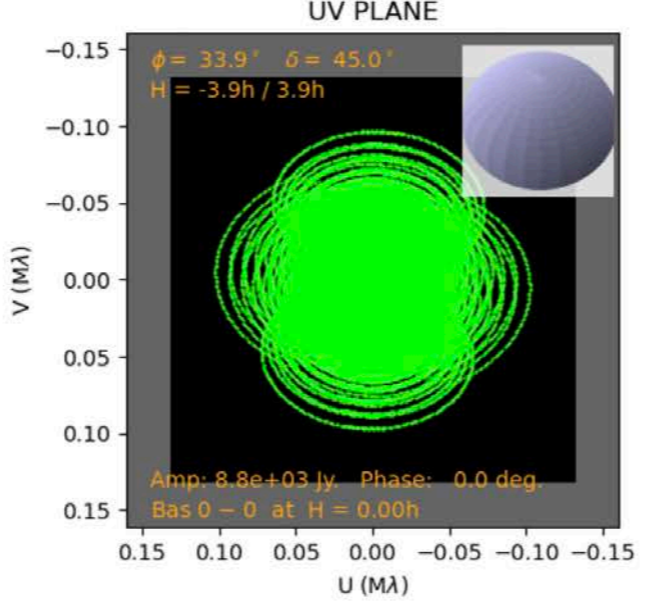
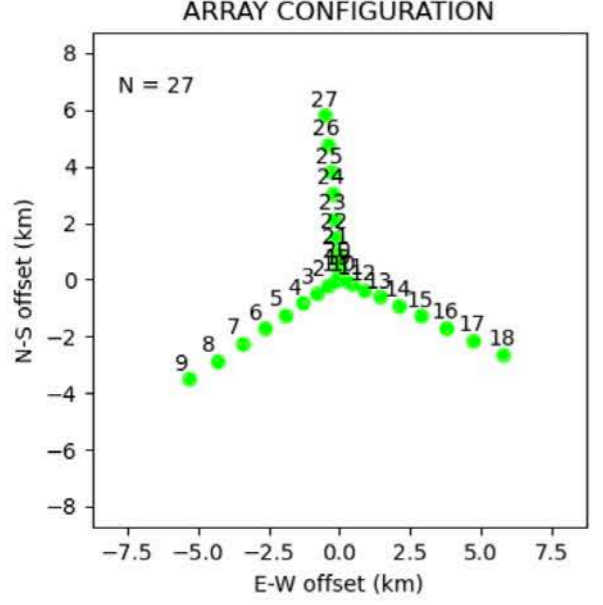
# "Super synthèse terrestre" Earth Rotation Synthesis



Snapshot



$\Delta T = 4h$



$\Delta T = 8h$

**APSYNSIM**  
I. Marti-Vidal

**Visibilité complexe  
(connaissance parfaite)**

$$\underline{V}(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T(l, m)$$

**Distribution en  
température  
de brillance du ciel  
(connaissance parfaite)**

**Visibilité complexe  
(connaissance parfaite)**

$$\underline{V}(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T(l, m)$$

**Distribution en  
température  
de brillance du ciel  
(connaissance parfaite)**

**Fonction d'échantillonnage  
(couverture (u,v))**

$$S(u, v) = \sum_{k=1}^M \delta(u - u_k, v - v_k)$$

**Visibilité complexe  
(connaissance parfaite)**

$$\underline{V}(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T(l, m)$$

**Distribution en  
température  
de brillance du ciel  
(connaissance parfaite)**

**Fonction d'échantillonnage  
(couverture (u,v))**

$$S(u, v) = \sum_{k=1}^M \delta(u - u_k, v - v_k)$$

**La PSF est liée à la  
fonction d'échantillonnage**

$$psf(l, m) \xrightarrow{\mathcal{F}} S(u, v)$$



**Visibilité complexe  
(connaissance parfaite)**

$$\underline{V}(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T(l, m)$$

**Distribution en  
température  
de brillance du ciel  
(connaissance parfaite)**

**Fonction d'échantillonnage  
(couverture (u,v))**

$$S(u, v) = \sum_{k=1}^M \delta(u - u_k, v - v_k)$$

**La PSF est liée à la  
fonction d'échantillonnage**

$$psf(l, m) \xrightarrow{\mathcal{F}} S(u, v)$$

**Visibilité complexe  
échantillonnée par S**

$$\underline{V}(u, v) \cdot S(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T^D(l, m)$$

**Ciel  
"corrompu"  
Dirty**

**Visibilité complexe  
(connaissance parfaite)**

$$\underline{V}(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T(l, m)$$

**Distribution en  
température  
de brillance du ciel  
(connaissance parfaite)**

**Fonction d'échantillonnage  
(couverture (u,v))**

$$S(u, v) = \sum_{k=1}^M \delta(u - u_k, v - v_k)$$

**La PSF est liée à la  
fonction d'échantillonnage**

$$psf(l, m) \xrightarrow{\mathcal{F}} S(u, v)$$

**Visibilité complexe  
échantillonnée par S**

$$\underline{V}(u, v) \cdot S(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T^D(l, m)$$

**Ciel  
"corrompu"  
Dirty**

**Théorème de  
la convolution** ↓  $\mathcal{F}^{-1}$

$$T(l, m) * psf(l, m) = T^D(l, m)$$

Visibilité complexe  
(connaissance parfaite)

$$\underline{V}(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T(l, m)$$

Distribution en  
température  
de brillance du ciel  
(connaissance parfaite)

Fonction d'échantillonnage  
(couverture (u,v))

$$S(u, v) = \sum_{k=1}^M \delta(u - u_k, v - v_k)$$

La PSF est liée à la  
fonction d'échantillonnage

$$psf(l, m) \xrightarrow{\mathcal{F}} S(u, v)$$

Visibilité complexe  
échantillonnée par S

$$\underline{V}(u, v) \cdot S(u, v) \xrightarrow{\mathcal{F}^{-1}} T^D(l, m)$$

Ciel  
"corrompu"  
Dirty

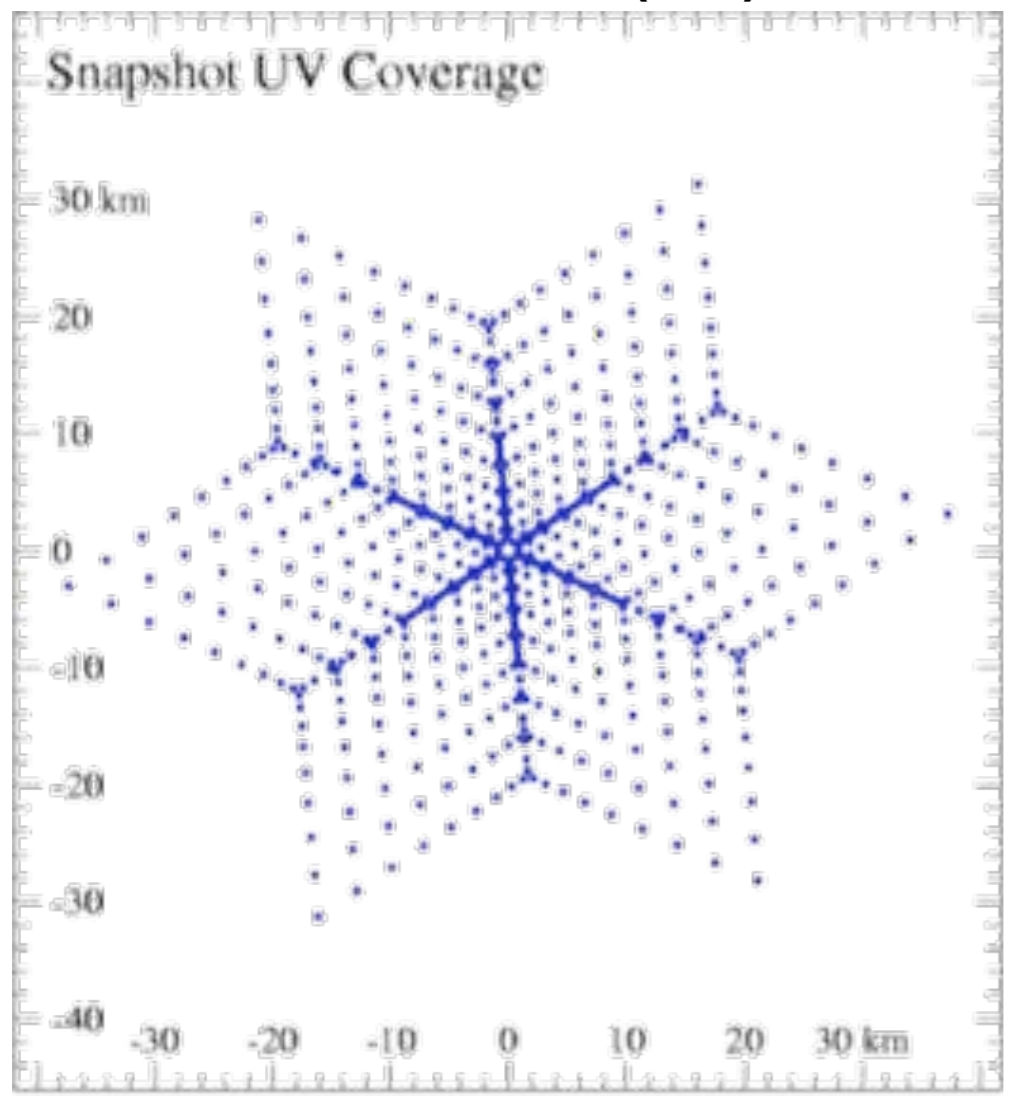
Théorème de  
la convolution  $\downarrow \mathcal{F}^{-1}$

$$T(l, m) * psf(l, m) = T^D(l, m)$$

**Échantillonner la fonction de visibilité dans l'espace de Fourier  
revient à convoluer le "vrai" ciel par la PSF**

## Plan de Fourier

### Mesures de visibilité (u,v) instantanées

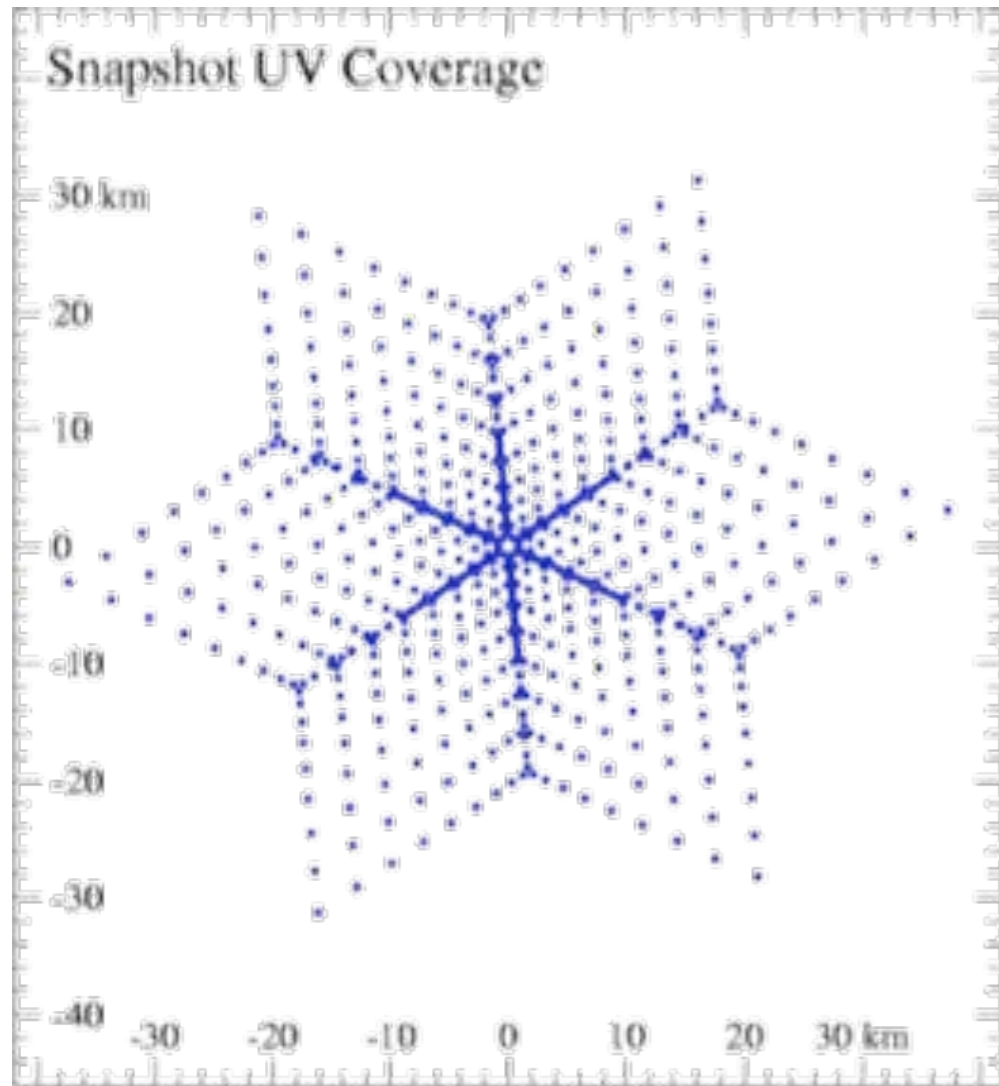


échantillonnage discret du plan de Fourier (u,v) plane

# Imagerie par synthèse d'ouverture

## Plan de Fourier

### Mesures de visibilité (u,v) instantanées



échantillonnage discret du plan de Fourier (u,v) plane



## Espace image

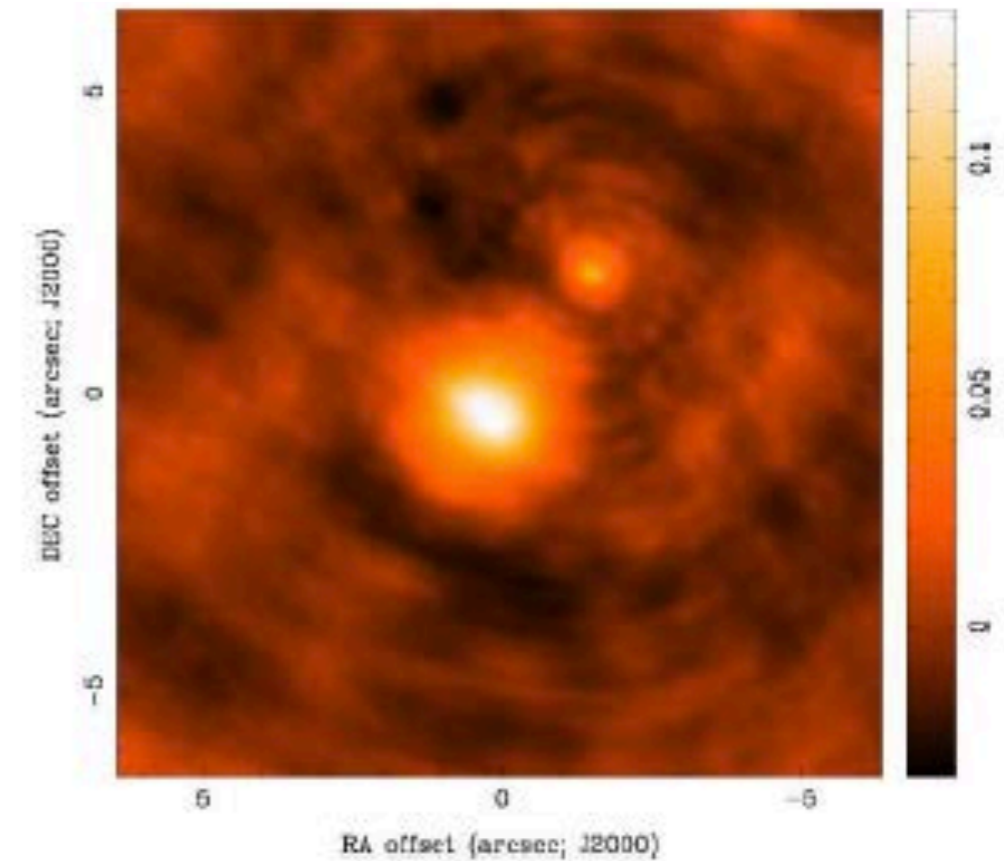
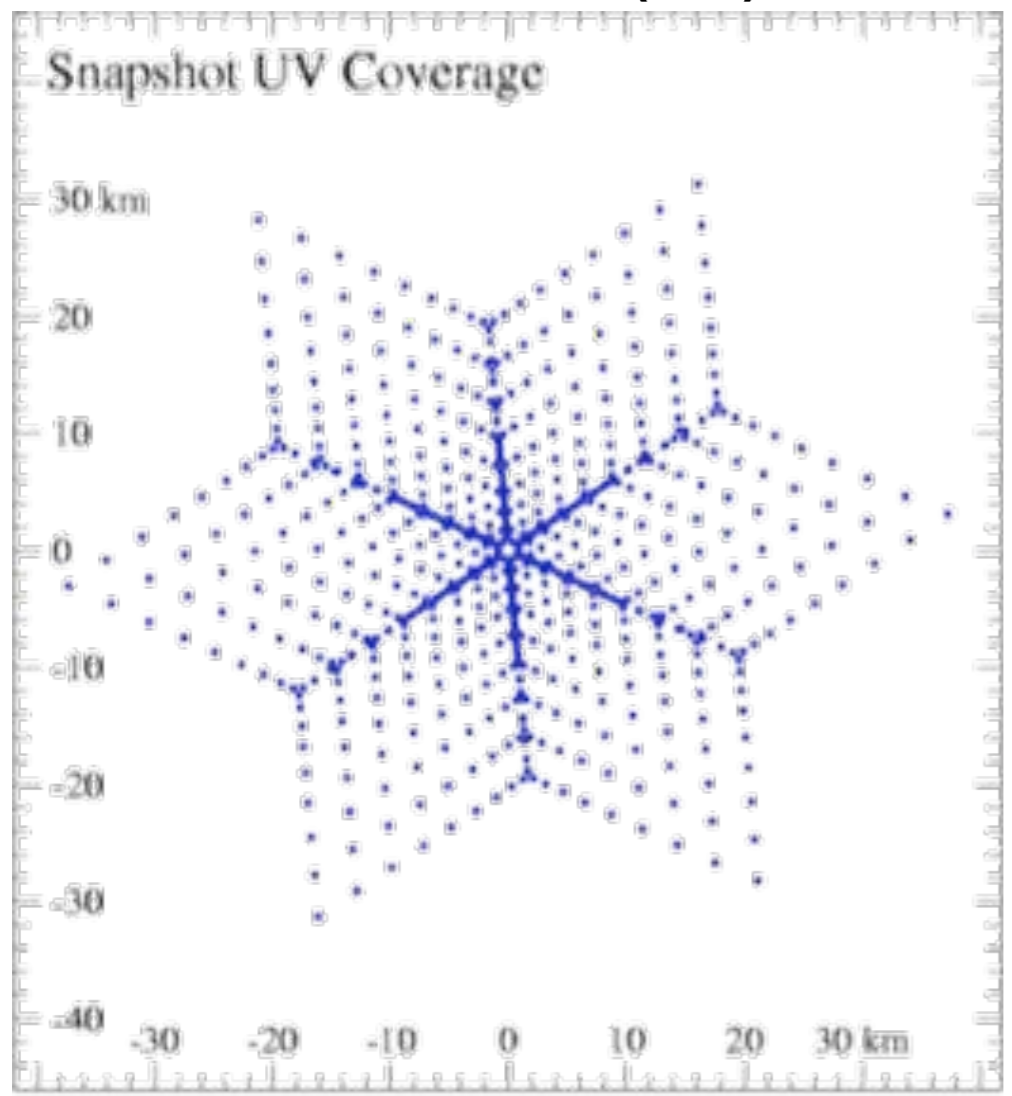


image "initiale" =  
« vrai » ciel \* PSF =

# Image "Dirty"

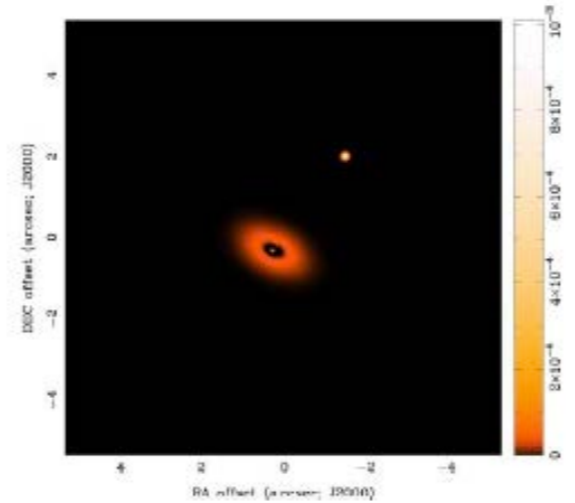
## Plan de Fourier

### Mesures de visibilité (u,v) instantanées



échantillonnage discret du plan de Fourier (u,v) plane

$\sim FT^{-1}$



### Espace image

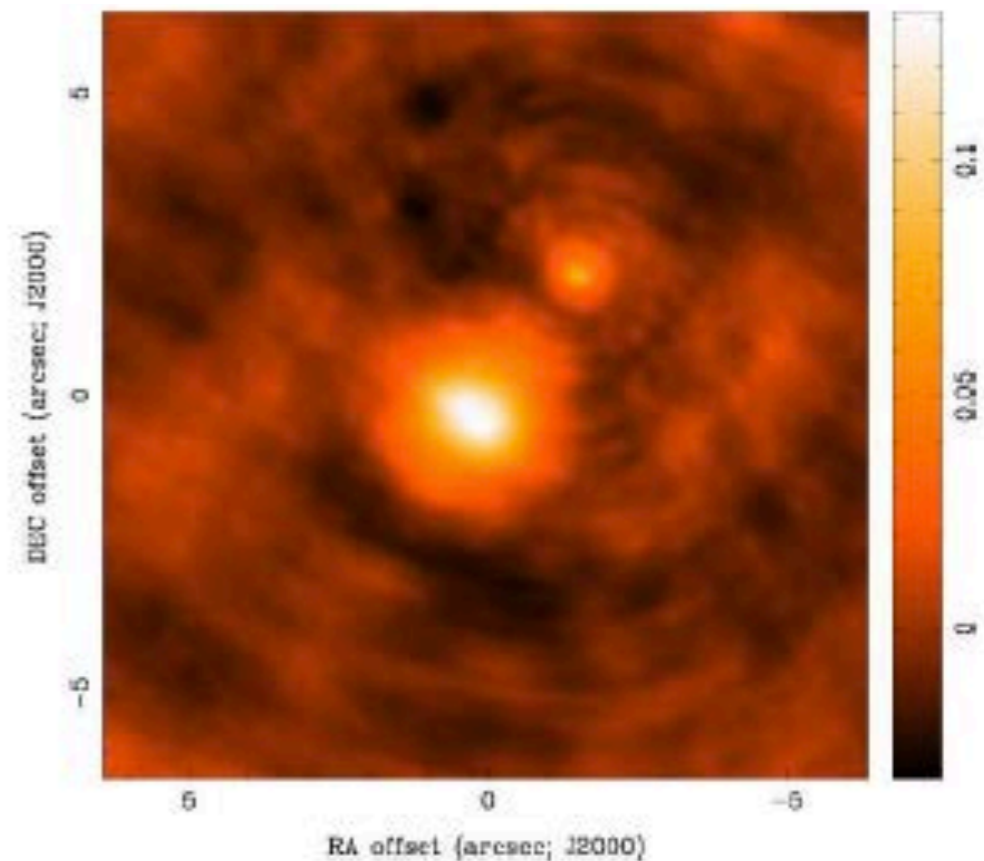


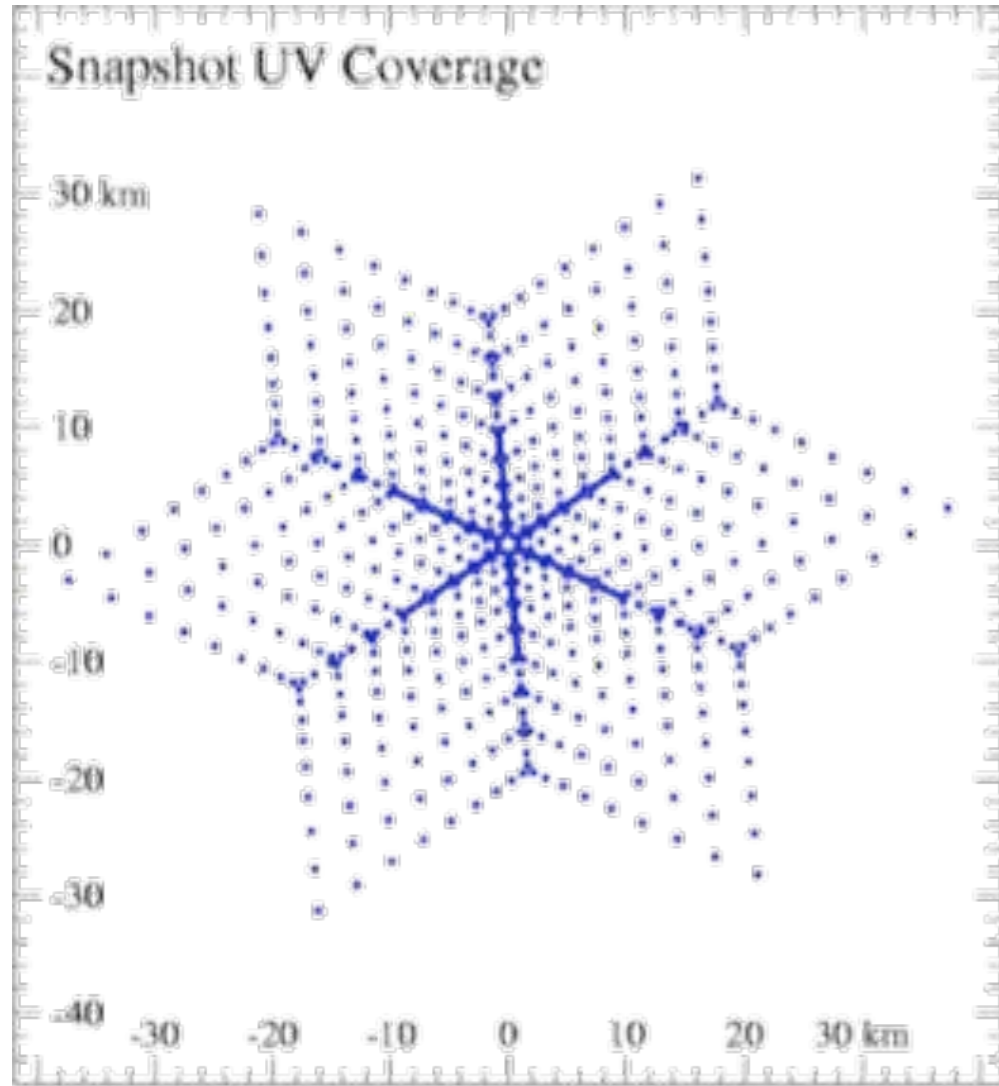
image "initiale" =  
« vrai » ciel \* PSF =

## Image "Dirty"

# Imagerie par synthèse d'ouverture

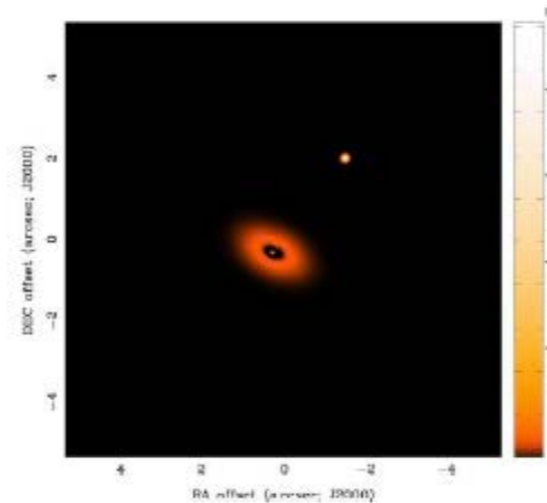
## Plan de Fourier

### Mesures de visibilité (u,v) instantanées



échantillonnage discret du plan de Fourier (u,v) plane

$\sim FT^{-1}$



### Espace image

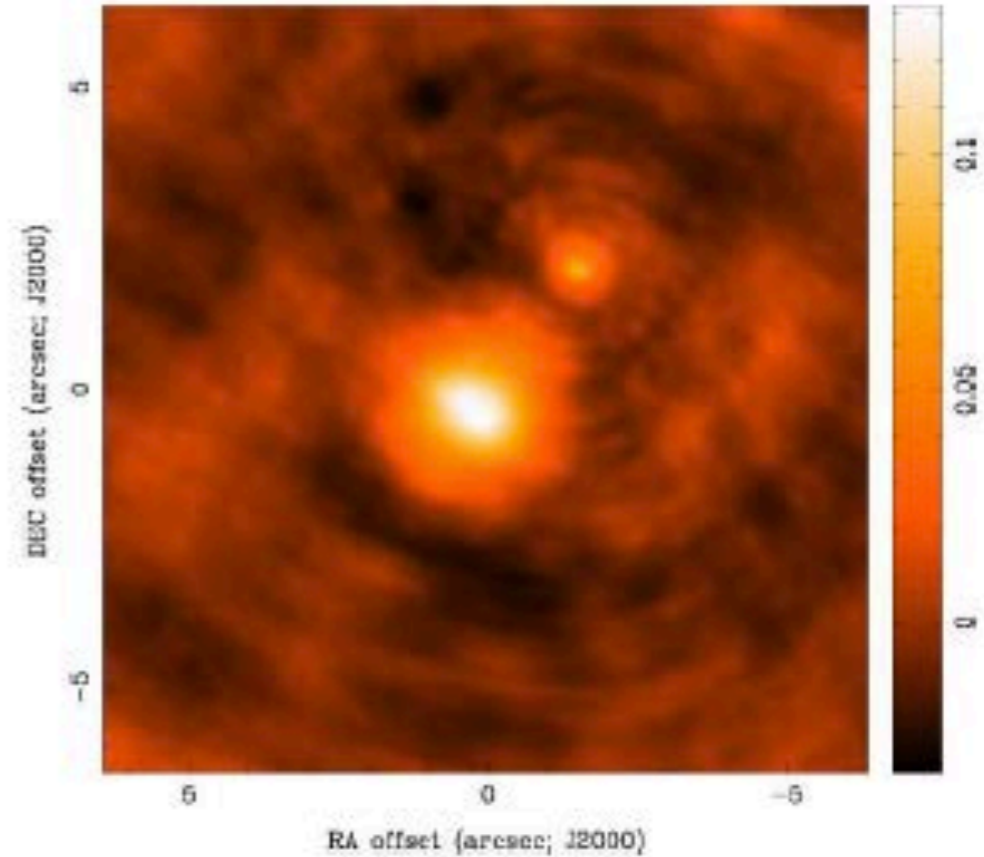


image "initiale" =  
« vrai » ciel \* PSF =

## Image "Dirty"

### Attention

- Faible échantillonnage dans Fourier
- Pas vraiment une TF
- les hypothèses simplificatrices ne tiennent plus

*redondance, échantillons insuffisants*  
*interféromètre non-coplanaire*  
*approximation petit champ*

} **Problème inverse difficile**

+ tous les effets dépendants de la direction (DDE) (Beam, ionosphere...)

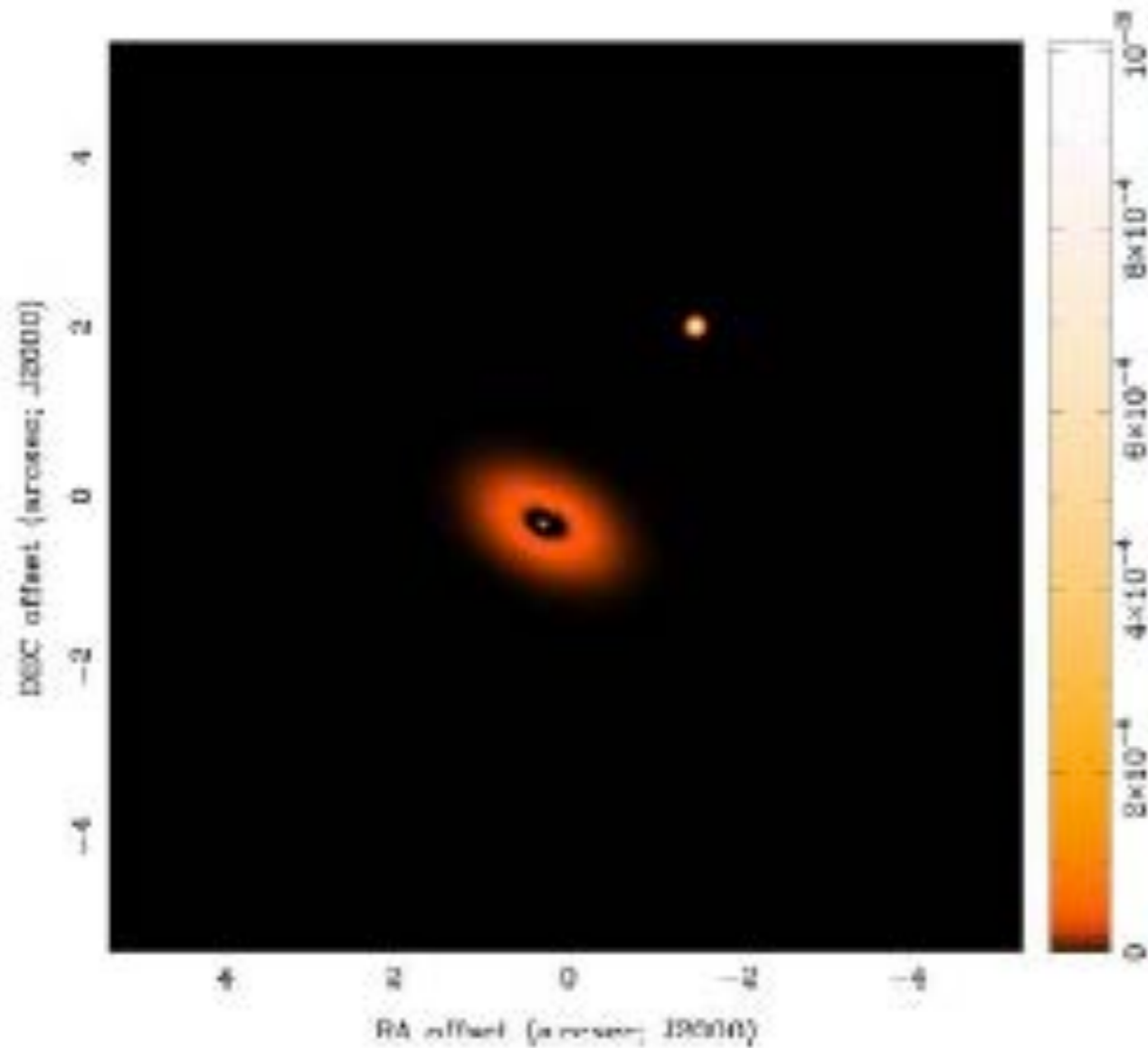
# Plan

- Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?
- Principe de la mesure par interférométrie
- Imagerie
- Déconvolution
- Tour d'horizon de l'imagerie radio



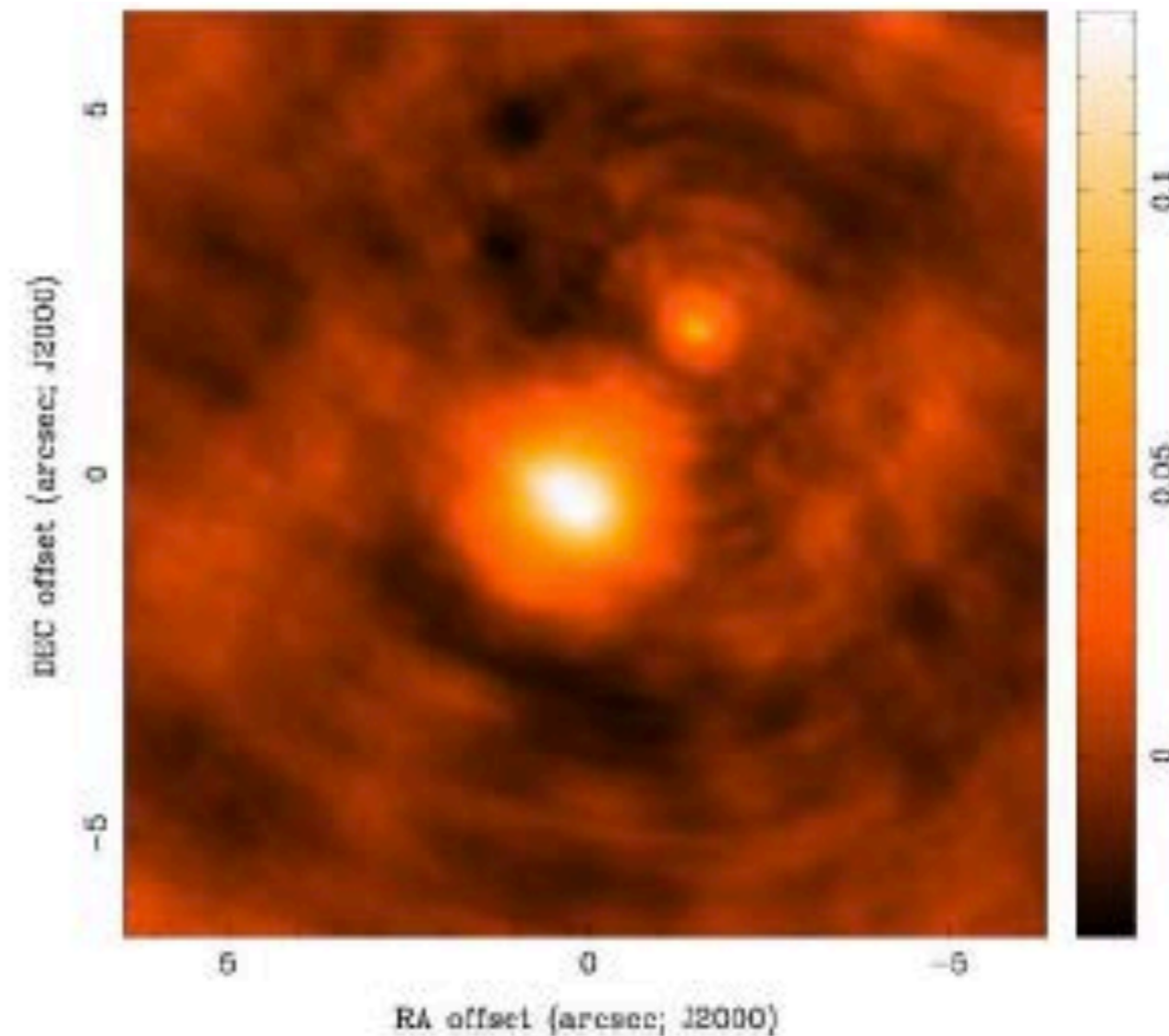
**Déconvolution** == retirer l'effet de la PSF synthétique  
== les conséquences de l'échantillonnage

Réalité "terrain"



- \* Mesure continue
- \* Résolution infinie

Inversion brutale des visibilité



- \* Mesure incomplète
- \* Résolution finie

# Déconvolution - Algorithme CLEAN

## CLEAN (1974)

- Optimal pour les point sources
- Algorithme itératif de soustraction graduelle de la PSF à l'image **Dirty**

## CLEAN (1974)

- Optimal pour les point sources
- Algorithme itératif de soustraction graduelle de la PSF à l'image **Dirty**

### Algorithme "CLEAN" classique

#### Initialisation

Création d'une image **residuals** initialisée avec la **Dirty**

Création d'une image **model** pour répertorier les détections

gain = 0.9 &  $N_{\max}$  & critère d'arrêt

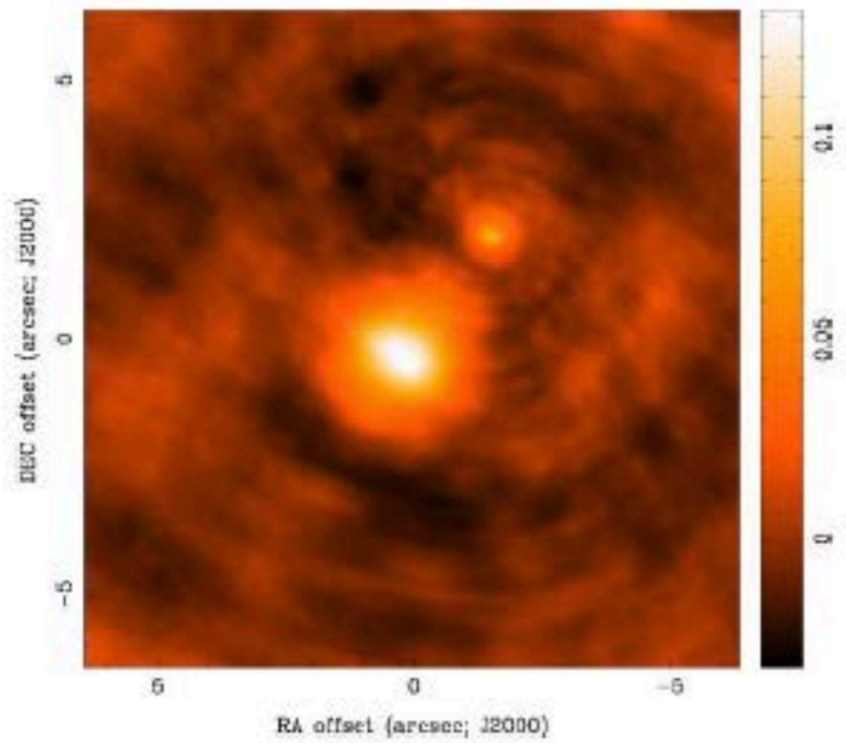
#### Pour $i < N_{\max}$ :

- 1) Recherche du maximum dans **residuals**  $\rightarrow (i_{\max}, j_{\max})$
- 2) Soustraction d'une fraction du max en utilisant la PSF centrée et mise à l'échelle du maximum  $f = \text{gain} \times \text{Residuals}(i_{\max}, j_{\max})$
- 3) Ajout de  $f$  aux coordonnées  $(i_{\max}, j_{\max})$  de l'image **model**
- 4) Retour à l'étape 1 de recherche du nouveau maximum

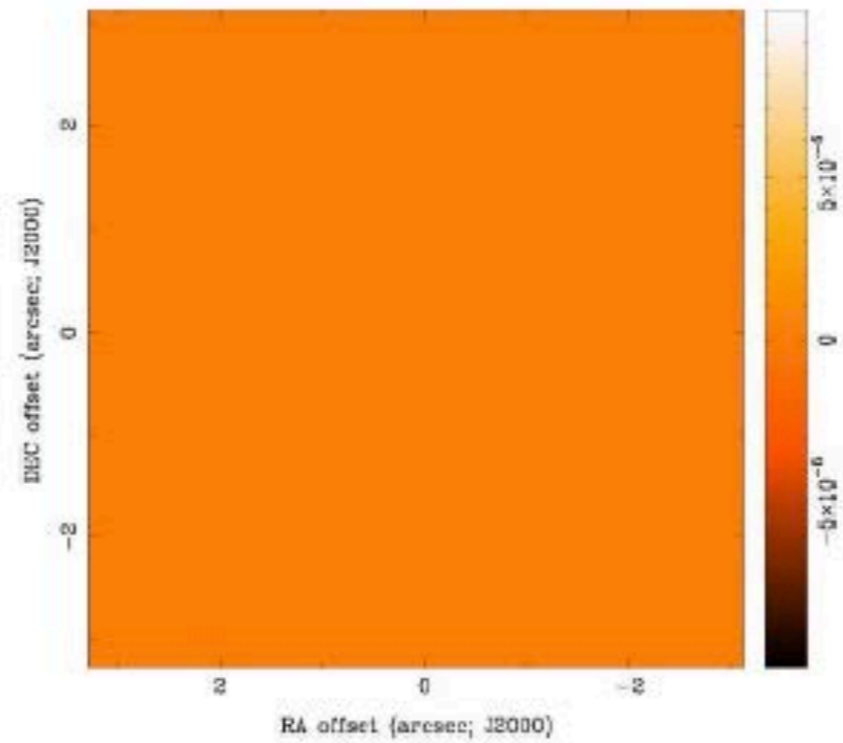
# Déconvolution - Algorithme CLEAN

**N<sub>iter</sub> = 0**

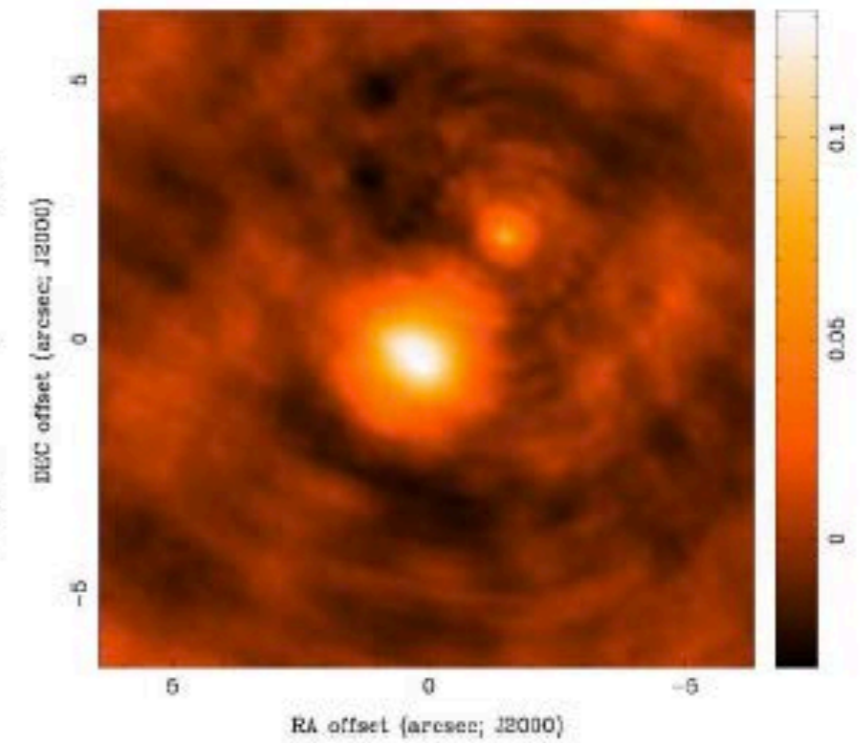
$T^D(l,m)$



0 Clean Components



residual map

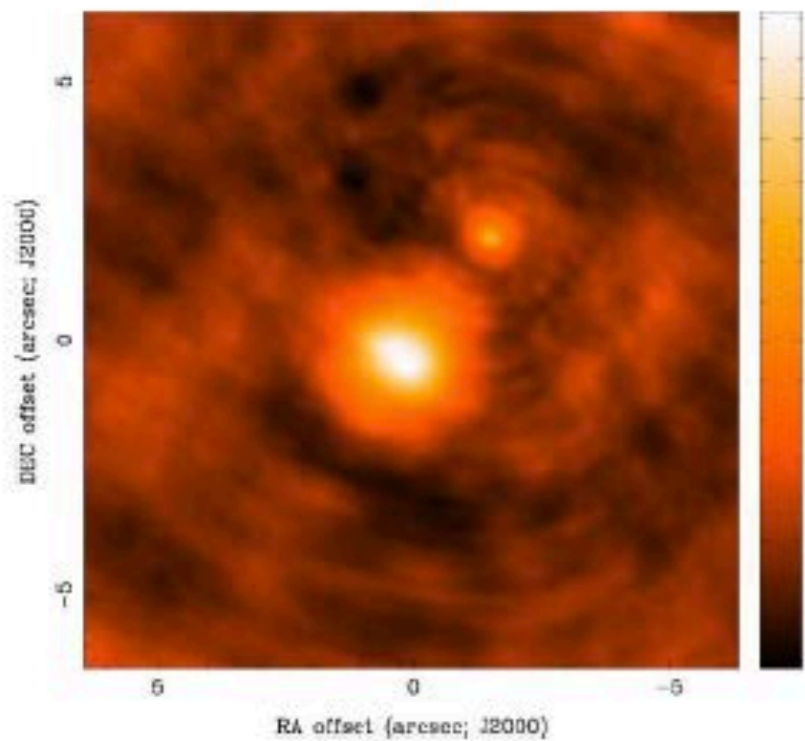


*Images from D. Wilner, NRAO*

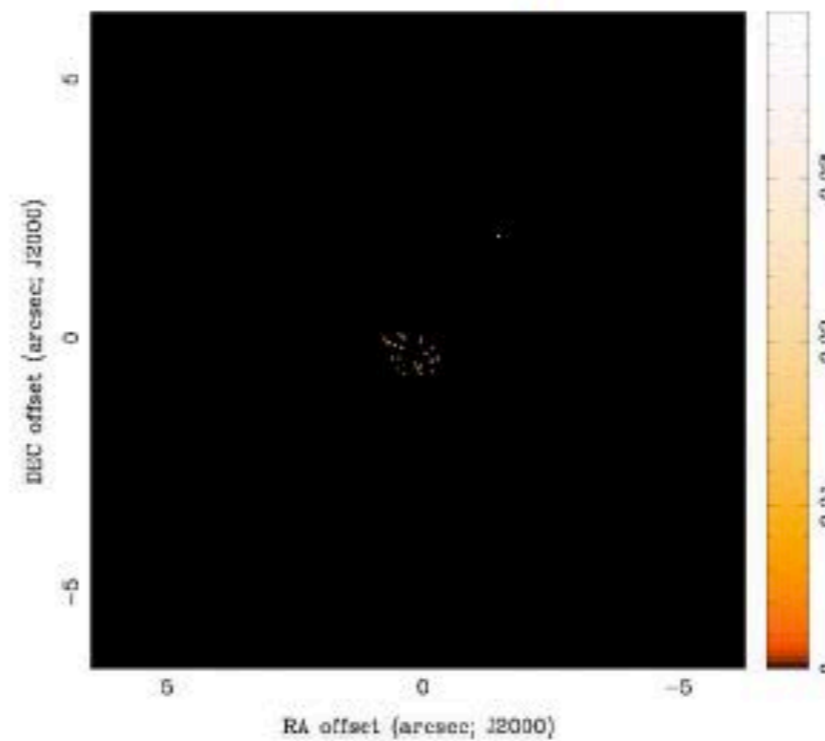
# Déconvolution - Algorithme CLEAN

$N_{\text{iter}} = 30$

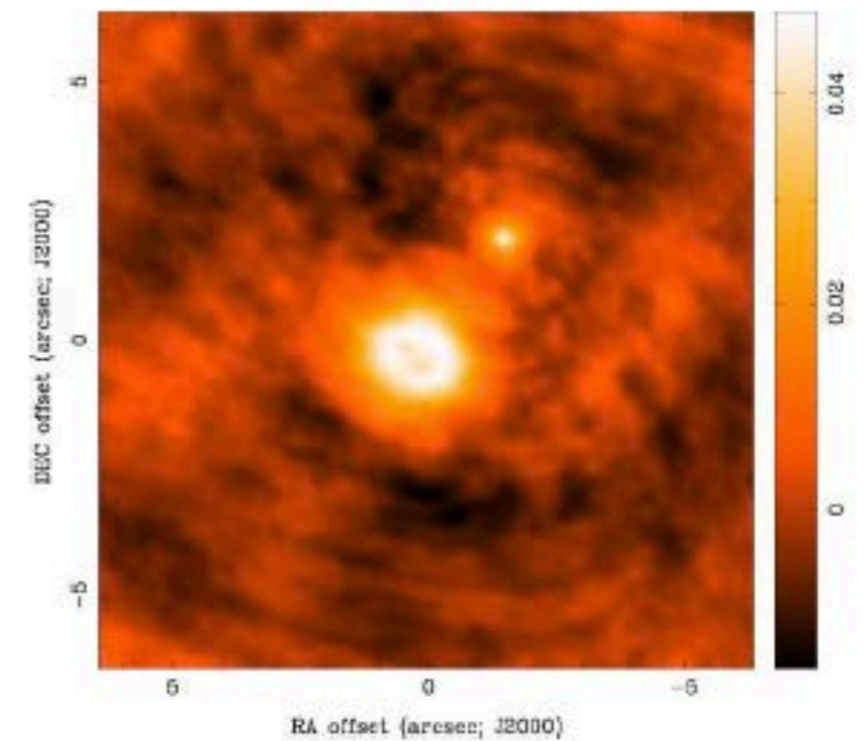
$T^D(l,m)$



30 Clean Components



residual map

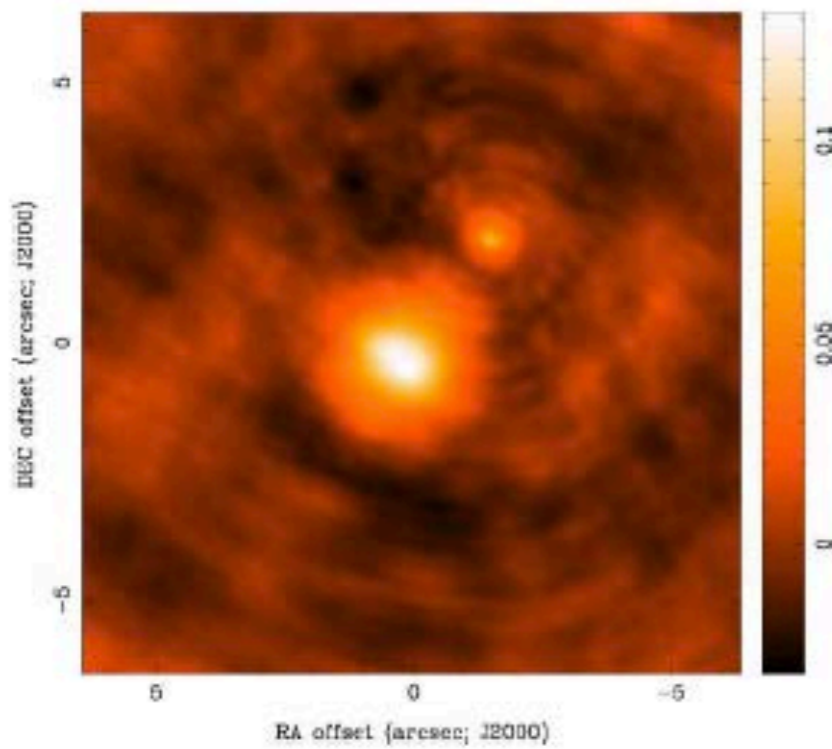


*Images from D. Wilner, NRAO*

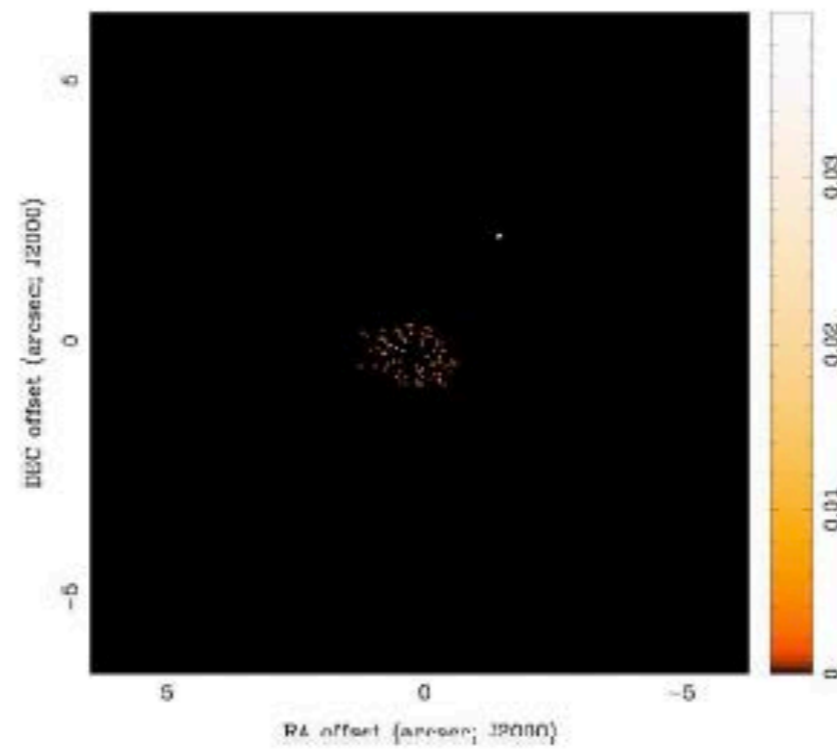
# Déconvolution - Algorithme CLEAN

$N_{\text{iter}} = 100$

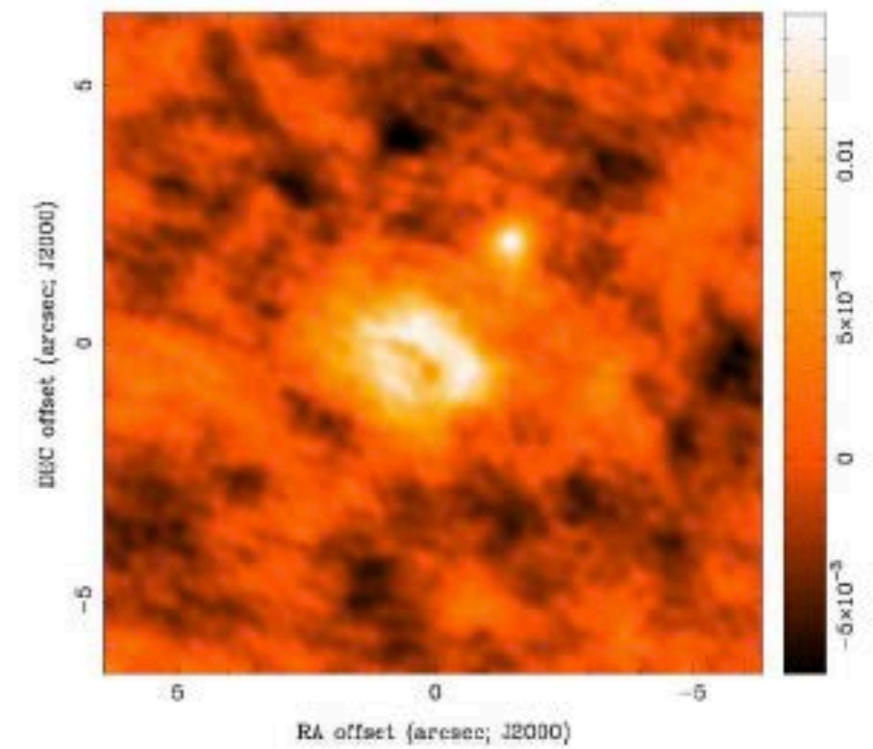
$T^D(l,m)$



100 Clean Components



residual map

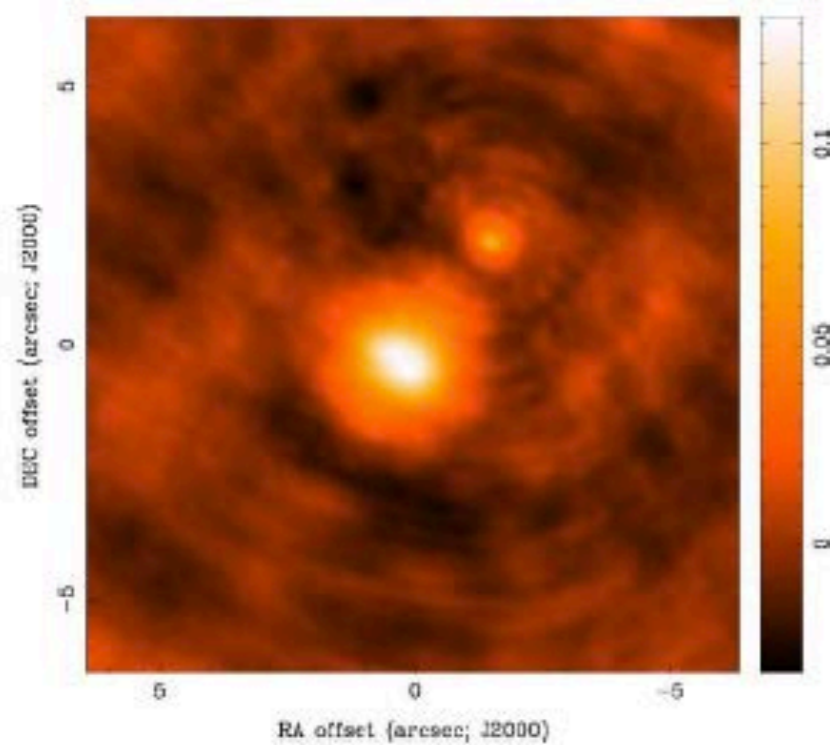


Images from D. Wilner, NRAO

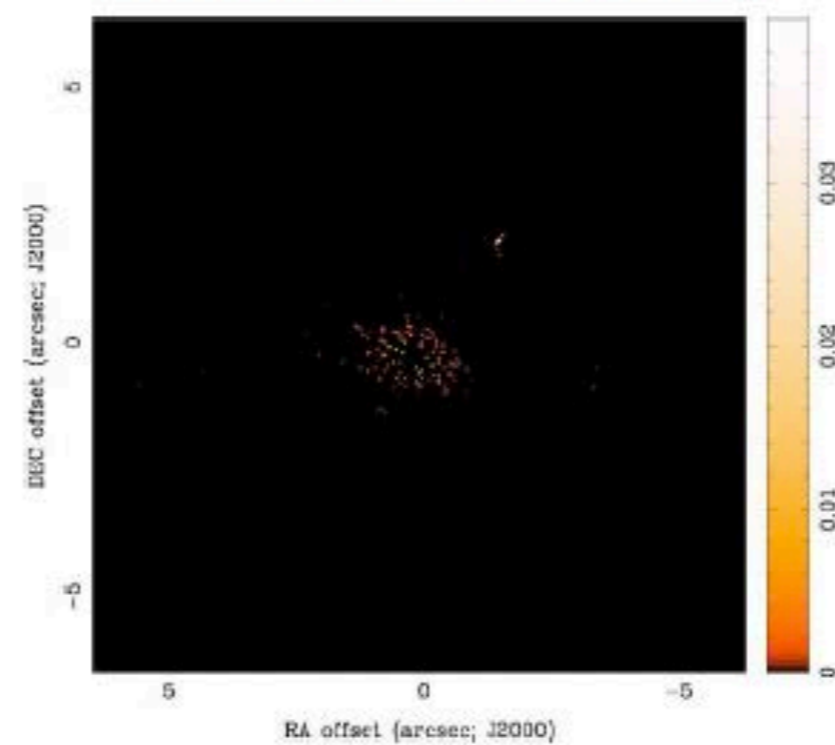
# Déconvolution - Algorithme CLEAN

$N_{\text{iter}} = 300$

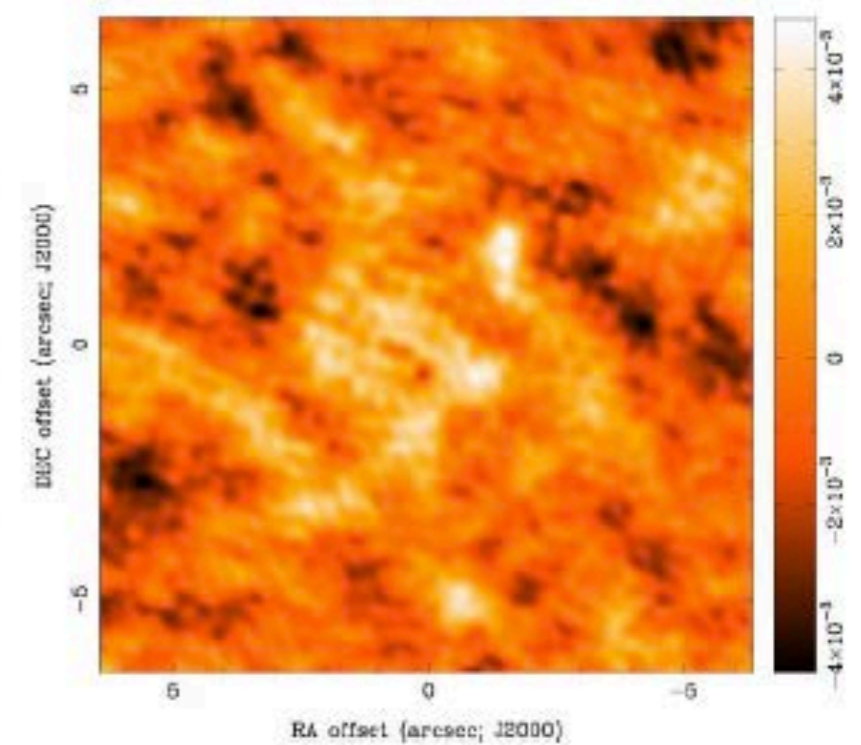
$T^D(l,m)$



300 Clean Components



residual map

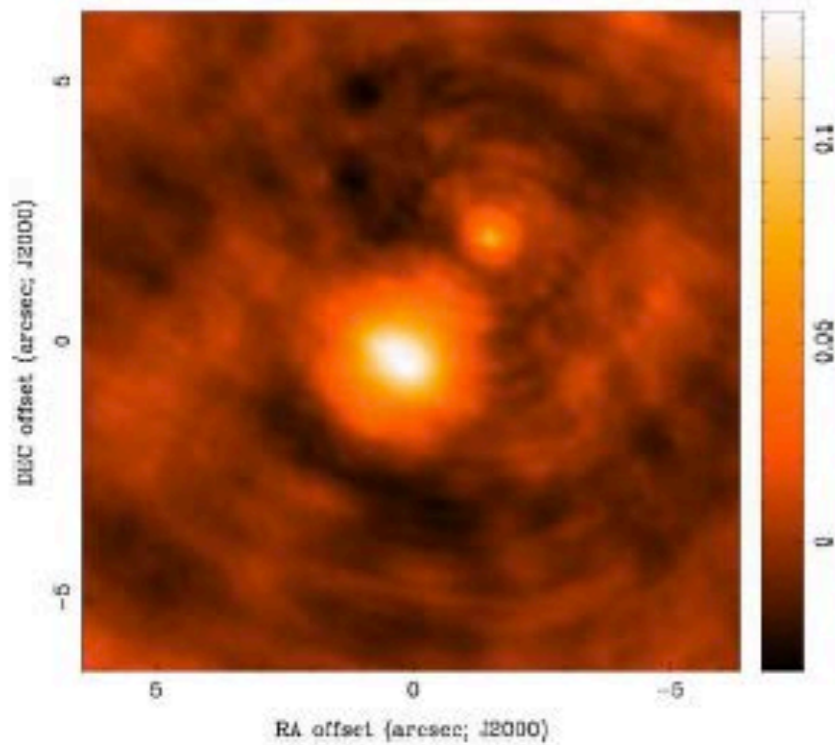


*Images from D. Wilner, NRAO*

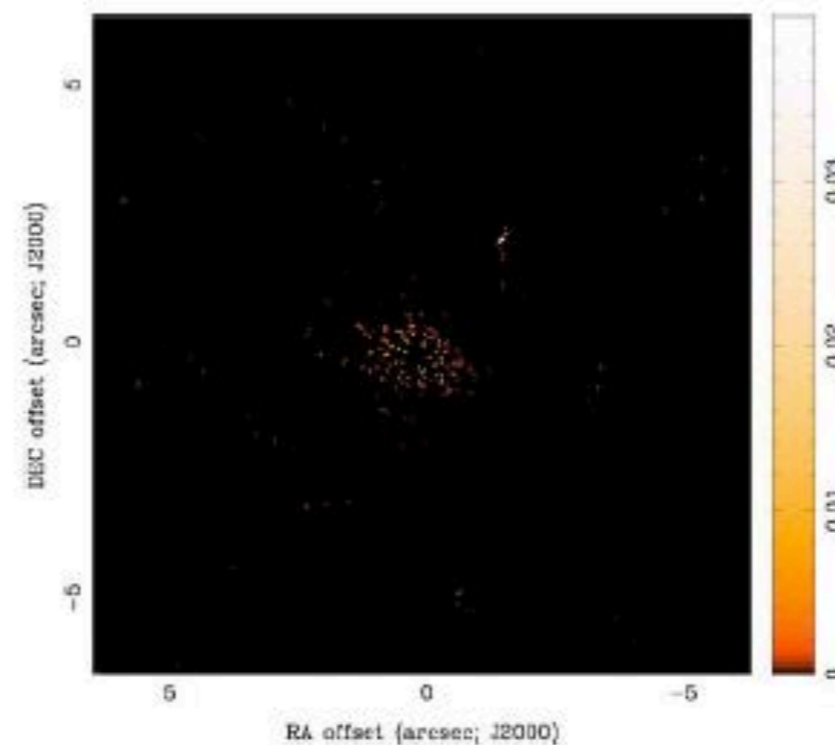
# Déconvolution - Algorithme CLEAN

$N_{\text{iter}} = 583$

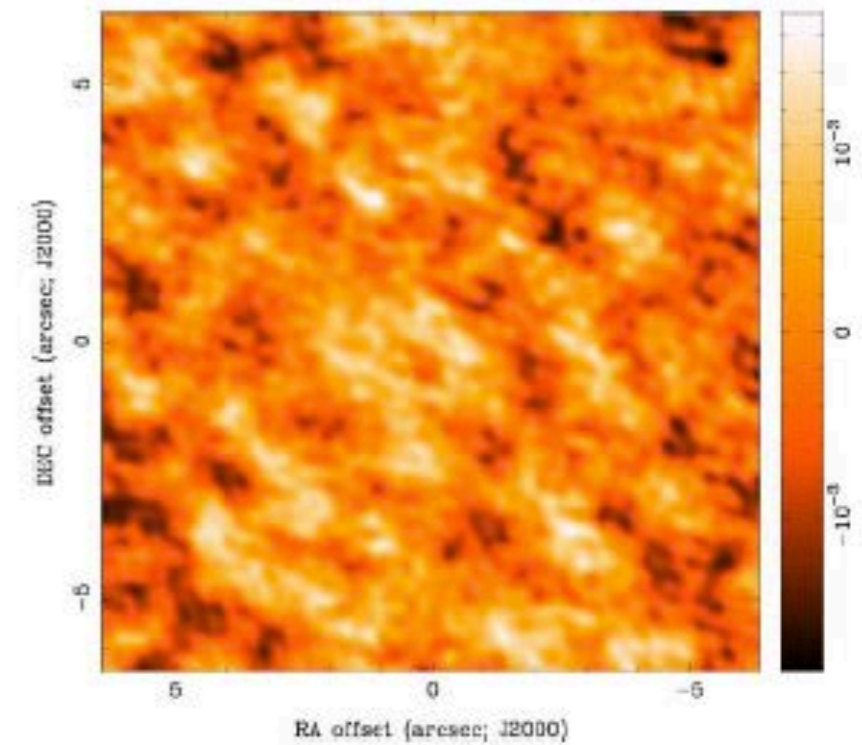
$T^D(l,m)$



583 Clean Components



residual map



Images from D. Wilner, NRAO



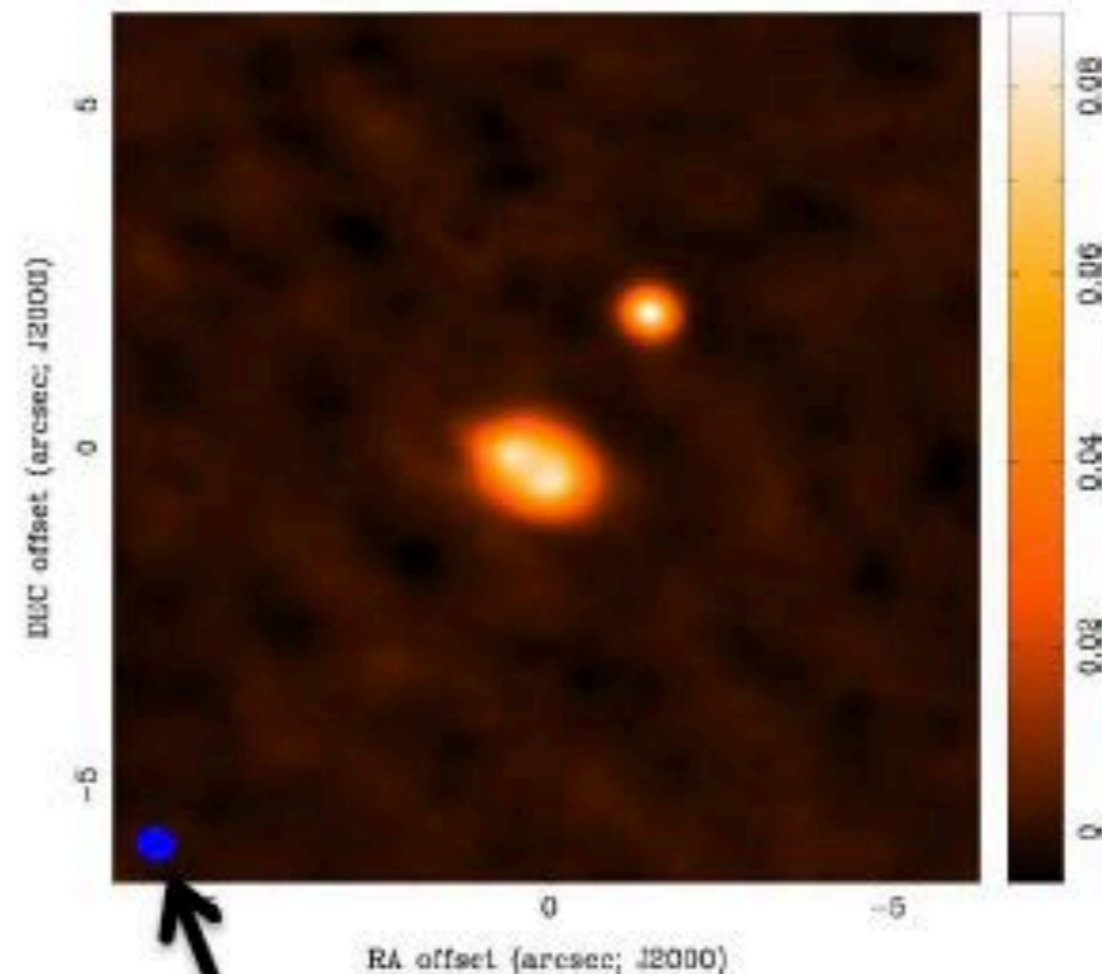
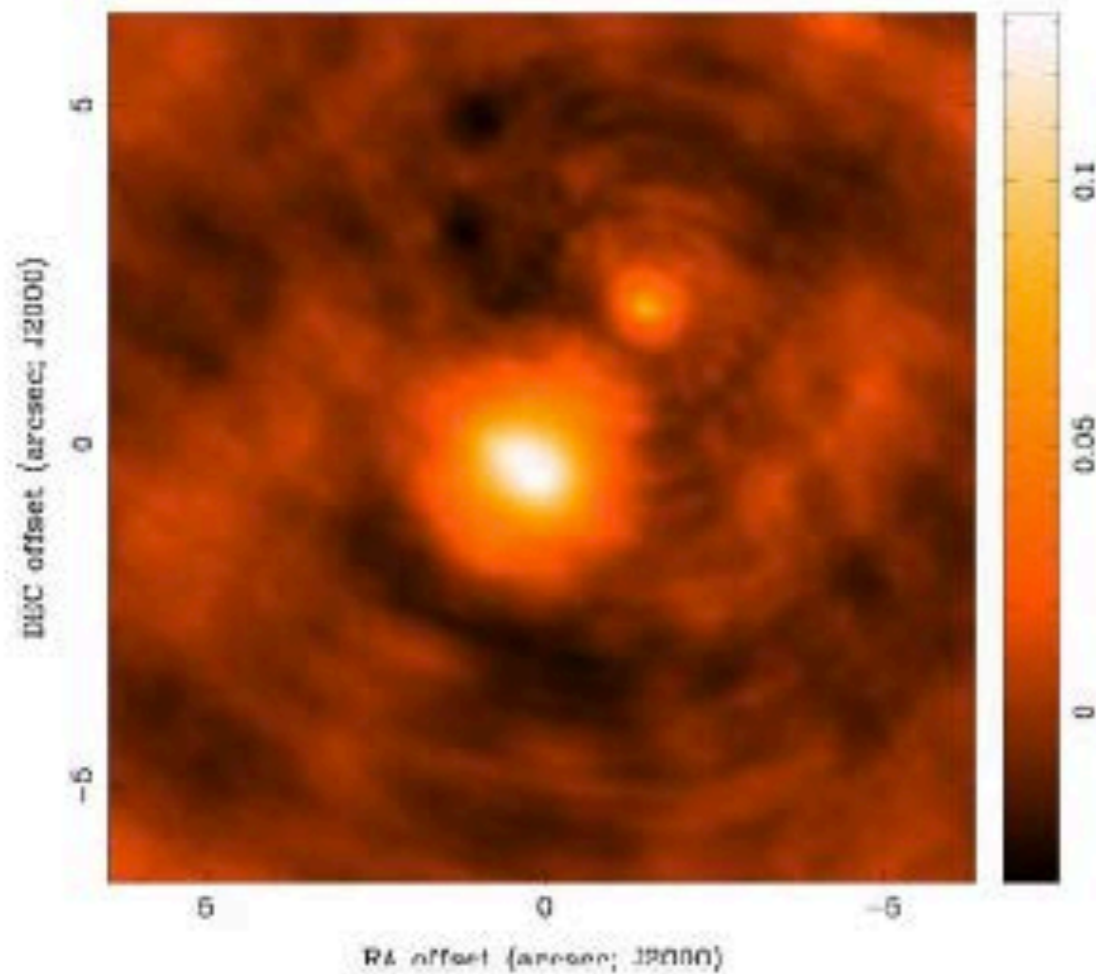
# Déconvolution - Algorithme CLEAN

À la fin, on convolue la carte des sources détectées avec une approximation lisse de la PSF

le "clean" beam

$T^D(l,m)$

restored image



ellipse = clean beam fwhm

Images from D. Wilner, NRAO

# Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~40 ans de développement en déconvolution

*Multifrequency, Multiscale CLEAN...*

# Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~40 ans de développement en déconvolution *Multifrequency, Multiscale CLEAN...*
- Aujourd'hui, prise en compte des **effets dépendants de la direction** *Imagerie ~ Étalonnage*

# Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

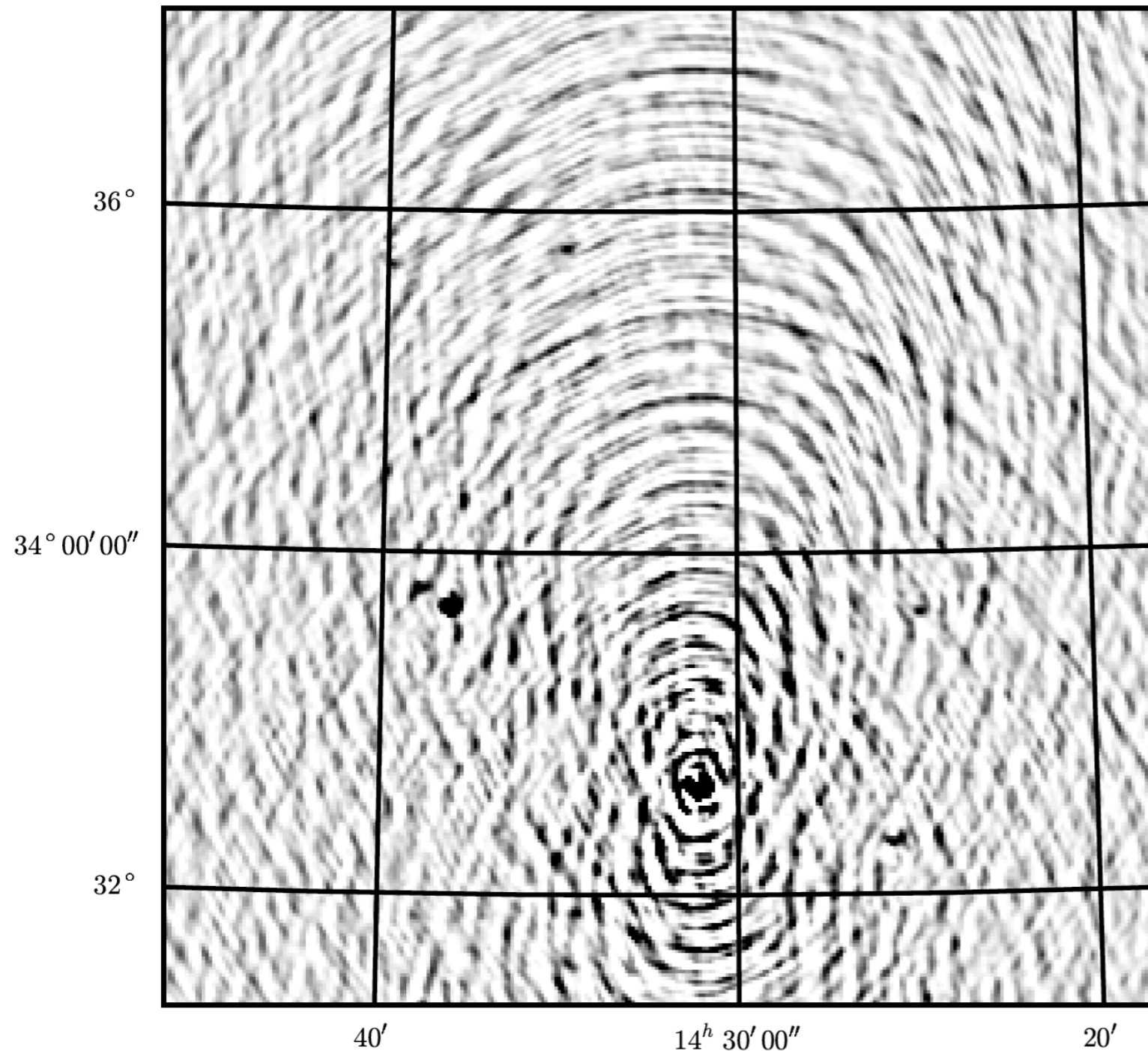
- ~40 ans de développement en déconvolution

*Multifrequency, Multiscale CLEAN...*

- Aujourd'hui, prise en compte des **effets dépendants de la direction** *Imagerie ~ Étalonnage*

**Imagerie grand champ**

**Terme de réseau seul  
(PSF)**



**Tasse et al. 2012**

# Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~40 ans de développement en déconvolution

*Multifrequency, Multiscale CLEAN...*

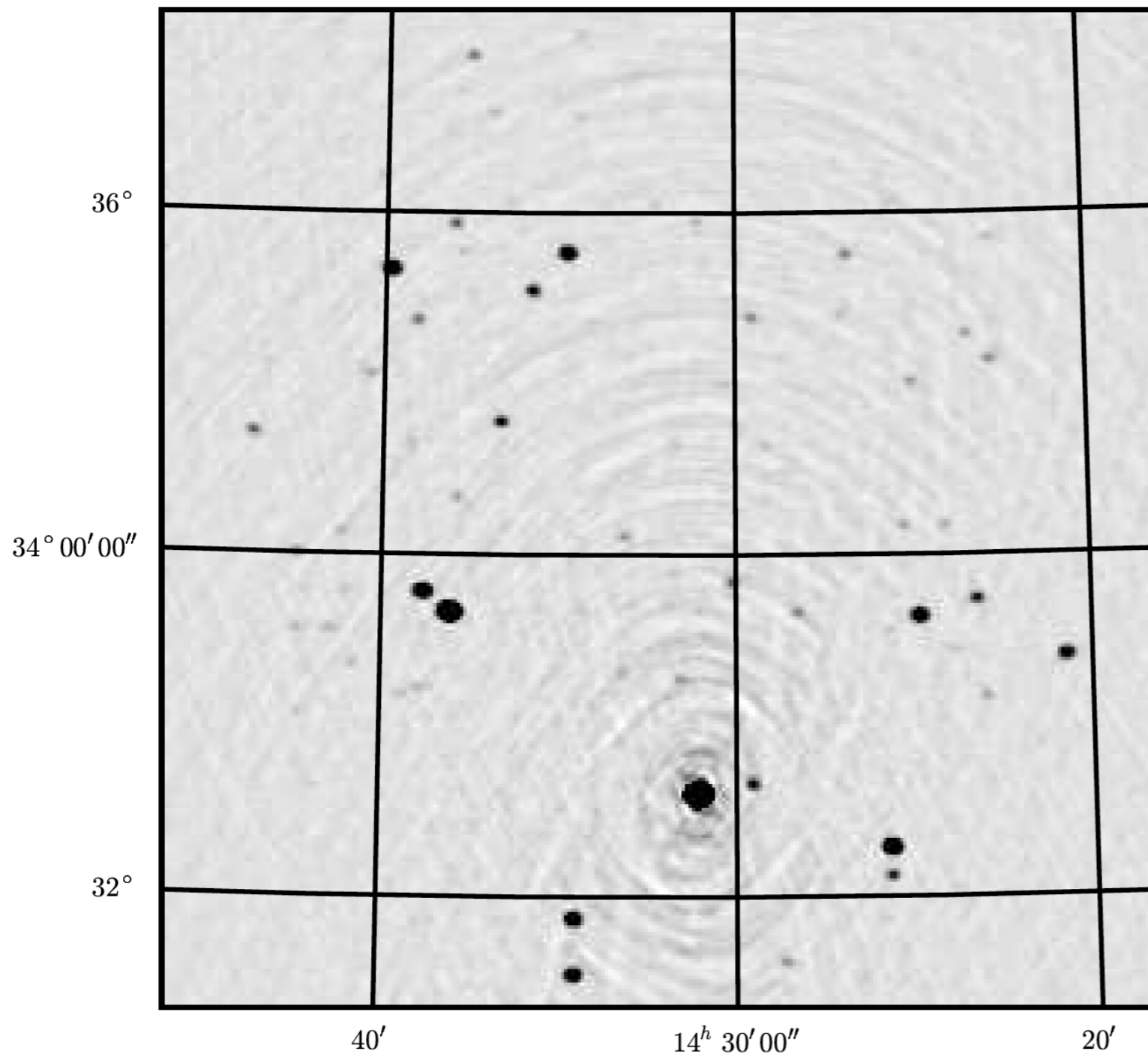
- Aujourd'hui, prise en compte des **effets dépendants de la direction** *Imagerie ~ Étalonnage*

**Imagerie grand champ**

**Terme de réseau seul  
(PSF)**

**+**

**Correction de la  
non-coplanarité du réseau  
(Et/ou grand champ)  
("W-term"  $\neq 0$ )**



**Tasse et al. 2012**

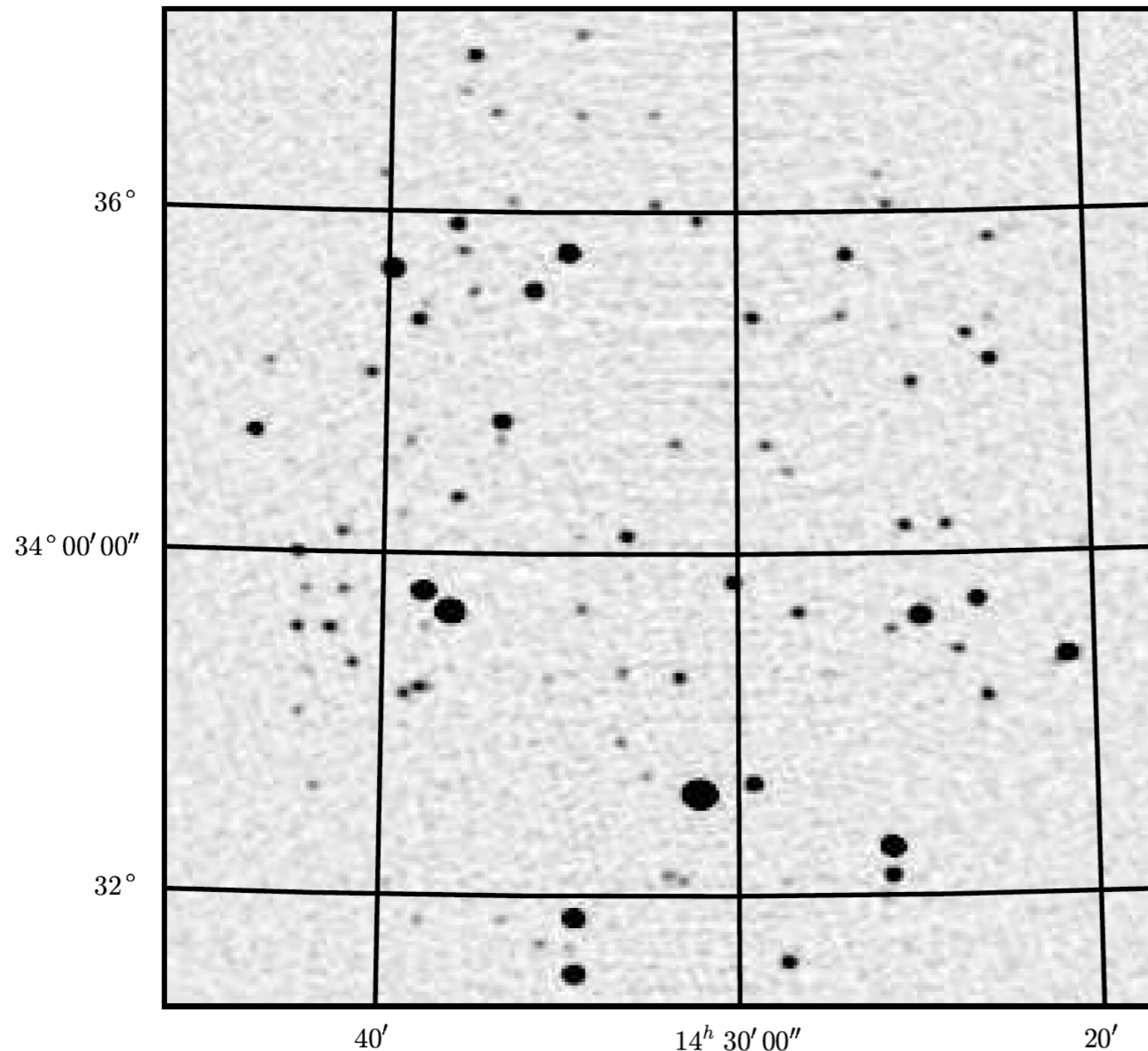
# Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~40 ans de développement en déconvolution

*Multifrequency, Multiscale CLEAN...*

- Aujourd'hui, prise en compte des **effets dépendants de la direction** *Imagerie ~ Étalonnage*

**Imagerie grand champ**



**Terme de réseau seul  
(PSF)**

**+**

**Correction de la  
non-coplanarité du réseau  
(Et/ou grand champ)  
("W-term"  $\neq 0$ )**

**+**

**Correction de la réponse  
de l'antenne élémentaire  
("E-term")**

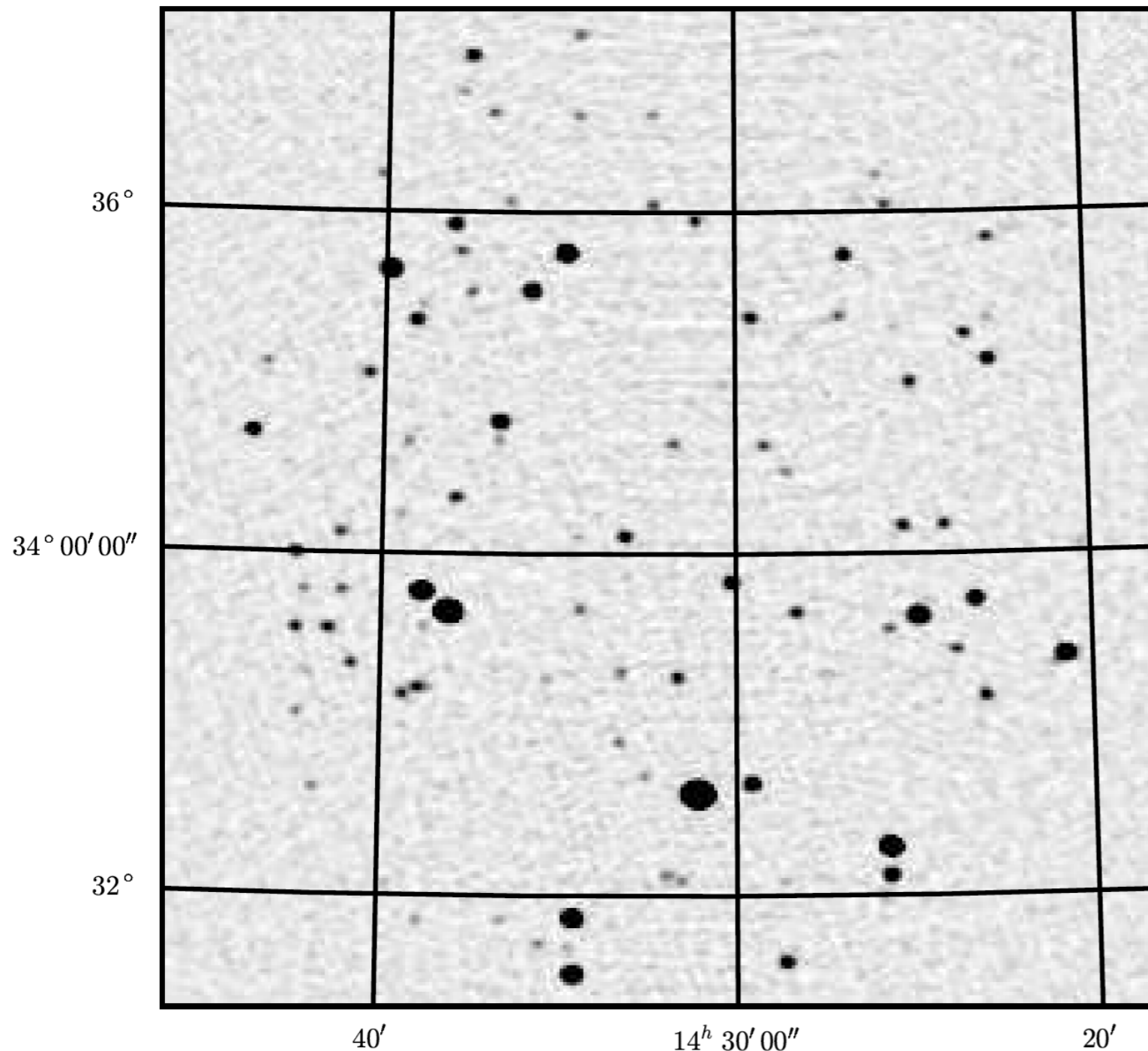
# Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~40 ans de développement en déconvolution

*Multifrequency, Multiscale CLEAN...*

- Aujourd'hui, prise en compte des **effets dépendants de la direction** *Imagerie ~ Étalonnage*

**Imagerie grand champ**



**Terme de réseau seul  
(PSF)**

**+**

**Correction de la  
non-coplanarité du réseau  
(Et/ou grand champ)  
("W-term"  $\neq 0$ )**

**+**

**Correction de la réponse  
de l'antenne élémentaire  
("E-term")**

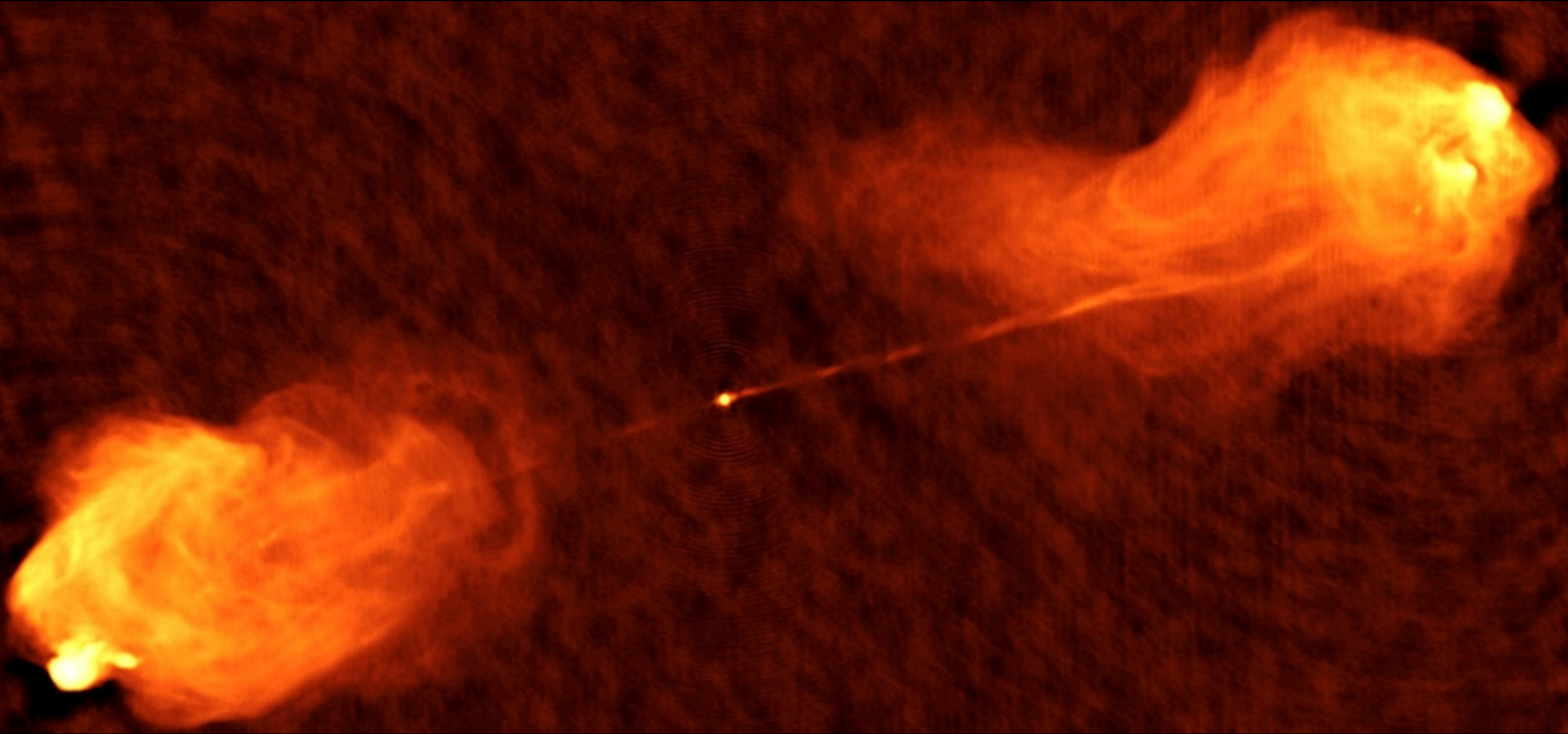
**Formalisme de Jones  
Hamaker, Bregman, Sault, 1996,...**

# Plan

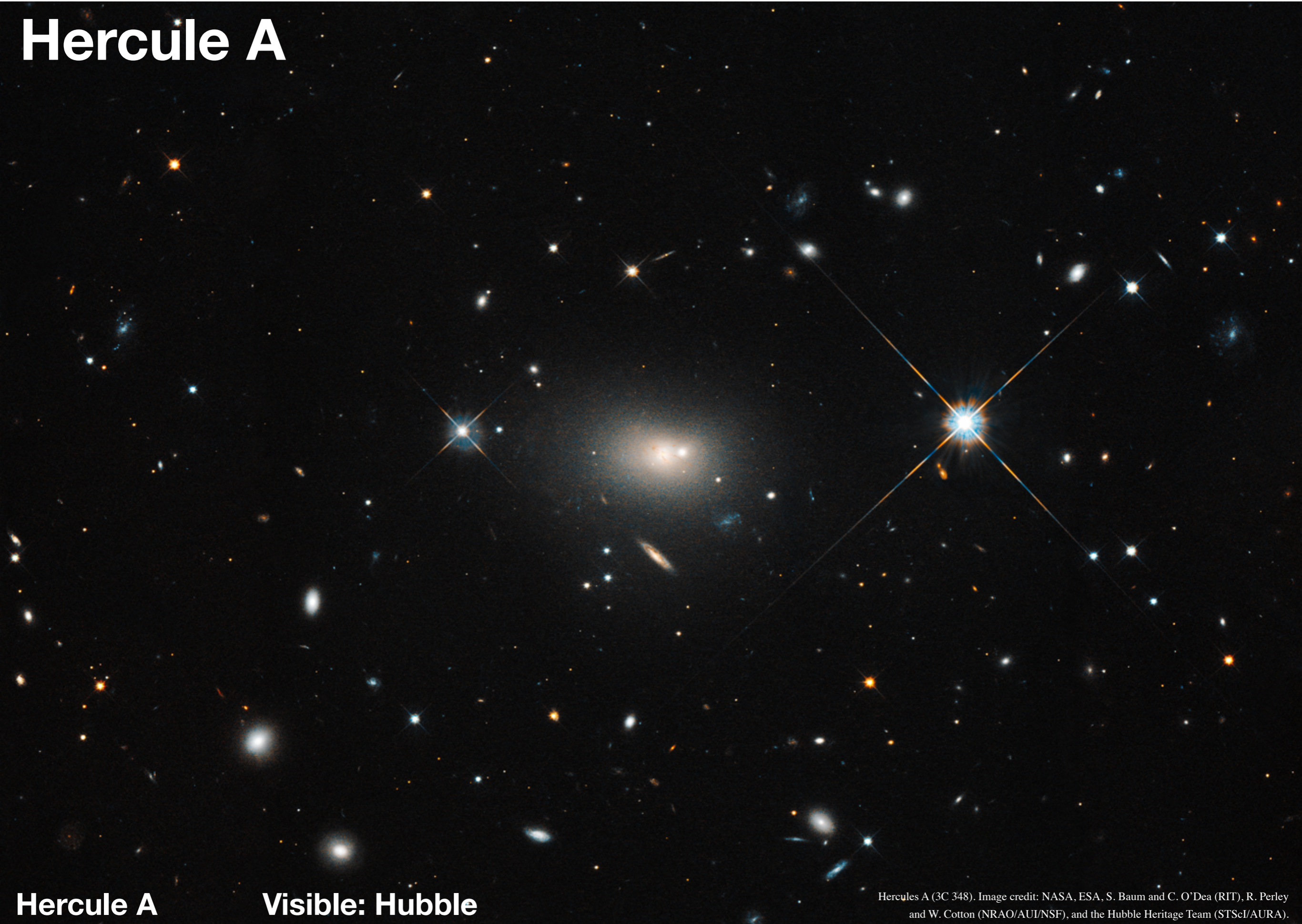
- Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?
- Principe de la mesure par interférométrie
- Imagerie
- Déconvolution
- Tour d'horizon de l'imagerie radio



# Cygnus A



# Hercule A

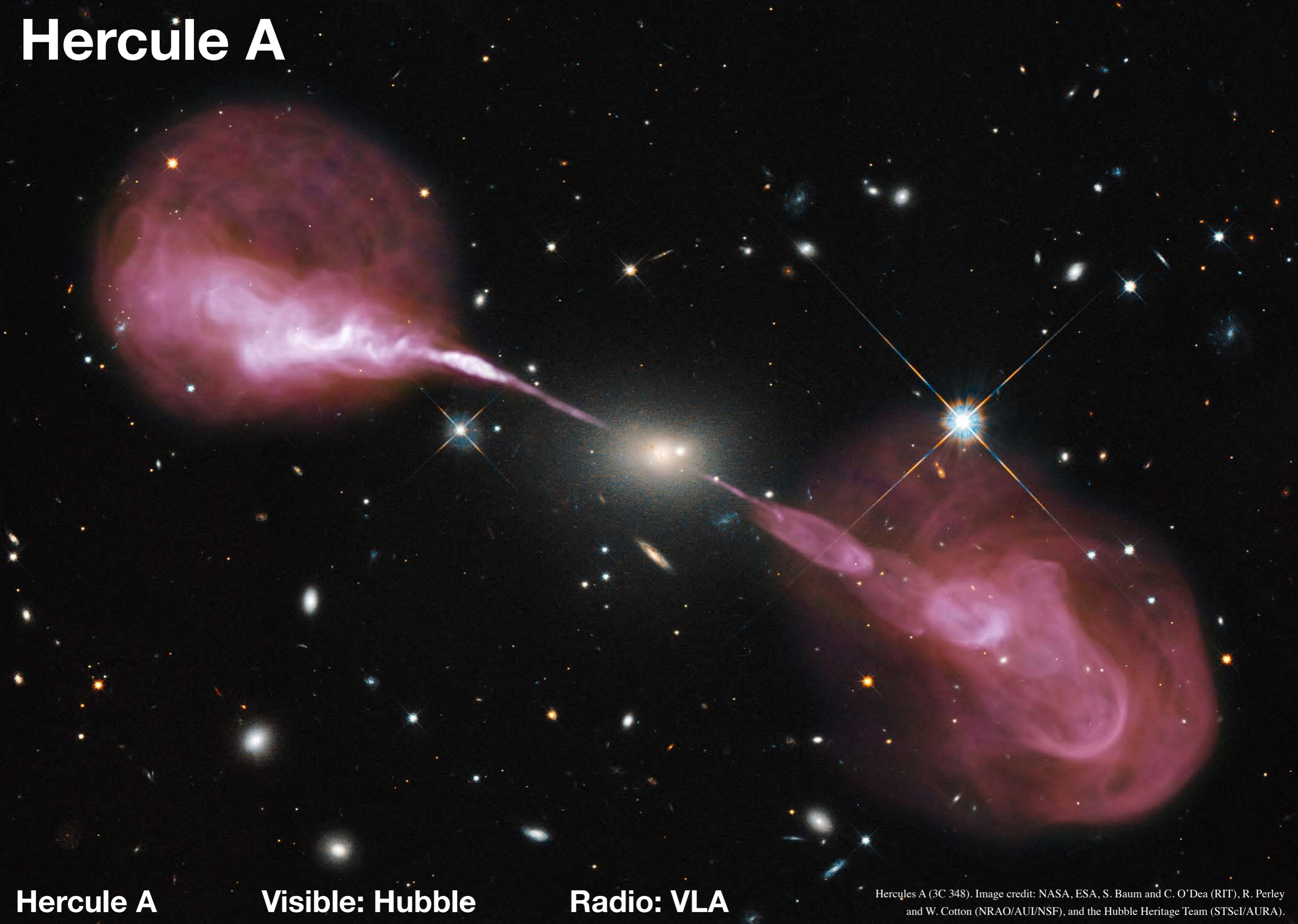


**Hercule A**

**Visible: Hubble**

Hercules A (3C 348). Image credit: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

# Hercule A



**Hercule A**

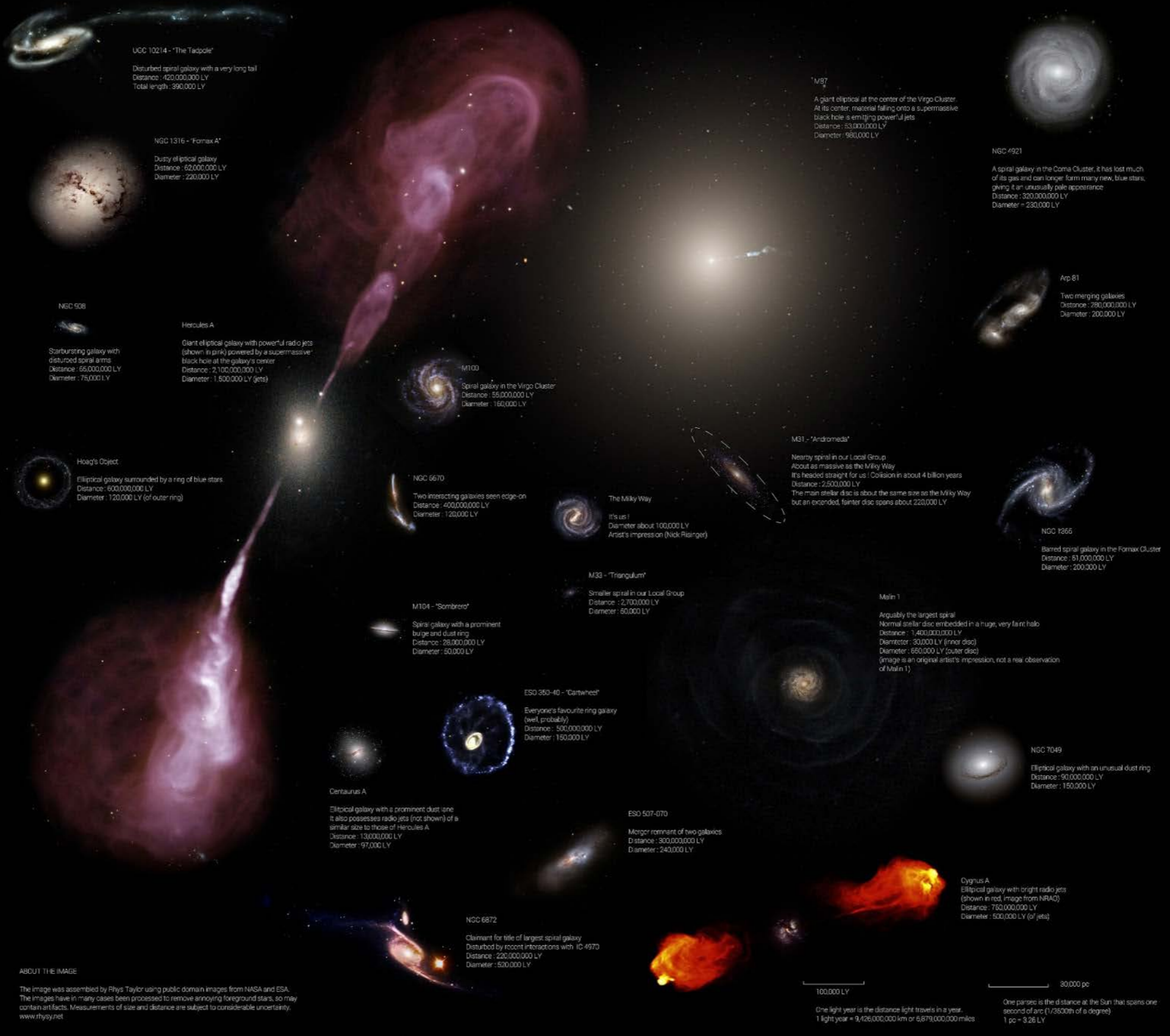
**Visible: Hubble**

**Radio: VLA**

Hercules A (3C 348). Image credit: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

# Galaxy Size Comparison Chart

A selection of galaxies shown to the same scale

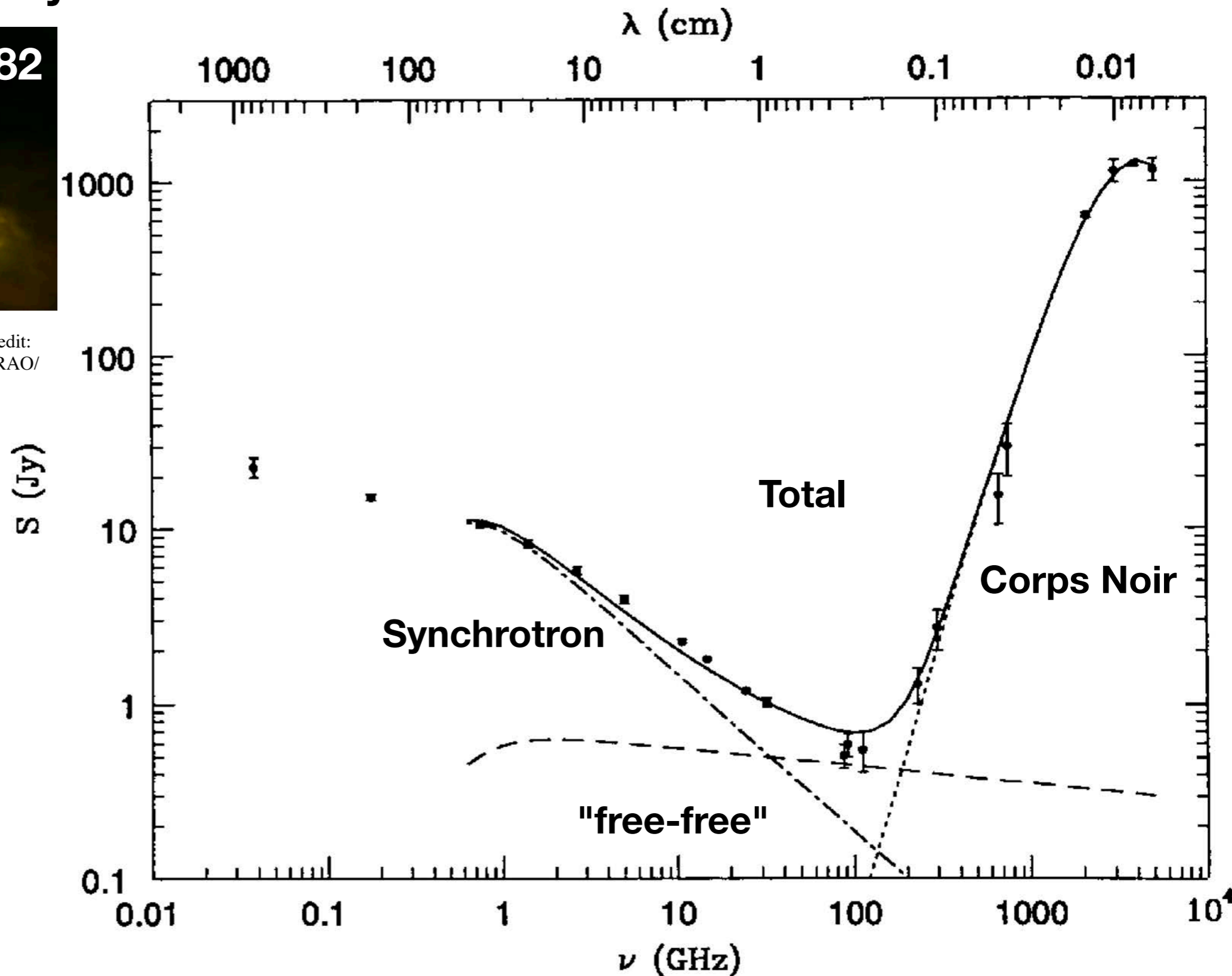


# Ciel radio et diversité des rayonnements en radio

## Combinaison des rayonnements



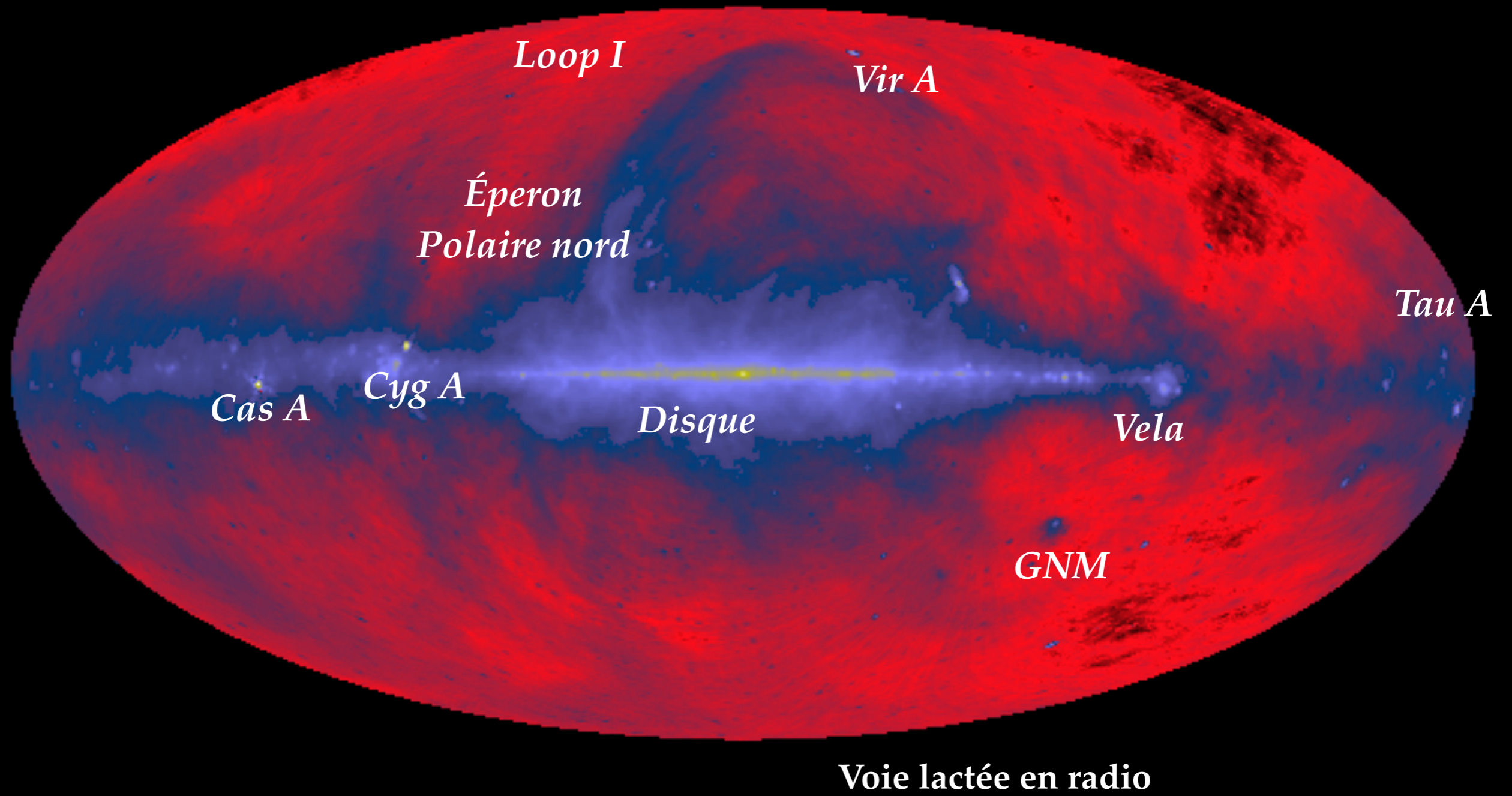
Radio continuum emission from M82. Image credit: Josh Marvil (NM Tech/NRAO), Bill Saxton (NRAO/AUI/NSF), Hubble (NASA/ESA/STScI).



The radio and far-infrared spectrum of the nearby starburst galaxy M82. The contribution of free-free emission is indicated by the nearly horizontal dashed line. Synchrotron radiation (dot-dash line) and thermal dust emission (dots) dominate at low and high frequencies, respectively. Free-free absorption from Hii regions distributed throughout the galaxy absorbs some of the synchrotron radiation and flattens the overall spectrum at the lowest frequencies.

# Diversité des sources radio

## La voie Lactée



# Diversité des sources radio

La voie Lactée

SNR

Nuages Moléculaires

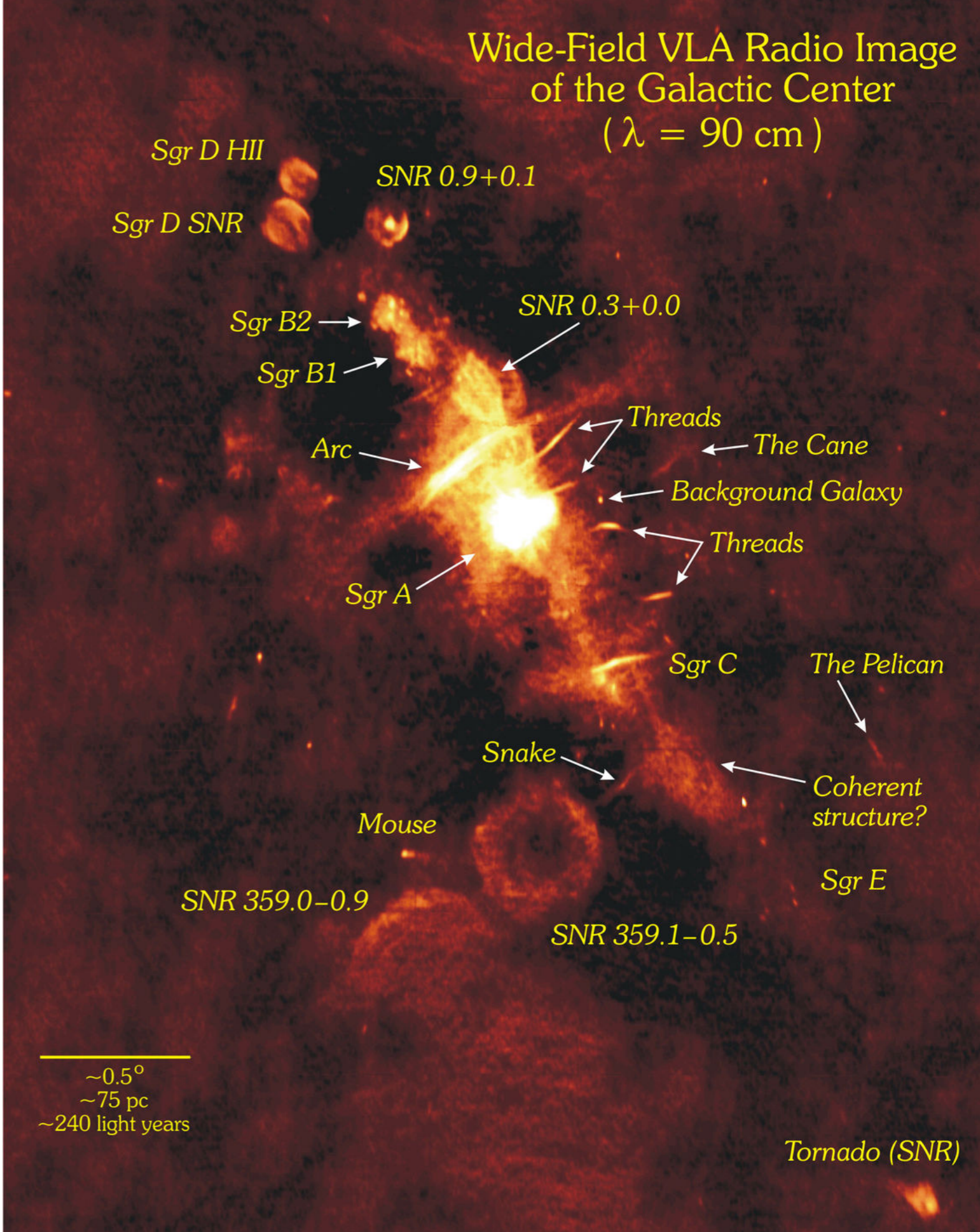
Filaments

Régions HII

Synchrotron diffus

Credit: NRAO/AUI and N.E. Kassim, Naval Research Laboratory

Wide-Field VLA Radio Image of the Galactic Center ( $\lambda = 90 \text{ cm}$ )

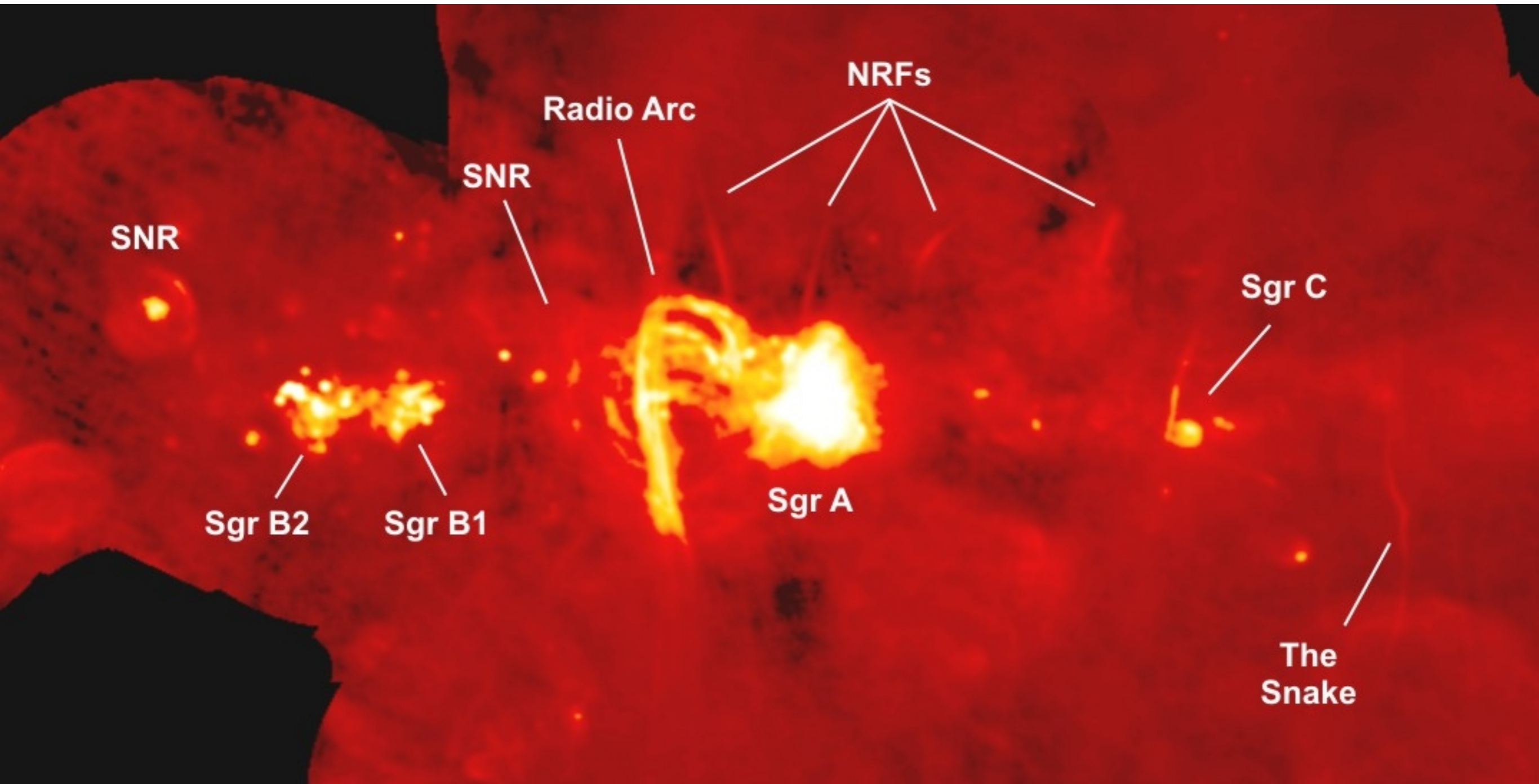


~0.5°  
~75 pc  
~240 light years

Tornado (SNR)

# Diversité des sources radio

## La voie Lactée



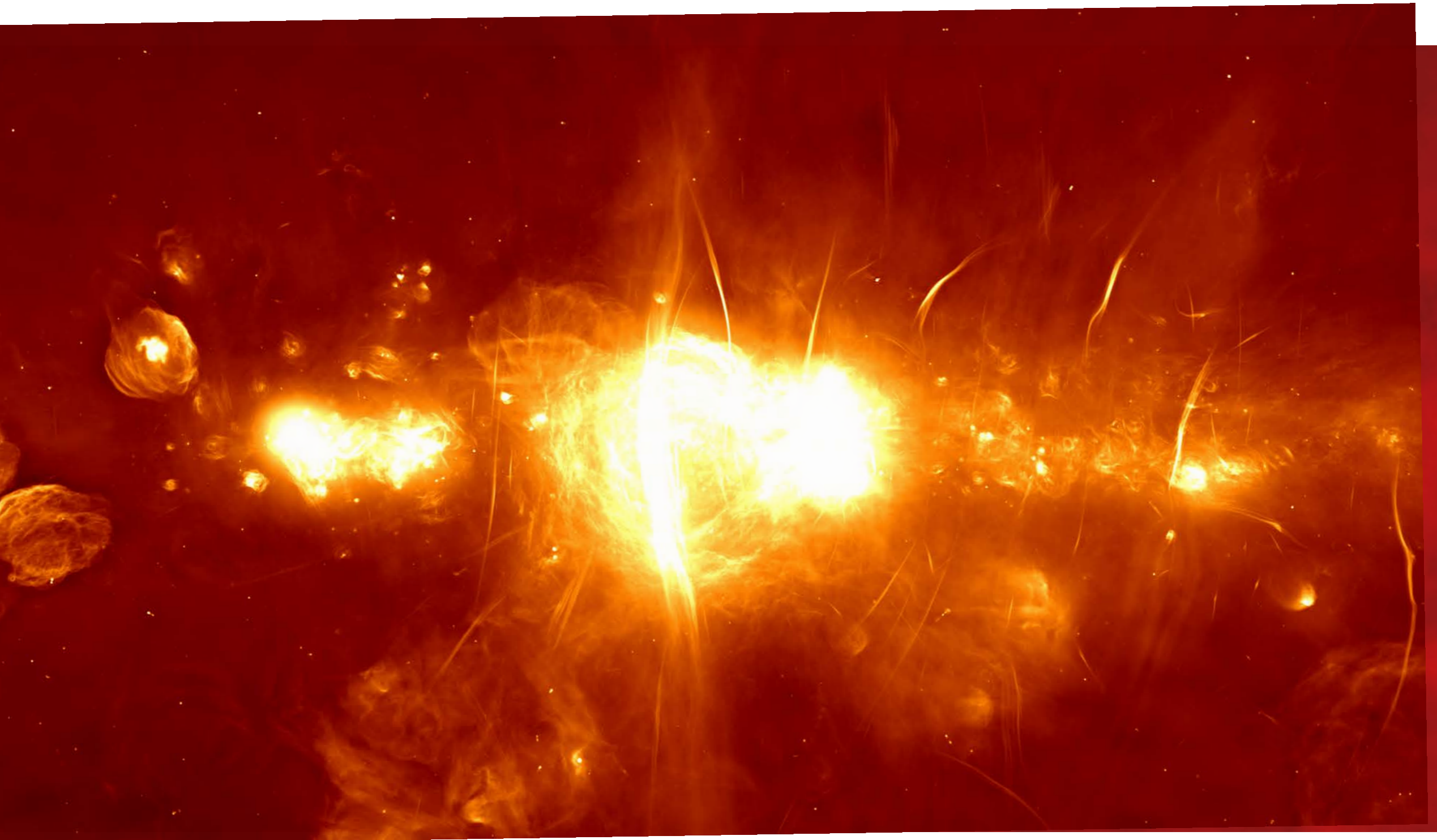
Credit: NRAO/AUI/NSF Yusef-Zadeh, et al.

MeerKAT



# Diversité des sources radio

## La voie Lactée

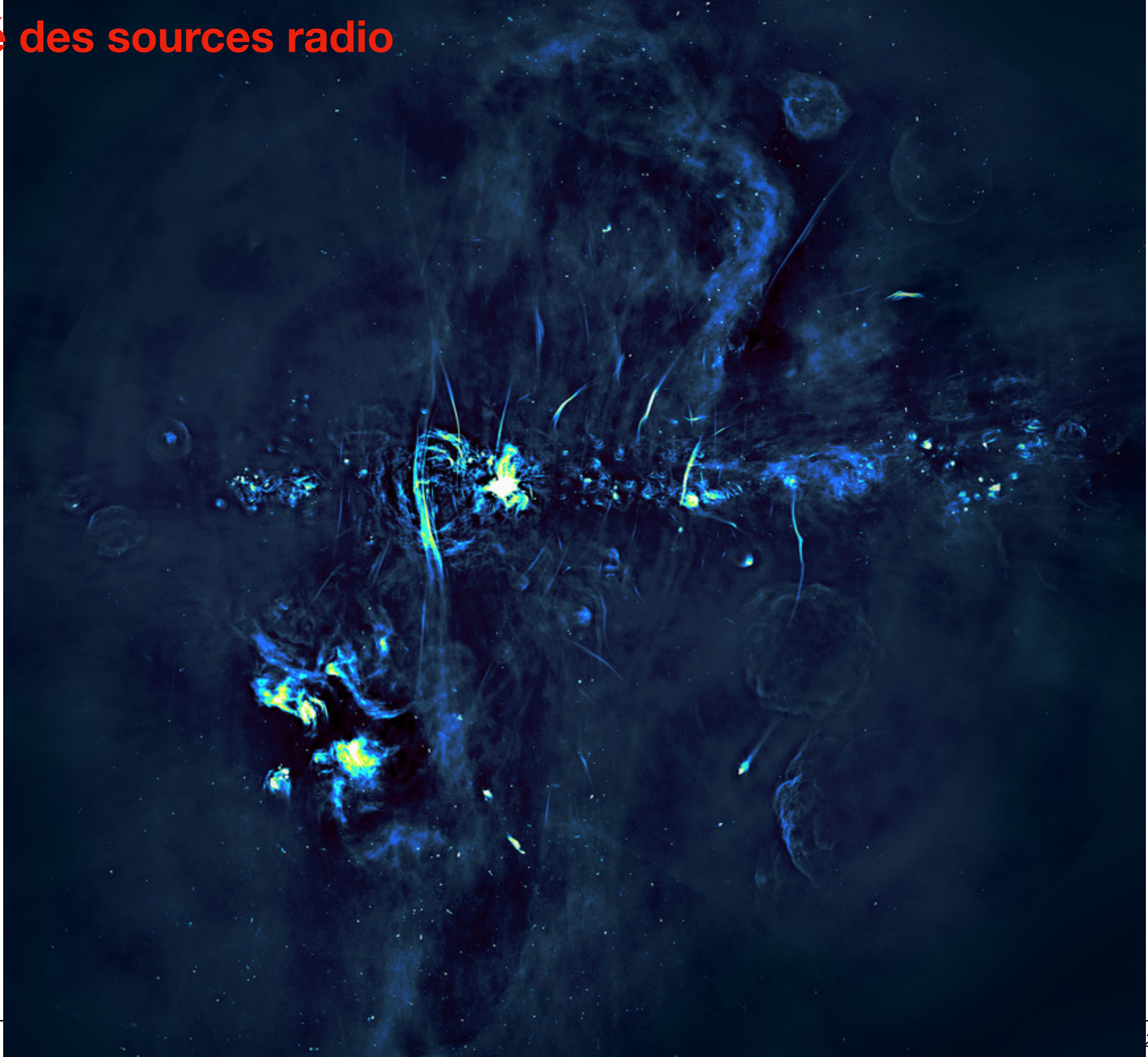


Credit: NRAO/AUI/NSF Yusef-Zadeh, et al.

MeerKAT

# Diversité des sources radio

La voie  
Lactée



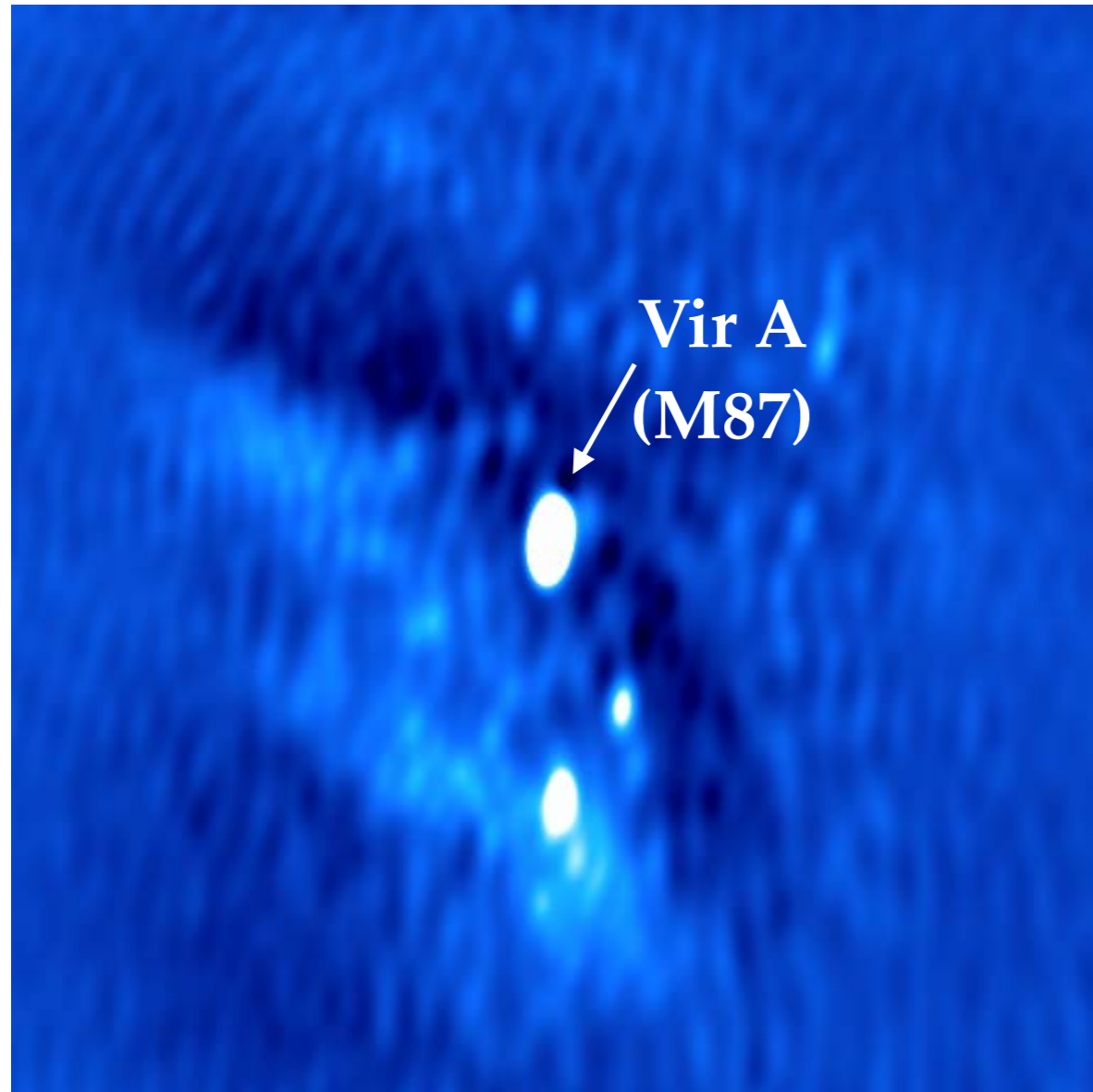
MeerKAT

Heywood et  
al., 2019

# Diversité des sources radio

étudiants de Master 2  
AAIF 2019-2020

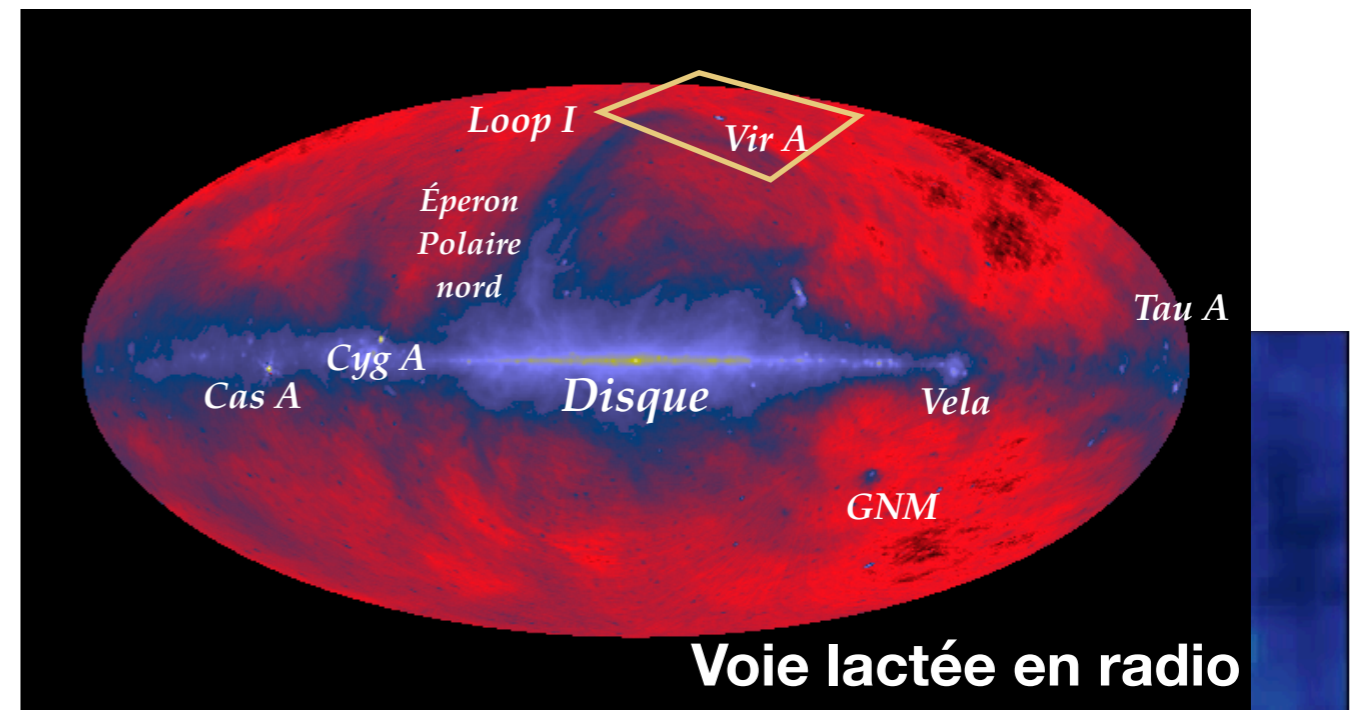
## Champ de Virgo A



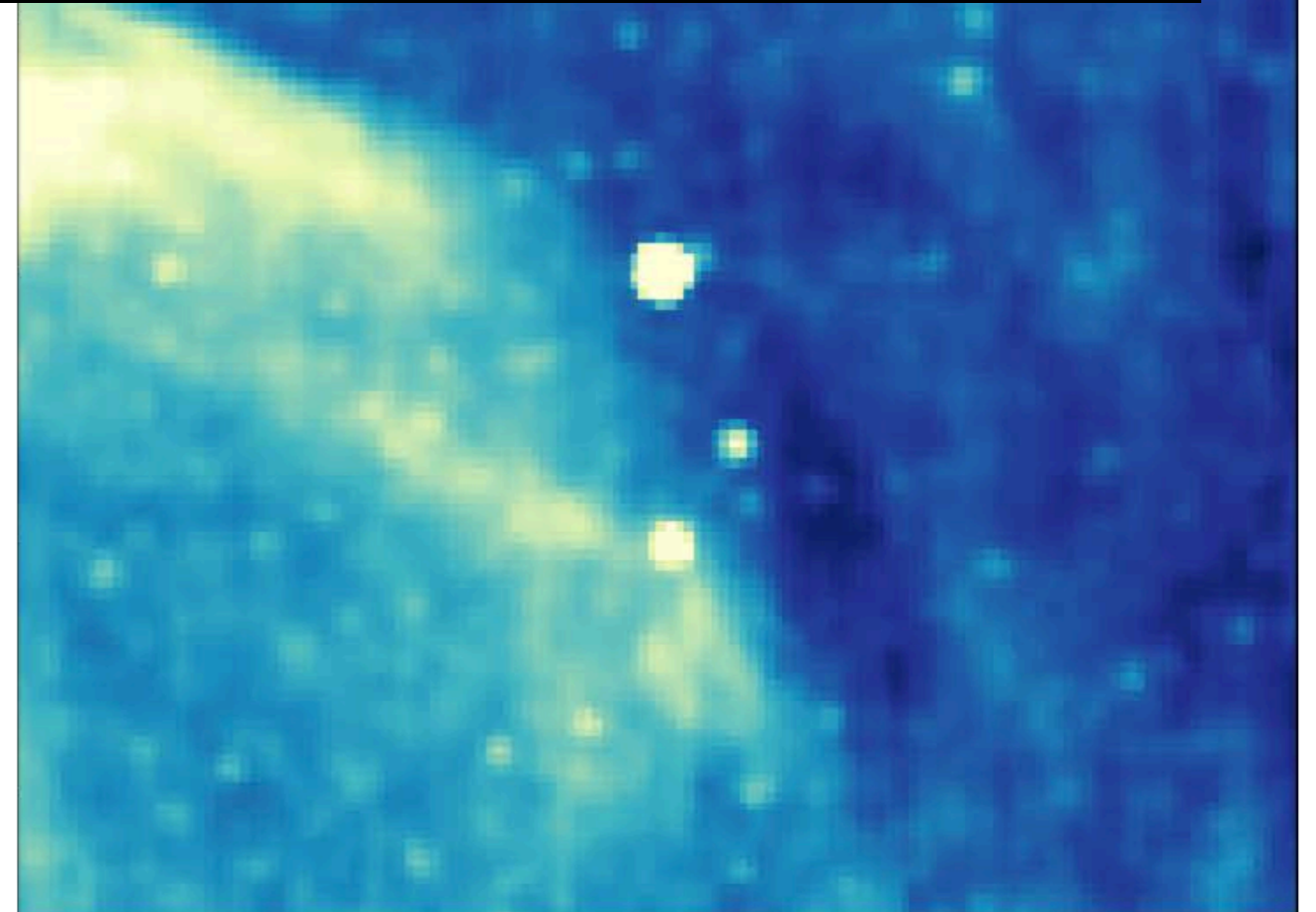
41°x41° 1 px = 5' Lune •

**31 MHz**

*(Collaboration NenuFAR, 2020)*



**Voie lactée en radio**



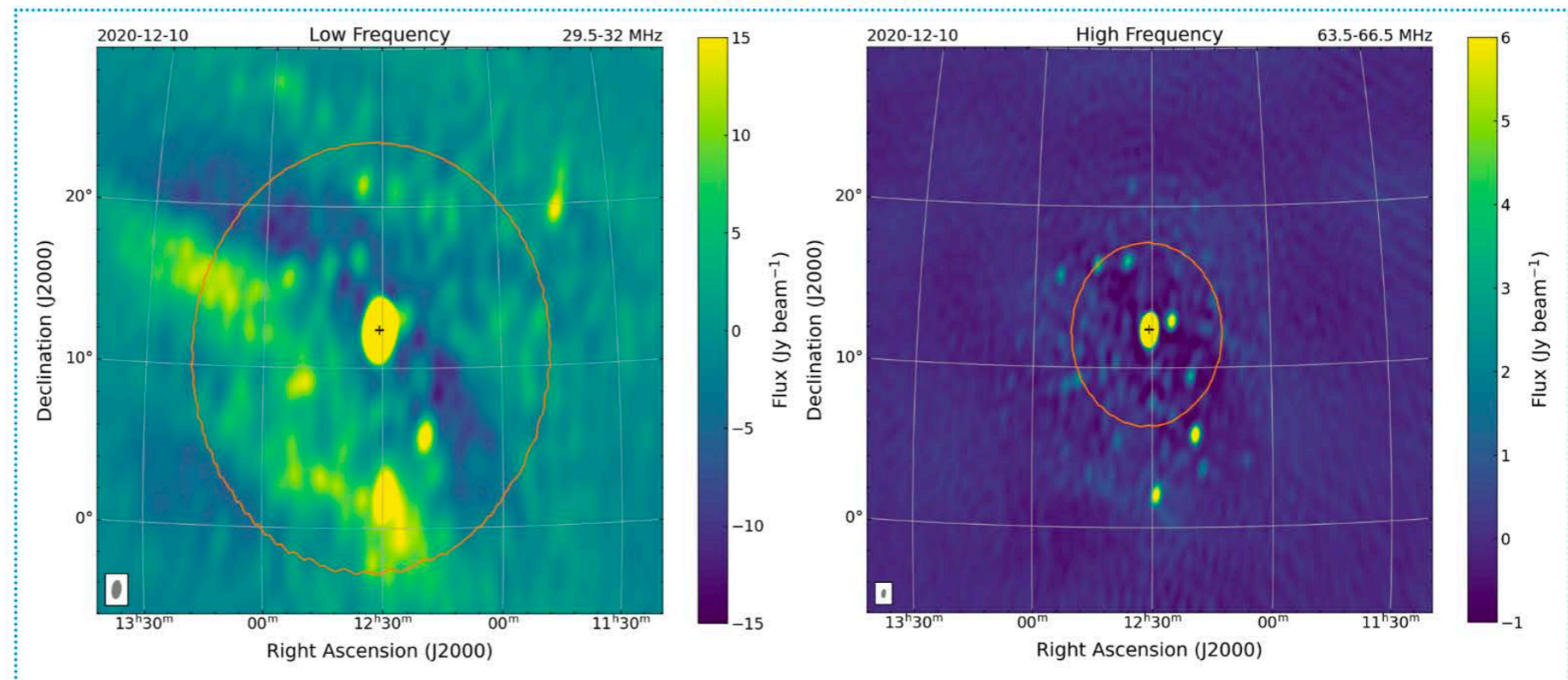
**31 MHz**

*(GSM adapté de Haslam, 1982)*

## Daily Image

01-02-2021

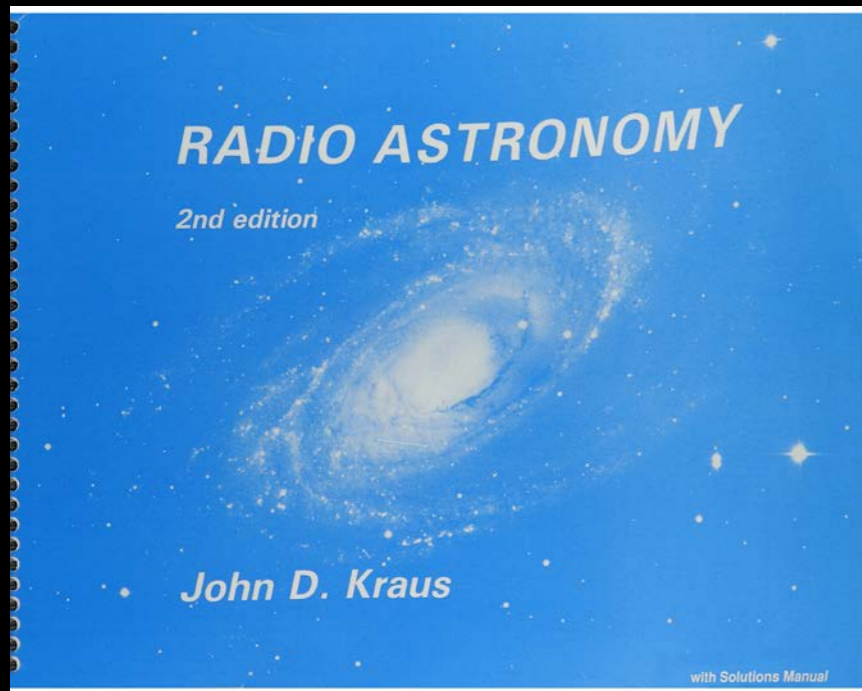
[Previous](#) [Next](#)



<https://www.astron.nl/dailyimage/main.php?date=20210201>

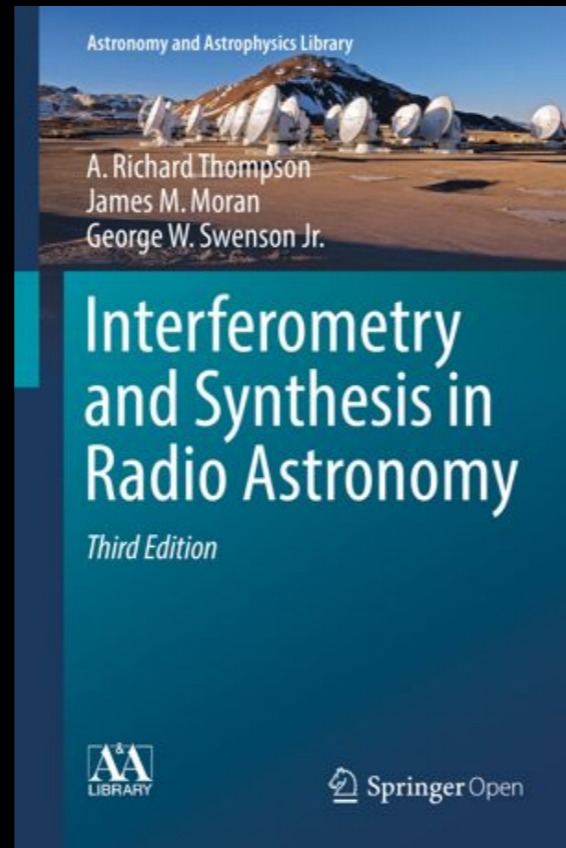
# Merci de votre attention !

## Quelques ressources bibliographiques

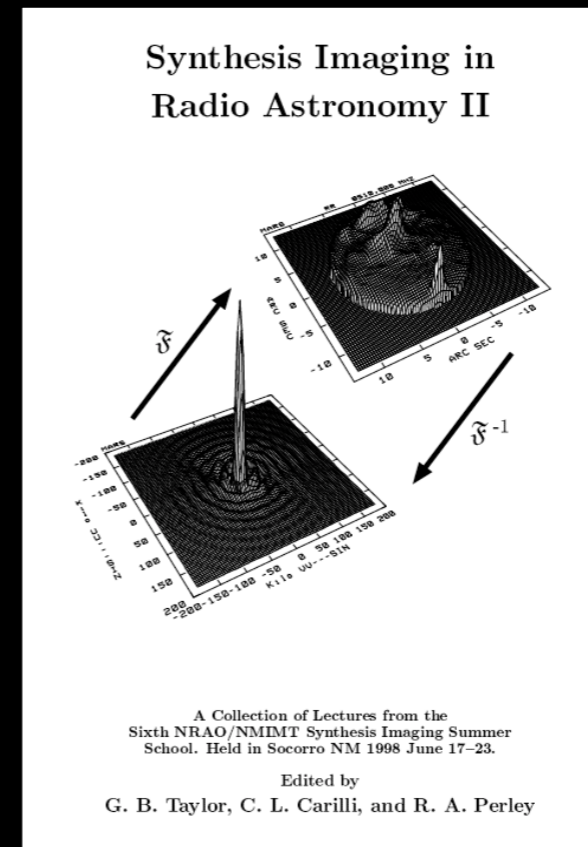


**Kraus, Radio Astronomy**

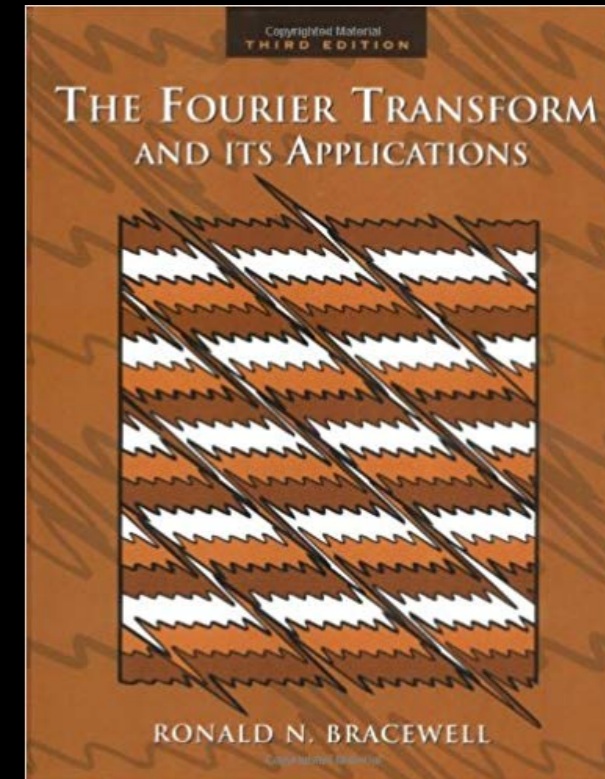
Cygnus-Quasar Book, 2nd ed.



**Thompson,  
Moran,  
Swenson,  
Springer, 3rd ed.**



**Taylor, Carilli, Perley**  
ASP, online



**Bracewell**  
McGraw Hill, 3rd ed.

**En ligne**

**"Essential radio astronomy"**

<https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era>

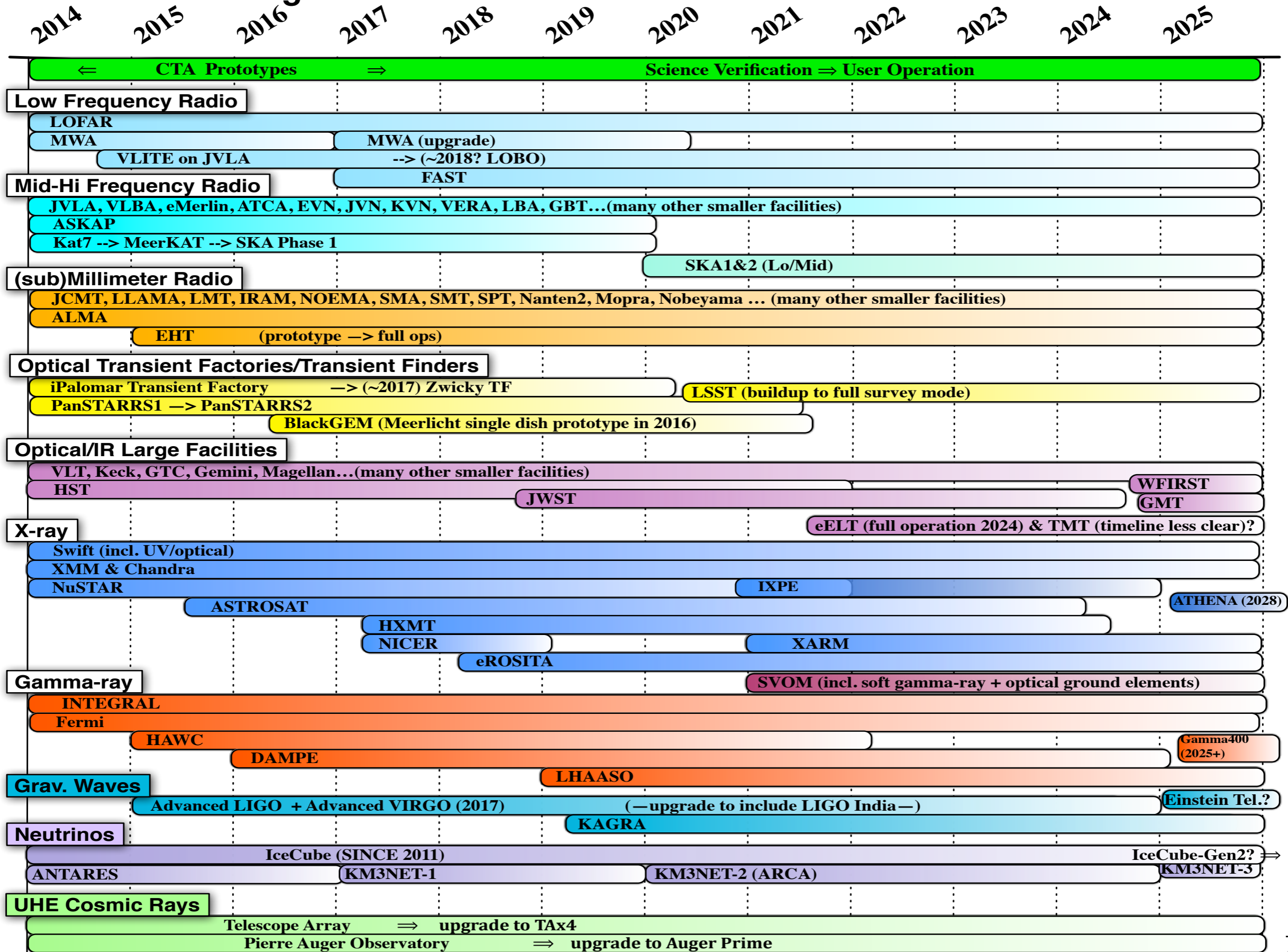
**Fundamentals of interferometry**

[https://github.com/ratt-ru/fundamentals\\_of\\_interferometry](https://github.com/ratt-ru/fundamentals_of_interferometry)

**quelques slides  
sur la calibration  
à lire chez vous...**

# Mesure par interférométrie

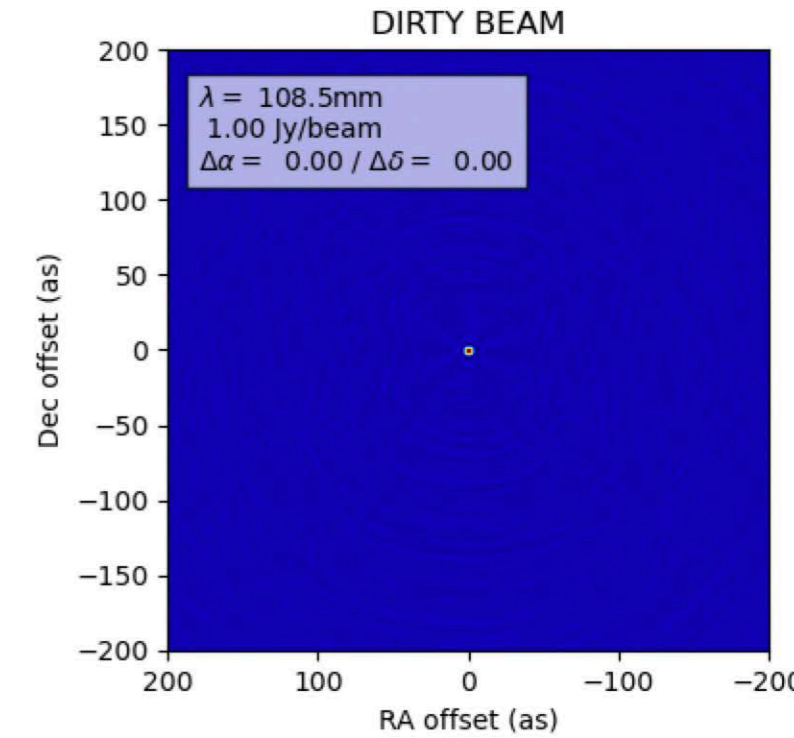
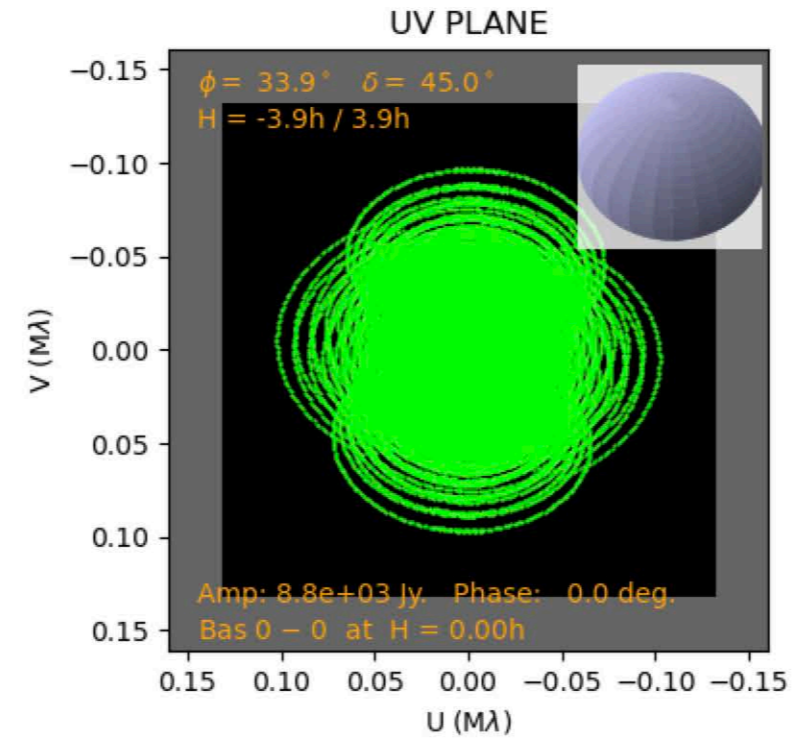
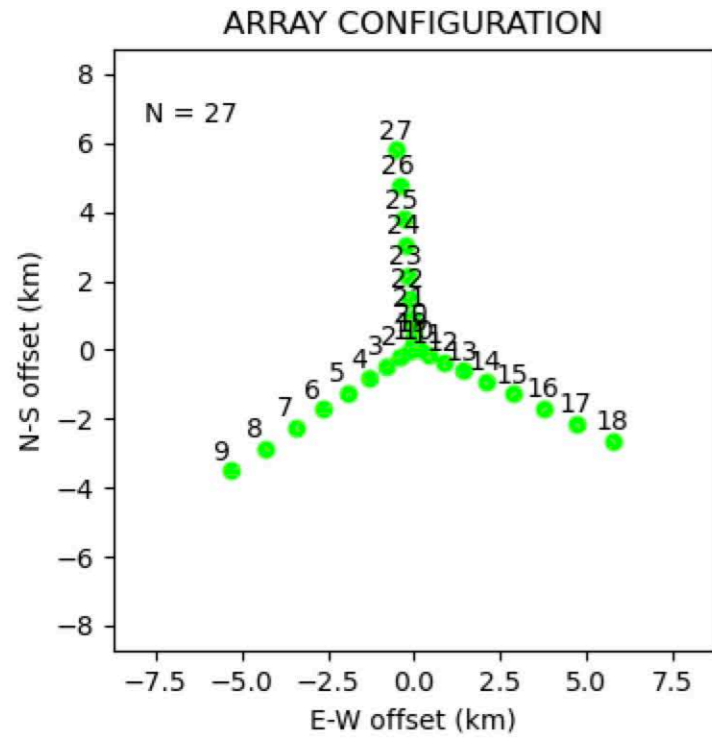
## Tour d'horizon des grands observatoires actuels et futurs



# APSYNSIM

# Aperture Synthesis Simulator

<https://github.com/onsala-space-observatory/APSYNSIM>

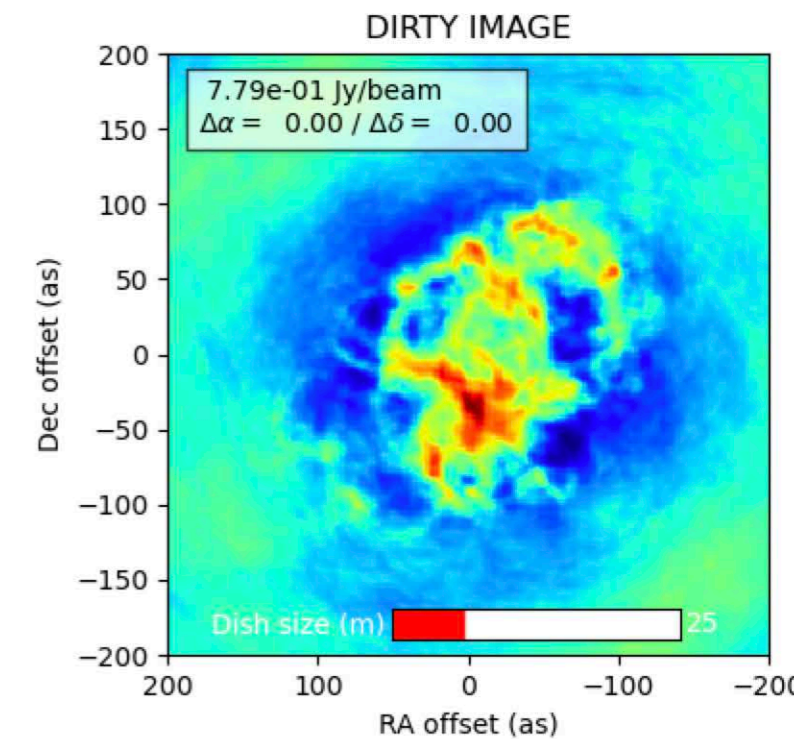
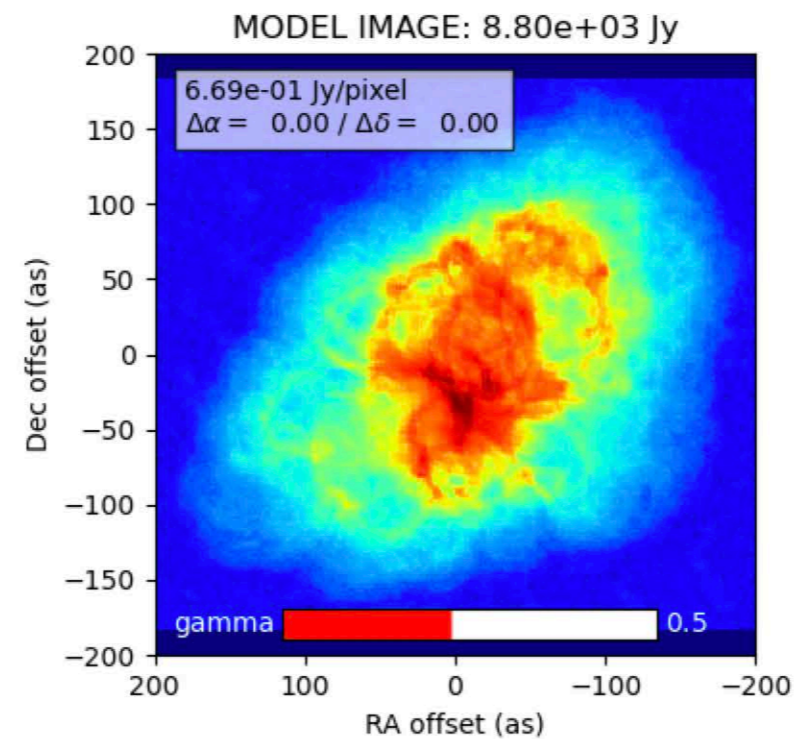


Lat (deg)	<input type="text" value="33.9"/>
Dec (deg)	<input type="text" value="45"/>
H <sub>0</sub> (h)	<input type="text" value="-3.94"/>
H <sub>1</sub> (h)	<input type="text" value="3.94"/>
$\lambda$ (mm)	<input type="text" value="108.5"/>
Robust	<input type="text" value="0"/>

+ Antenna   - Antenna   Reduce data

Save array   Load array   Load model

Quit



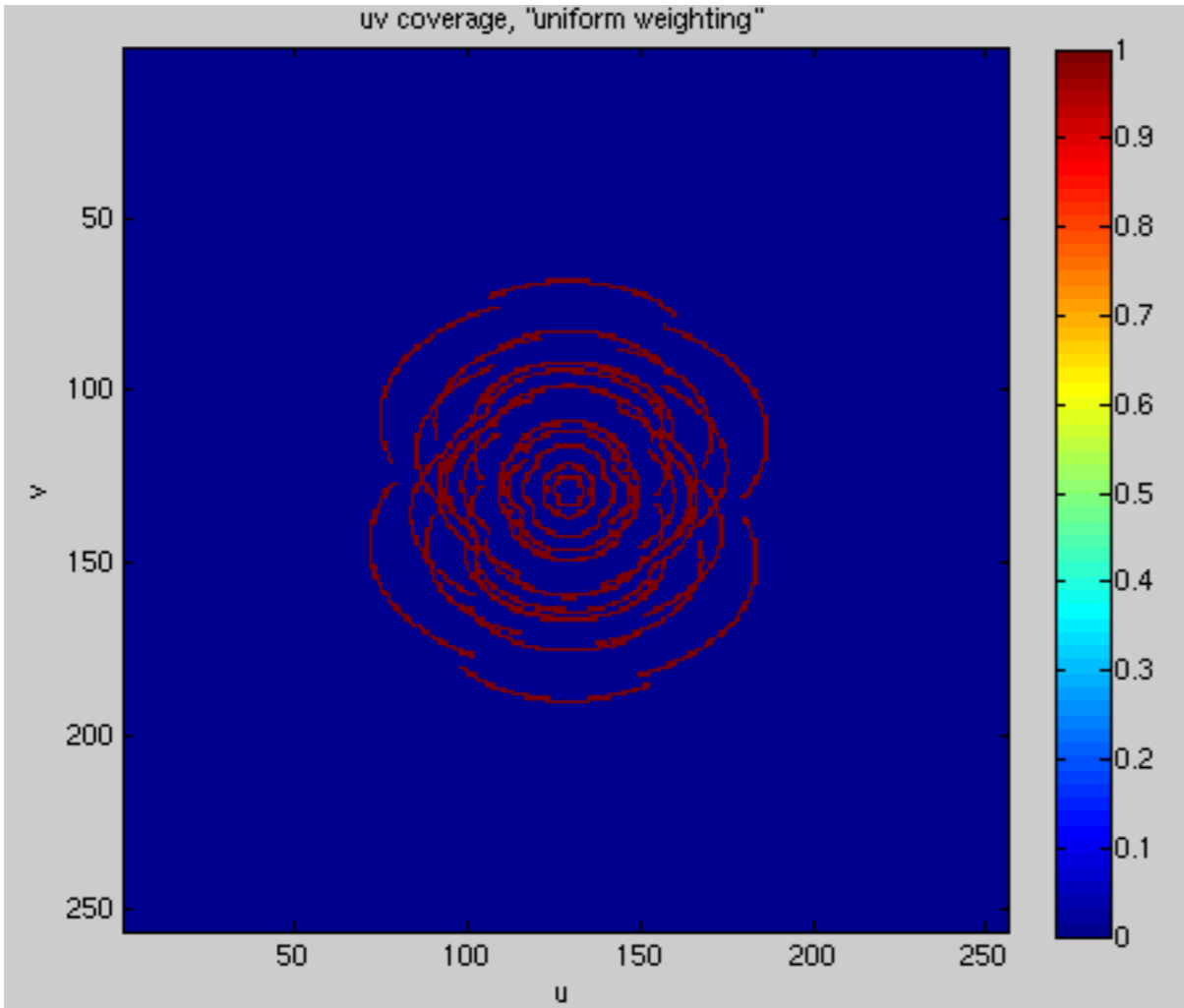
<https://arxiv.org/abs/1706.00936>

# Gridding + pondération

On a le choix de pouvoir pondérer les échantillons entre eux

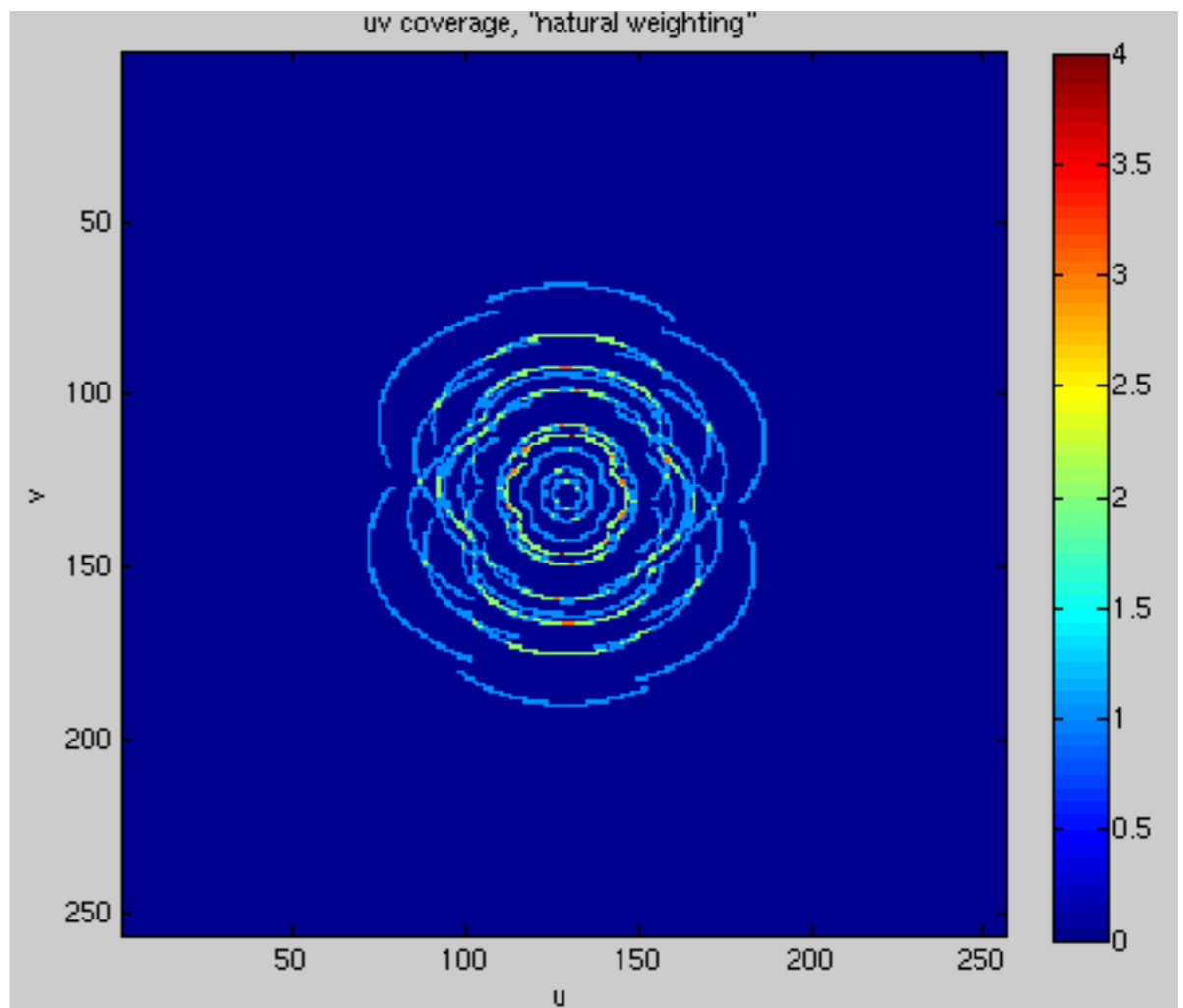
## Pondération "uniforme"

Chaque échantillon a le même poids  
 → Meilleure résolution angulaire



## Pondération "naturelle"

On favorise les échantillons les moins bruités  
 → Meilleure sensibilité



## Pondération intermédiaire ("Briggs")

**R = Robustness = [-2..0..2]**

" curseur " permettant un compromis entre uniforme et naturel

$$w_i \propto \frac{1}{1 + W_k f^2} \quad f^2 = \frac{(5 * 10^{-R})^2}{\frac{\sum_k W_k^2}{\sum_i \omega_i}}$$



# Diversité des sources radio

**AGN (active galactic nucleus)**

- powered Radio Sources

**Radio Quasars**

**FRII/FRI Radio Galaxies**

**Non-AGN powered radio sources**

**Supernova Remnants**

**Star-forming Galaxies**

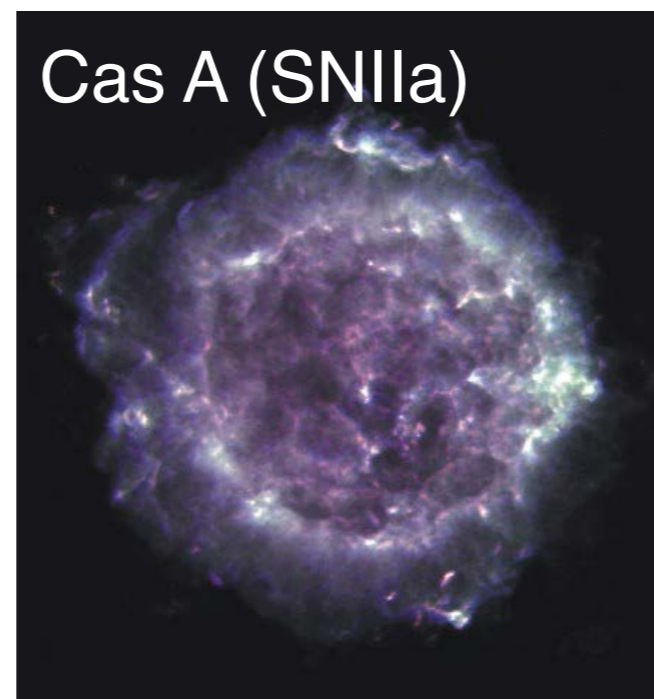
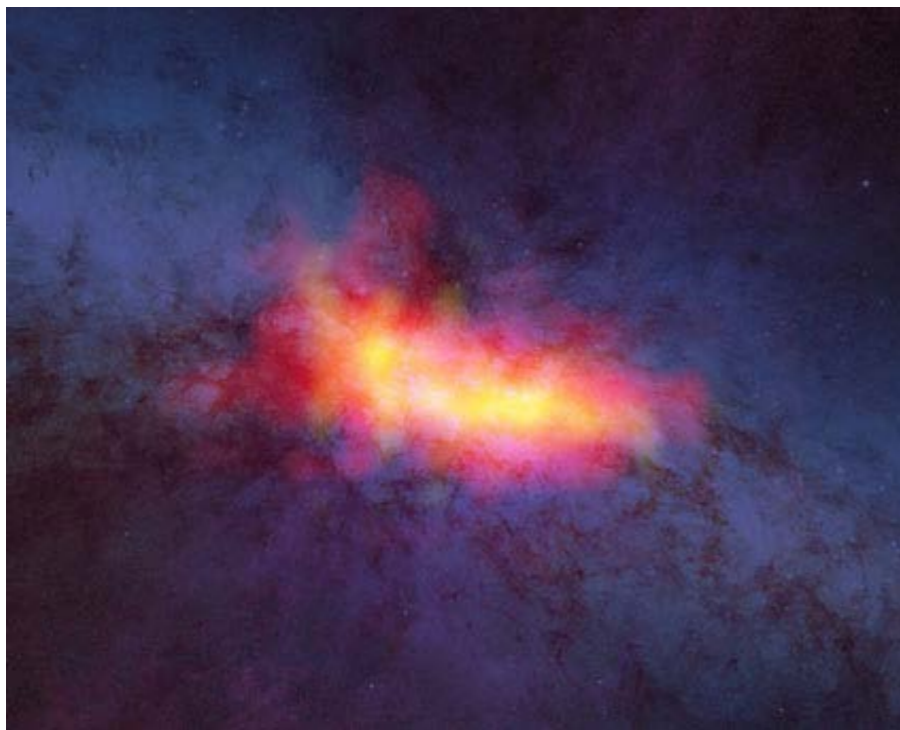
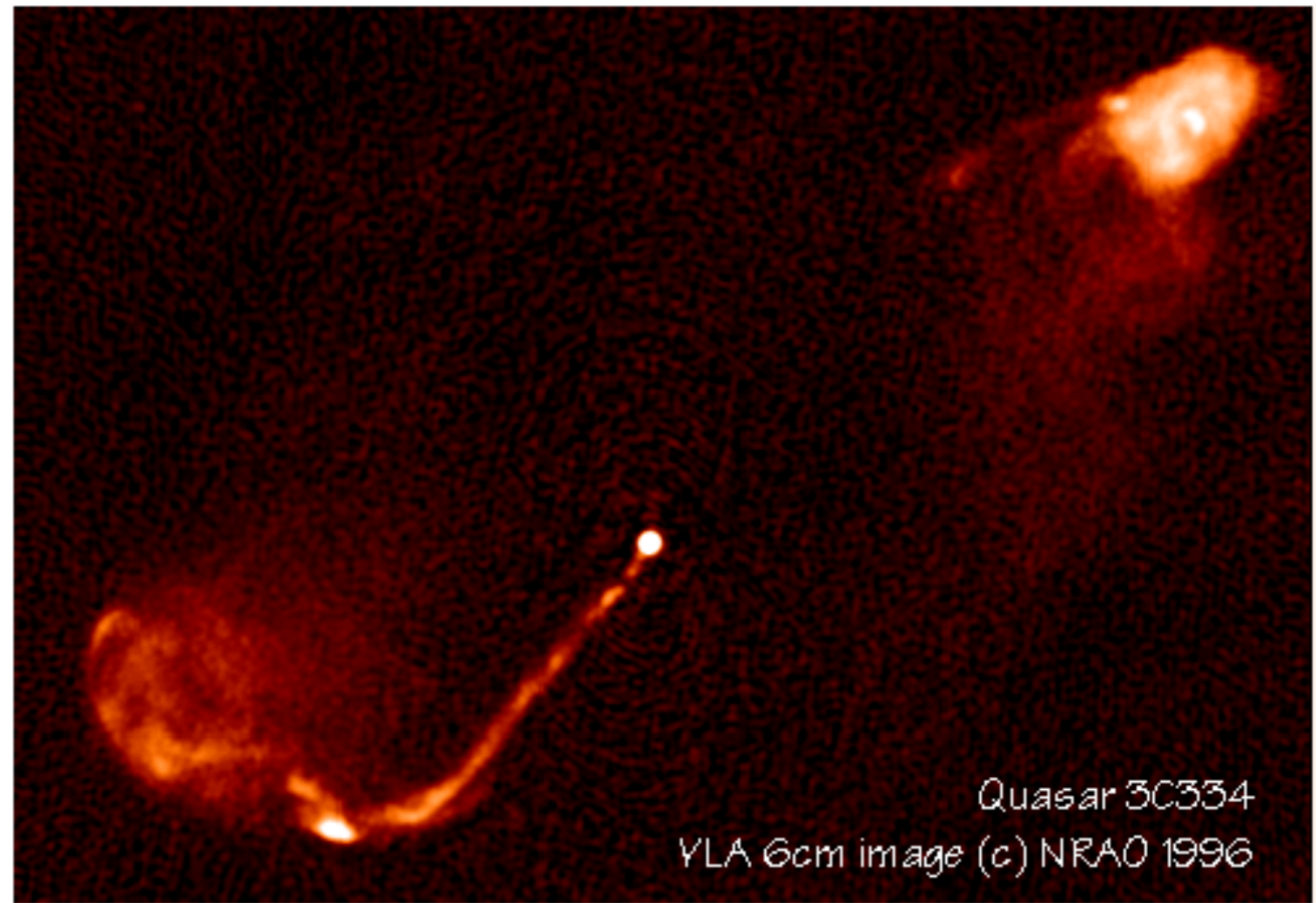
**HI gas (neutral hydrogen)**

**Molecular Clouds**

**HII regions**

**Sun**

**Planets and moons...**



# Diversité des sources radio

**AGN (active galactic nucleus)**

- powered Radio Sources

Radio Quasars

FRII/FRI Radio Galaxies

**Non-AGN powered radio sources**

Supernova Remnants

Star-forming Galaxies

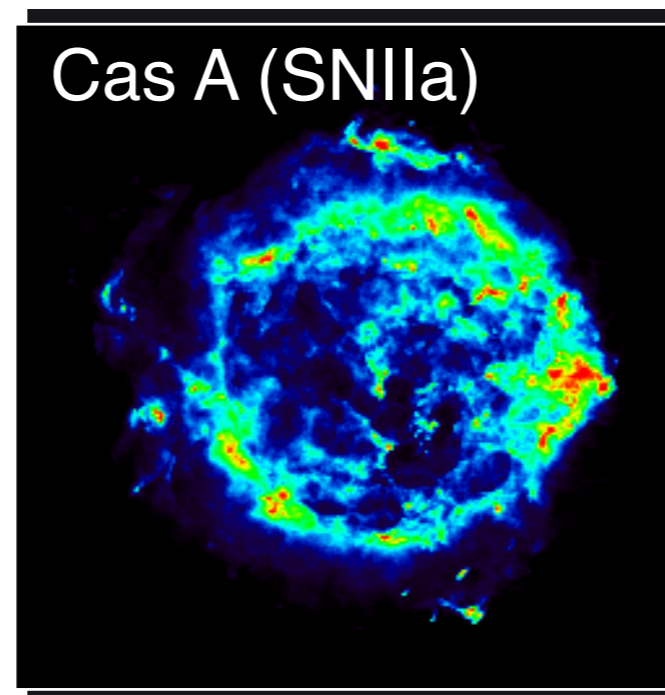
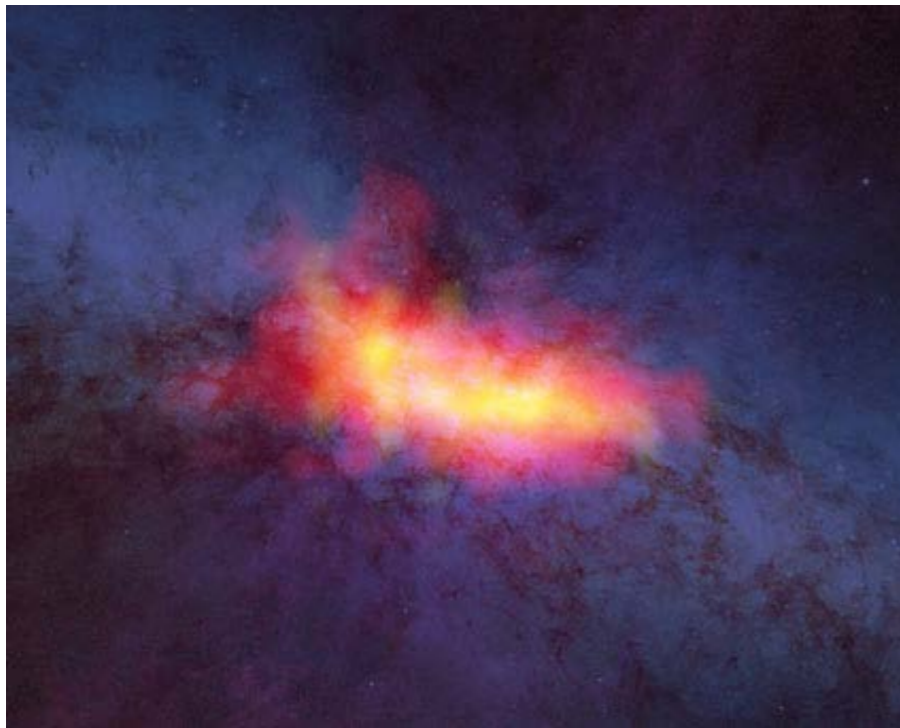
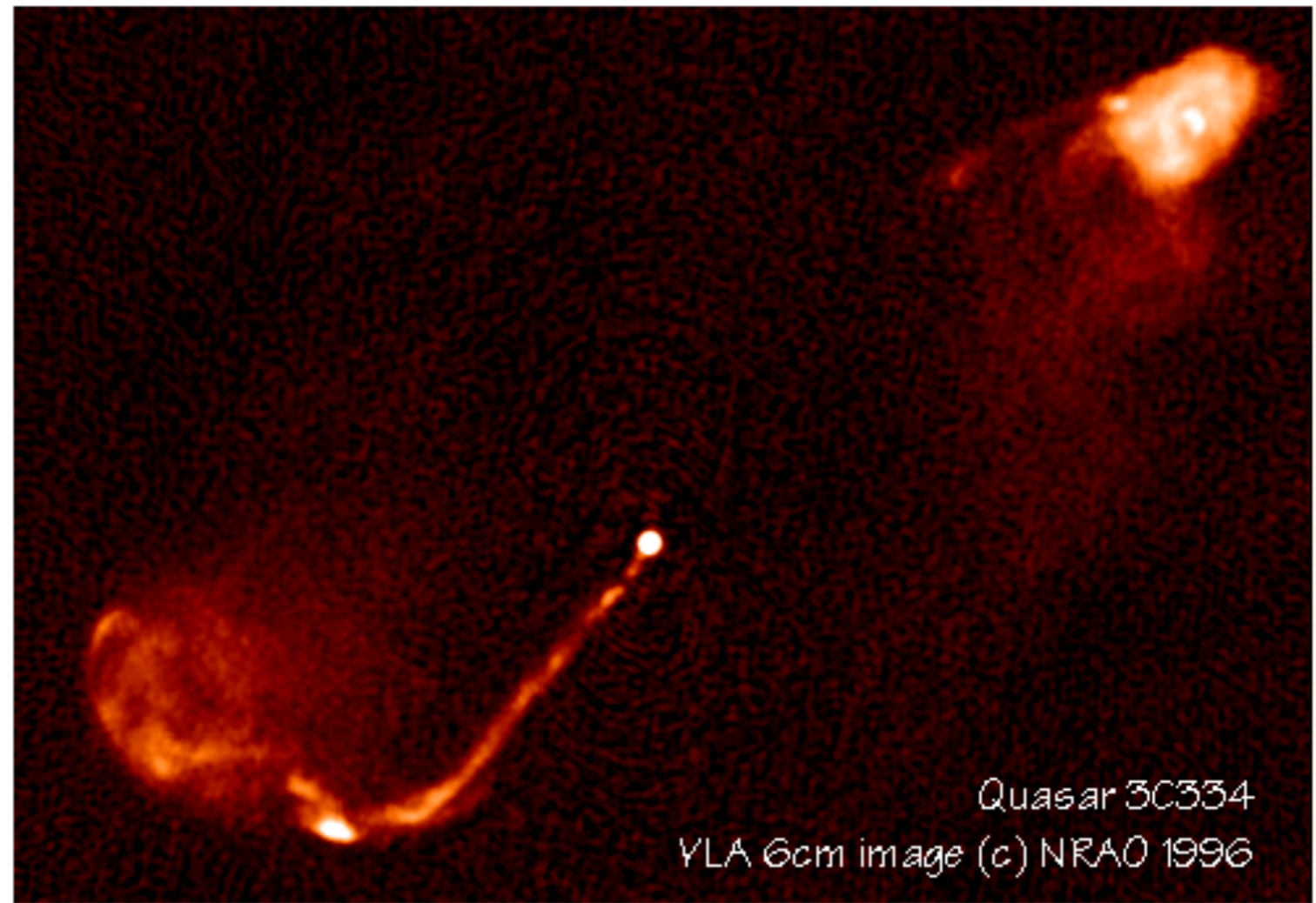
HI gas (neutral hydrogen)

Molecular Clouds

HII regions

Sun

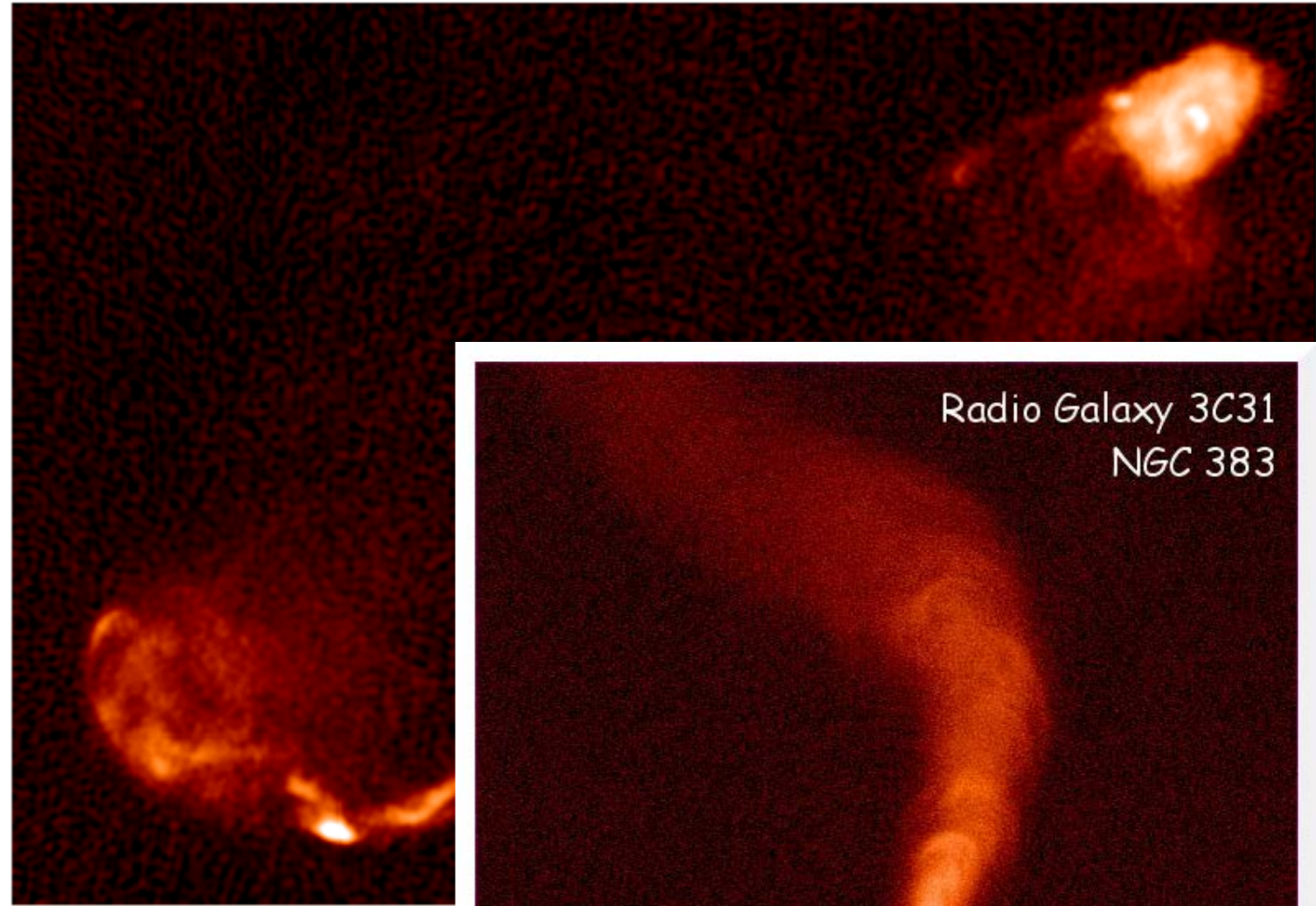
Planets and moons...



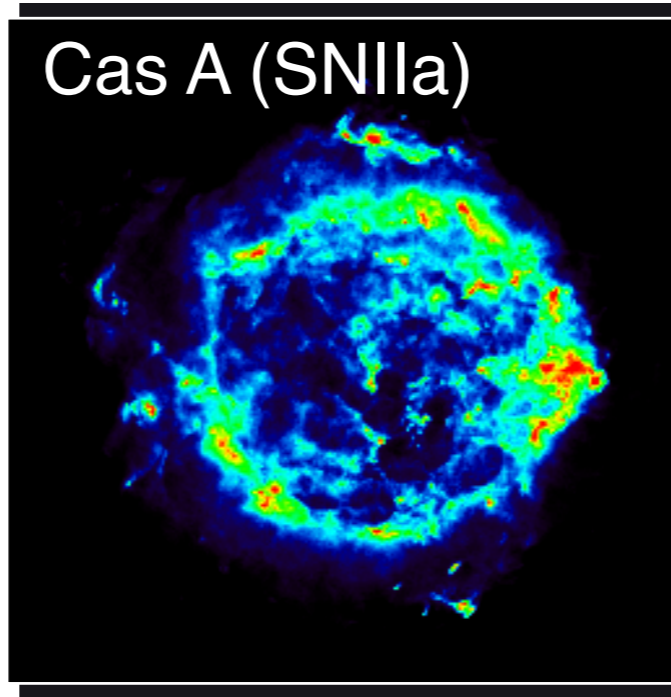
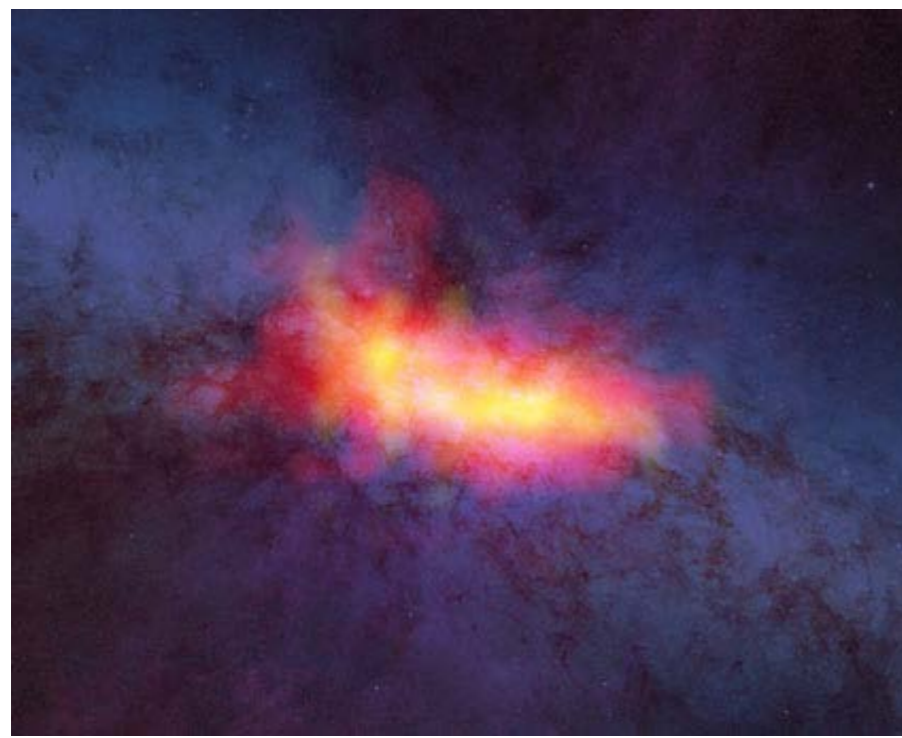
# Diversité des sources radio

- AGN (active galactic nucleus)
- powered Radio Sources
- Radio Quasars
- FRII/FRI Radio Galaxies

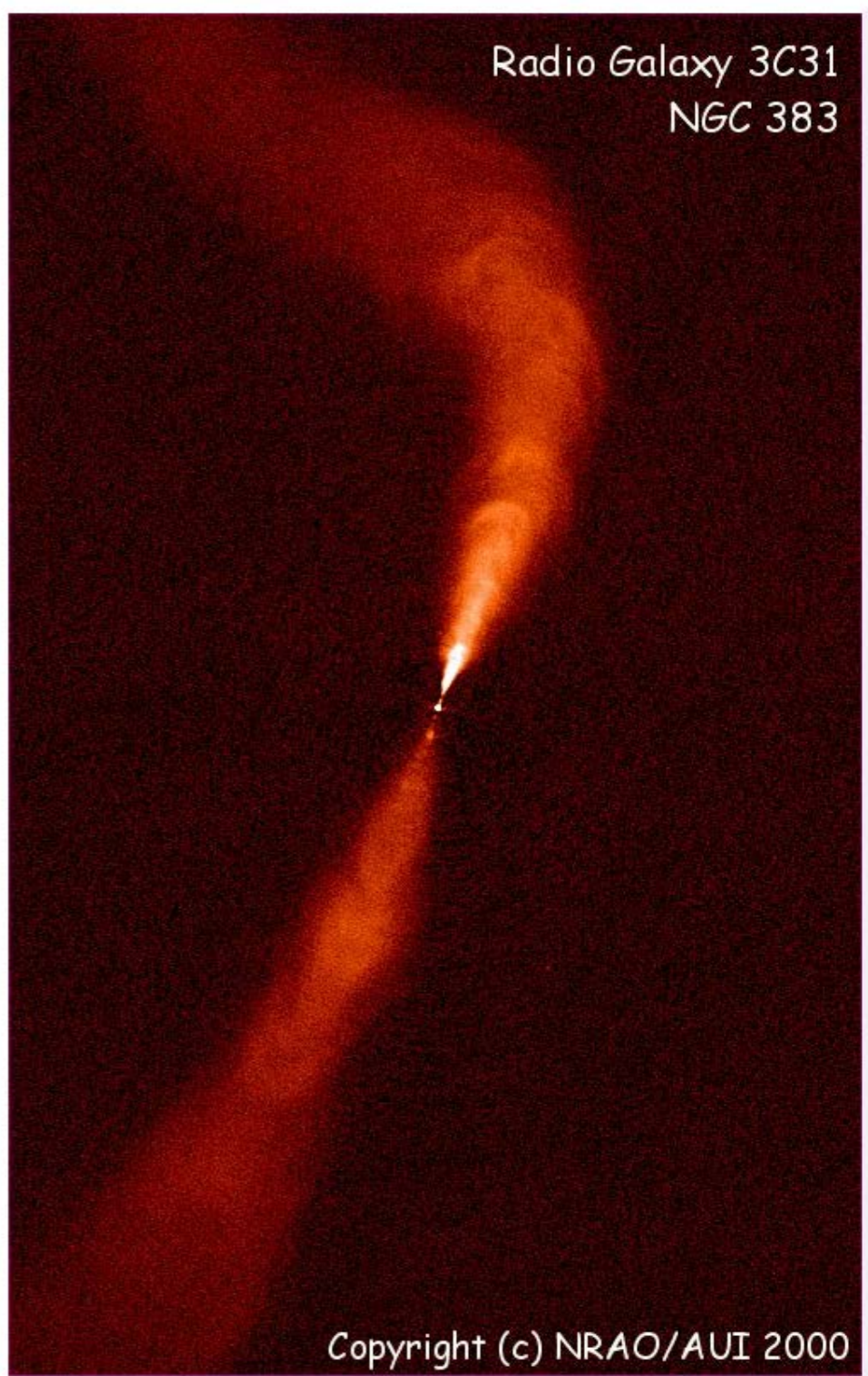
- Non-AGN powered radio sources
- Supernova Remnants
- Star-forming Galaxies
- HI gas (neutral hydrogen)
- Molecular Clouds
- HII regions
- Sun
- Planets and moons...



Radio Galaxy 3C31  
NGC 383



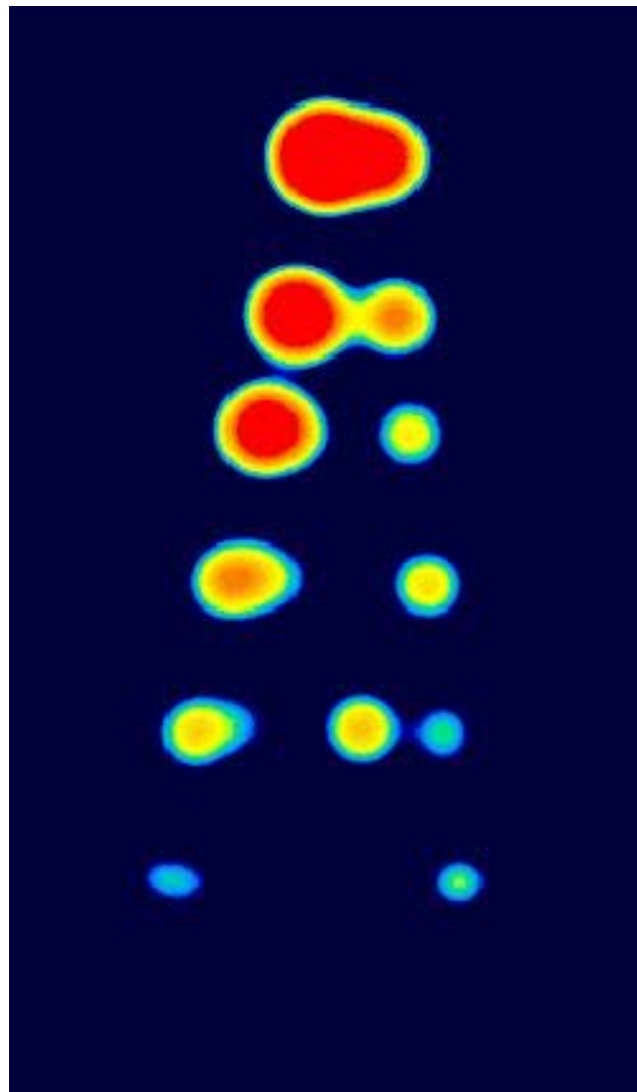
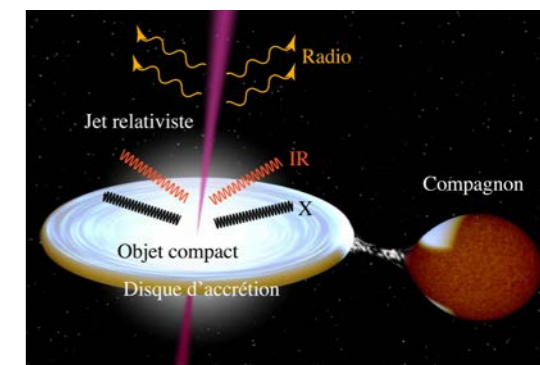
Cas A (SNIa)



Copyright (c) NRAO/AUI 2000

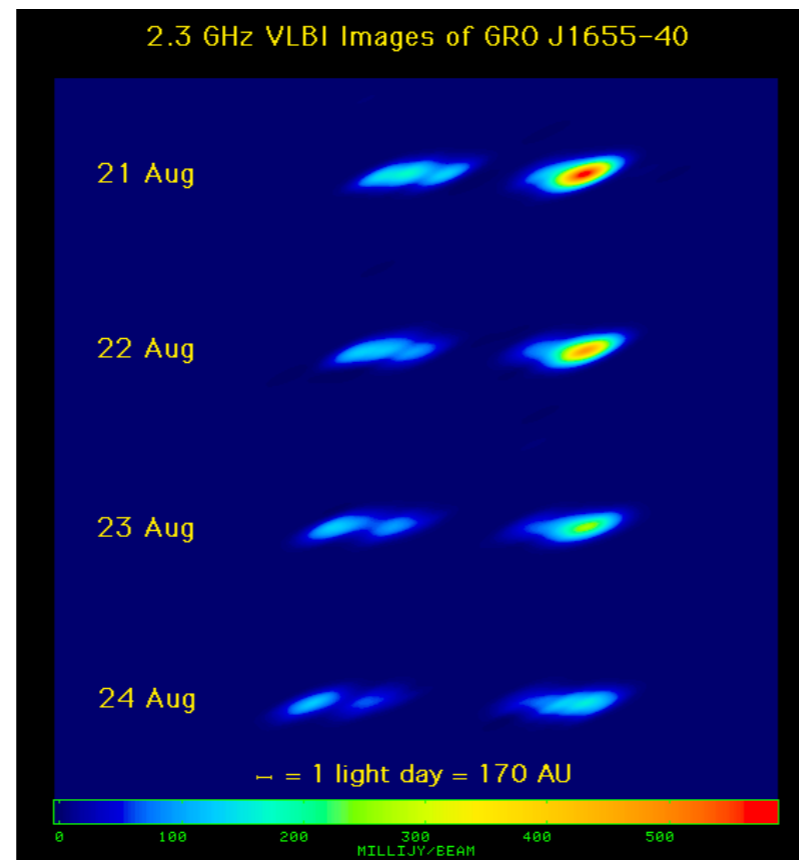
# Diversité des sources radio

Observation **rapide** et **VLBI** du microquasars V404 Cygni



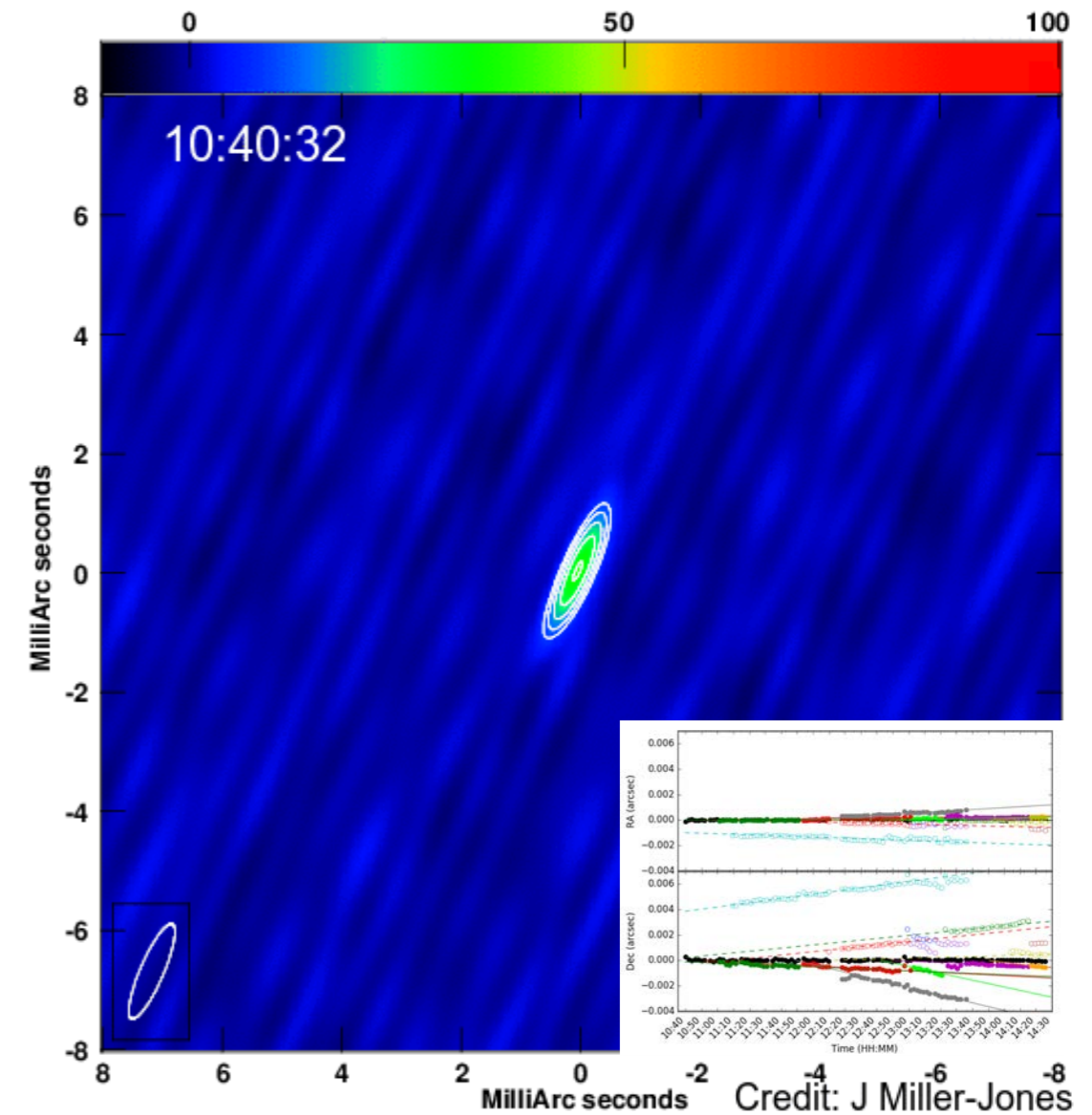
**GRS1915**

Mirabel & Rodriguez (1994)



**GRO J1655-40**

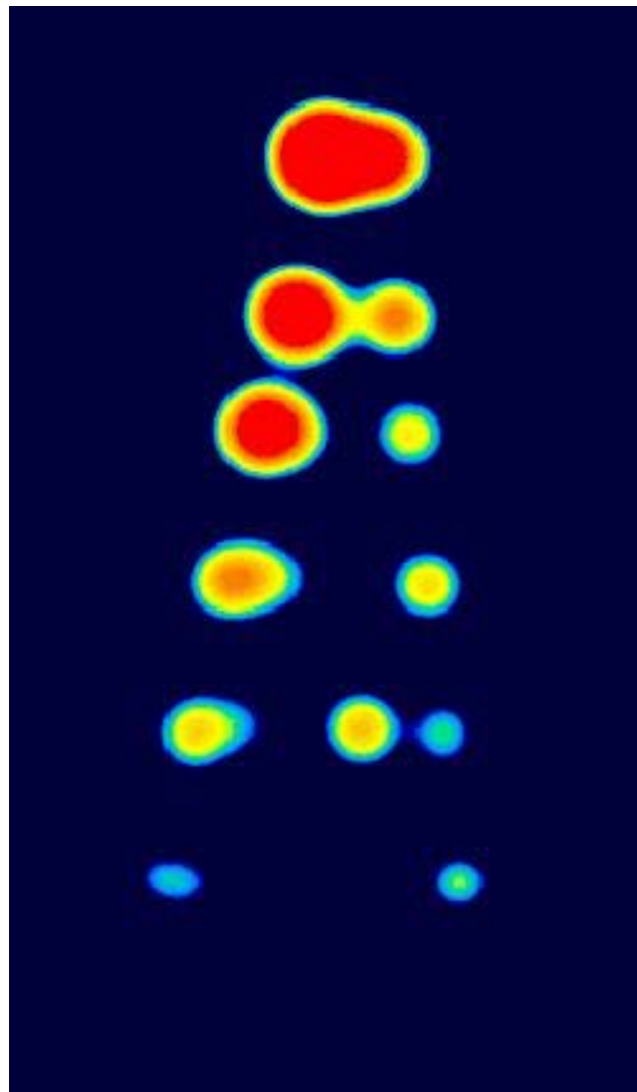
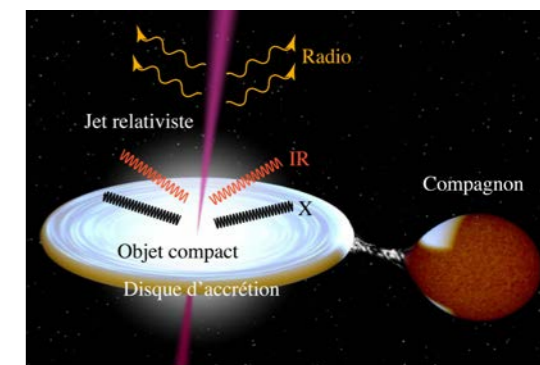
Tingay et al. (1995)



**V404 Cygni**  
J. Miller-Jones

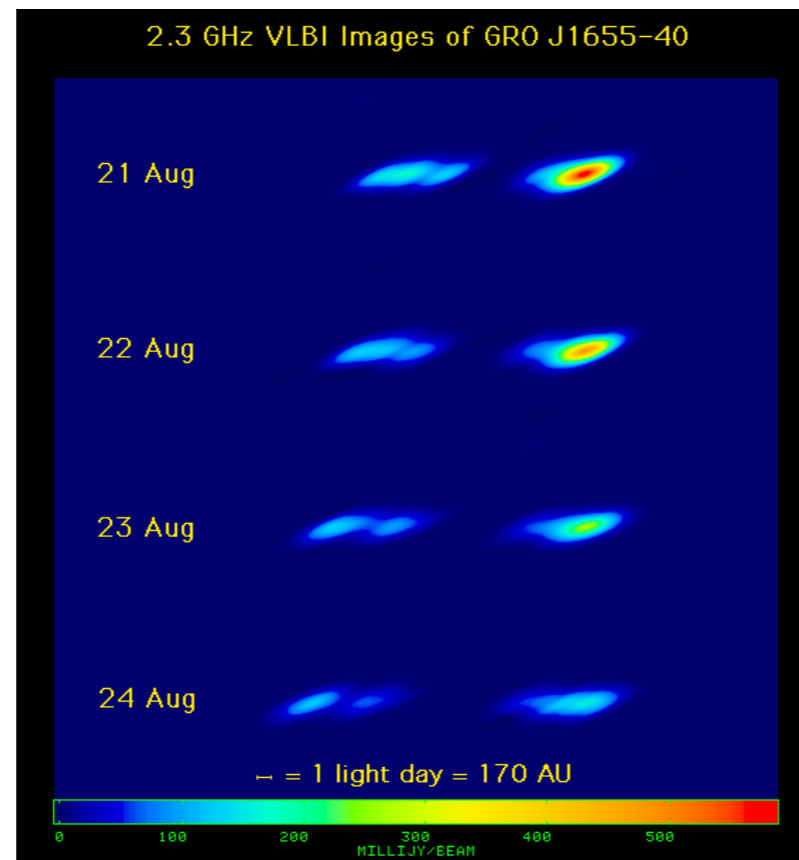
# Diversité des sources radio

Observation **rapide** et **VLBI** du microquasars V404 Cygni



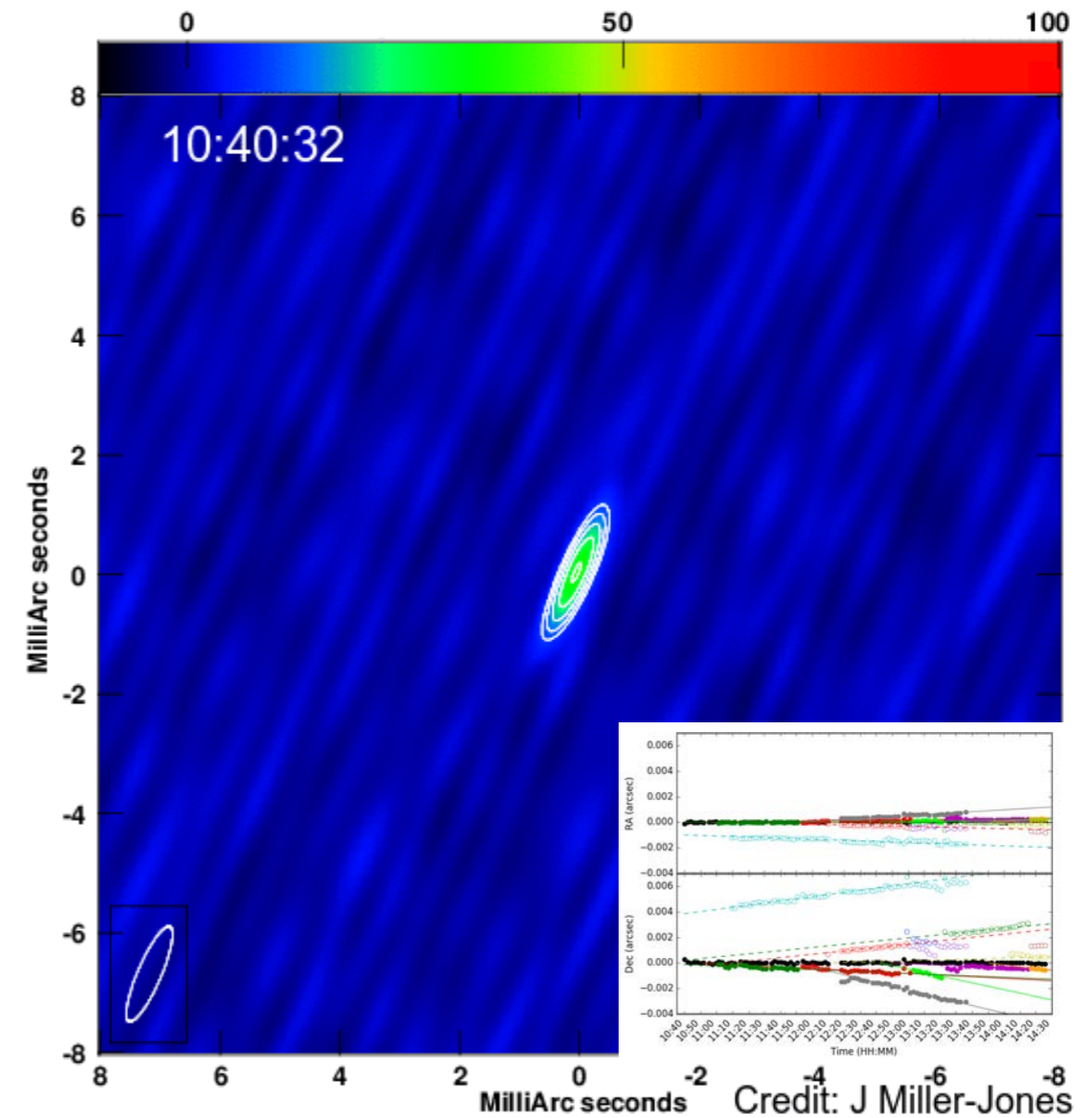
**GRS1915**

Mirabel & Rodriguez (1994)



**GRO J1655-40**

Tingay et al. (1995)



**V404 Cygni**  
J. Miller-Jones

# Étalonnage des interféromètres

**Différentes générations de calibration**  
Étalonnage moderne

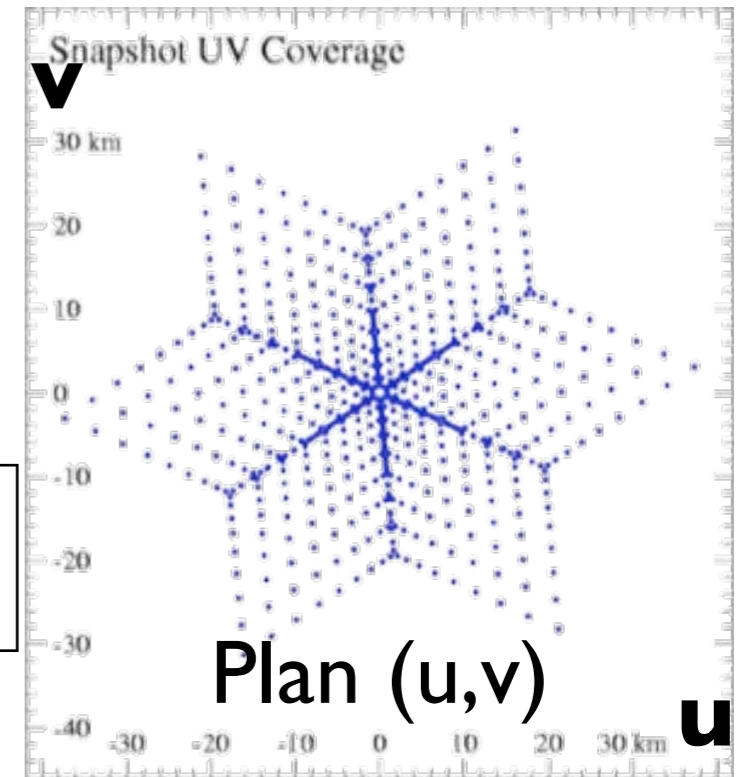
# Étalonnage des interféromètres



$\sim \mathcal{F}$

➔

$$V(u, v) = \iint T(l, m) e^{-i2\pi(ul+vm)} dl dm$$

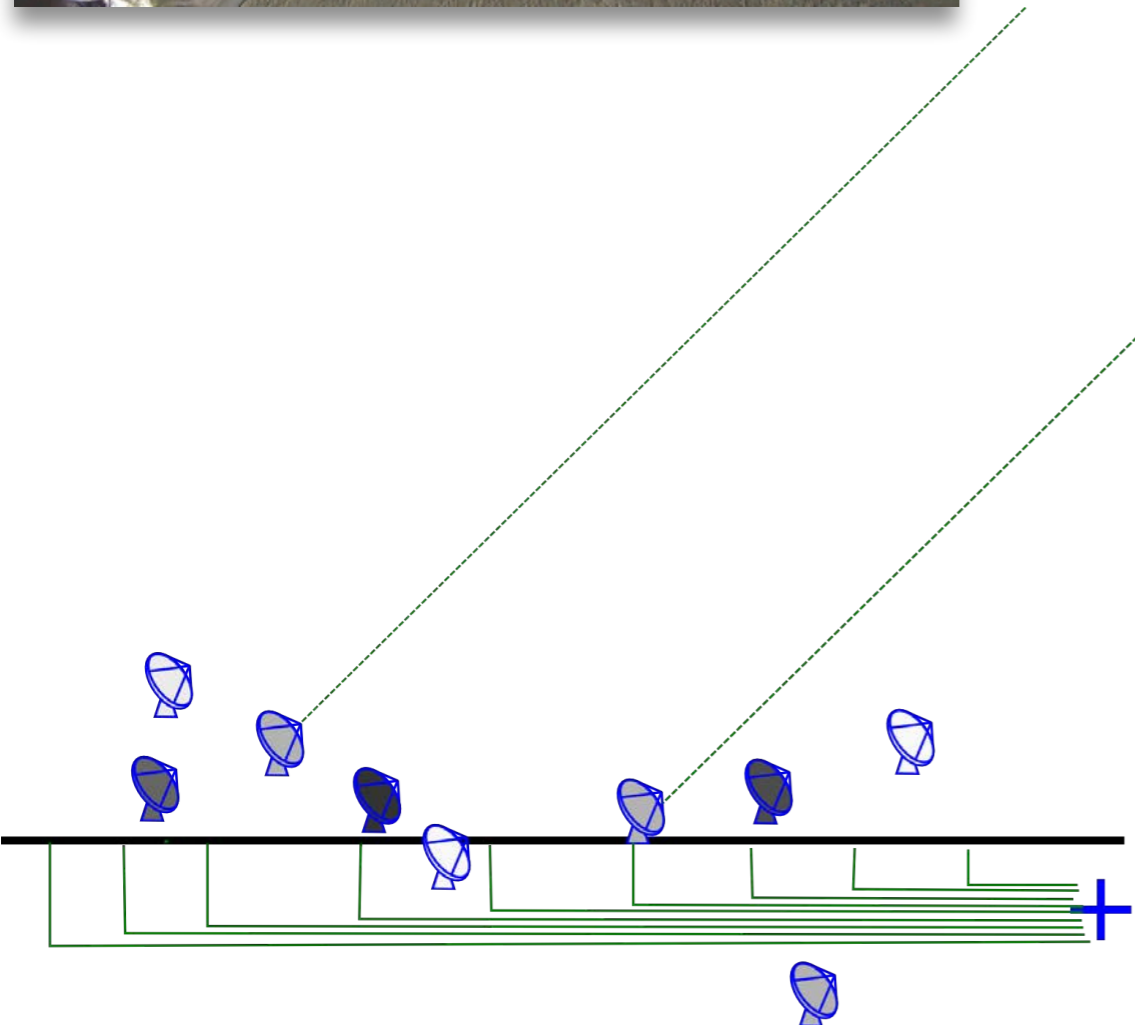
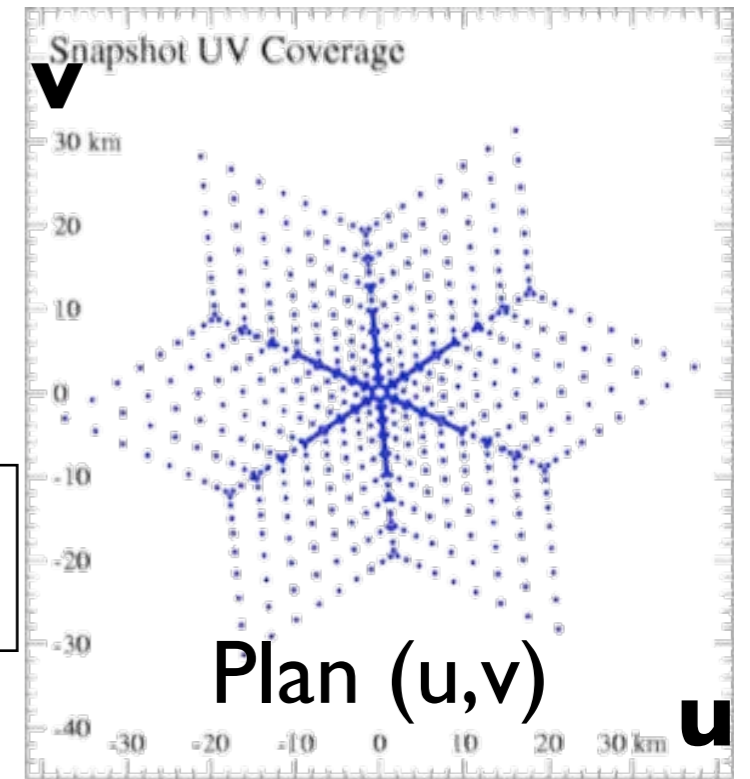


# Étalonnage des interféromètres



$\sim \mathcal{F}$   
➔

$$V(u, v) = \iint T(l, m) e^{-i2\pi(ul+vm)} dl dm$$



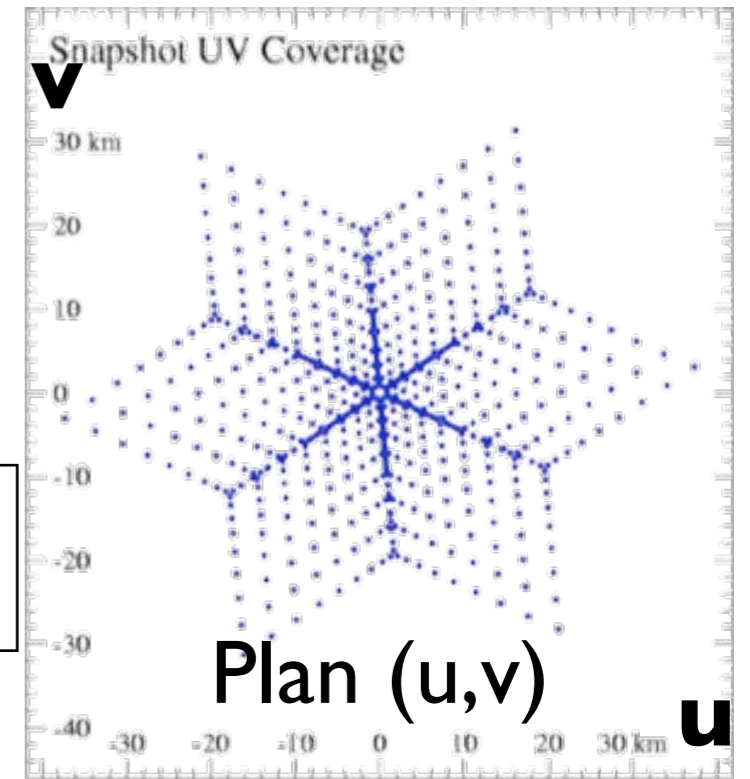


# Étalonnage des interféromètres

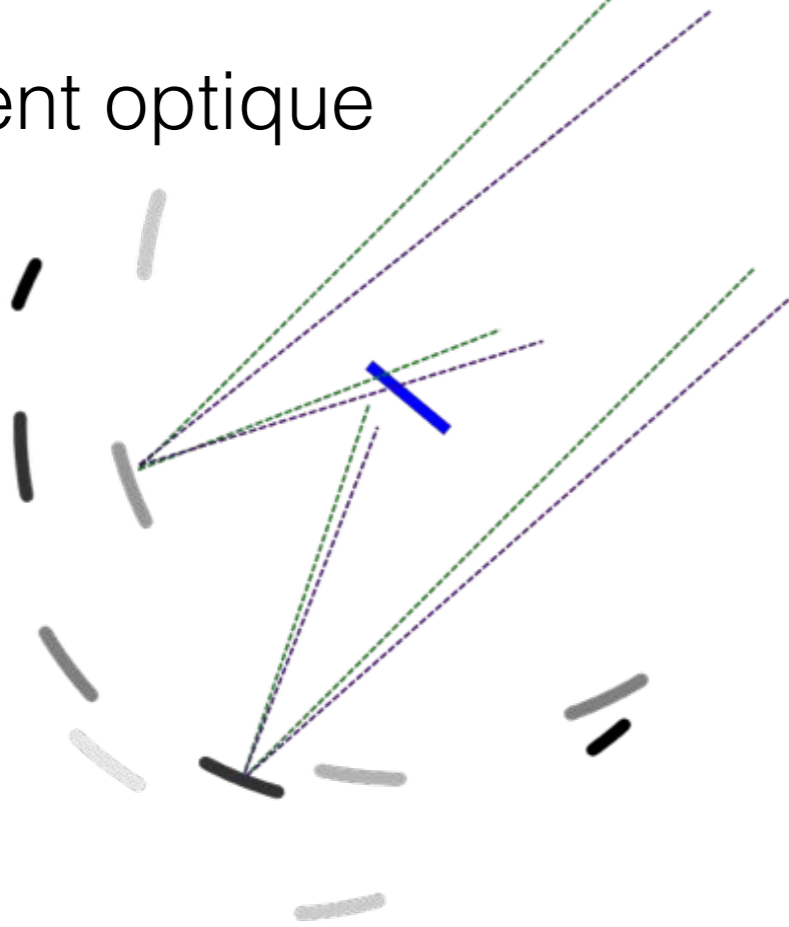


$\sim \mathcal{F}$   
➔

$$V(u, v) = \iint T(l, m) e^{-i2\pi(ul+vm)} dl dm$$



équivalent optique



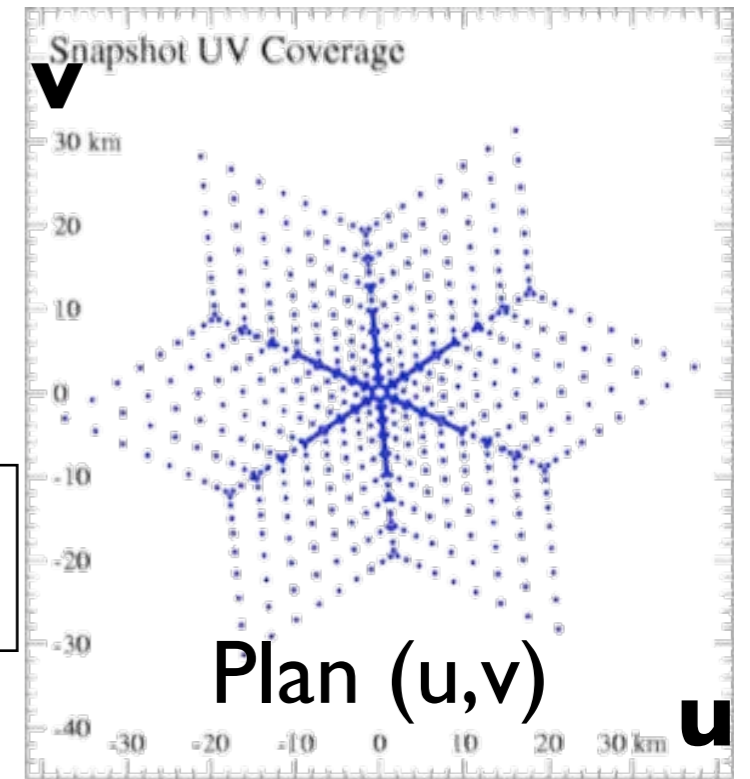
# Étalonnage des interféromètres



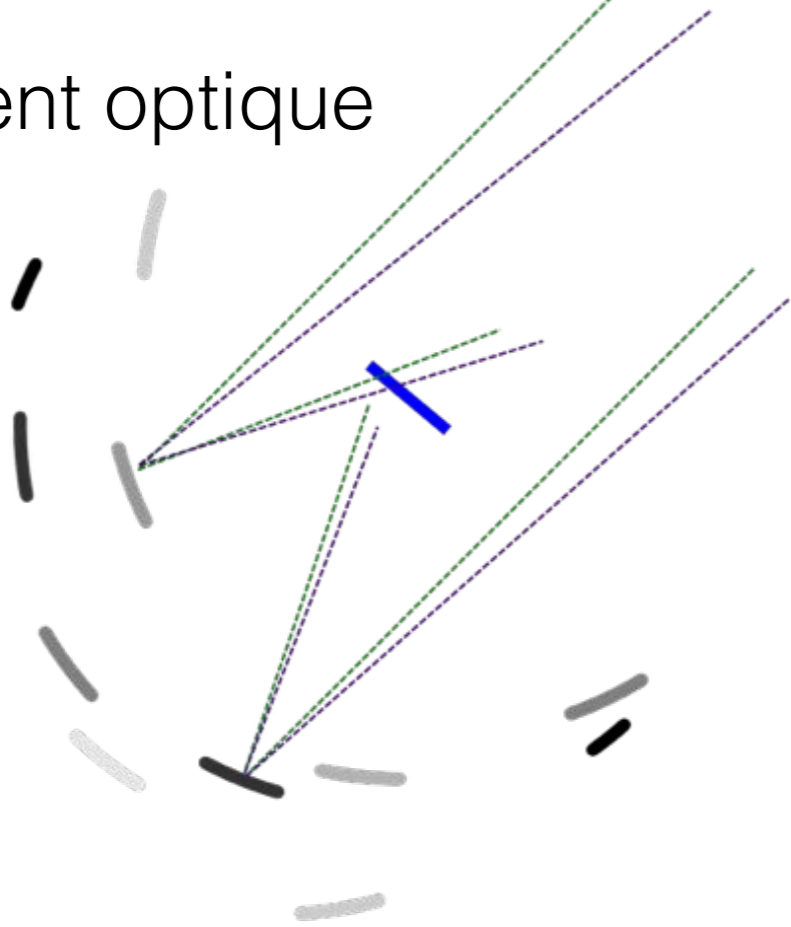
$\sim \mathcal{F}$

➔

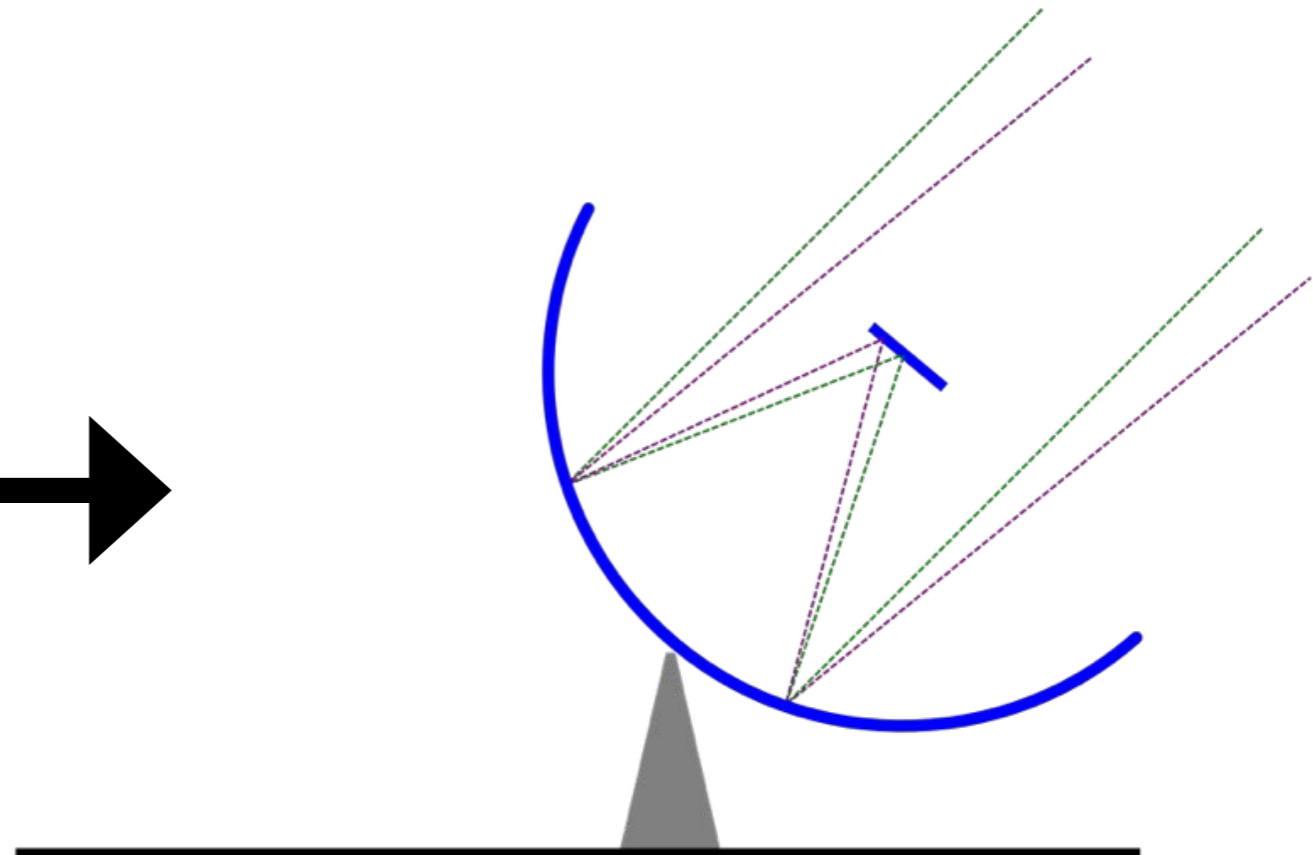
$$V(u, v) = \iint T(l, m) e^{-i2\pi(ul+vm)} dl dm$$



équivalent optique



➔

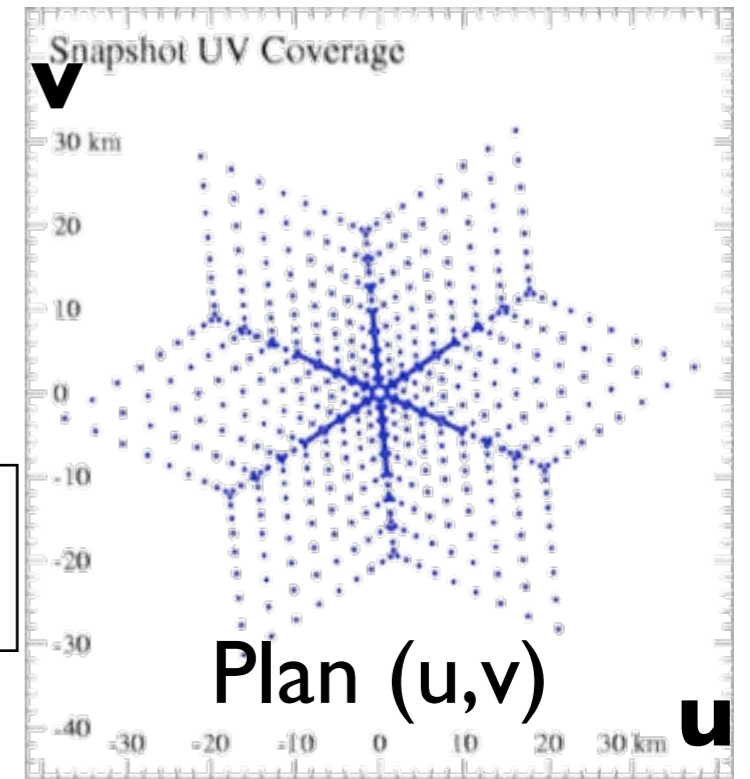


# Étalonnage des interféromètres

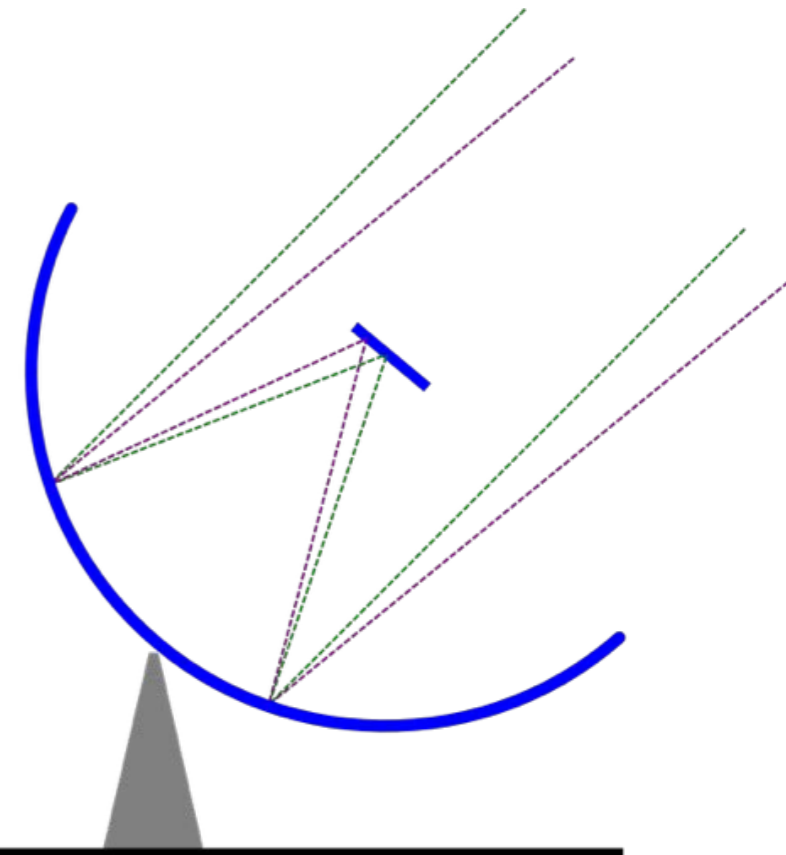
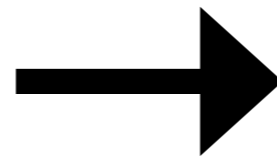
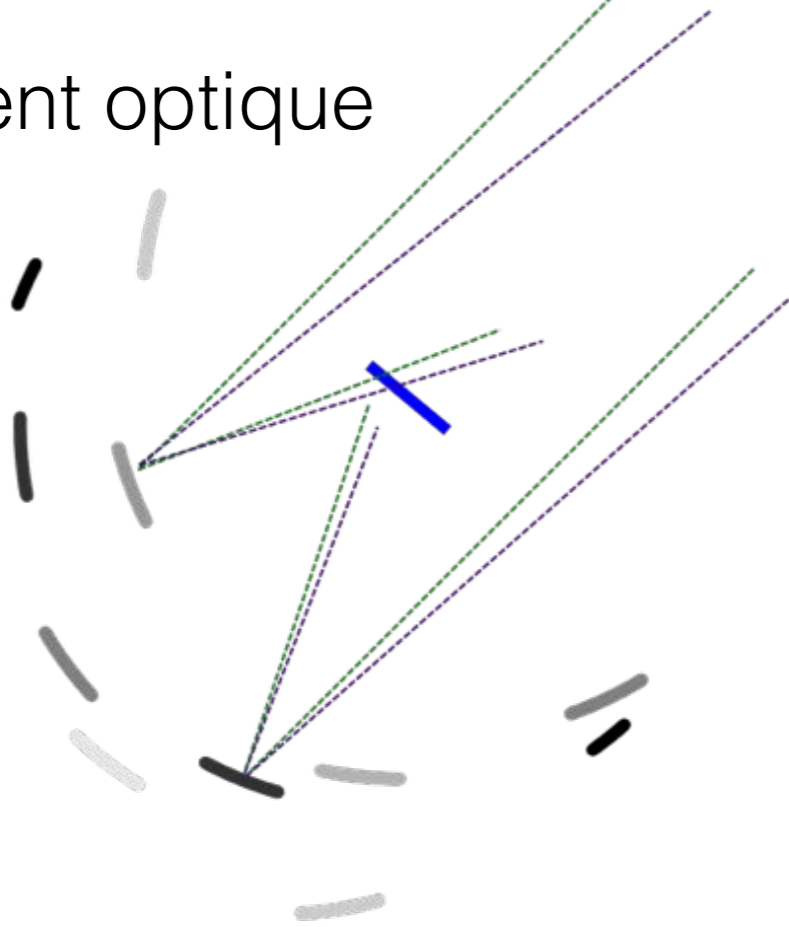


$\sim \mathcal{F}$   
→

$$V(u, v) = \iint T(l, m) e^{-i2\pi(ul+vm)} dl dm$$



équivalent optique



**Étalonnage complexe**

=

**« Optique adaptative »  
en post-traitement**

# Étalonnage des interféromètres

"1ère génération" (1GC)    Étalonnage valable au centre du champ  
Utilisation de sources étalon aux propriétés connues

$$\widetilde{V}_{pq}(t, \nu) = g_p(t, \nu)g_q^*(t, \nu)V_{pq}(t, \nu) + \epsilon_{pq}(t)$$

# Étalonnage des interféromètres

"1ère génération" (1GC)

Étalonnage valable au centre du champ

Utilisation de sources étalon aux propriétés connues

$$\widetilde{V}_{pq}(t, \nu) = g_p(t, \nu) g_q^*(t, \nu) V_{pq}(t, \nu) + \epsilon_{pq}(t)$$

Visibilités  
corrompues

Gain  
antenne p

Gain  
antenne q

Visibilités  
vraies

bruit sur la ligne  
de base (p,q)

# Étalonnage des interféromètres

## "1ère génération" (1GC)

Étalonnage valable au centre du champ

Utilisation de sources étalon aux propriétés connues

$$\widetilde{V}_{pq}(t, \nu) = g_p(t, \nu) g_q^*(t, \nu) V_{pq}(t, \nu) + \epsilon_{pq}(t)$$

Visibilités  
corrompues

Gain  
antenne p

Gain  
antenne q

Visibilités  
vraies

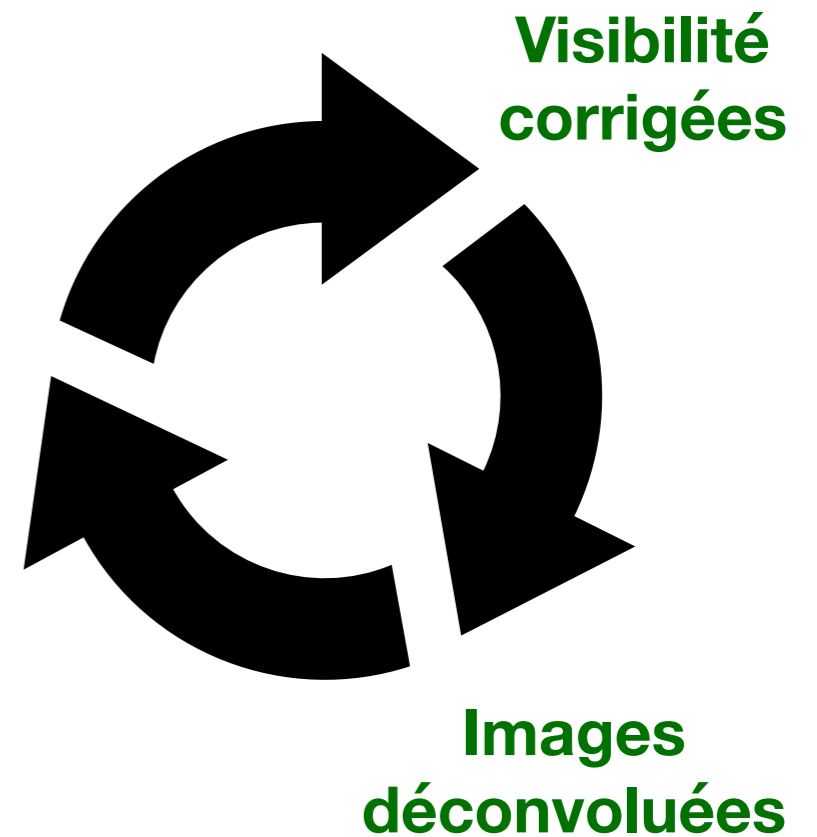
bruit sur la ligne  
de base (p,q)

## "2ème génération" (2GC)

Amélioration de l'étalonnage  
données grâce au contenu du champ

## "Self-calibration"

Visibilité  
brutes



# Étalonnage des interféromètres

## "1ère génération" (1GC)

Étalonnage valable au centre du champ

Utilisation de sources étalon aux propriétés connues

$$\widetilde{V}_{pq}(t, \nu) = g_p(t, \nu) g_q^*(t, \nu) V_{pq}(t, \nu) + \epsilon_{pq}(t)$$

Visibilités  
corrompues

Gain  
antenne p

Gain  
antenne q

Visibilités  
vraies

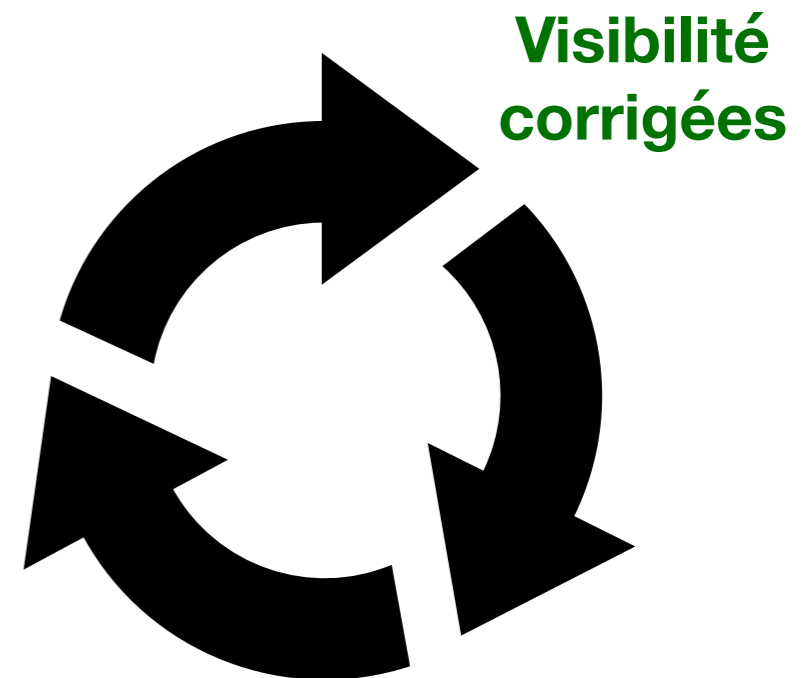
bruit sur la ligne  
de base (p,q)

## "2ème génération" (2GC)

Amélioration de l'étalonnage  
données grâce au contenu du champ

## "Self-calibration"

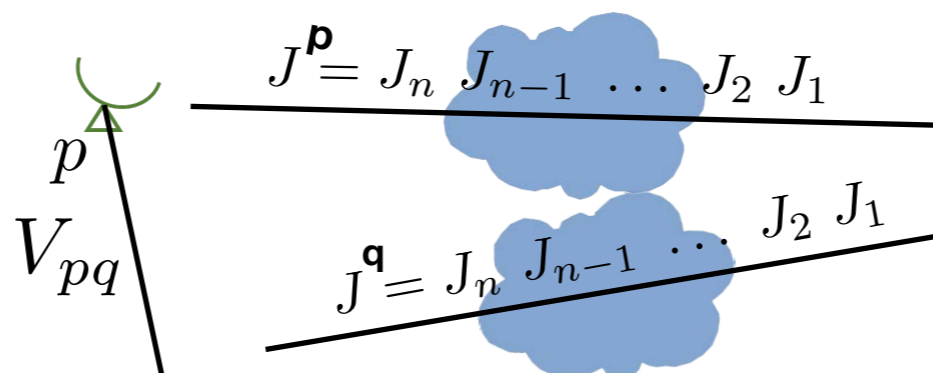
Visibilité  
brutes



## "3ème génération" (3GC)

Equation de la mesure

Effets dépendants de la direction  
non uniformes dans le champ

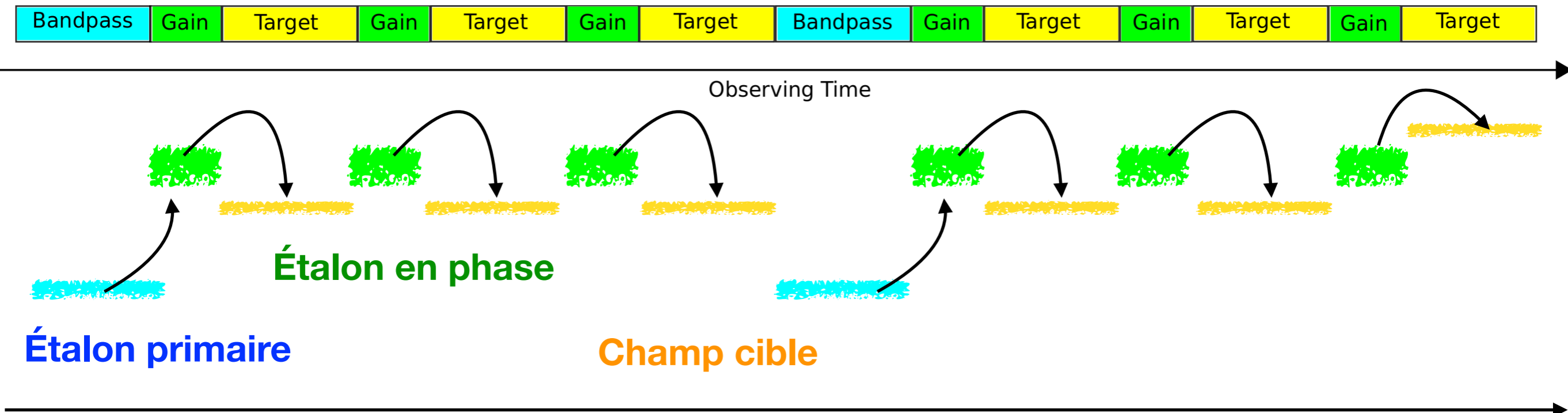


Images  
déconvoluées

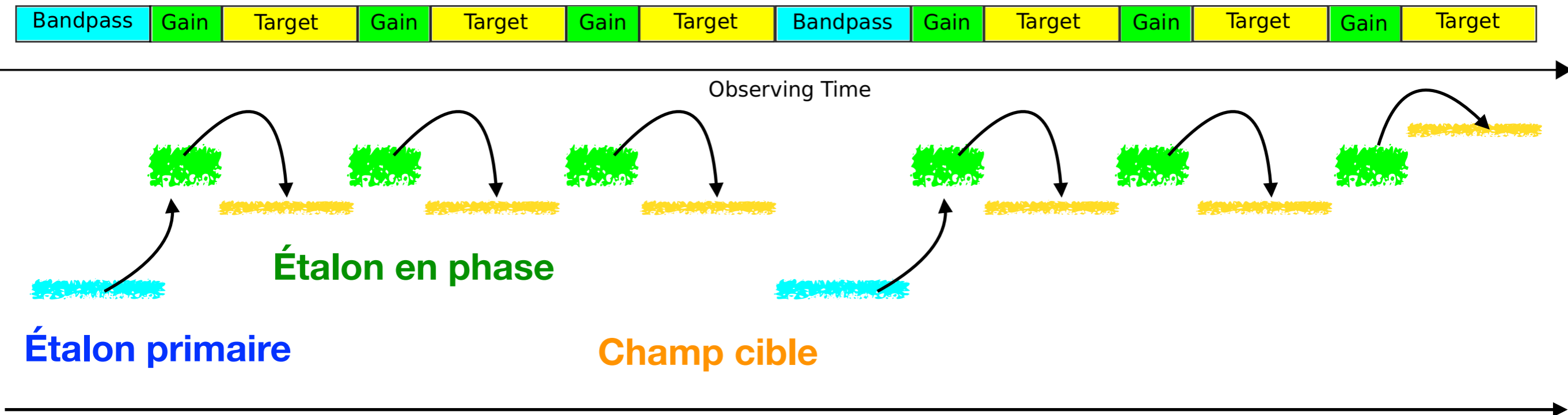
- Observation de **sources étalons**  
(dont on connaît, la forme, la densité de flux, le spectre)



- Observation de **sources étalons**  
(dont on connaît, la forme, la densité de flux, le spectre)
- Stratégie d'observation: alternance entre source étalon et champ cible



- Observation de **sources étalons**  
(dont on connaît, la forme, la densité de flux, le spectre)
- Stratégie d'observation: alternance entre source étalon et champ cible

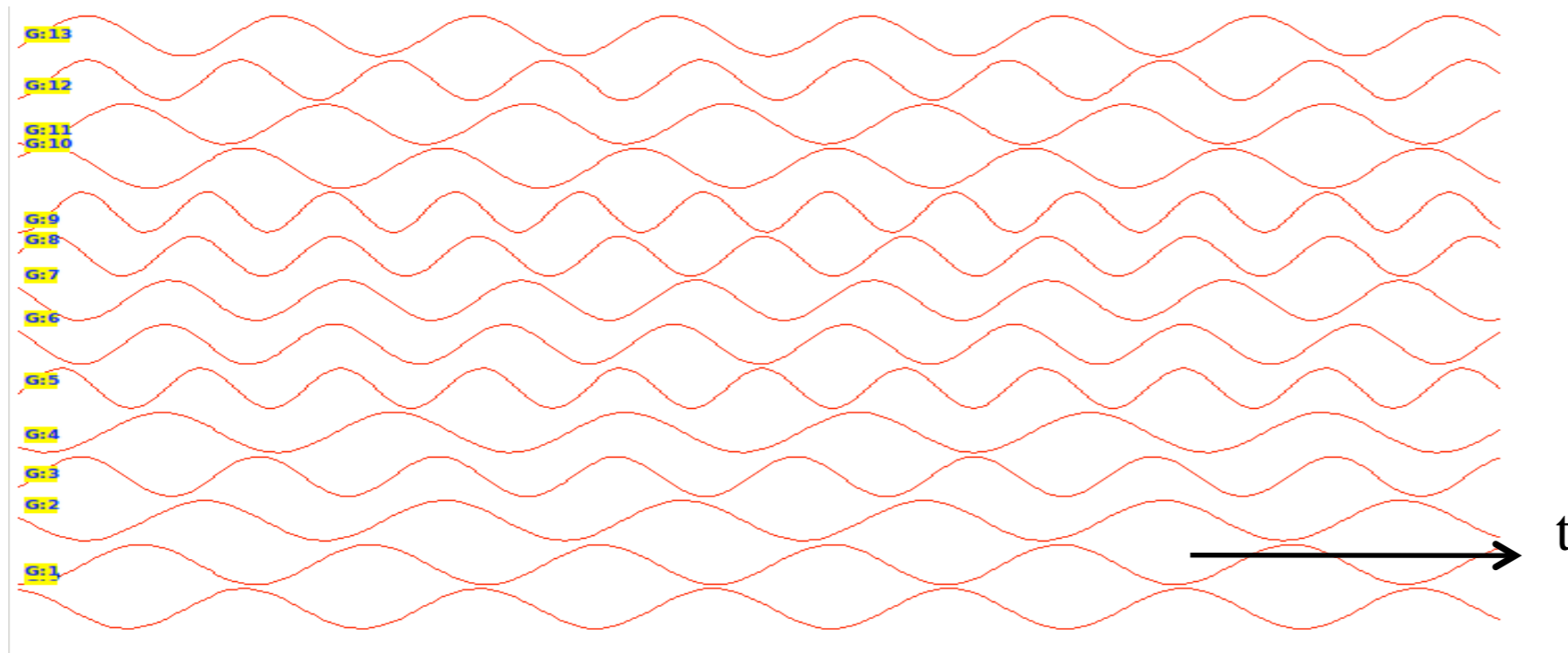


- La source étalon permet de suivre les variations de la réponse de l'instrument (~étoile guide)
- On détermine les **gains complexes** des antennes  $g_p$  qui seront utilisé pour corriger les visibilités du champ cible.
- On peut **sélectionner, lisser, interpoler** ces solutions suivant le degré de correction

- A) **L'étalonnage en flux absolu** (ou primaire) est faite pour déterminer l'échelle physique de densité de flux des sources dans le champ.  
(**"Absolute Flux Calibration/calibrator"**)
- B) **L'étalonnage en bande passante** est utilisée pour corriger de la réponse instrumentale de long de l'axe de fréquence.  
(**"Bandpass calibration/calibrator"**)
- C) La correction des délais utilisée pour enlever les délais résiduels superflus de phase entre les antennes.  
(**"Delay calibration/correction"**)
- D) **L'étalonnage en gain** est utilisée pour déterminer les gains complexes (amplitude et phase) effectifs de chaque antenne pendant une observation (**"Gain calibration / Phase calibrator"**)

En pratique, A),B) et C) sont fait avec la même source de référence  
D) est effectué sur une source de référence proche ou dans le champ cible

Simulation d'une erreur périodique du gain de 20% (0.8-1.2) sur chaque antenne

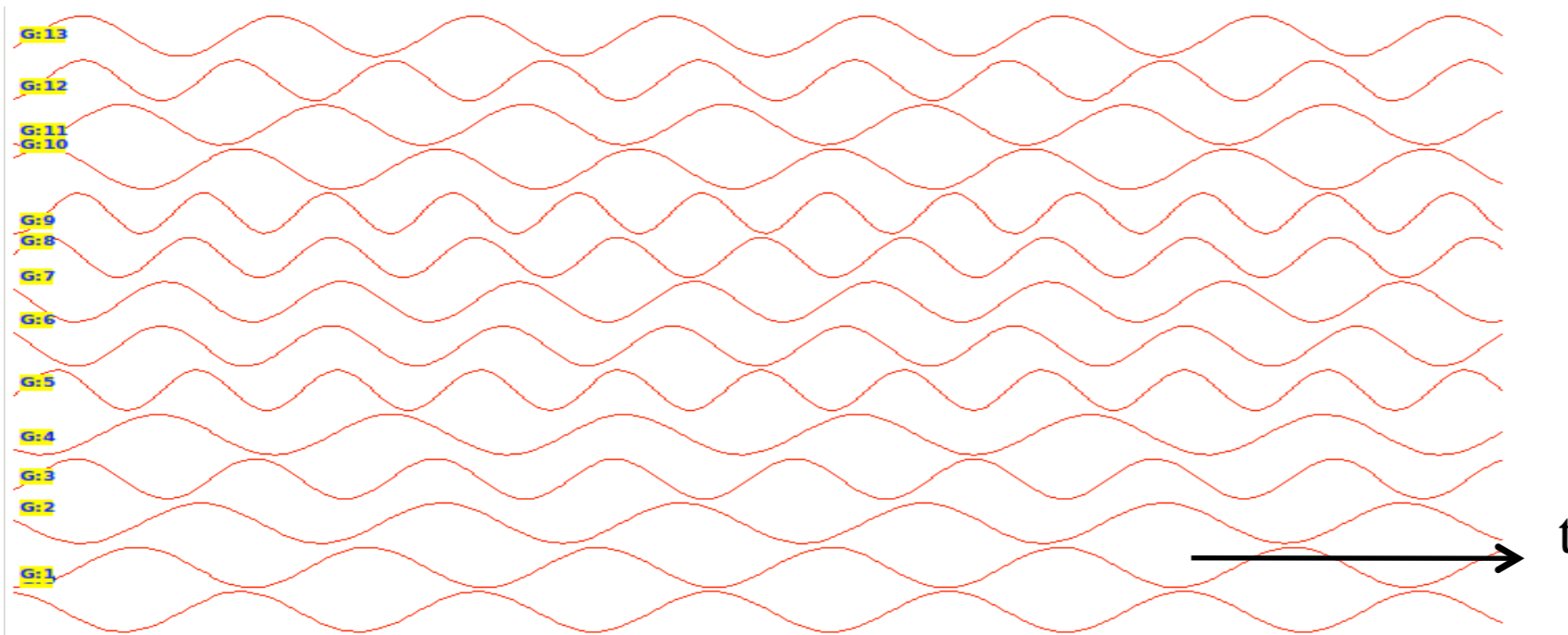


Gain des 14 antennes du  
WSRT (Westerbork  
Synthesis Radio Telescope)

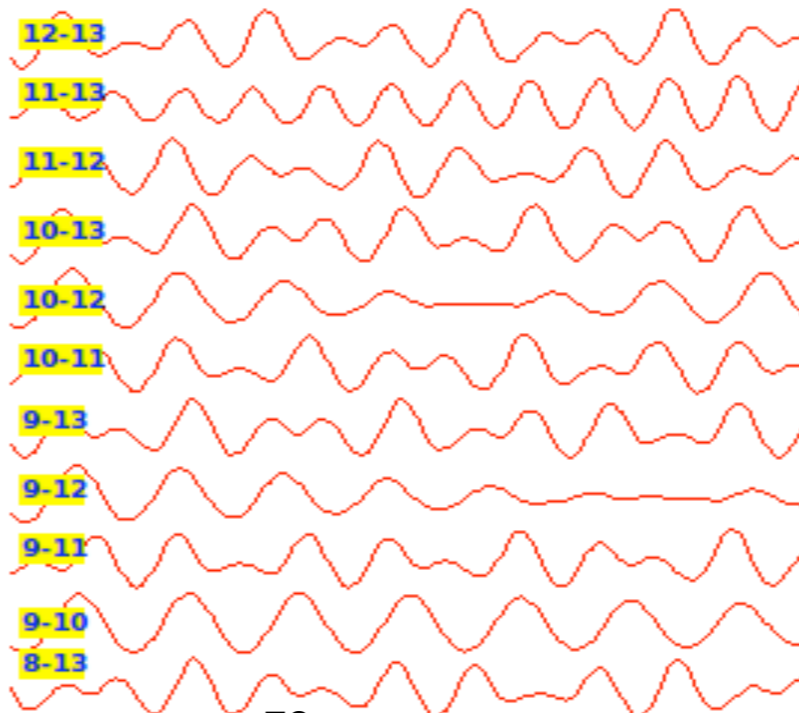
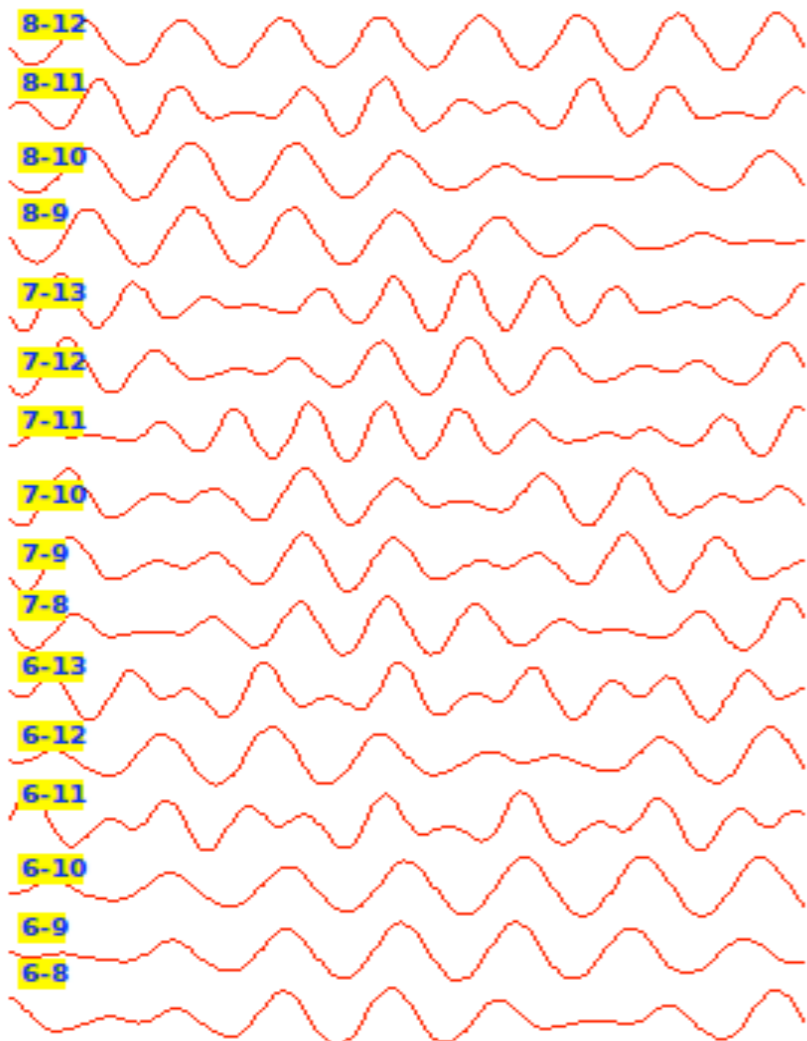
# Étalonnage des interféromètres

1GC

Simulation d'une erreur périodique du gain de 20% (0.8-1.2) sur chaque antenne



Gain des 14 antennes du WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope)

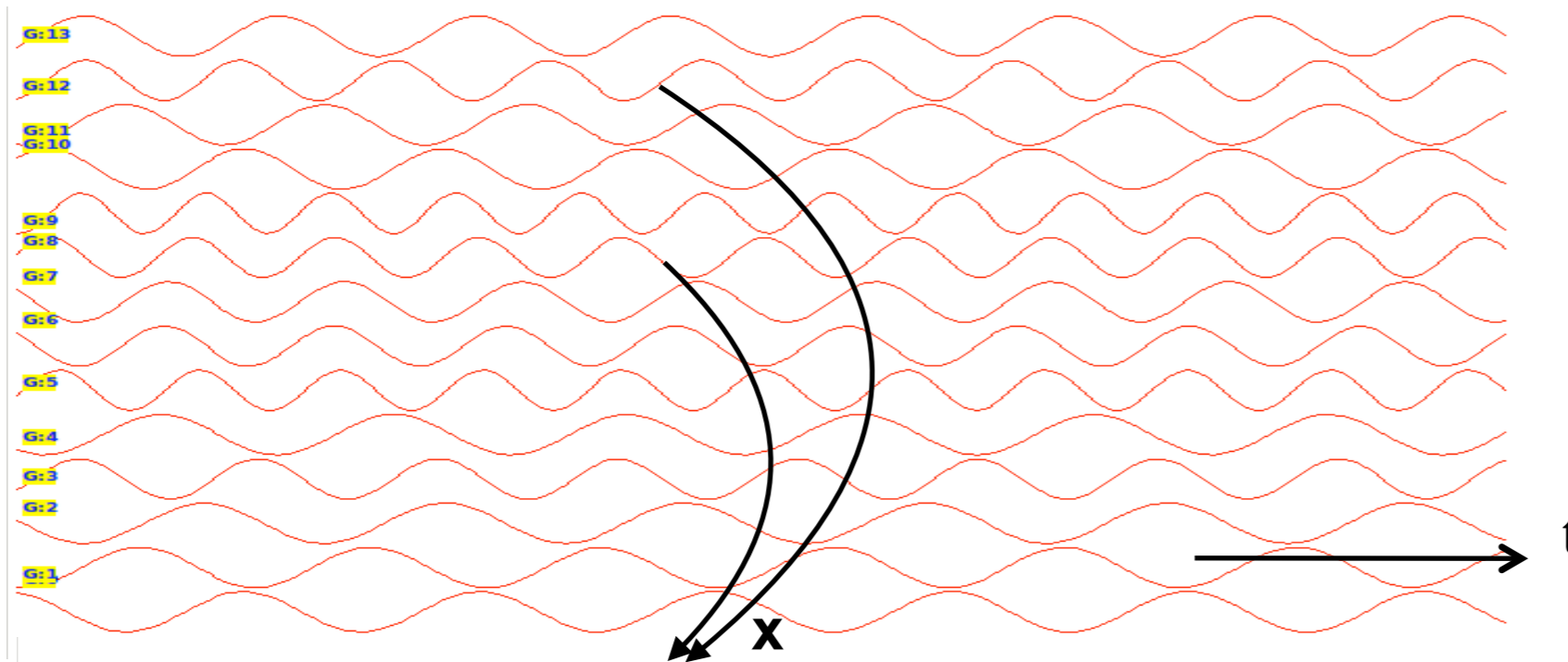


→ Amplitude de la visibilité pour quelques lignes de bases (en fonction de t)

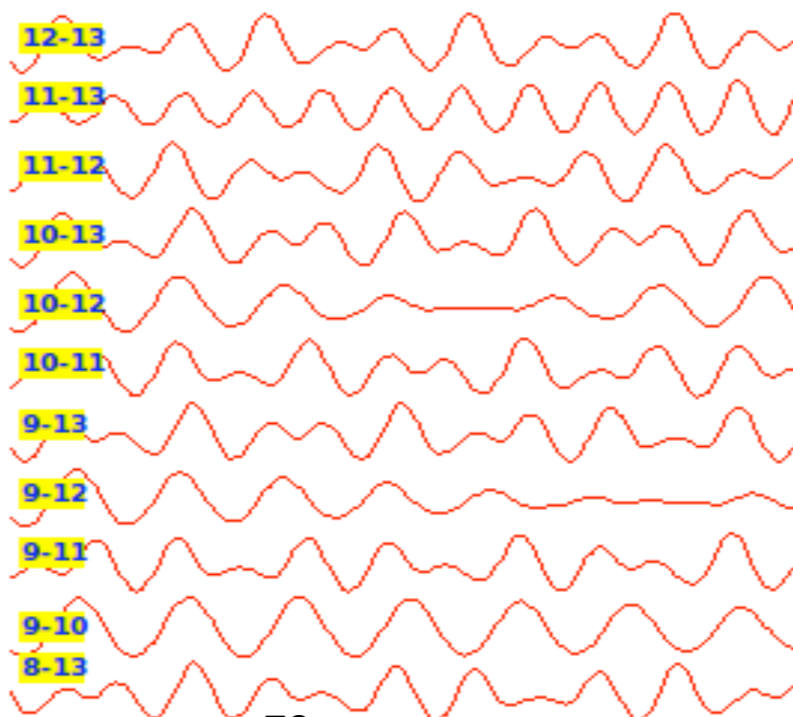
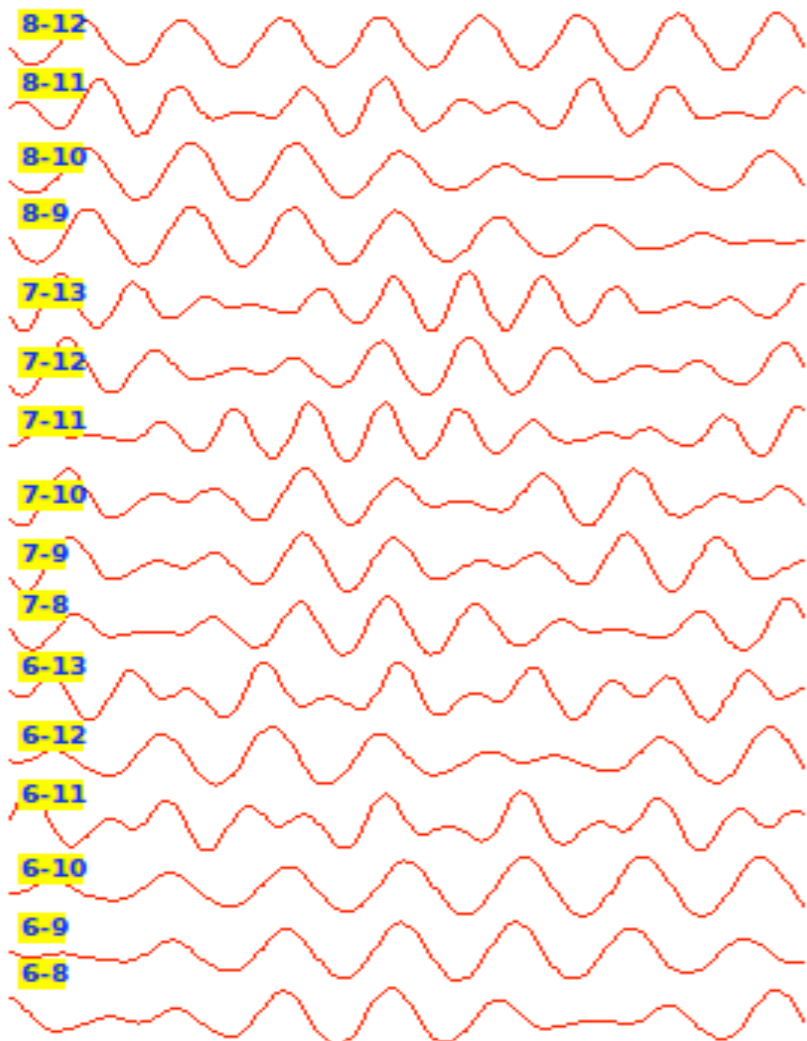
# Étalonnage des interféromètres

1GC

Simulation d'une erreur périodique du gain de 20% (0.8-1.2) sur chaque antenne



Gain des 14 antennes du WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope)

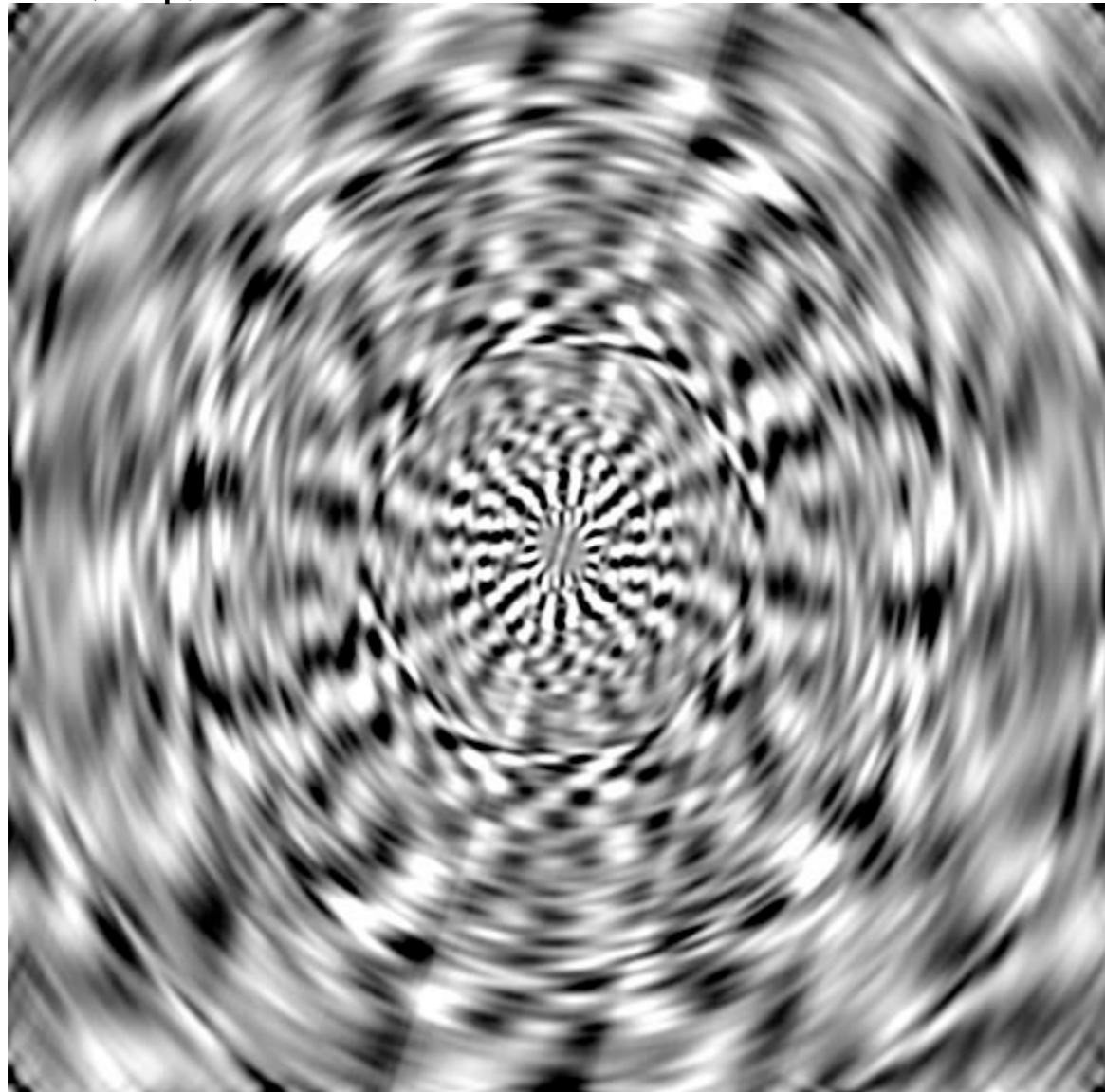


→ Amplitude de la visibilité pour quelques lignes de bases (en fonction de  $t$ )

Soustraction de la source (à partir d'un modèle supposé de la source)

**Avant étalonnage des Gains**

$\delta S(\theta, \phi)$



Min = -0.03 Jy

Max = 0.03 Jy

⇒ La source a bien été soustraite, mais il reste des résidus (variations d'intensité) élevés dus aux erreurs de gain artificiellement introduites et non corrigées.

**Après étalonnage des Gains**

$\delta S(\theta, \phi)$



Min =  $-1.5 \cdot 10^{-9}$  Jy

Max =  $1.5 \cdot 10^{-9}$  Jy

⇒ Les résidus ont une statistique gaussienne (erreur numérique dans ce cas)

Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"



Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration

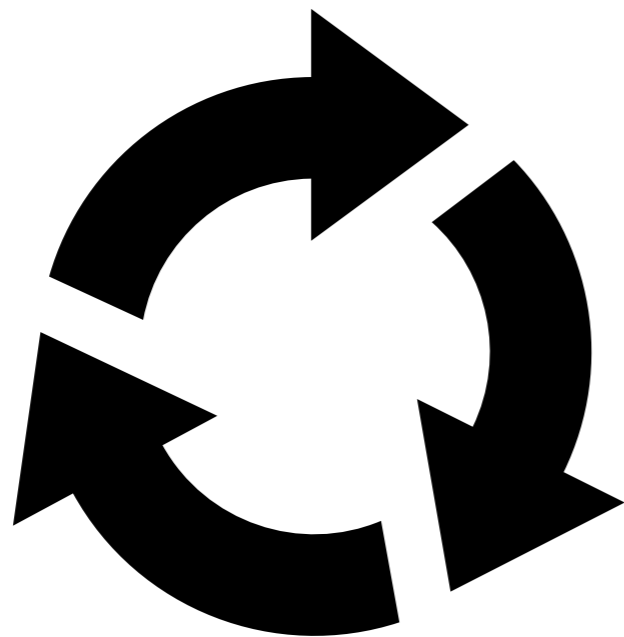
Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration

Visibilité  
brutes

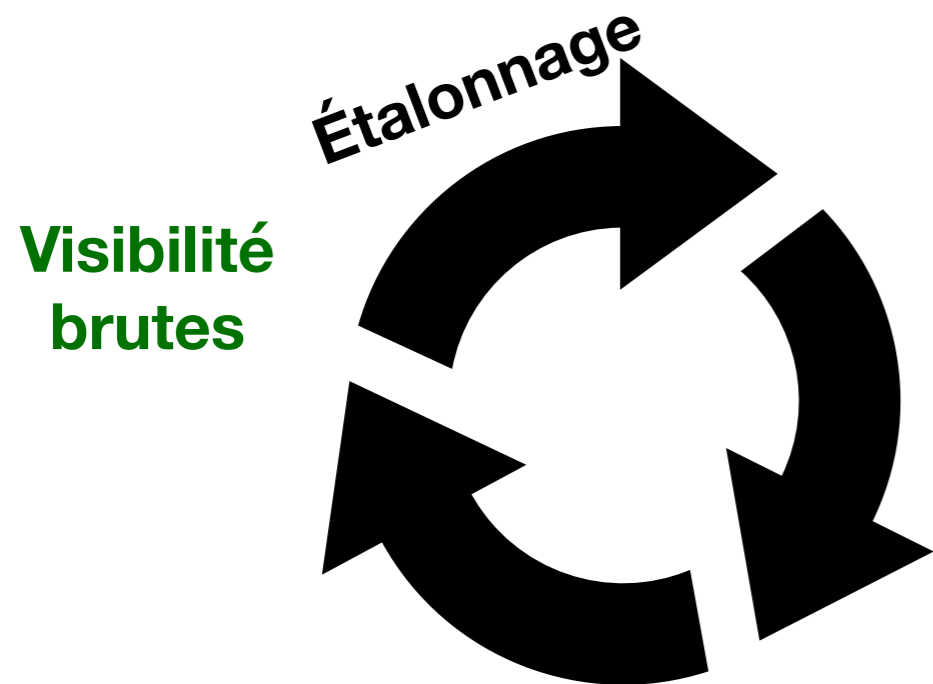


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration

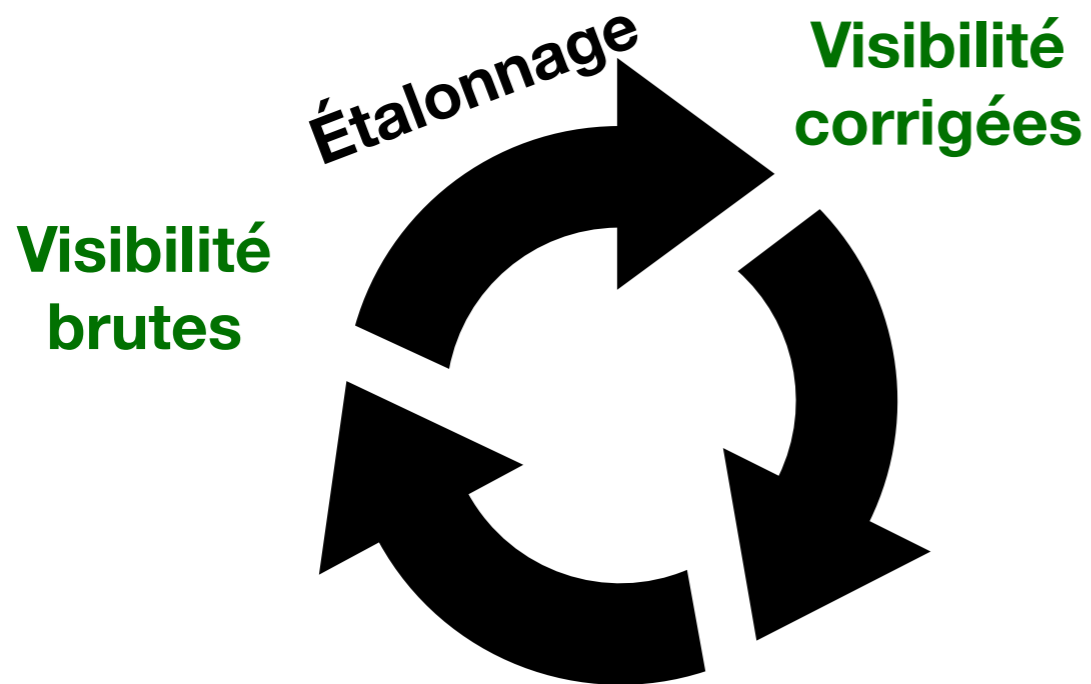


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration

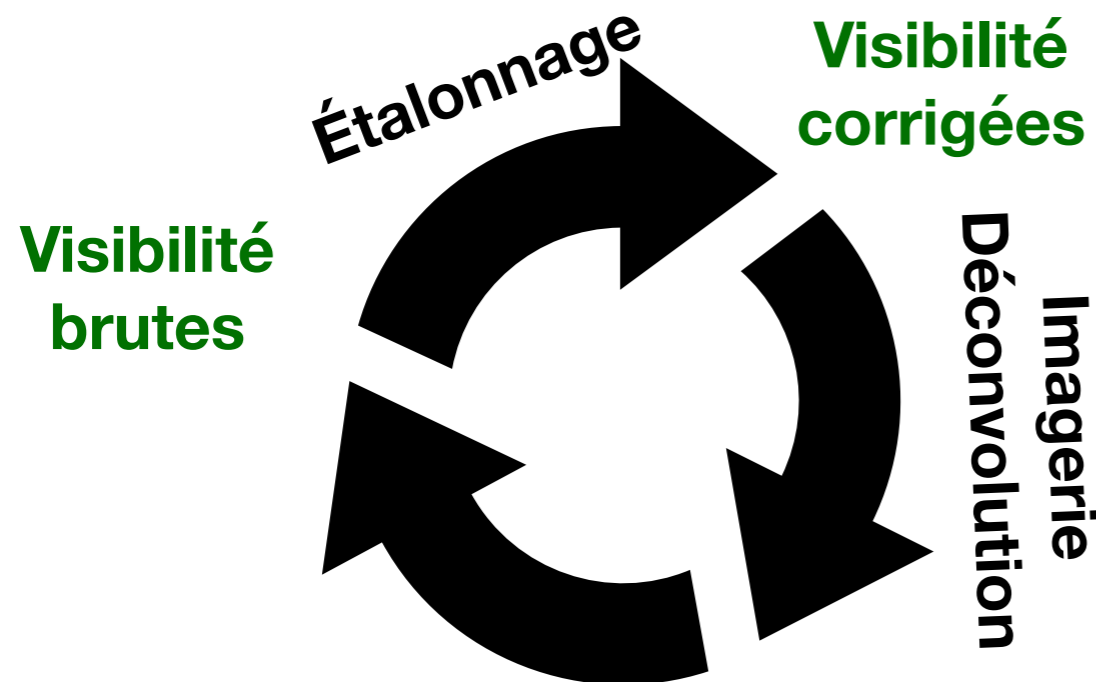


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration

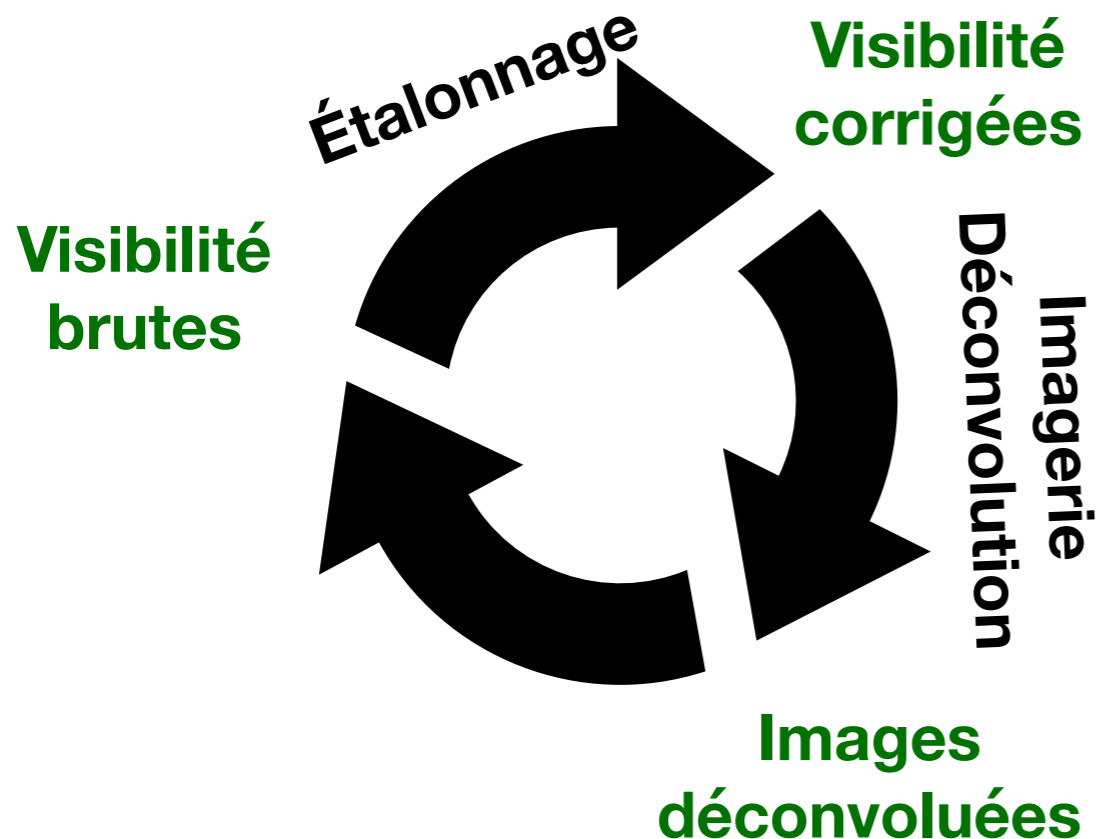


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration

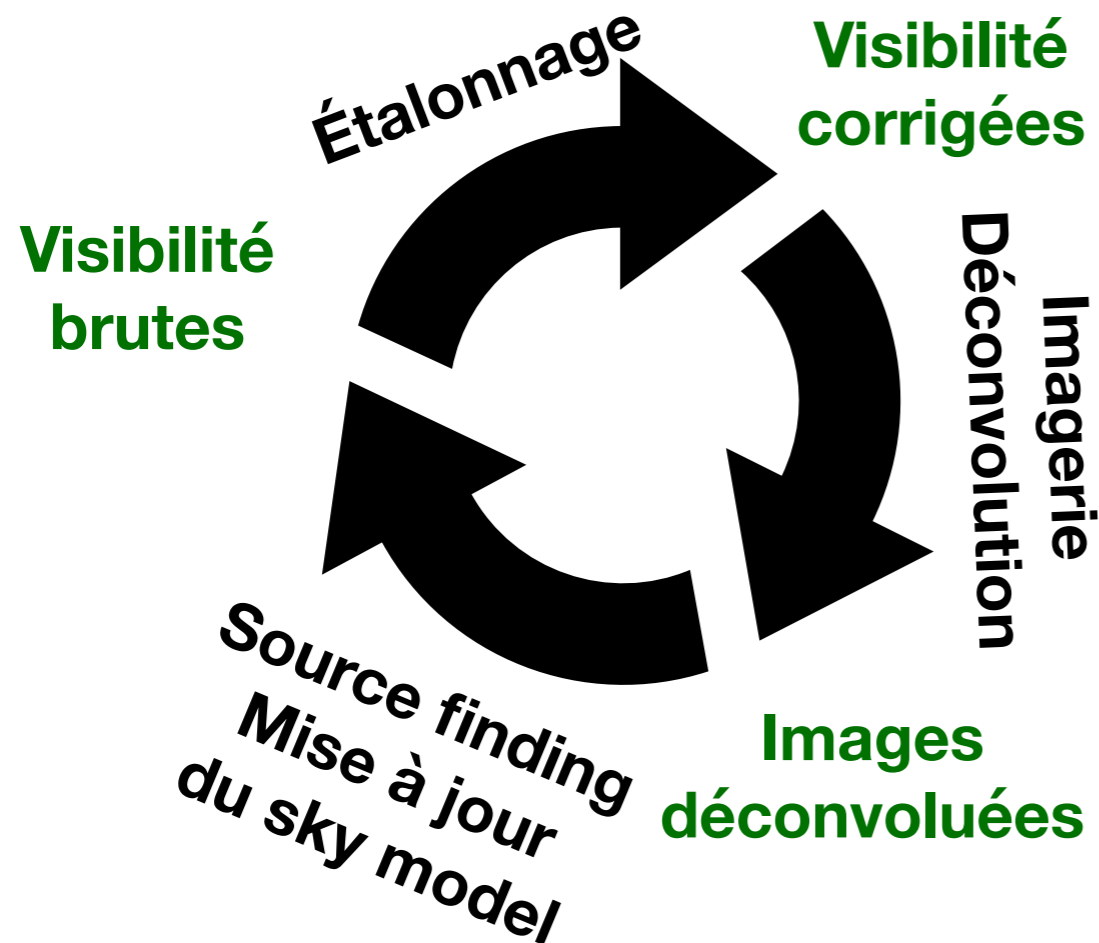


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration



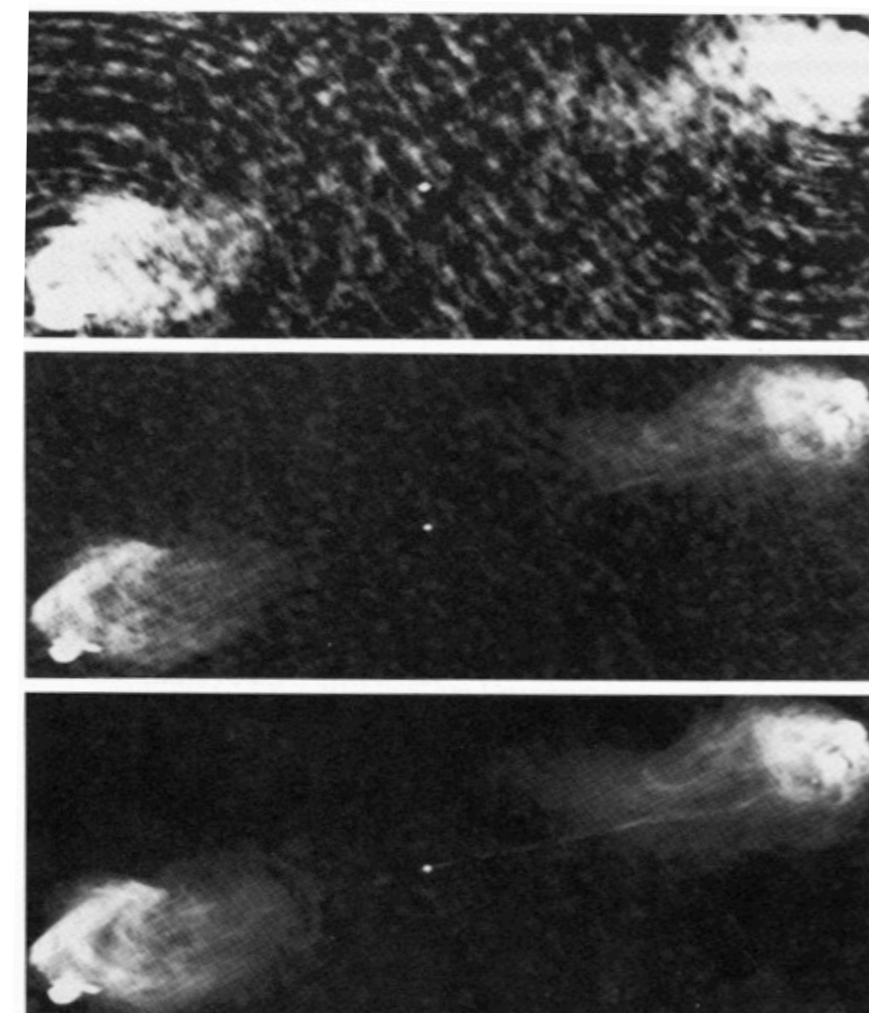
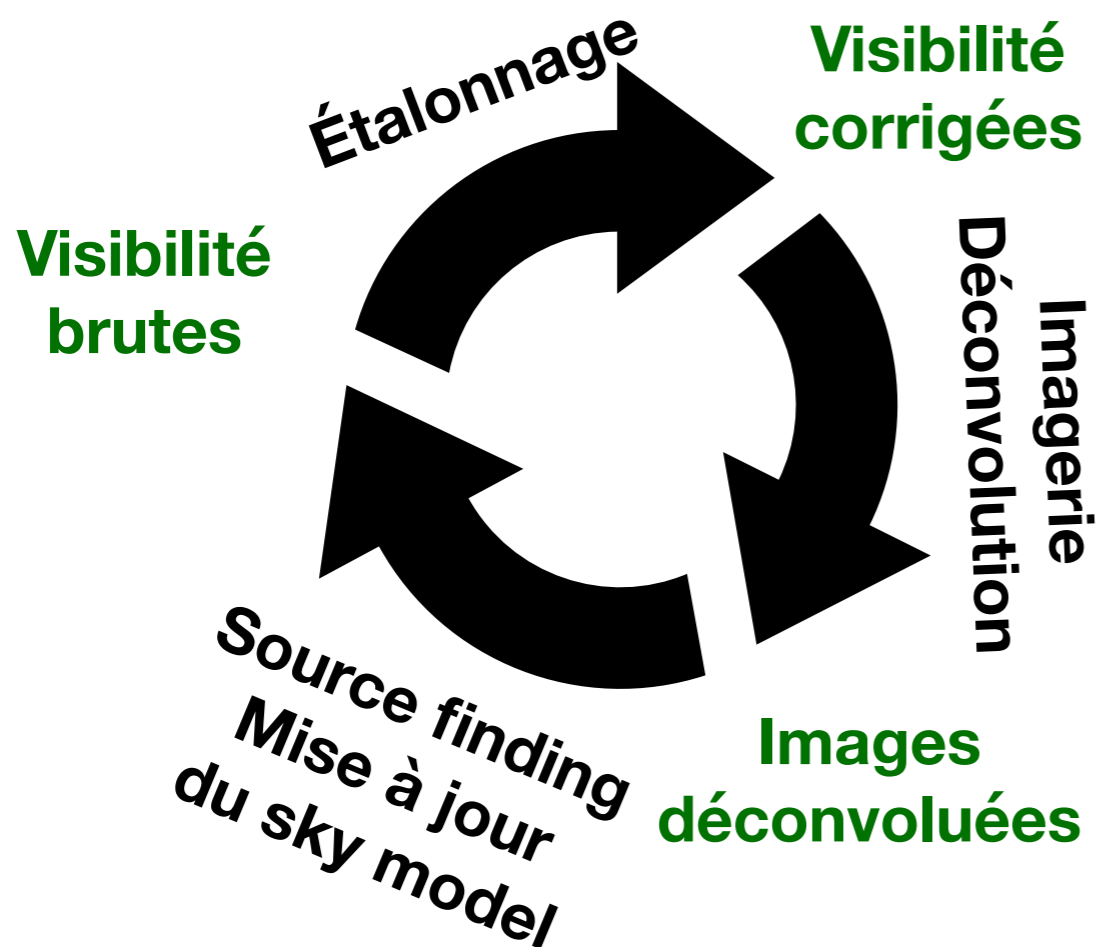
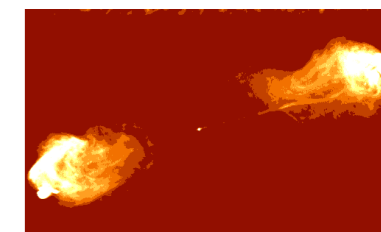


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

On définit la plage dynamique de l'image (Dynamic Range) comme le rapport:

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I} \quad \text{ex: DR} = 1:1000, 1:10^6$$

On peut raffiner l'étalonnage avec l'algorithme de self-calibration



Après plusieurs itérations de self-calibration, l'image ne s'améliore plus. Cependant il peut rester des artefacts non désirés et non capturés par l'étalonnage (surtout si on veut imager dans un grand champ)



Région où  
l'étalonnage  
classique  
est valable

# Étalonnage des interféromètres

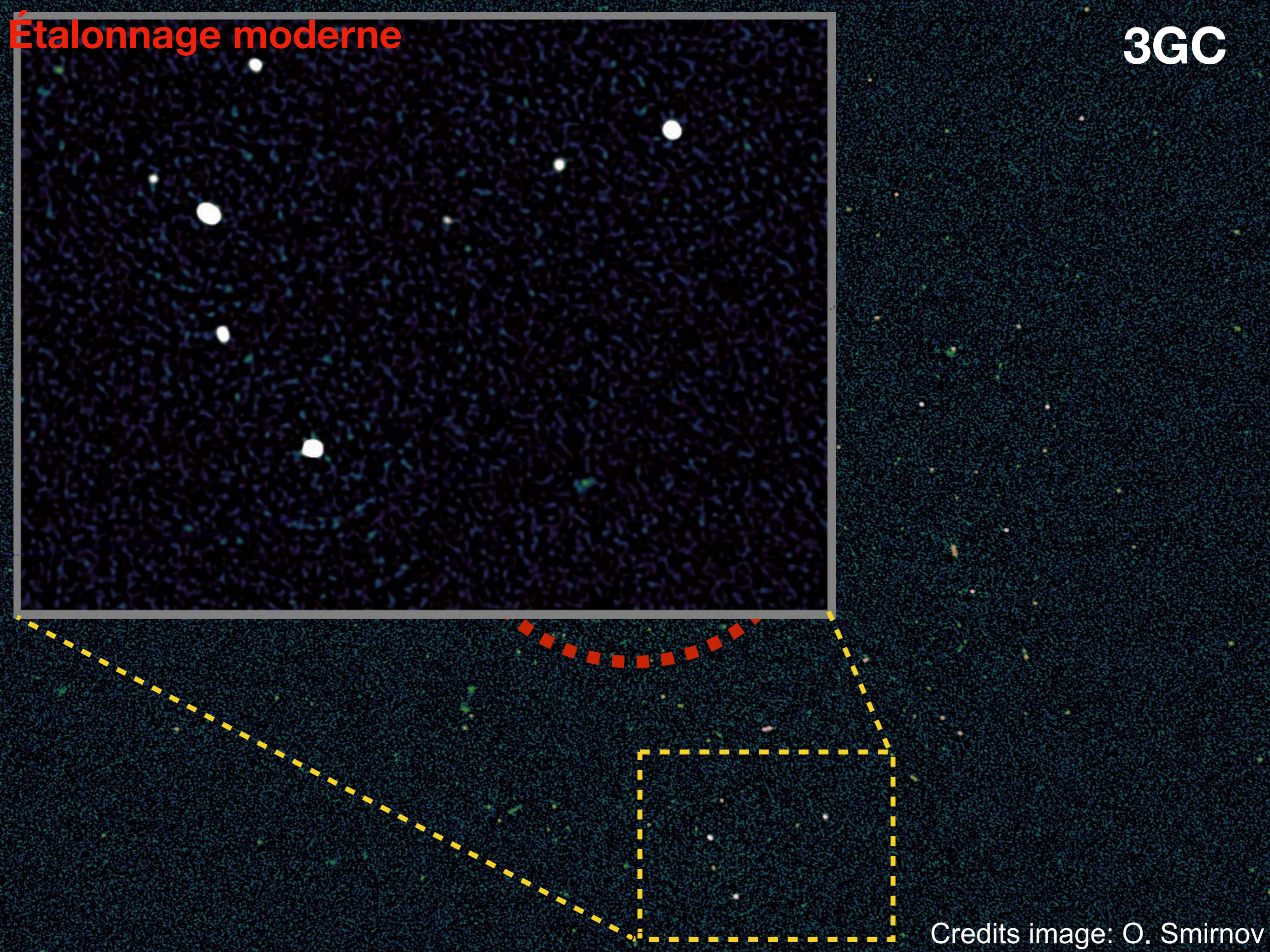
Différentes générations de calibration  
**Étalonnage moderne**

A star field with a dark blue background and scattered white and yellow stars. A red dashed circle is centered in the upper half of the image, and a yellow dashed square is located in the lower right quadrant. The text "Région où l'étalonnage classique est valable" is centered within the red dashed circle.

Région où  
l'étalonnage  
classique  
est valable

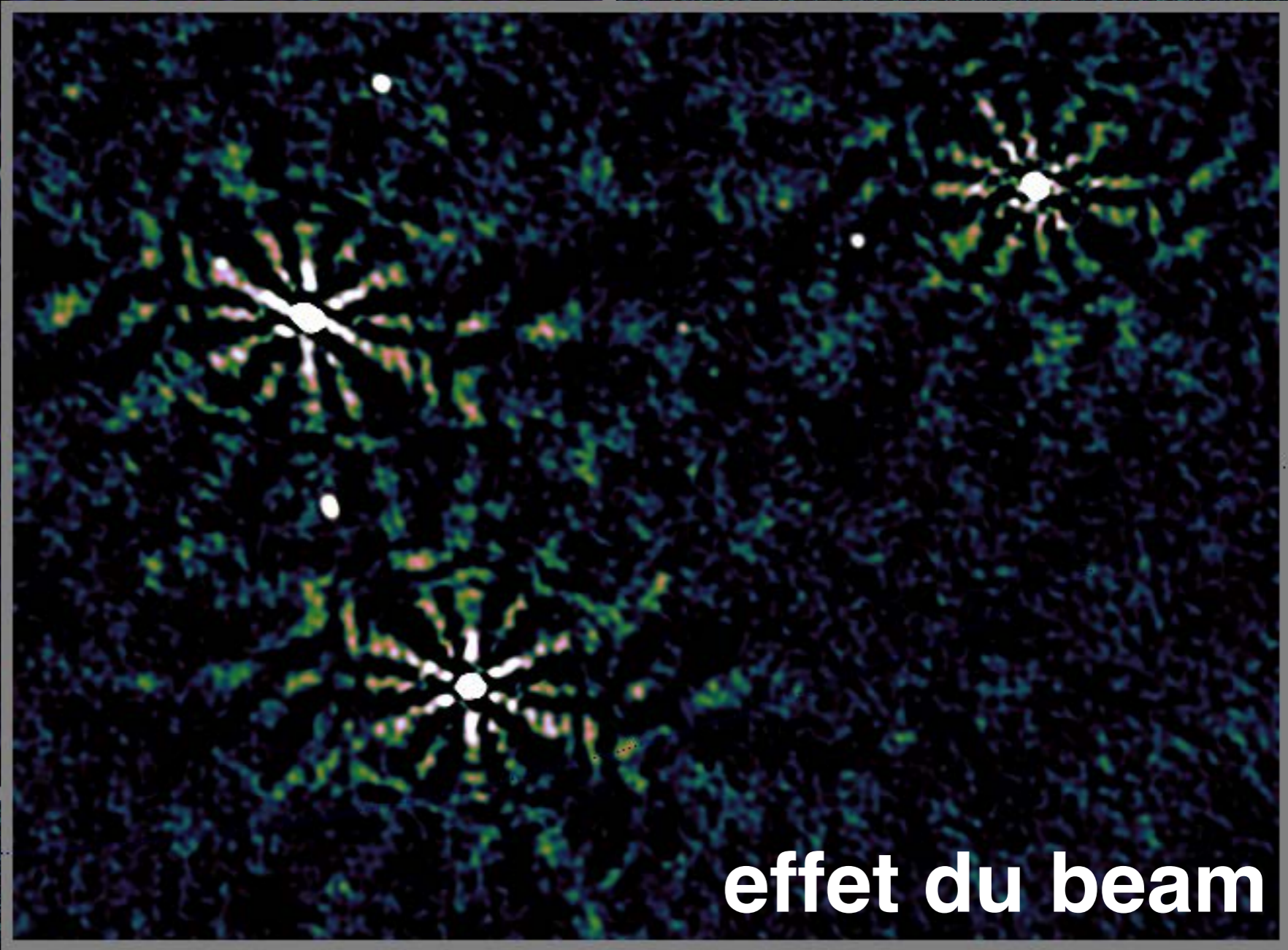
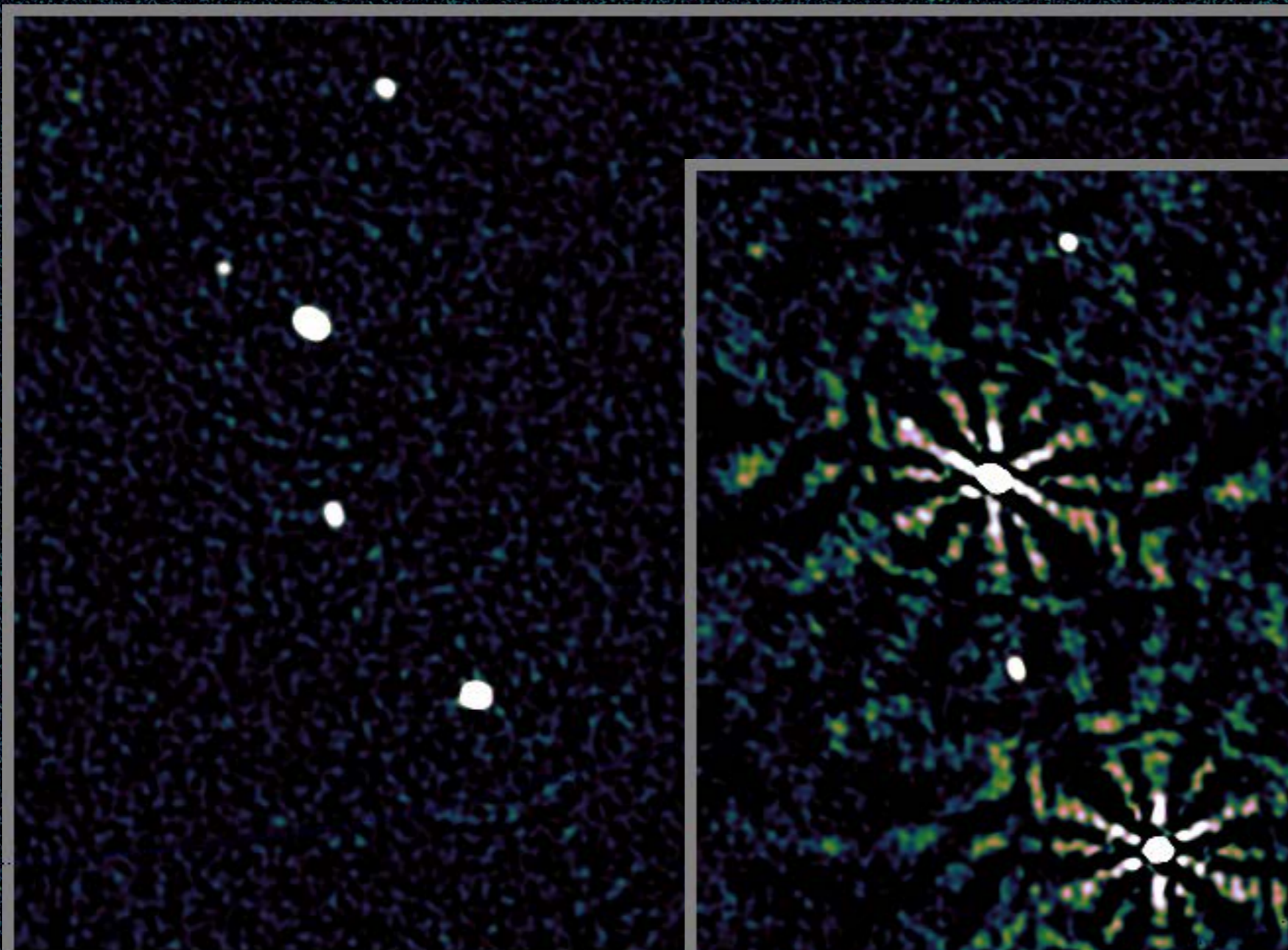
Étalonnage moderne

3GC

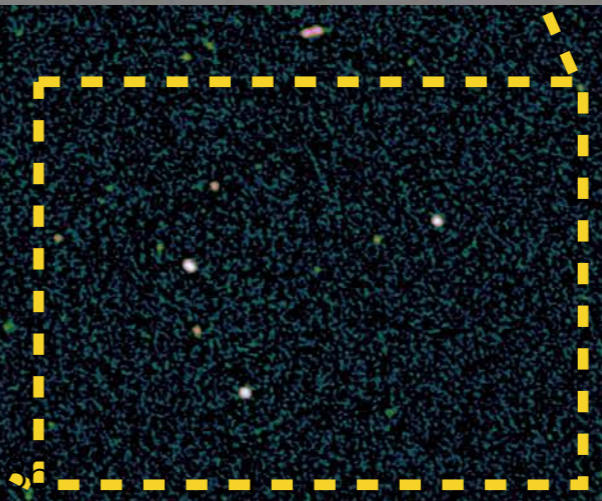


Credits image: O. Smirnov

**3GC**



**effet du beam**



Credits image: O. Smirnov

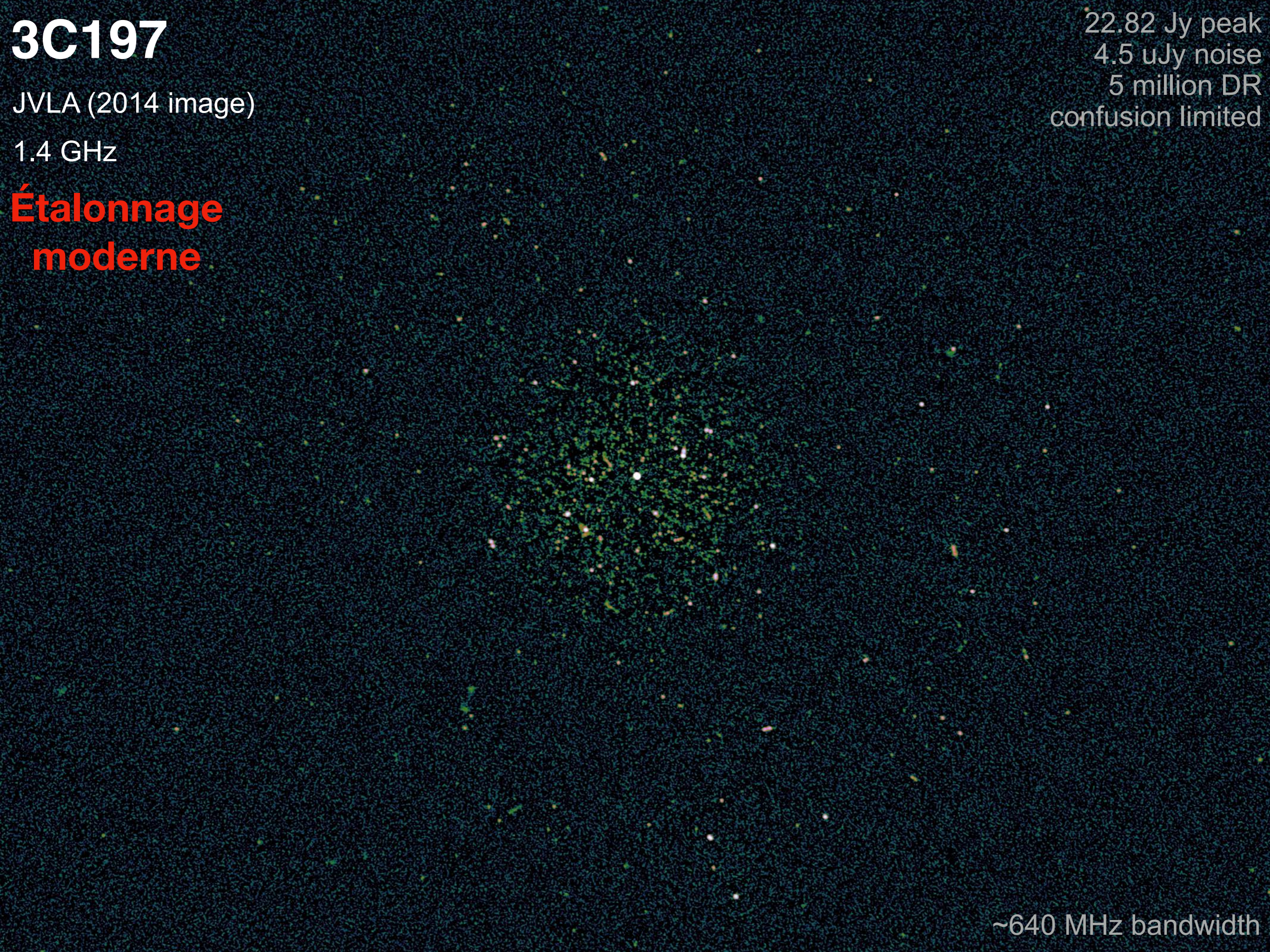
# 3C197

JVLA (2014 image)

1.4 GHz

Étalonnage  
moderne

22.82 Jy peak  
4.5  $\mu$ Jy noise  
5 million DR  
confusion limited



~640 MHz bandwidth

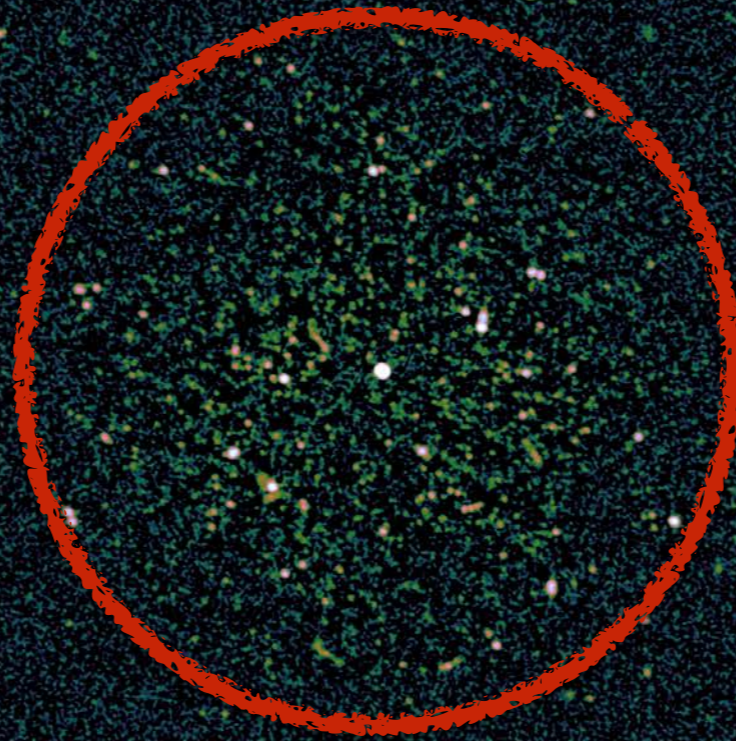
# 3C197

JVLA (2014 image)

1.4 GHz

Étalonnage  
moderne

22.82 Jy peak  
4.5  $\mu$ Jy noise  
5 million DR  
confusion limited



~640 MHz bandwidth



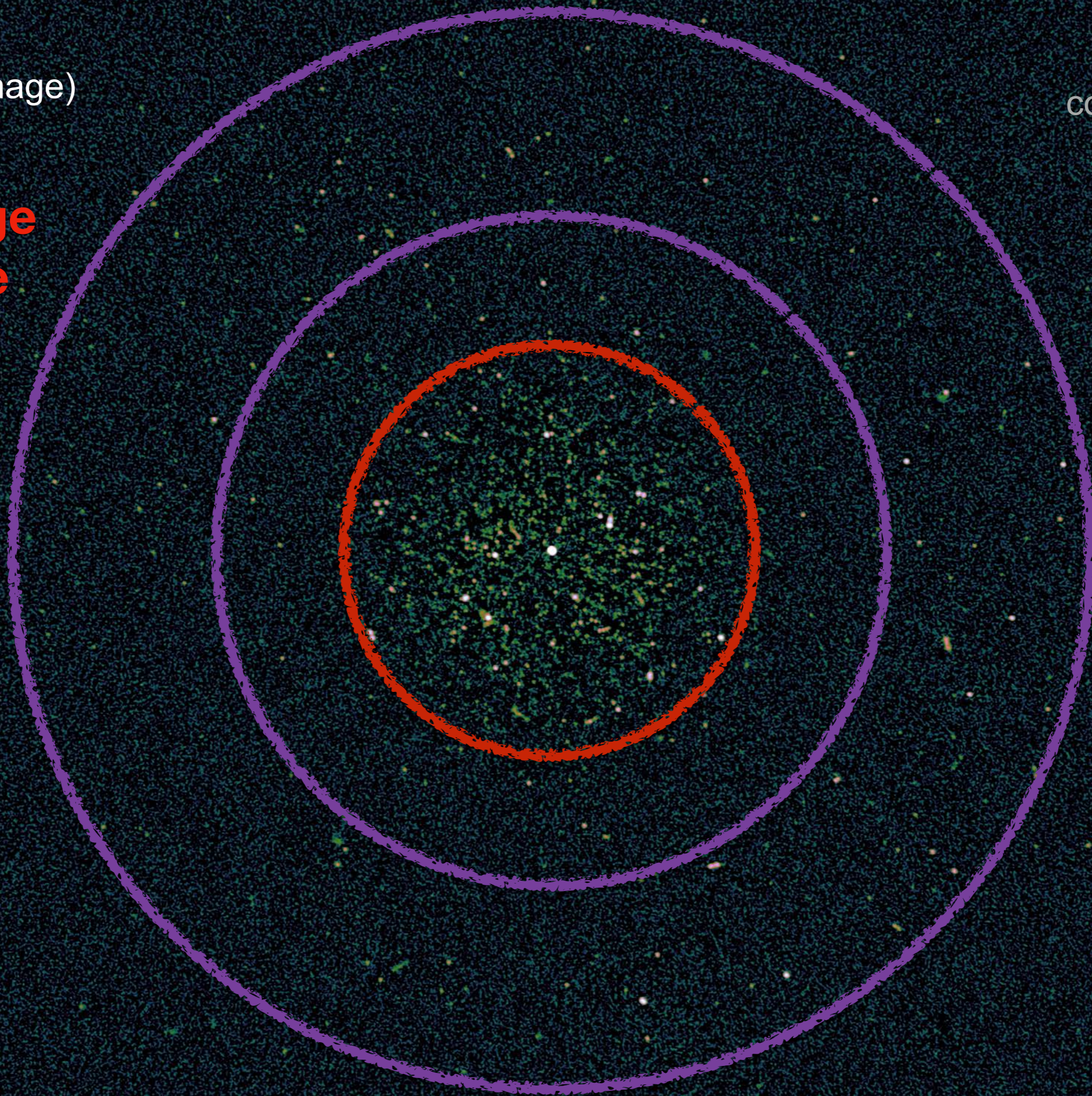
# 3C197

JVLA (2014 image)

1.4 GHz

Étalonnage  
moderne

22.82 Jy peak  
4.5  $\mu$ Jy noise  
5 million DR  
confusion limited



~640 MHz bandwidth

# 3C197

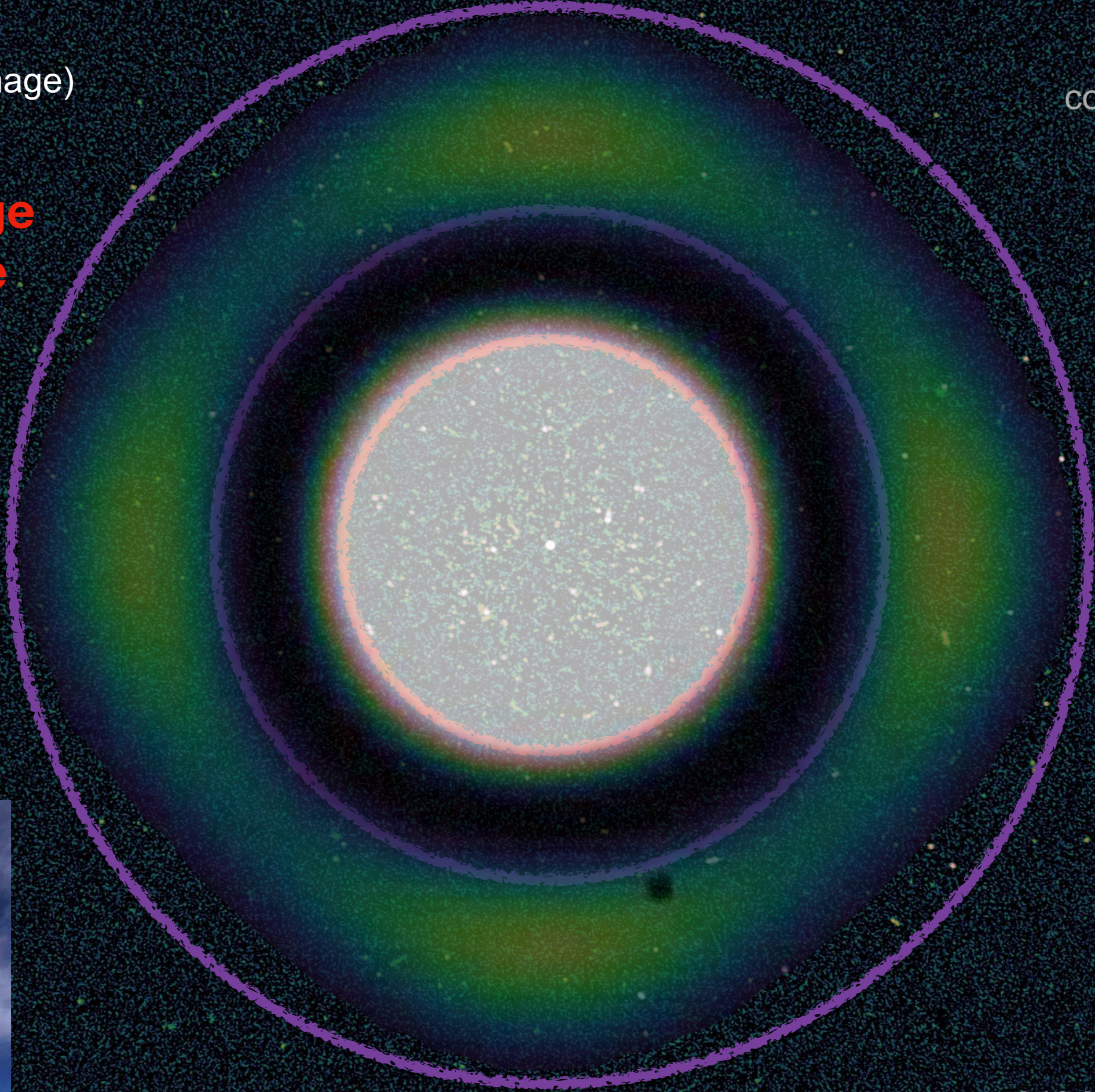
JVLA (2014 image)

1.4 GHz

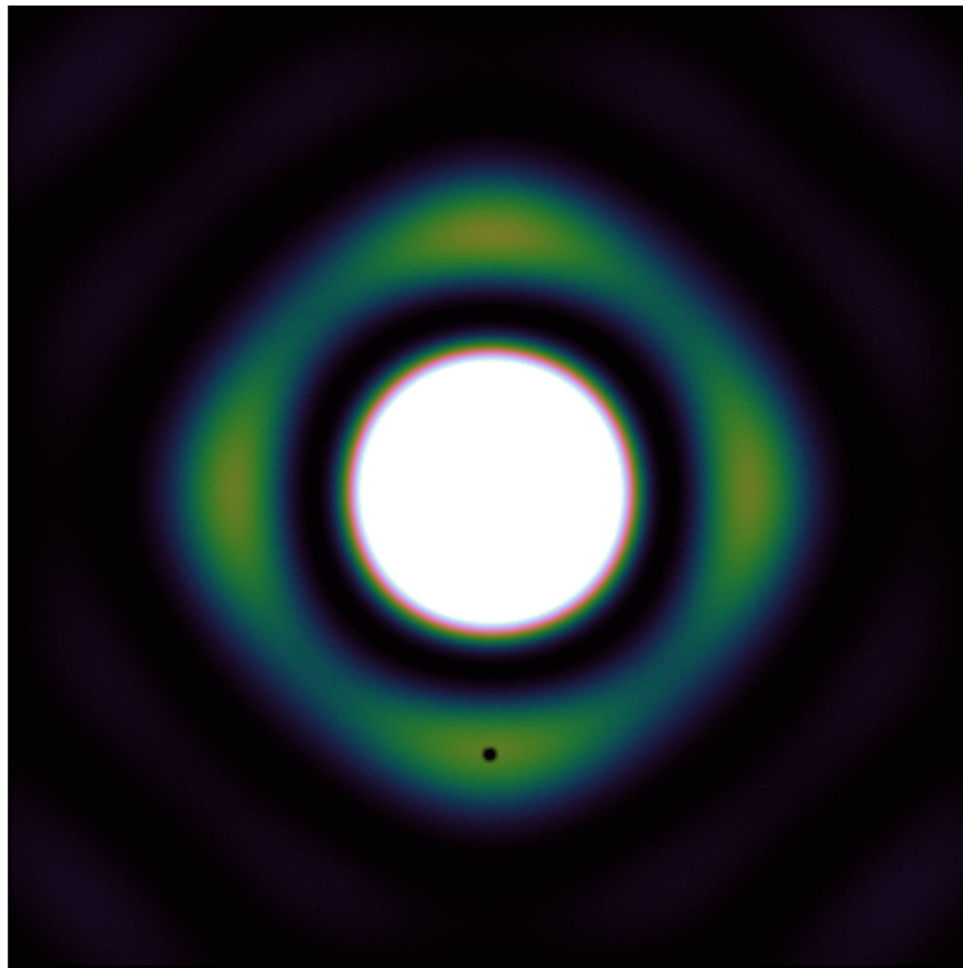
Étalonnage  
moderne

## Antenna beam

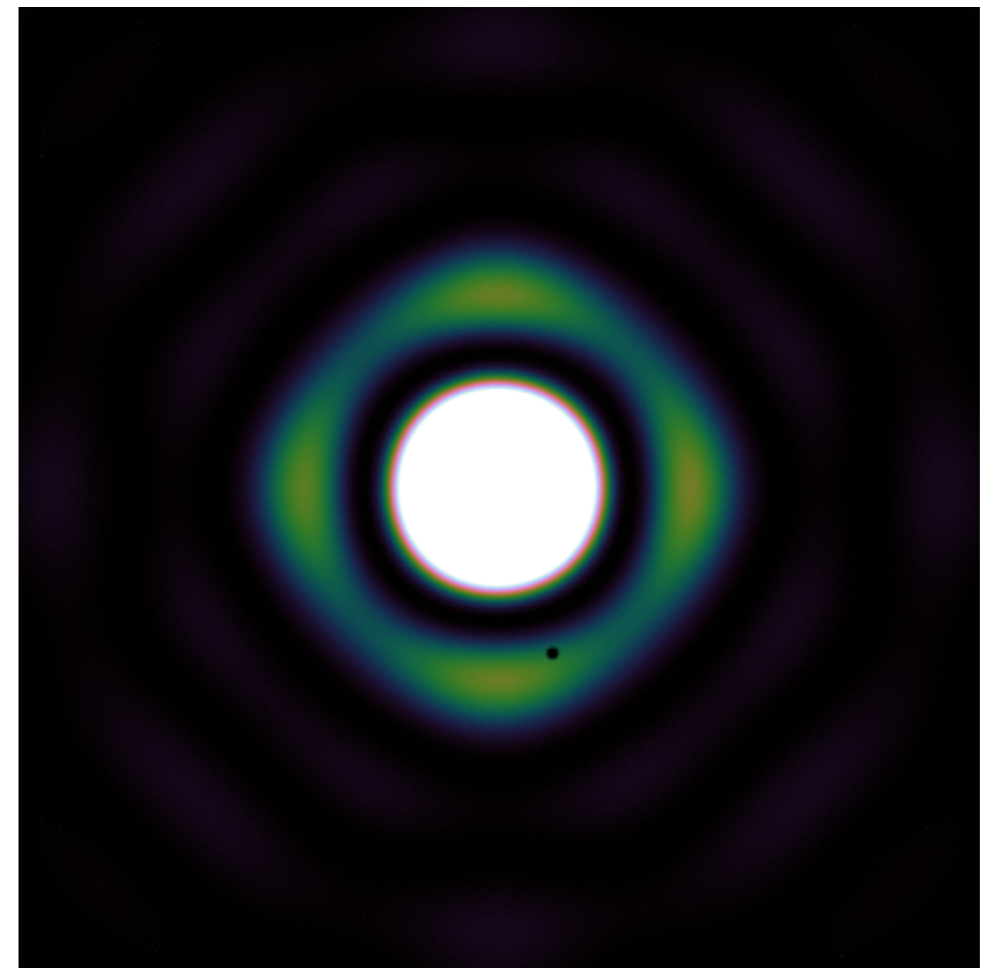
22.82 Jy peak  
4.5  $\mu$ Jy noise  
5 million DR  
confusion limited



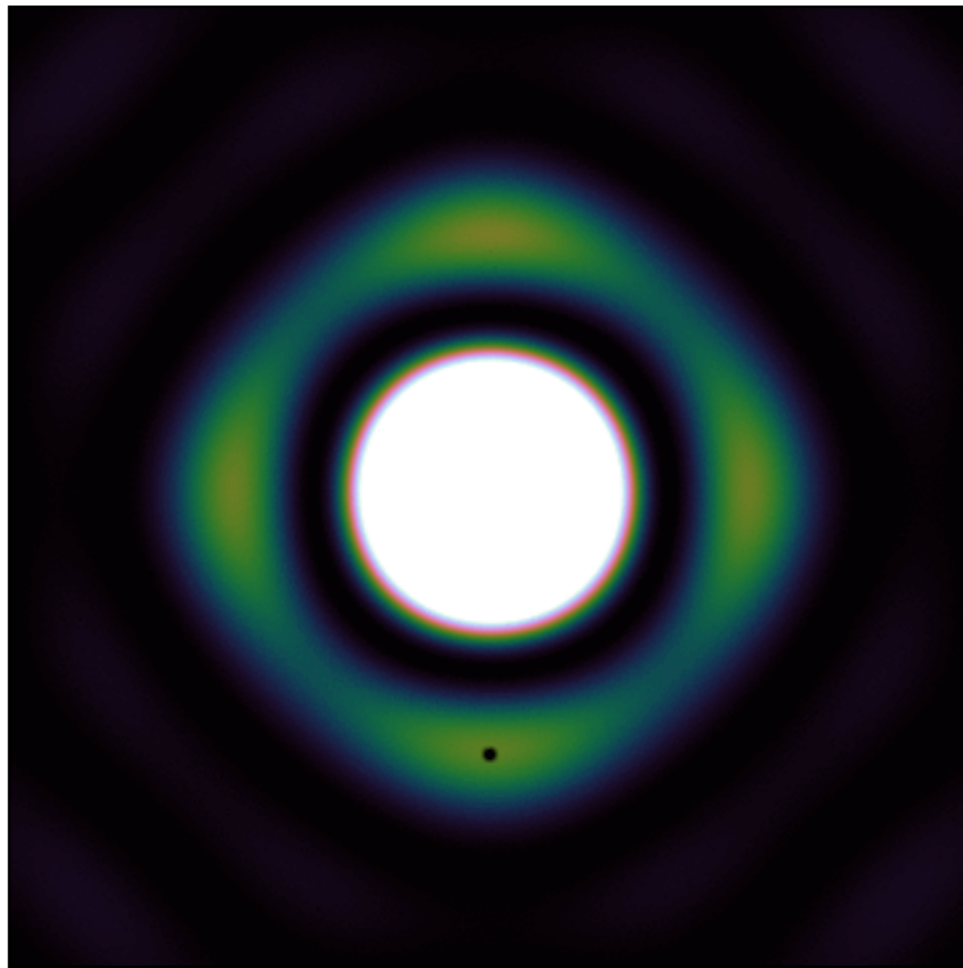
~640 MHz bandwidth



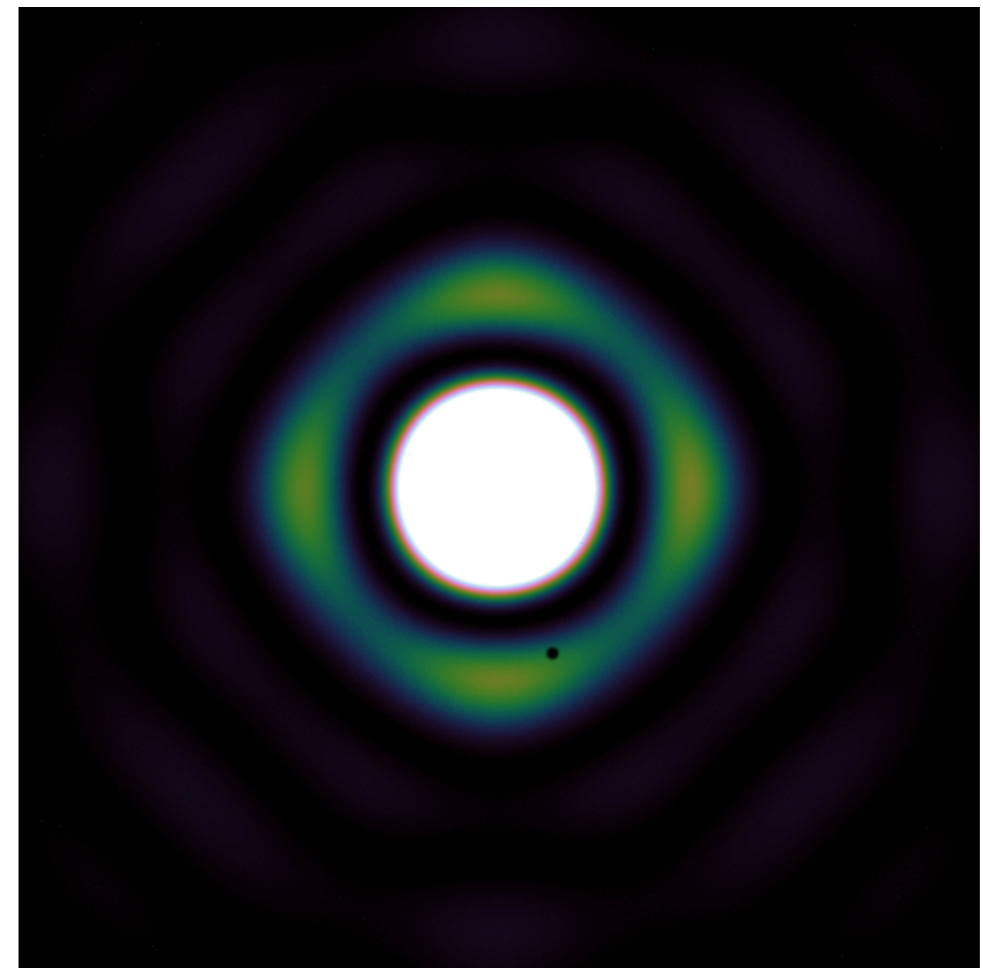
Rotation du lobe



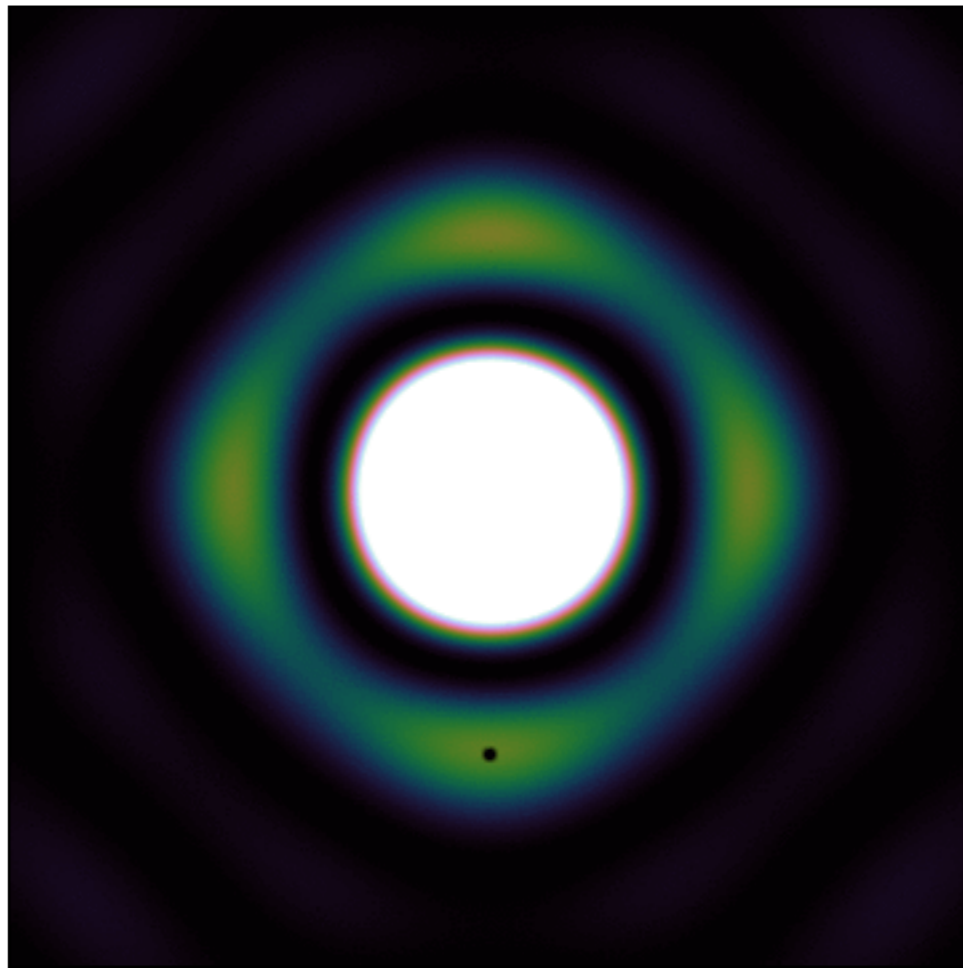
Changement d'échelle du lobe



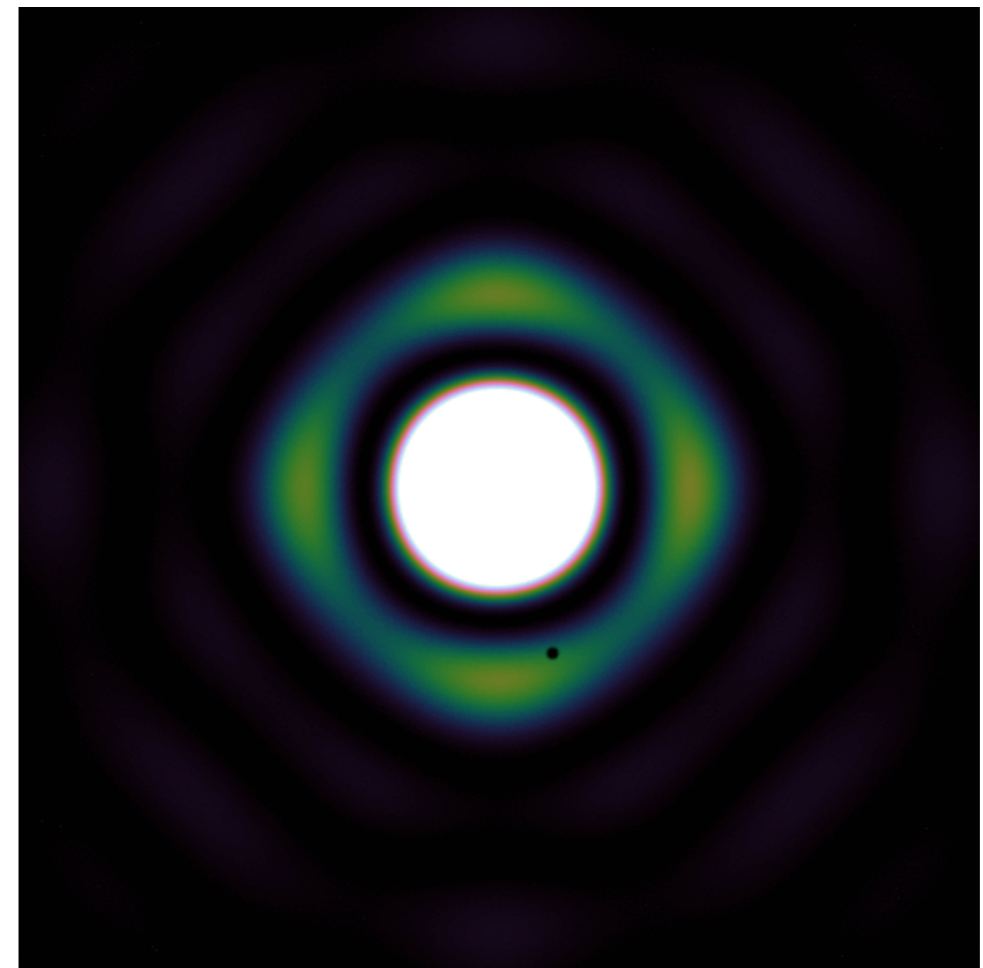
Rotation du lobe



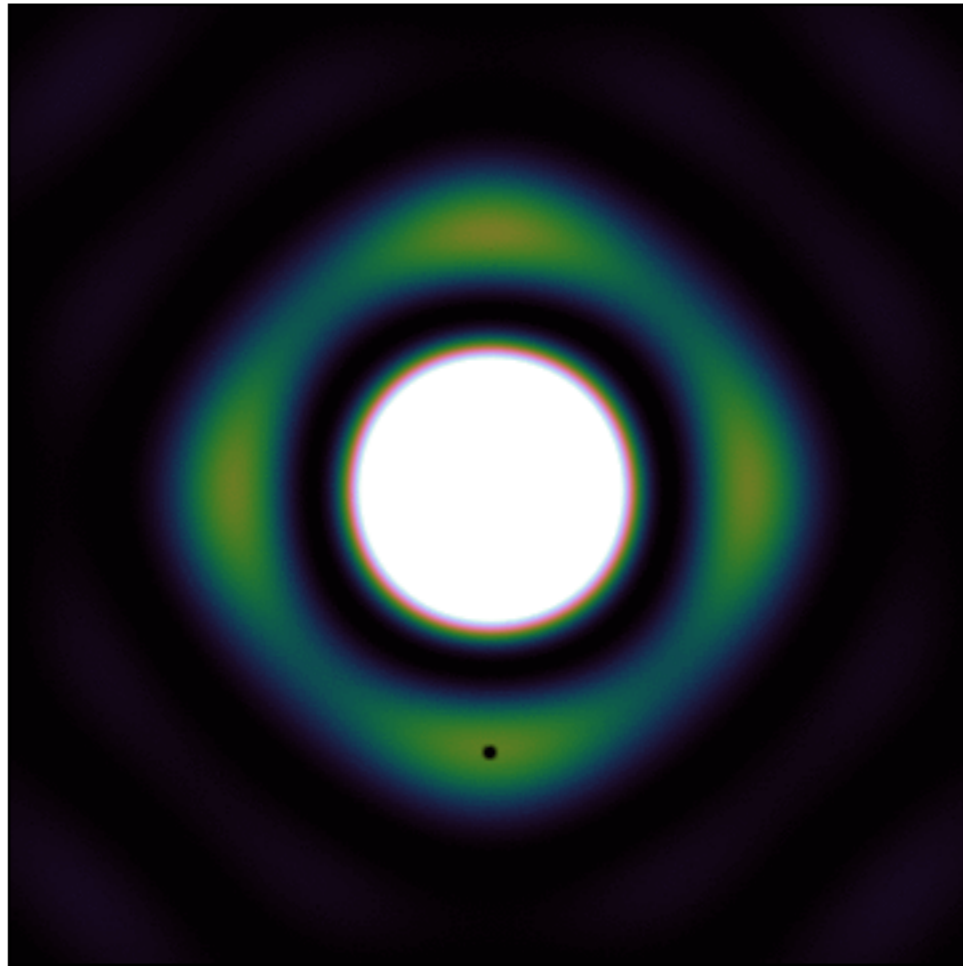
Changement d'échelle du lobe



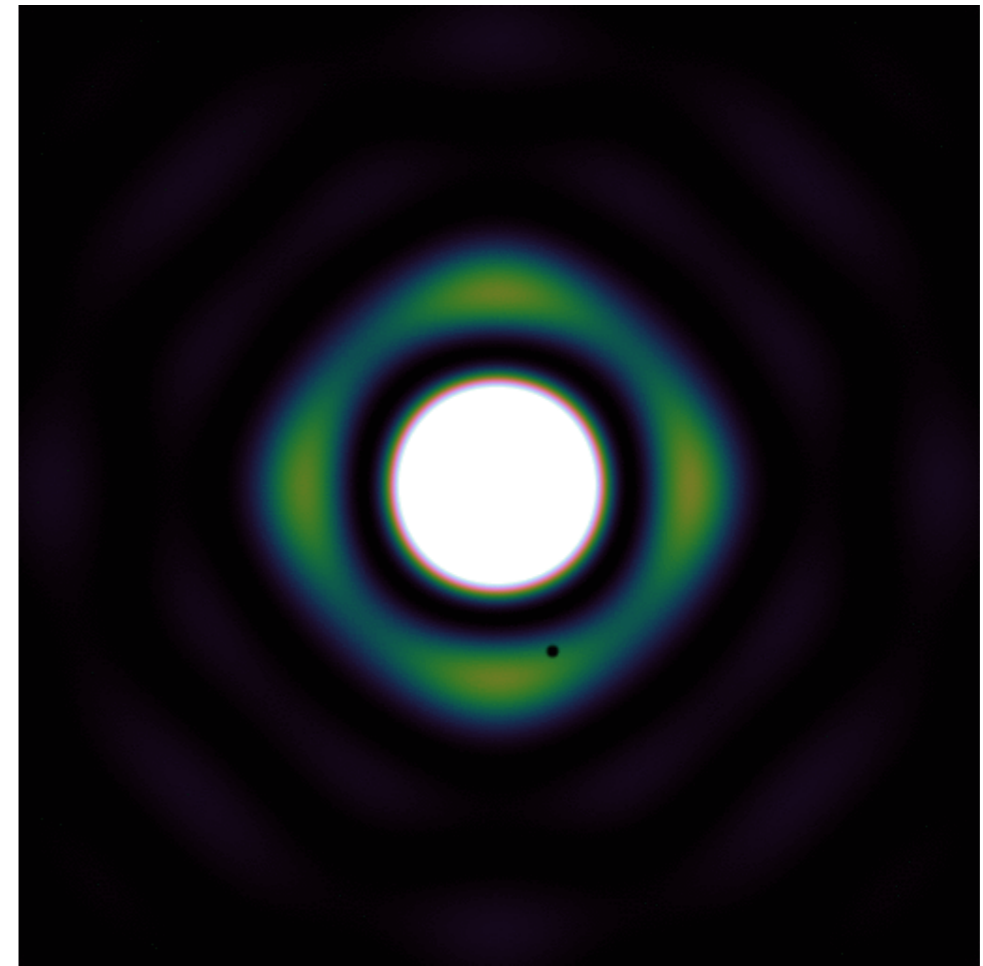
Rotation du lobe



Changement d'échelle du lobe

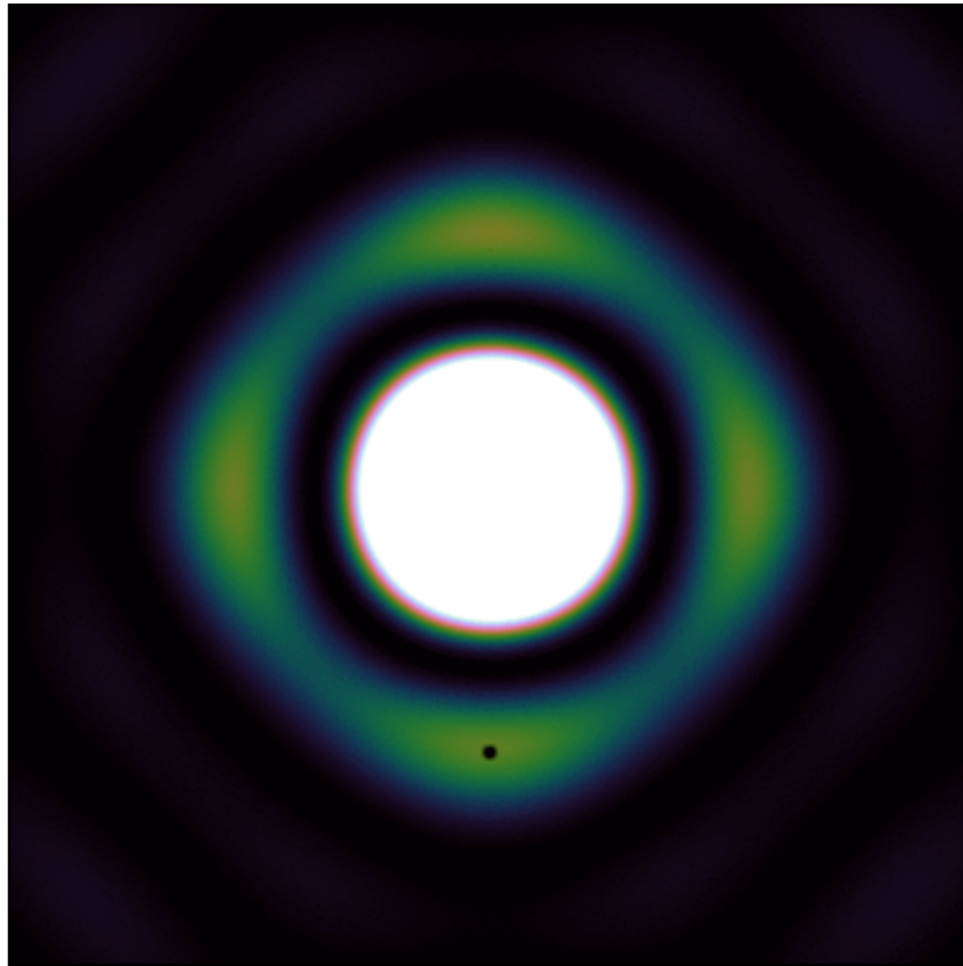


Rotation du lobe

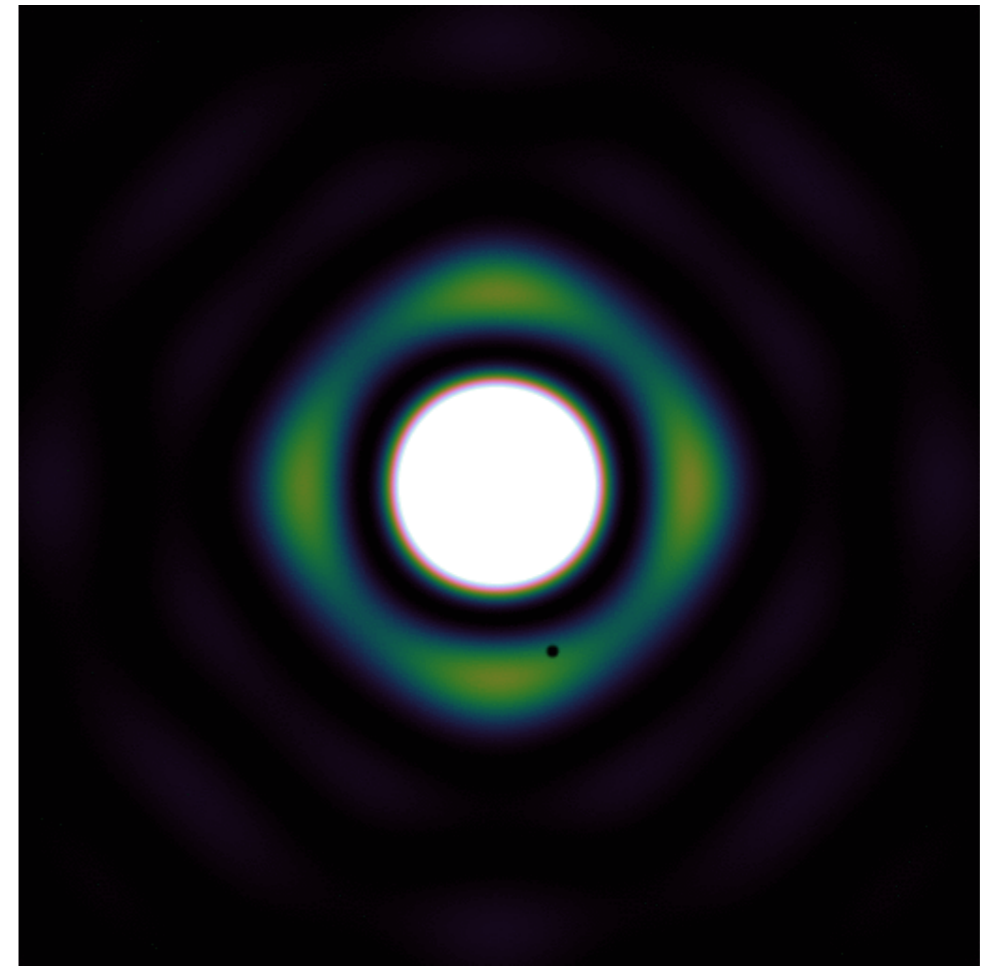


Changement d'échelle du lobe

**Quelle origine possible?**



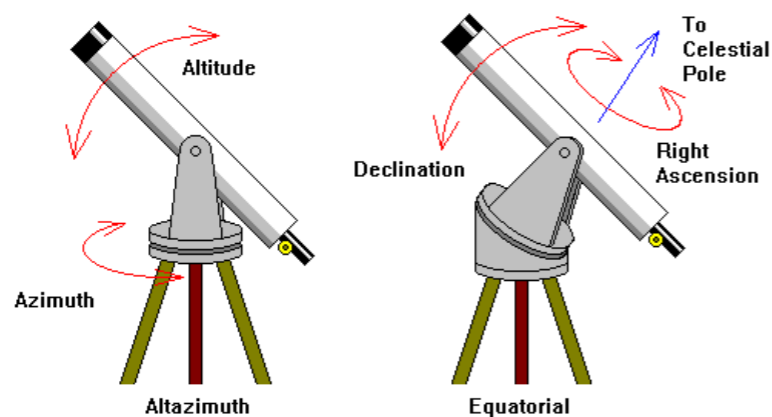
Rotation du lobe

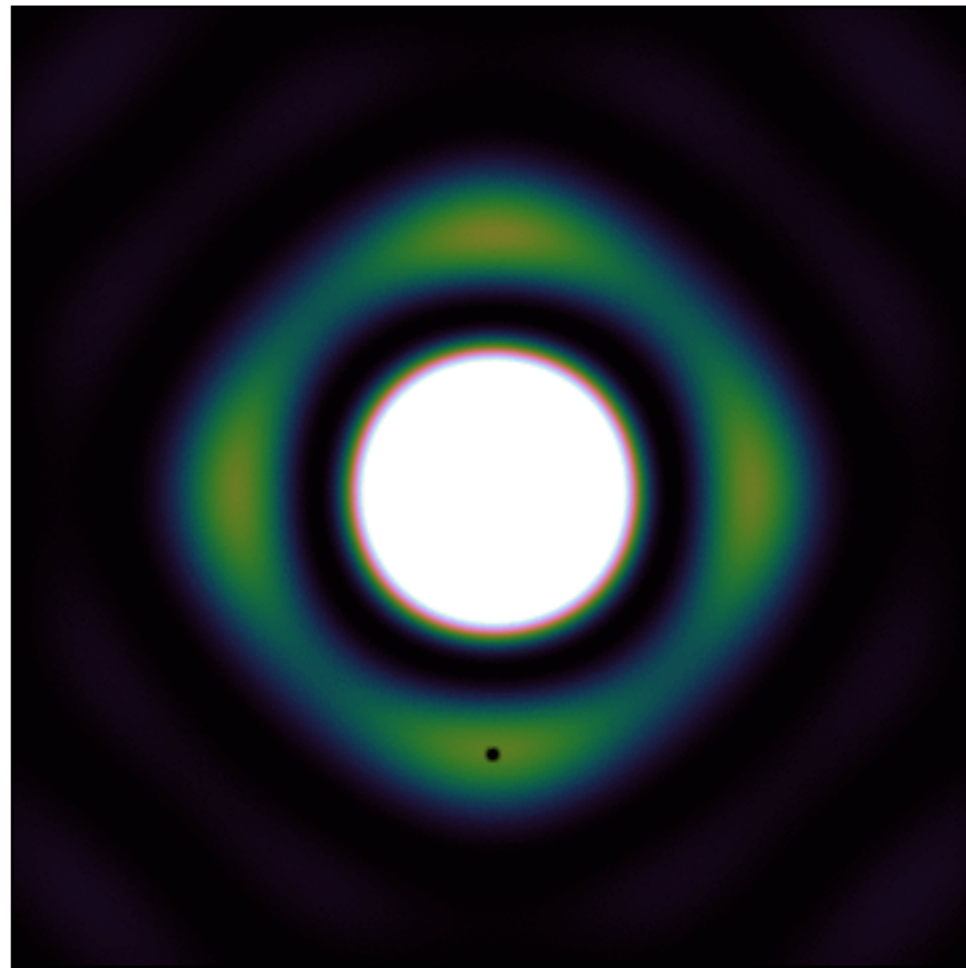


Changement d'échelle du lobe

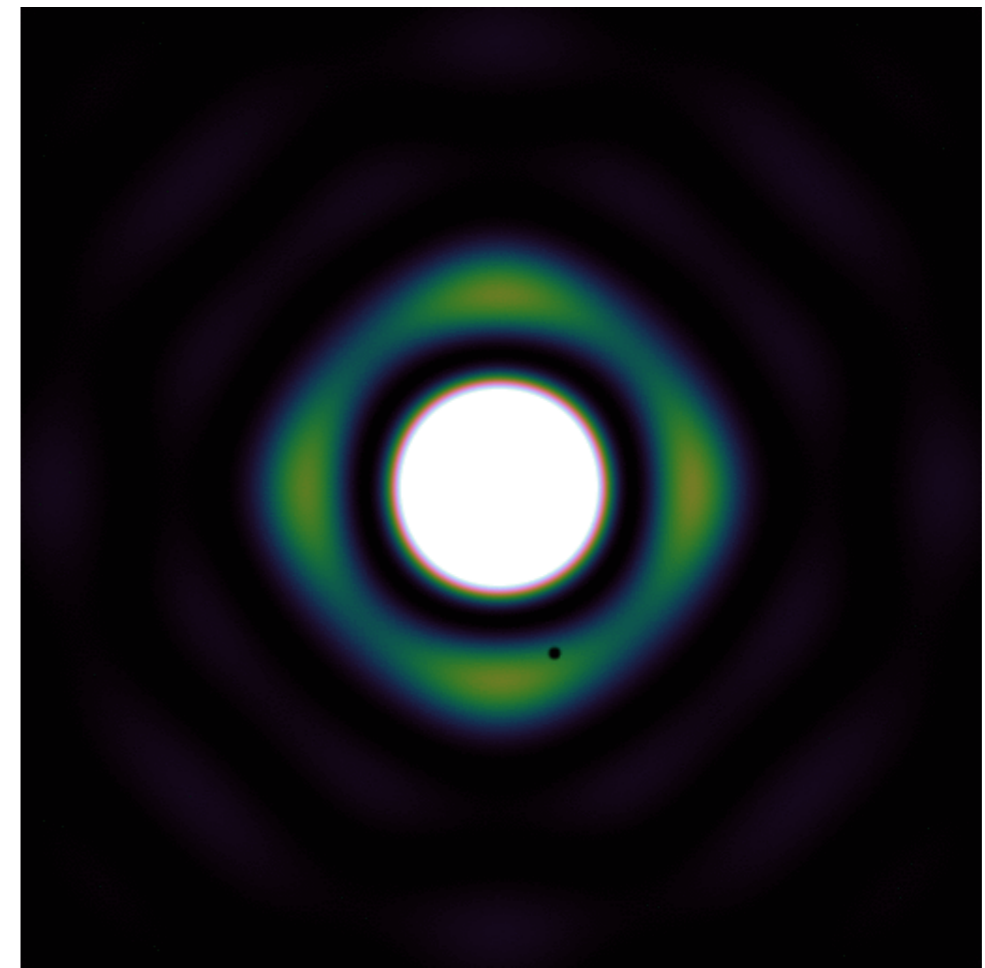
## Quelle origine possible?

Type de monture du télescope





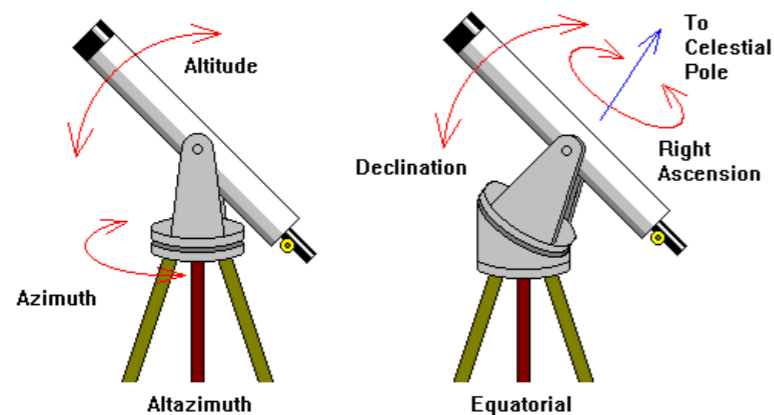
Rotation du lobe



Changement d'échelle du lobe

## Quelle origine possible?

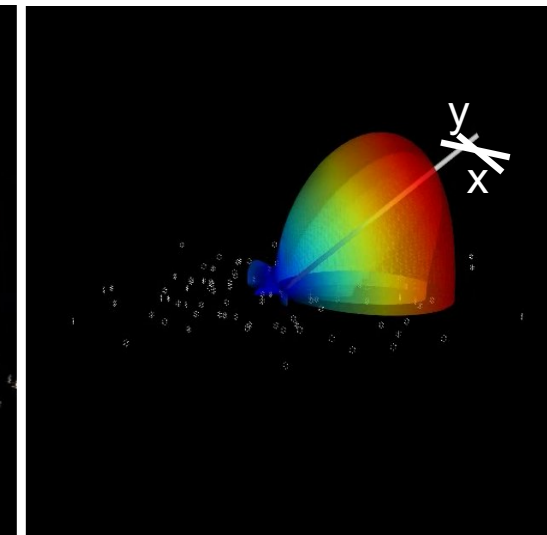
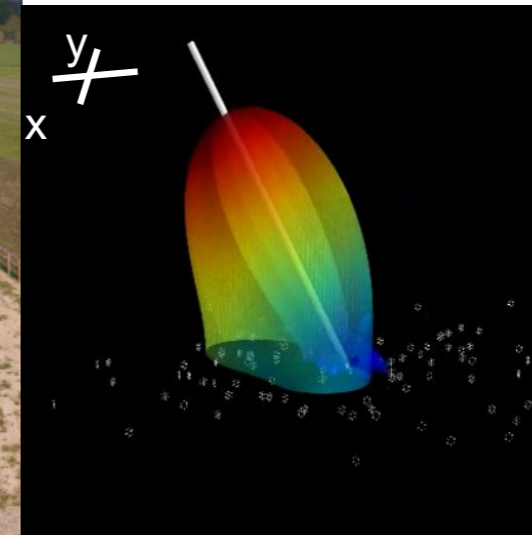
Type de monture du télescope



Changement de fréquence

$$\theta_{Ire} = \frac{\lambda}{D} \propto \nu^{-1}$$





**Direction 1**  
affecte le gain

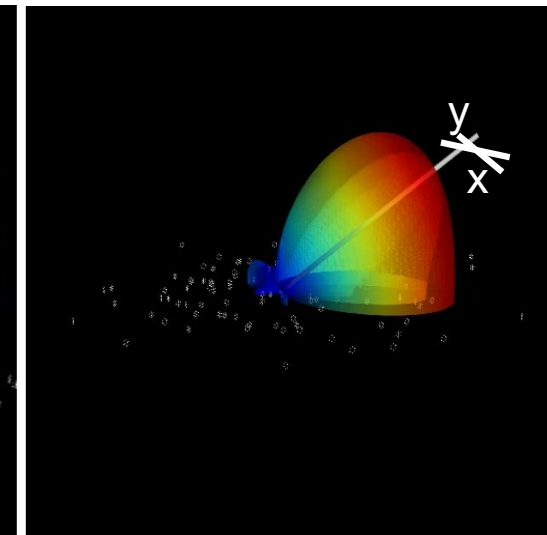
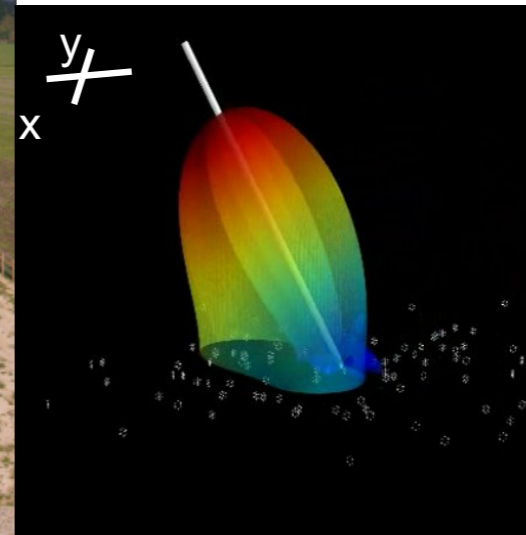
**Direction 2**

la polarisation

## Diagramme d'antenne

# Étalonnage moderne

## Effets dépendants de la direction

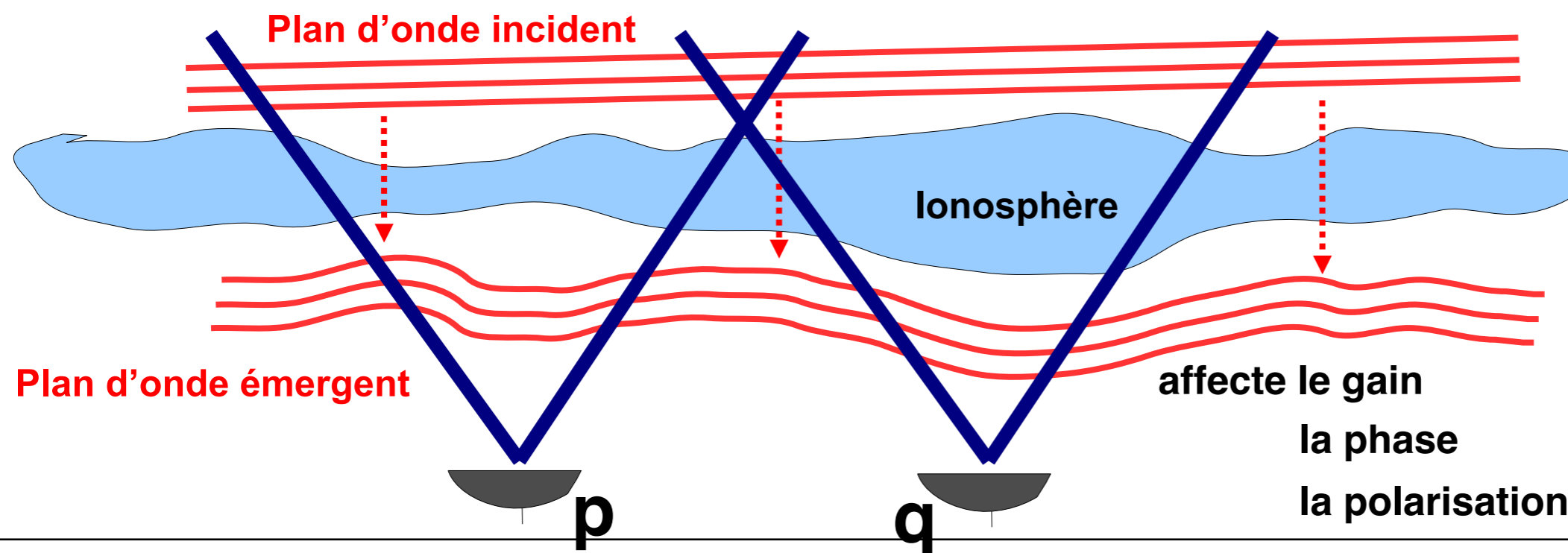


**Direction 1**  
affecte le gain

**Direction 2**  
la polarisation

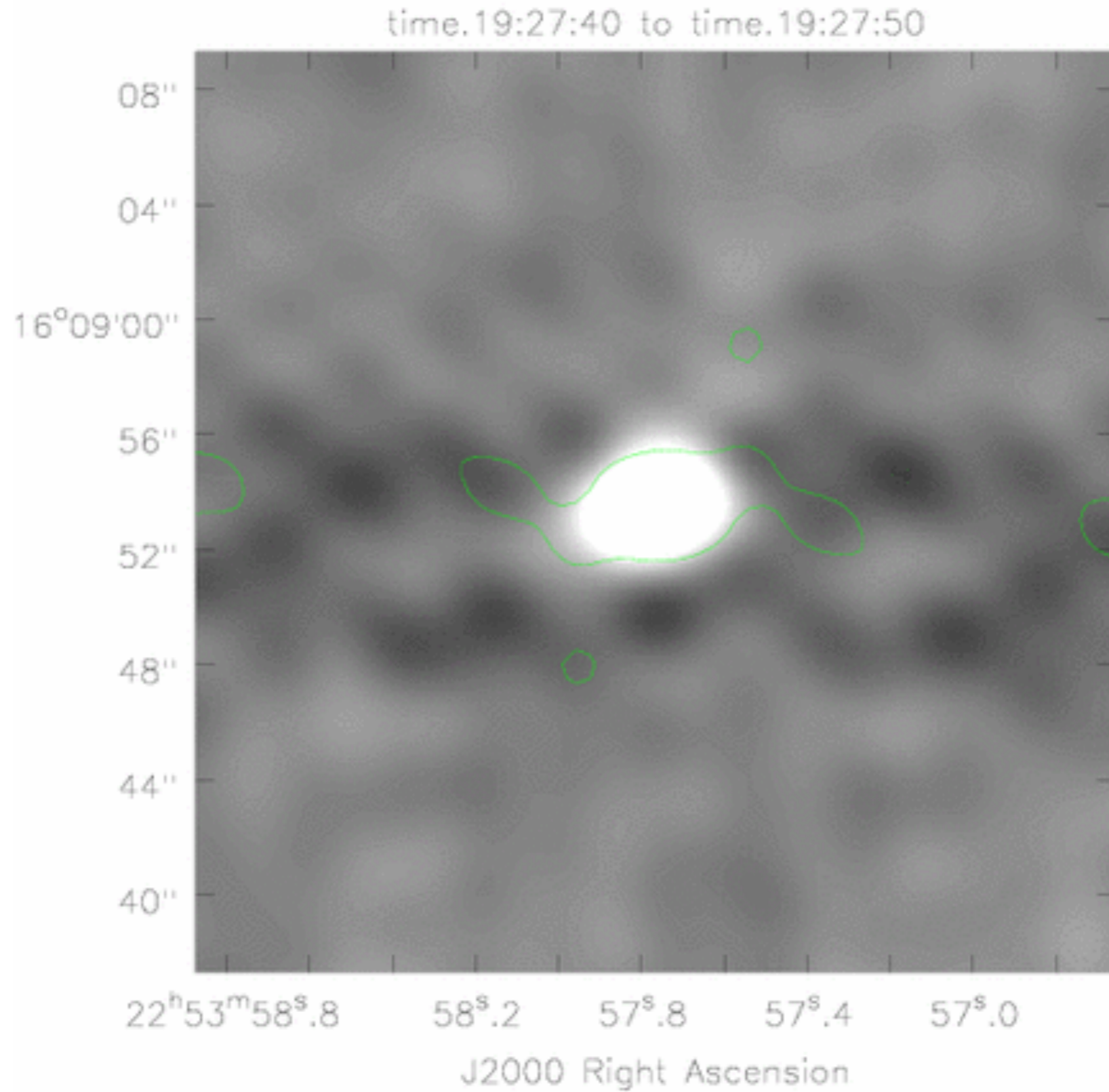
## Diagramme d'antenne

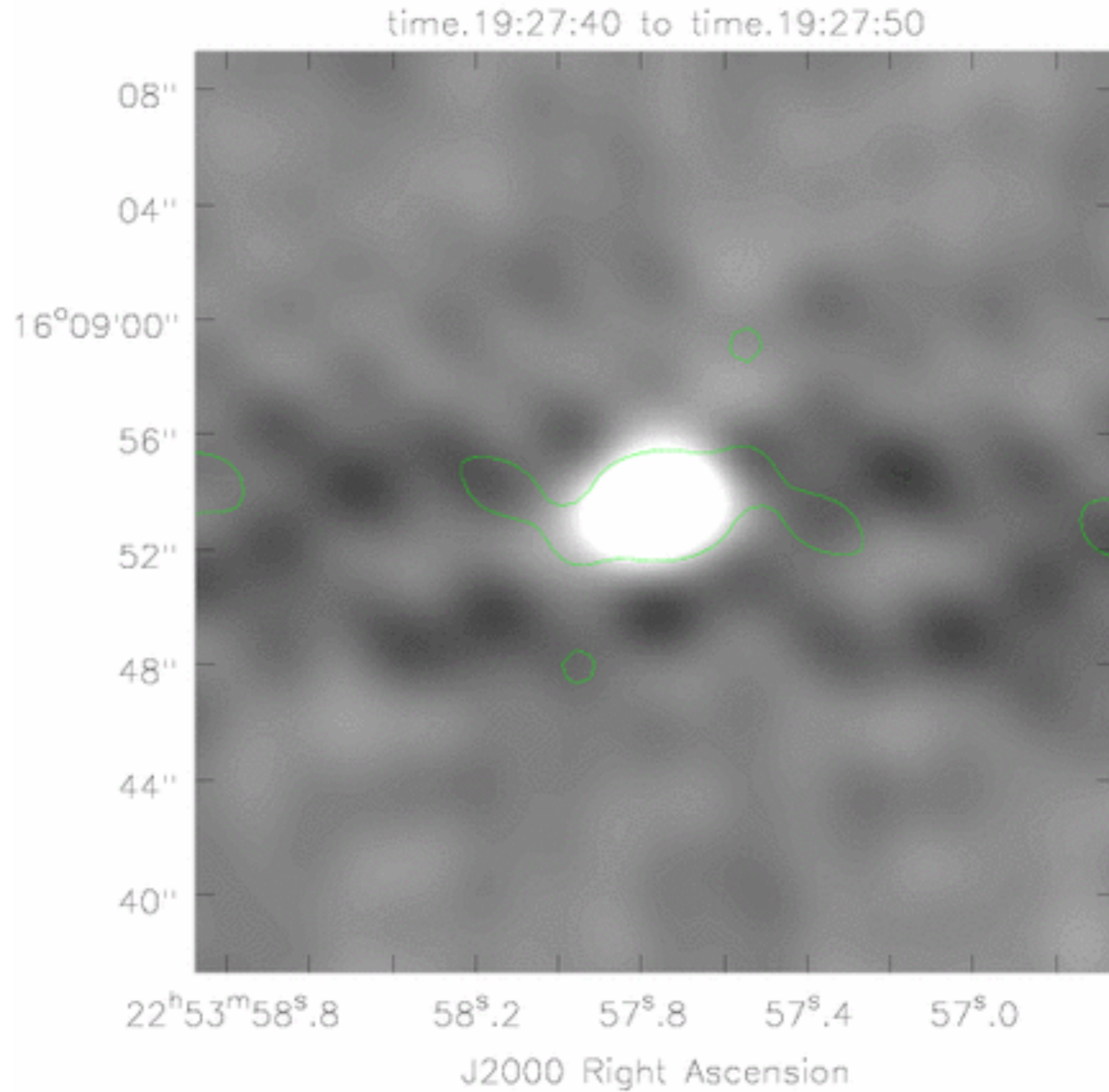
## Fluctuations ionosphériques/atmosphériques



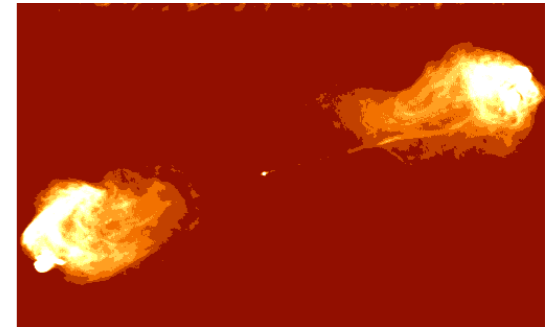
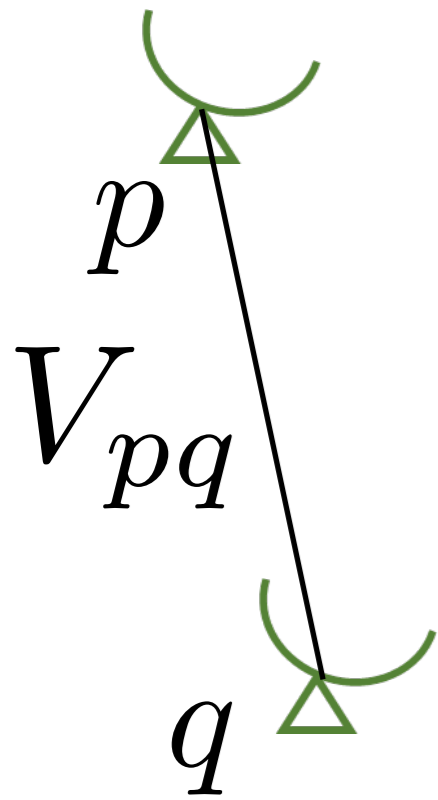
PSF

PSF + ionosphère

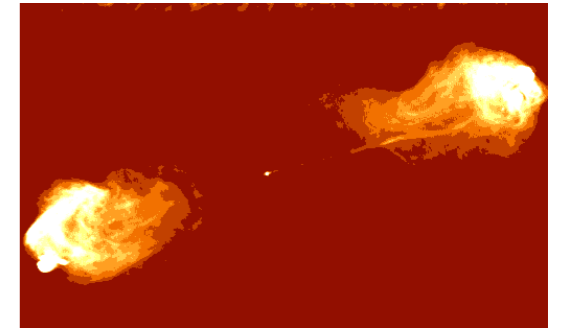
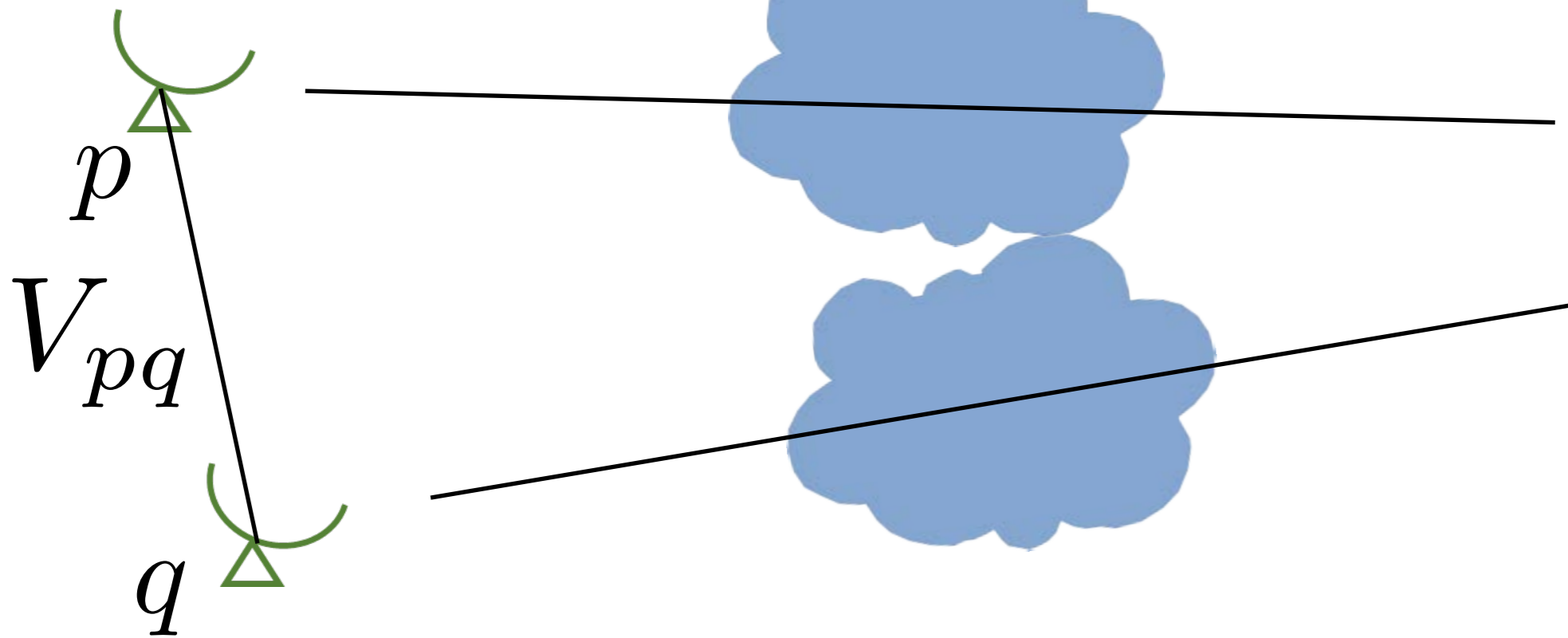




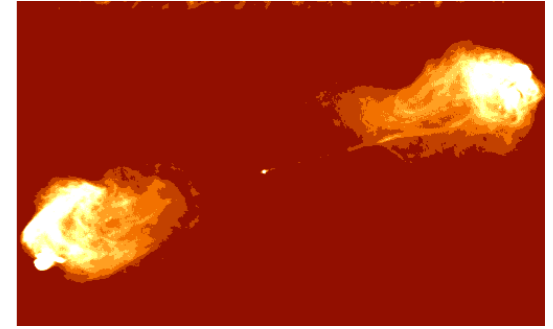
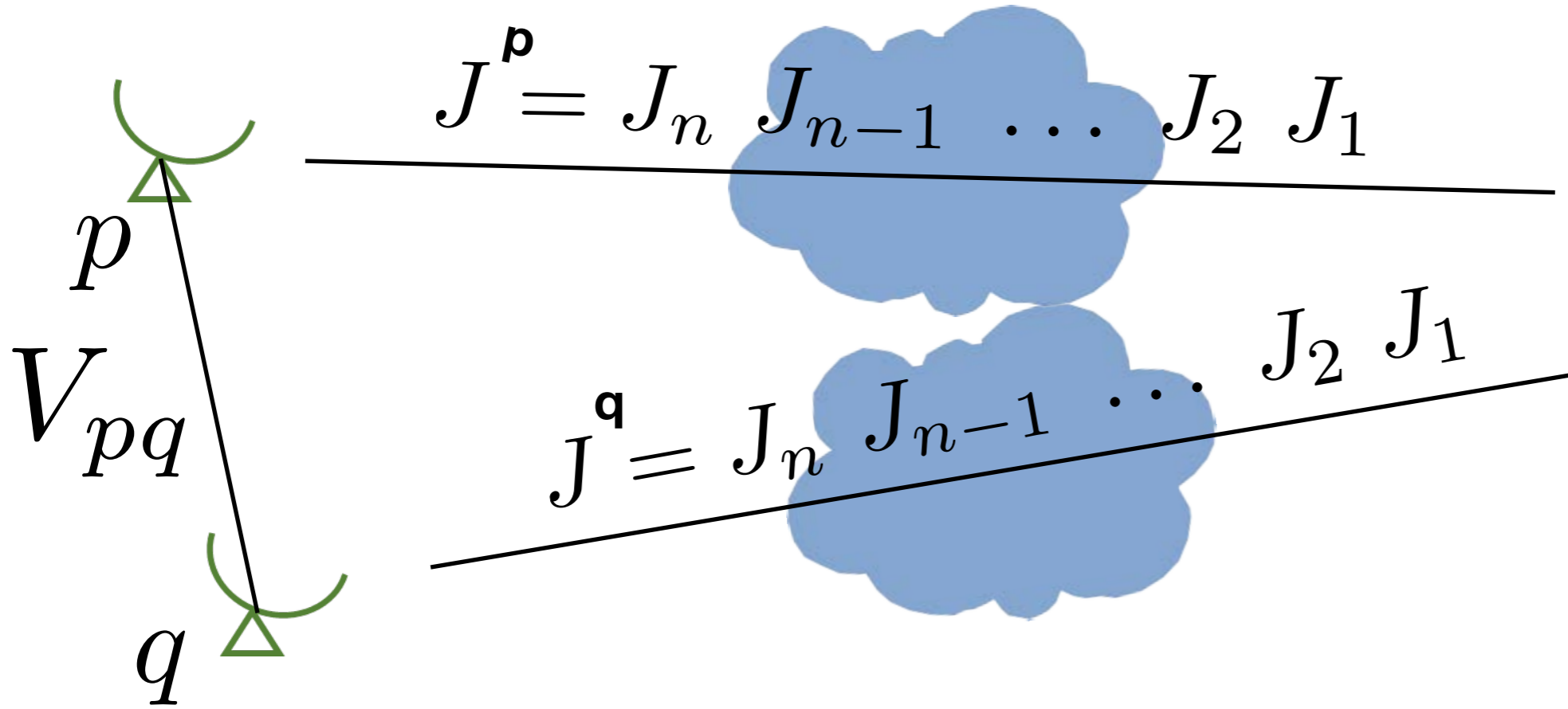
$\mathcal{B}$



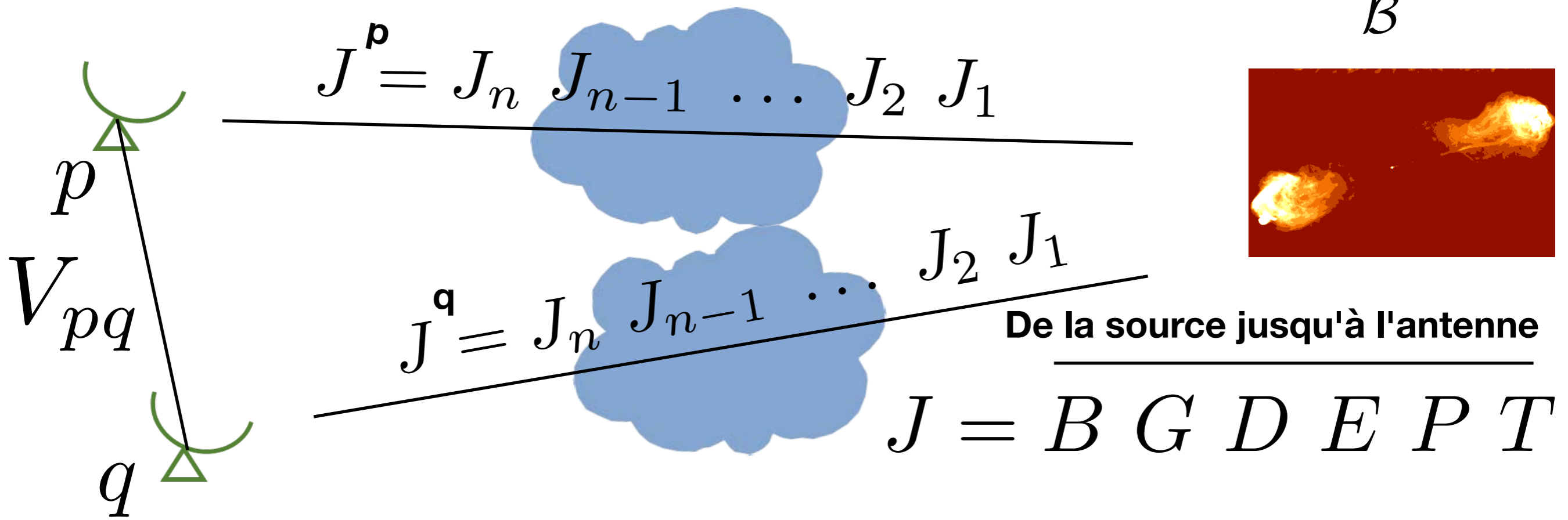
$\mathcal{B}$



$\mathcal{B}$

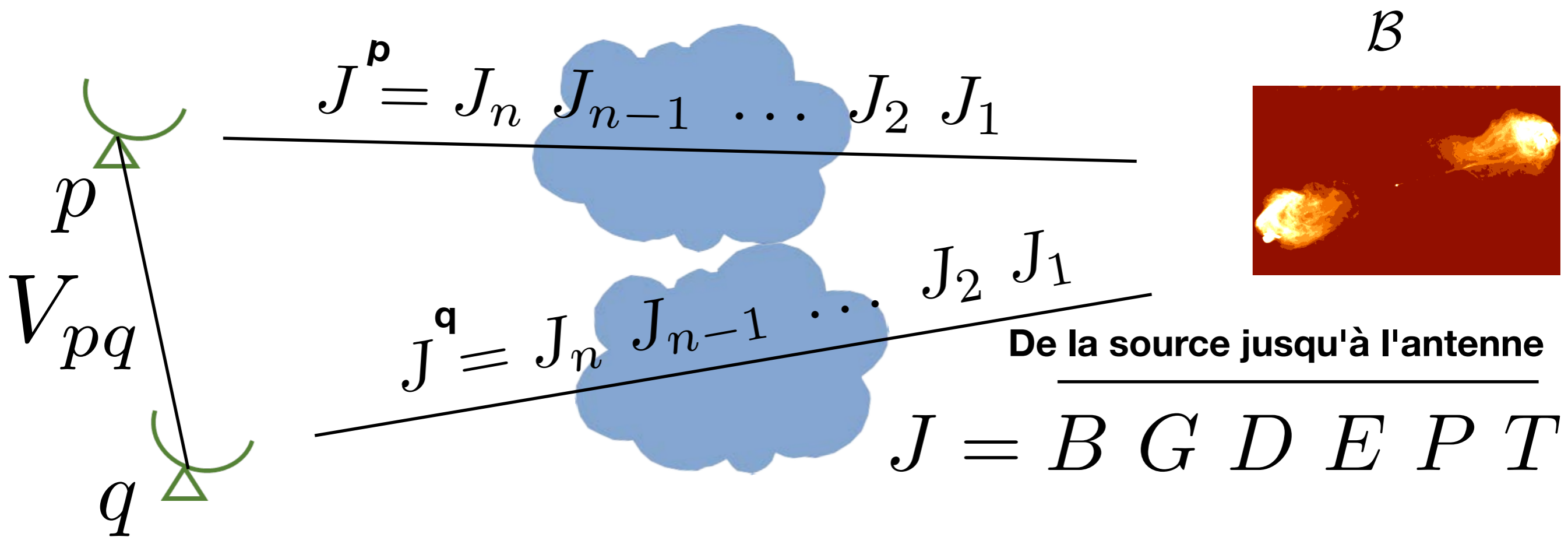


$\mathcal{B}$



$$J = B G D E P T$$

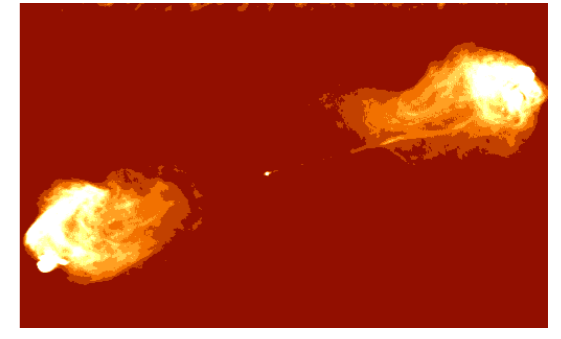
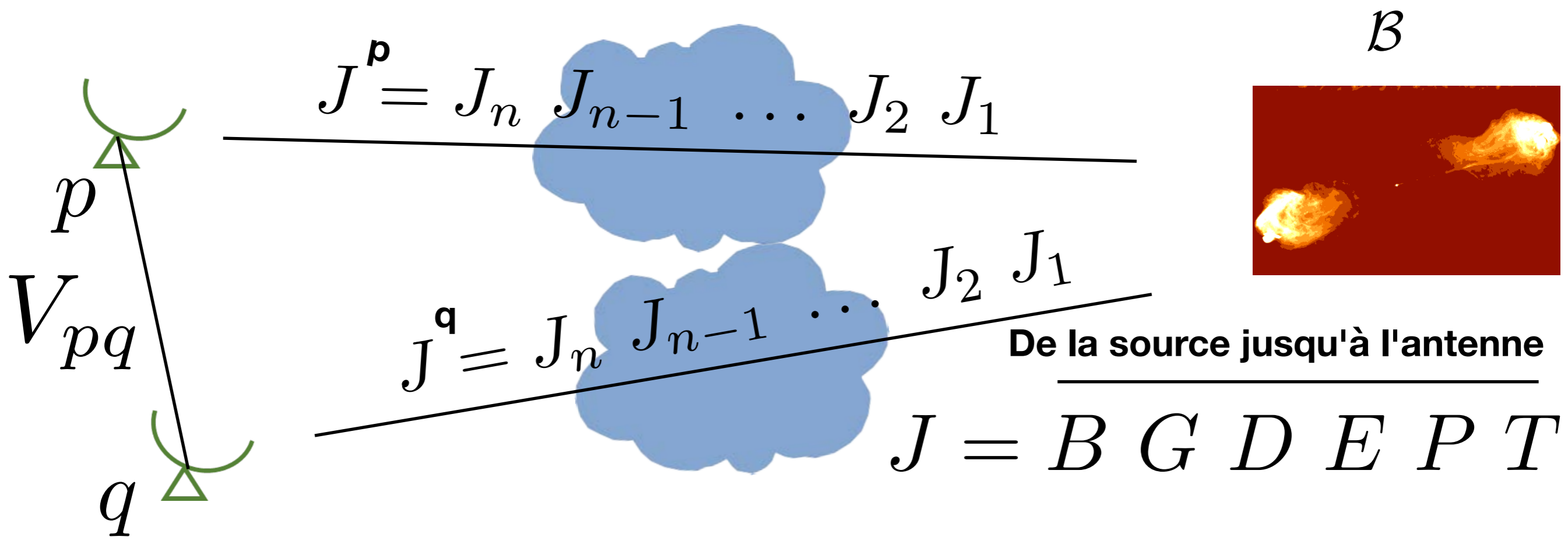




### Radio Interferometer Measurement Equation (RIME)

$$V_{pq} = J_p \mathcal{B} J_q^H$$

[Hamaker, Bregman, Sault, 96]  
 [Smirnov, 11]

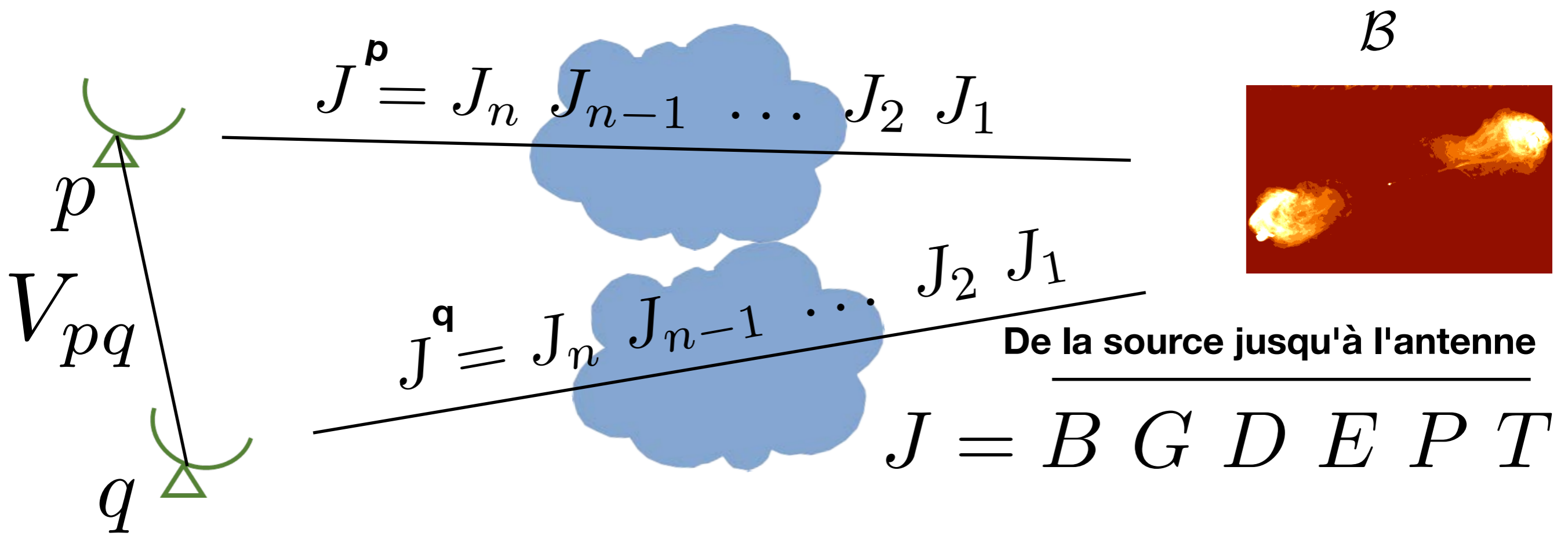


### Radio Interferometer Measurement Equation (RIME)

$$V_{pq} = J_p \mathcal{B} J_q^H$$

[Hamaker, Bregman, Sault, 96]  
[Smirnov, 11]

Visibilité de la ligne de base pq  
 Effets entre la source et l'antenne p  
 Brillance  
 Effets entre la source et l'antenne q



### Radio Interferometer Measurement Equation (RIME)

$$V_{pq} = J_p \mathcal{B} J_q^H$$

[Hamaker, Bregman, Sault, 96]  
 [Smirnov, 11]

Visibilité de la ligne de base pq  
 Effets entre la source et l'antenne p  
 Brillance  
 Effets entre la source et l'antenne q

Représentation compact, linéaire et intuitive des effets de propagation

Indispensable pour les interféromètres radio modernes