



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



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 15th, 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=ydjV-ZXcAOA>

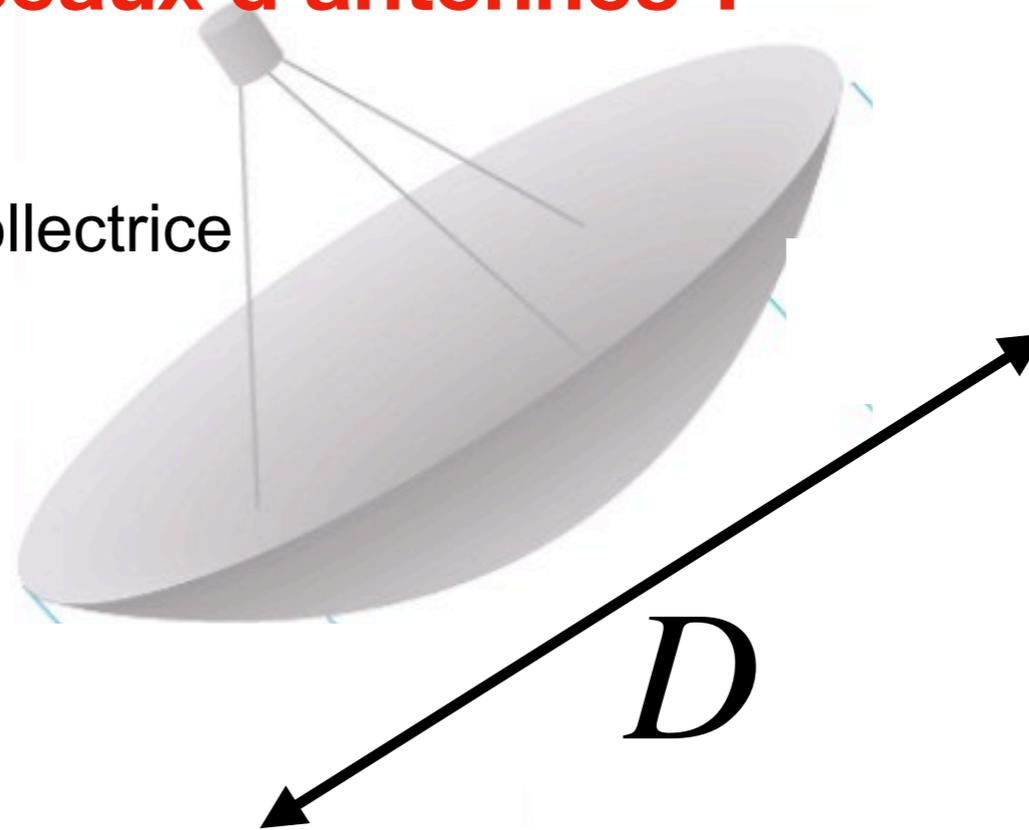
Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

- **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

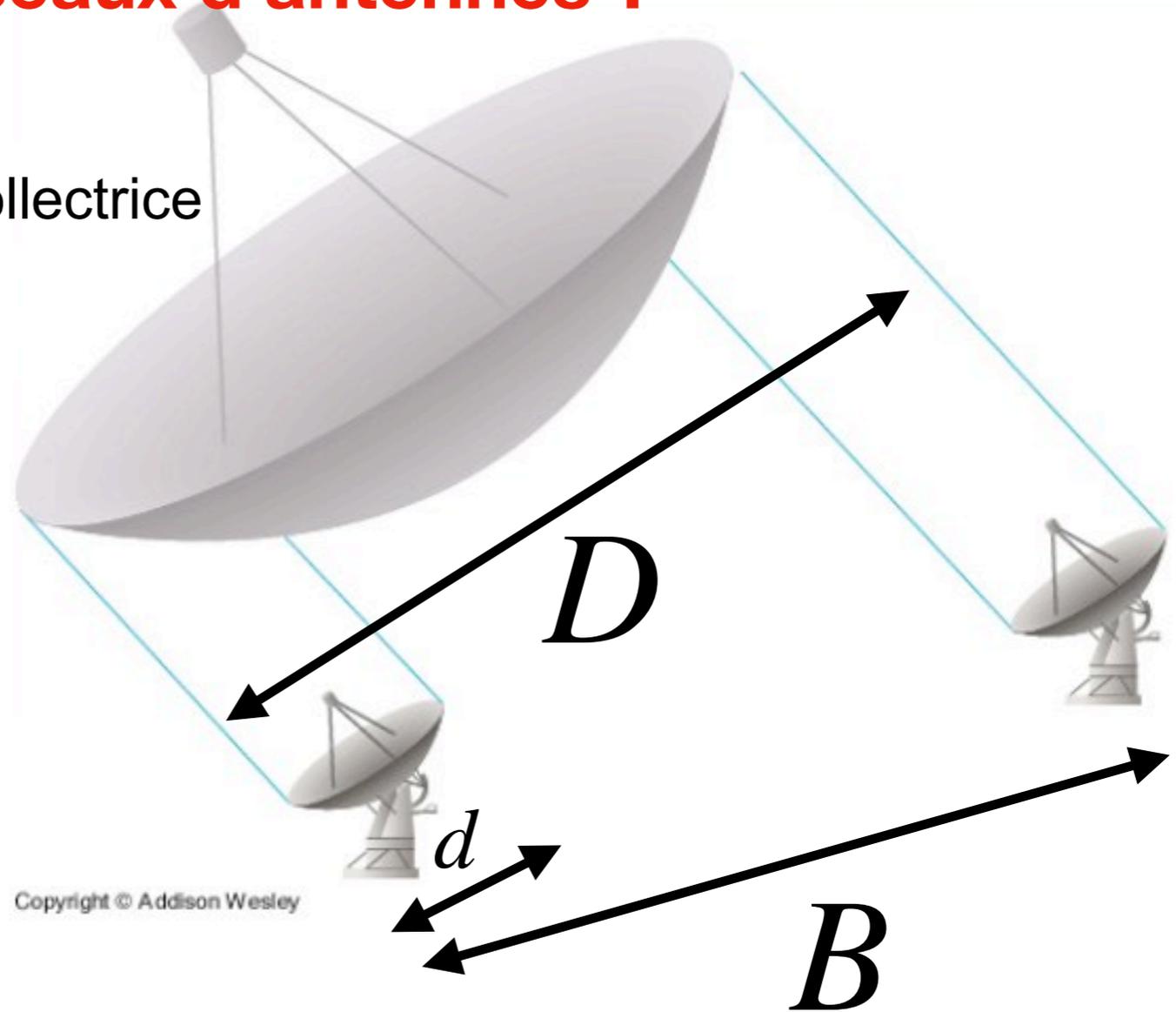
$$\propto D^2$$

$$\propto Nd^2$$

- **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

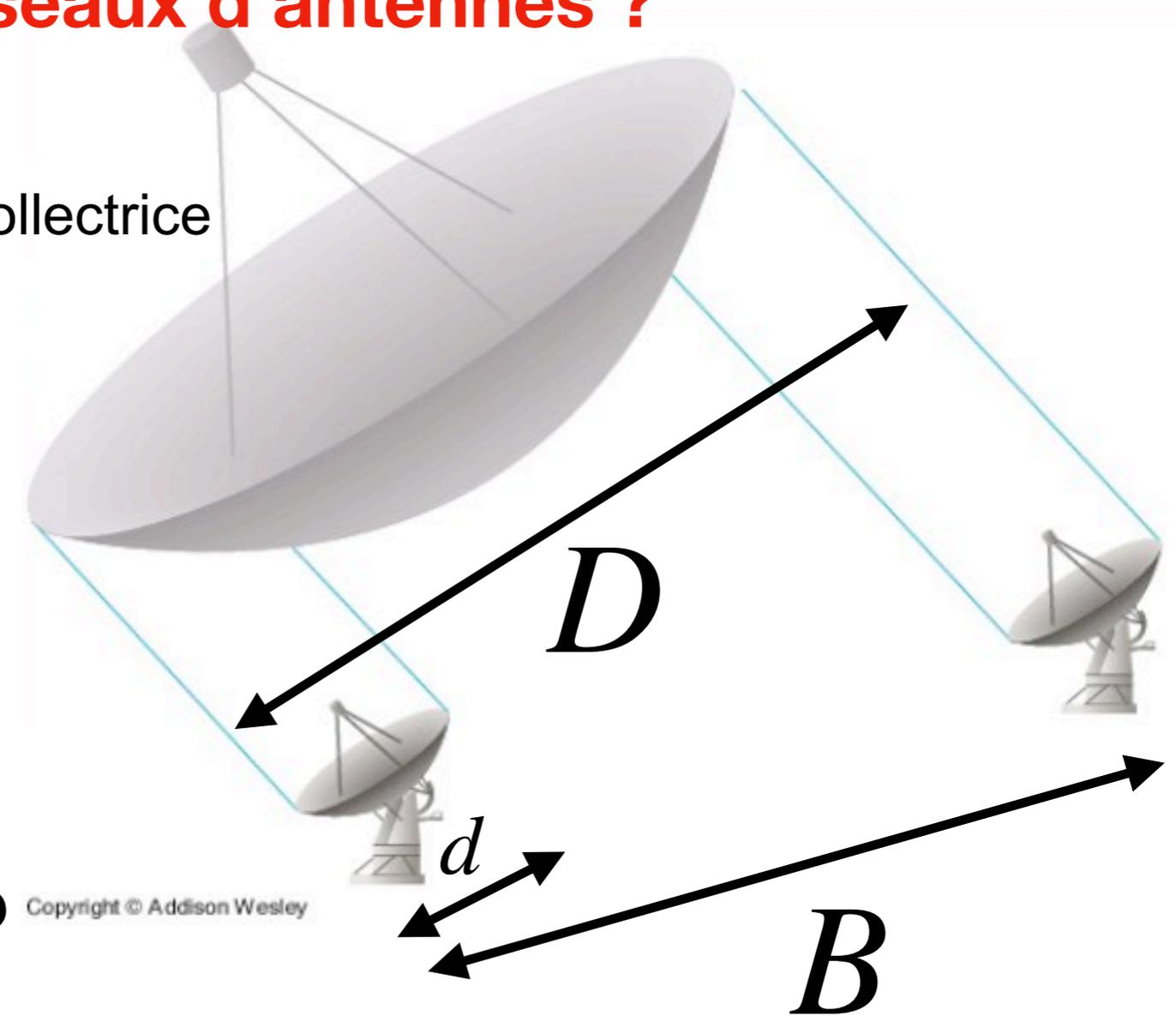
~~$\propto D^2$~~

$\propto Nd^2$

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

~~$\propto 1/D$~~

$\propto 1/B$



→ Réseaux d'antennes

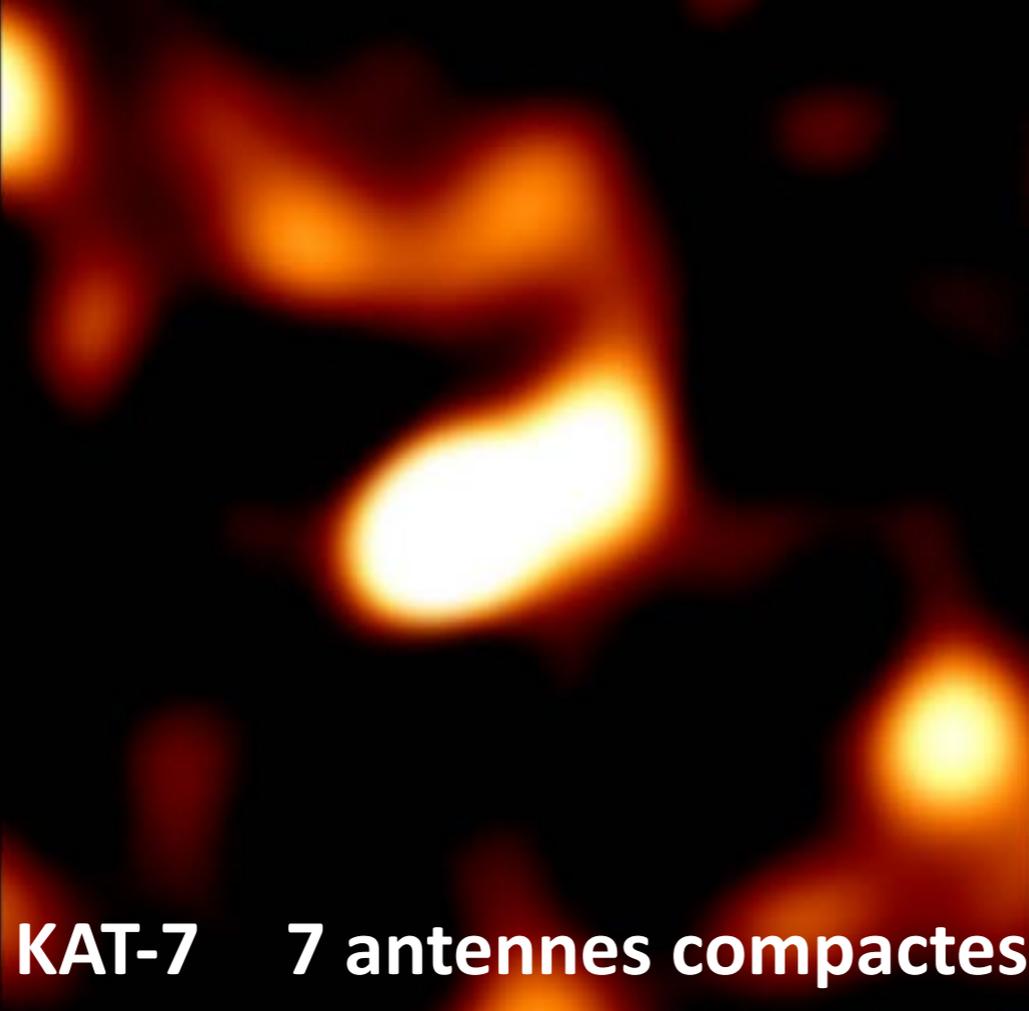


Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?

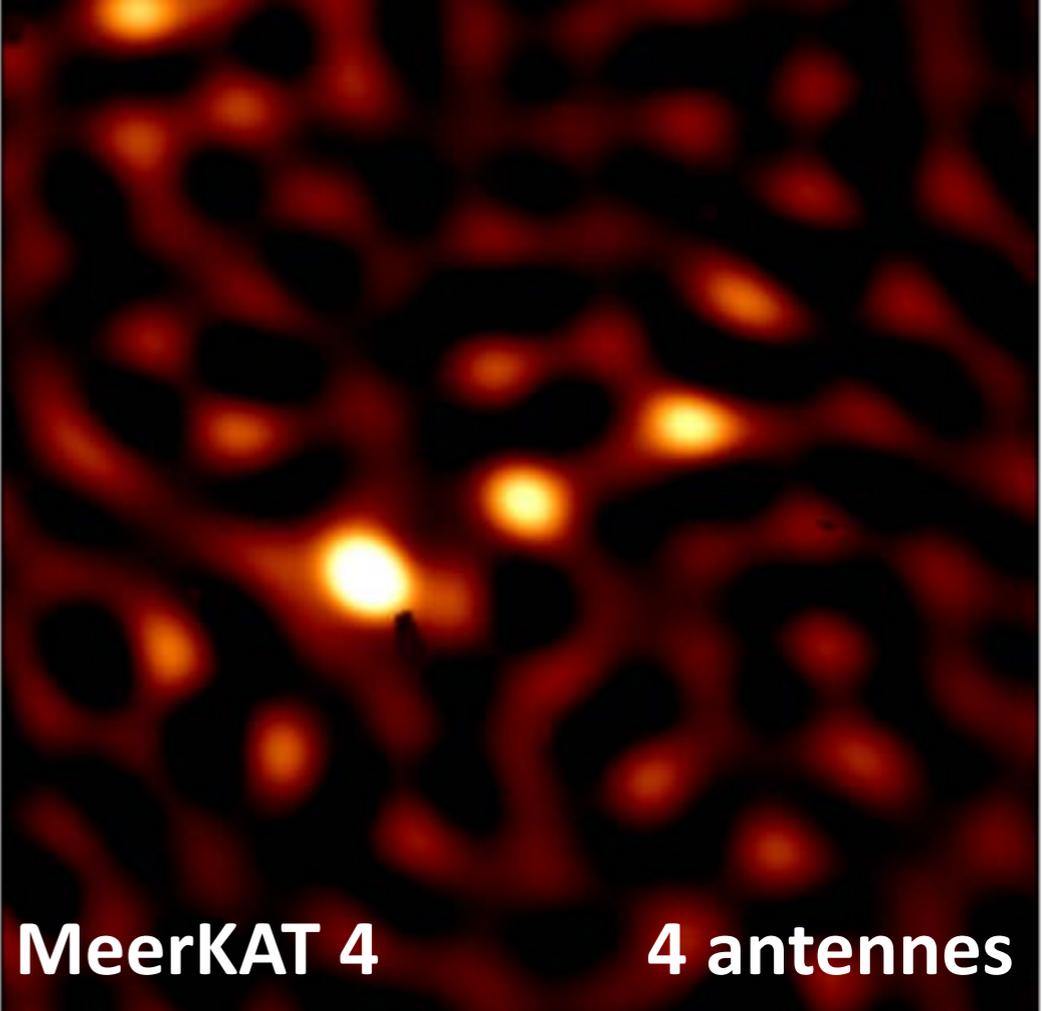
Résolution angulaire

KAT-7

Prototype
MeerKAT

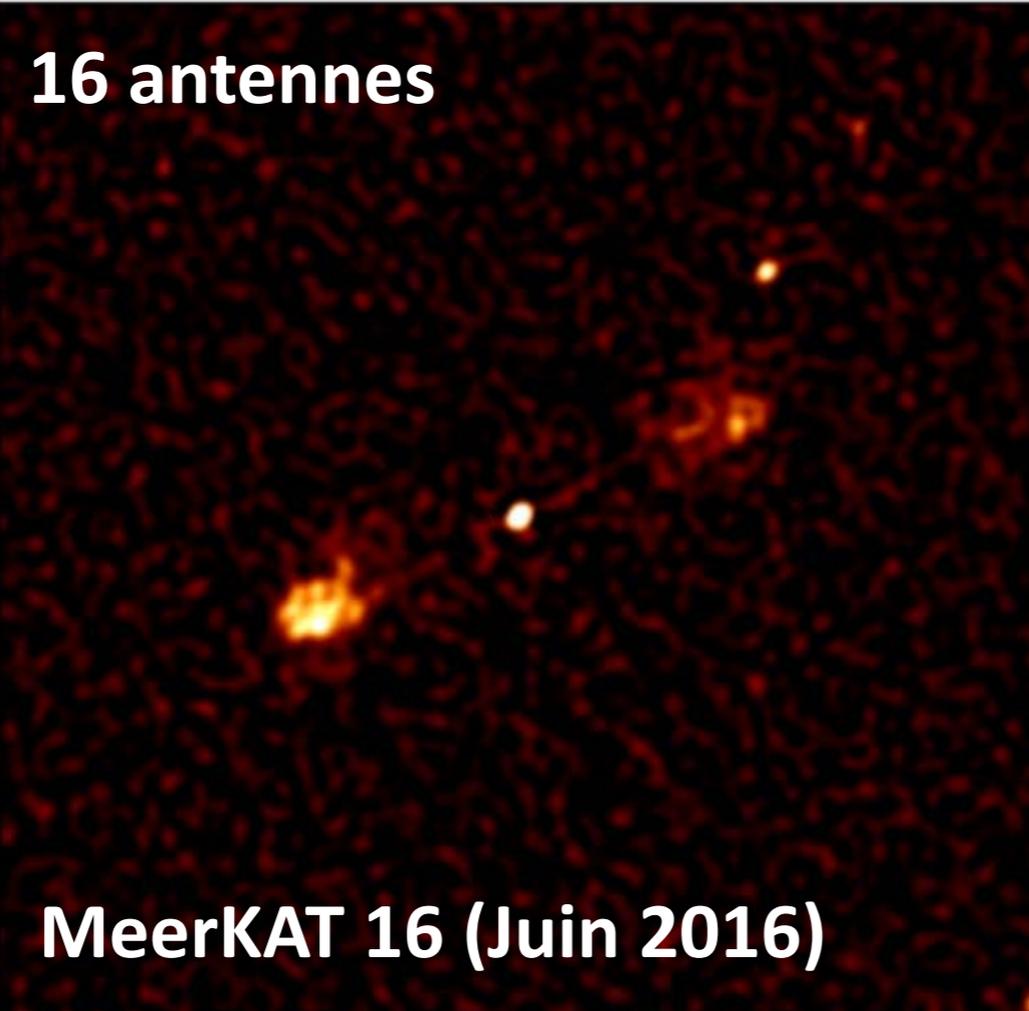


KAT-7 7 antennes compactes



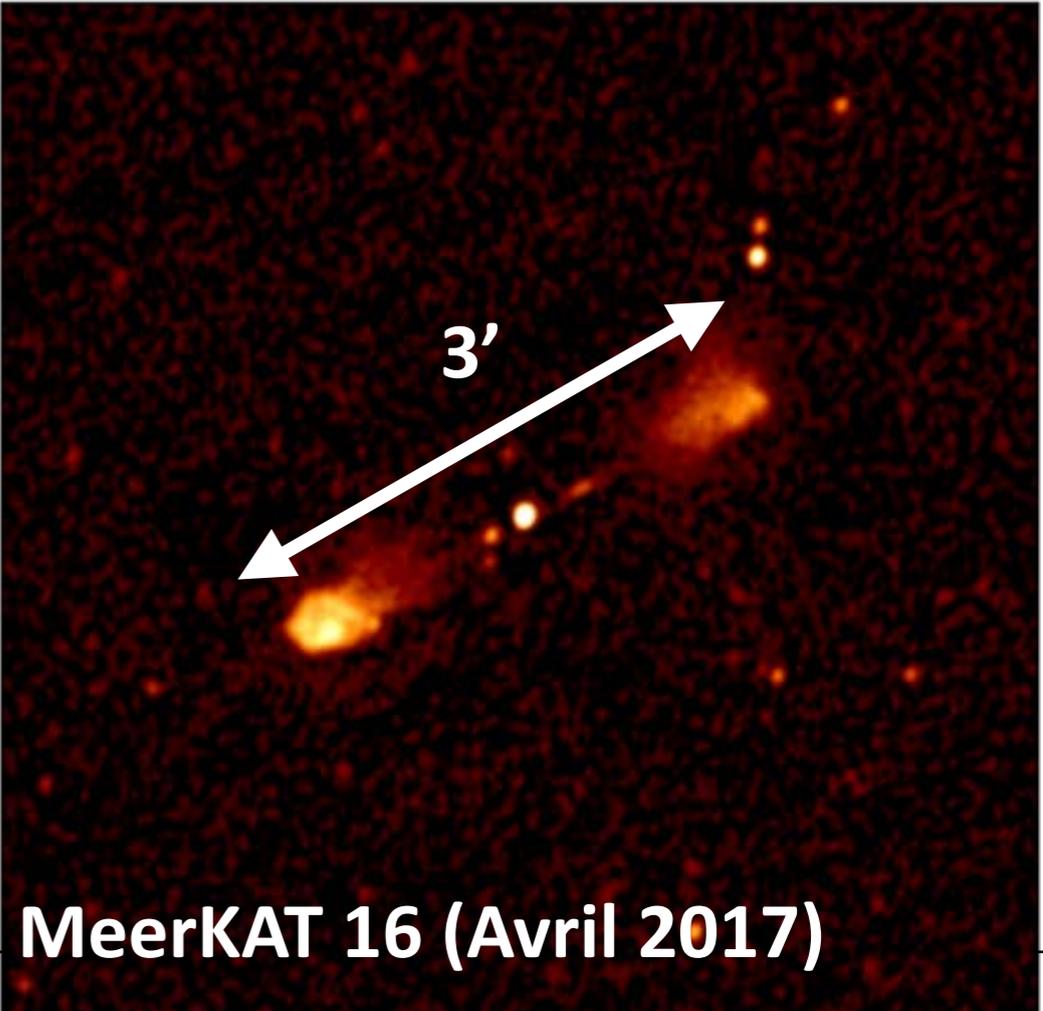
MeerKAT 4 4 antennes

MeerKAT
avec 16
antennes



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

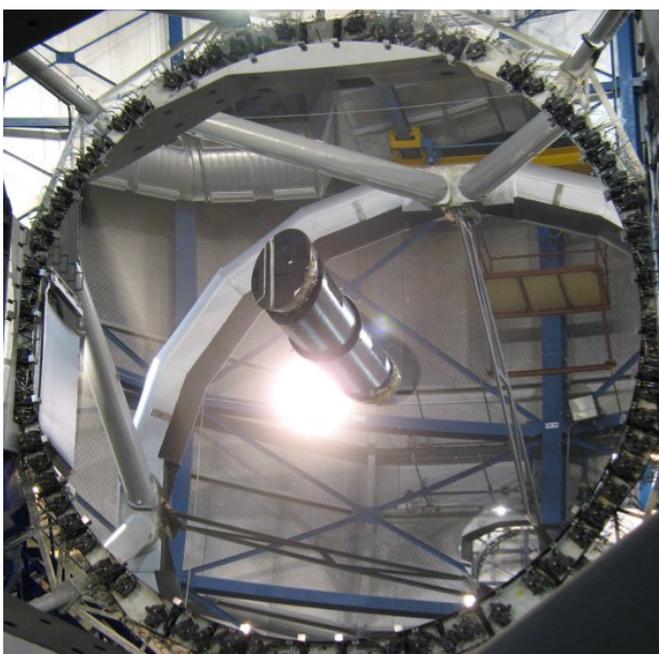


Plan

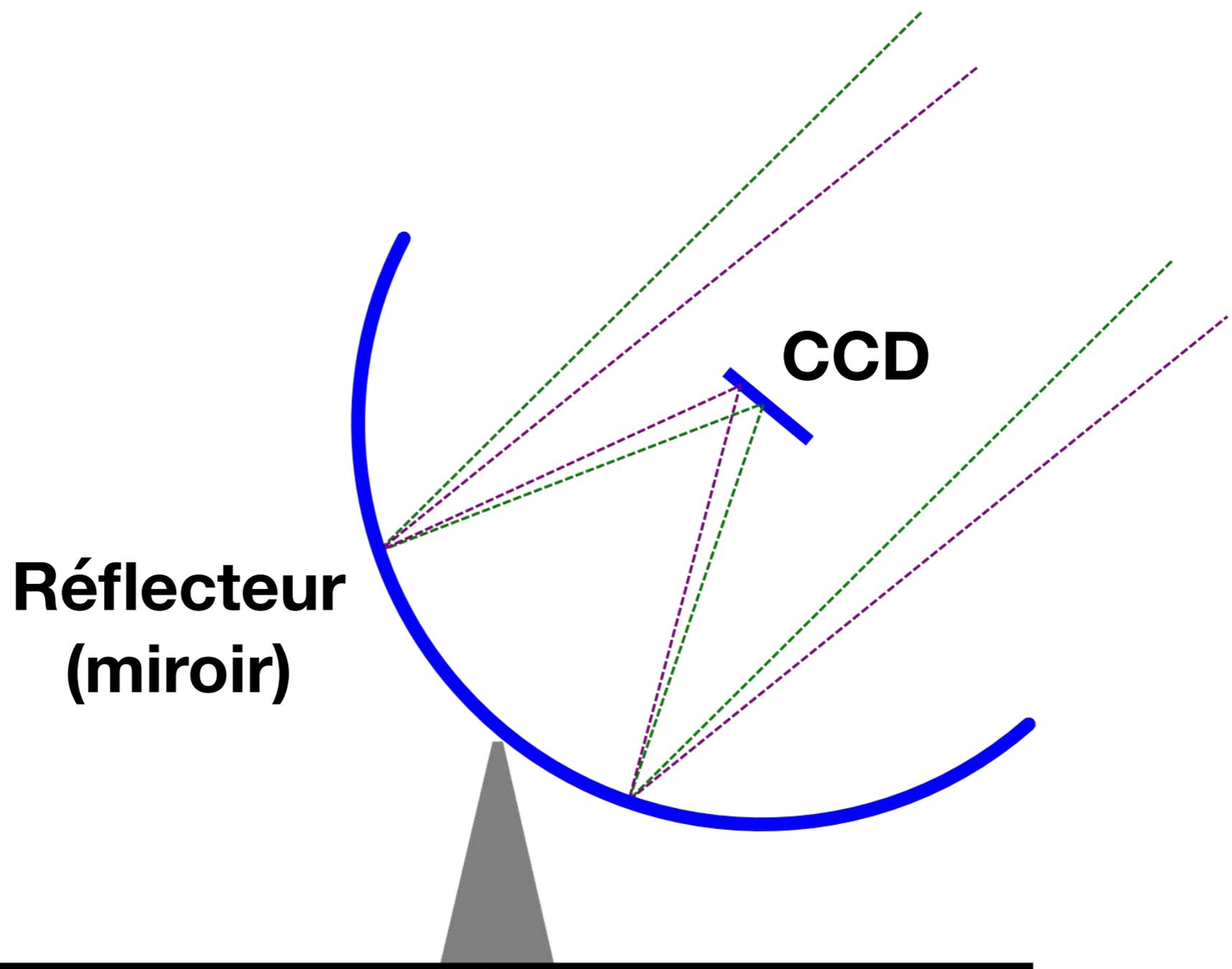
- Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?
- Principe de la mesure par interférométrie
- Imagerie
- Déconvolution
- Tour d'horizon de l'imagerie radio

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes



Telescope visible



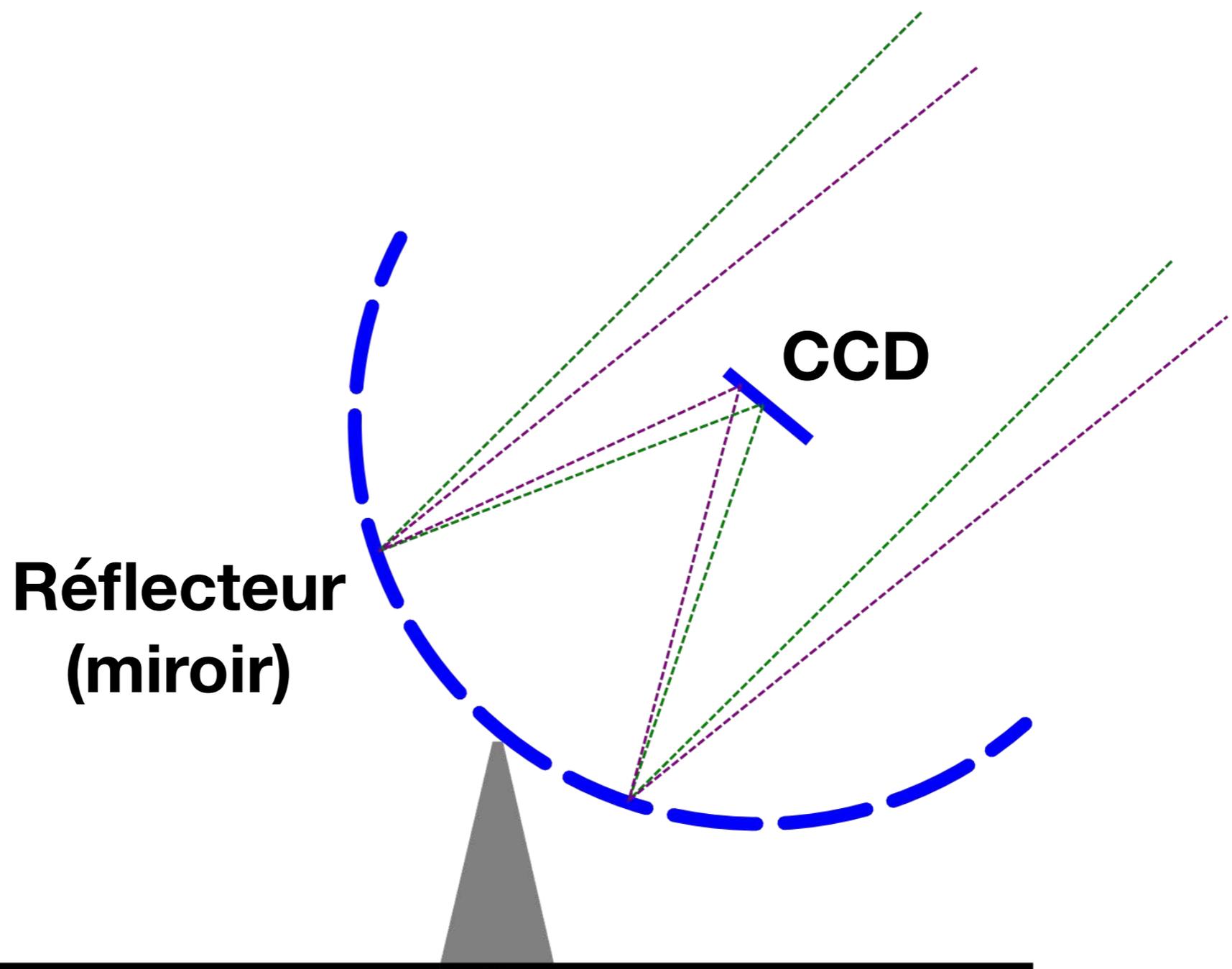
1) Commencer avec un télescope "normal"

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes



Telescope visible

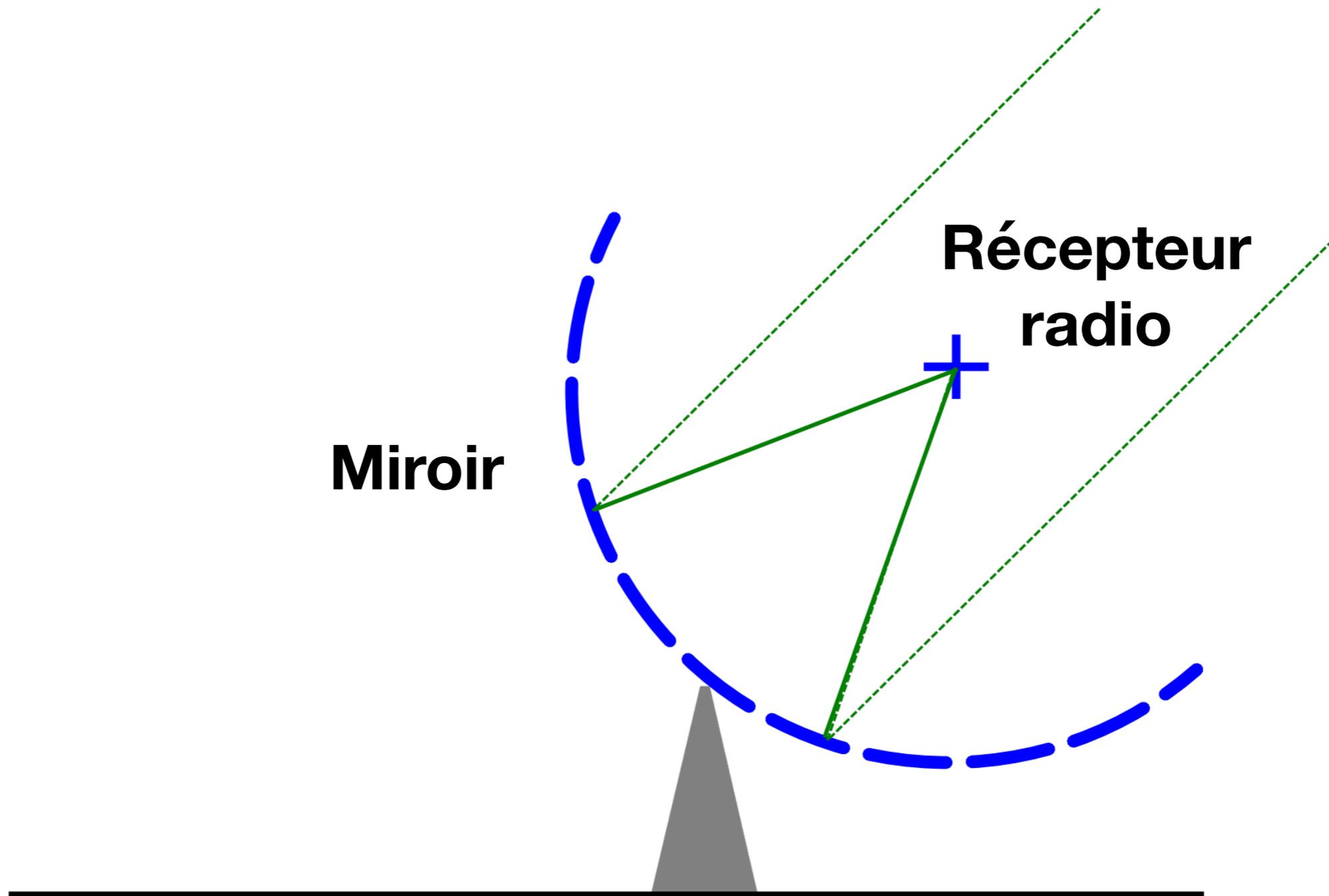


2) Découper le réflecteur en différent morceaux

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

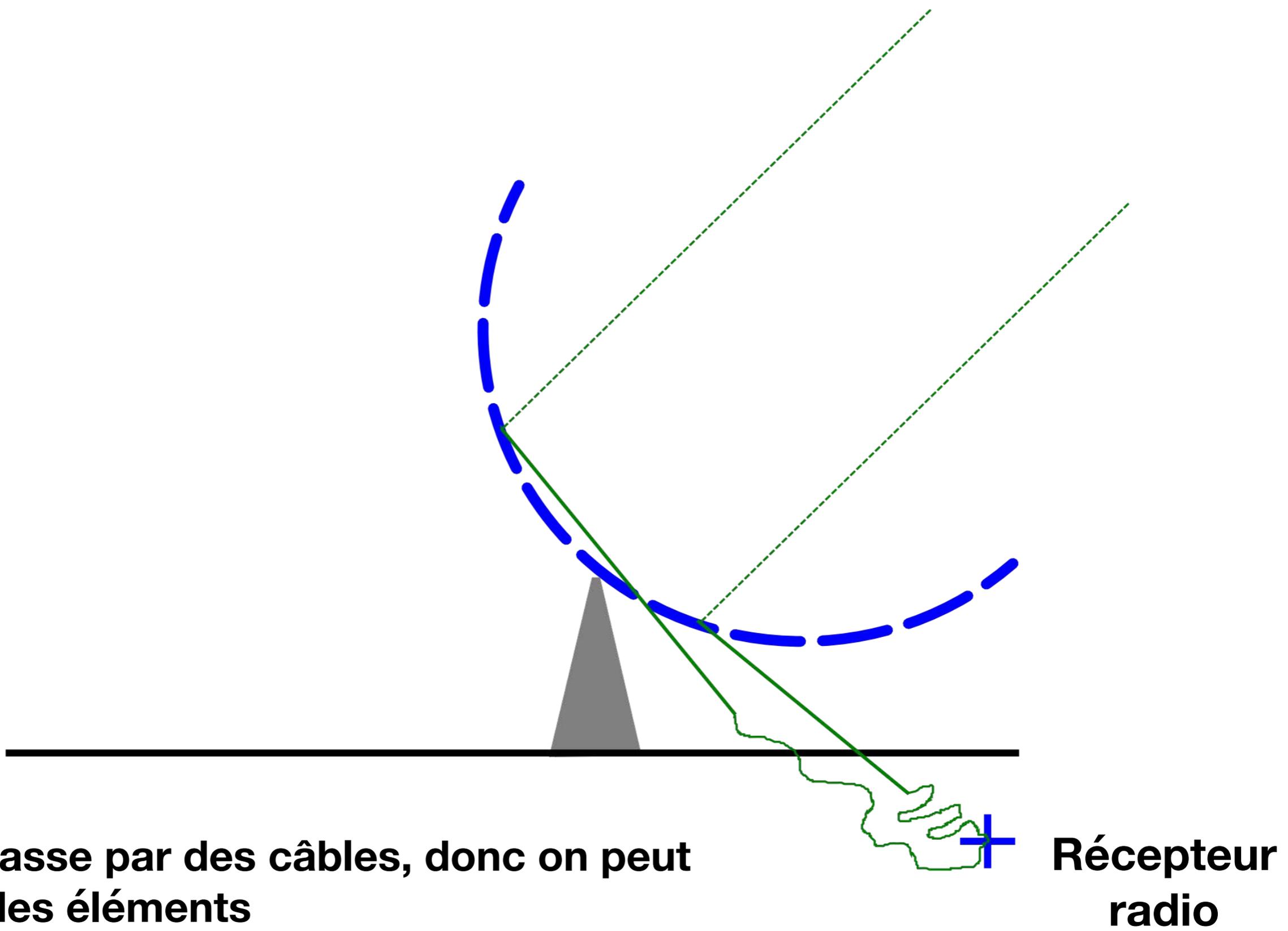
Telescope radio



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

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

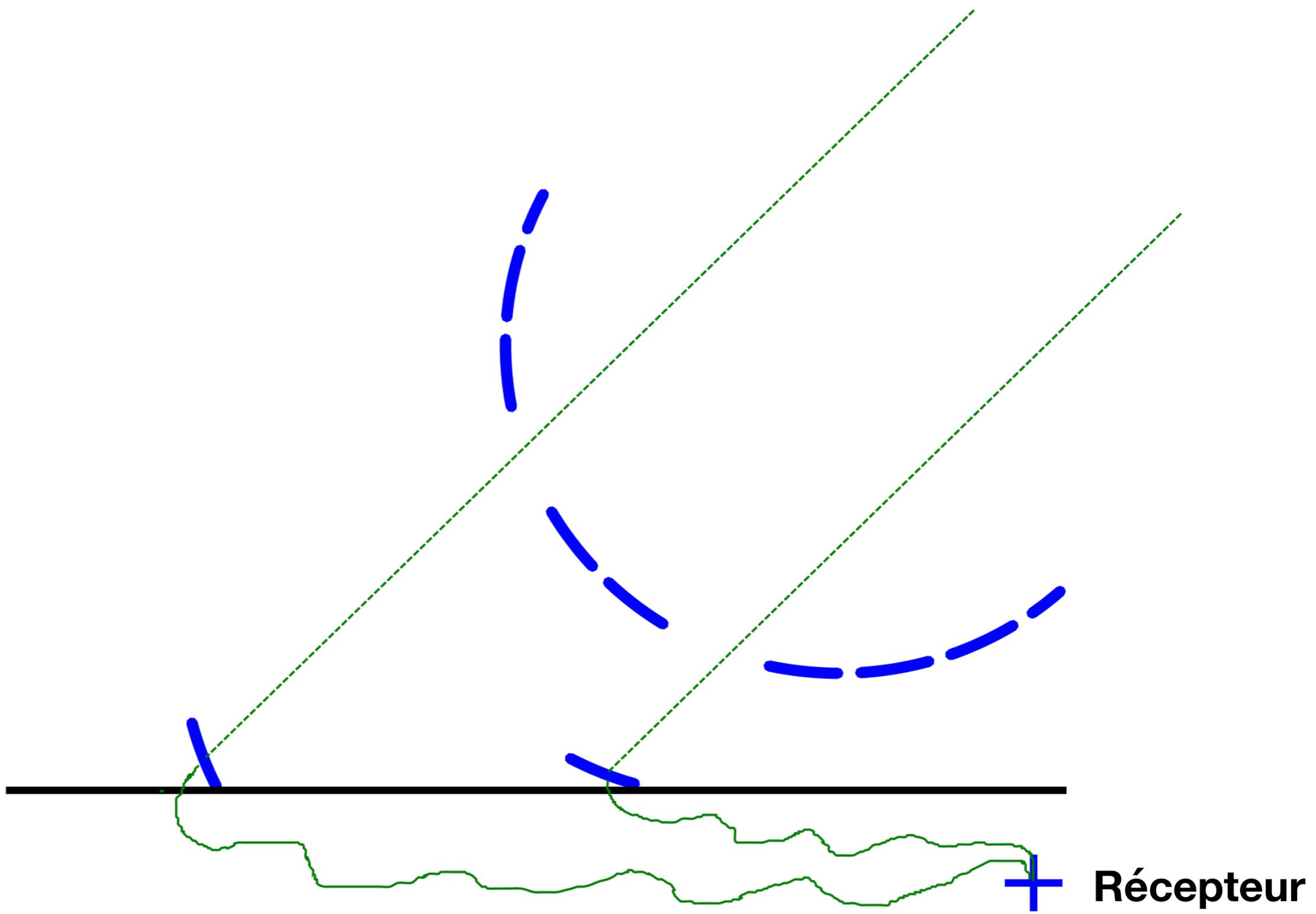


4) Tout passe par des câbles, donc on peut bouger des éléments

Récepteur radio

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

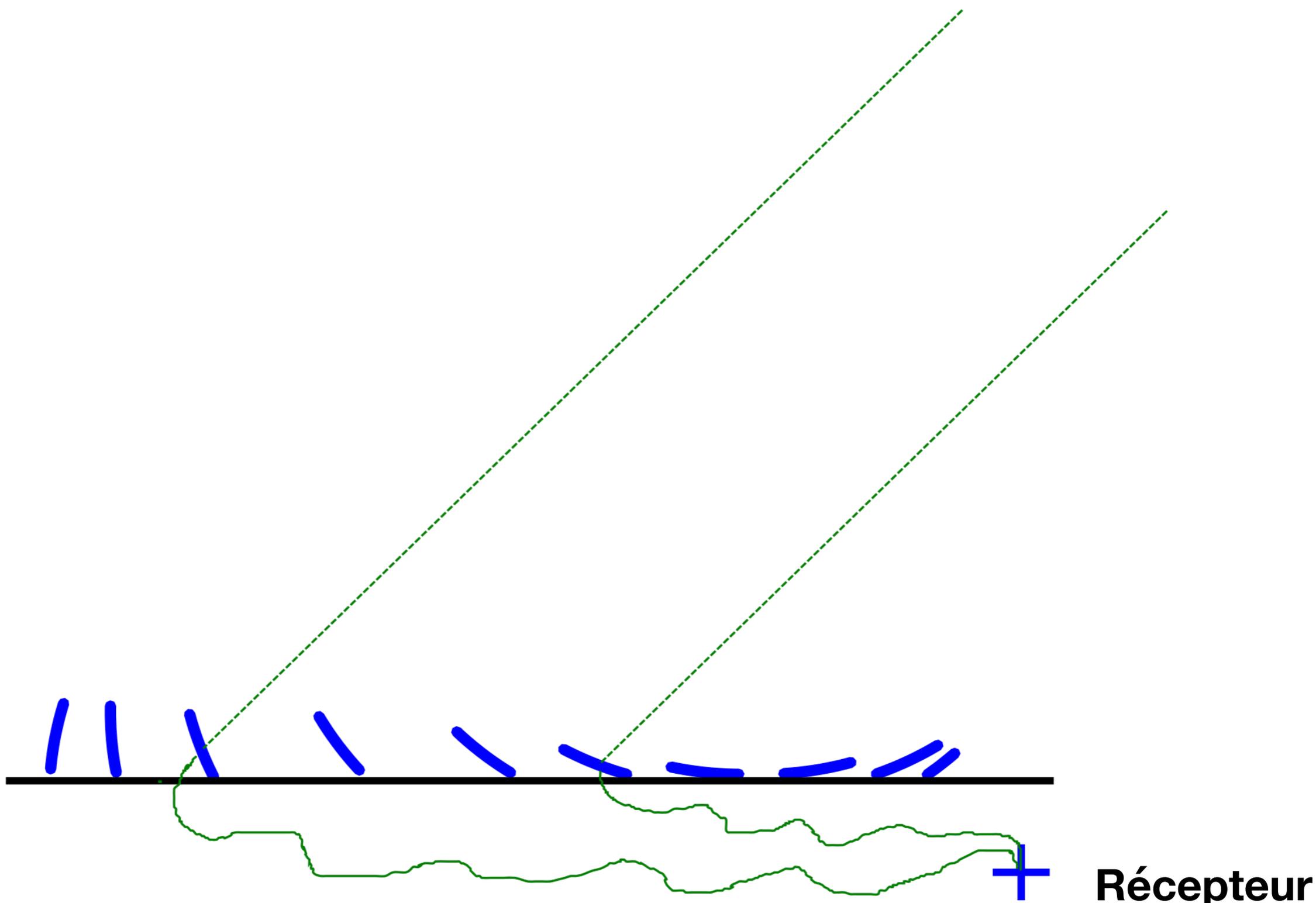


+ Récepteur radio

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

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

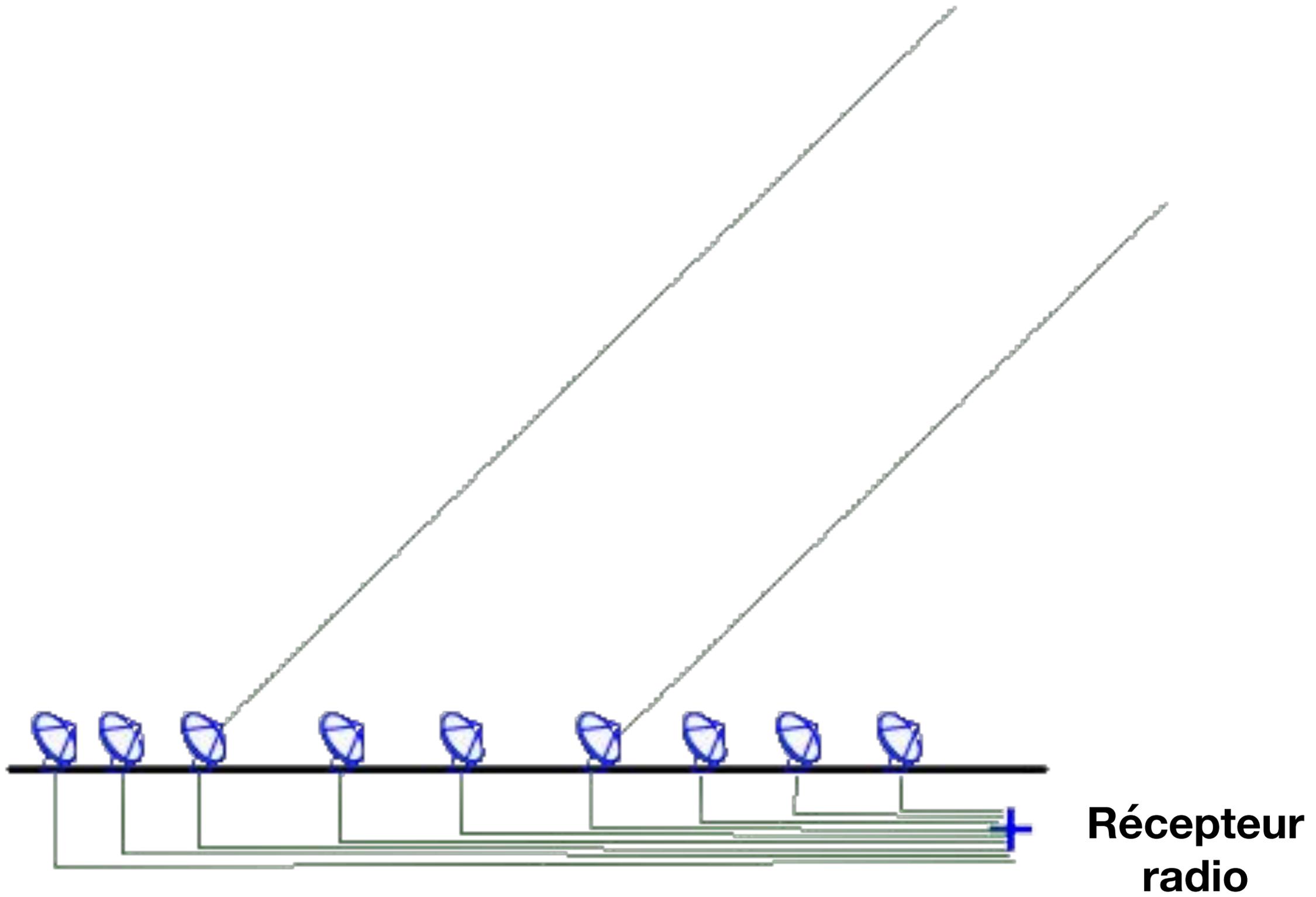


6) ... et pourquoi pas tout poser ...

**Récepteur
radio**

Mesure par interférométrie

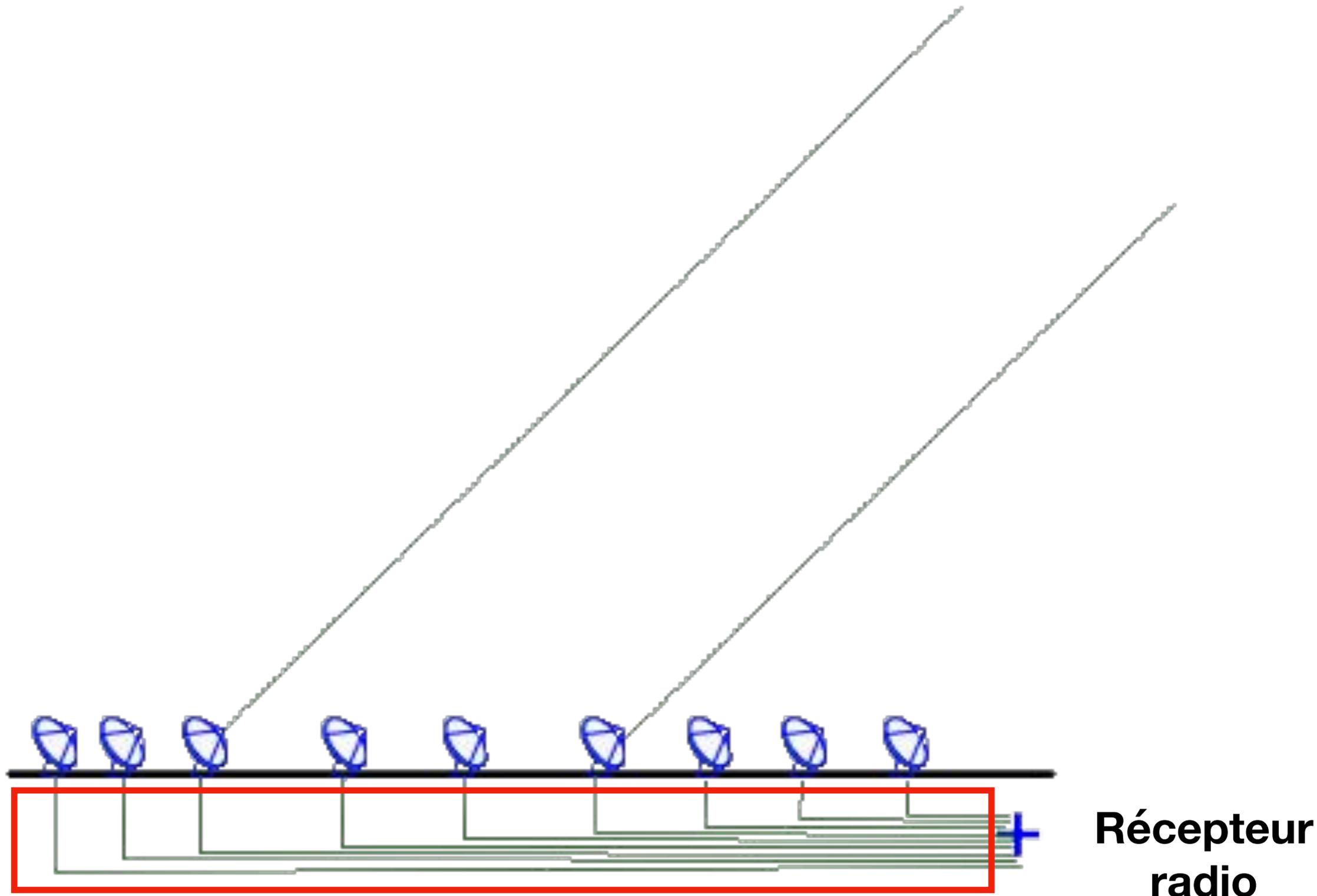
Fabrication d'un réseau d'antennes



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

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes



Phasage !

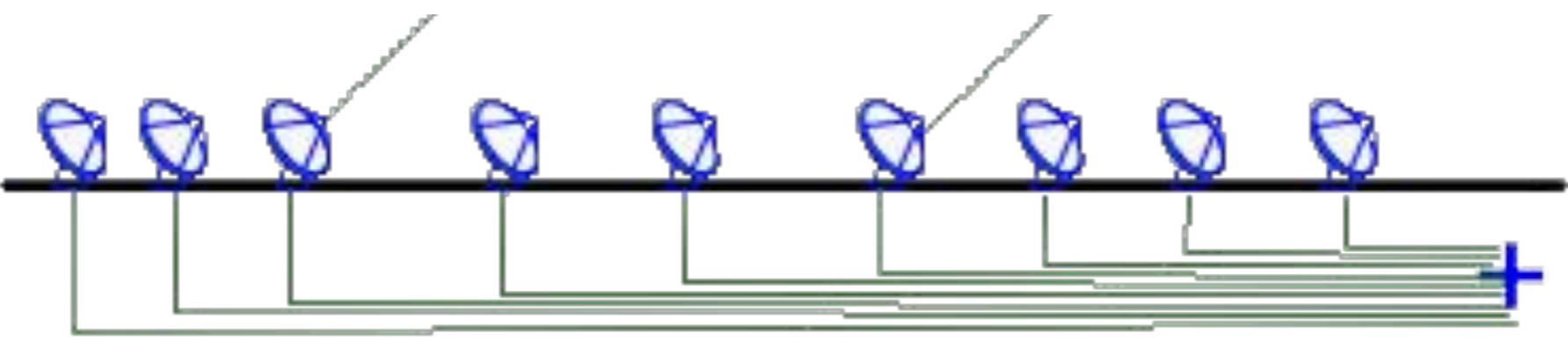
Récepteur radio

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

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

Que faire du signalphasé ?



Somme

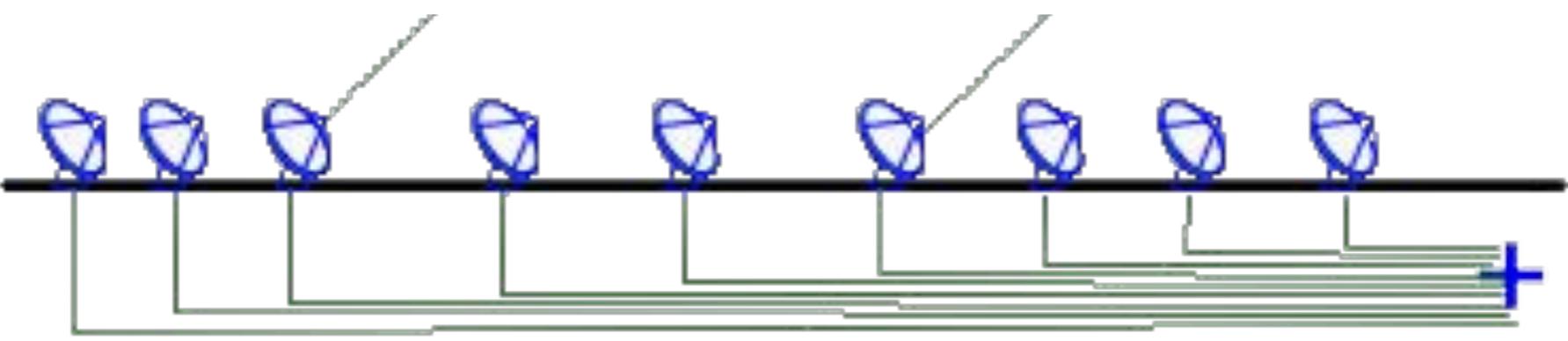
Produit



Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

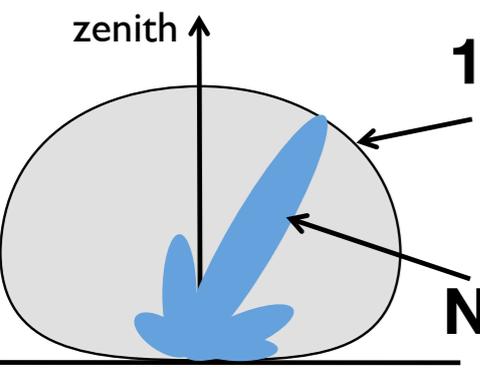
Que faire du signalphasé ?



Somme

Produit

« Réseau phasé »



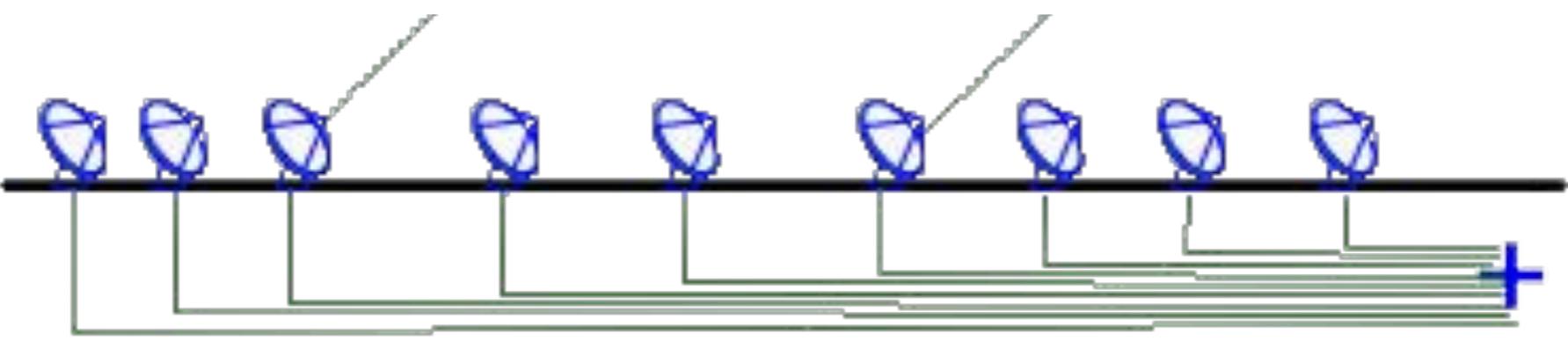
"1 pixel" mobile & sensible sur le ciel

- Séries temporelles
- Spectres dynamiques

Mesure par interférométrie

Fabrication d'un réseau d'antennes

Que faire du signalphasé ?



Somme

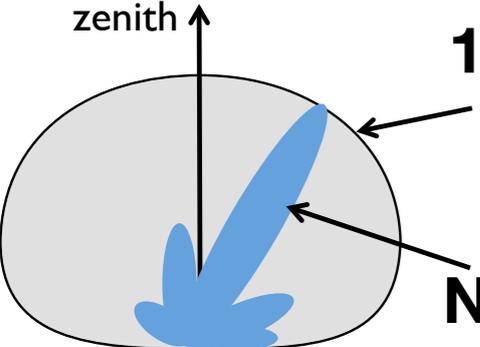
Produit

« Réseau phasé »

« Interféromètre »



Voir pres. C. Viou



"1 pixel" mobile & sensible sur le ciel

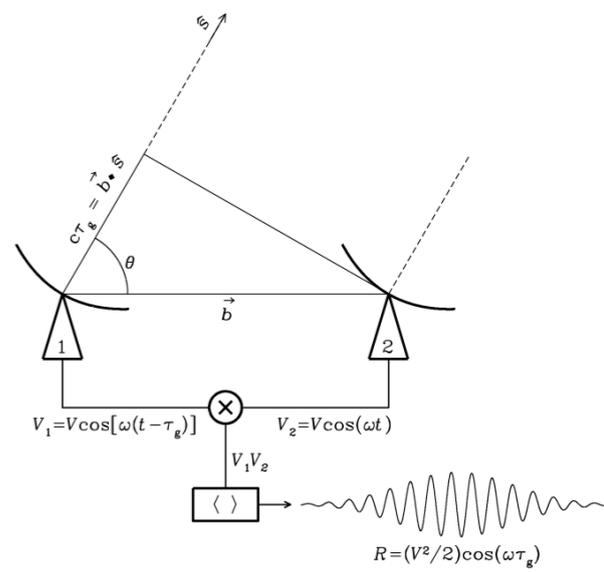
- Séries temporelles
- Spectres dynamiques



VLA

Sensible aux "caractéristiques fréquentielles" du ciel

→ Imagerie



Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D

Mesure par interférométrie

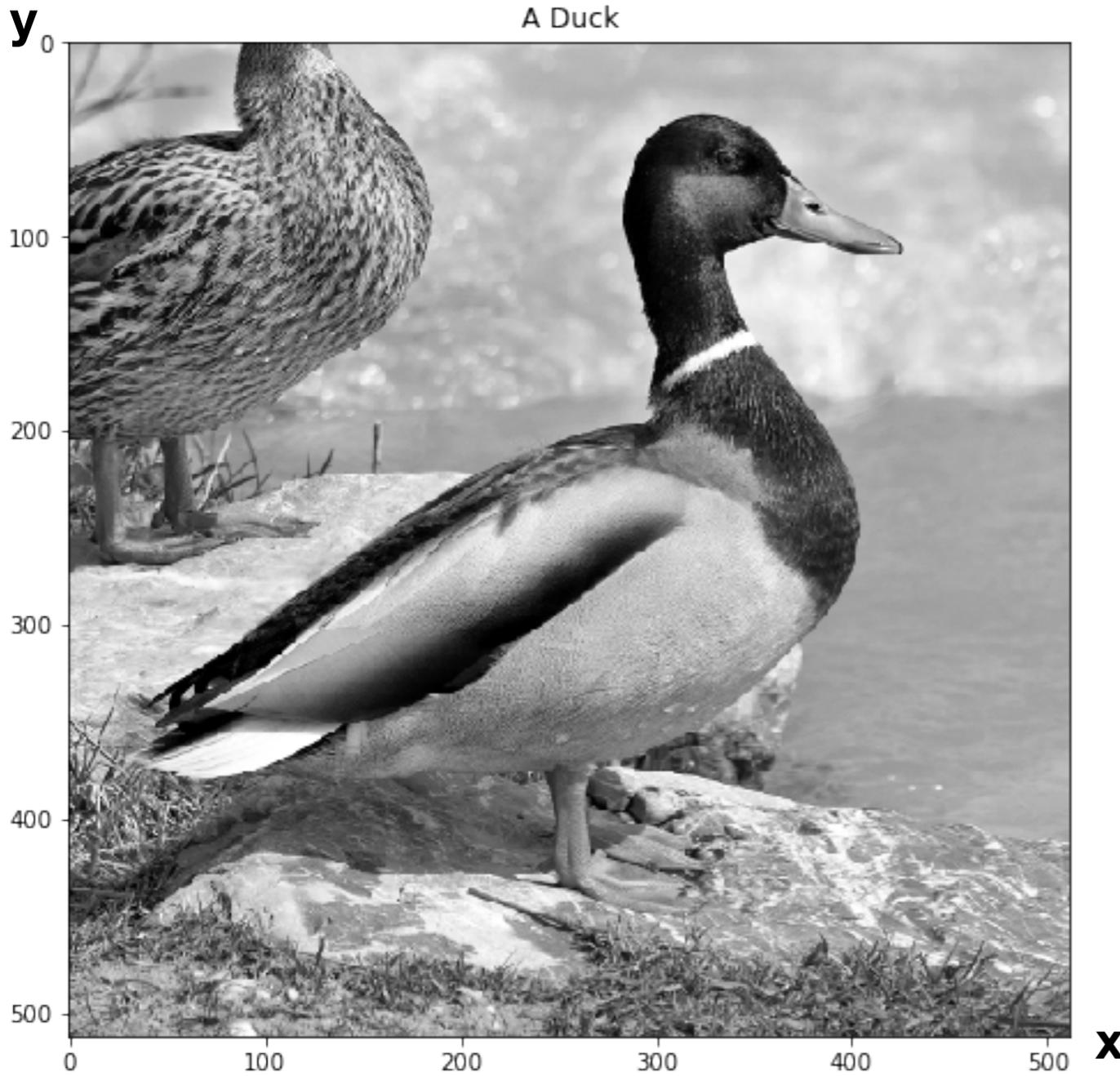
Transformée de Fourier à 2D

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

Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D

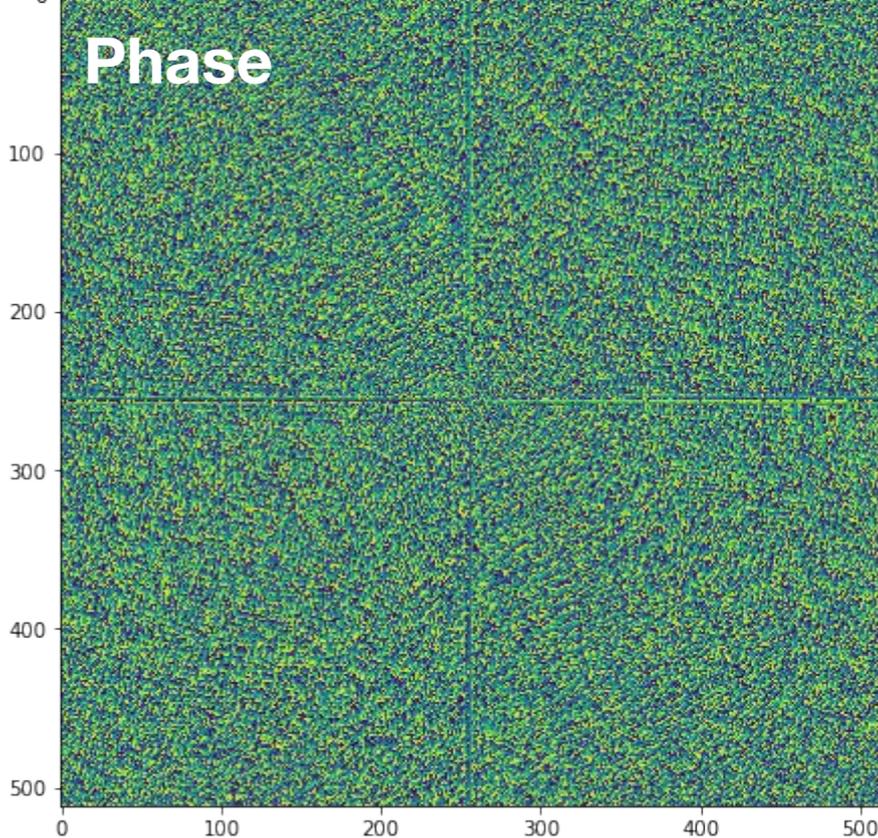
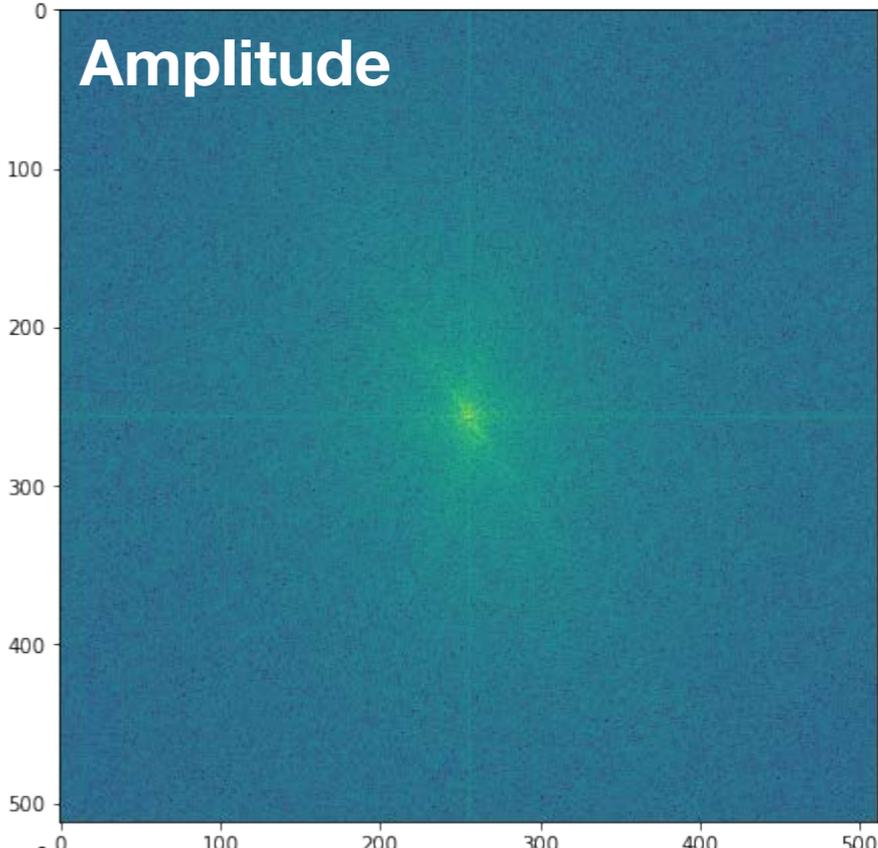
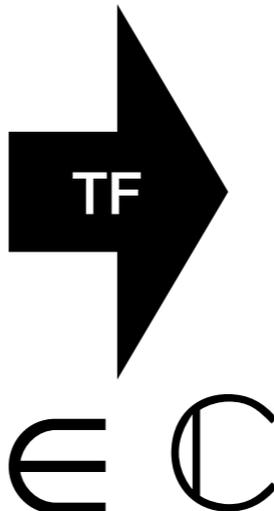
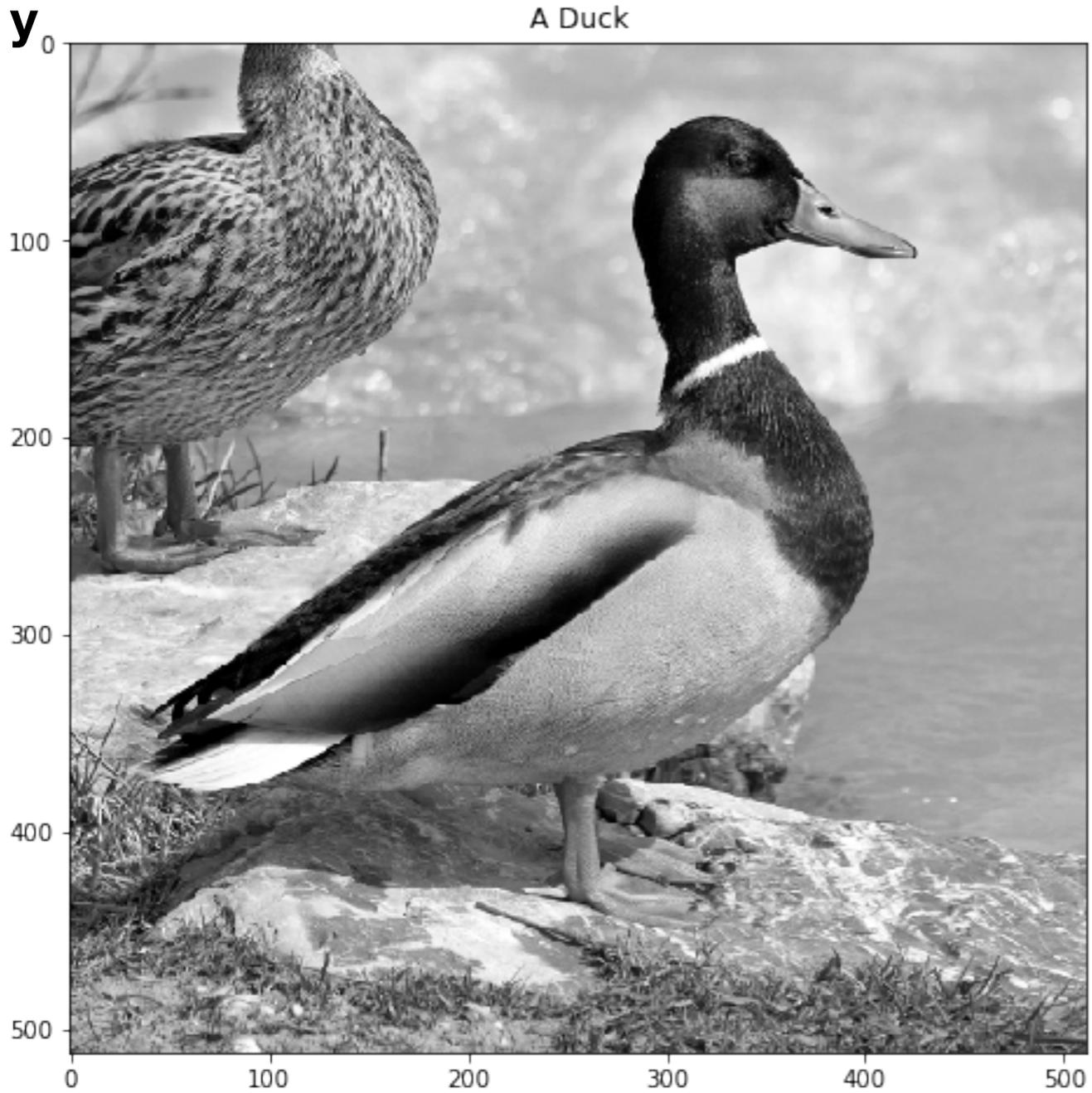
$$\text{TF 1D } \hat{S}(\nu) = \int s(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$$



Mesure par interférométrie

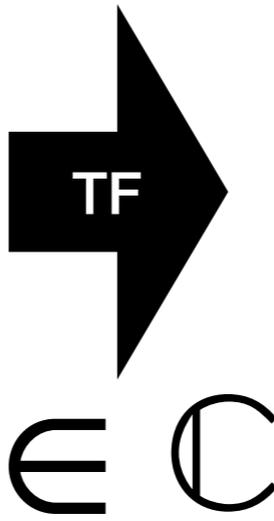
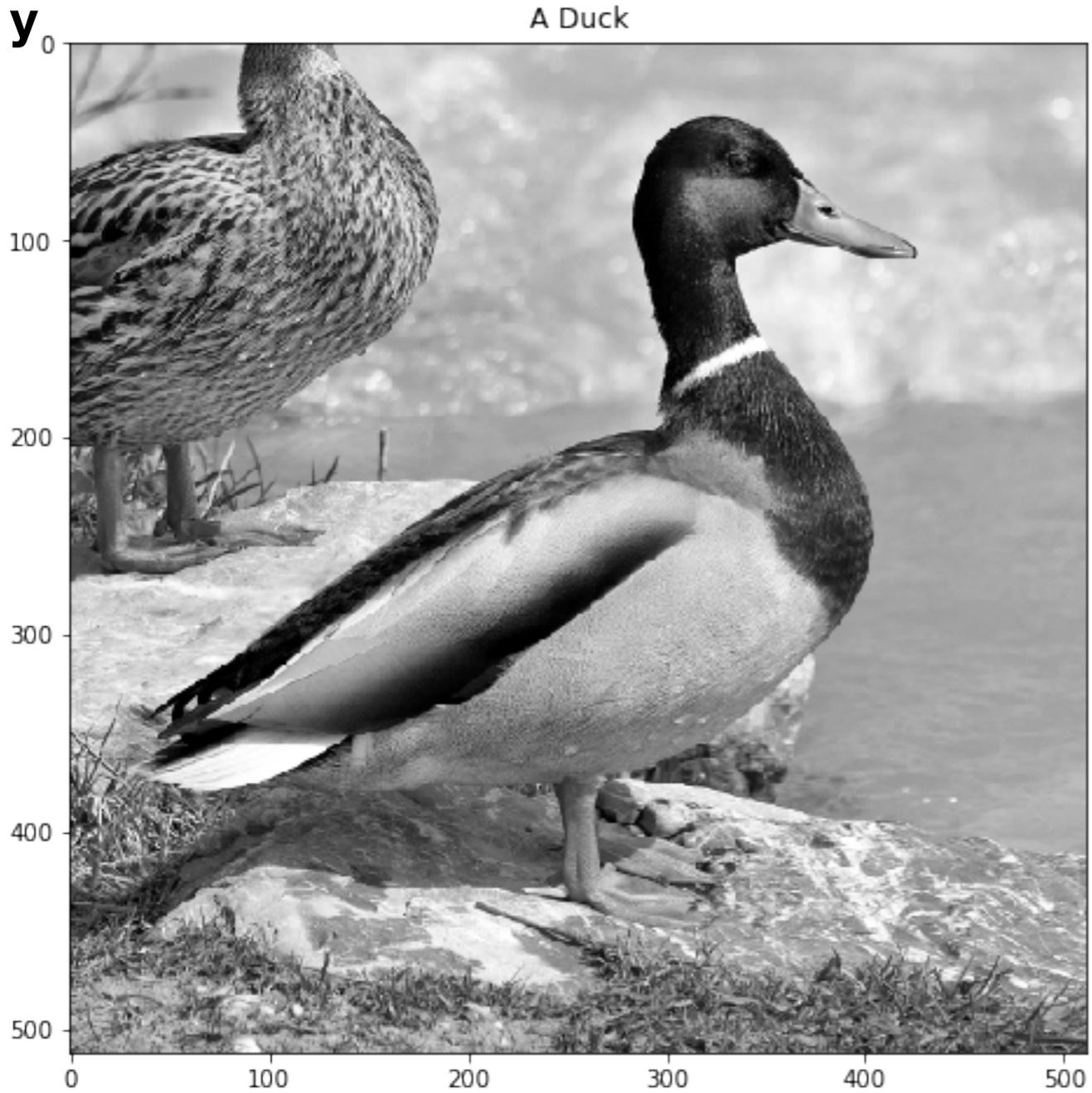
Transformée de Fourier à 2D

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

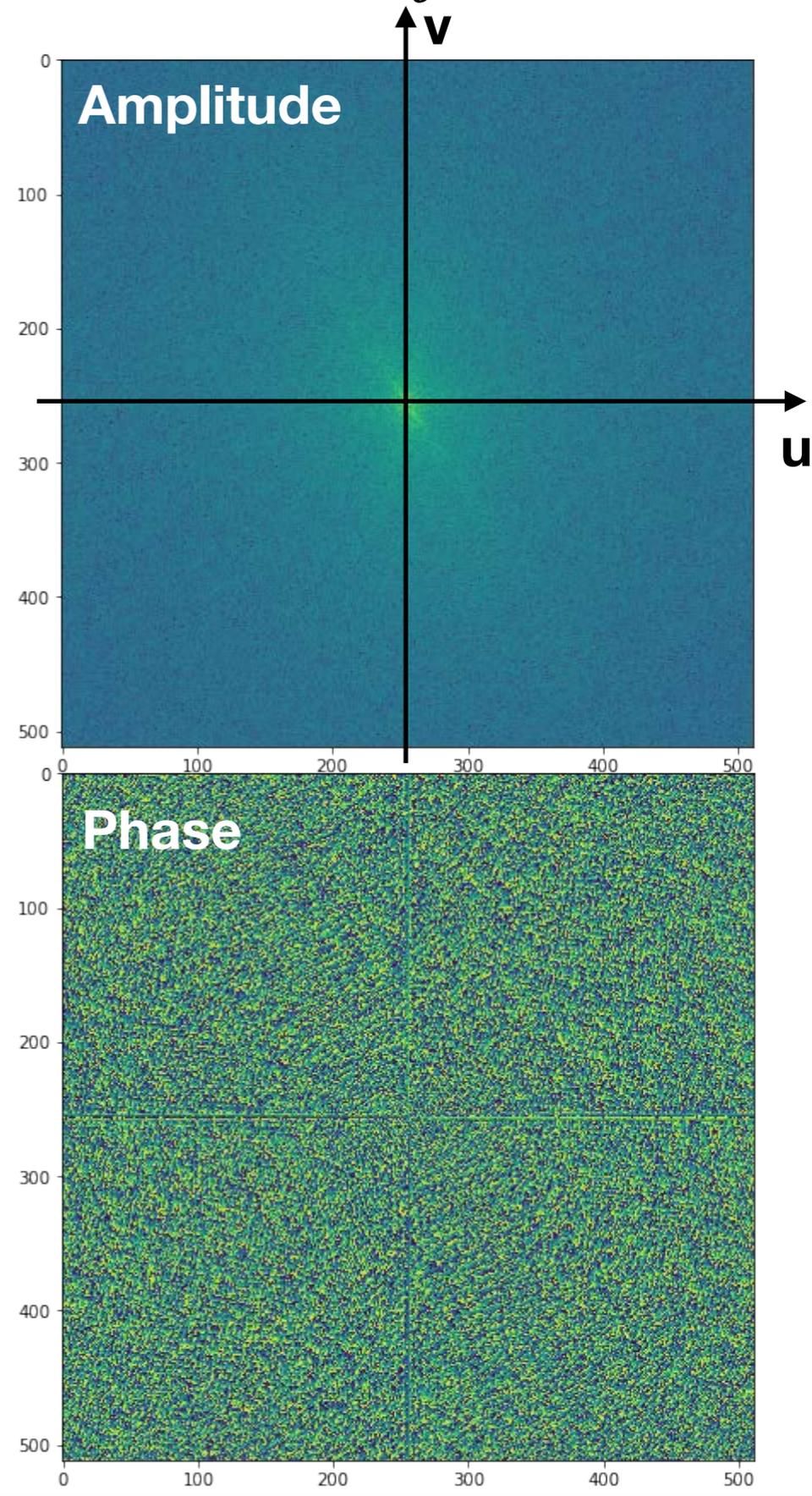


Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D

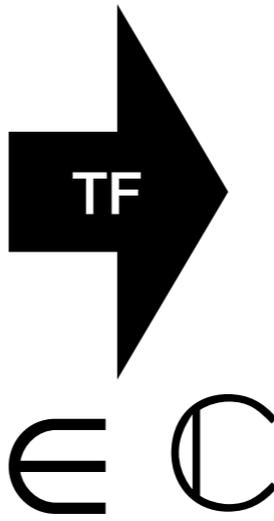
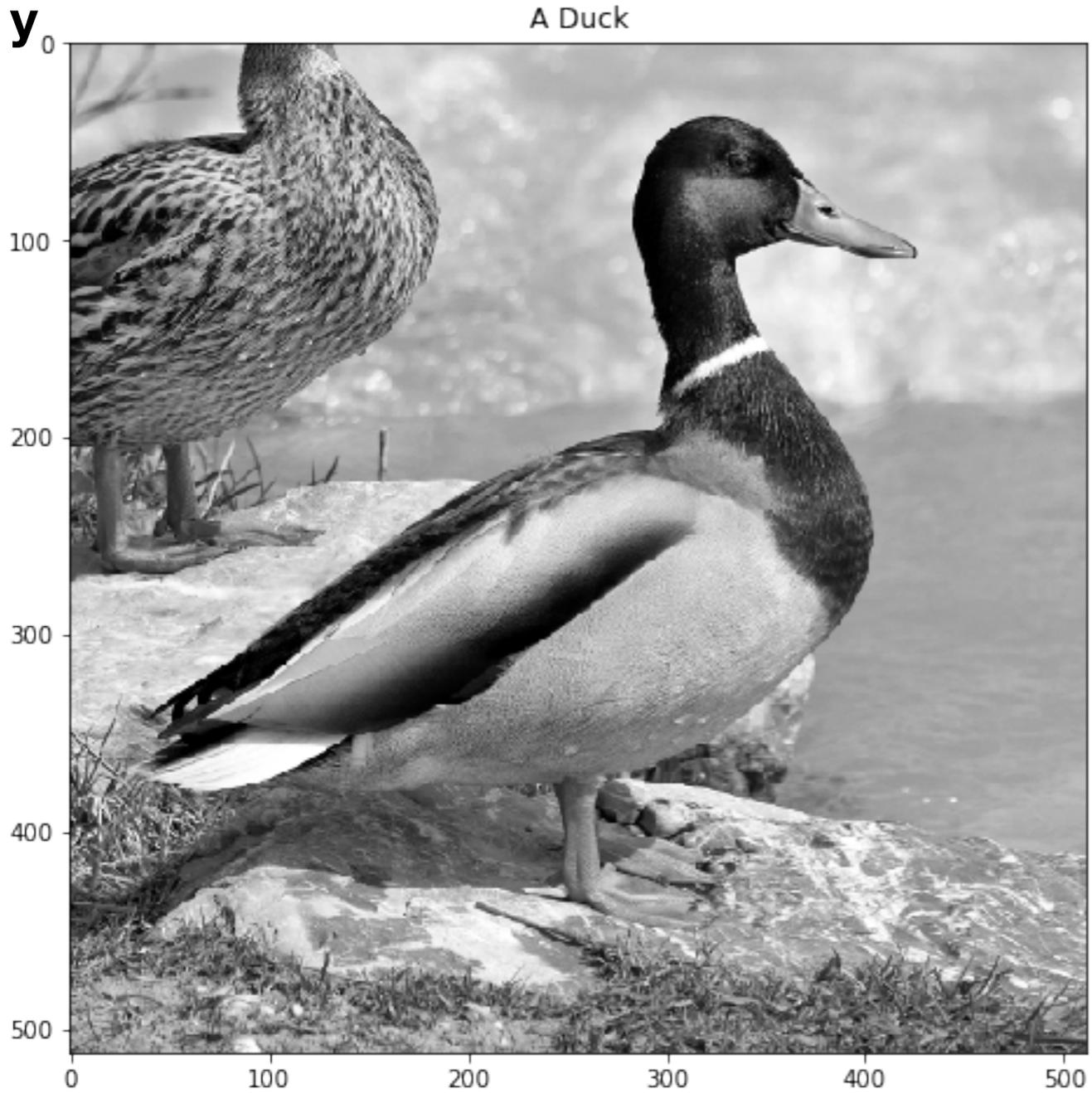


$$\text{TF 1D } \hat{S}(\nu) = \int s(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$$

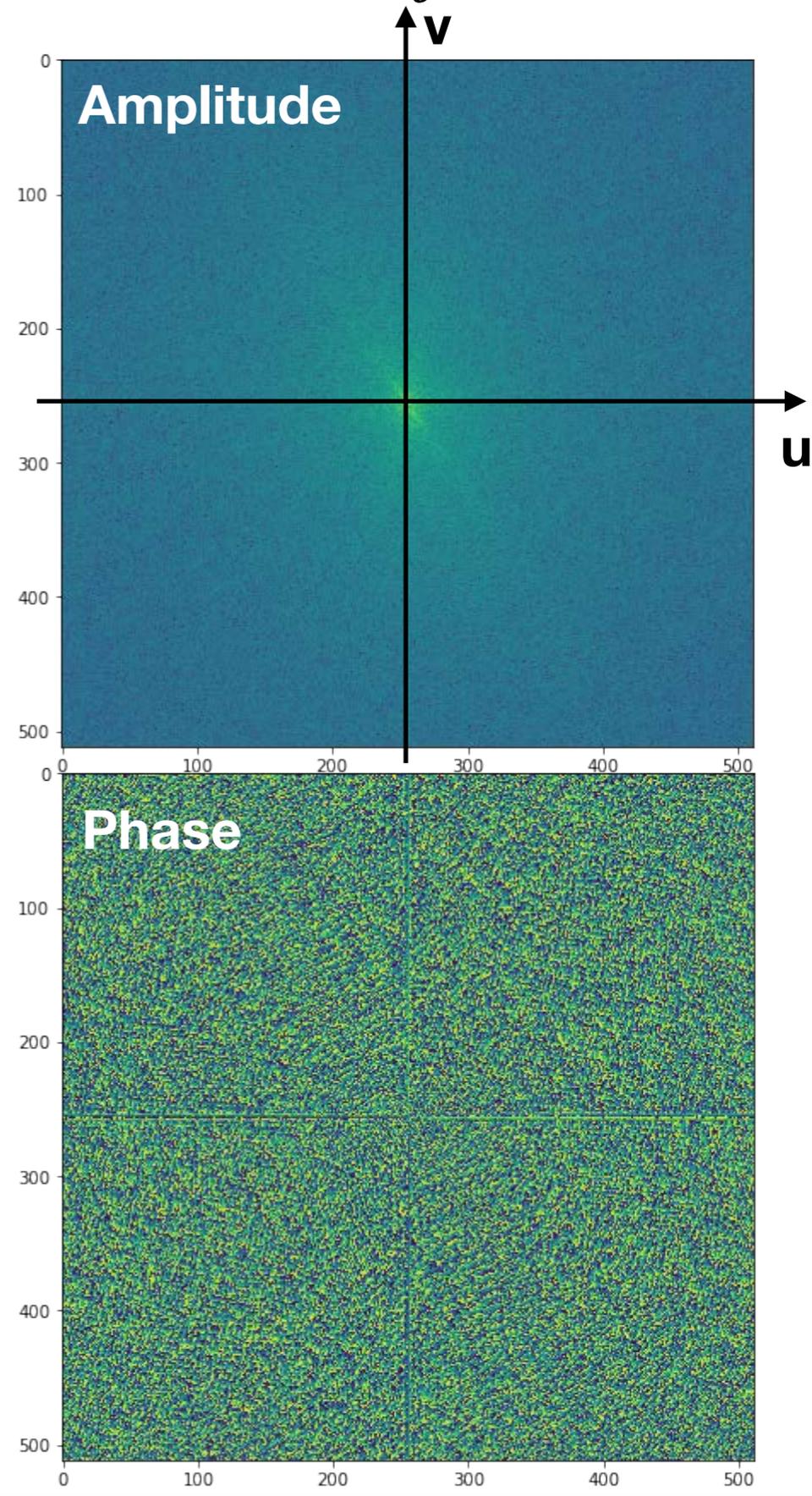


Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D



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

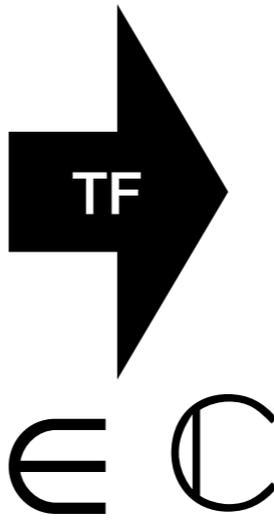
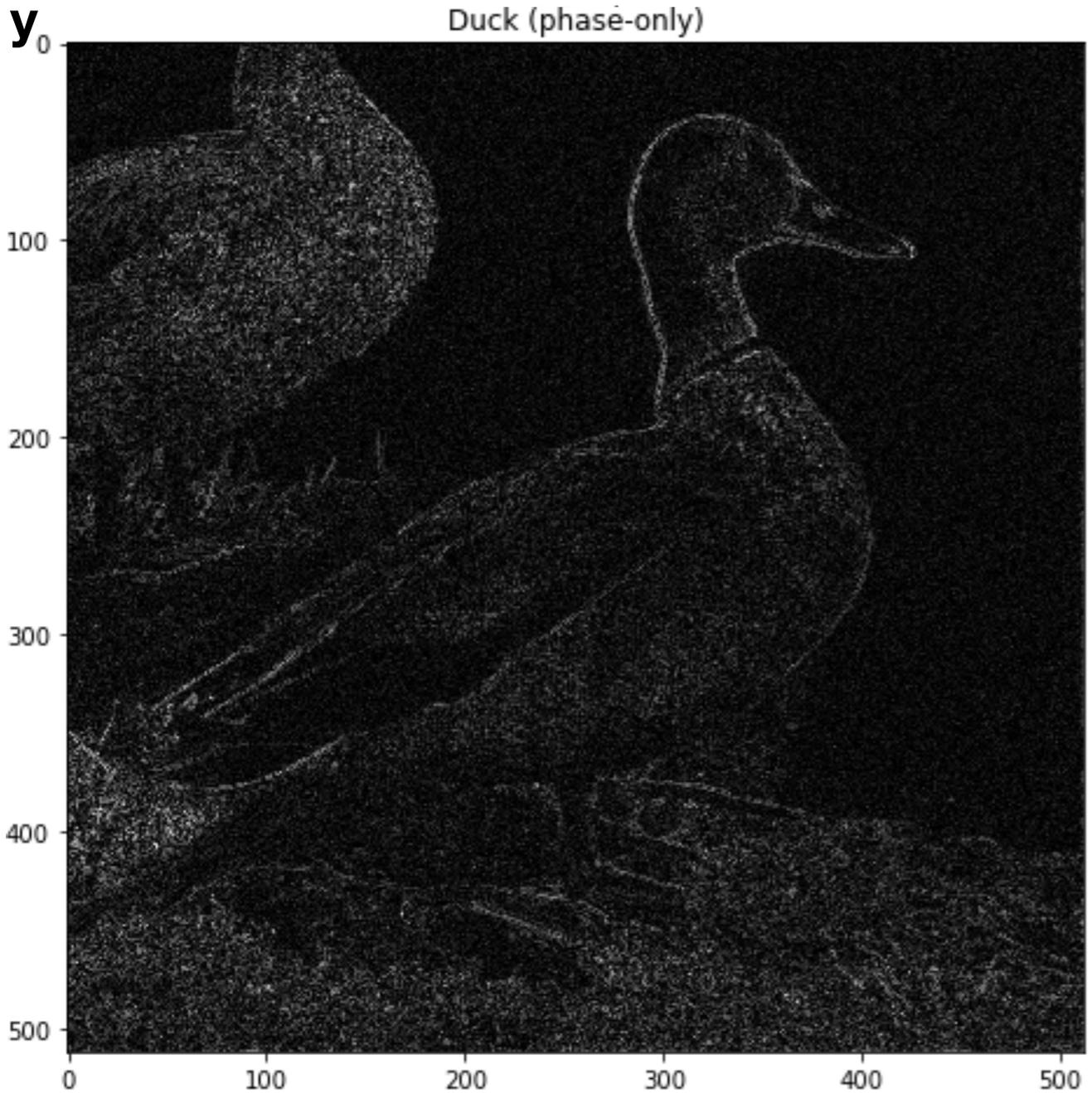


$$\hat{D}(u, v) = \iint D(x, y) e^{-2i\pi(xu+yv)} dx dy$$

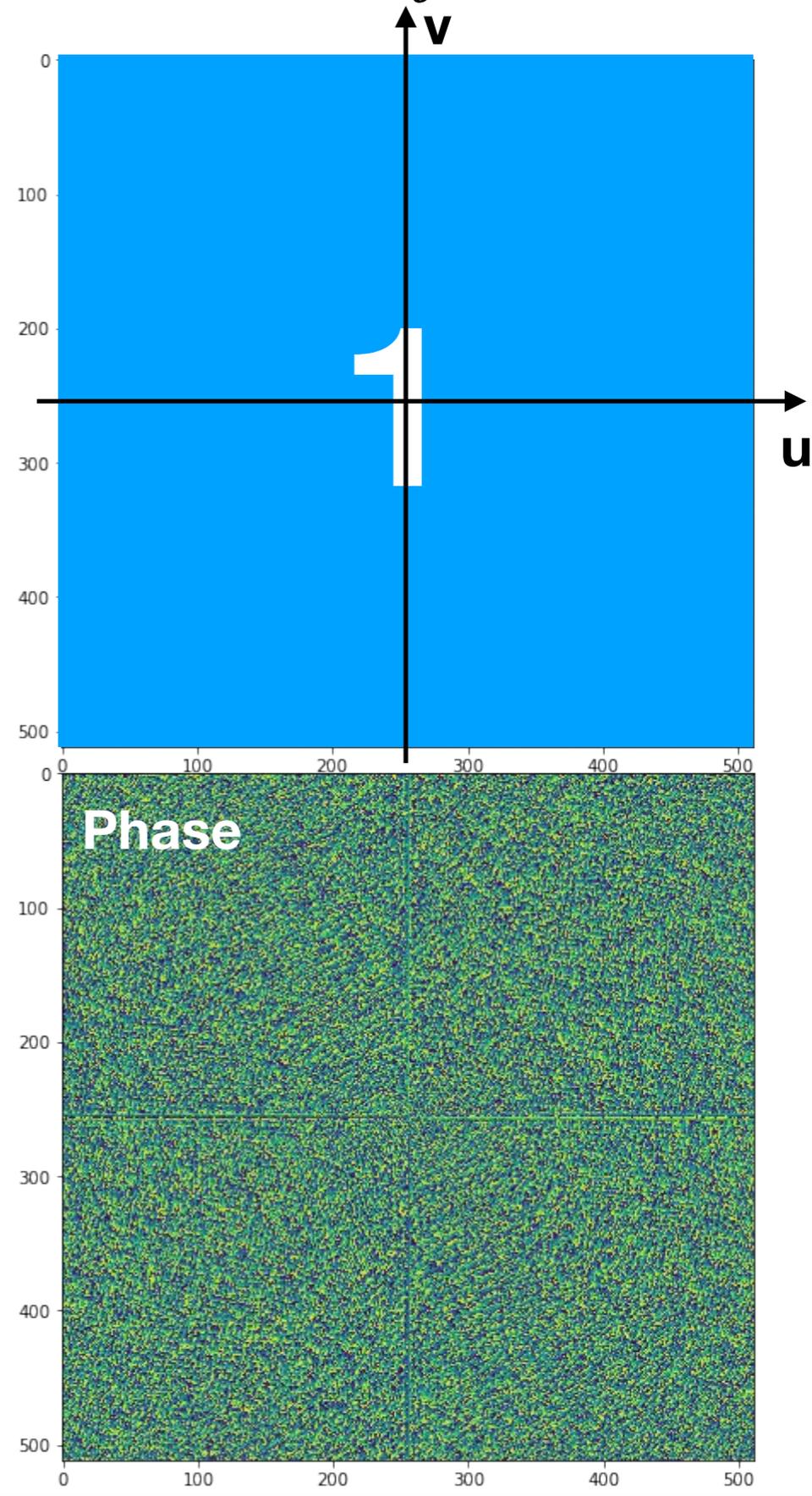
$(x, y) \leftrightarrow (u, v)$ Coordonnées conjuguées

Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D



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

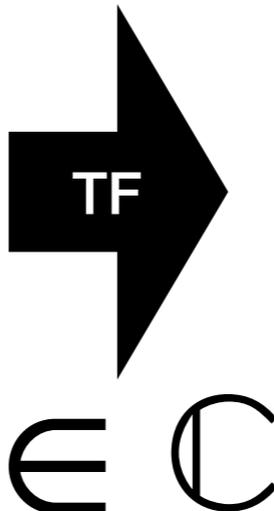
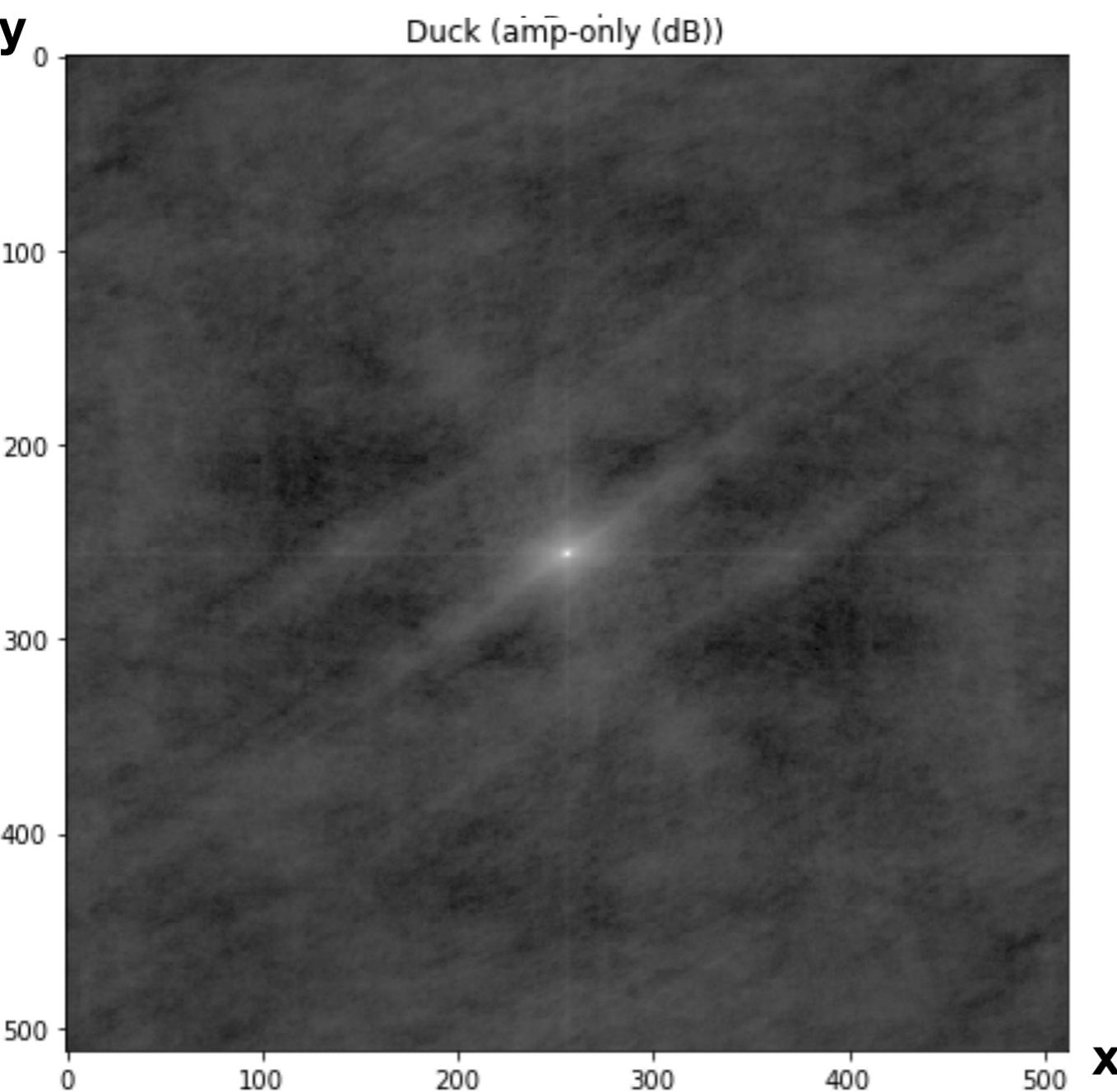


$$\hat{D}(u, v) = \iint D(x, y)e^{-2i\pi(xu+yv)} dx dy$$

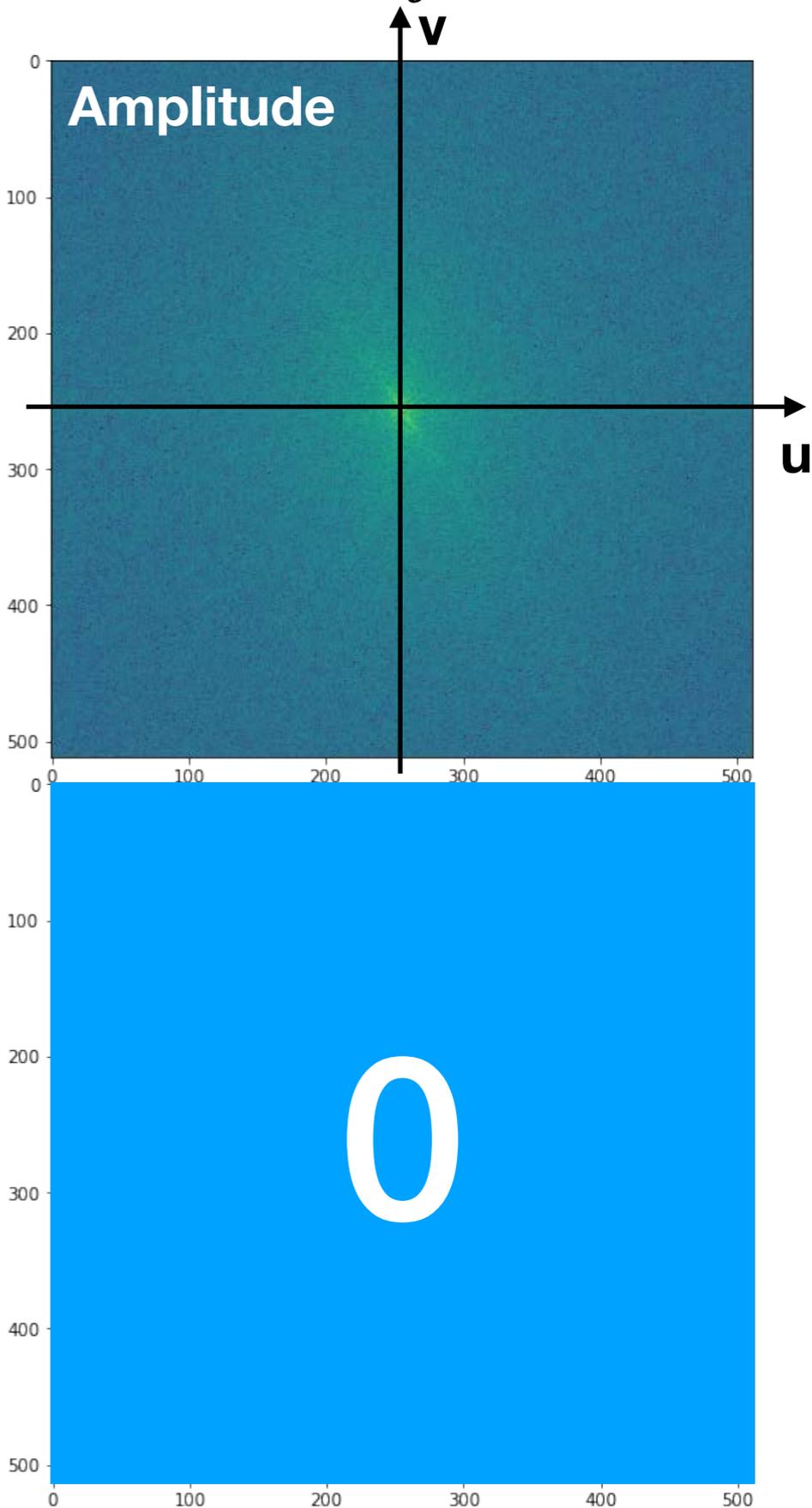
$(x, y) \leftrightarrow (u, v)$ Coordonnées conjuguées

Mesure par interférométrie

Transformée de Fourier à 2D



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



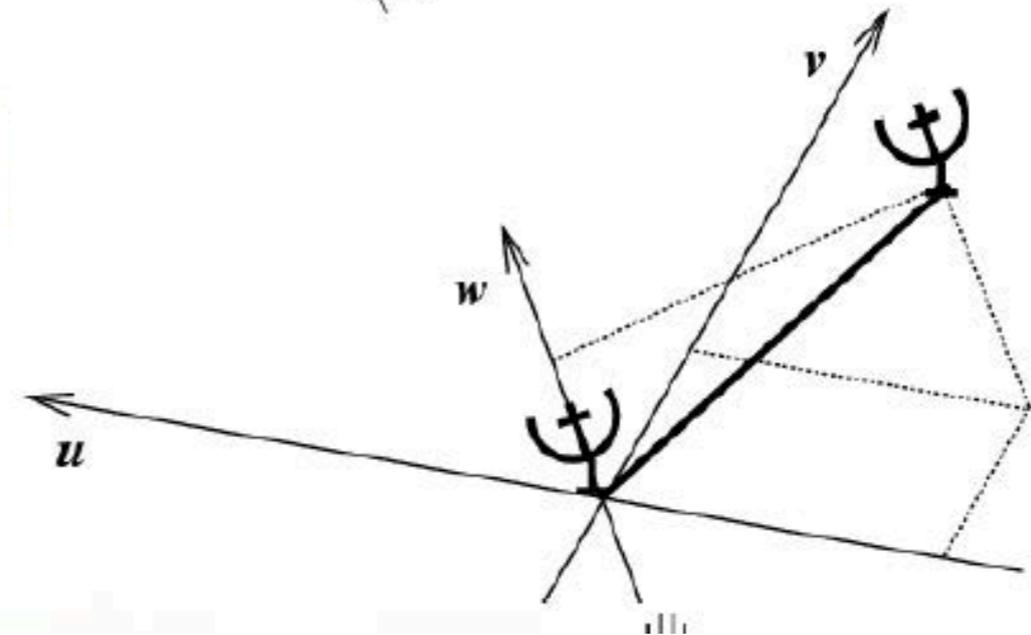
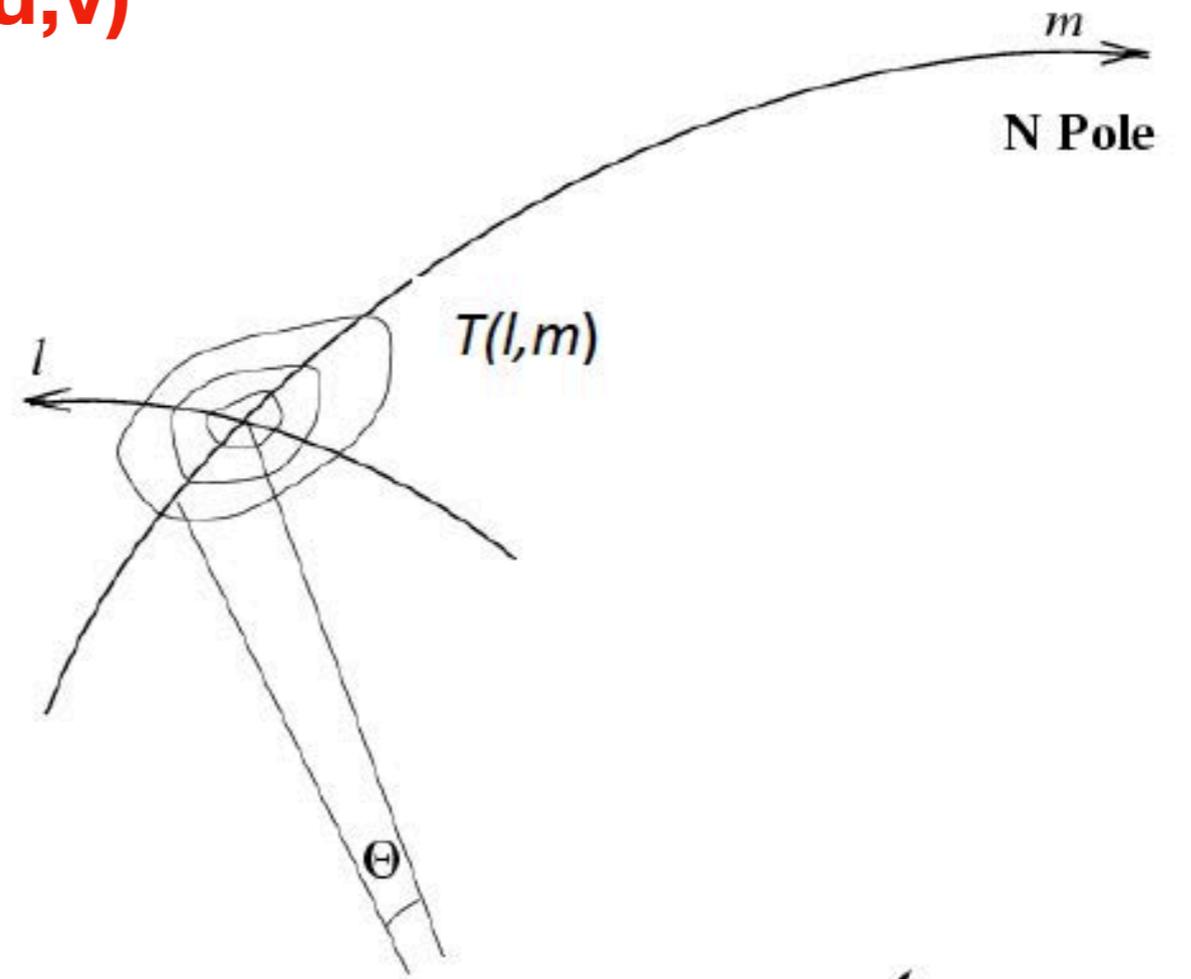
$$\hat{D}(u, v) = \iint D(x, y)e^{-2i\pi(xu+yv)} dx dy$$

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

Mesure par interférométrie: plan (u,v)



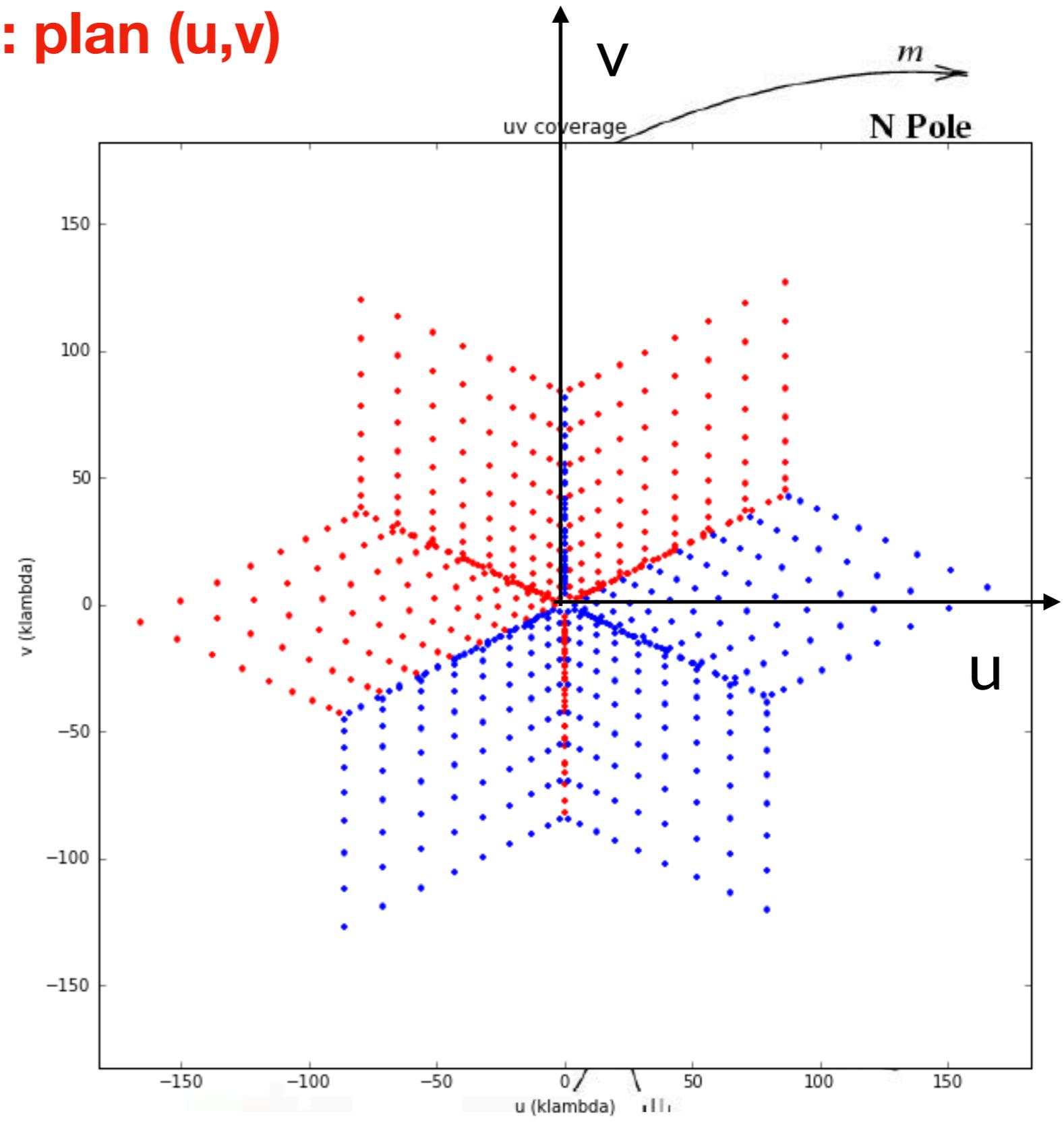
(l,m) Direction dans le ciel



Mesure par interférométrie: plan (u,v)



(l,m) Direction dans le ciel



Mesure par interférométrie: plan (u,v)



(l,m) Direction dans le ciel

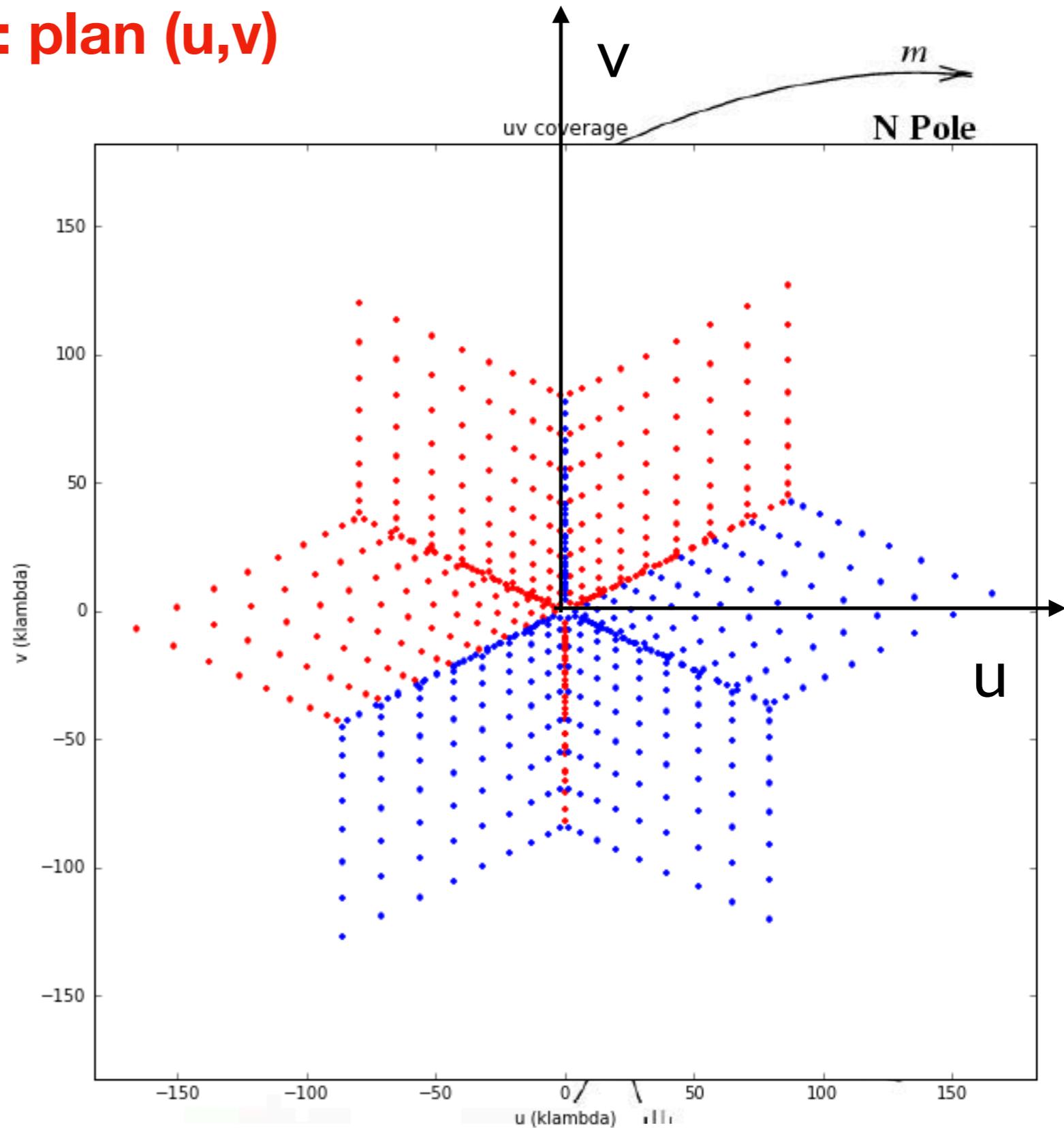
(u,v) Fréquences spatiales

1 ligne de base projetée

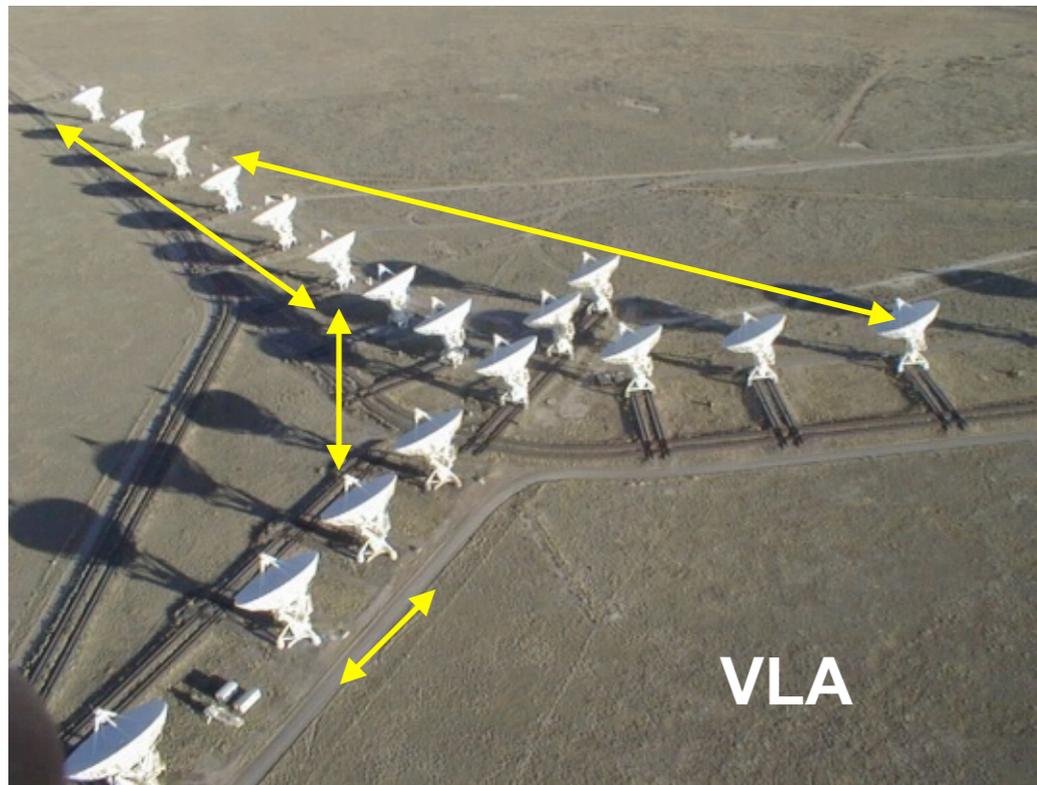
= 1 échantillon du plan de

Fourier (plan « u,v »)

= 1 visibilité



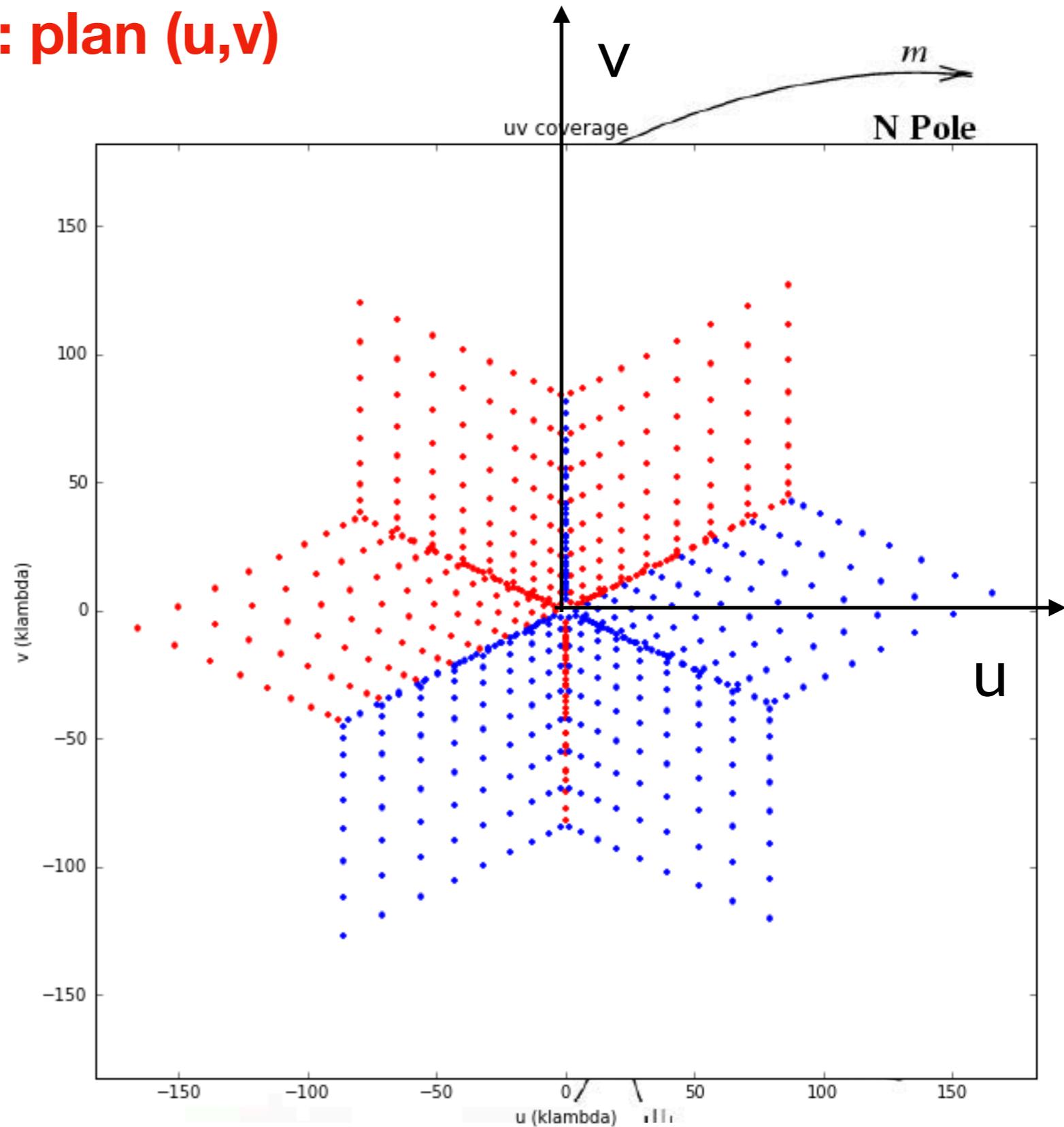
Mesure par interférométrie: plan (u,v)



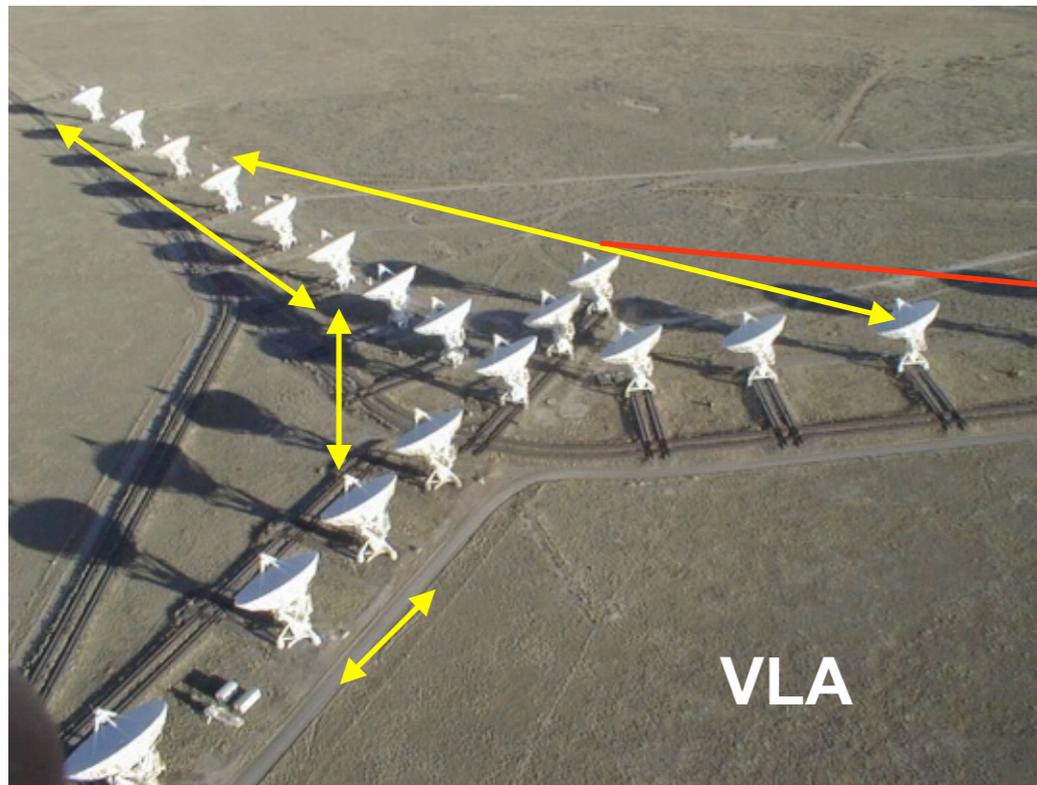
(l,m) Direction dans le ciel

(u,v) Fréquences spatiales

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



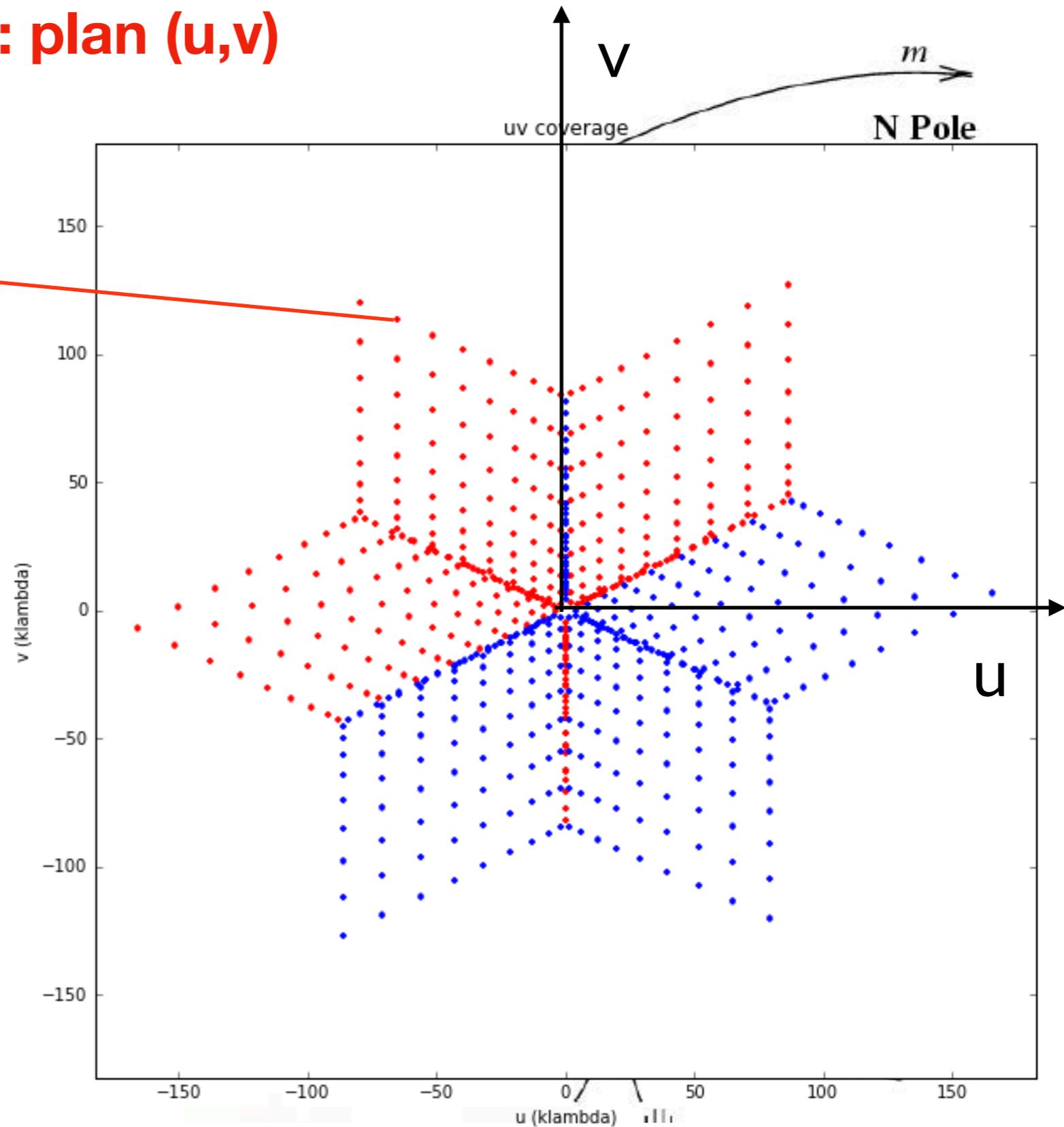
Mesure par interférométrie: plan (u,v)



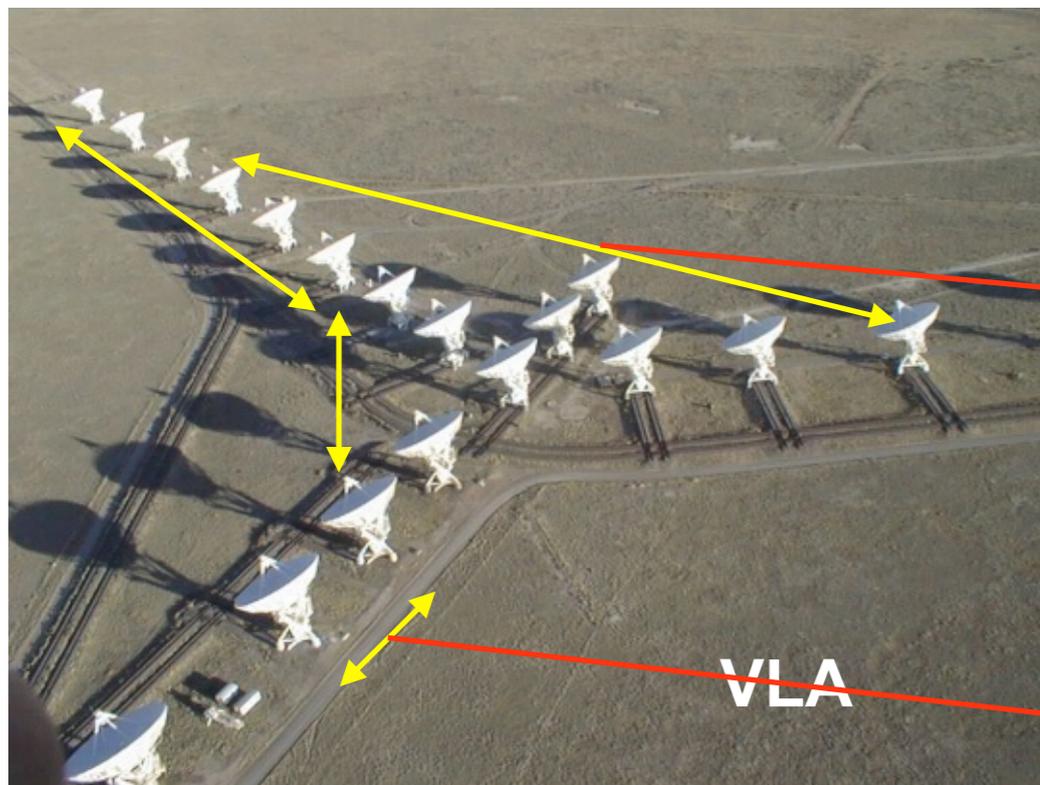
(l,m) Direction dans le ciel

(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

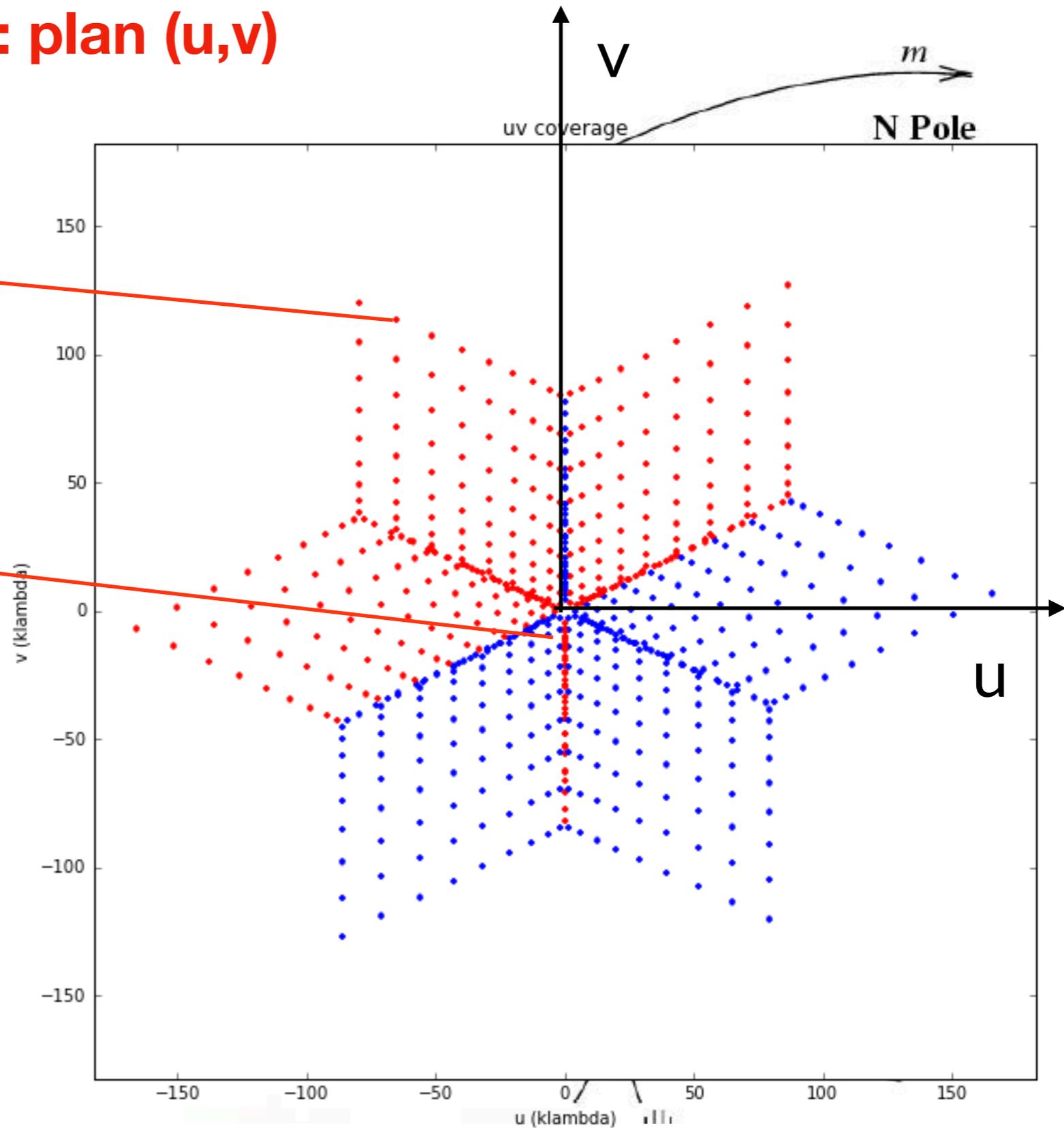
(u,v) Fréquences spatiales

1 ligne de base projetée

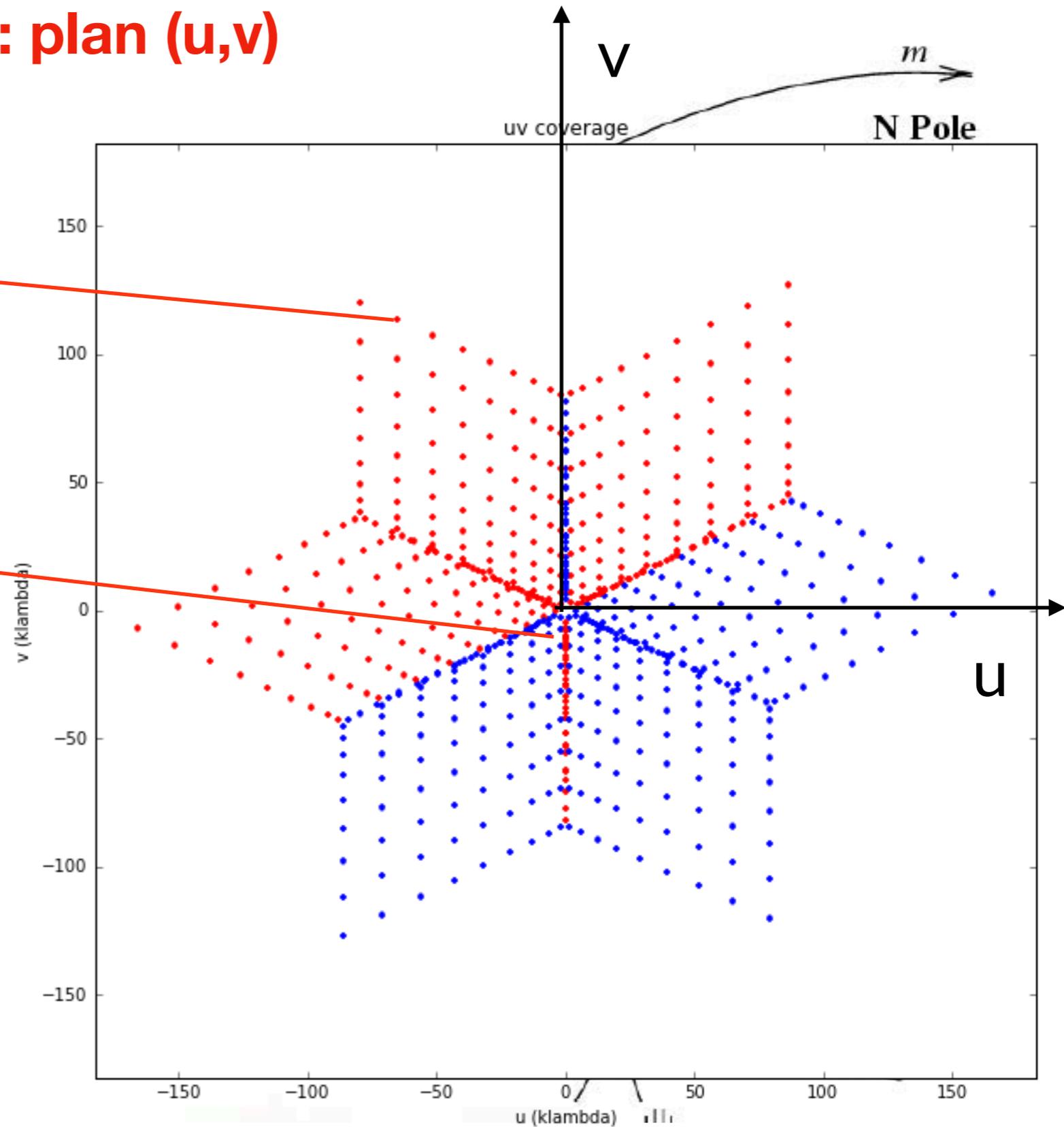
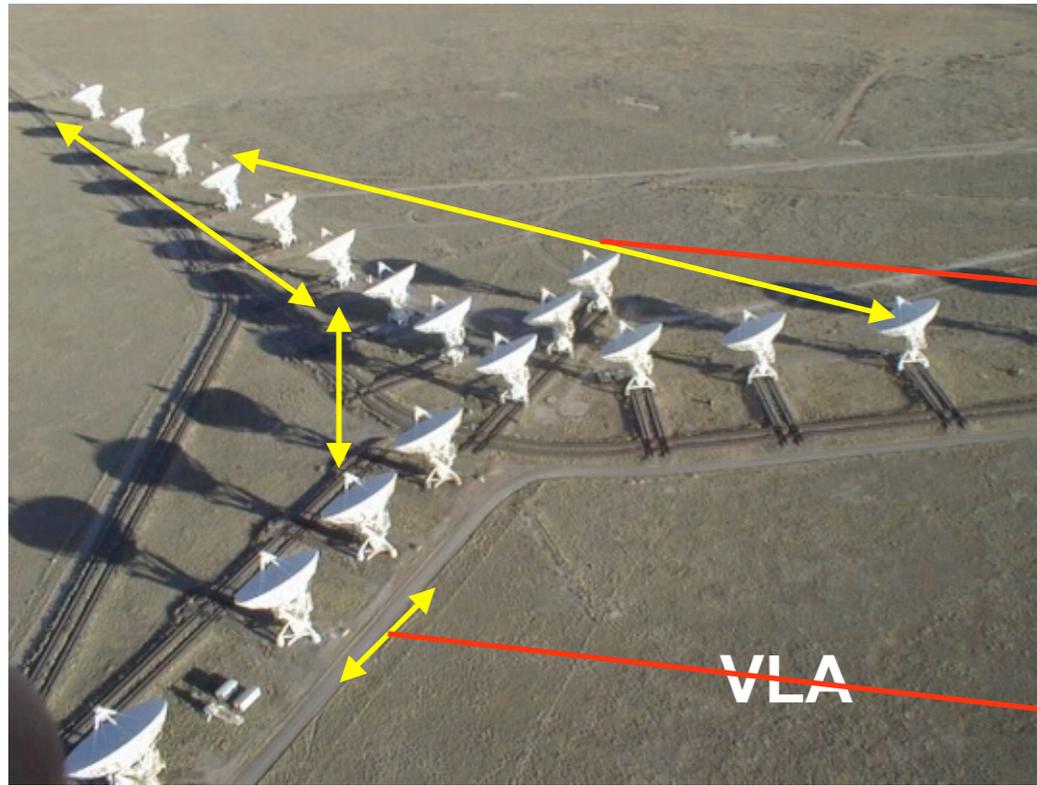
= 1 échantillon du plan de

Fourier (plan « u,v »)

= 1 visibilité



Mesure par interférométrie: plan (u,v)



(l,m) Direction dans le ciel

(u,v) Fréquences spatiales

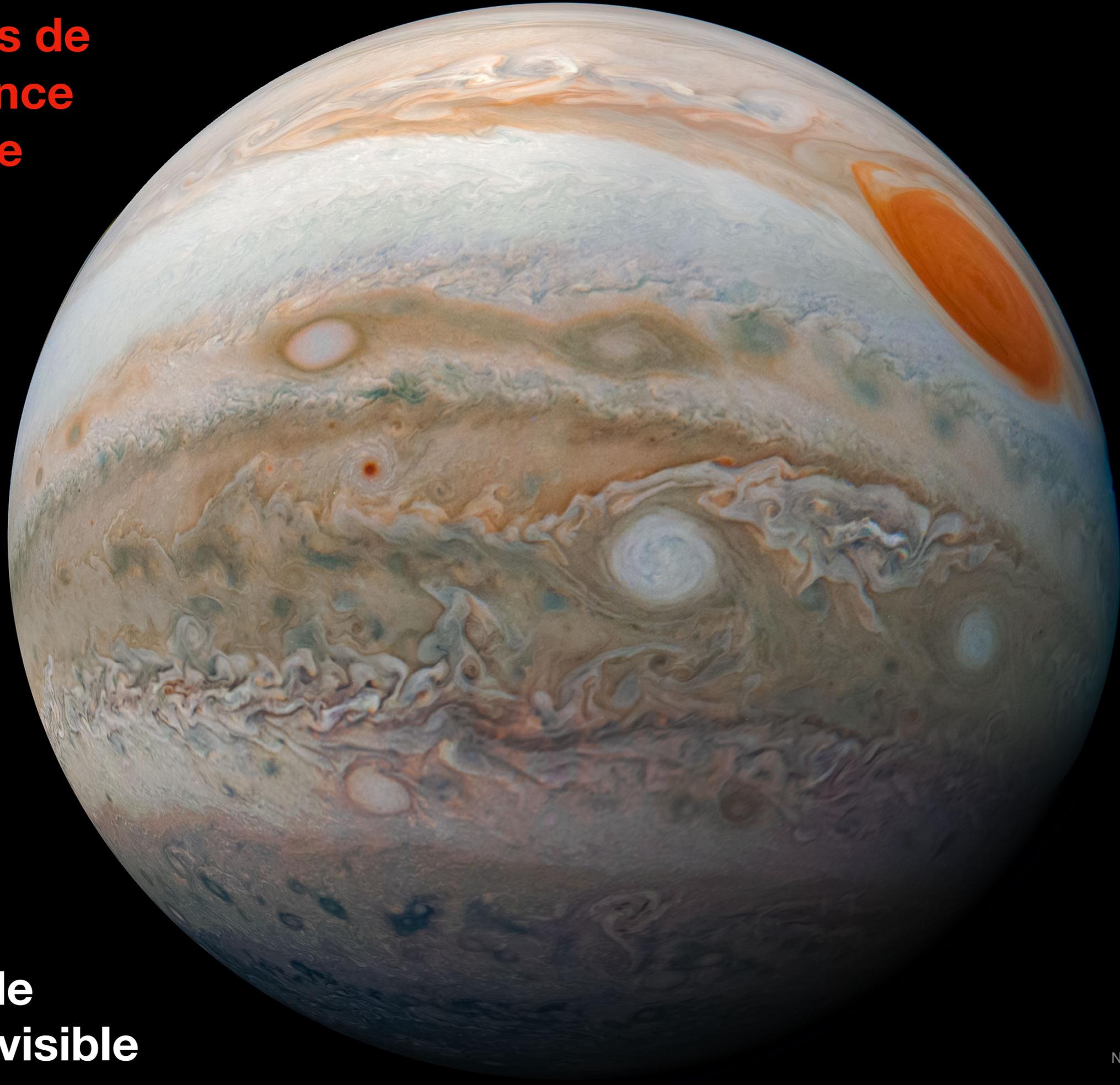
**1 ligne de base projetée
= 1 échantillon du plan de
Fourier (plan « u,v »)
= 1 visibilité**

**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**

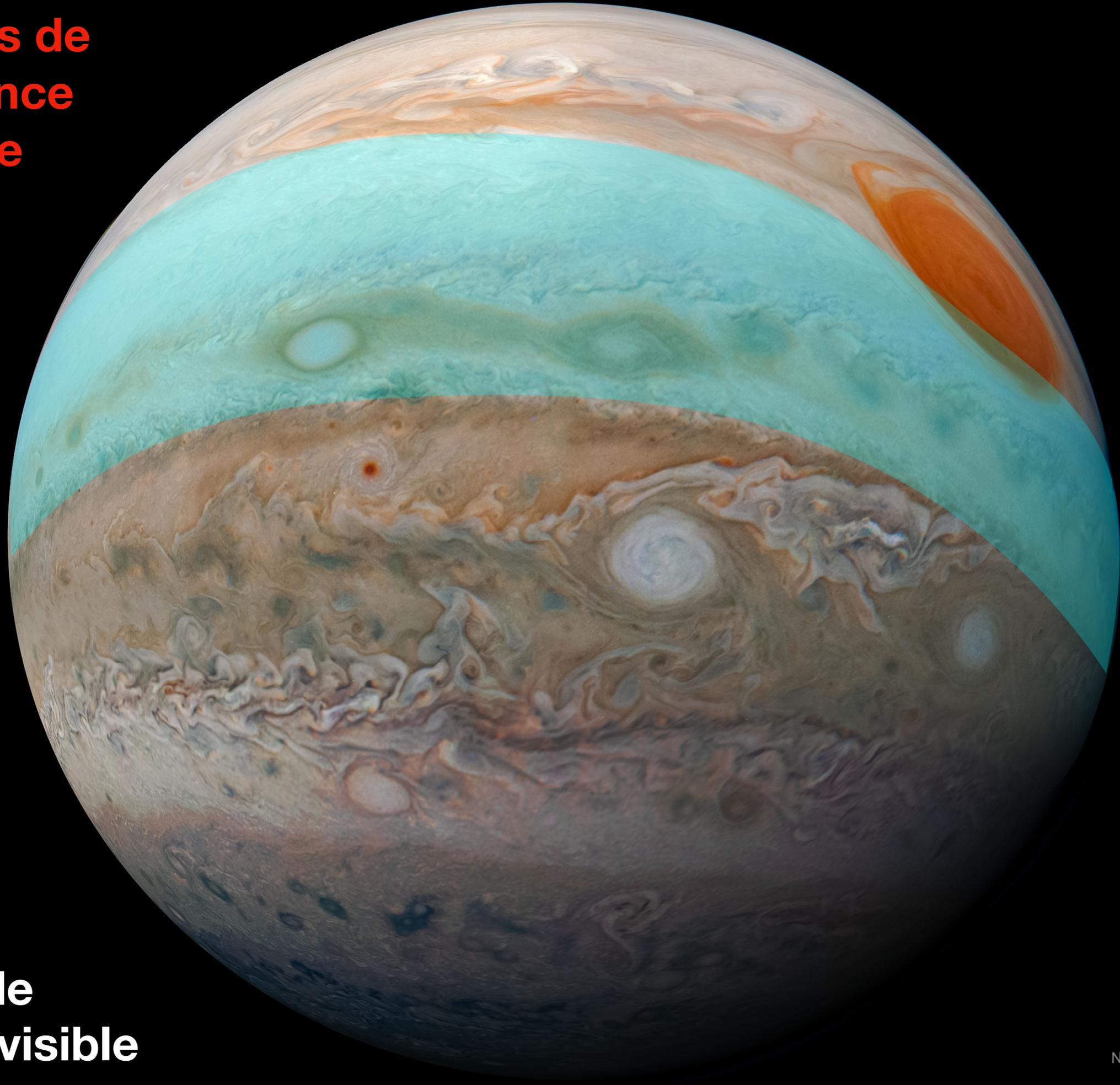
NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS
Processing: Kevin M. Gill

Notions de fréquence spatiale



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

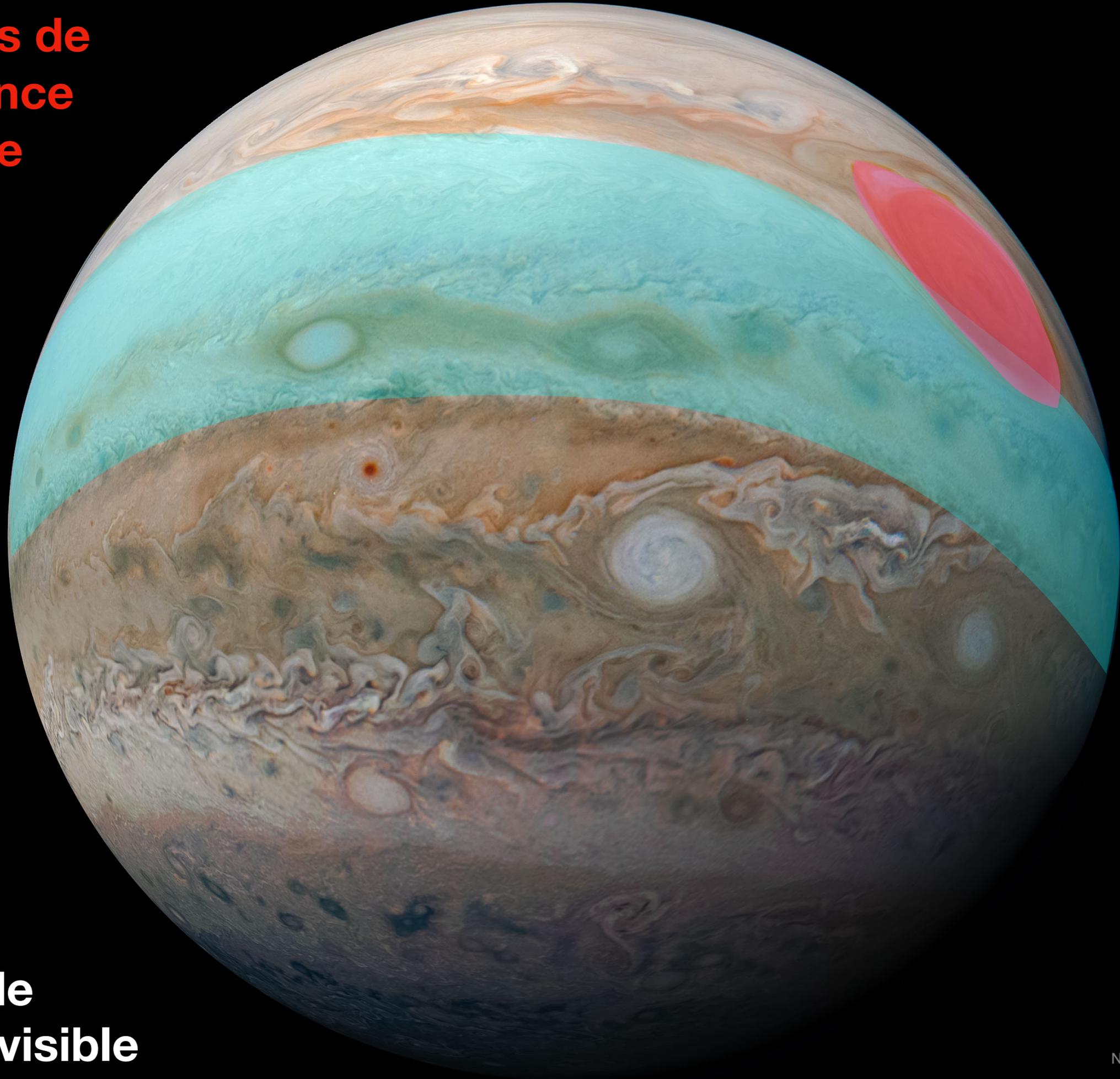
Notions de fréquence spatiale



**Exemple
Image visible**

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

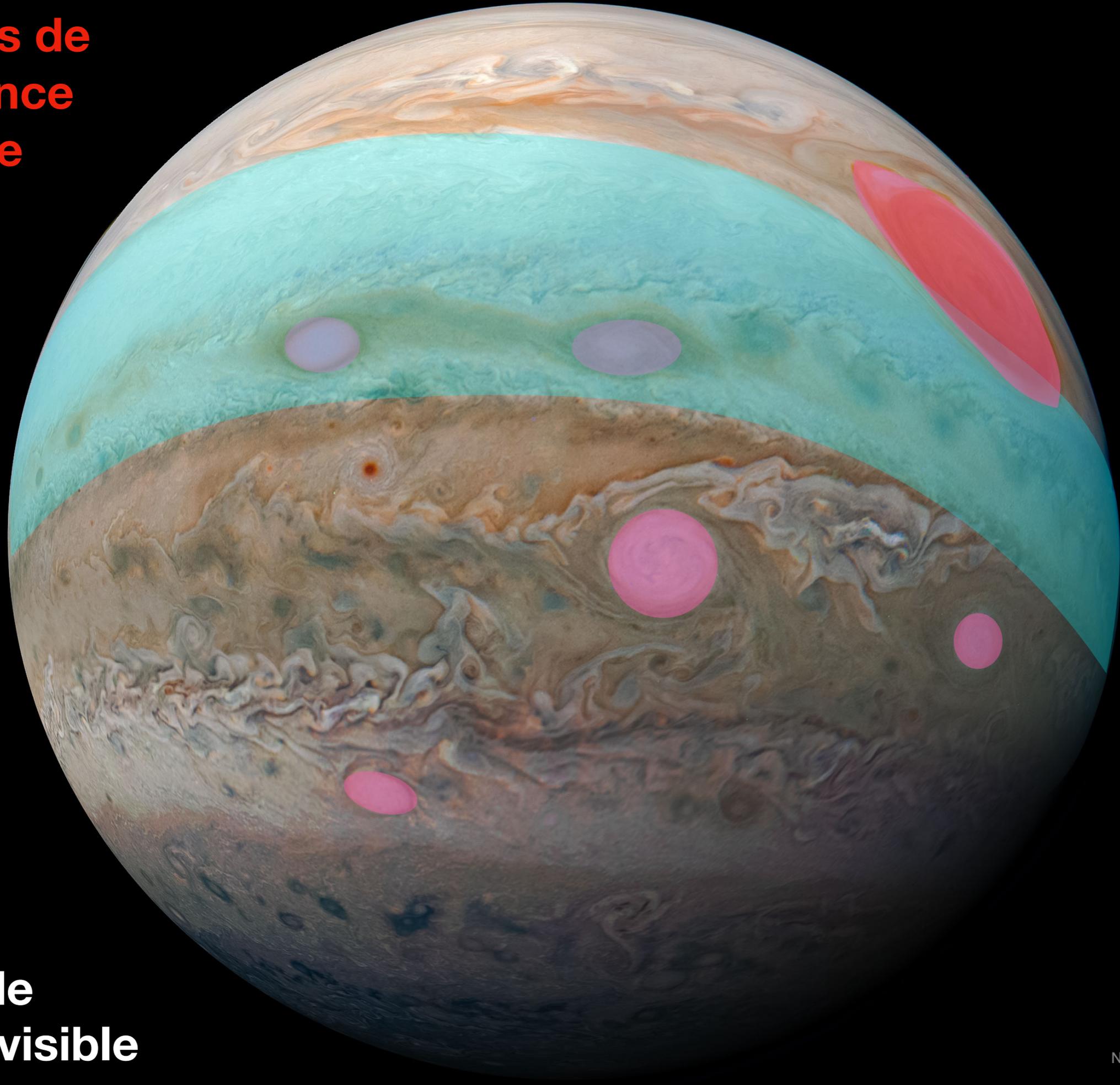
Notions de fréquence spatiale



**Exemple
Image visible**

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

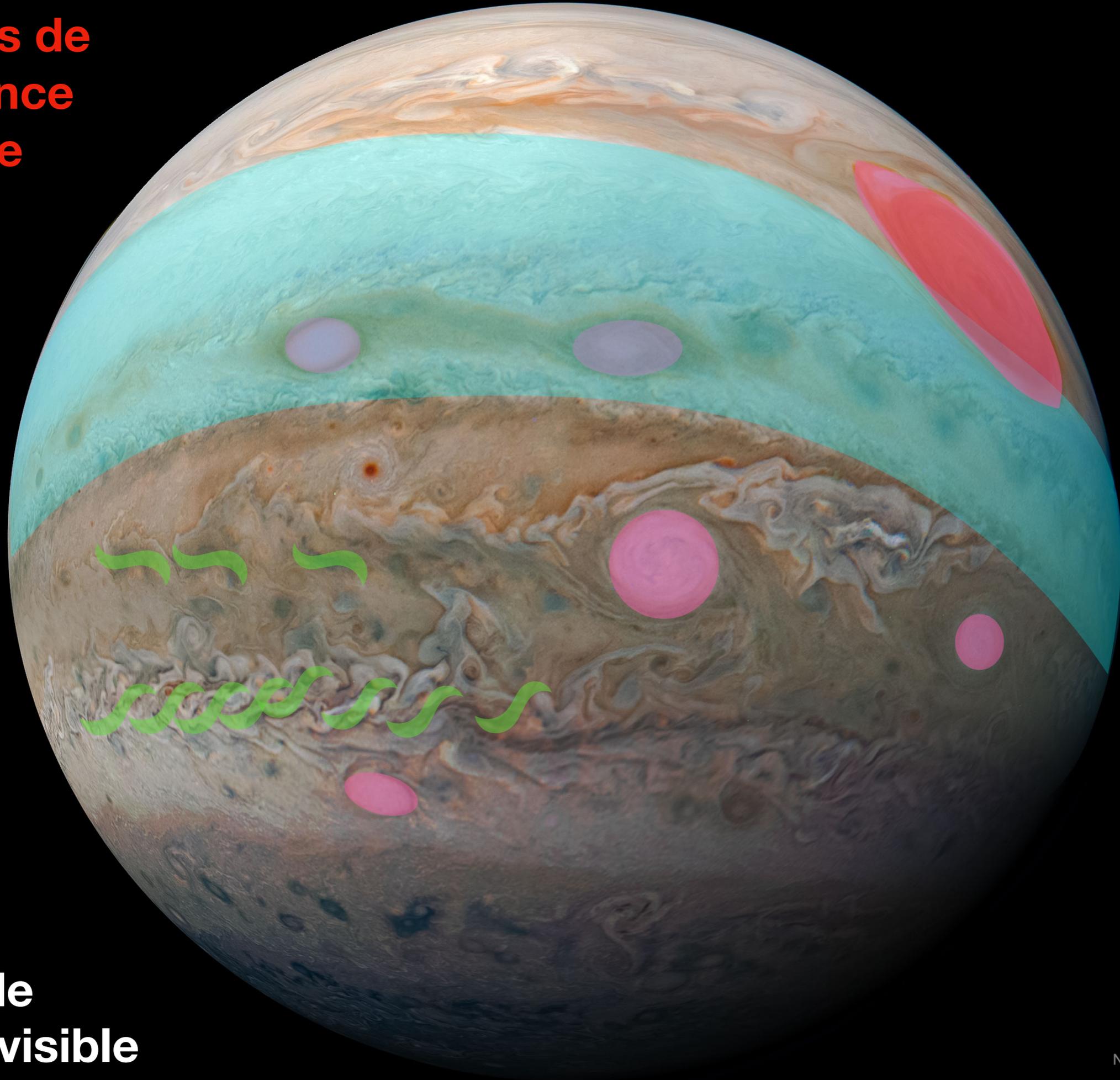
Notions de fréquence spatiale



**Exemple
Image visible**

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

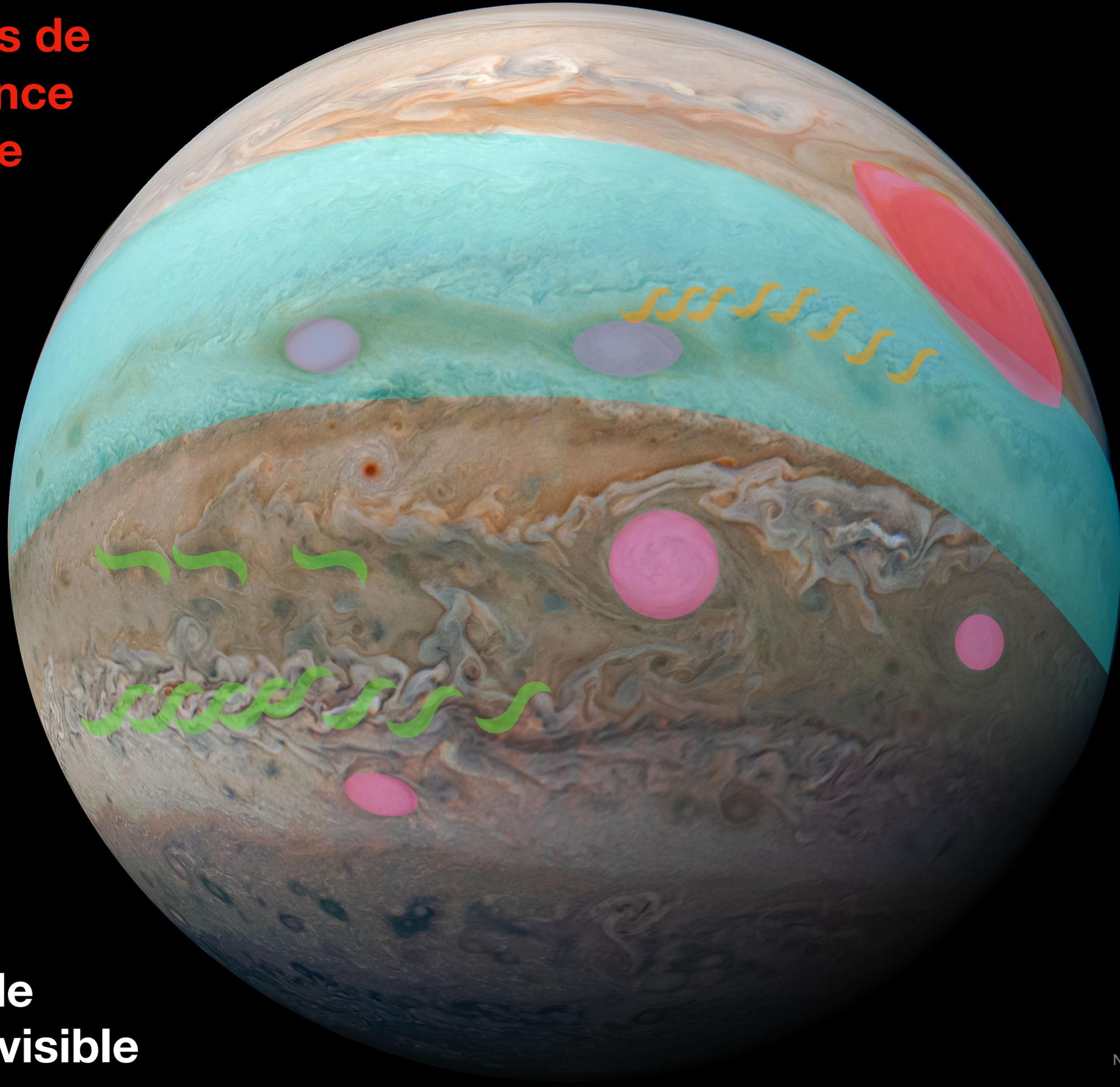
Notions de fréquence spatiale



**Exemple
Image visible**

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

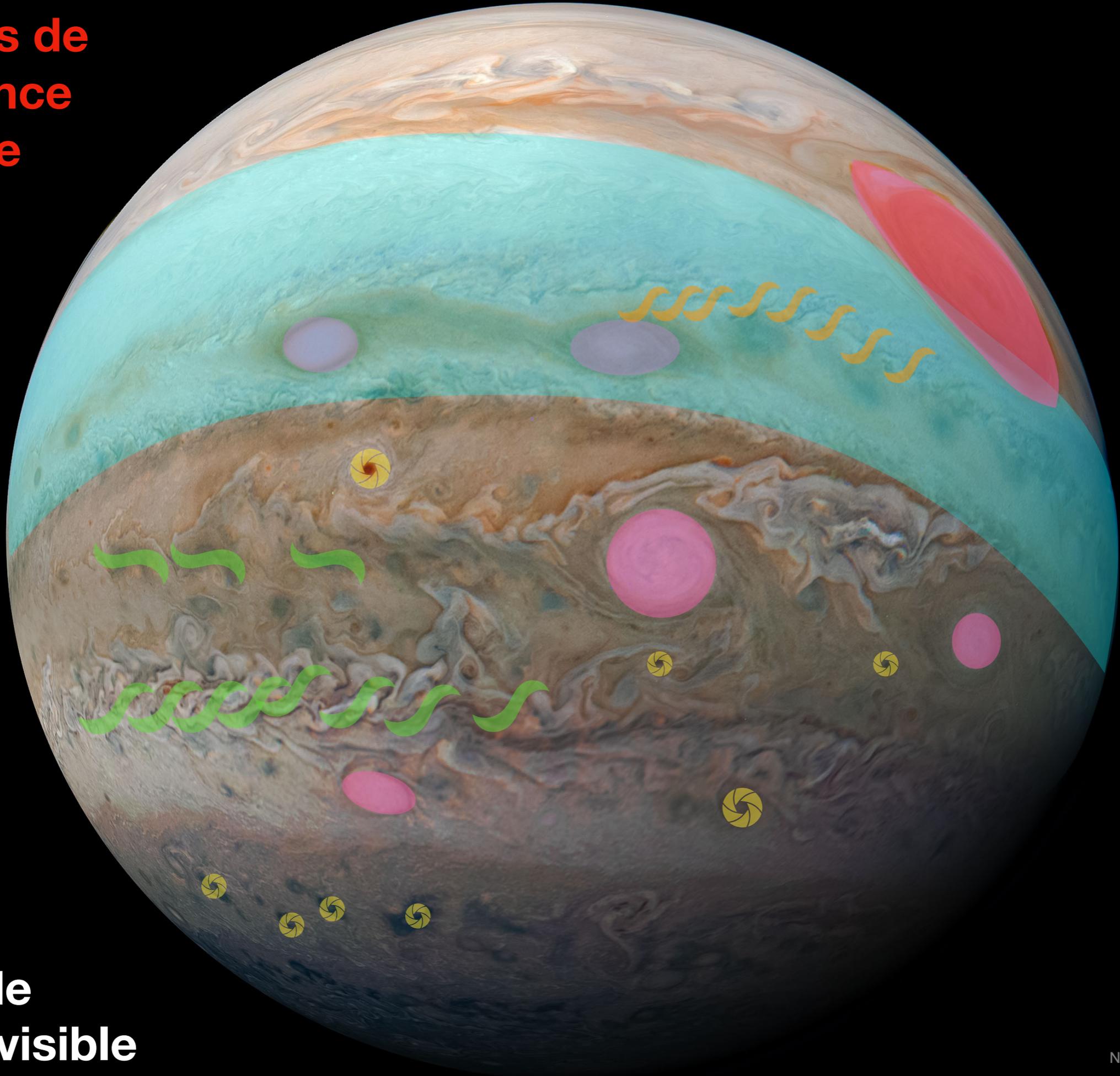
Notions de fréquence spatiale



**Exemple
Image visible**

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

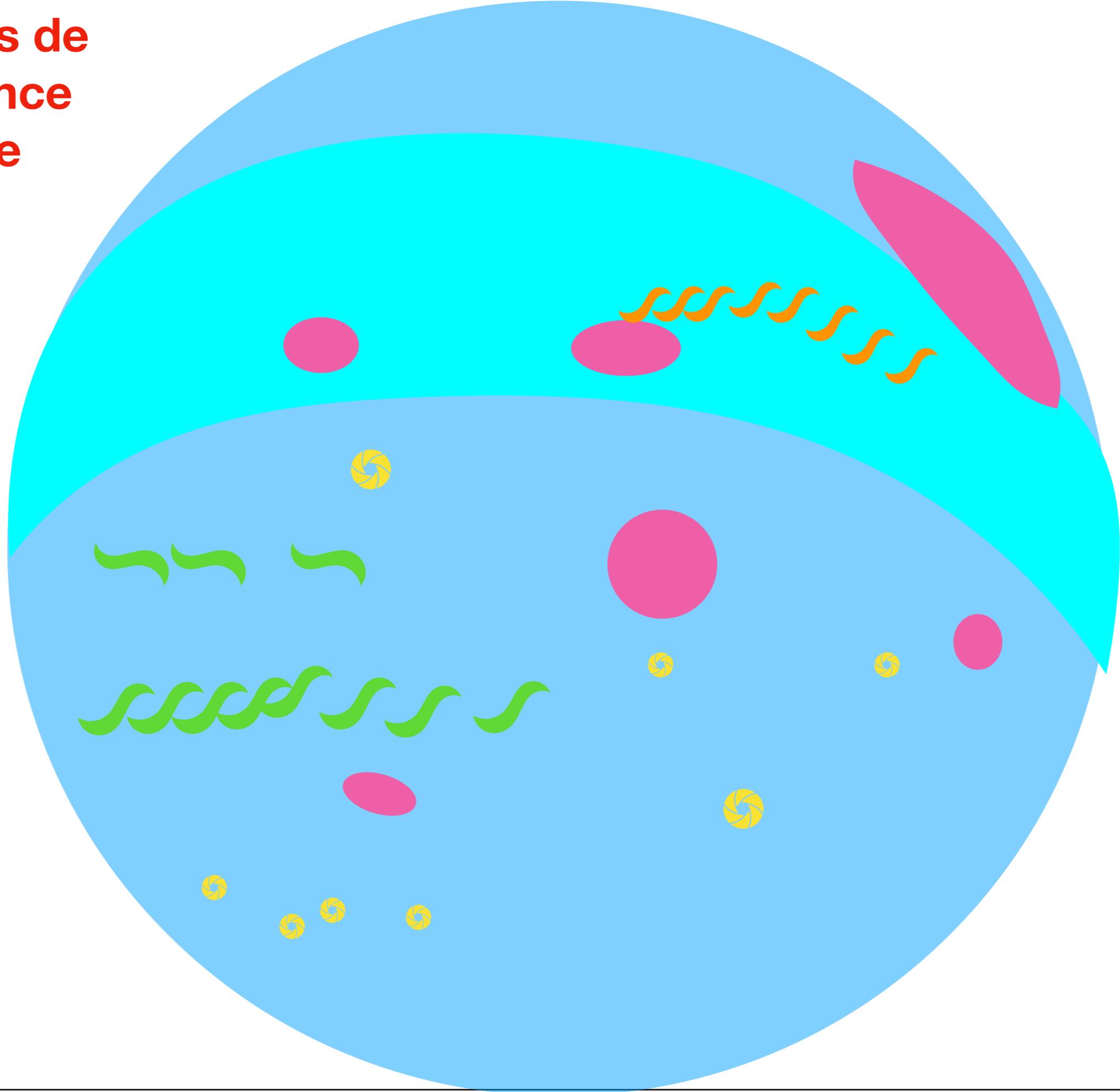
Notions de fréquence spatiale



**Exemple
Image visible**

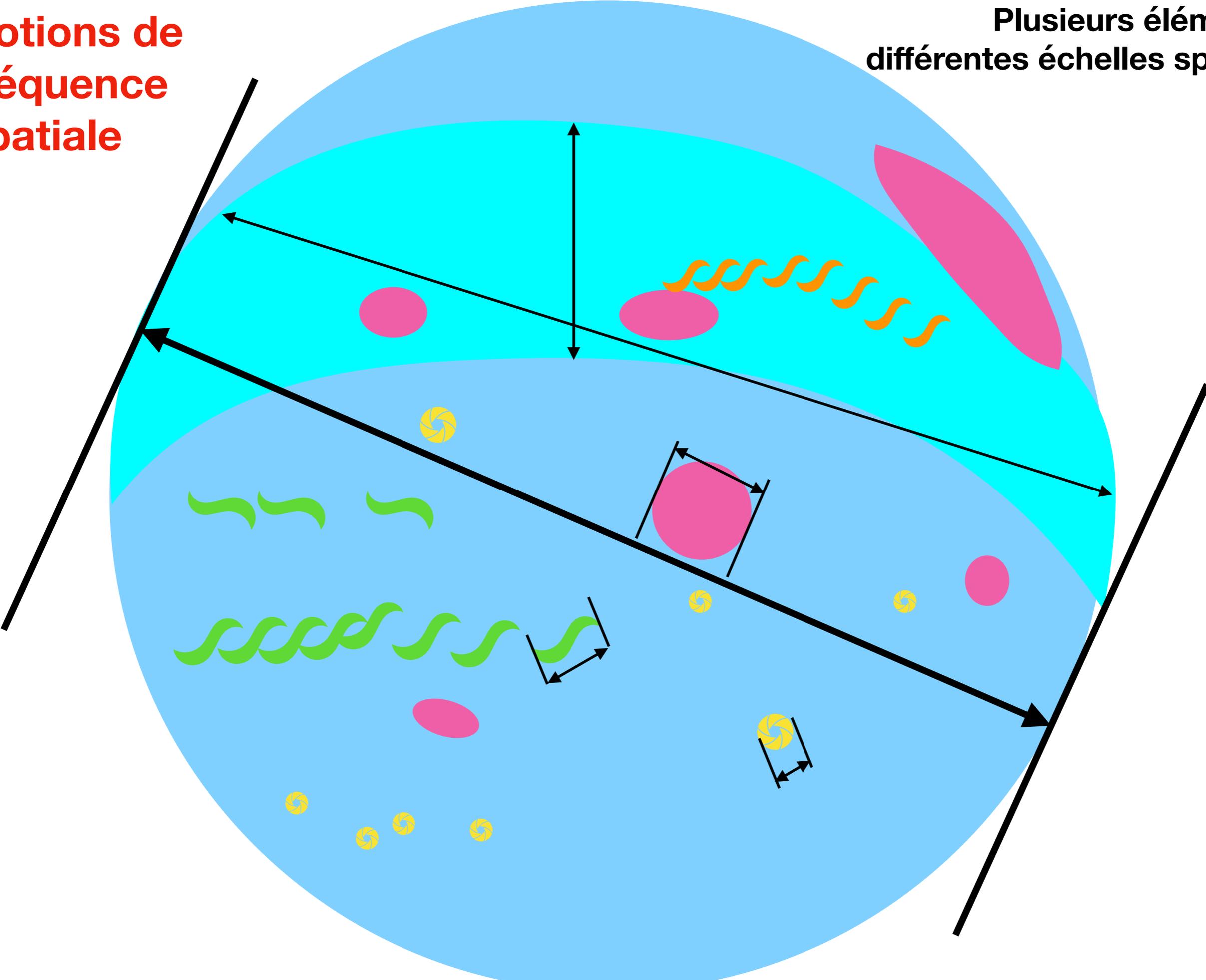
NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS
Processing: Kevin M. Gill

Notions de fréquence spatiale

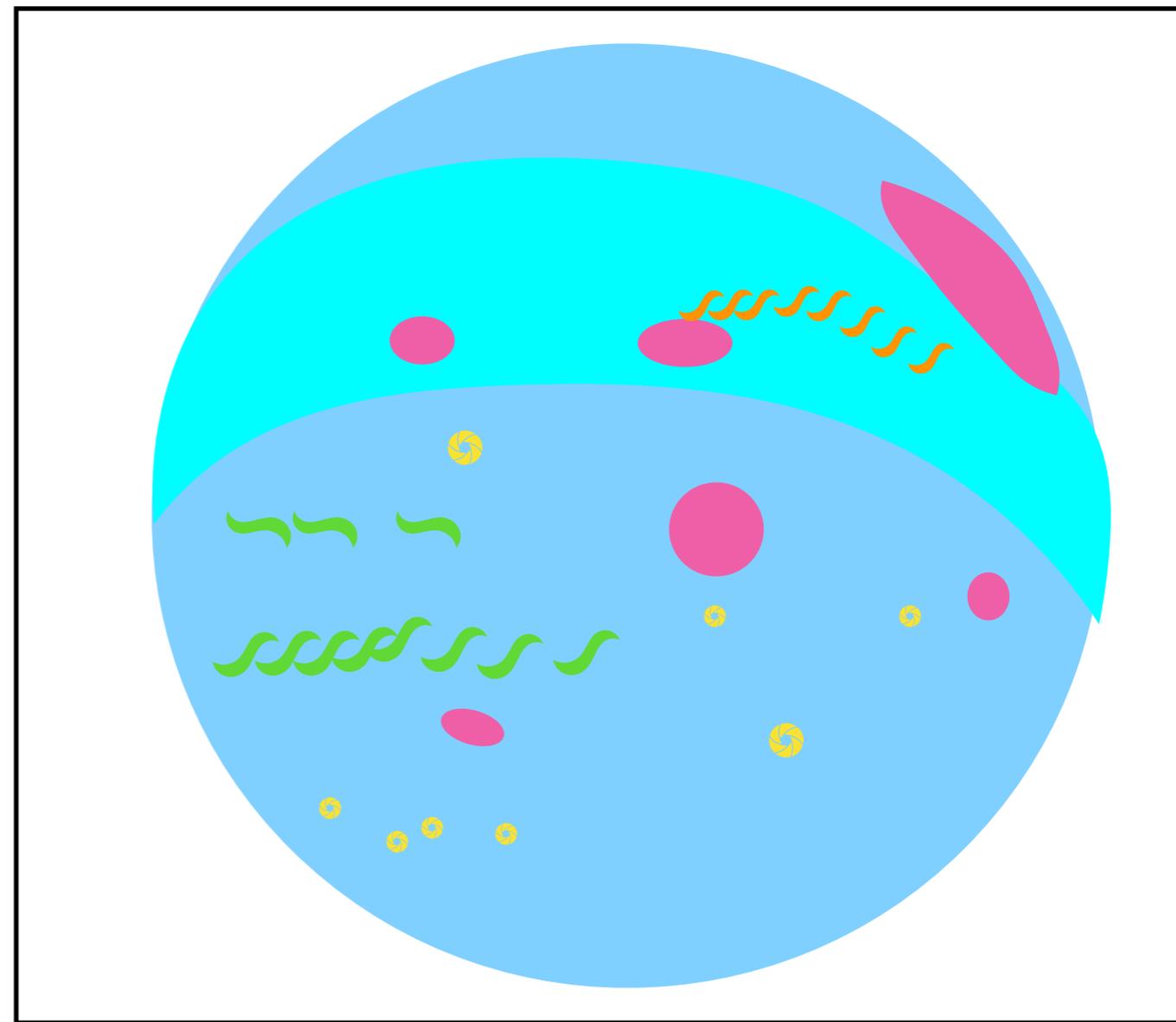


**Notions de
fréquence
spatiale**

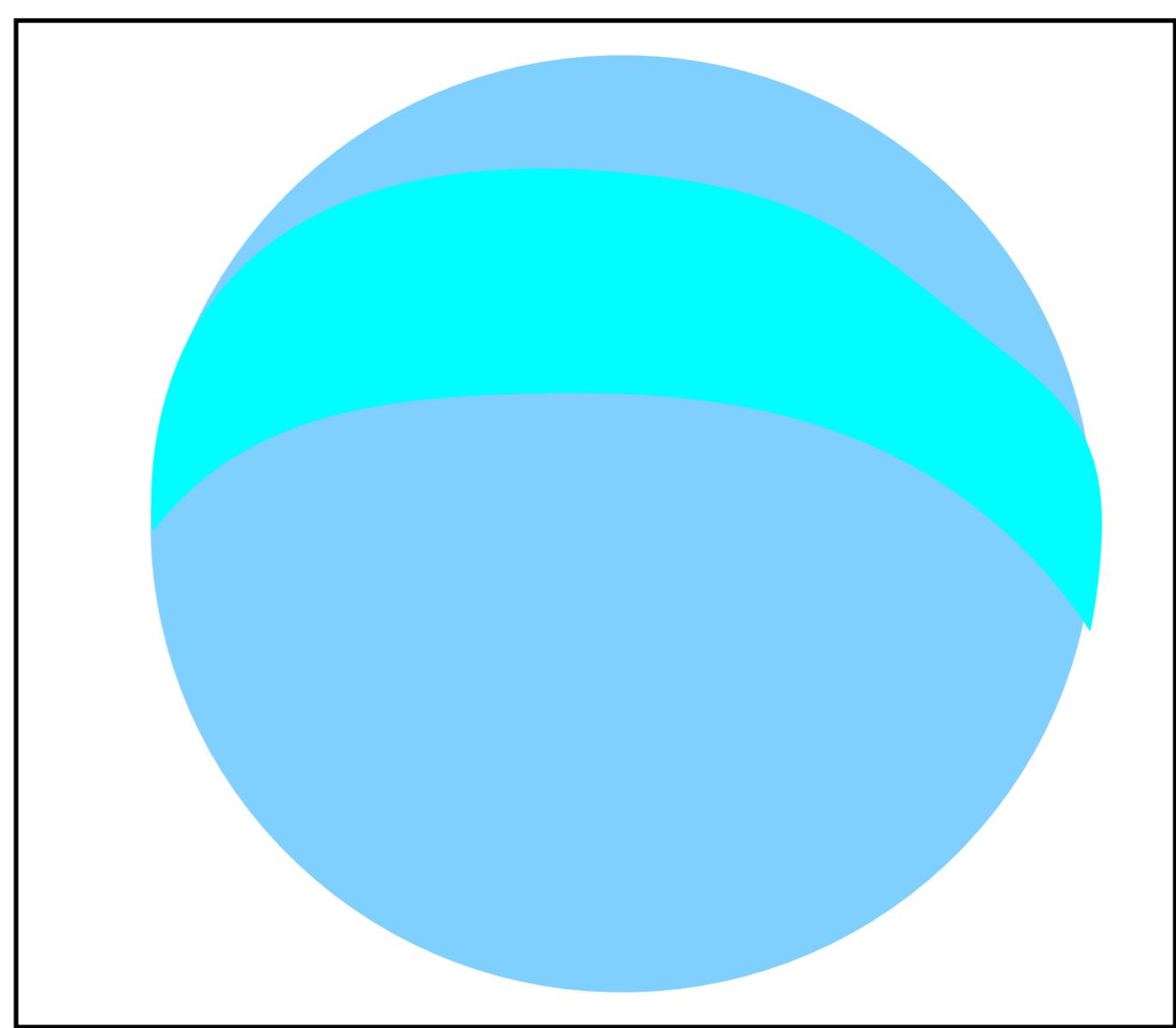
**Plusieurs éléments à
différentes échelles spatiales**



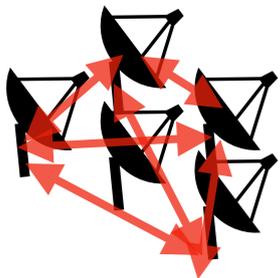
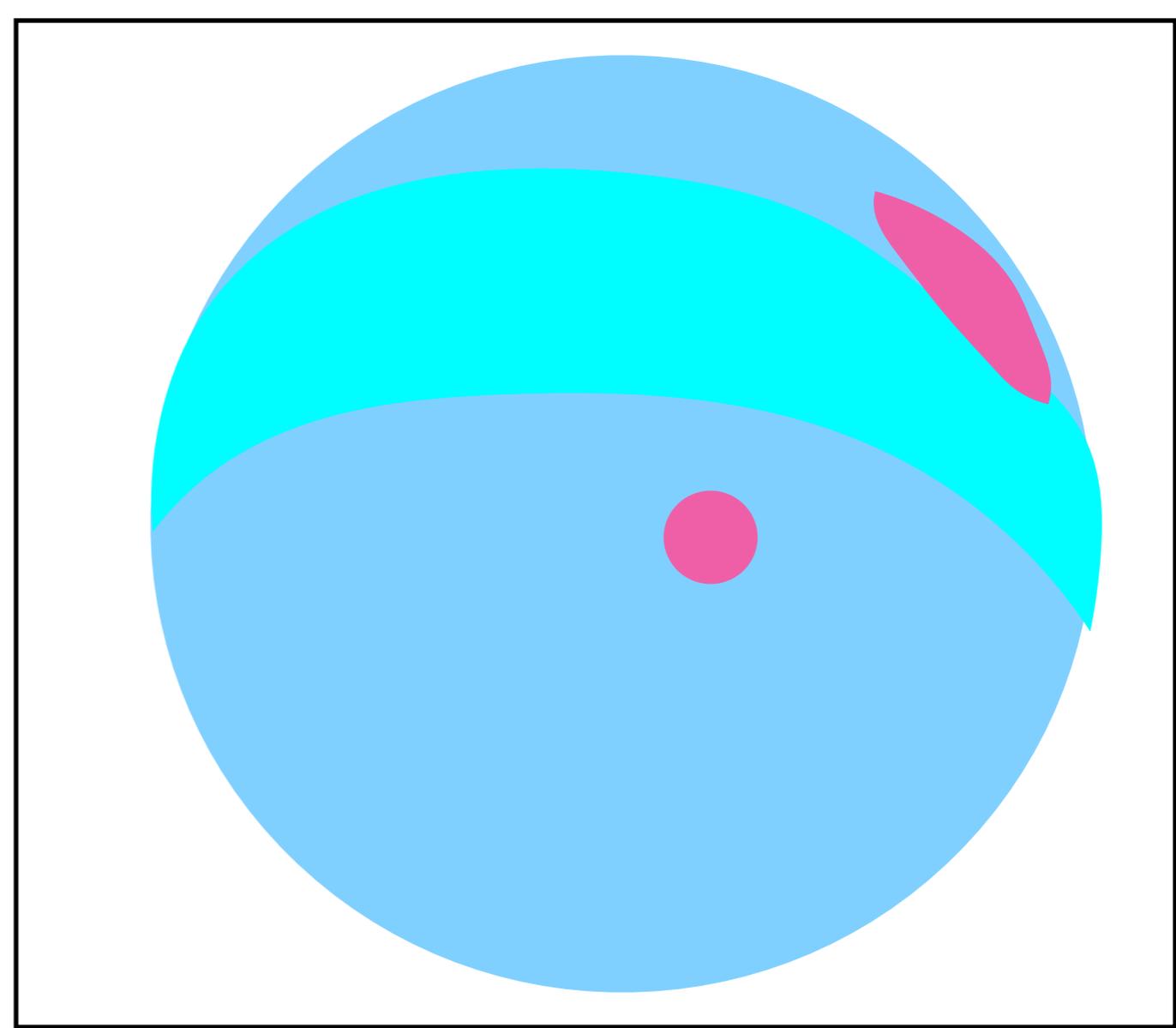
Mesure par interférométrie



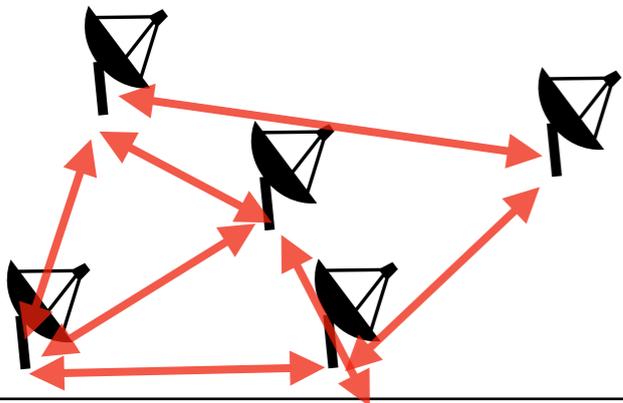
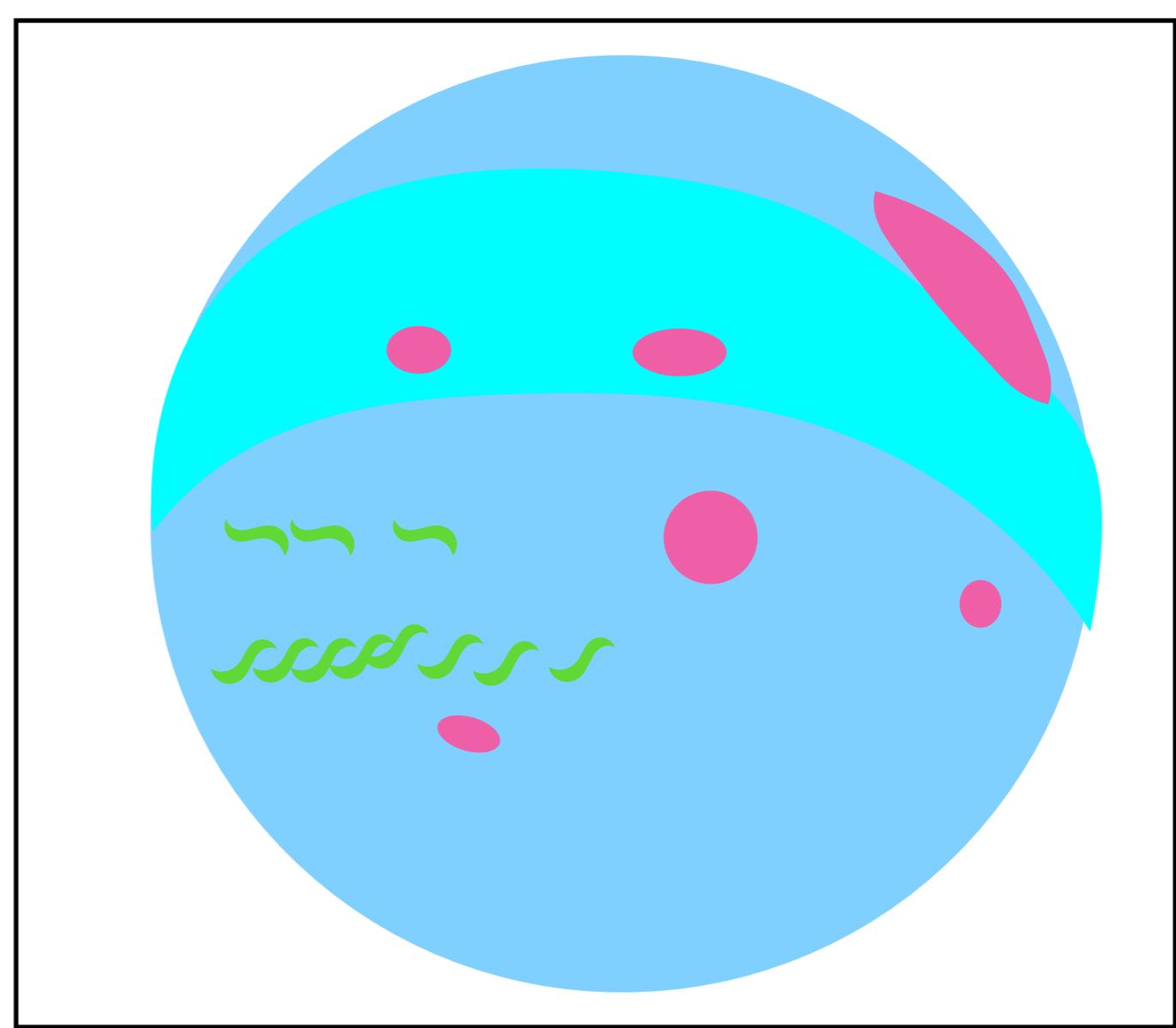
Mesure par interférométrie



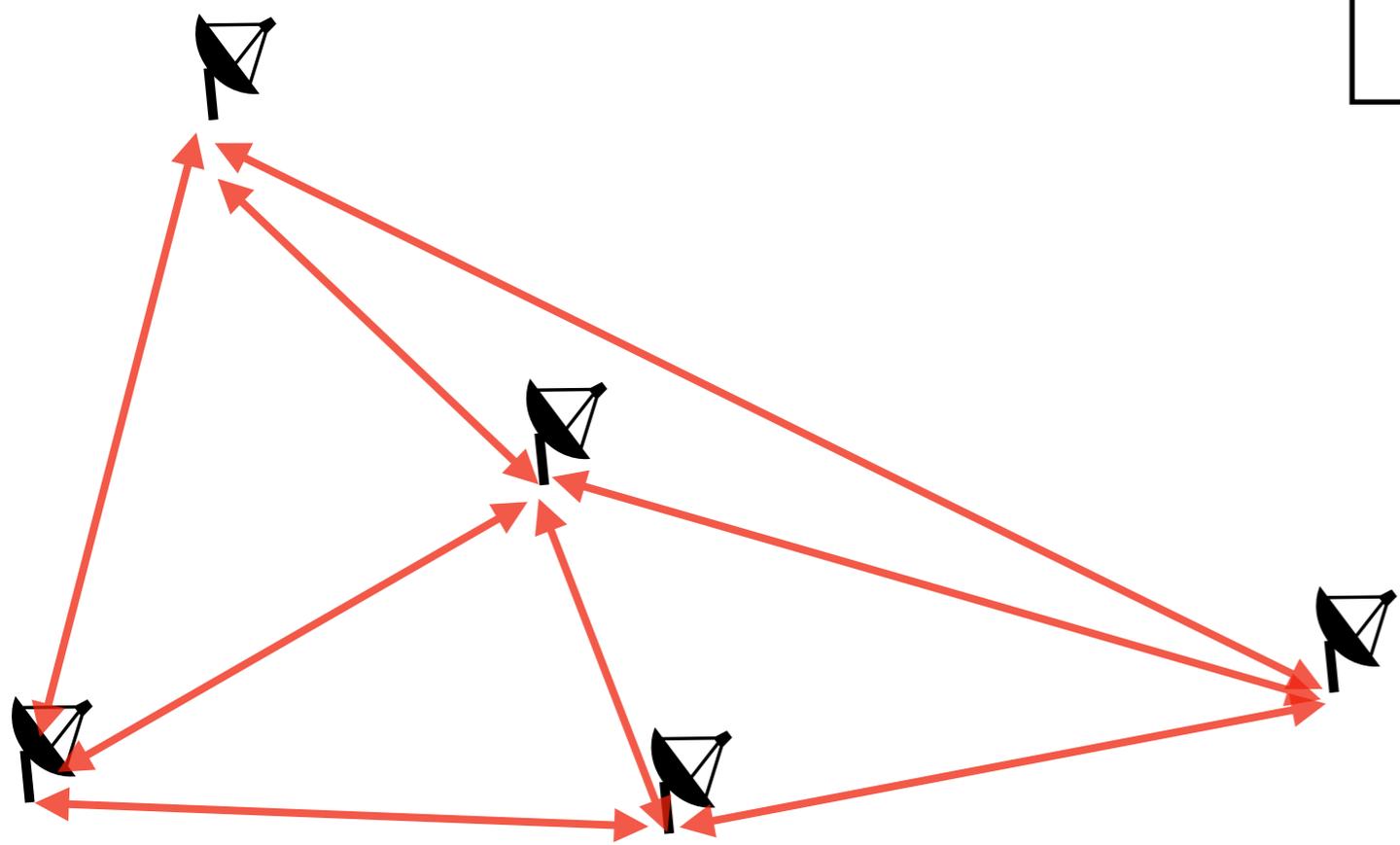
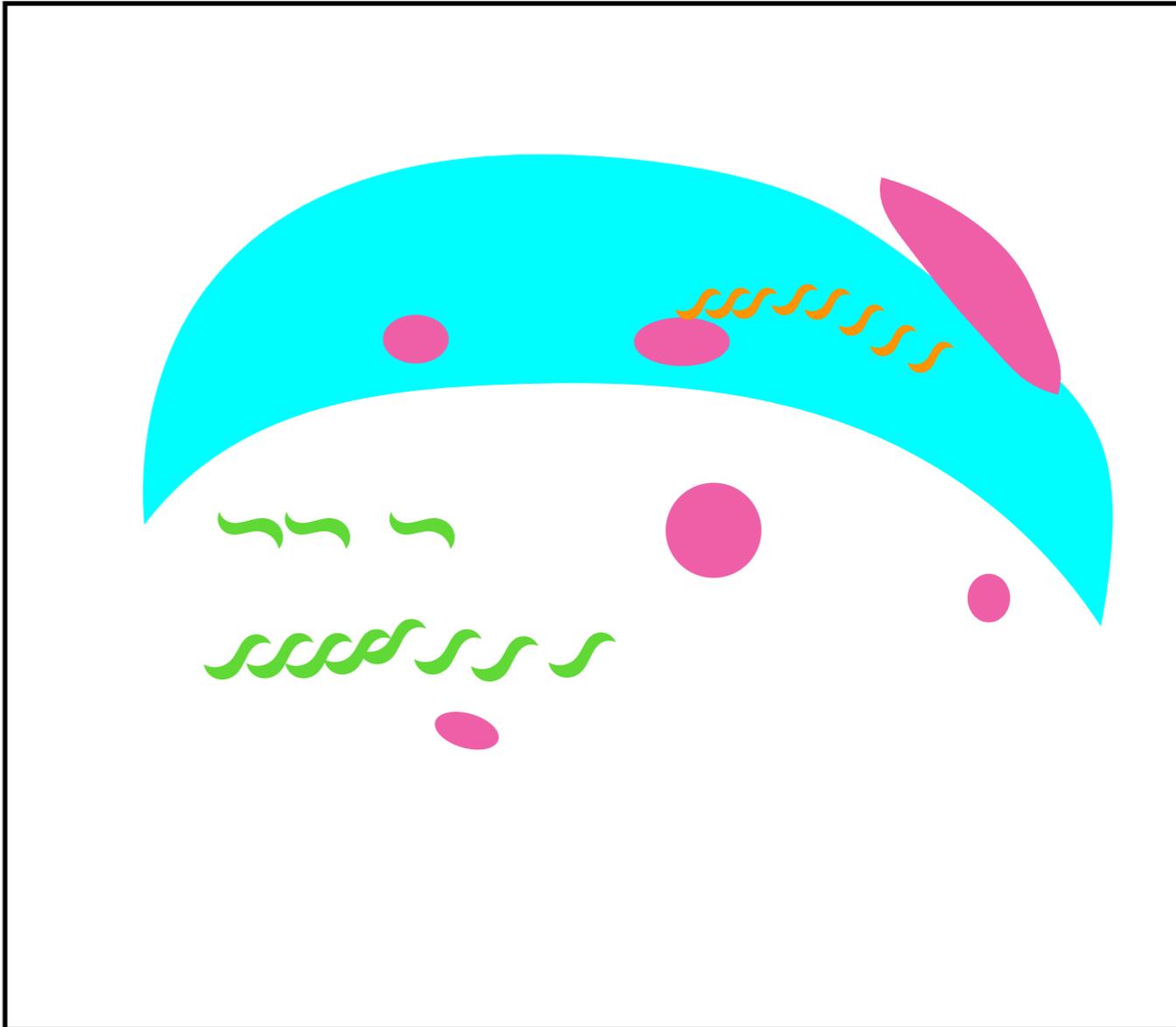
Mesure par interférométrie



Mesure par interférométrie

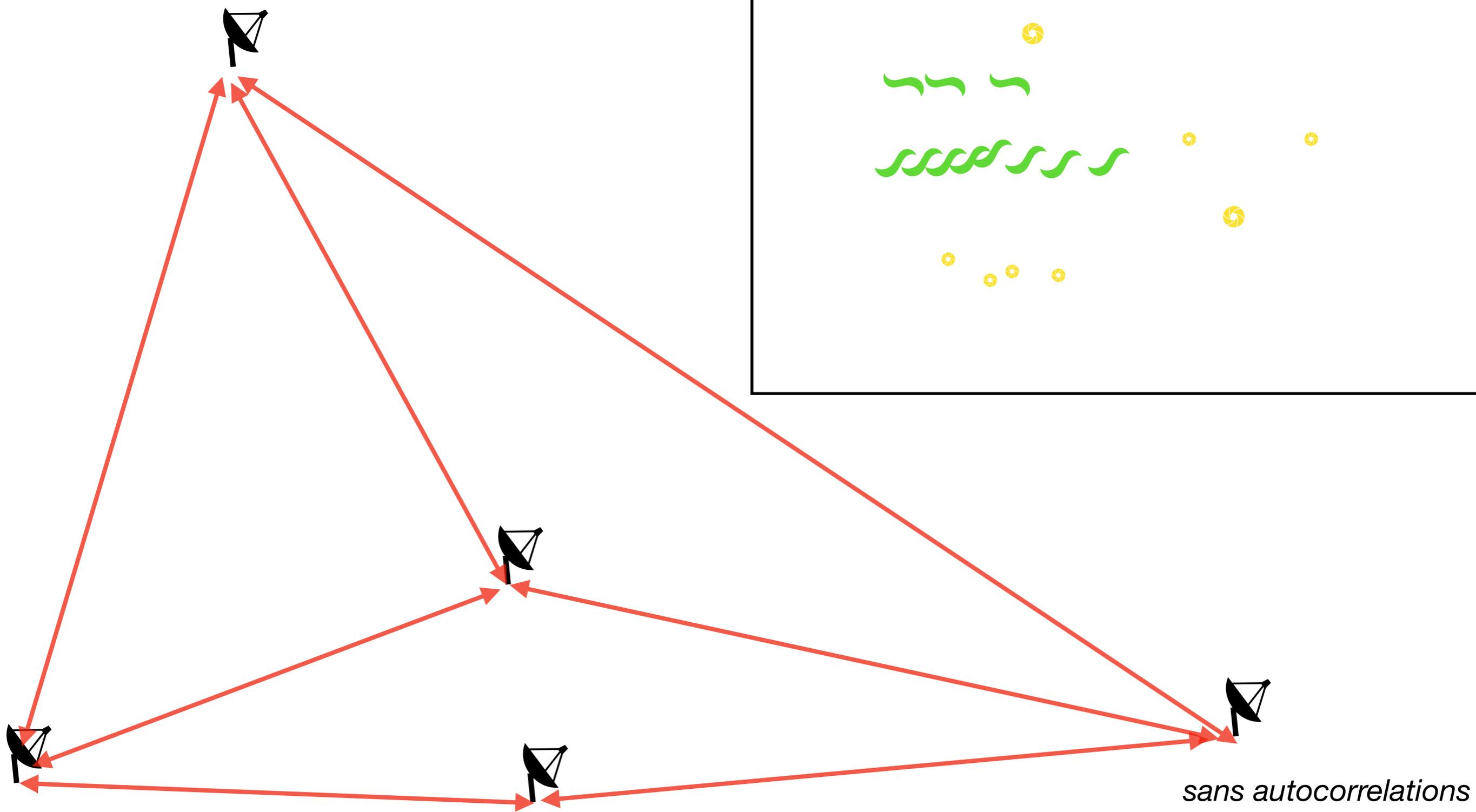


Mesure par interférométrie



sans autocorrelations

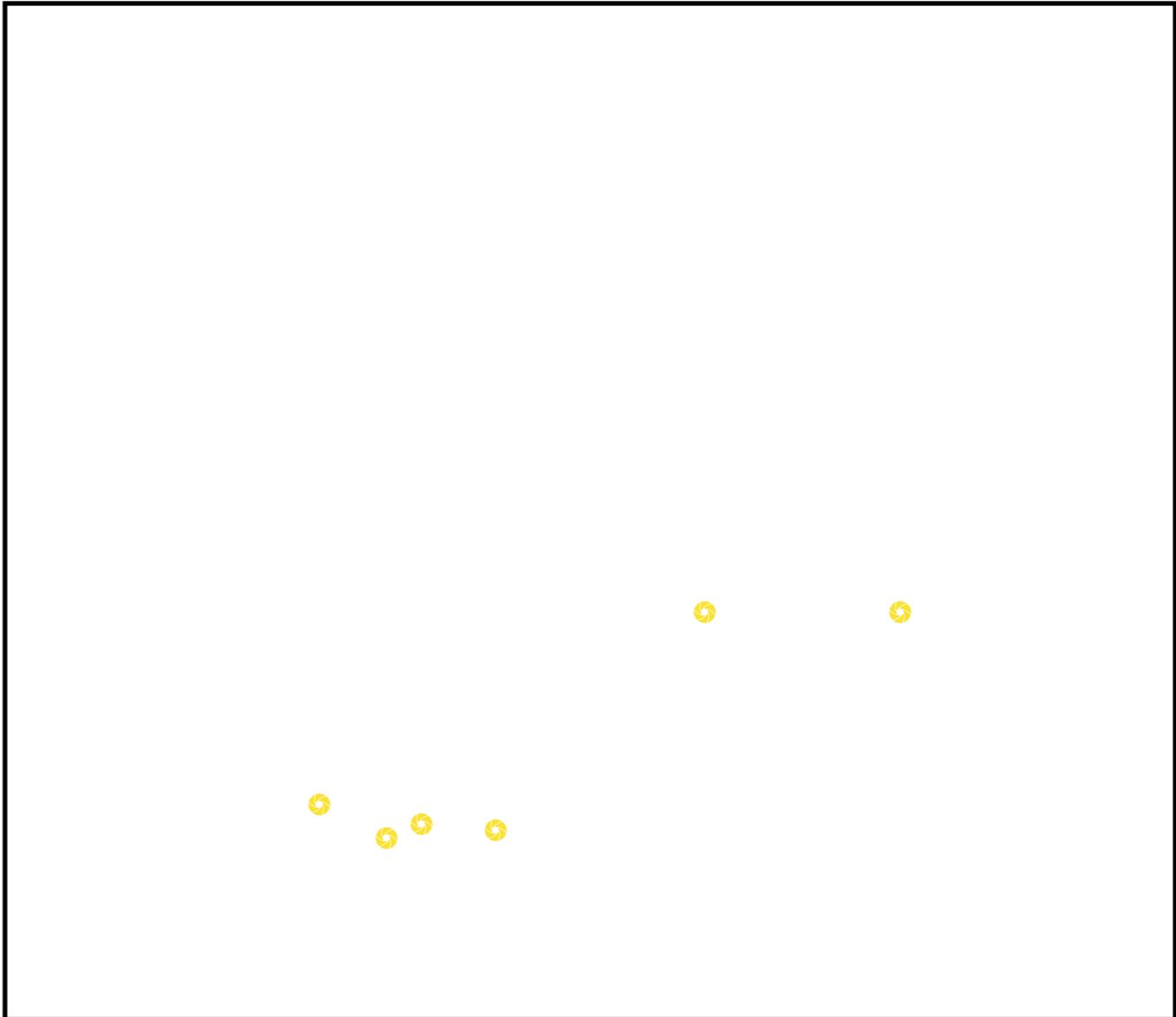
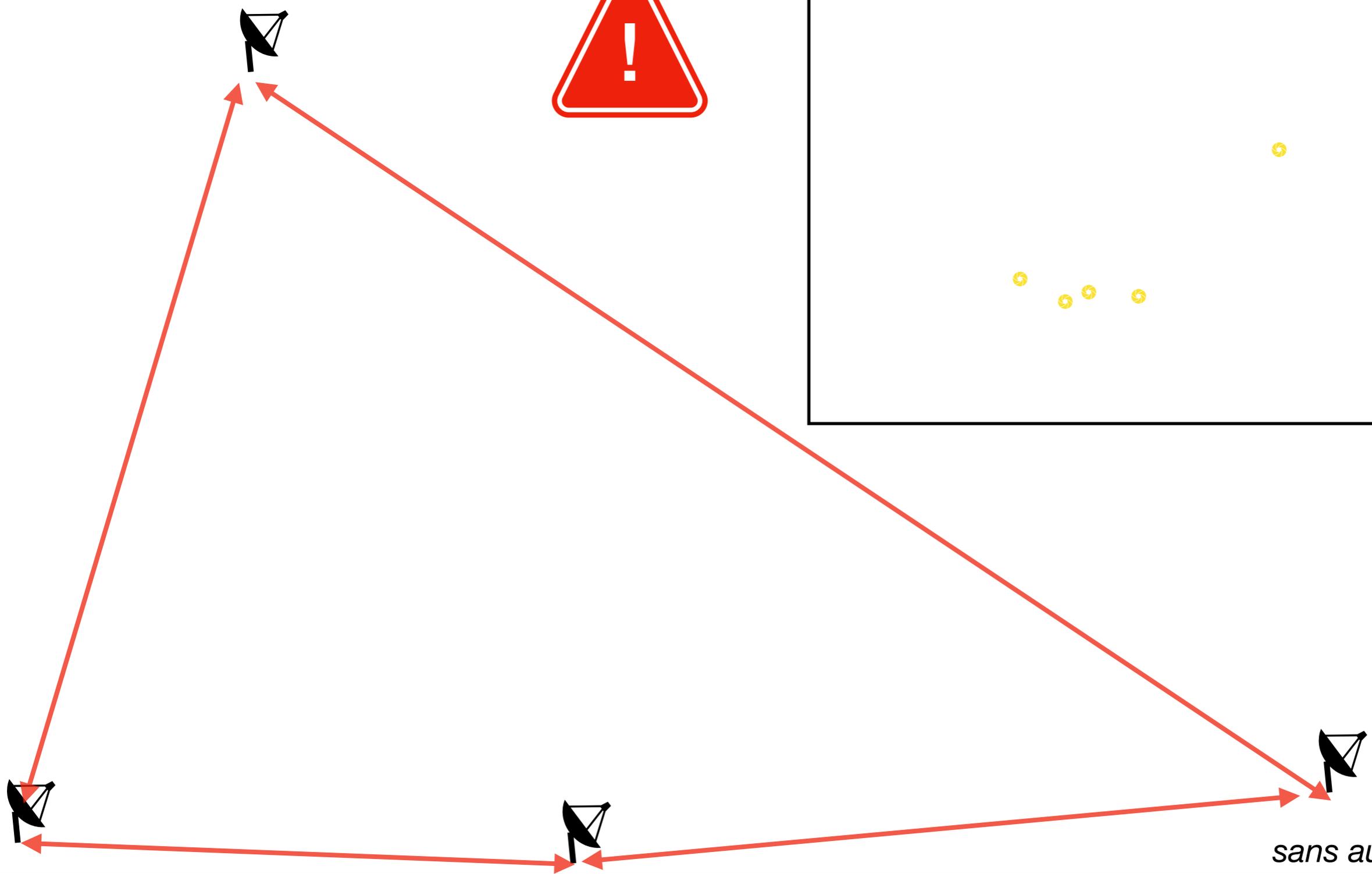
Mesure par interférométrie



sans autocorrelations

Mesure par interférométrie

VLBI Very Long
Baseline
Interferometry



sans autocorrelations

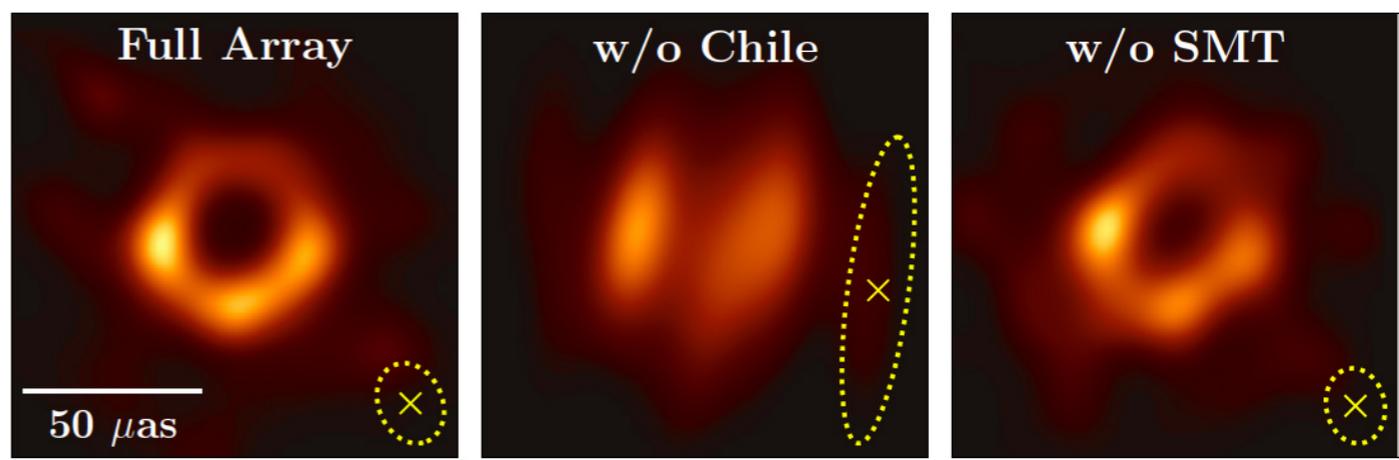
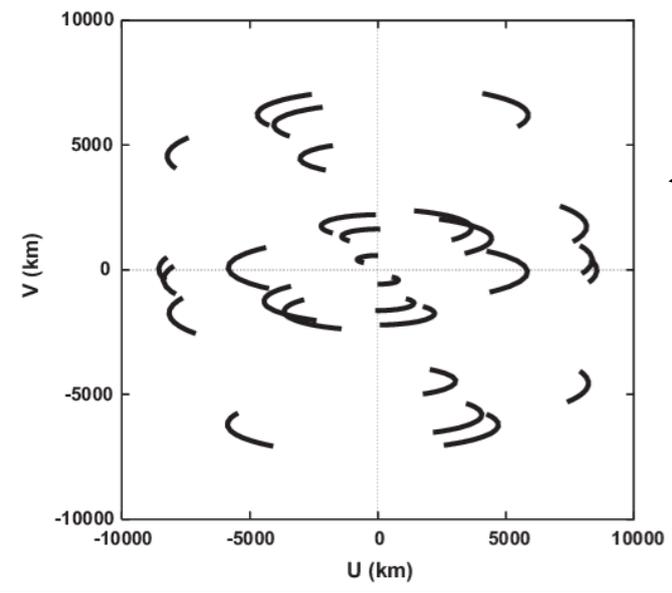
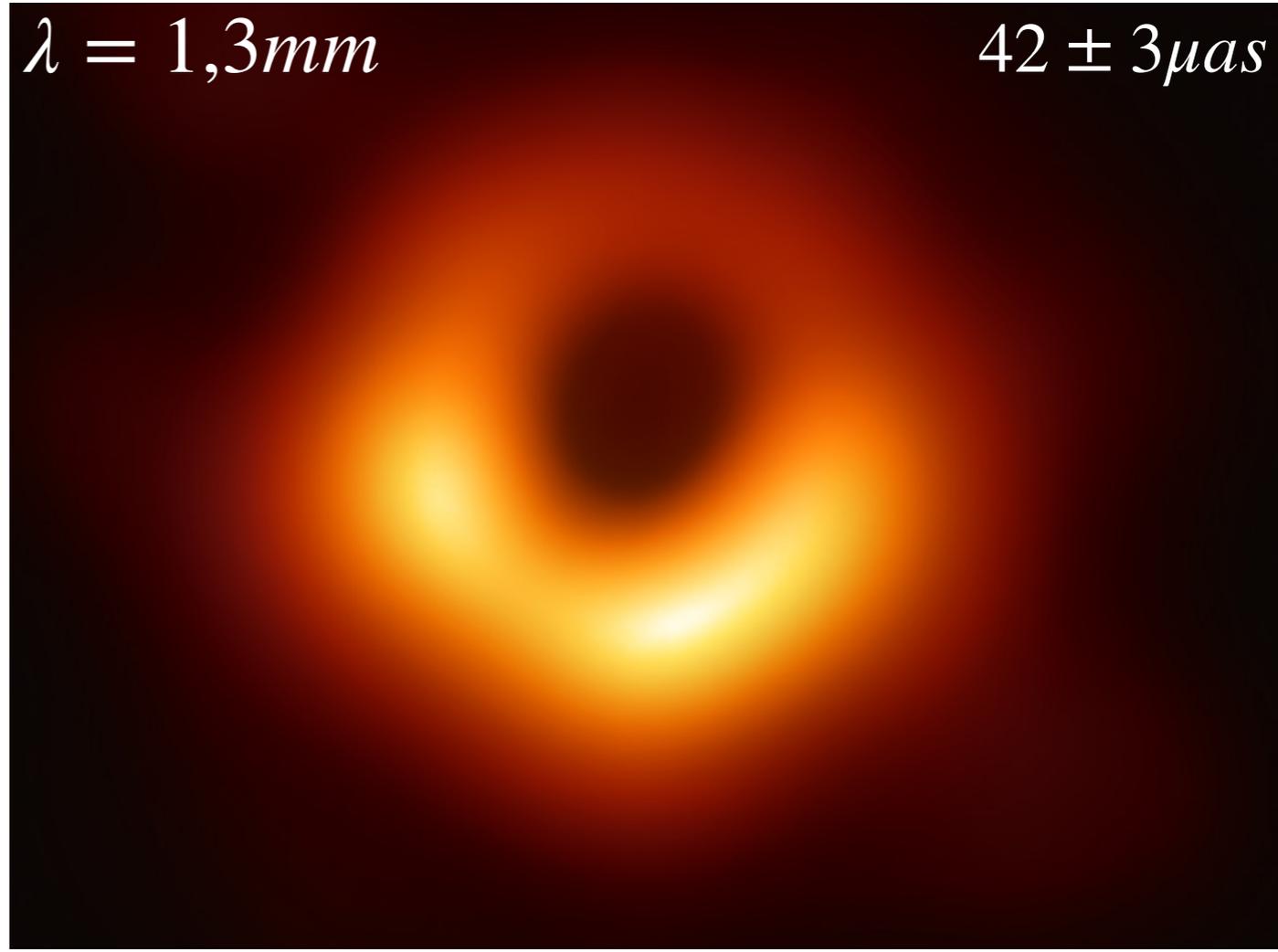
Mesure par interférométrie

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)

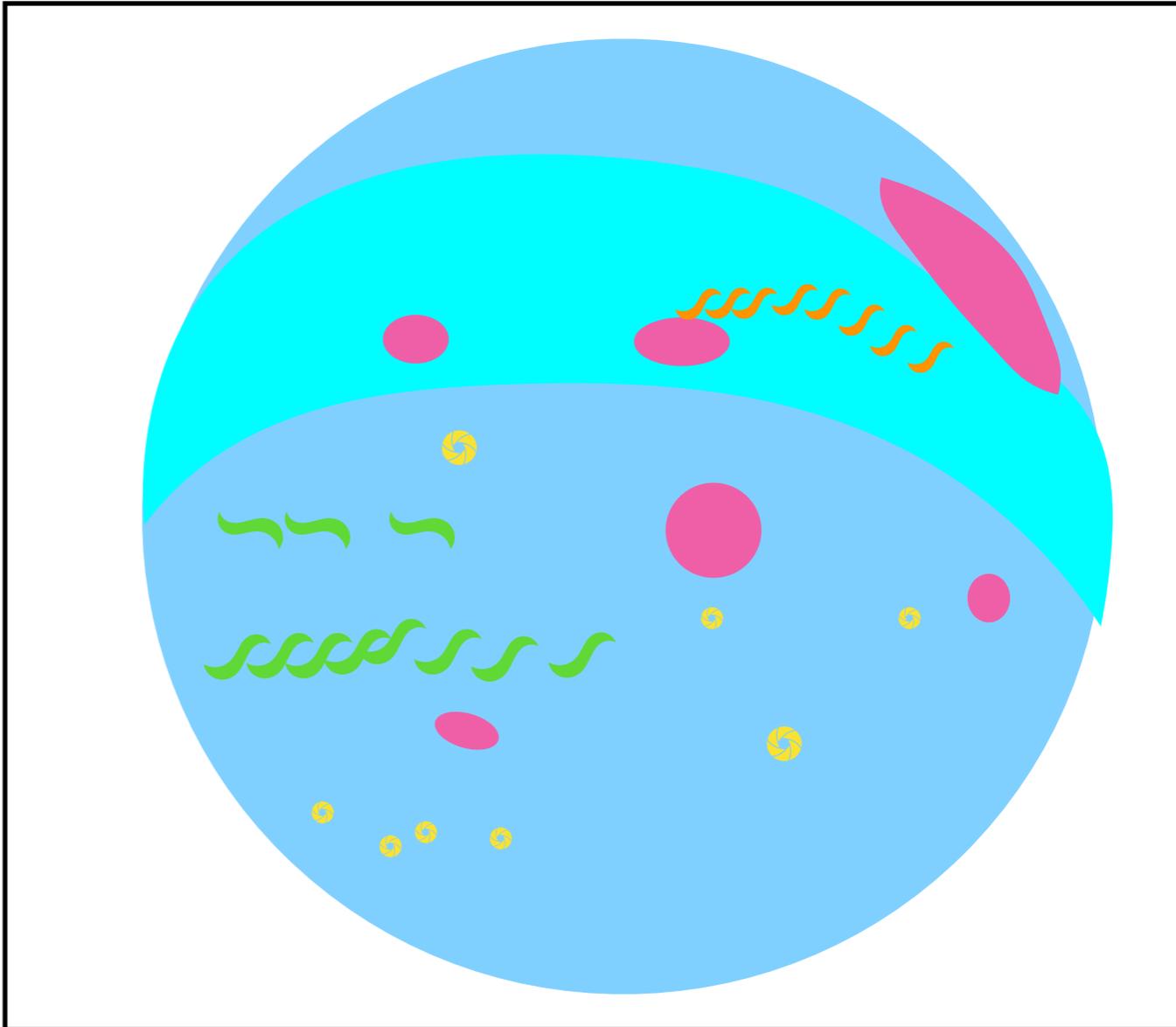
The Event Horizon Telescope Collaboration *et al* 2019 *ApJL* **875** L1

Mesure par interférométrie



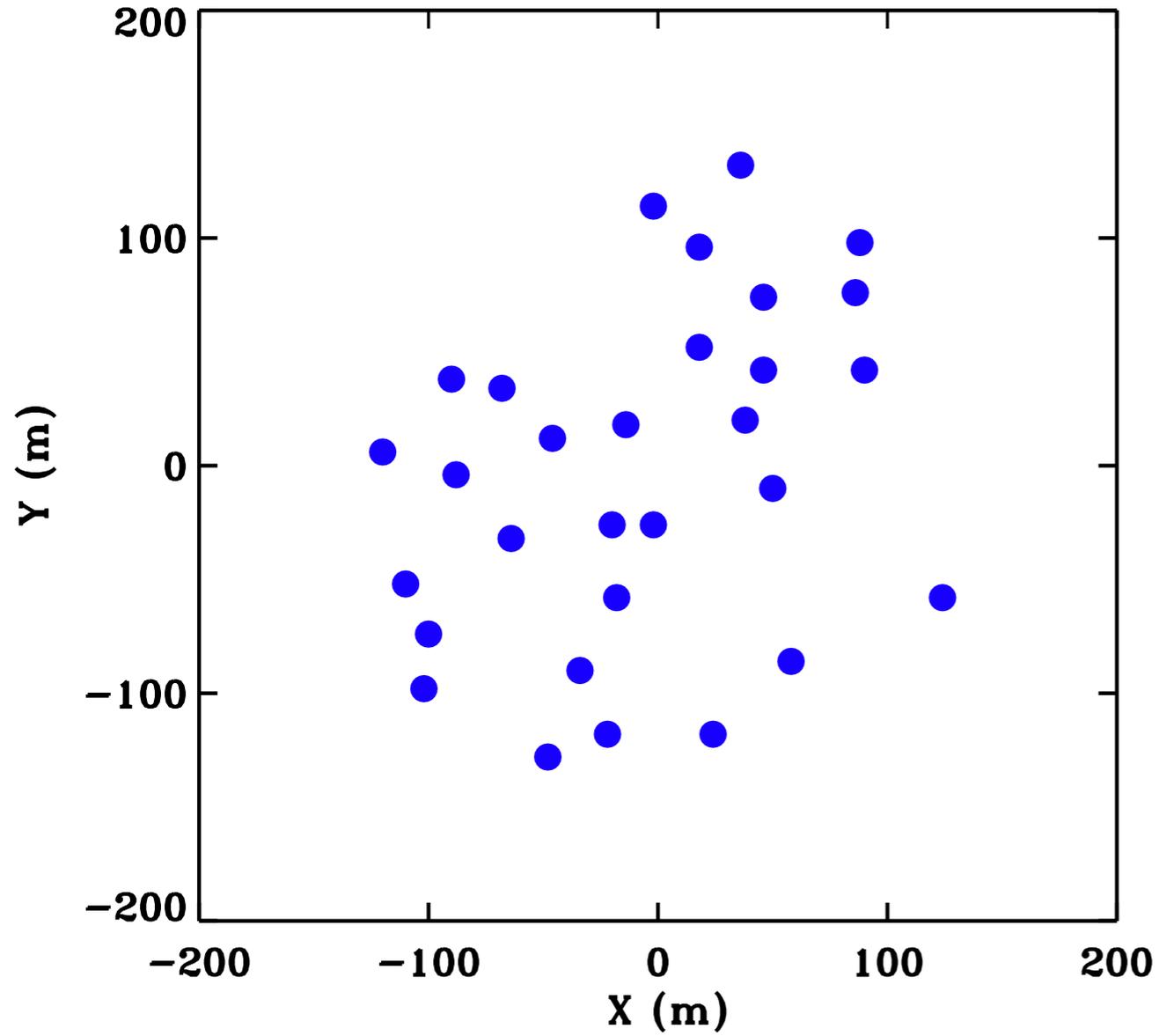
Interféromètre avec une bonne **diversité** de lignes de base

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

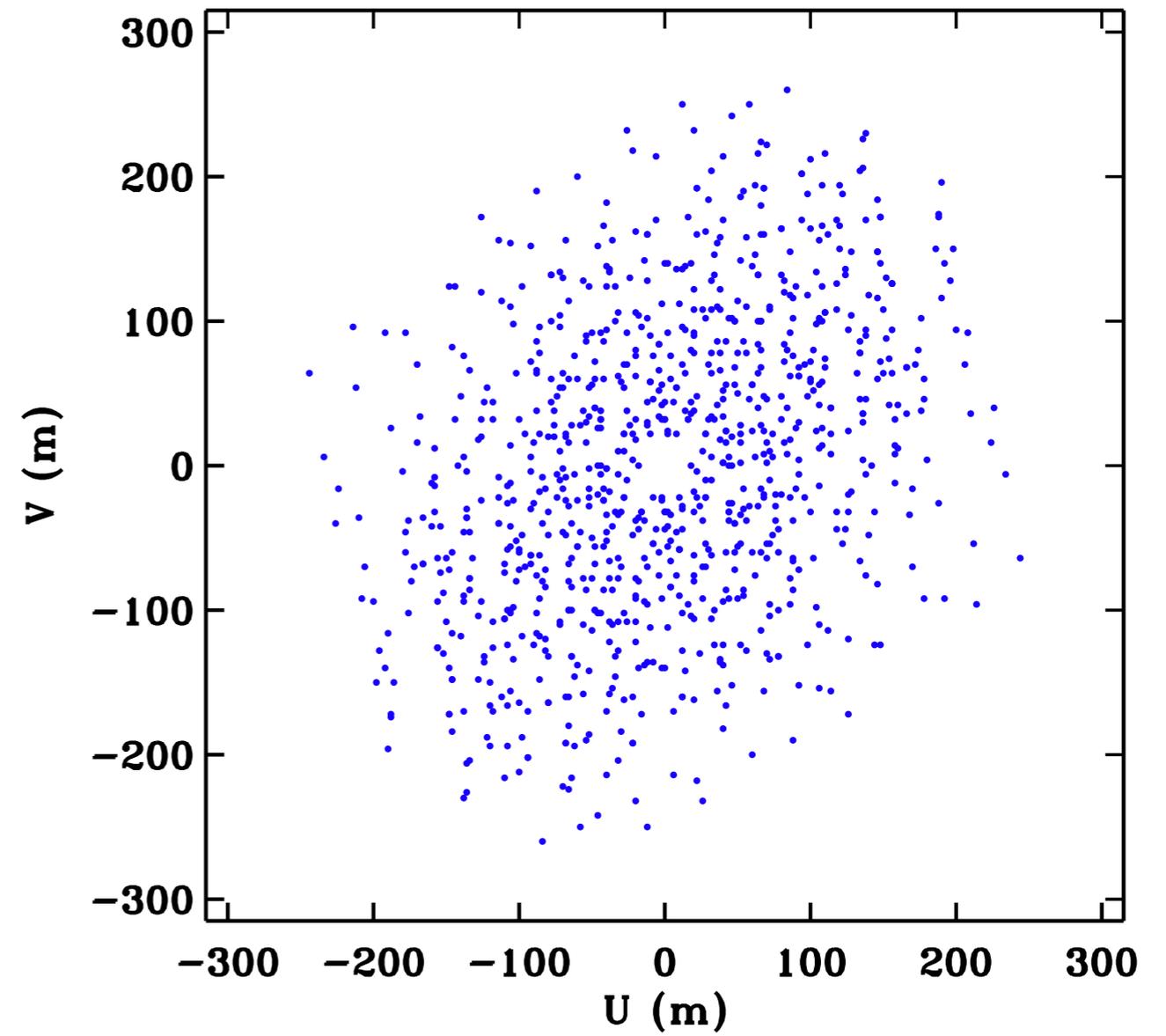


Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes

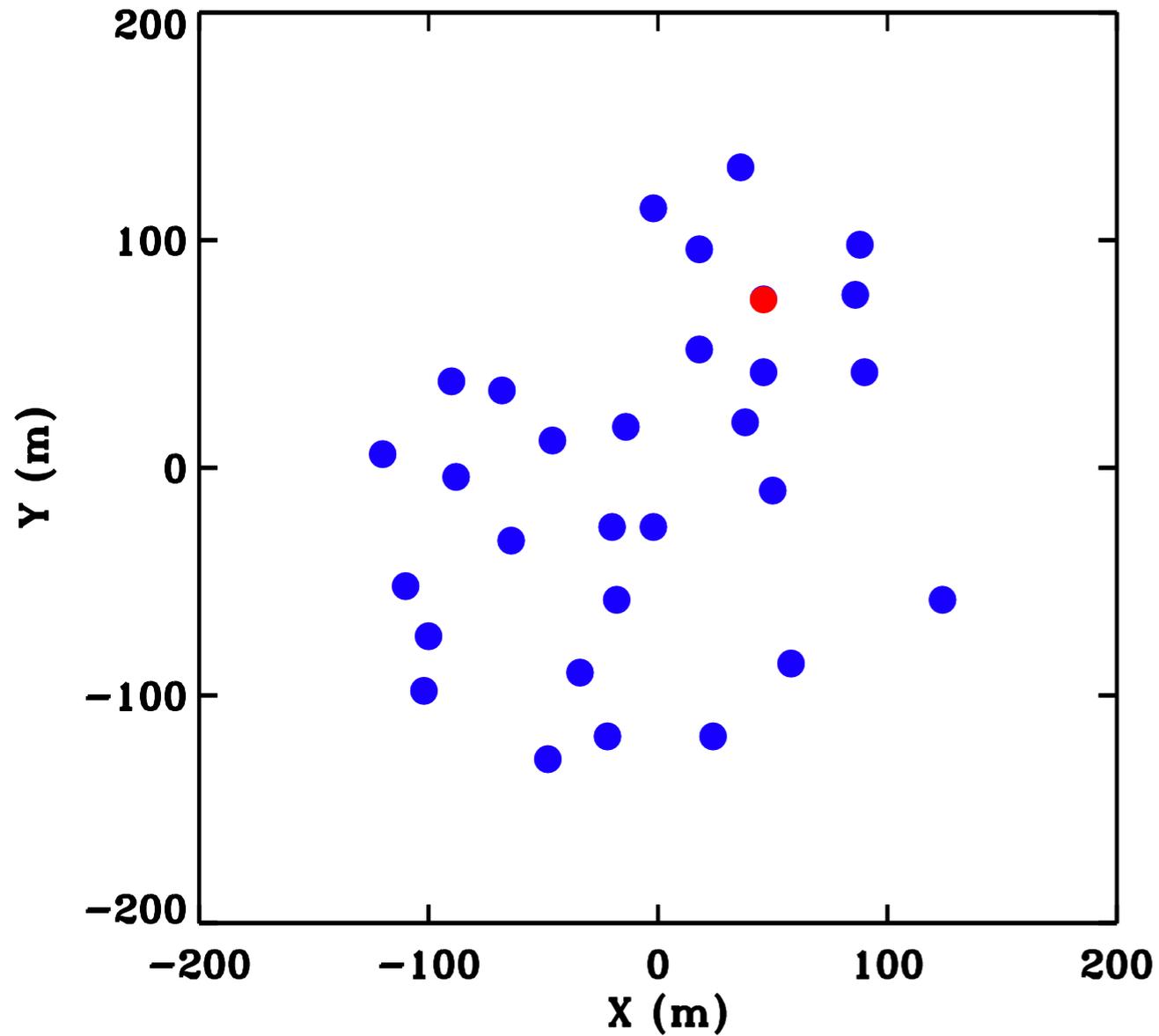


Couverture uv instantanée

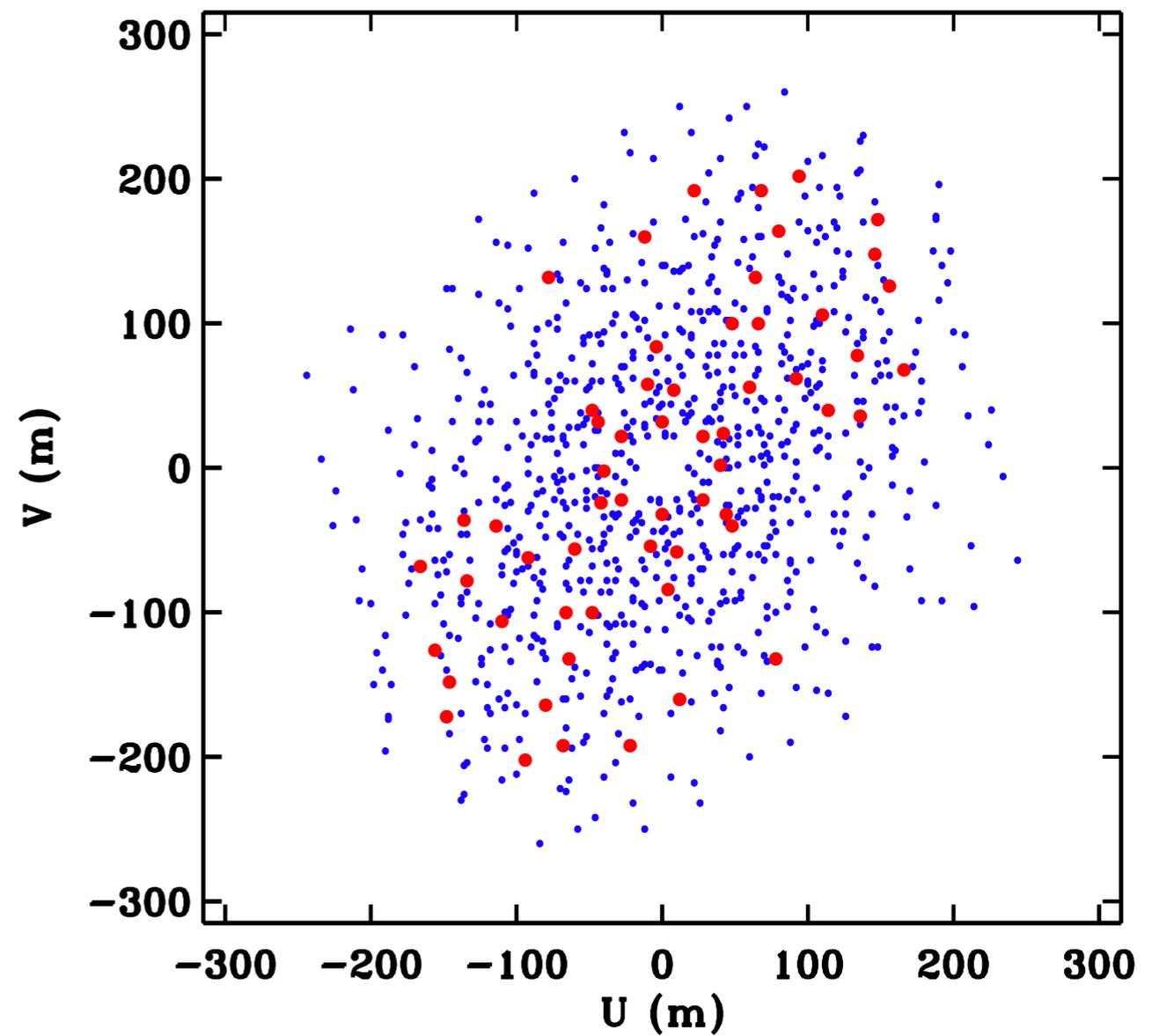


Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes



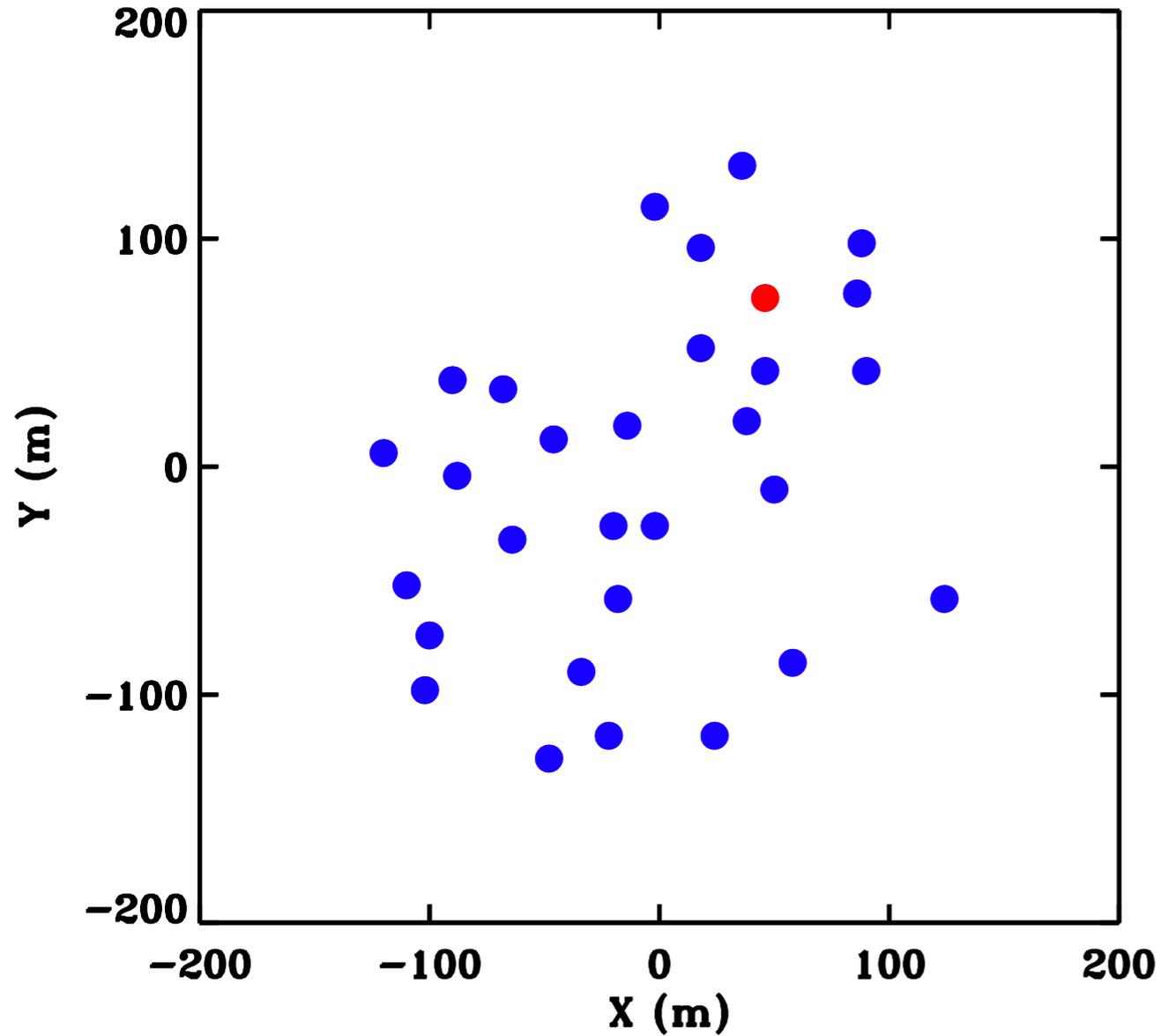
Couverture uv instantanée



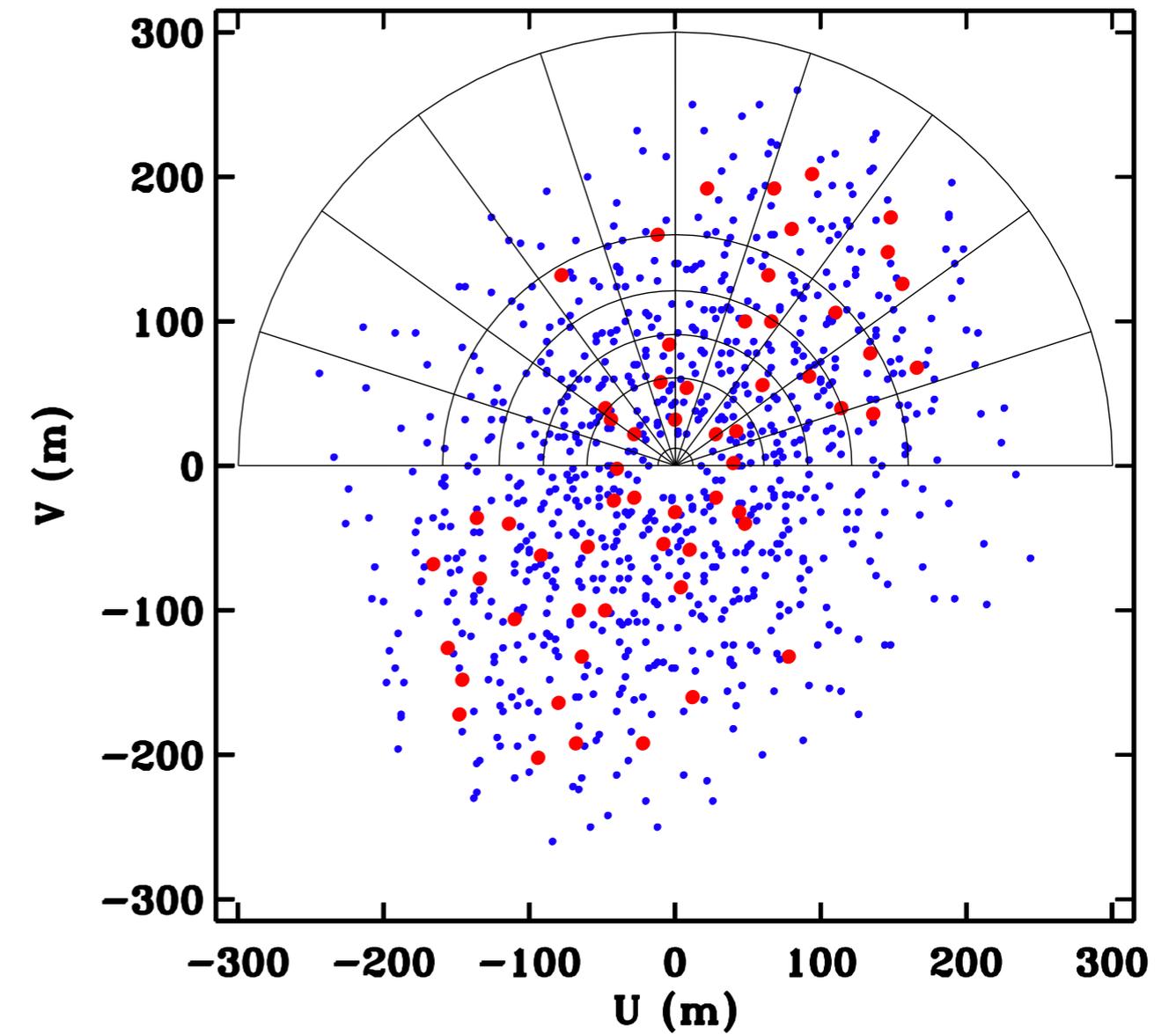
• visibilities involving the red antenna.

Optimisation de la couverture instantanée ?

Distribution des antennes



Couverture uv instantanée

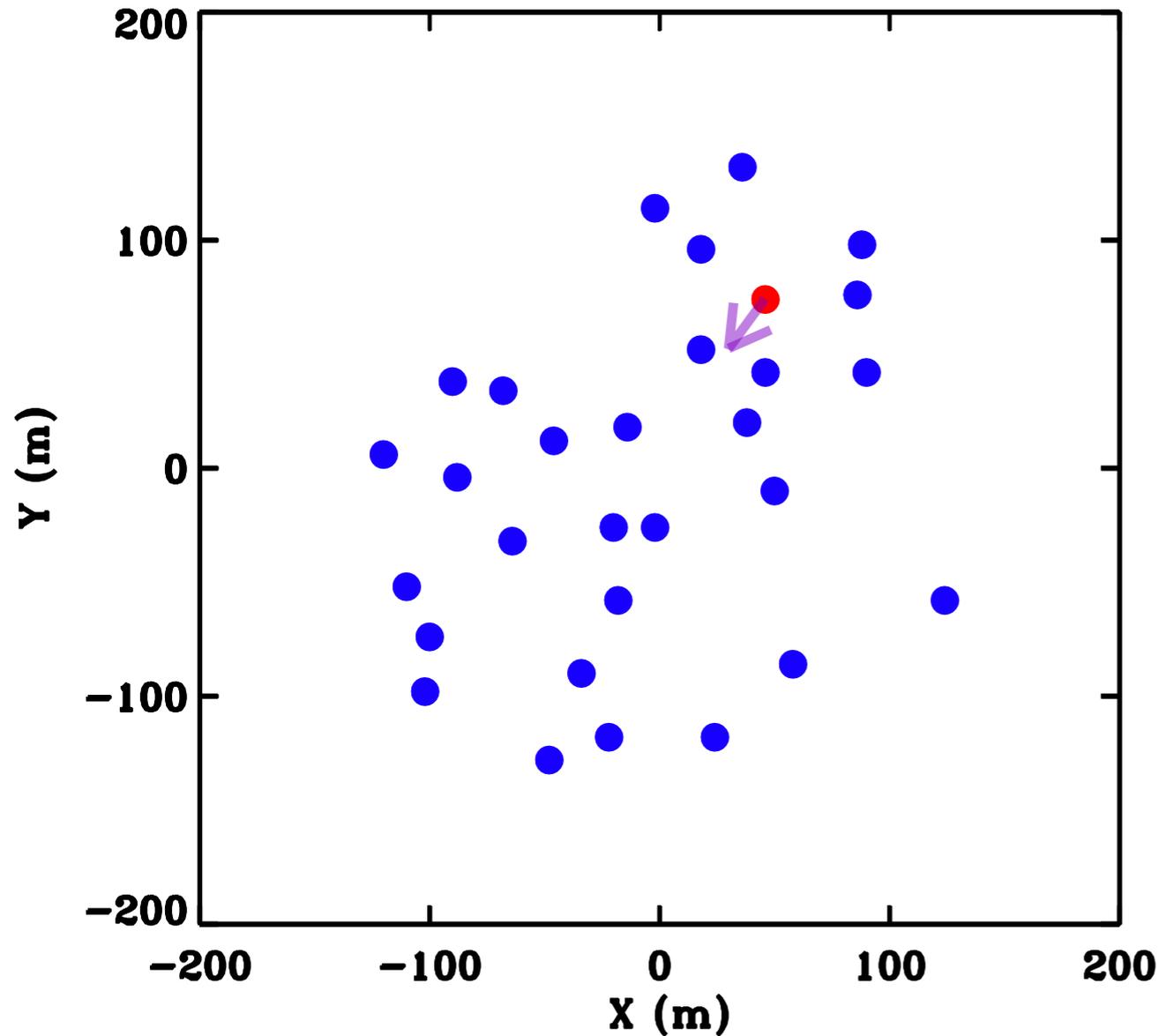


- visibilities involving the red antenna.
- adapted grid to compute local density of a gaussian distribution.

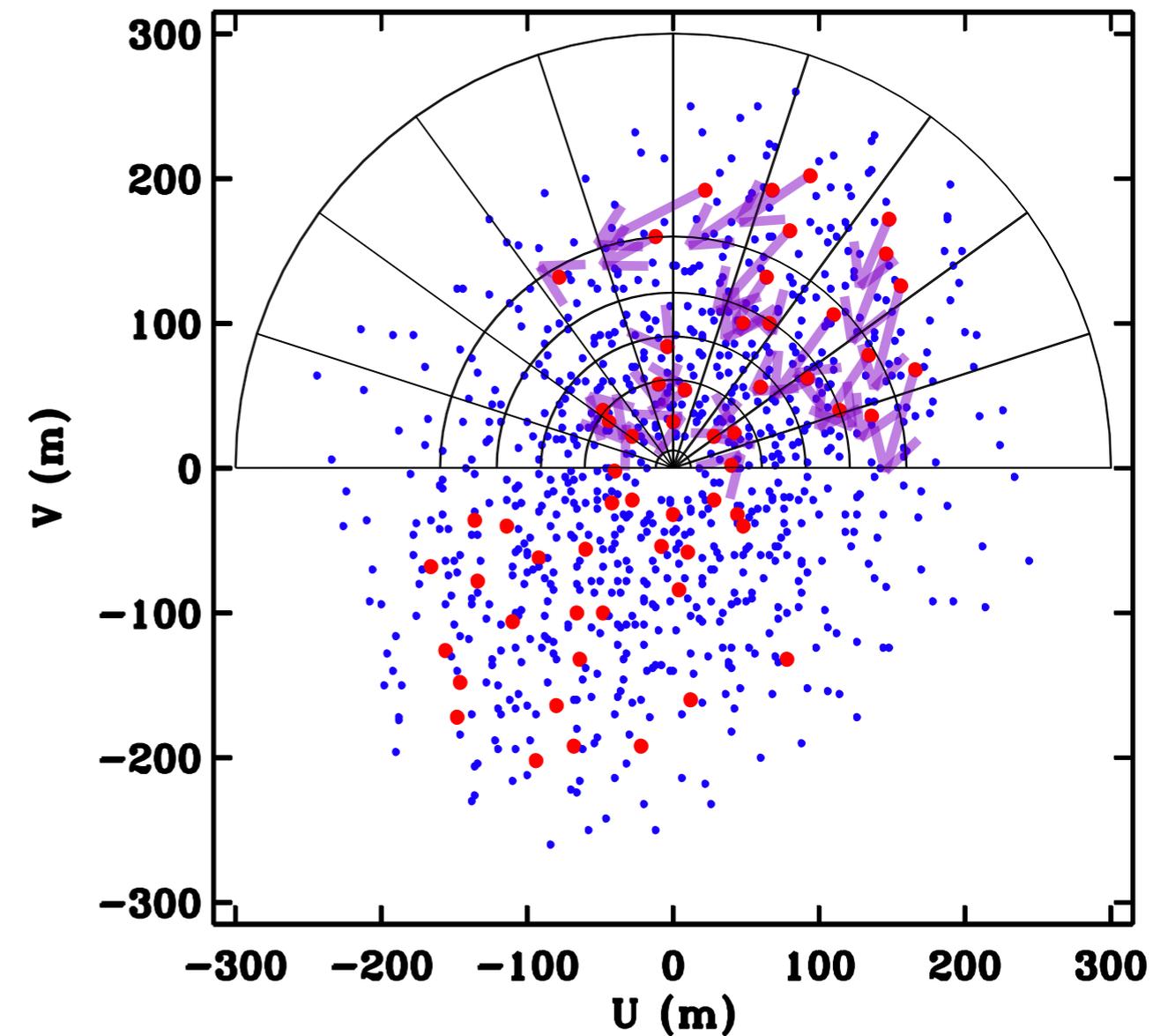
Densité (u,v) cible : distribution gaussienne radiale

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.**

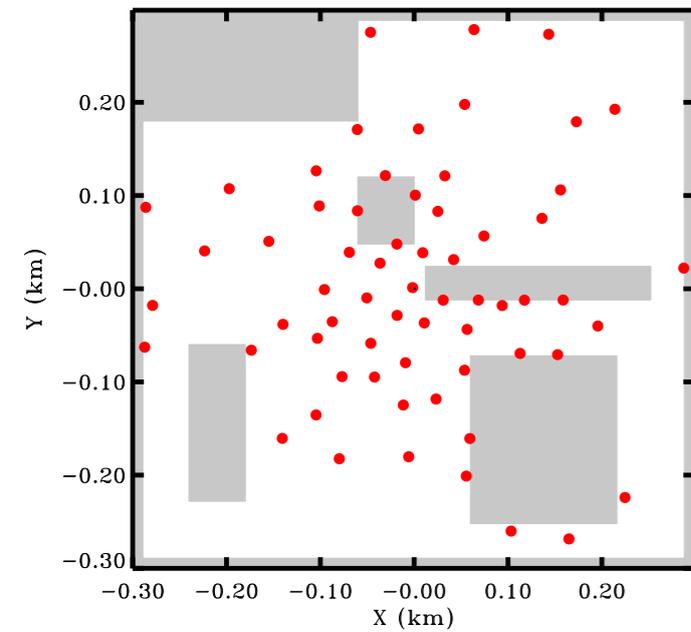
Densité (u,v) cible : distribution gaussienne radiale

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

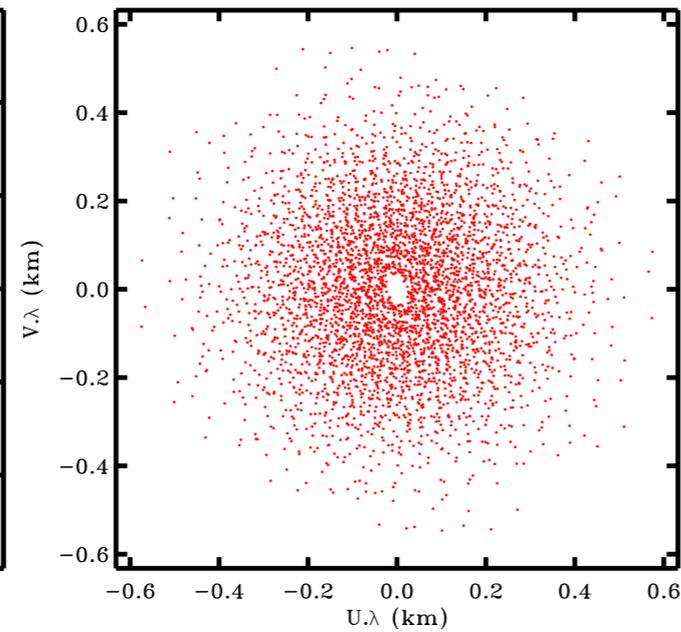
Boone, 2001, 2002

Optimisation de la couverture ?

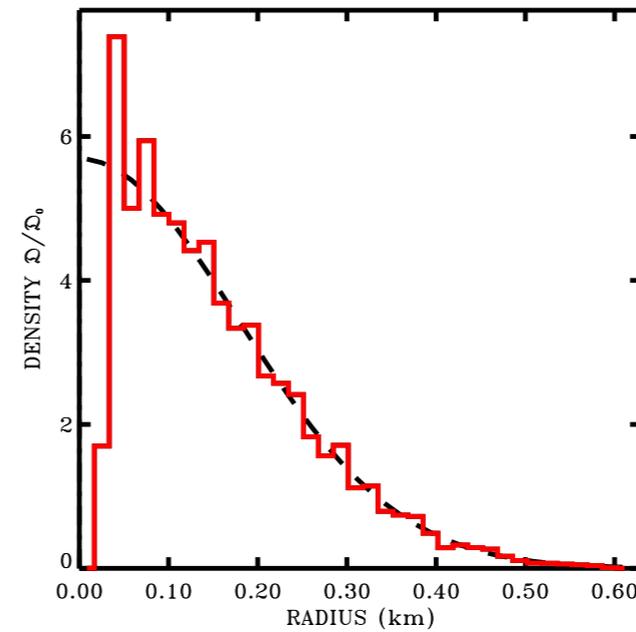
Position des antennes
et obstacles



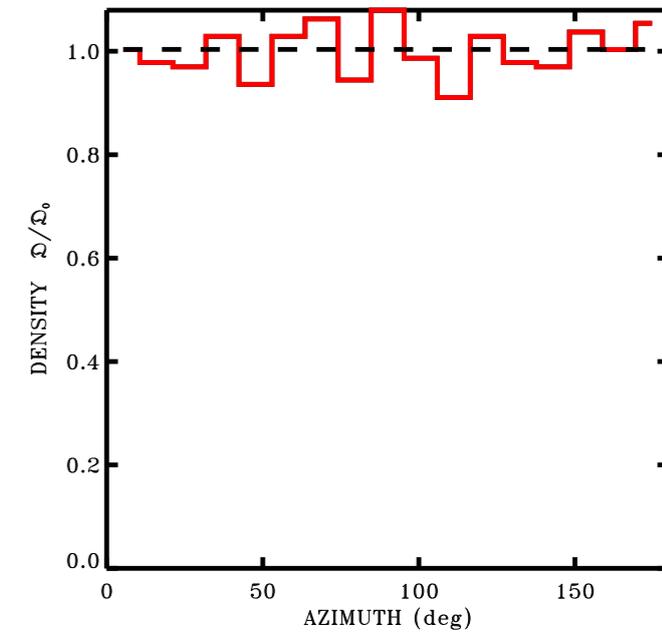
Couverture (u,v)
Instantanée



Profil radial



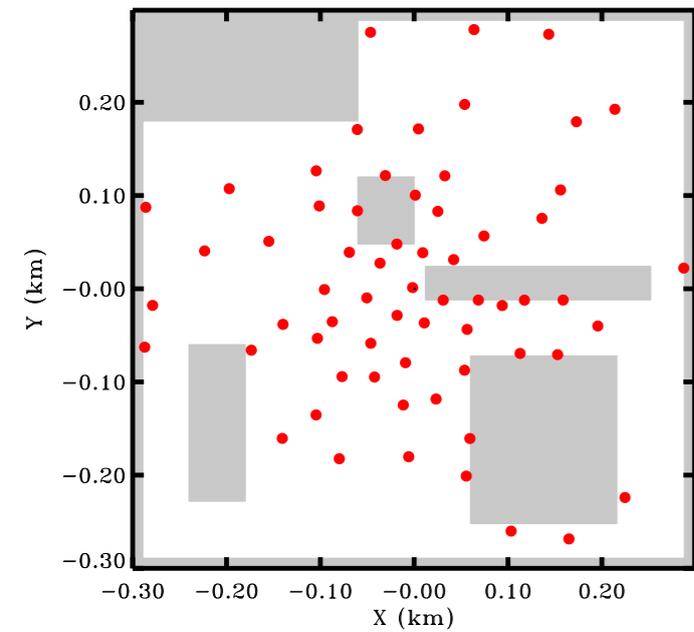
Profil azimuthal



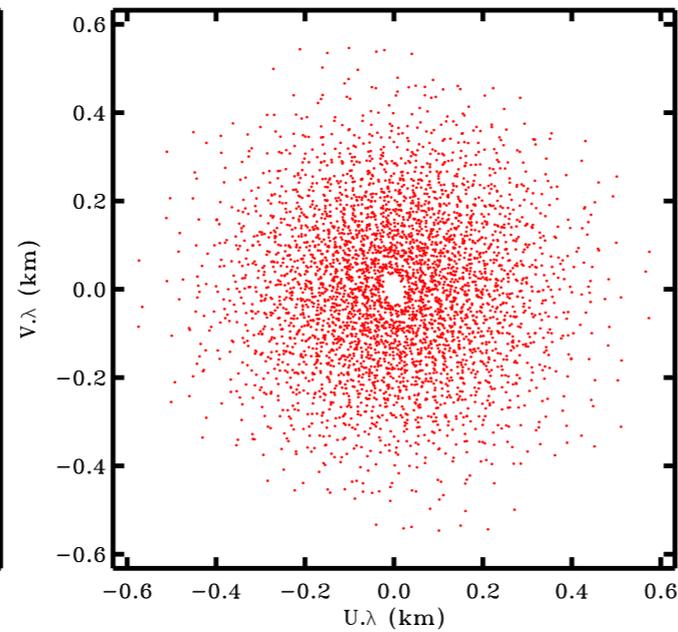
Exemple avec contraintes de positionnement (bâtiments)

Optimisation de la couverture ?

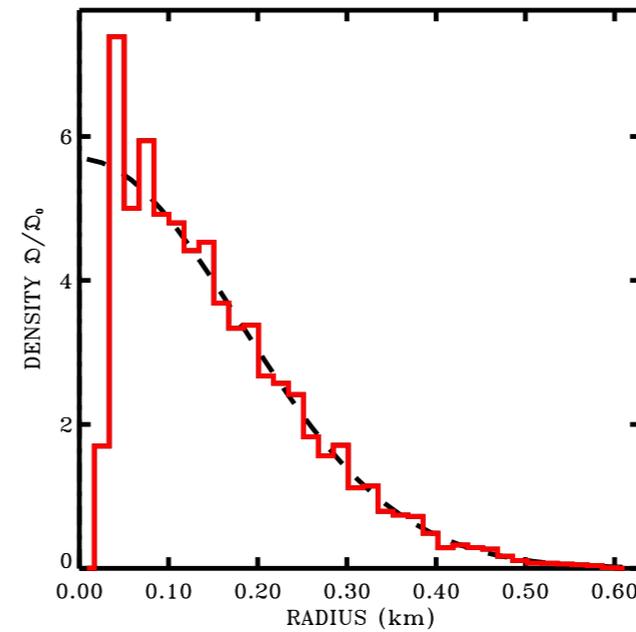
Position des antennes
et obstacles



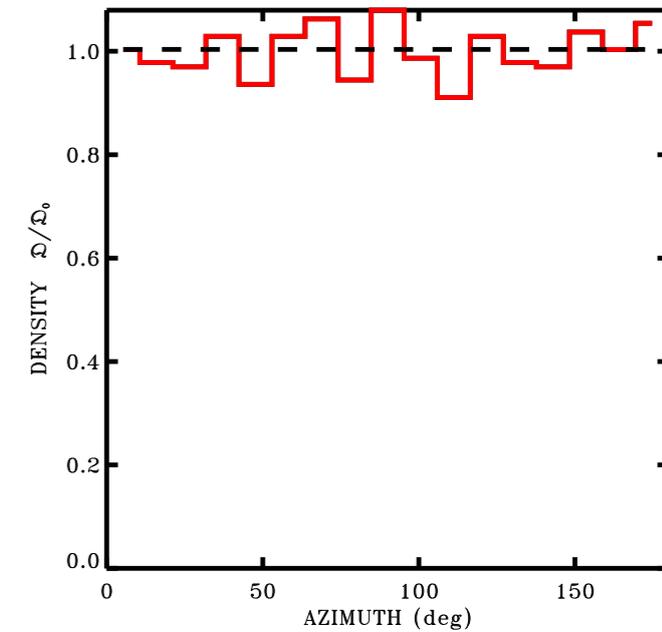
Couverture (u,v)
Instantanée



Profil radial

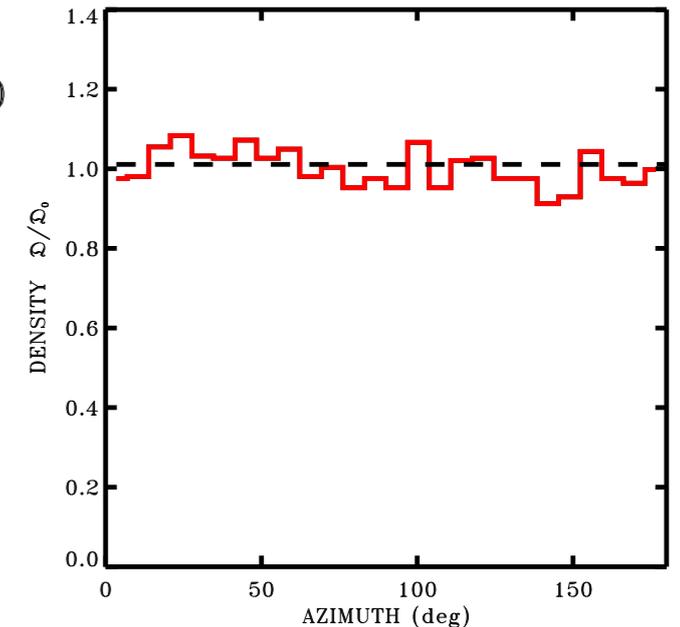
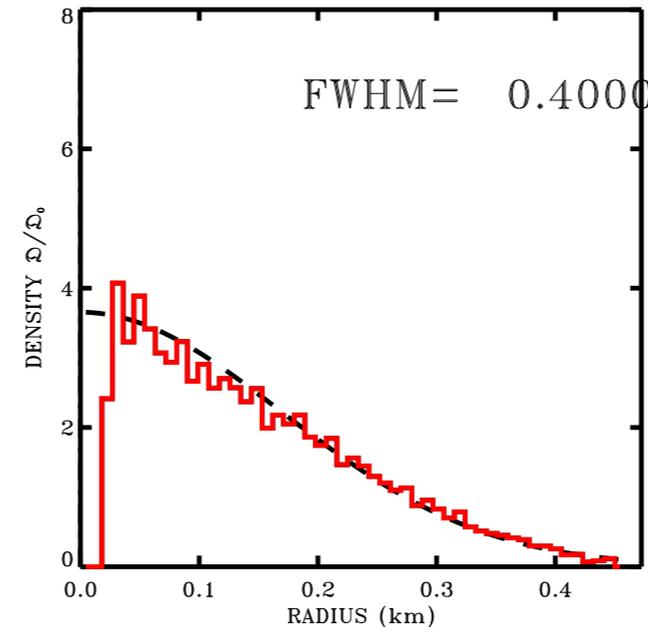
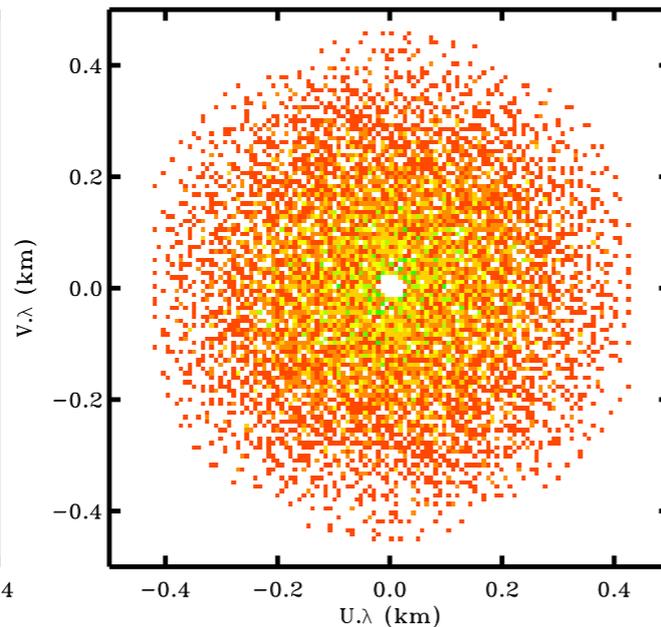
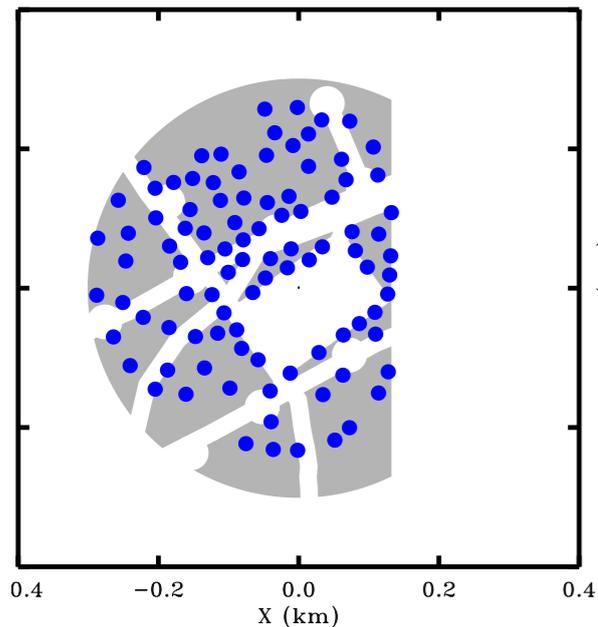


Profil azimuthal

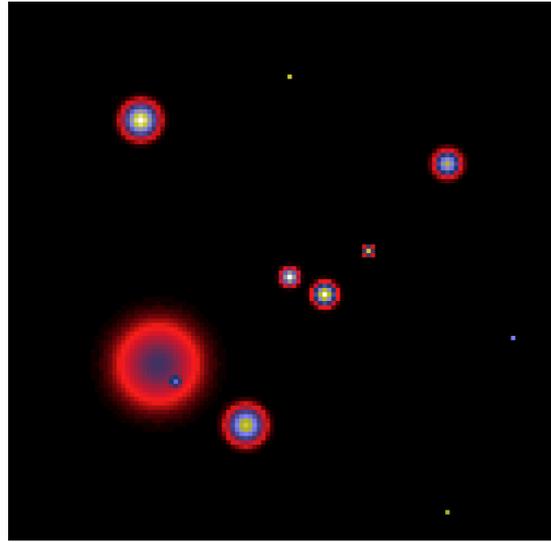


Exemple avec contraintes de positionnement (bâtiments)

Solution NenuFAR



Mesure par interférométrie: en résumé

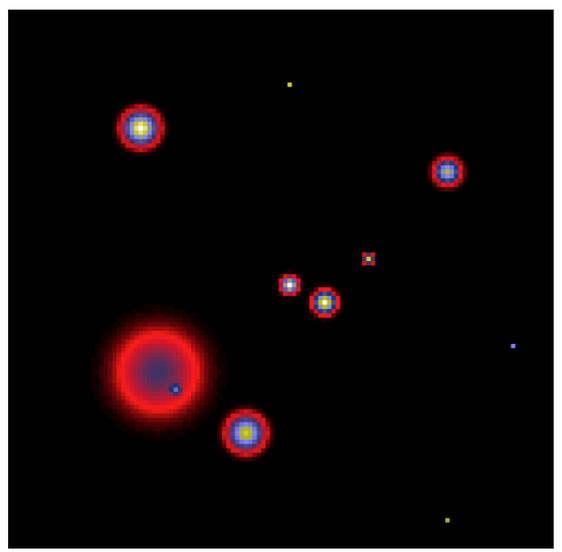


Brillance

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

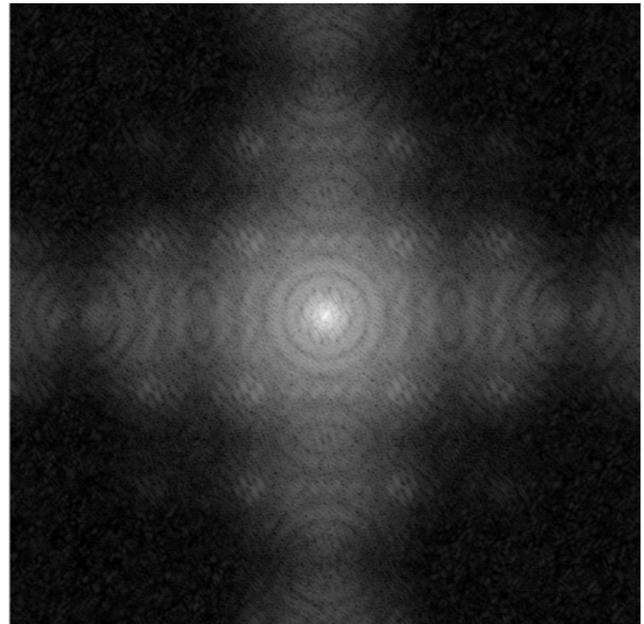
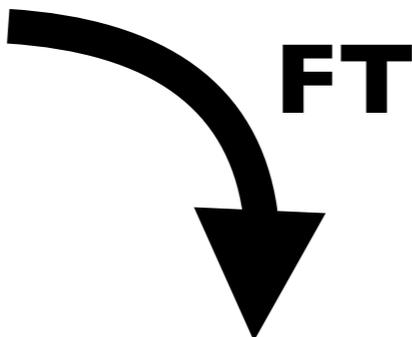


Mesure par interférométrie: en résumé



Brillance

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

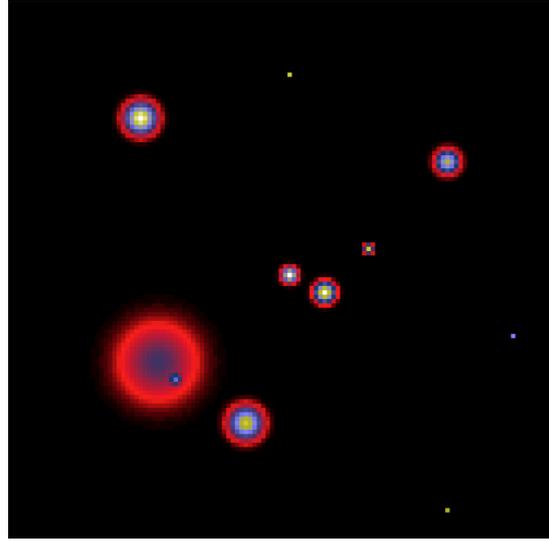


FT(Brillance)

Fonction de "visibilité" continue

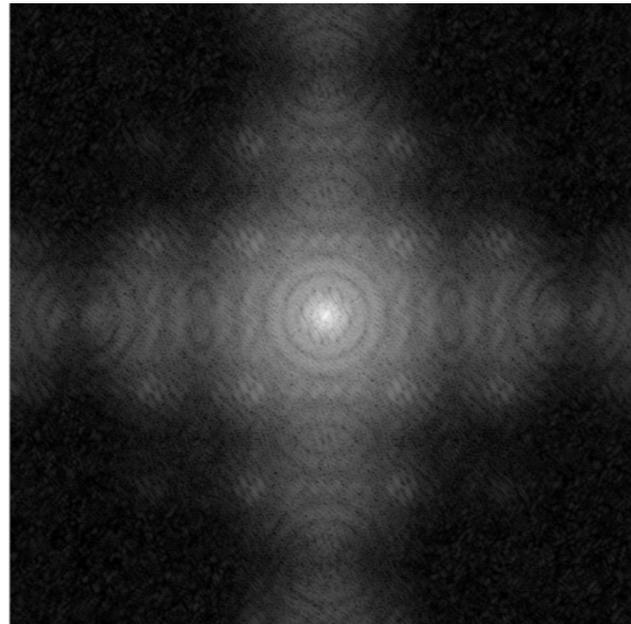
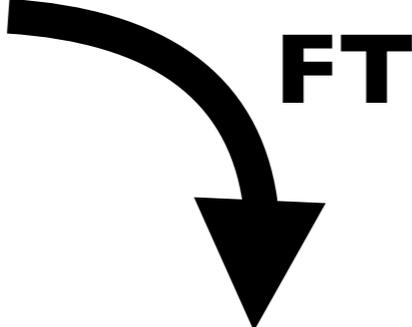


Mesure par interférométrie: en résumé



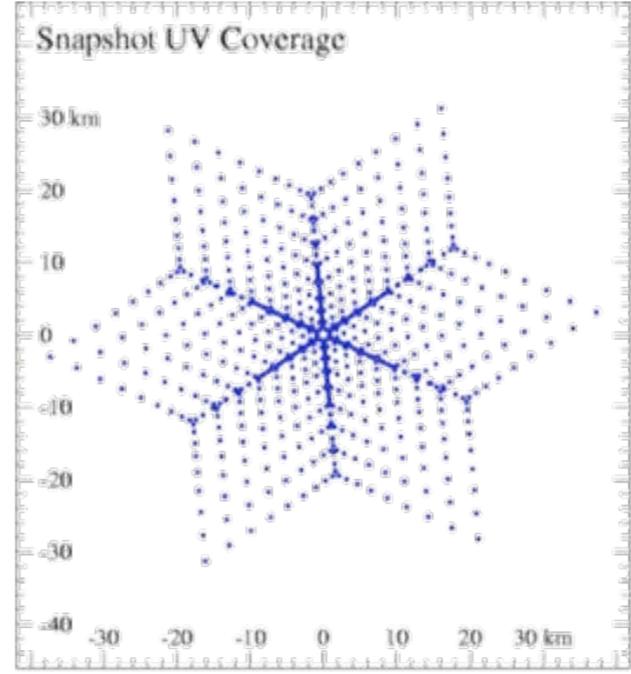
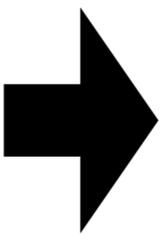
Brillance

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



FT(Brillance)

Fonction de "visibilité" continue



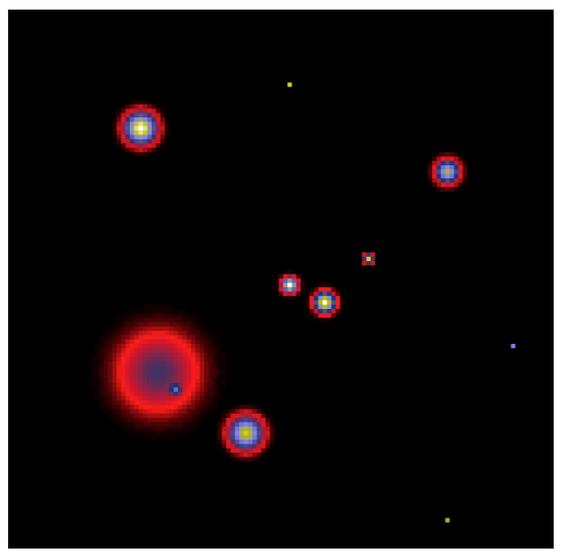
Échantillonnage discret par l'interféromètre

FT⁻¹(couverture uv) = PSF de l'interféromètre

Mesure par interférométrie: en résumé

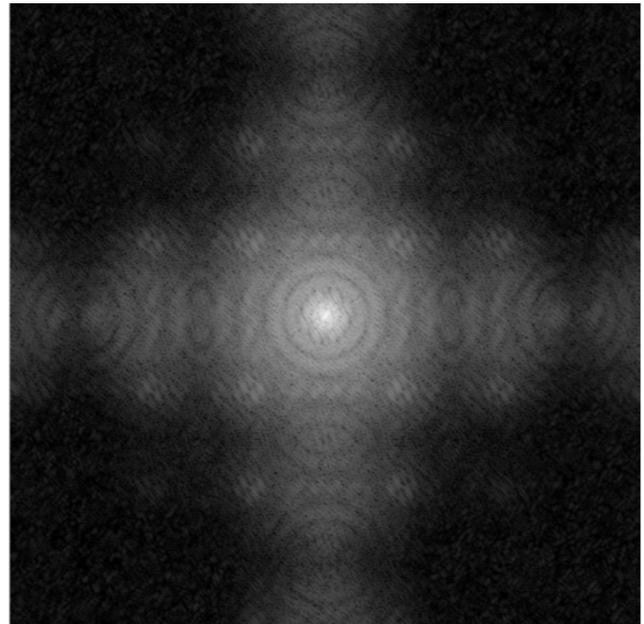
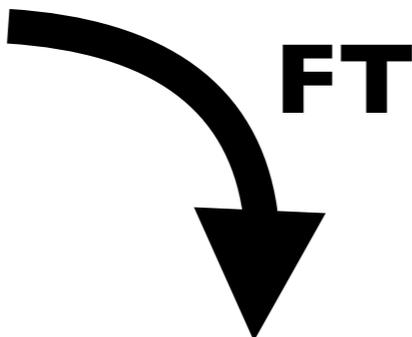


VLA



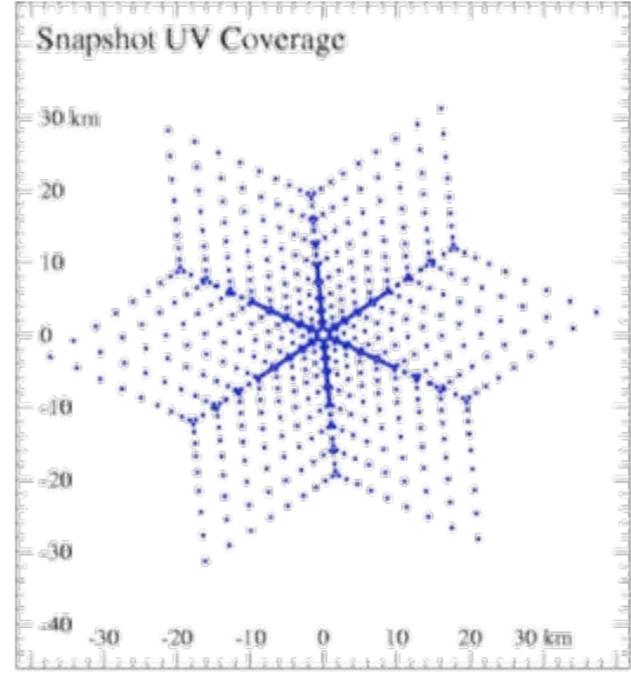
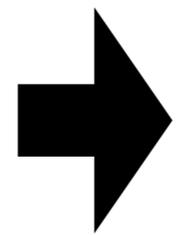
Brillance

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



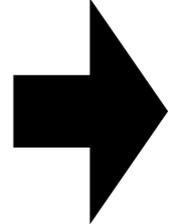
FT(Brillance)

Fonction de "visibilité" continue

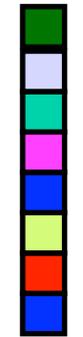


Échantillonnage discret par l'interféromètre

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



"Visibilités" = Composantes de Fourier

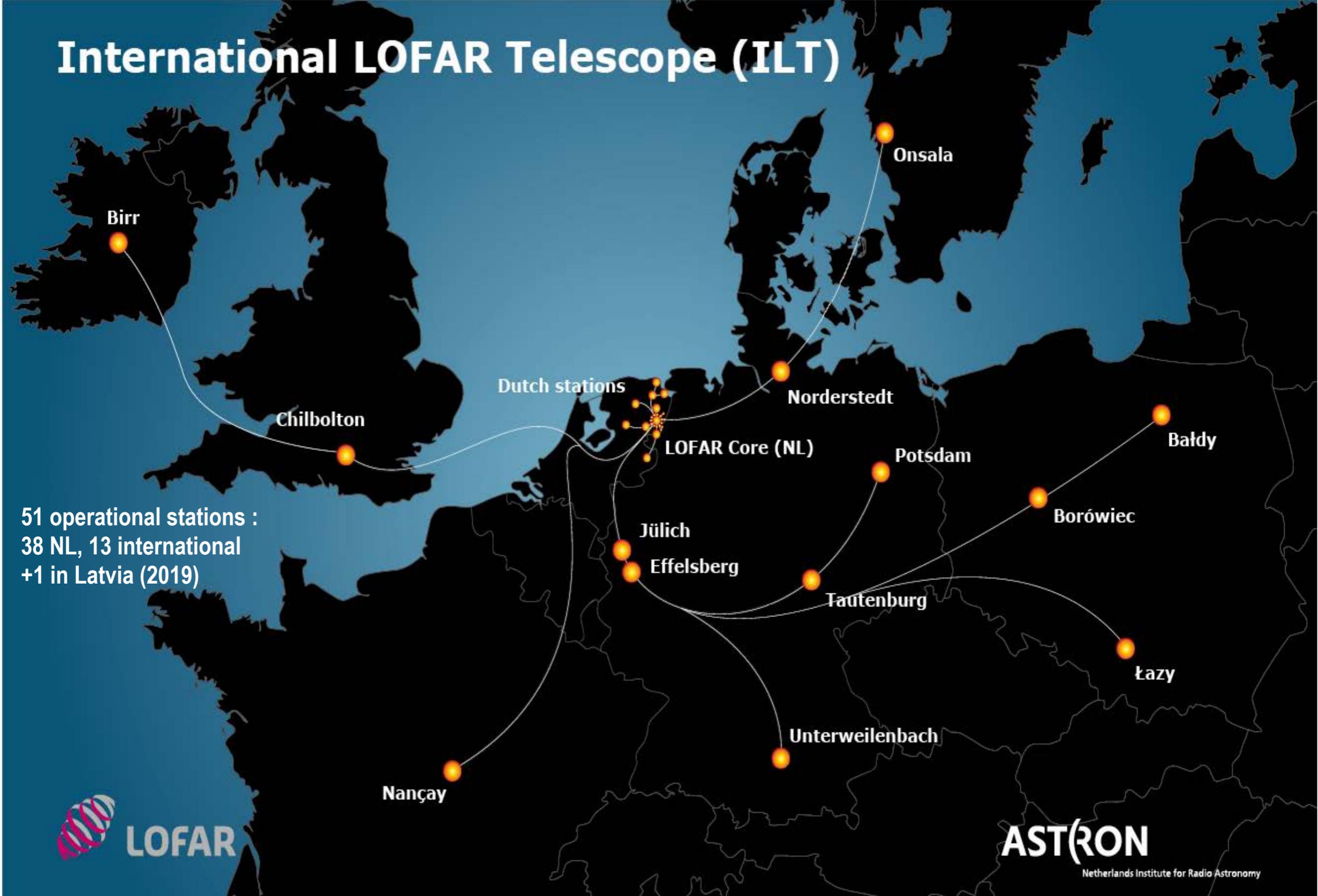


dataset

Mesure par interférométrie: quelques instances

Radio interferomètre électronique - LOFAR

F=30-80 & 110-250 MHz



Mesure par interférométrie: quelques instances

Radio interféromètre électronique - LOFAR

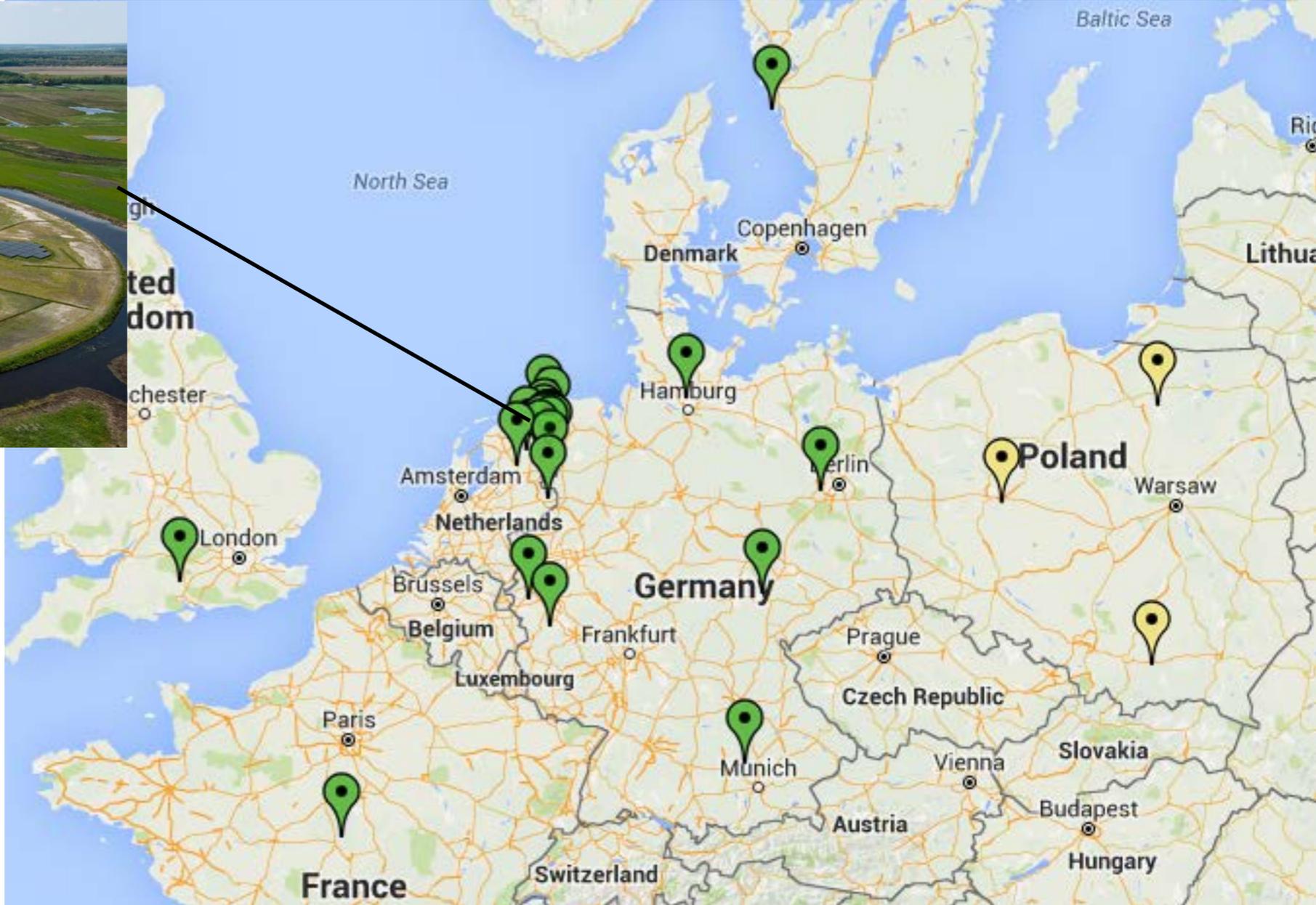
F=30-80 & 110-250 MHz



Mesure par interférométrie: quelques instances

Radio interféromètre électronique - LOFAR

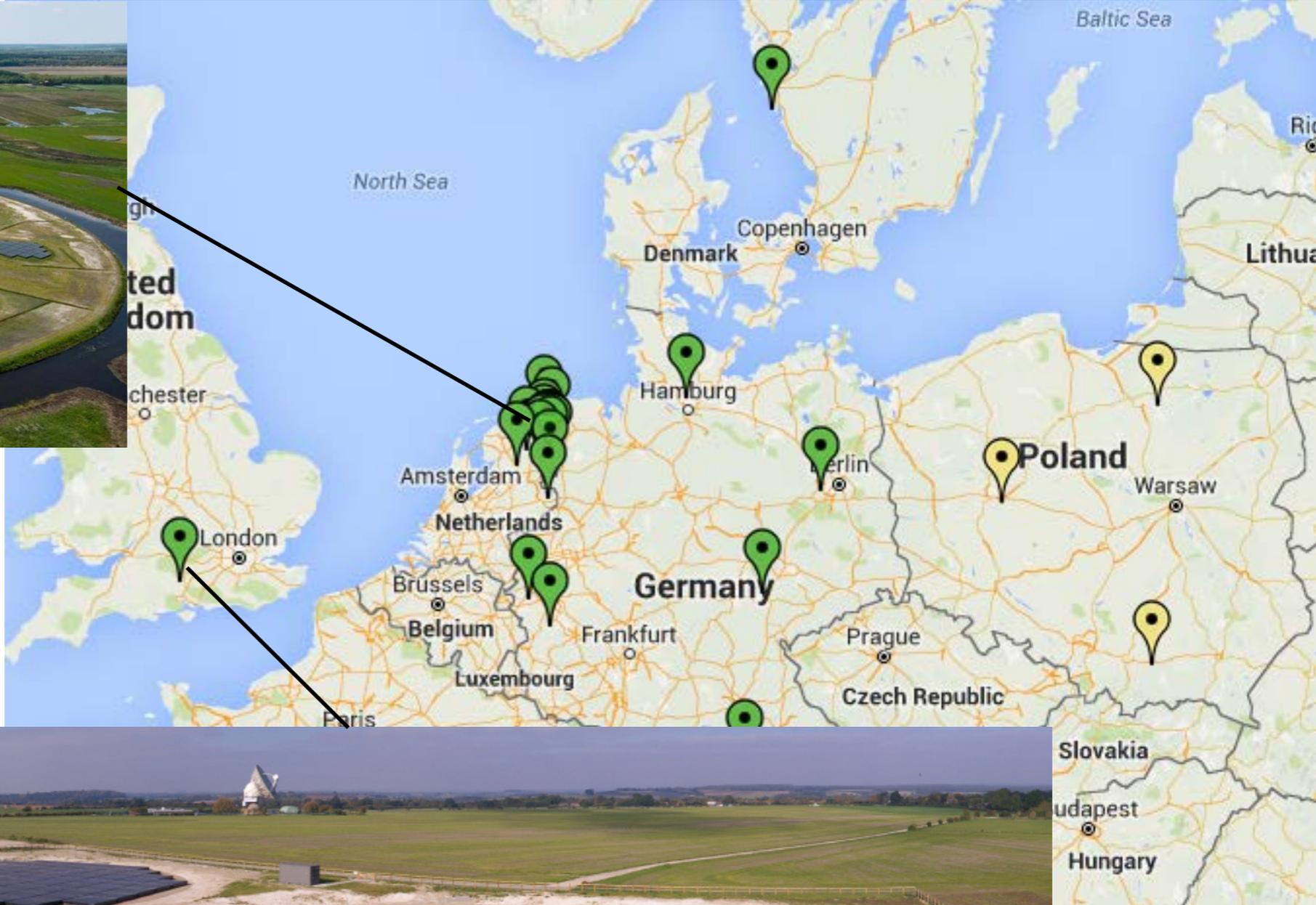
F=30-80 & 110-250 MHz



Mesure par interférométrie: quelques instances

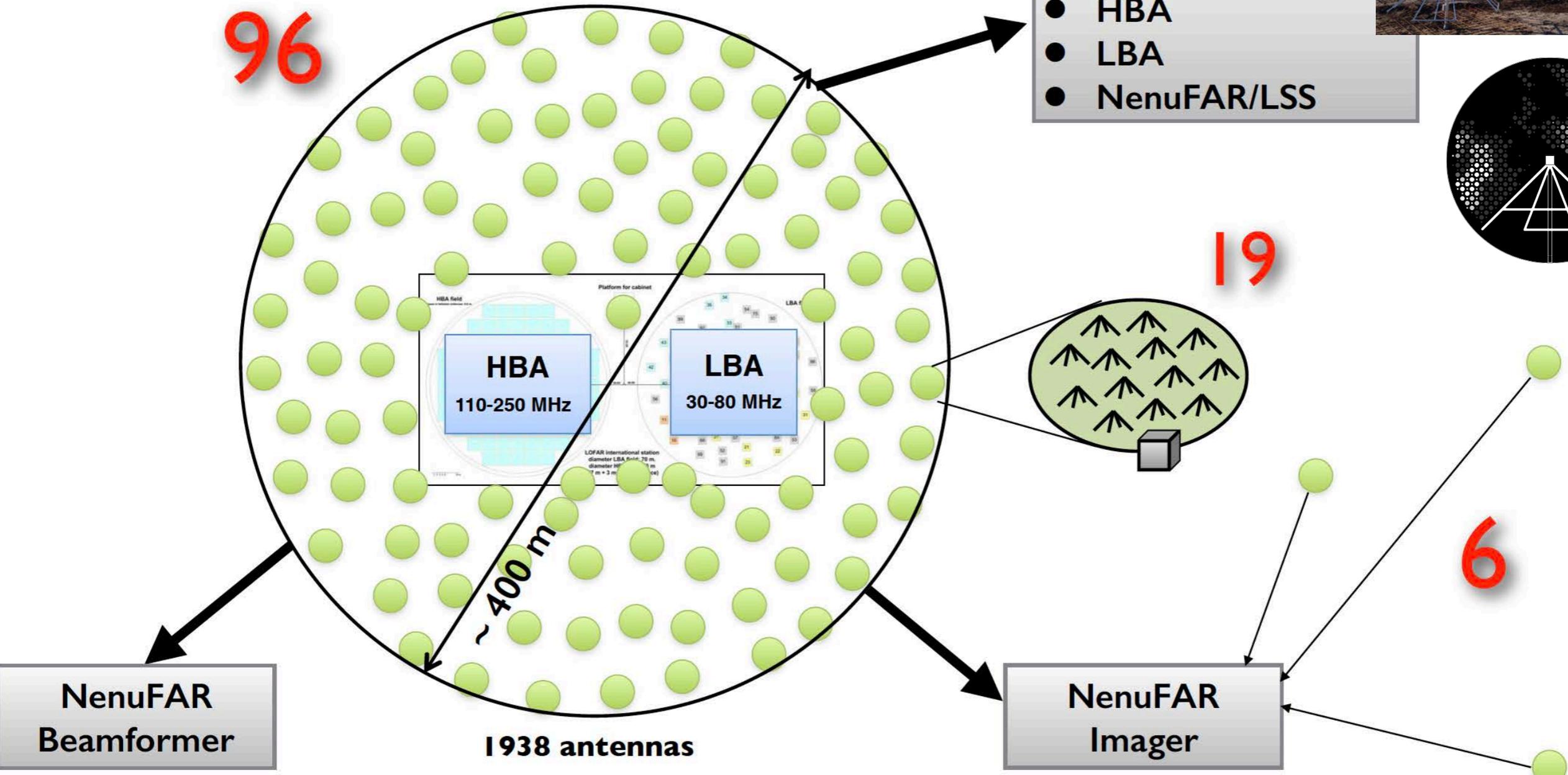
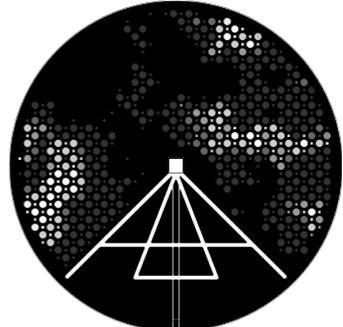
Radio interféromètre électronique - LOFAR

F=30-80 & 110-250 MHz



Mesure par interférométrie: quelques instances

"Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR



- LOFAR back-end
- HBA
 - LBA
 - NenuFAR/LSS

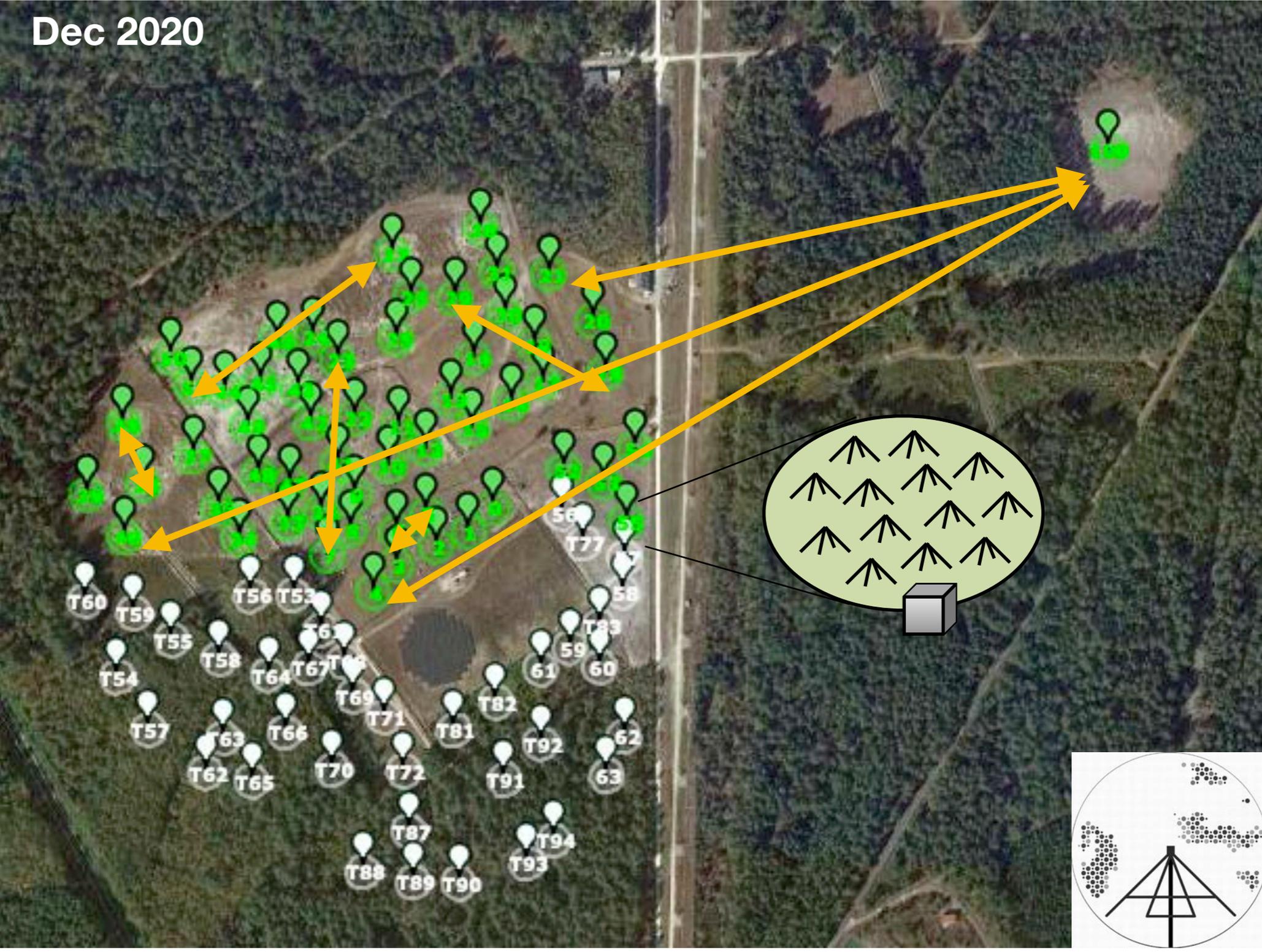
- Standalone Beamformer
- Standalone Transient Buffer
- Standalone Imager
- LOFAR "Super Station" mode

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

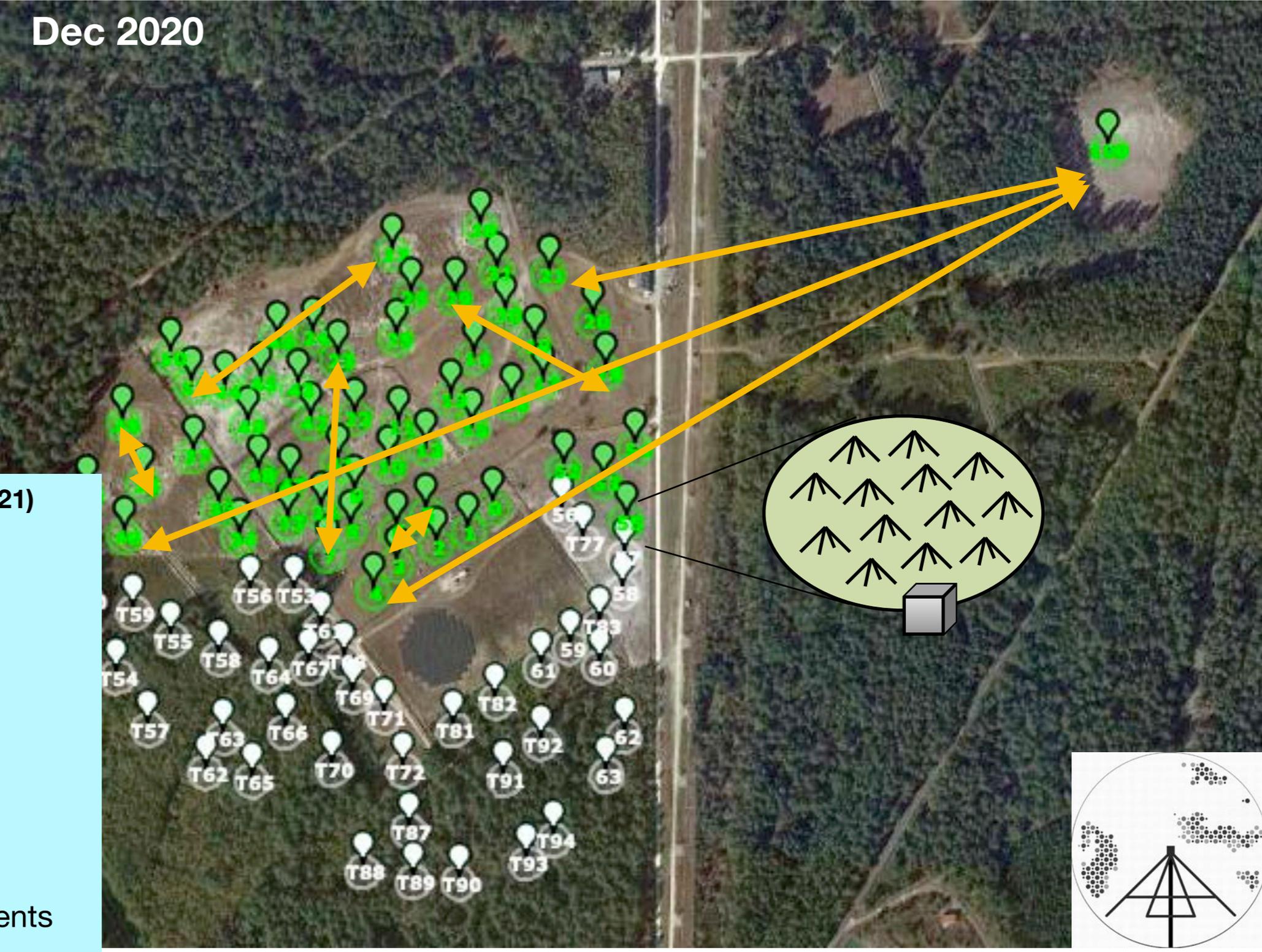
"Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR

F = 20-88 MHz

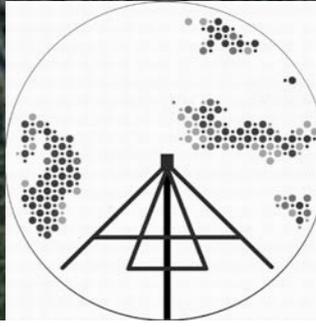
56 + 1 remote
Mini-arrays

Introducing
"longer" baselines

Dedicated correlator

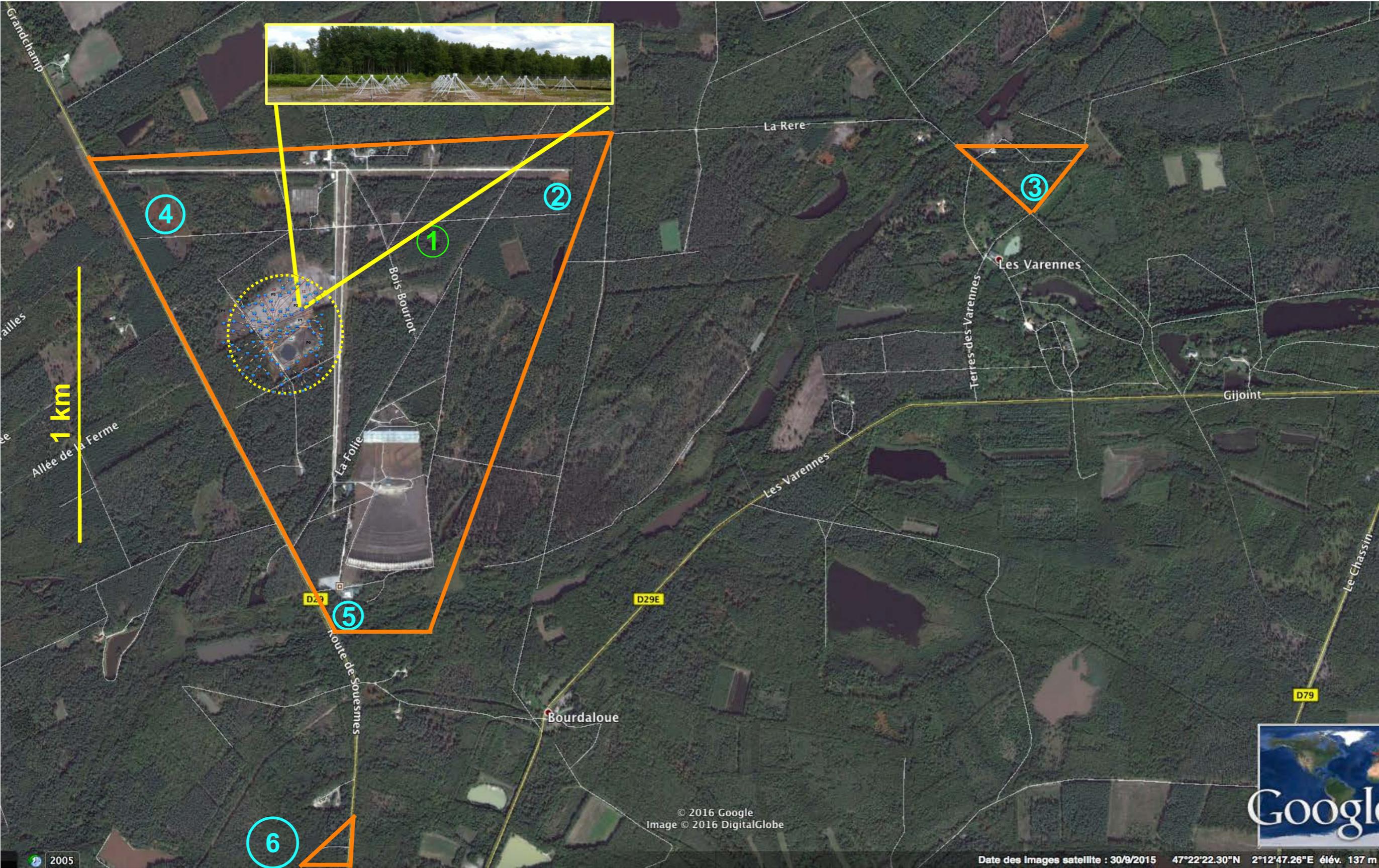


- Early Science phase (-> 2021)
- Cosmic Dawn
 - Exoplanets & Stars
 - Pulsars
 - Transients
 - FRB
 - Solar system
 - Clusters & AGNs & Filaments
 - RRL, ...



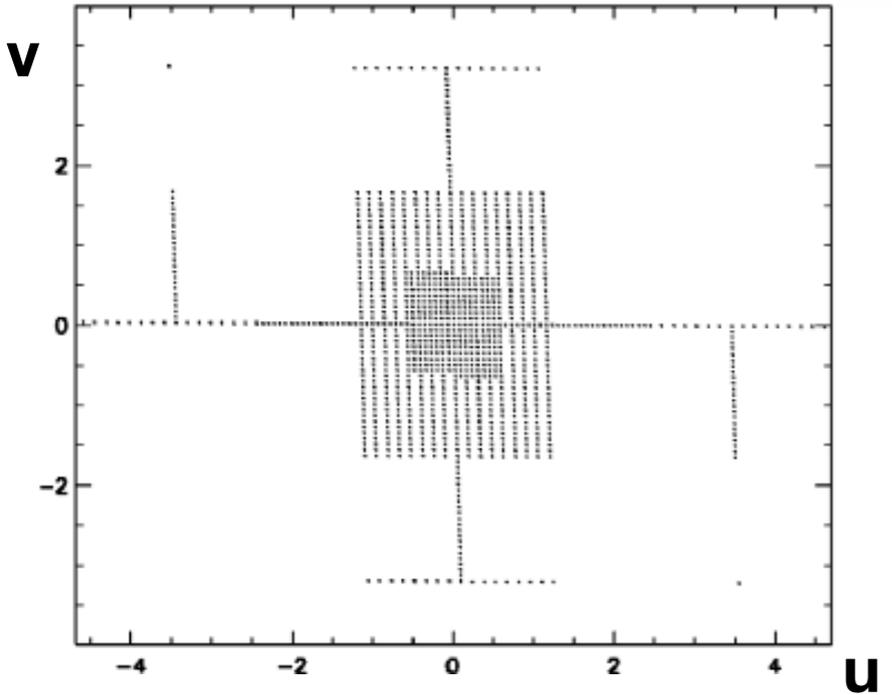
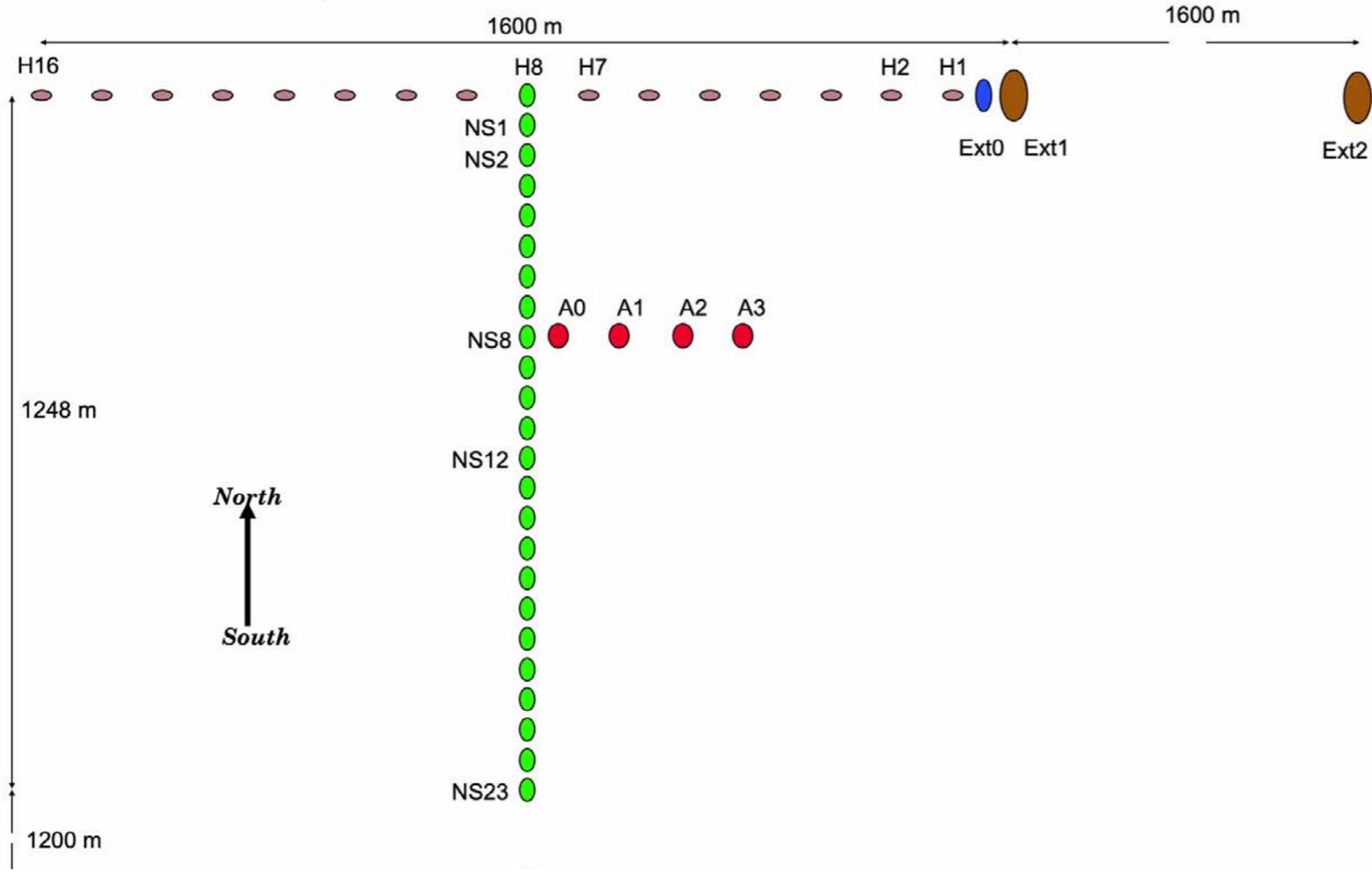
Mesure par interférométrie: quelques instances

"Pathfinder" de SKA-LOW: NenuFAR



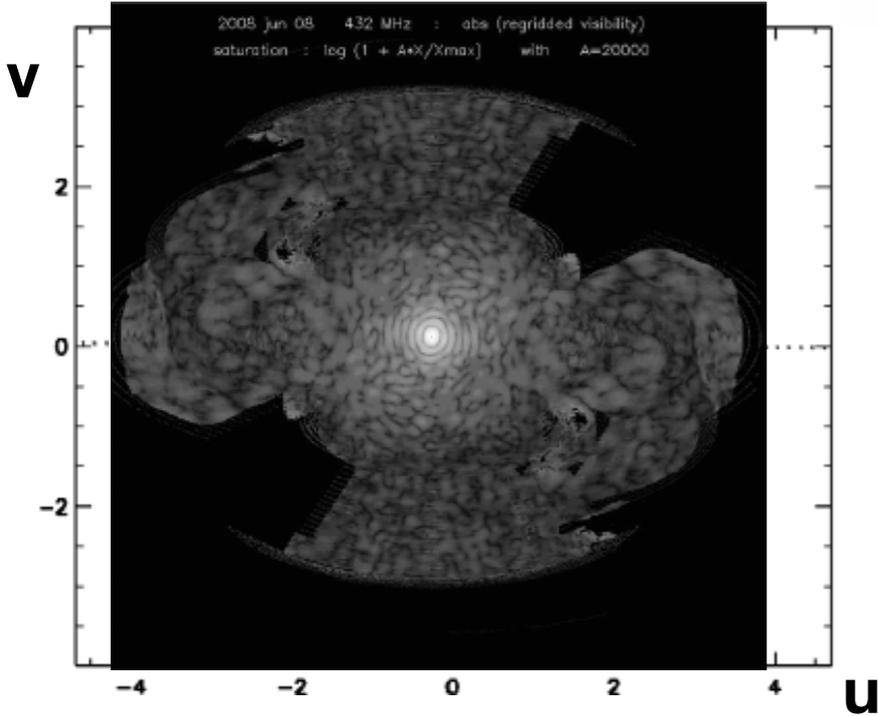
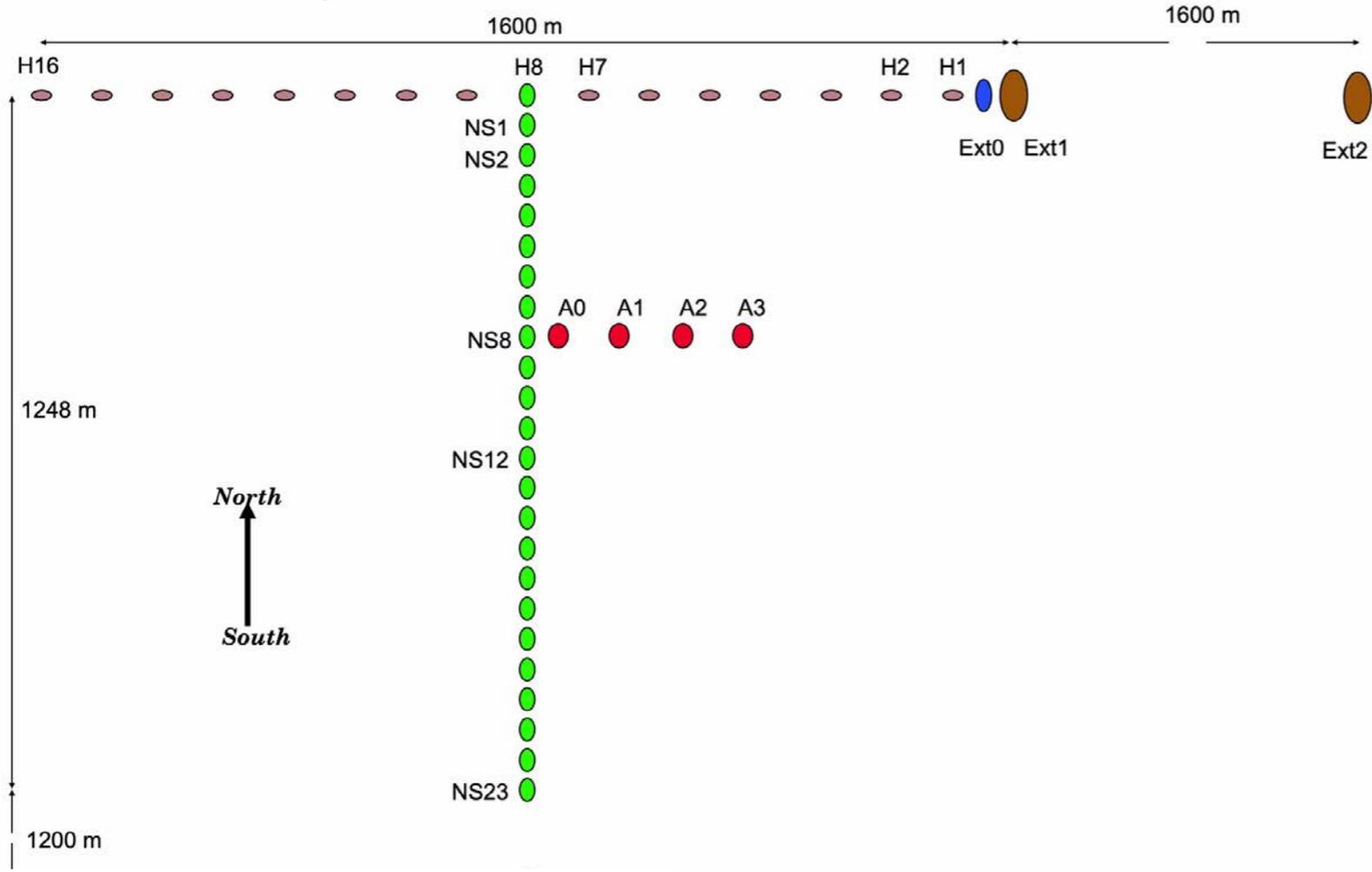
Mesure par interférométrie: quelques instances

Le radiohéliographe



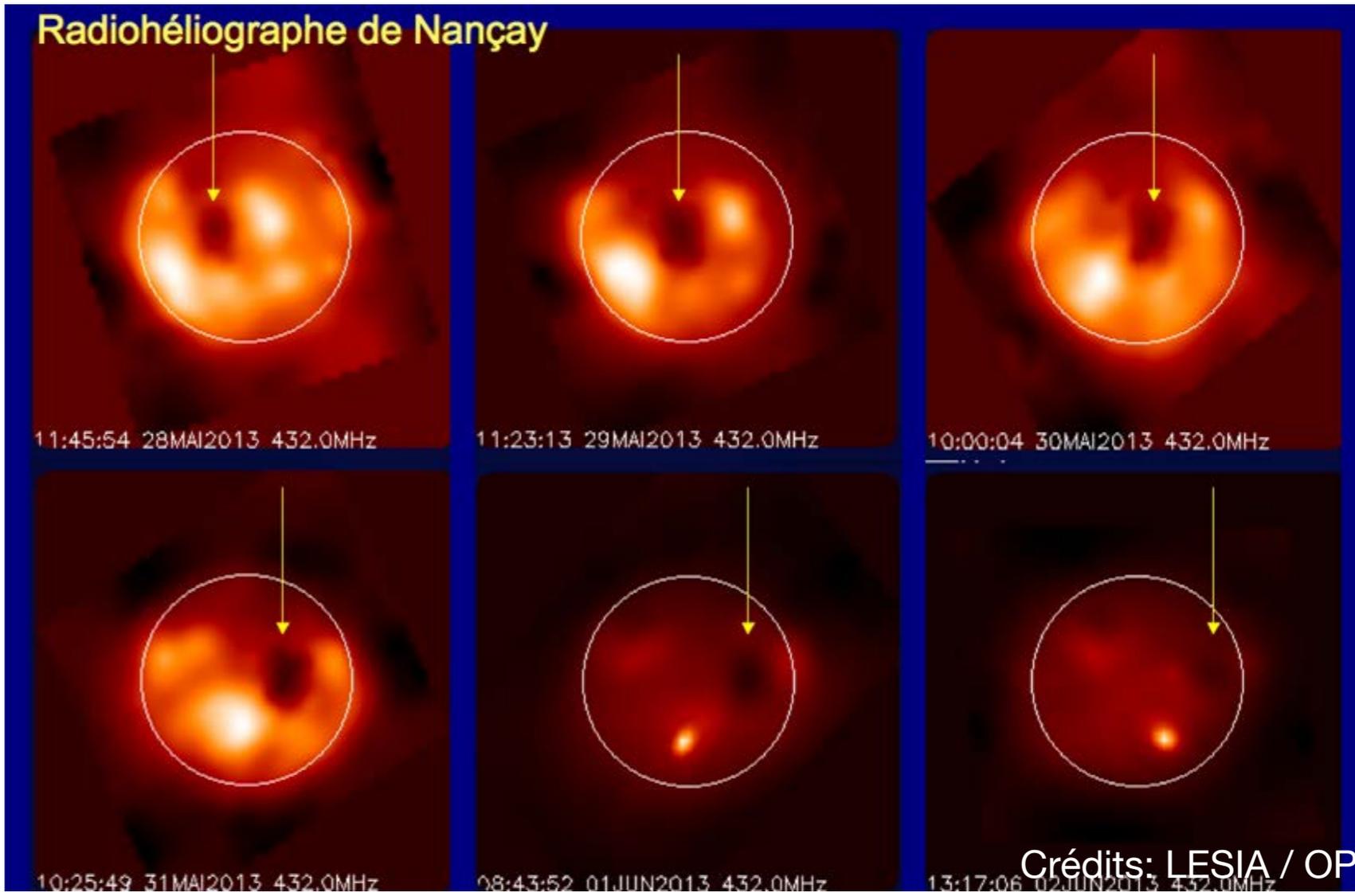
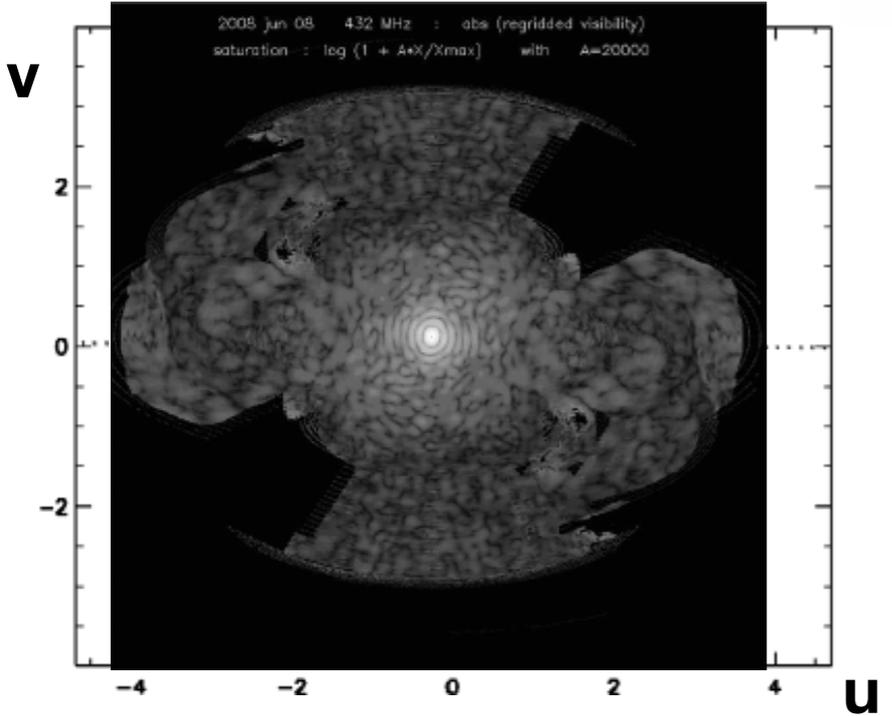
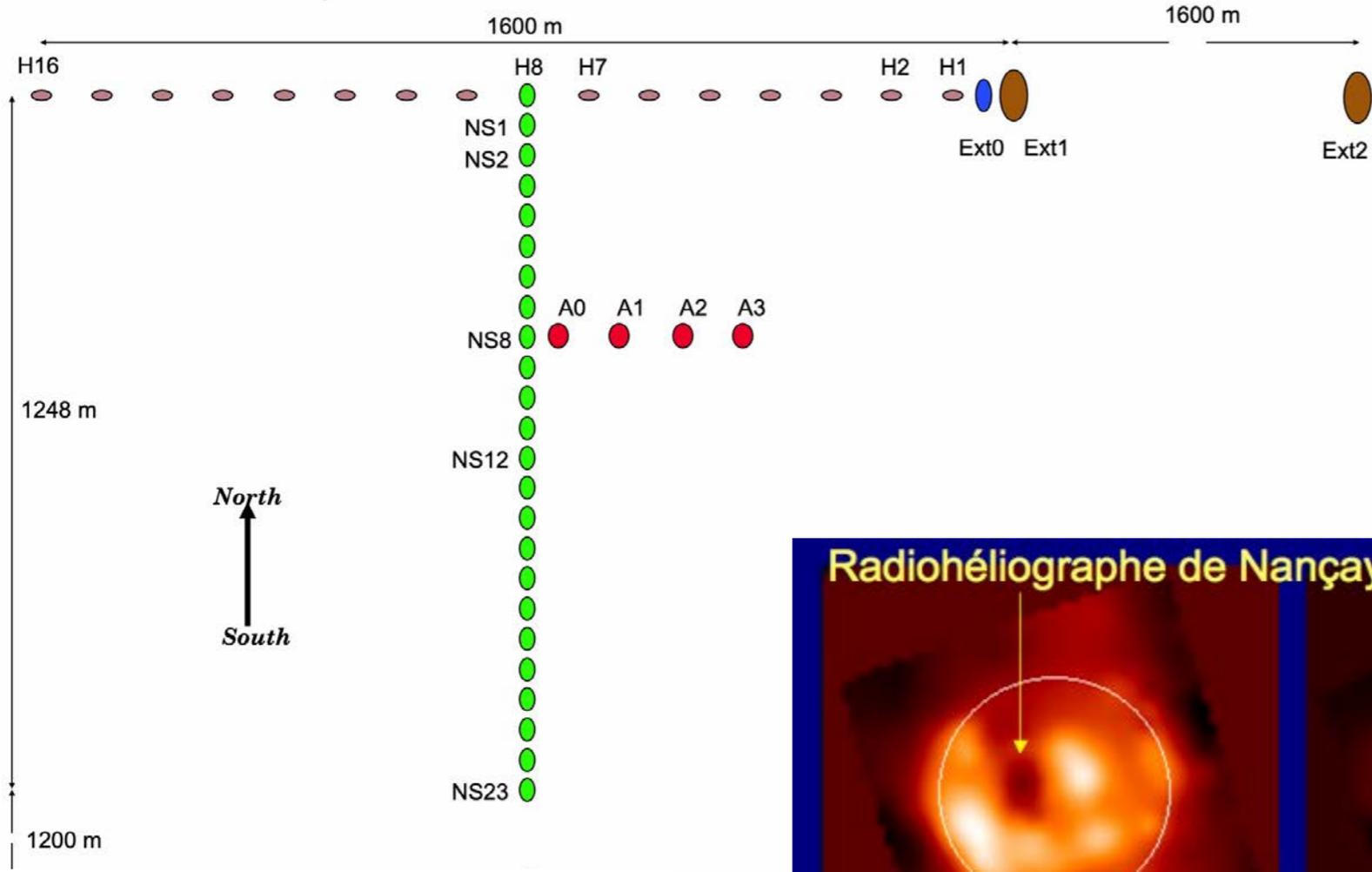
Mesure par interférométrie: quelques instances

Le radiohéliographe



Mesure par interférométrie: quelques instances

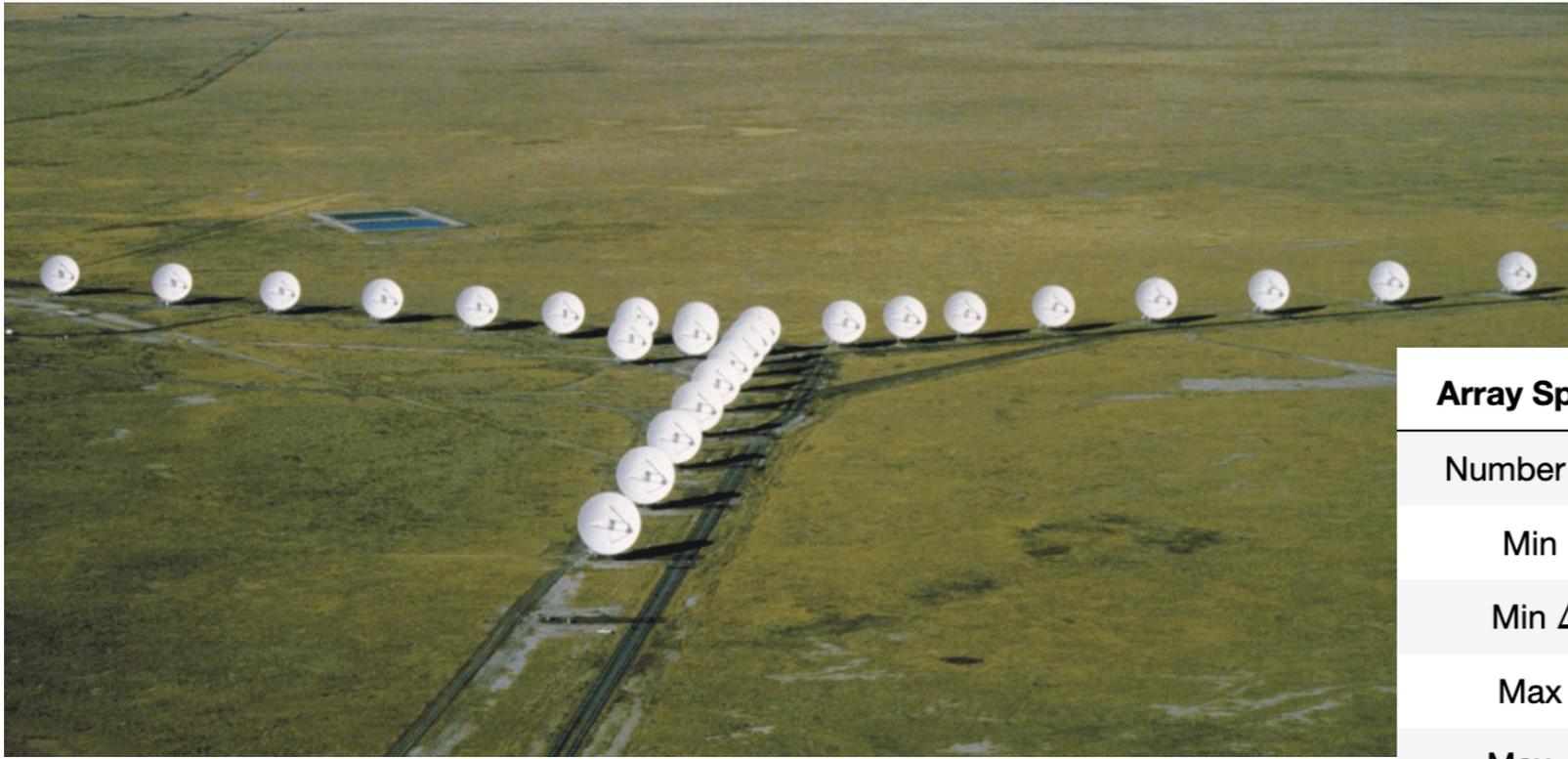
Le radiohéliographe



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



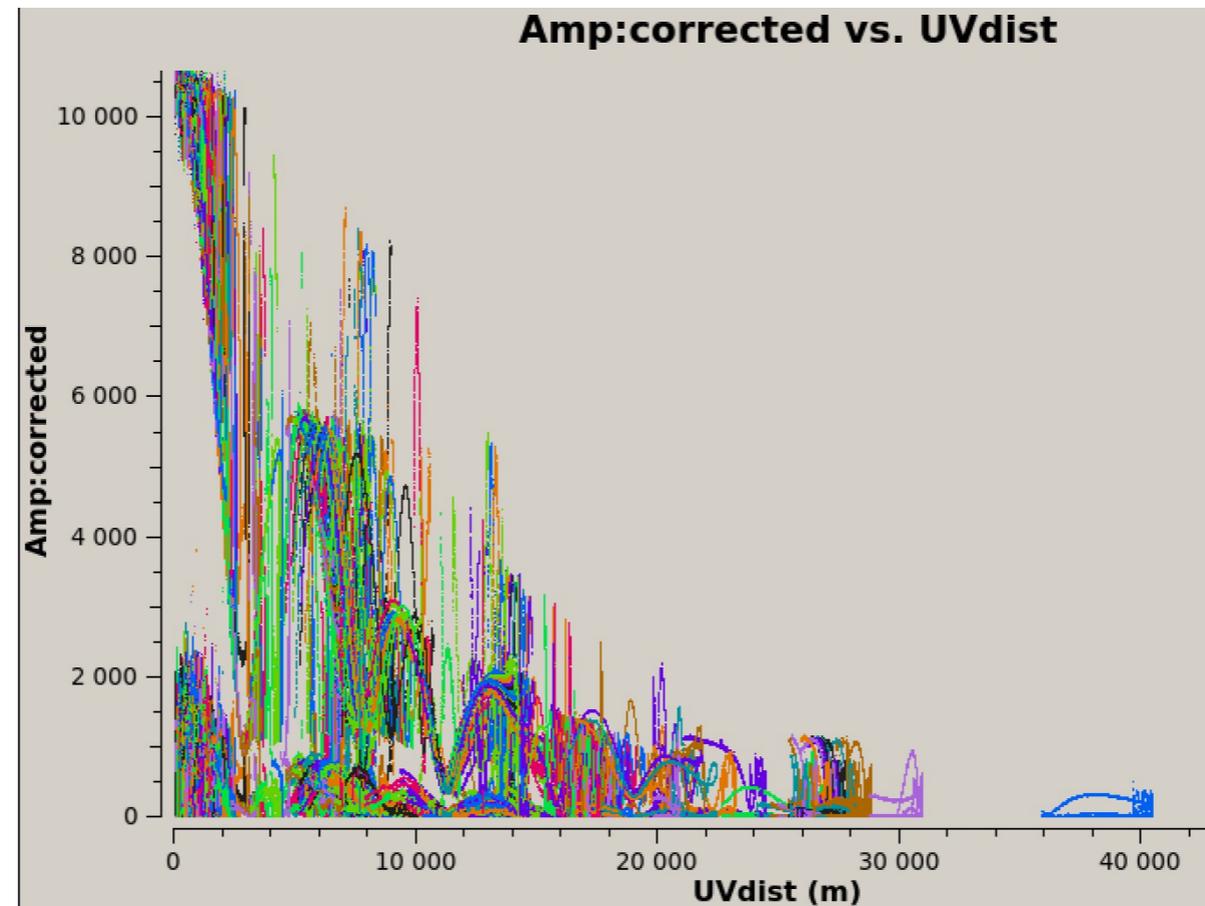
Plan

- 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

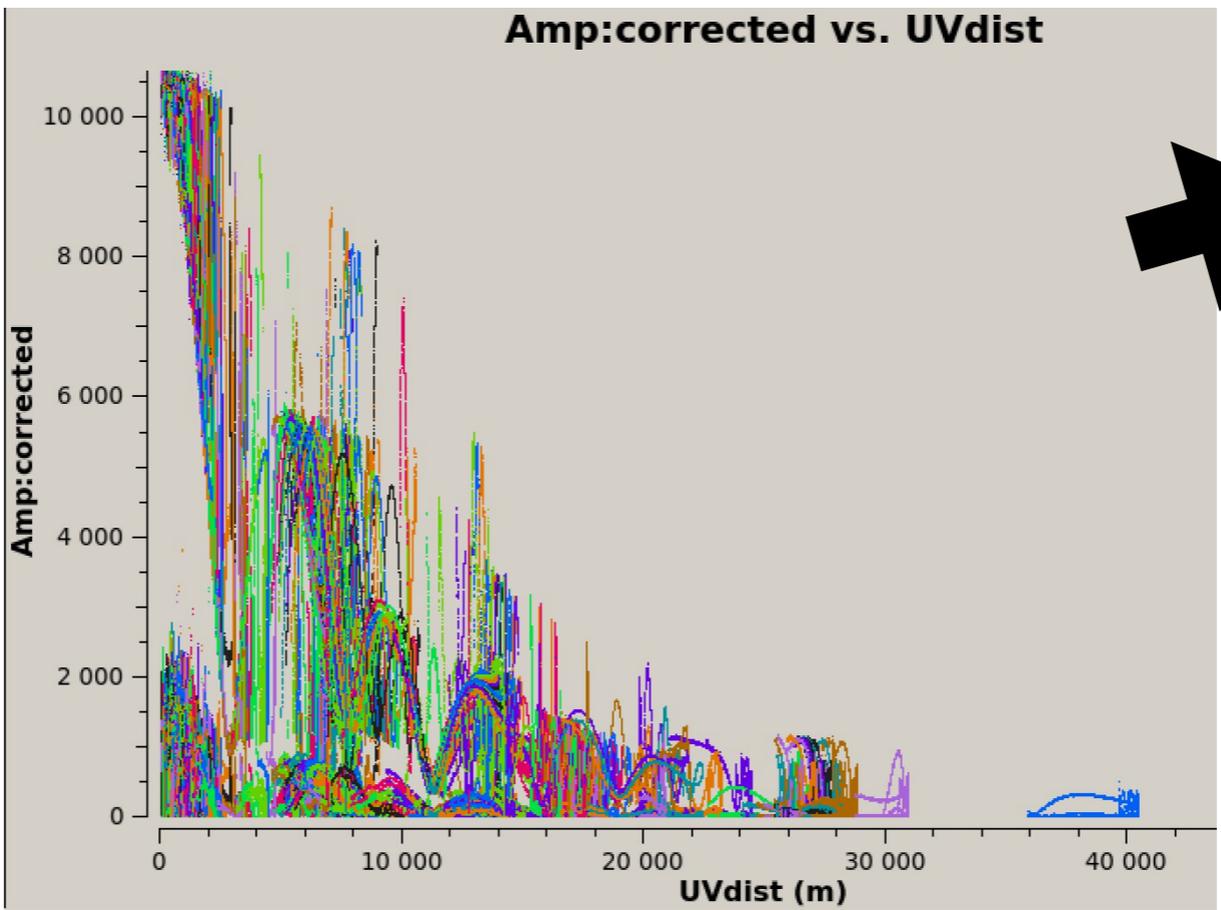
$$r_{uv} = \sqrt{u^2 + v^2}$$



Imagerie par synthèse d'ouverture

Mesures de visibilités complexe en fonction de

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

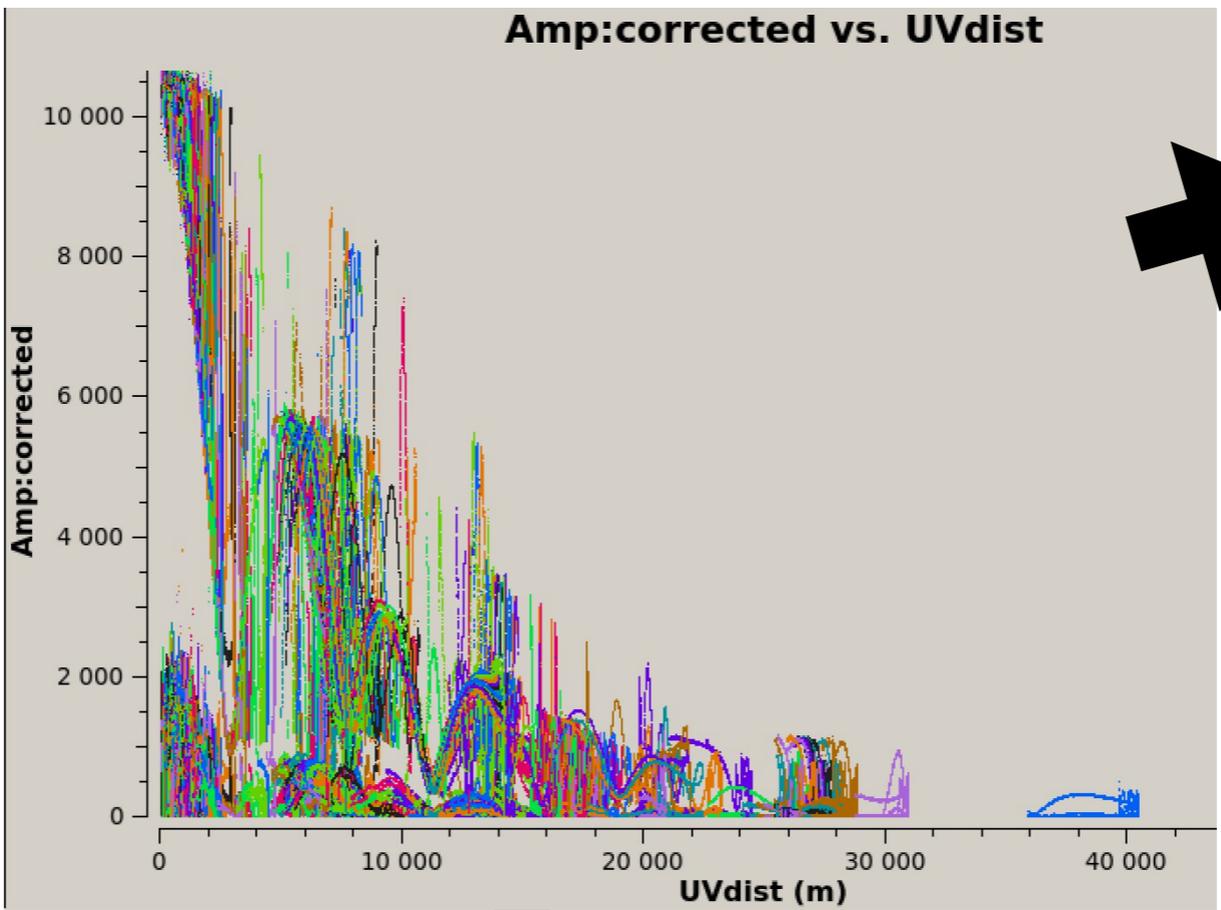


Début de l'interférométrie
interprétation de la fonction de visibilité mesurée

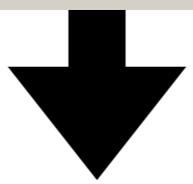
Imagerie par synthèse d'ouverture

Mesures de visibilités complexe en fonction de

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

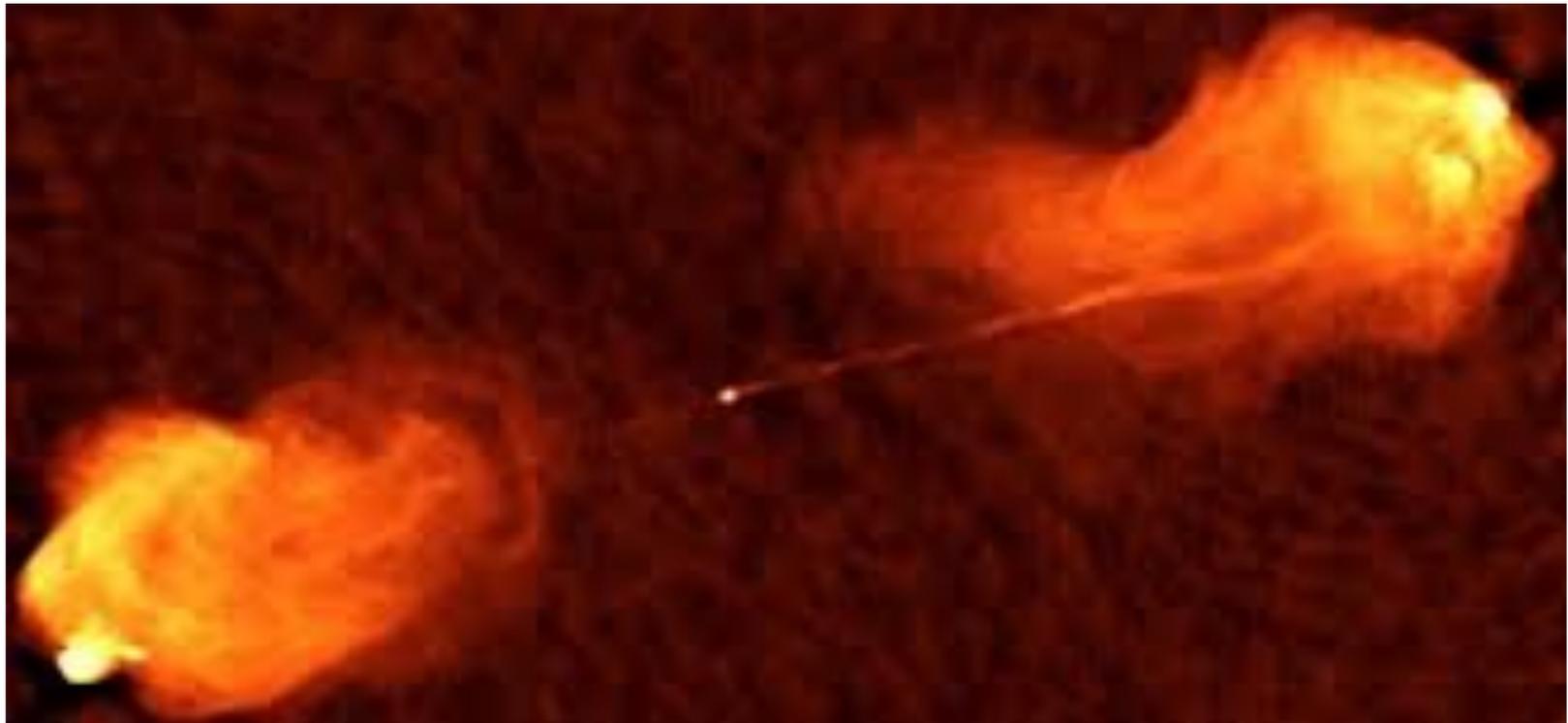


Début de l'interférométrie
interprétation de la fonction de visibilité mesurée



Imagerie + déconvolution

Distribution de brillance

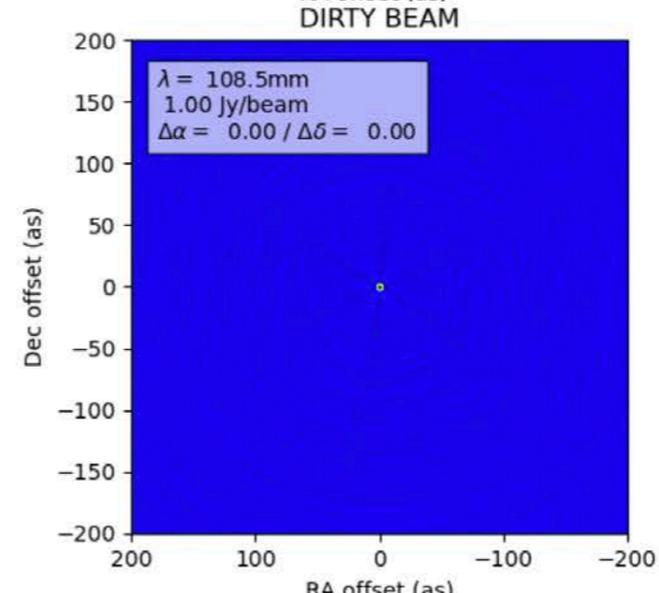
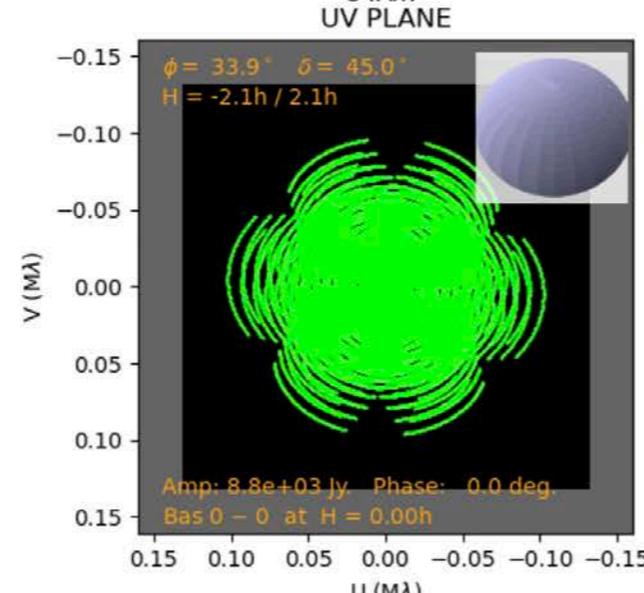
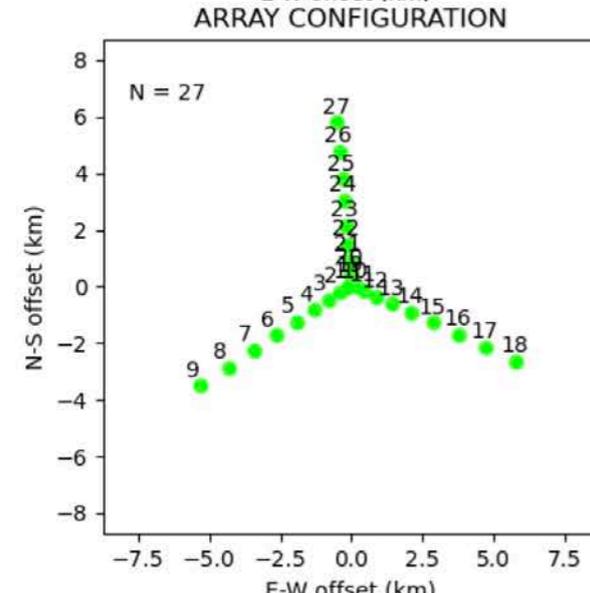
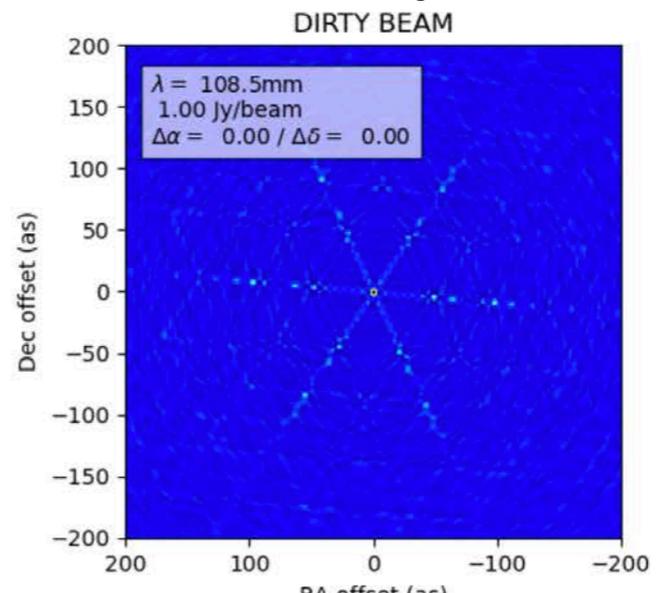
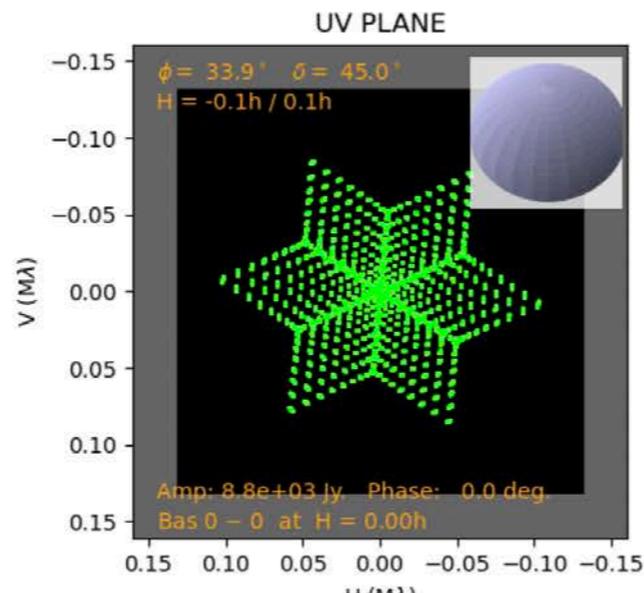
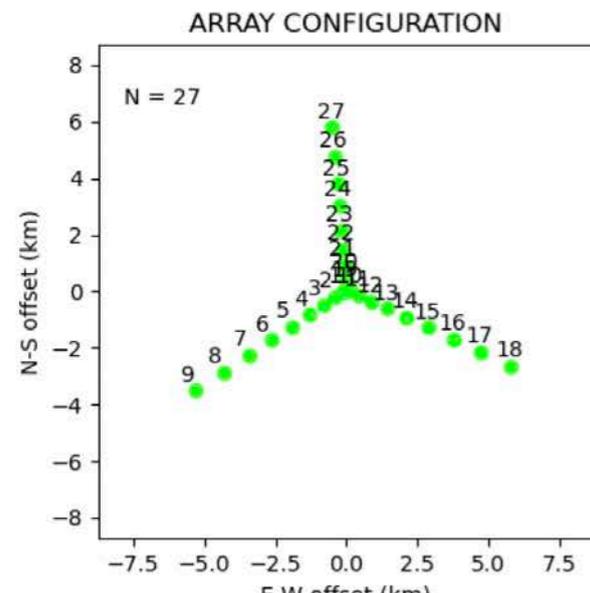


Imagerie par synthèse d'ouverture

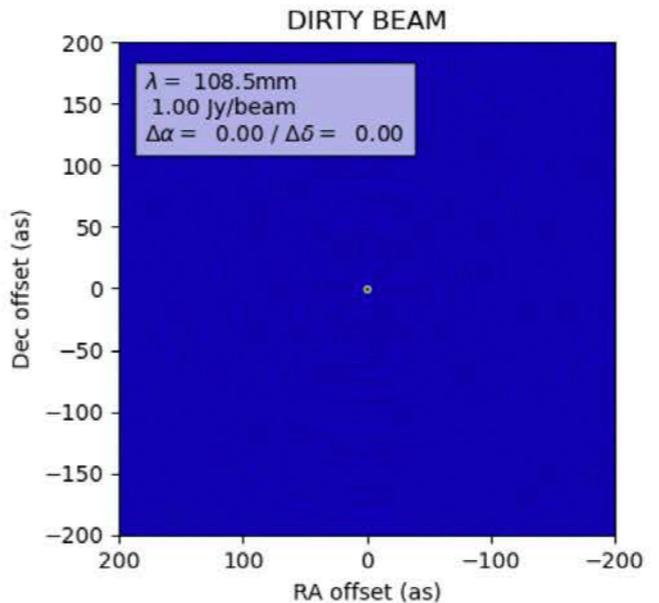
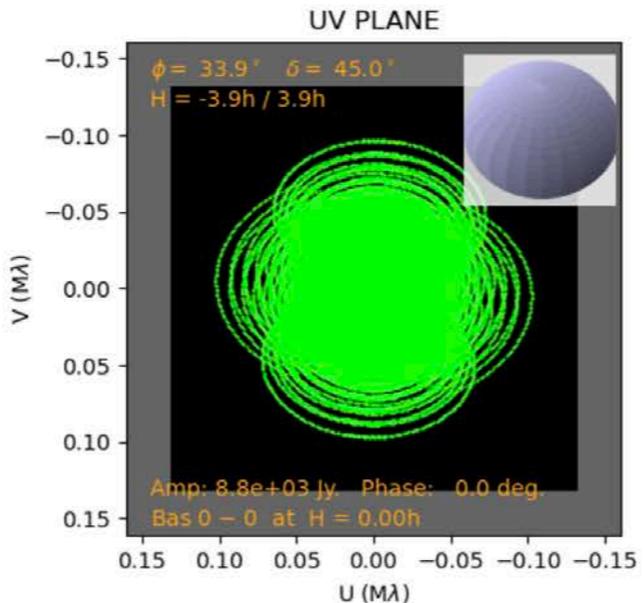
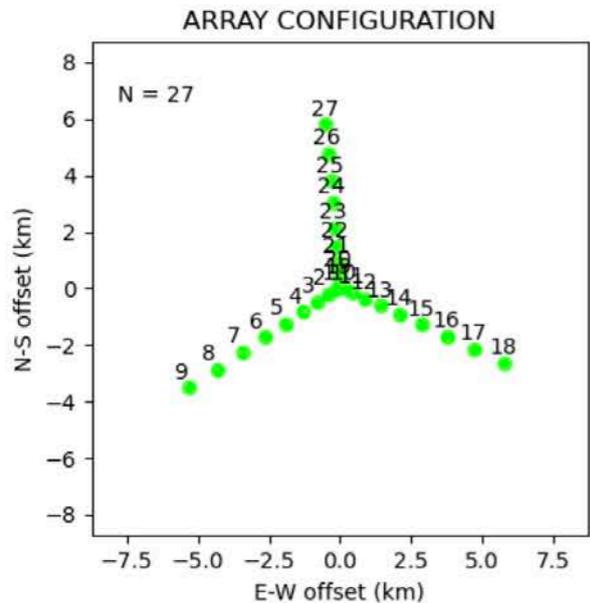
"Super synthèse terrestre" Earth Rotation Synthesis



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 $\downarrow \mathcal{F}^{-1}$

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

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

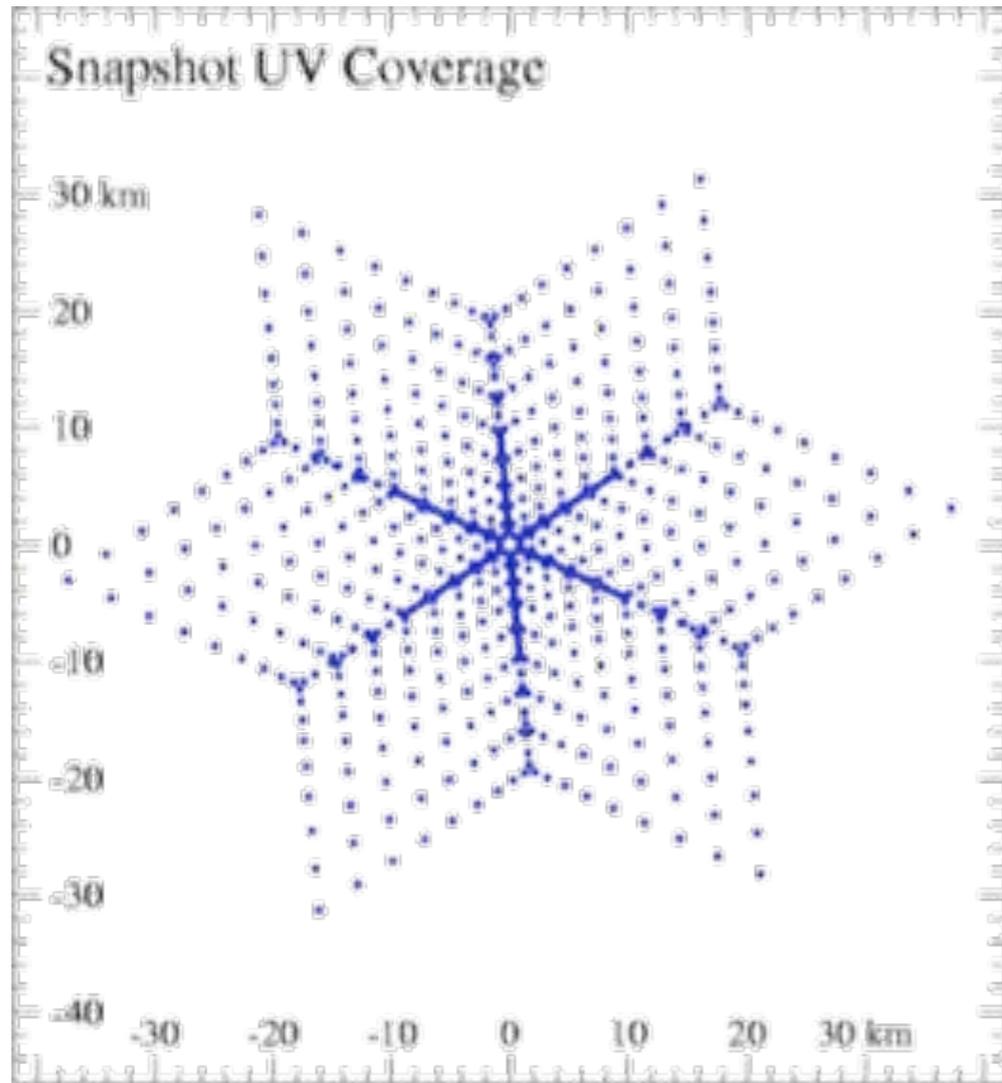
Théorème de
la convolution $\downarrow \mathcal{F}^{-1}$

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

**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

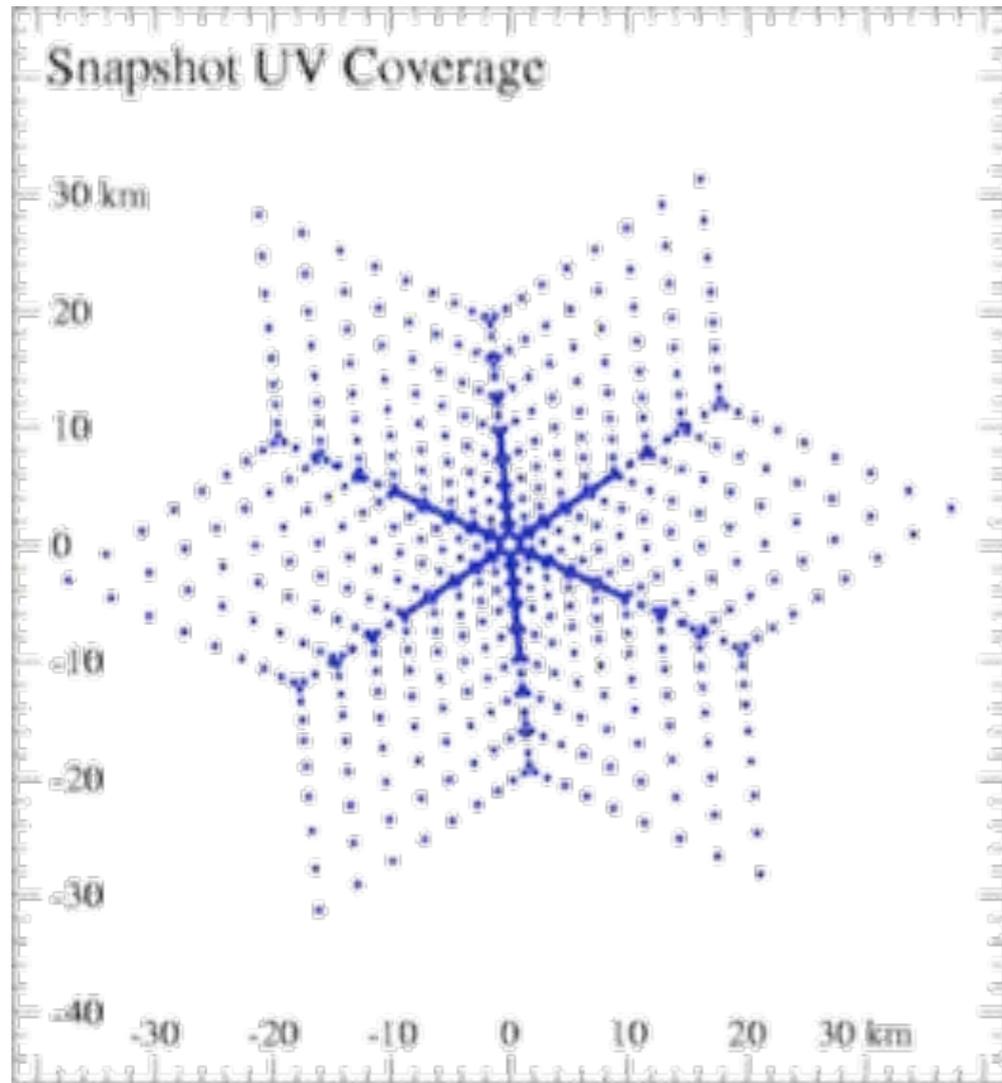


échantillonnage discret du plan de Fourier (u,v) plane

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

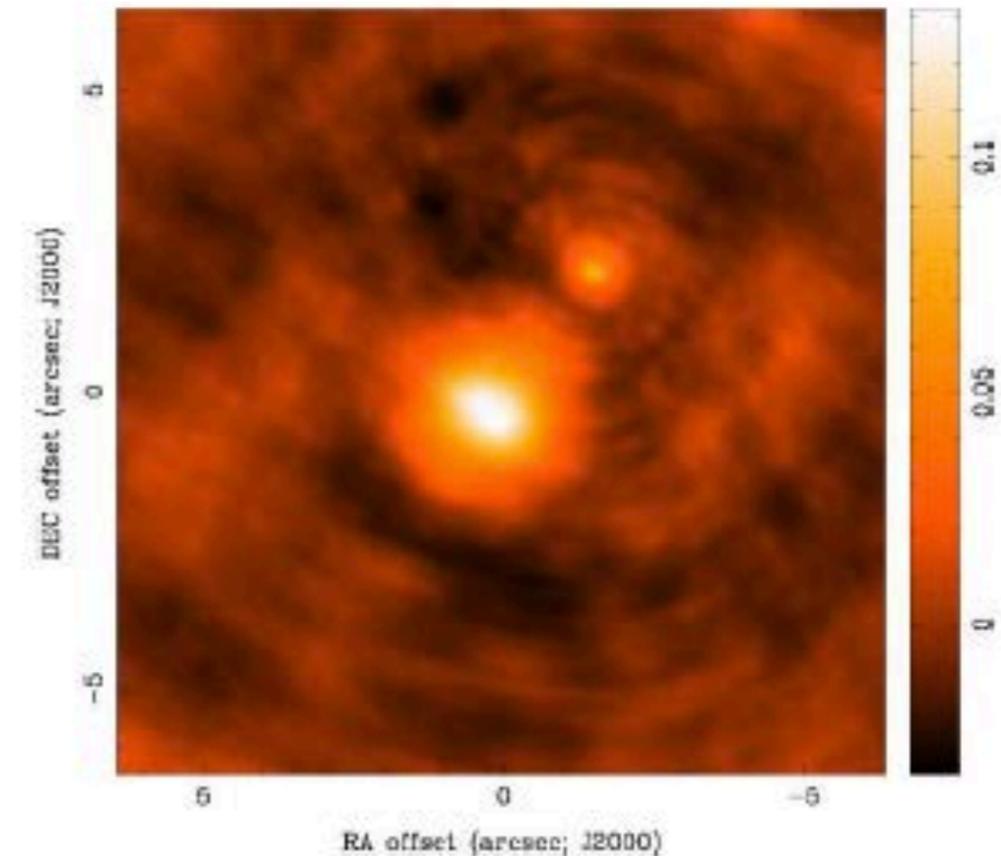


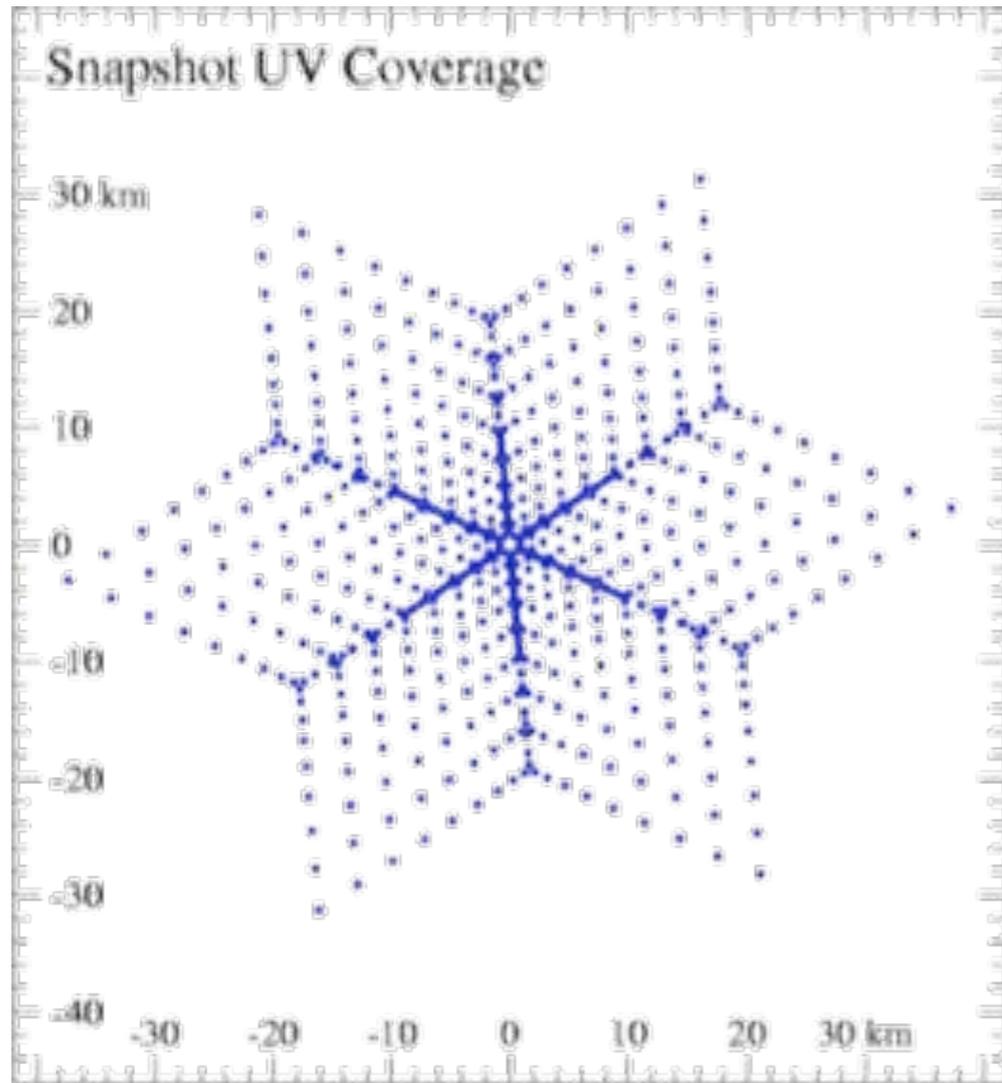
image "initiale" =
« vrai » ciel * PSF =

Image "Dirty"

Imagerie par synthèse d'ouverture

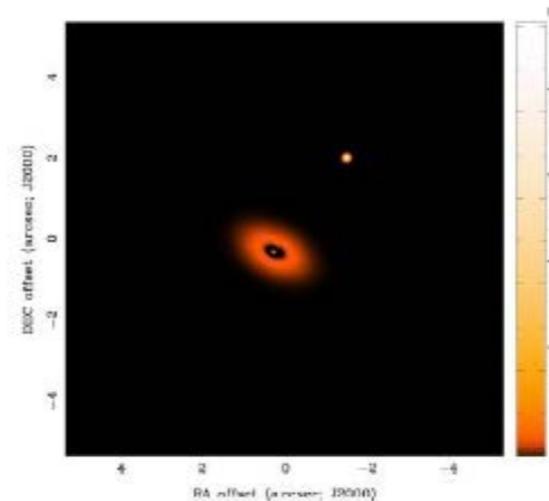
Plan de Fourier

Mesures de visibilité (u,v) instantanées



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

$\sim FT^{-1}$



Espace image

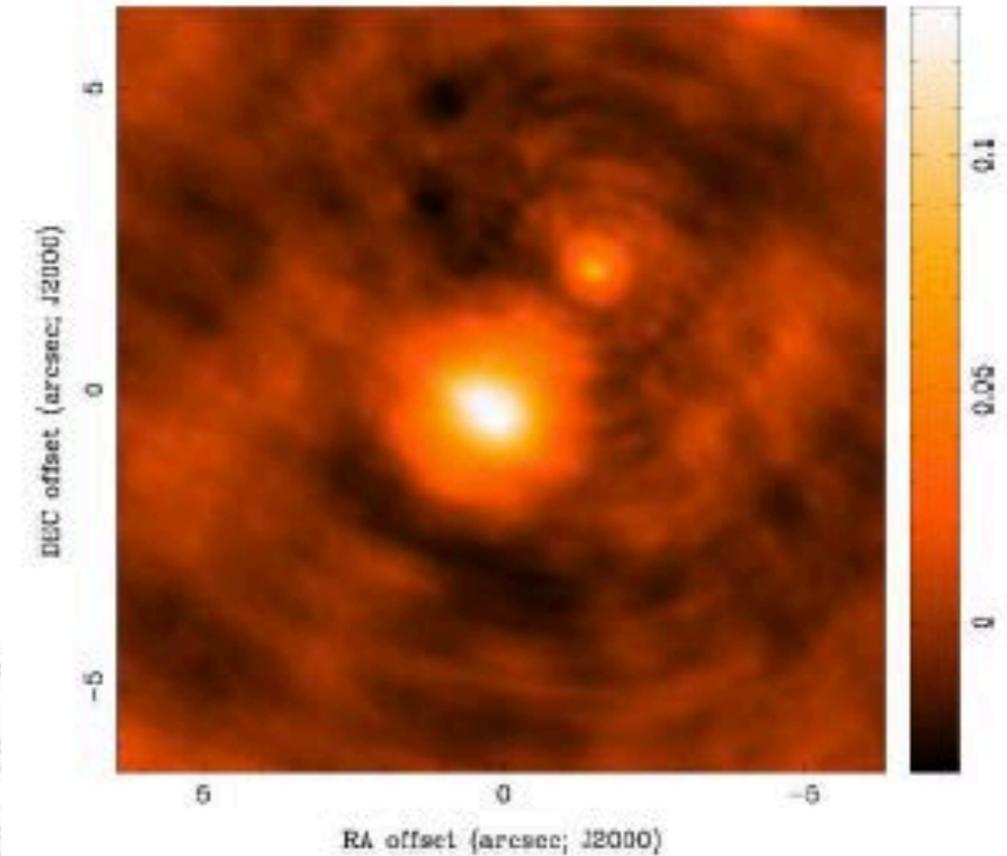


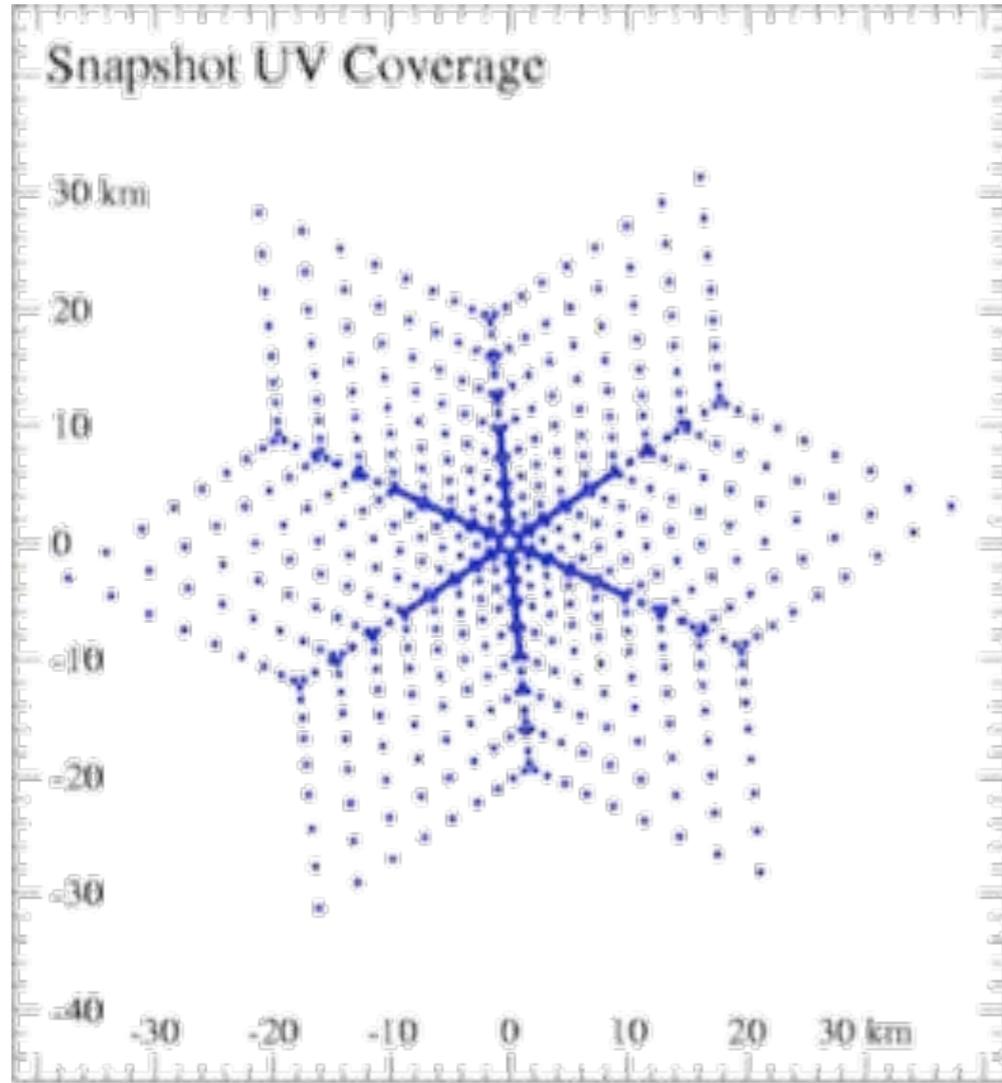
image "initiale" =
« vrai » ciel * PSF =

Image "Dirty"

Imagerie par synthèse d'ouverture

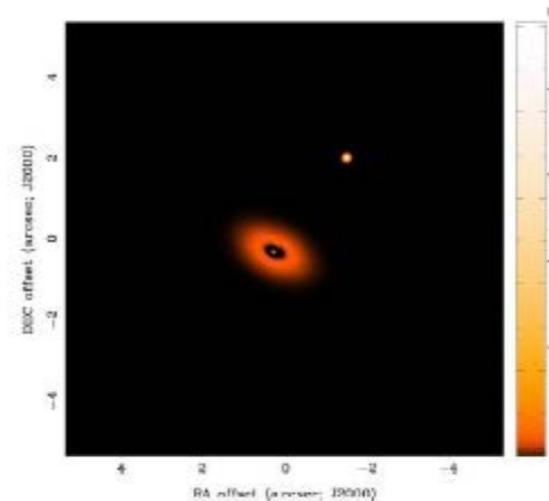
Plan de Fourier

Mesures de visibilité (u,v) instantanées



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

$\sim FT^{-1}$



Espace image

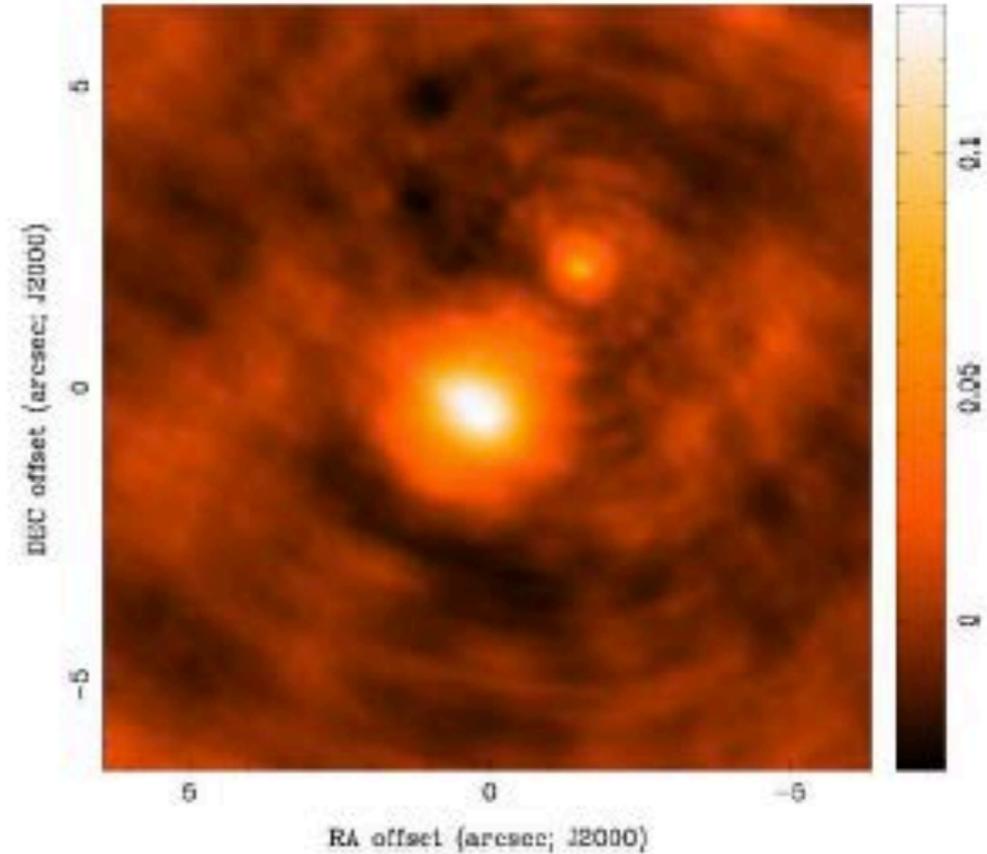


image "initiale" =
« vrai » ciel * PSF =

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**

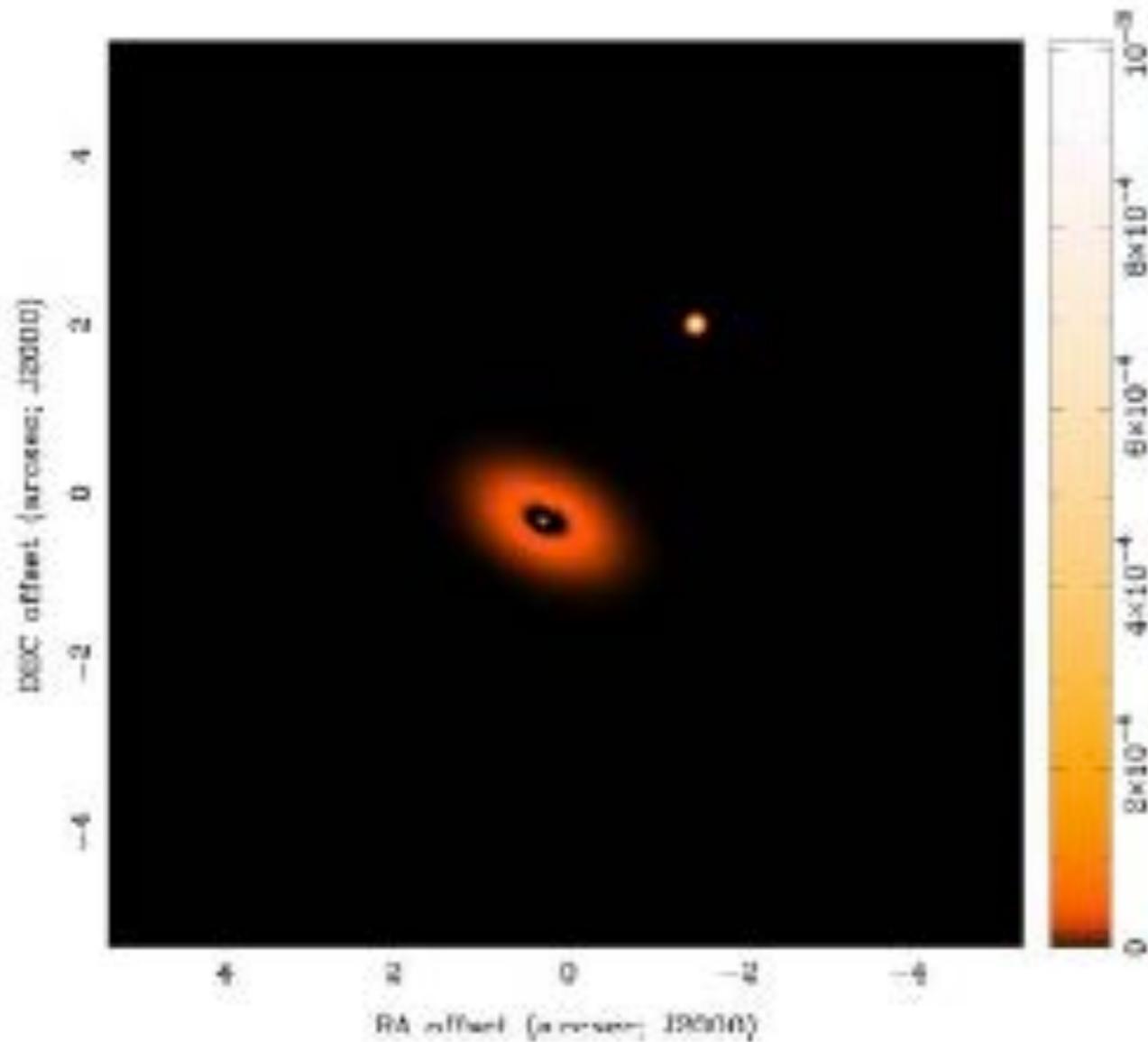
+ tous les effets dépendants de la direction (DDE) (Beam, ionosphere...)

Plan

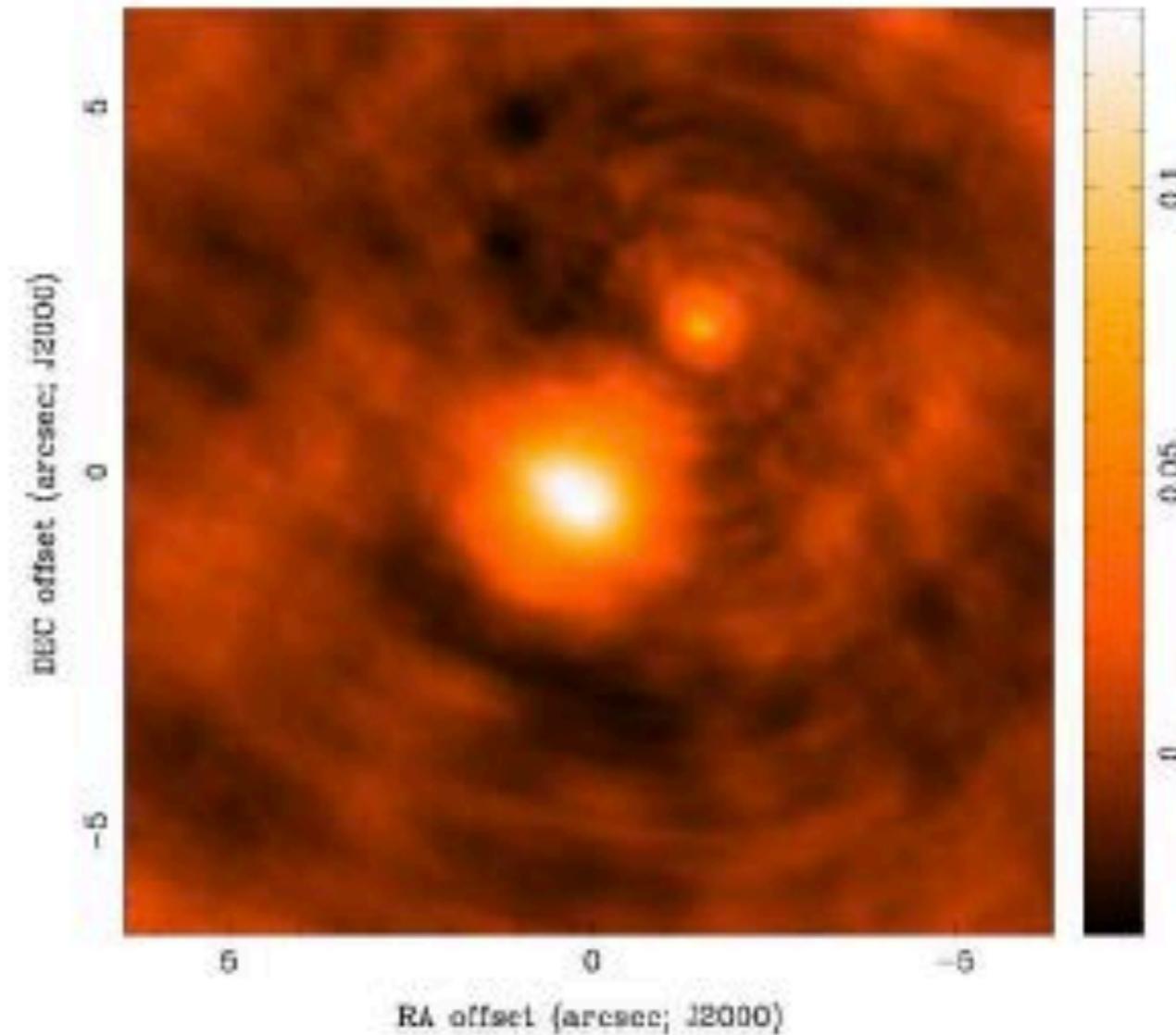
- Pourquoi construire des réseaux d'antennes ?
- Principe de la mesure par interférométrie
- Imagerie
- Déconvolution
- Tour d'horizon de l'imagerie radio

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

Réalité "terrain"



Inversion brutale des visibilité



- * Mesure continue
- * Résolution infinie

- * 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

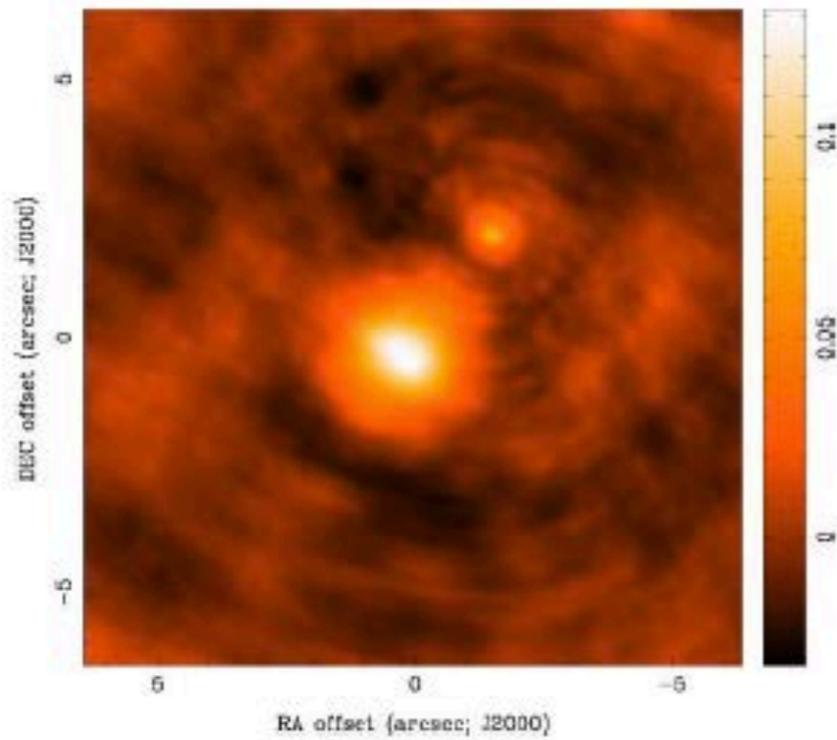
Pour $i < N_{\max}$:

- 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

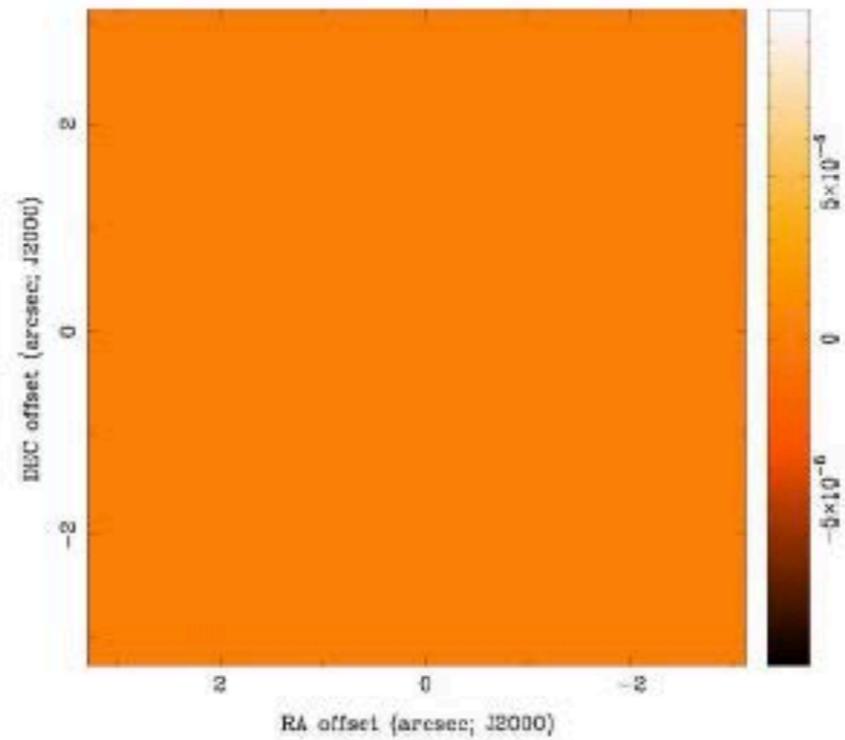
Déconvolution - Algorithme CLEAN

N_{iter} = 0

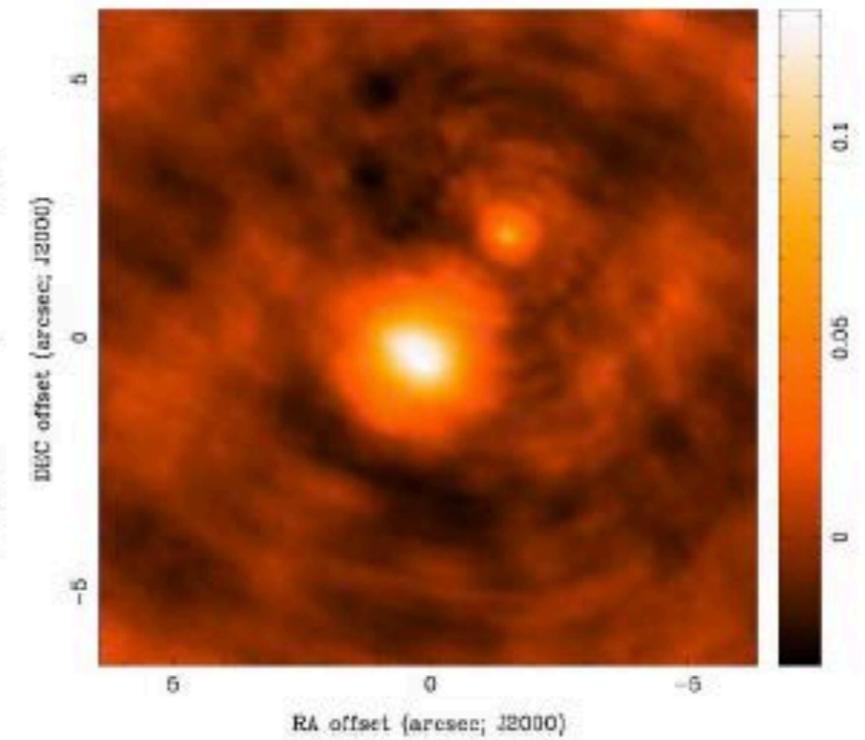
$T^D(l,m)$



0 Clean Components



residual map

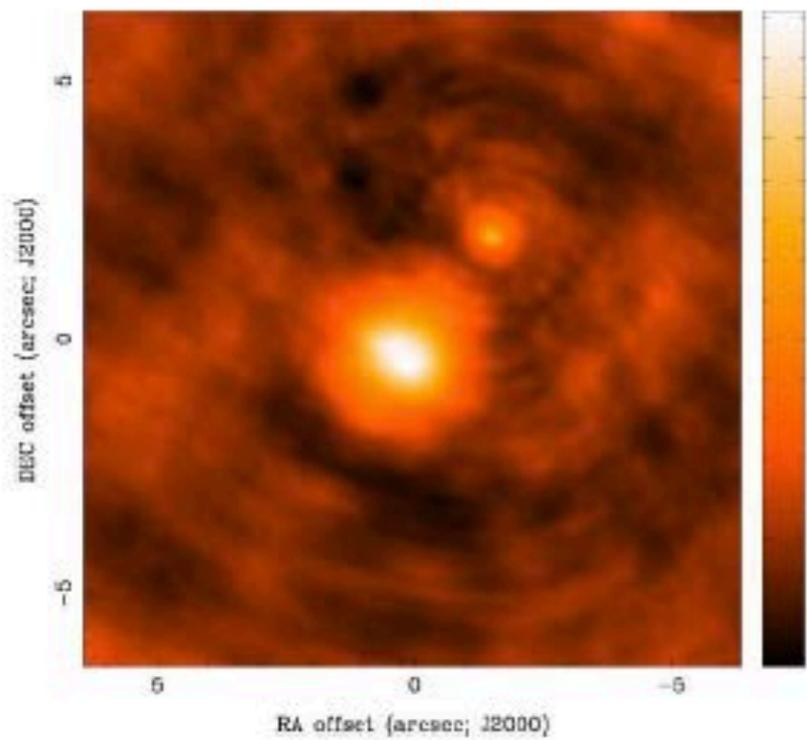


Images from D. Wilner, NRAO

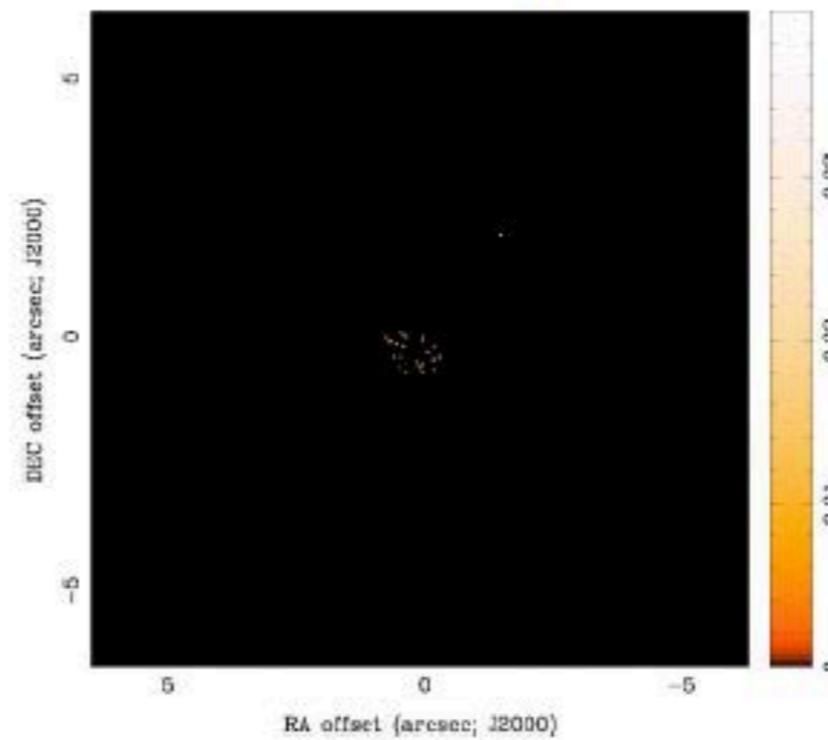
Déconvolution - Algorithme CLEAN

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

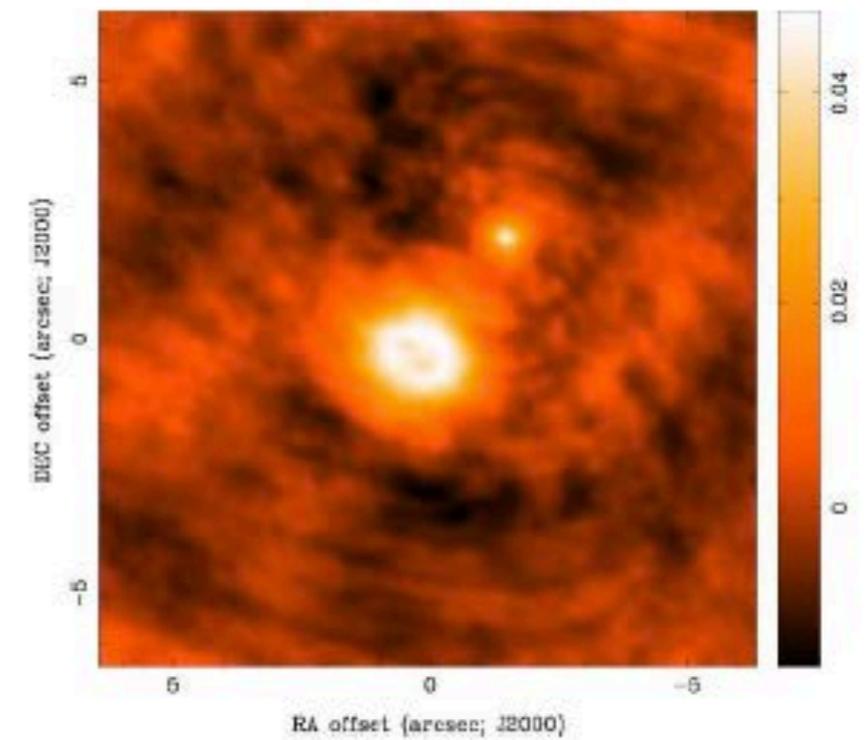
$T^D(l,m)$



30 Clean Components



residual map

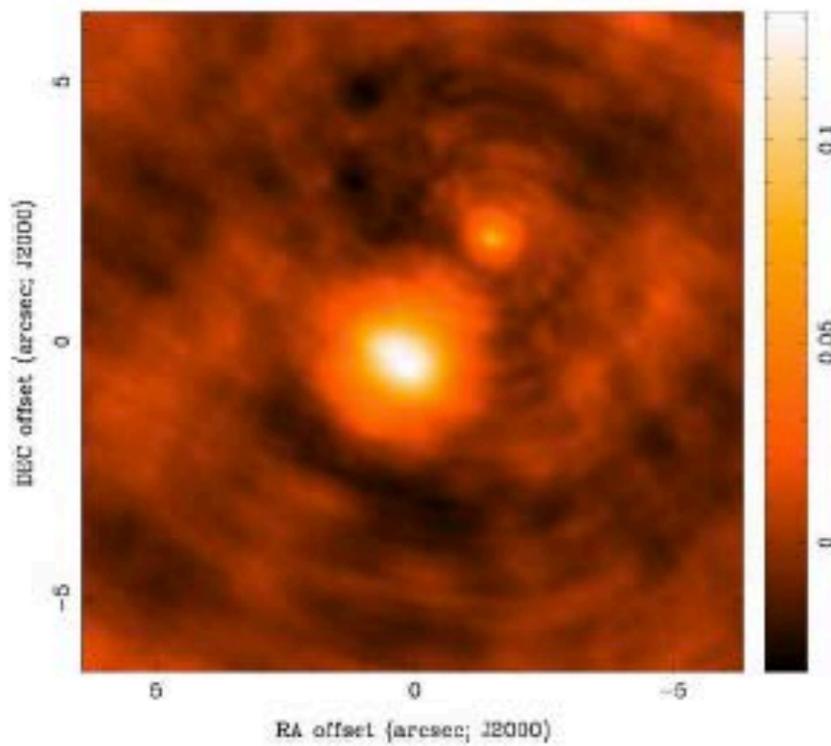


Images from D. Wilner, NRAO

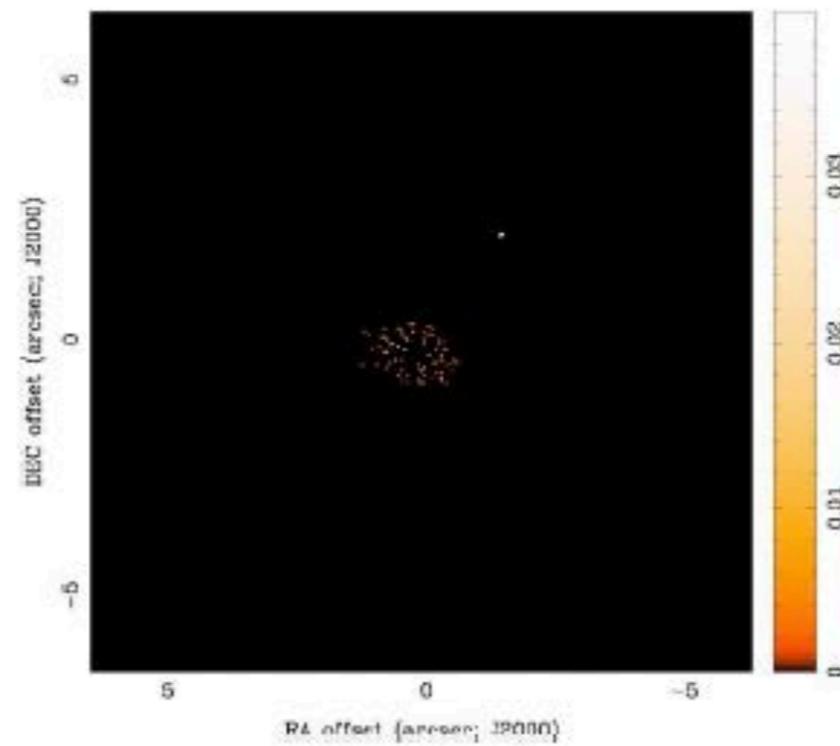
Déconvolution - Algorithme CLEAN

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

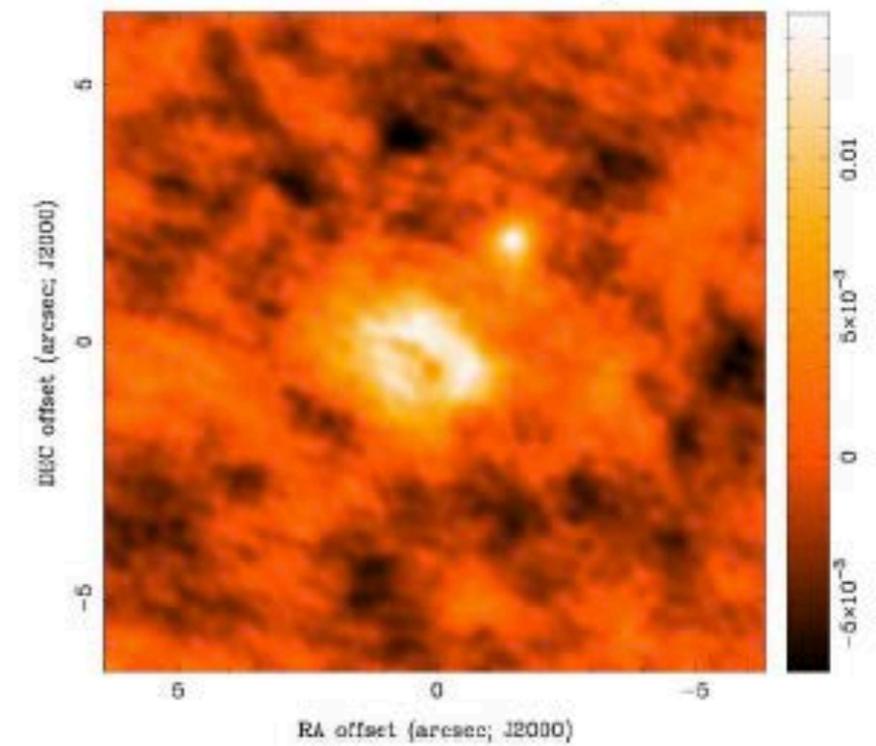
$T^D(l,m)$



100 Clean Components



residual map

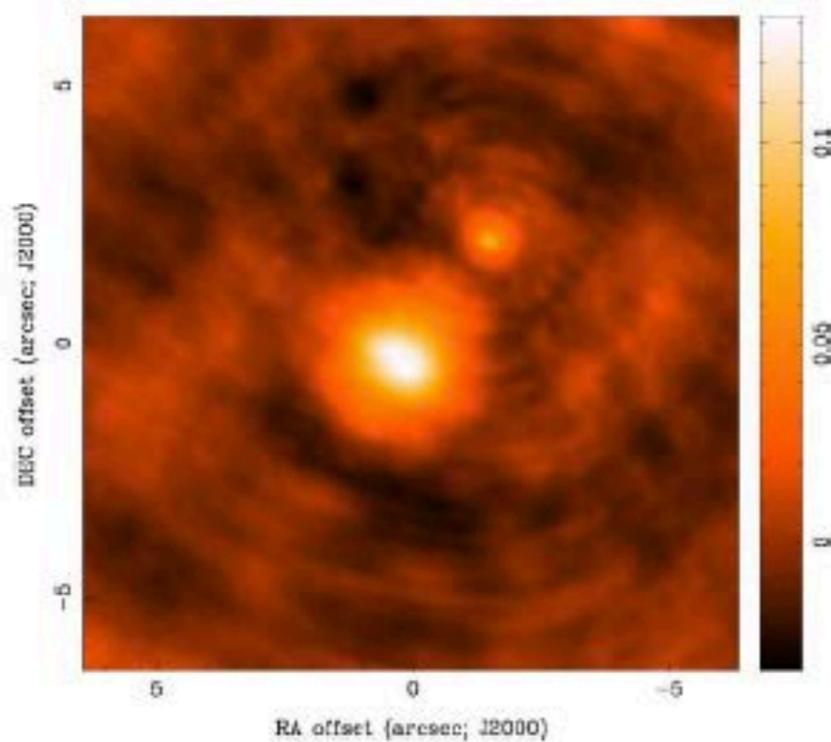


Images from D. Wilner, NRAO

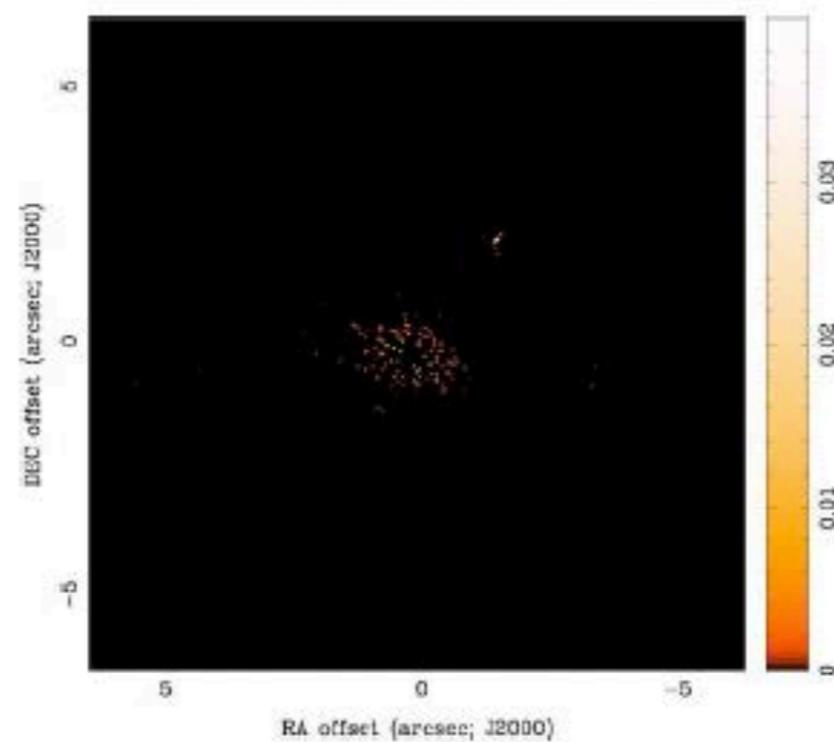
Déconvolution - Algorithme CLEAN

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

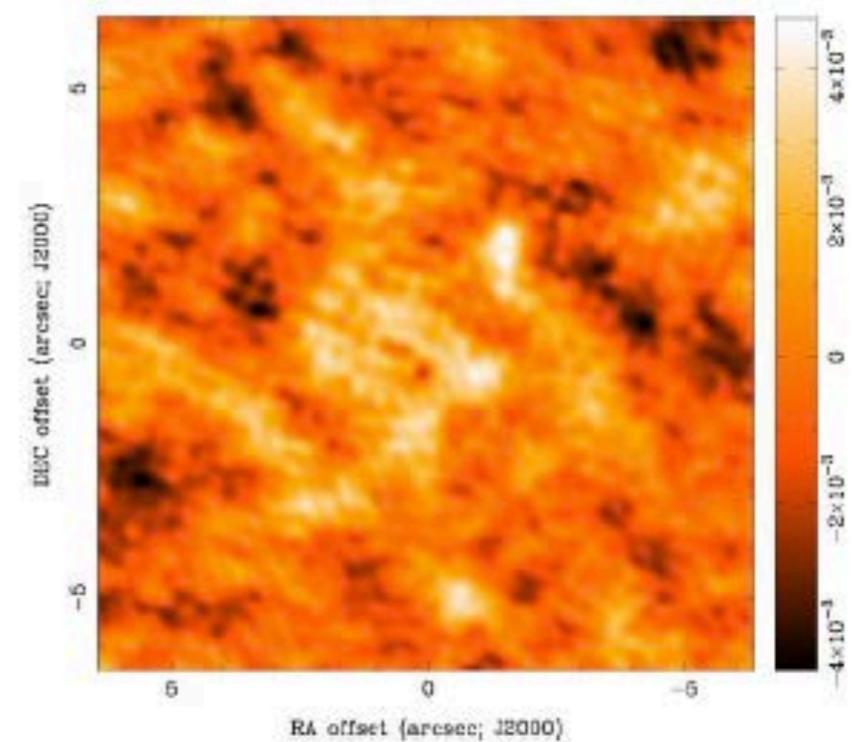
$T^D(l,m)$



300 Clean Components



residual map

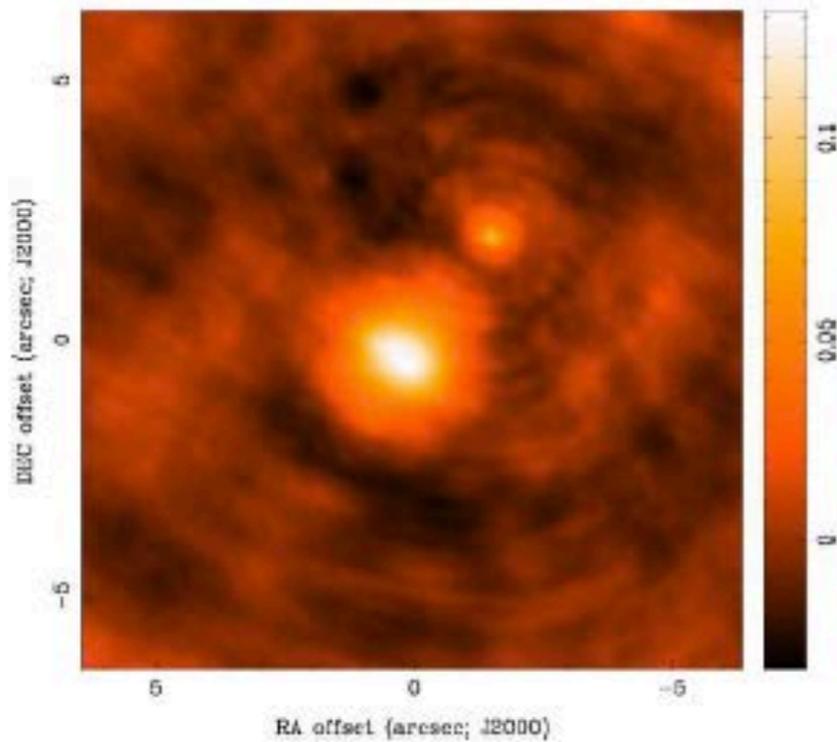


Images from D. Wilner, NRAO

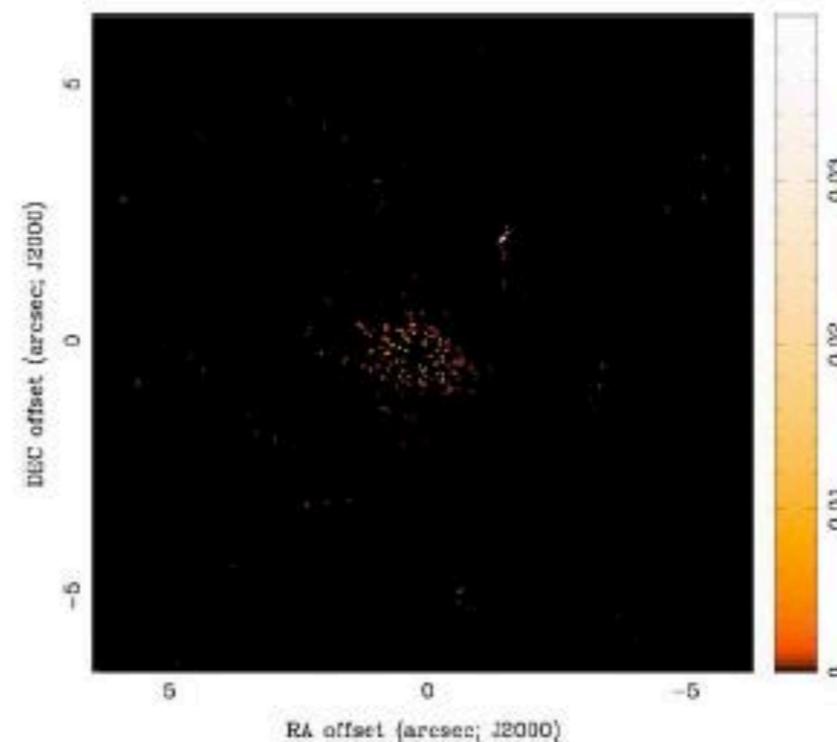
Déconvolution - Algorithme CLEAN

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

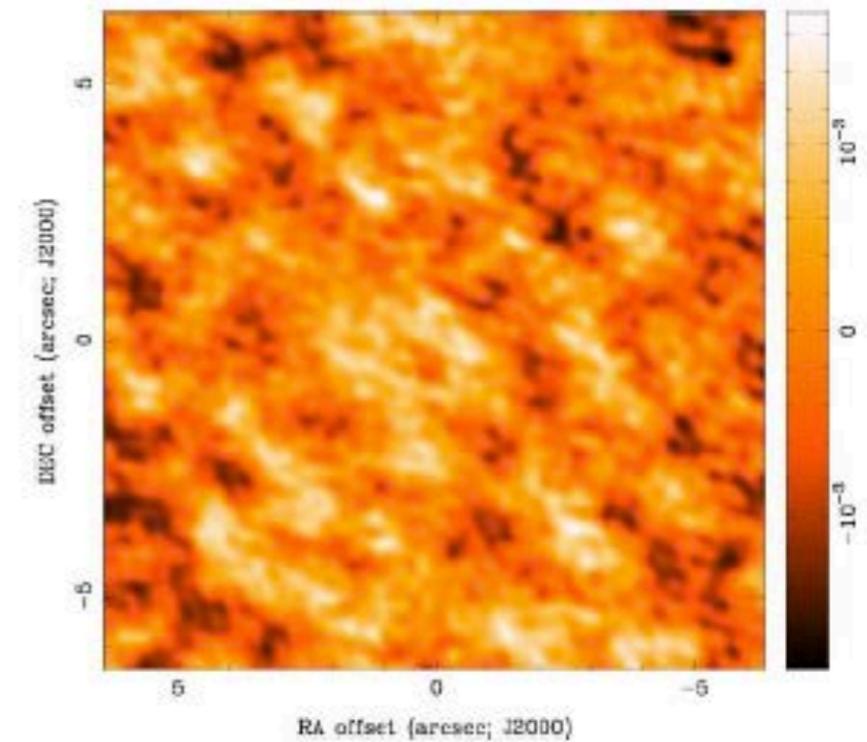
$T^D(l,m)$



583 Clean Components



residual map



Images from D. Wilner, NRAO

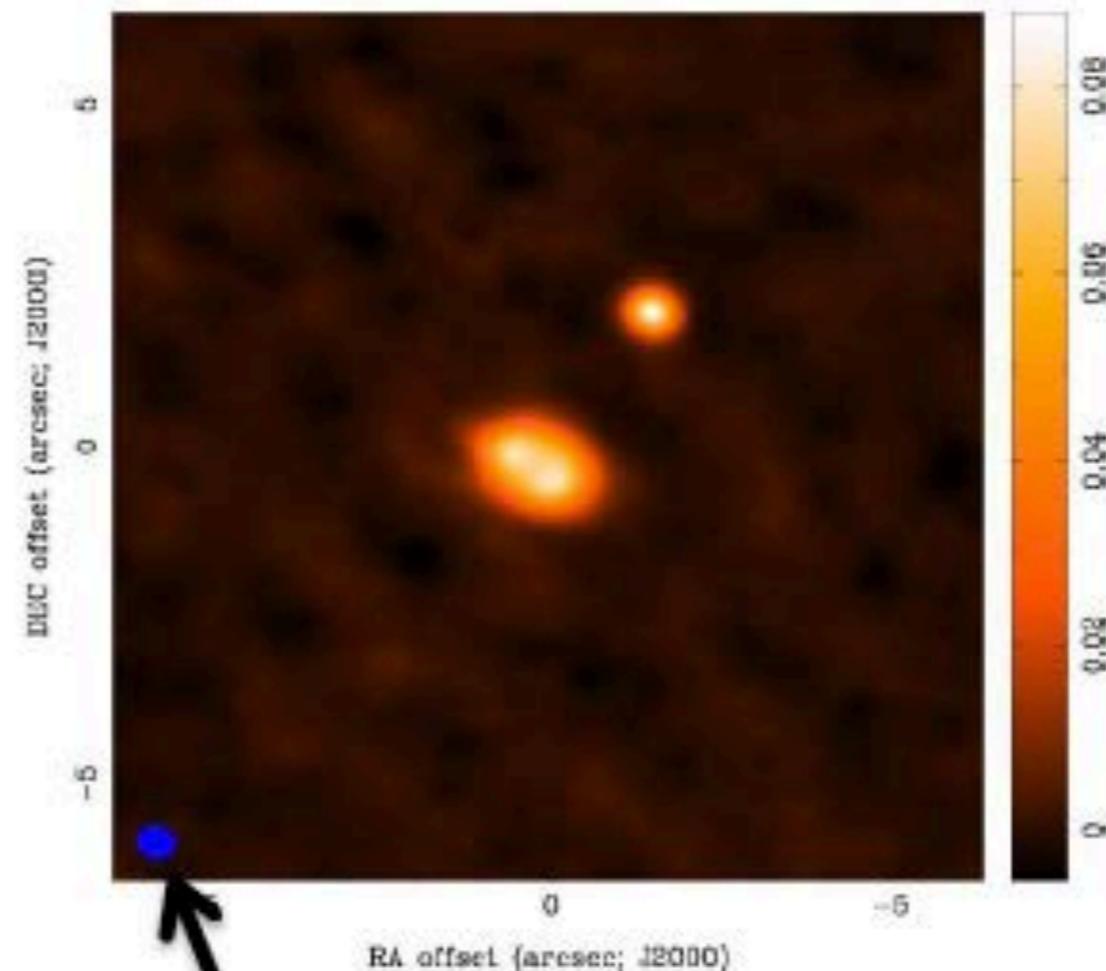
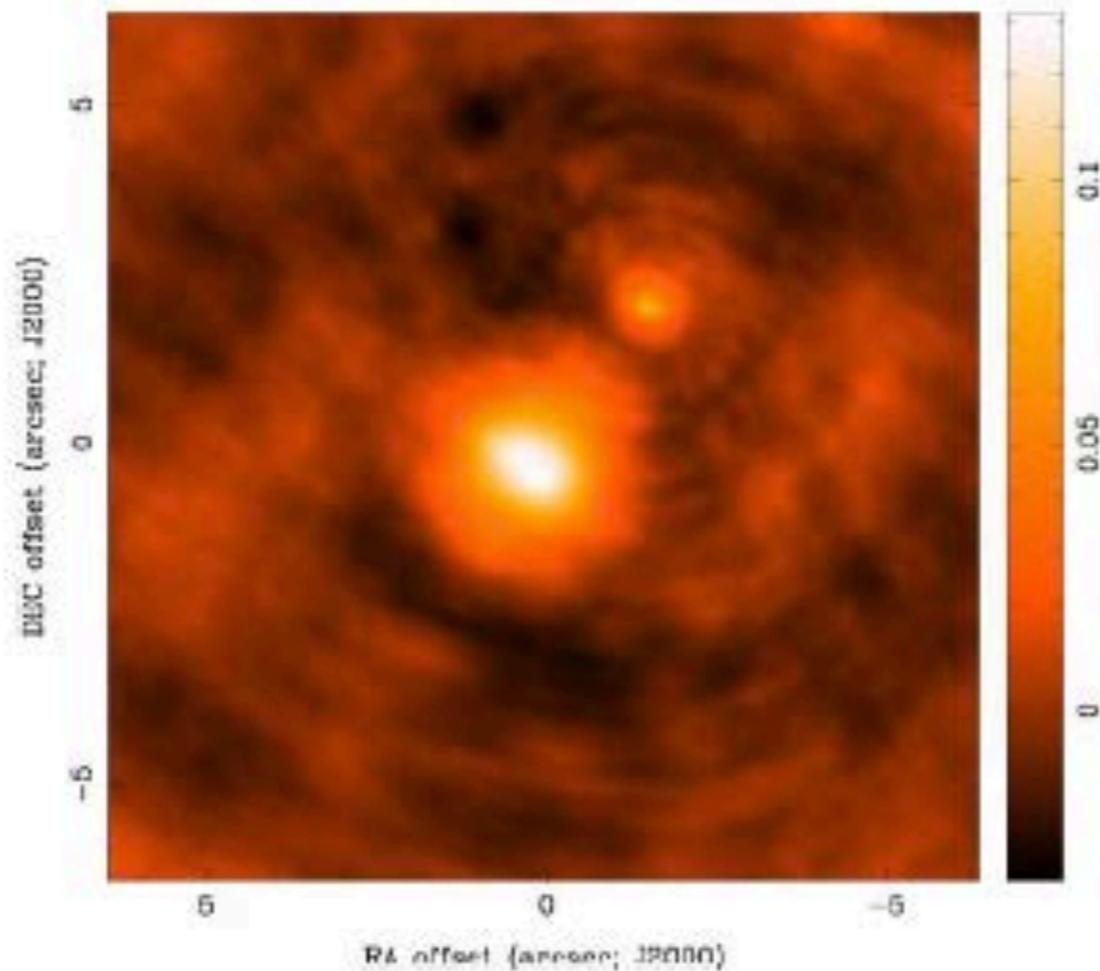
Déconvolution - Algorithme CLEAN

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

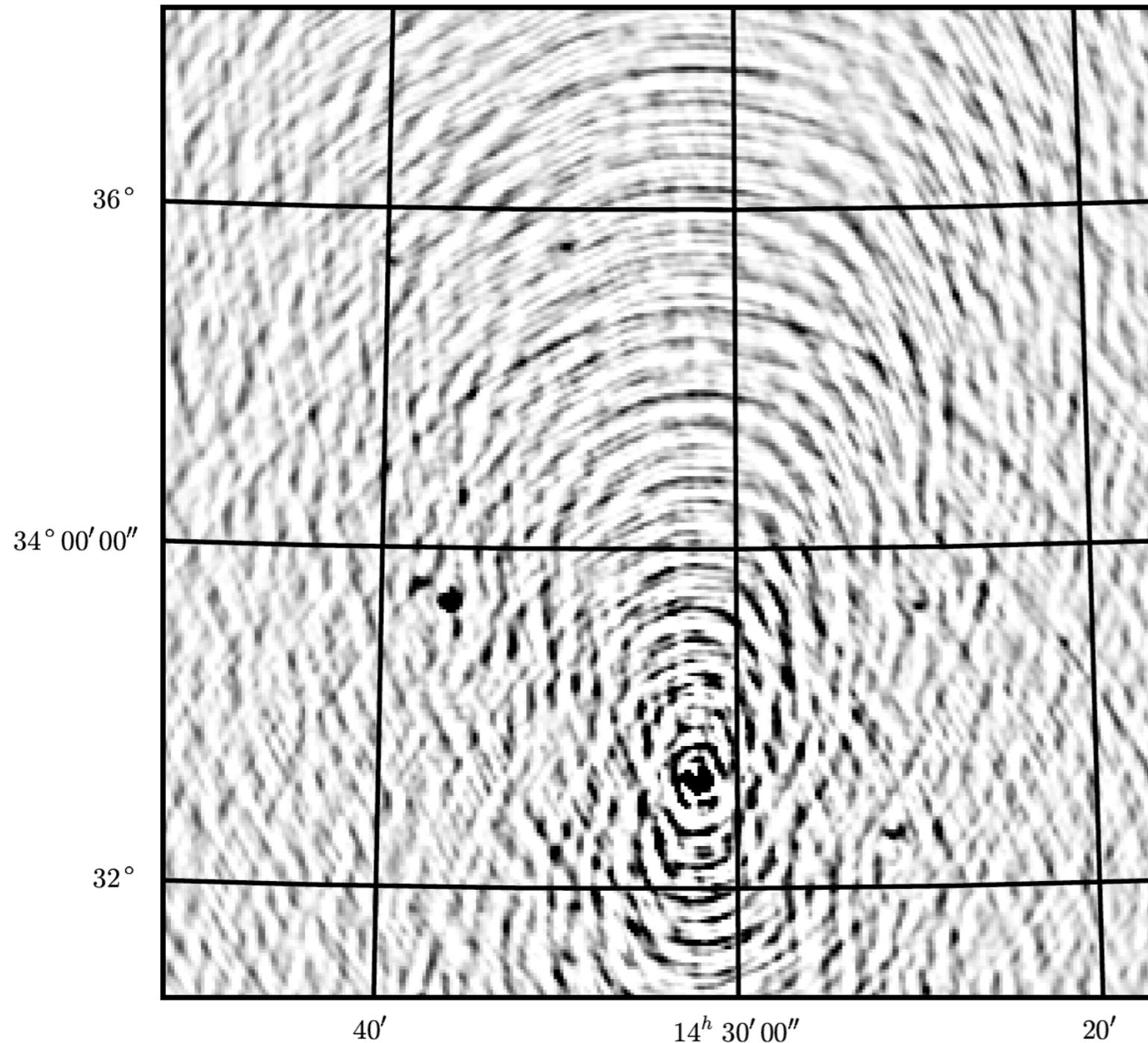
- ~40 ans de développement en déconvolution

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...

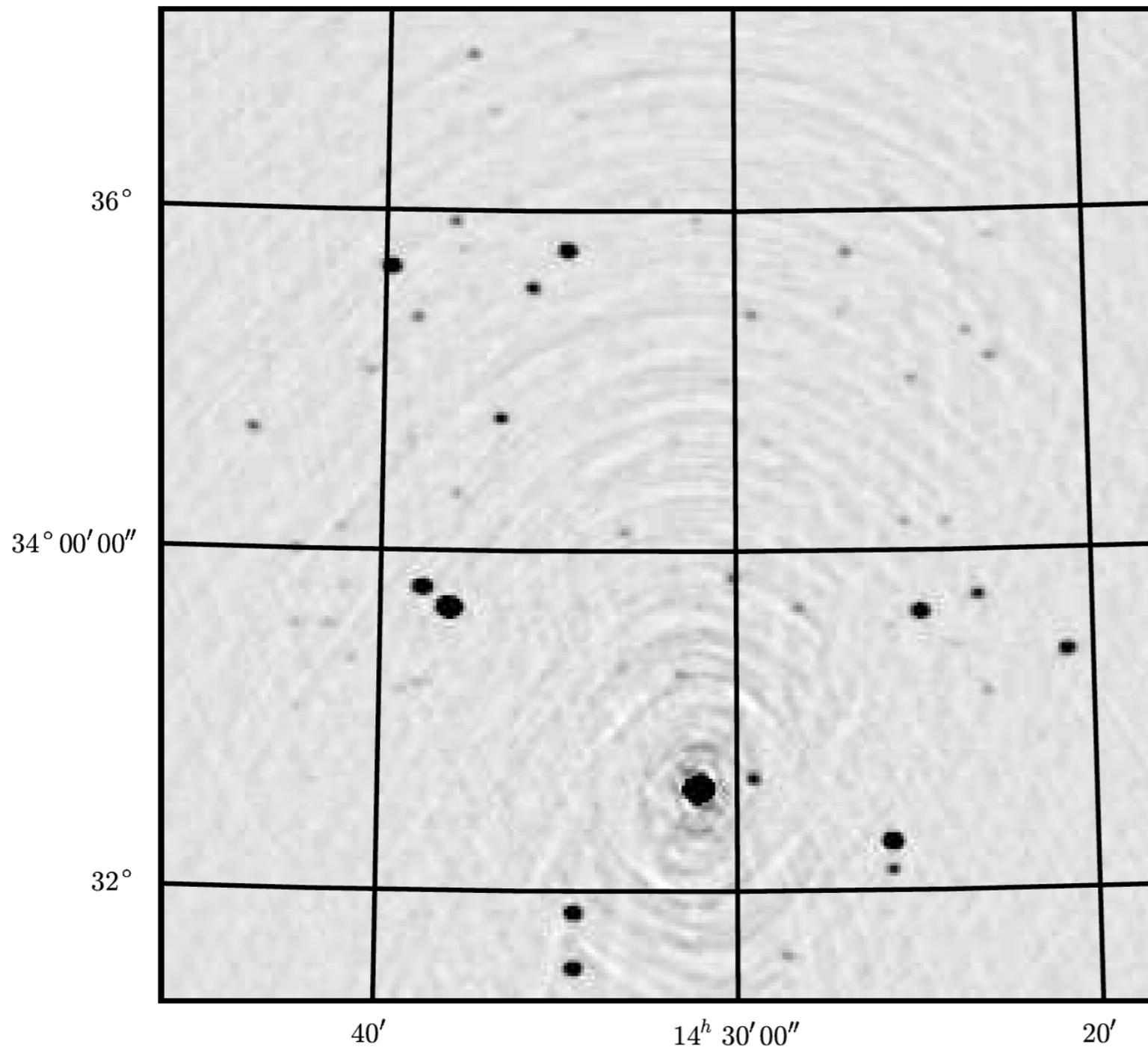
- Aujourd'hui, prise en compte des **effets dépendants de la direction** *Imagerie ~ Étalonnage*

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

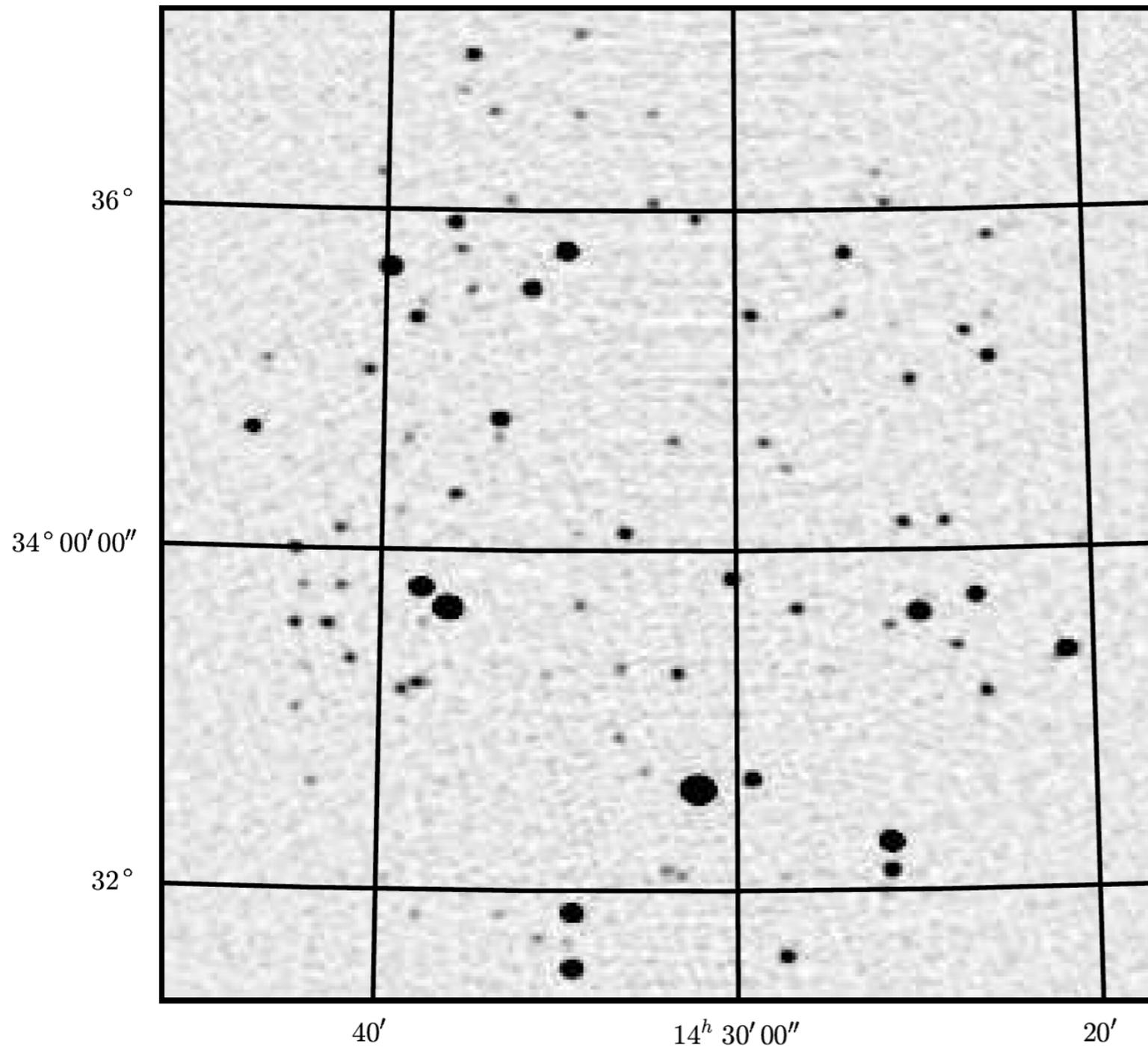
Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~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")**

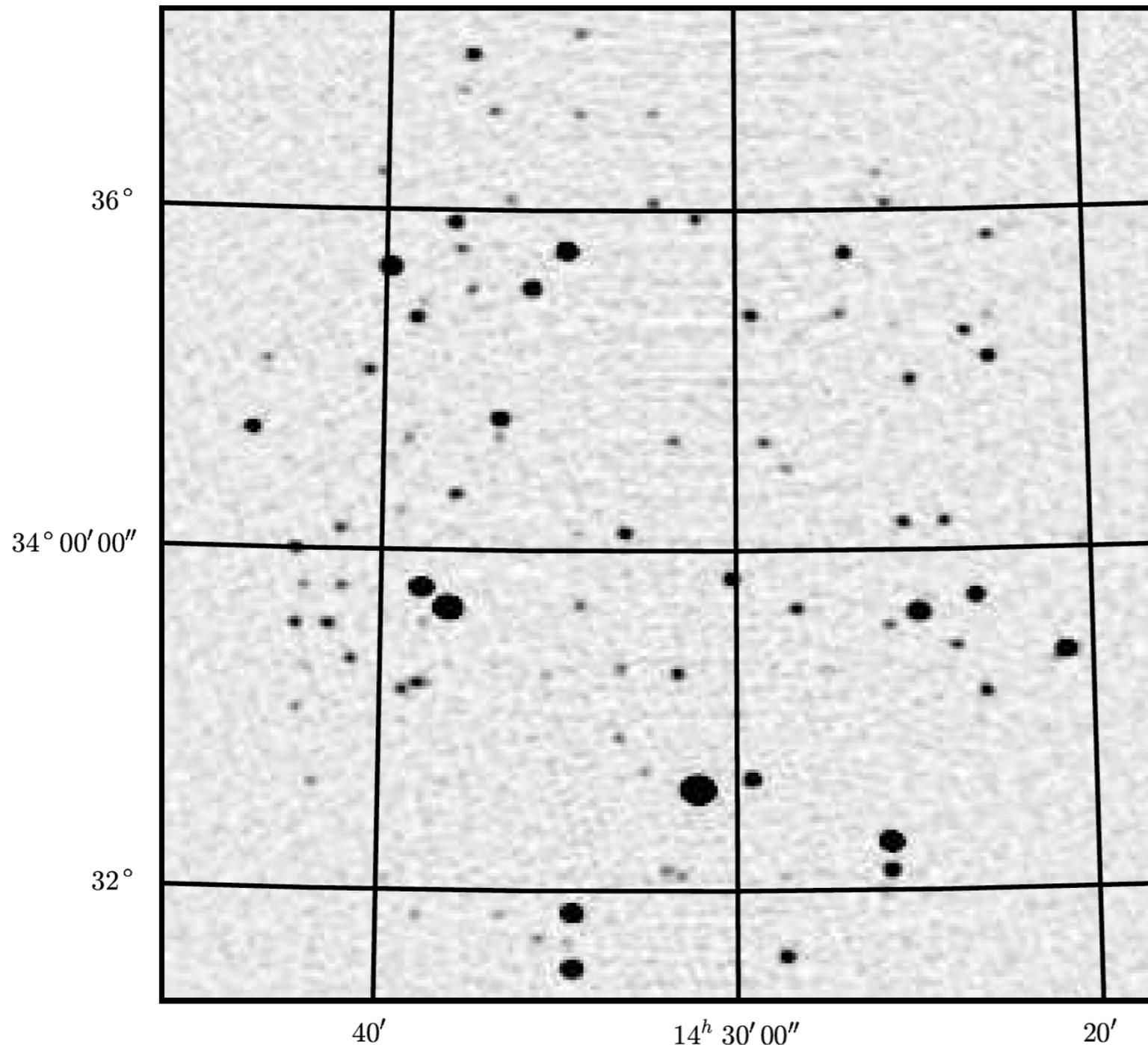
Déconvolution - Algorithme au-delà de CLEAN

- ~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" $\neq 0$)**

+

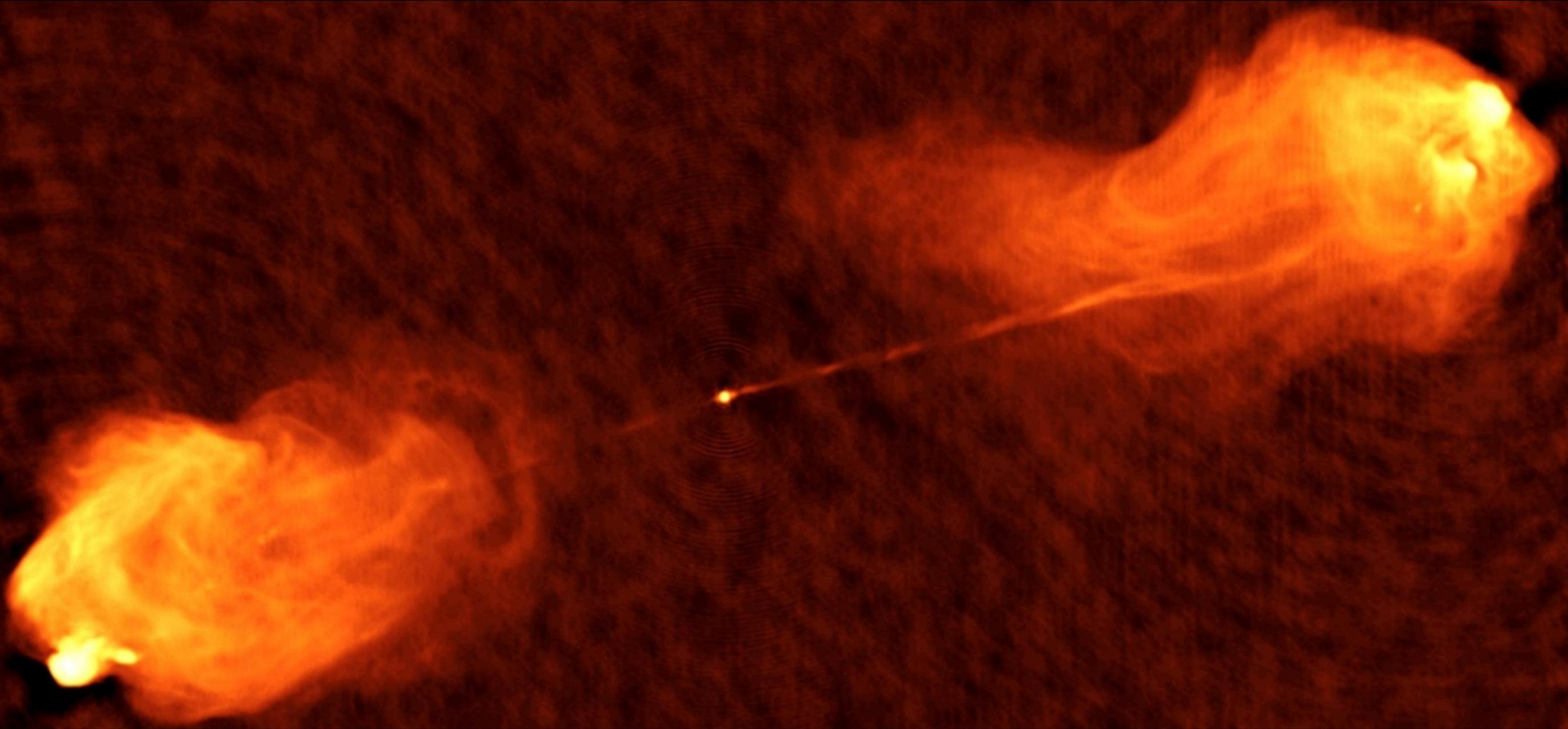
**Correction de la réponse
de l'antenne élémentaire
("E-term")**

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

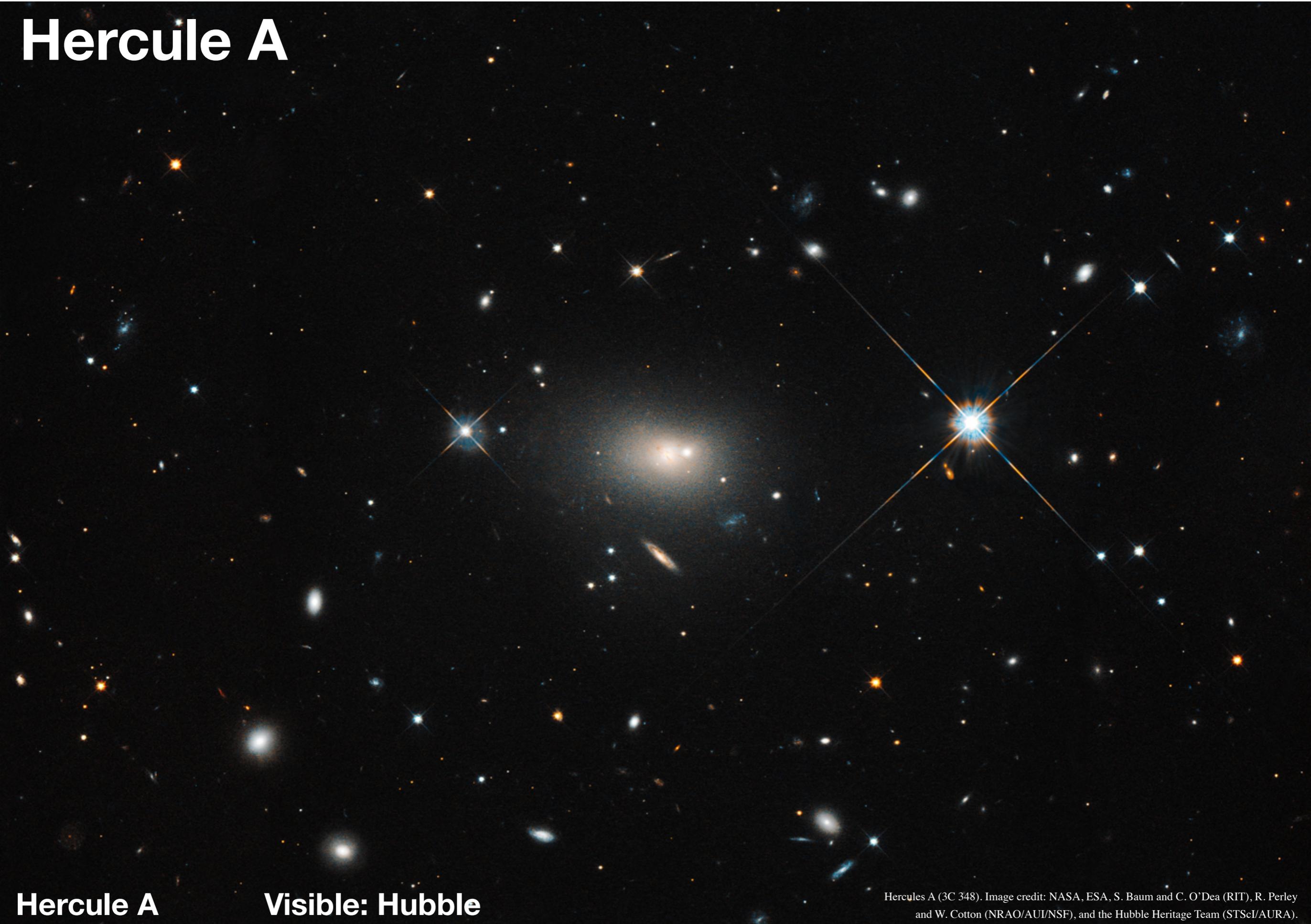
Plan

- 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

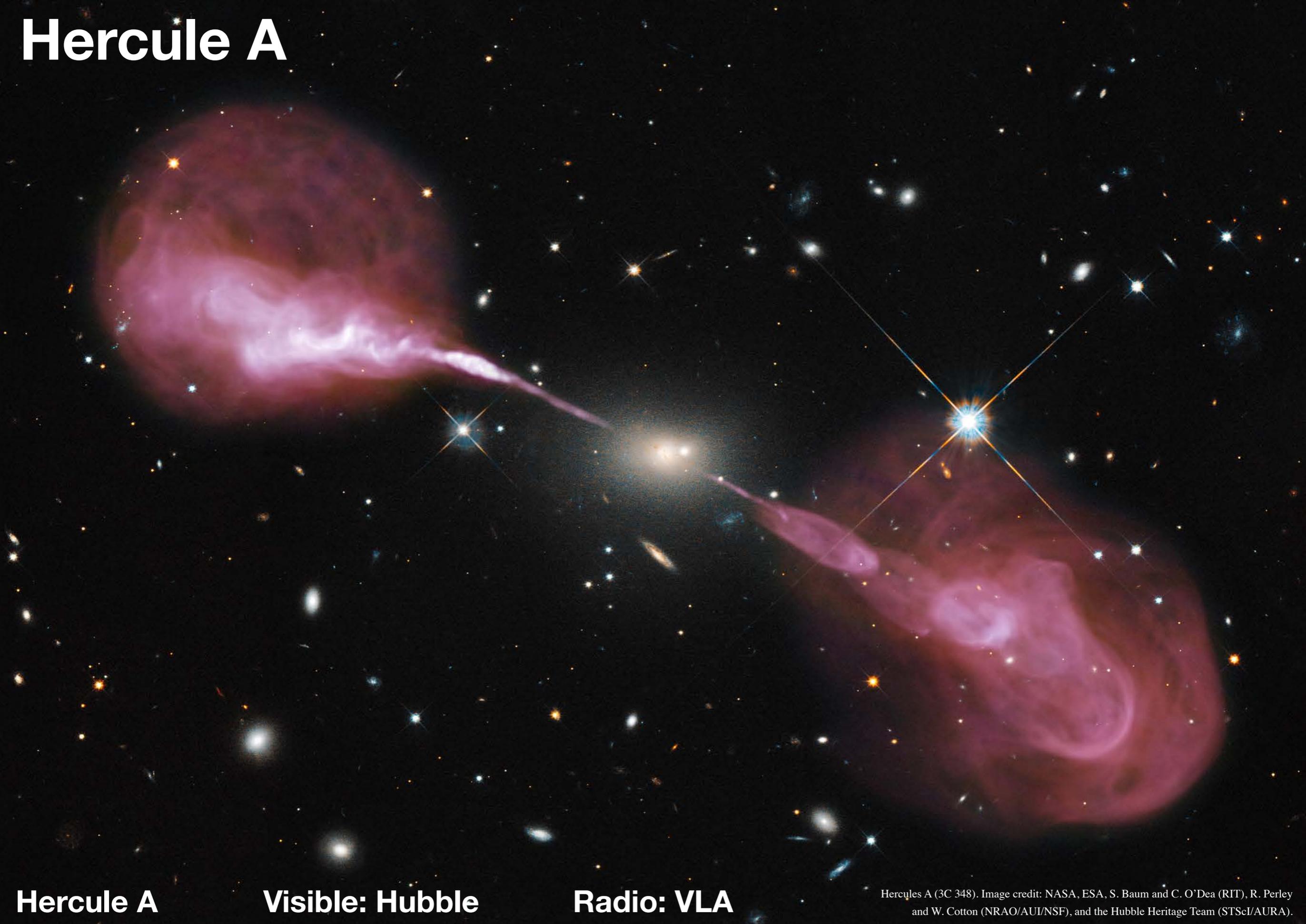


Hercule A

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

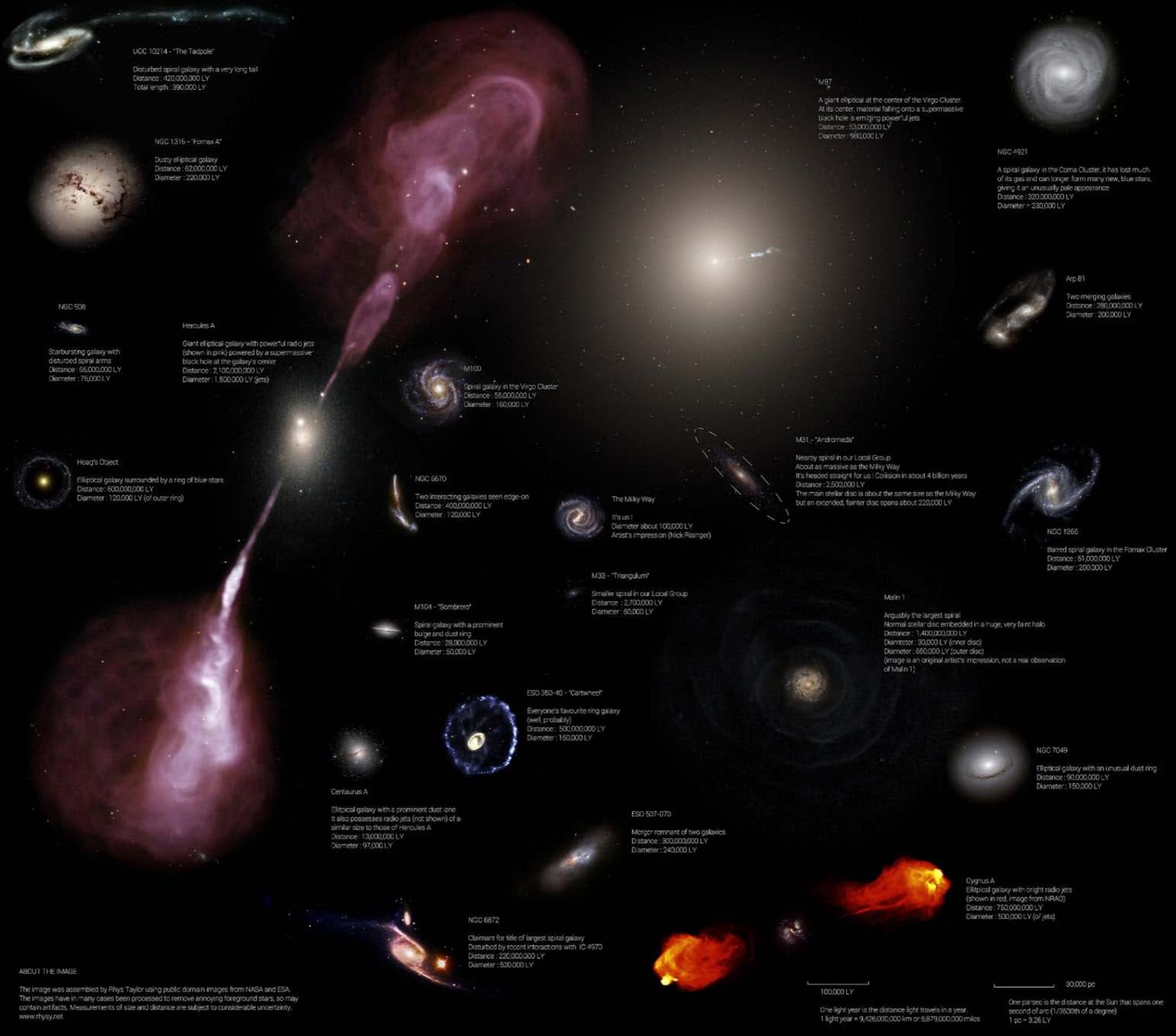
Visible: Hubble

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

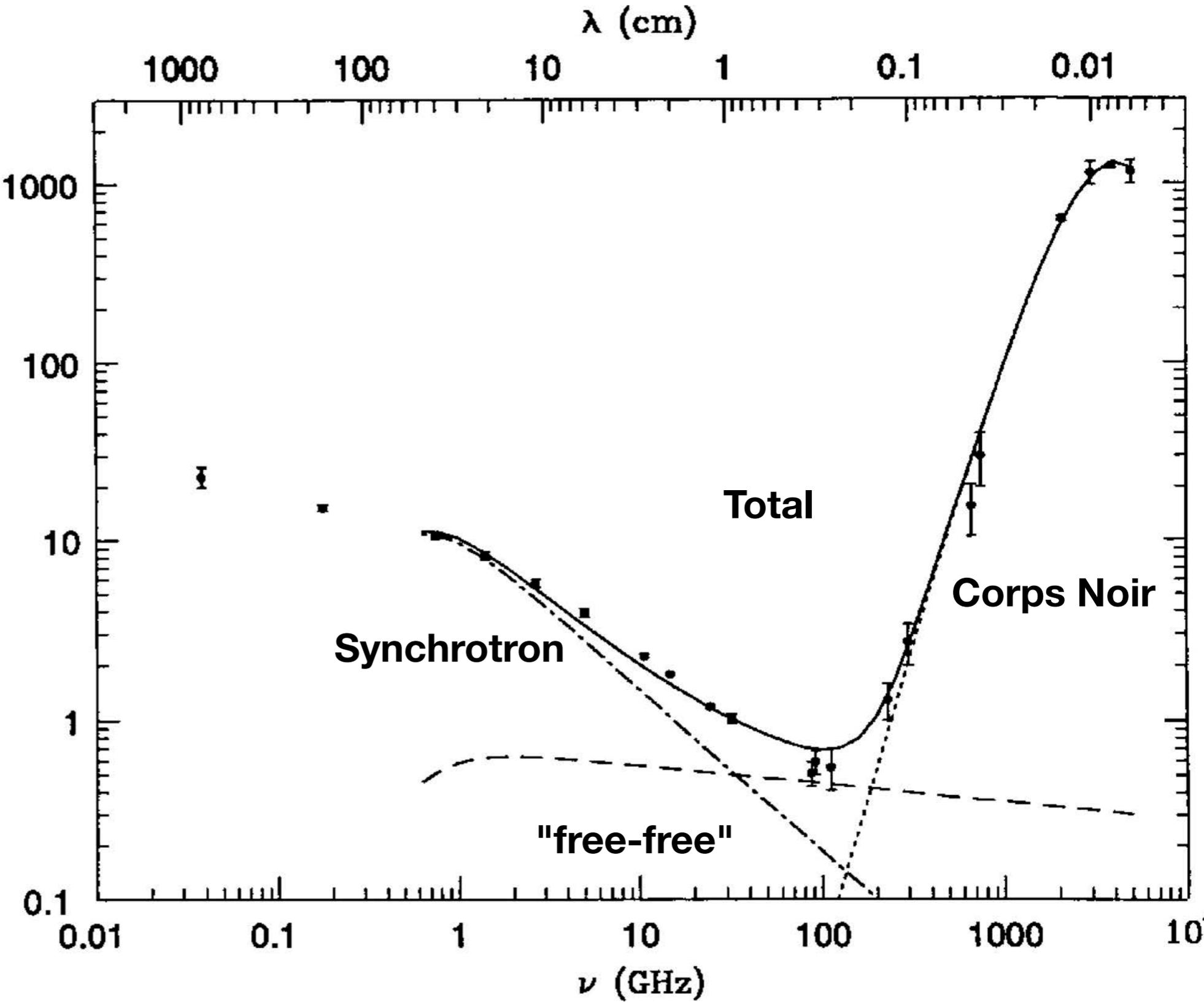


Ciel radio et diversité des rayonnements en radio

Combinaison des rayonnements



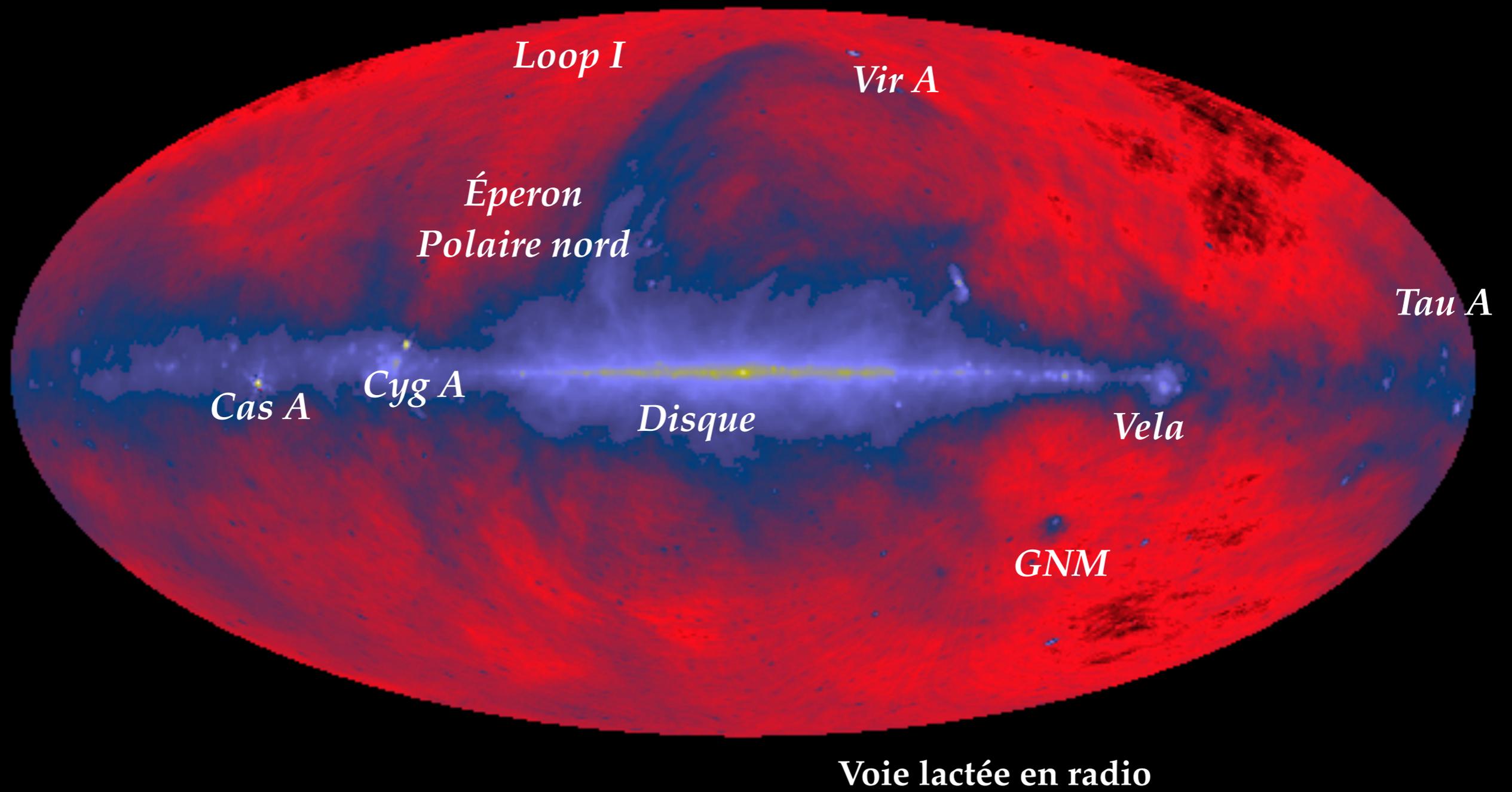
Radio continuum emission from M82. Image credit: Josh Marvil (NM Tech/NRAO), Bill Saxton (NRAO/AUI/NSF), Hubble (NASA/ESA/STScI).



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

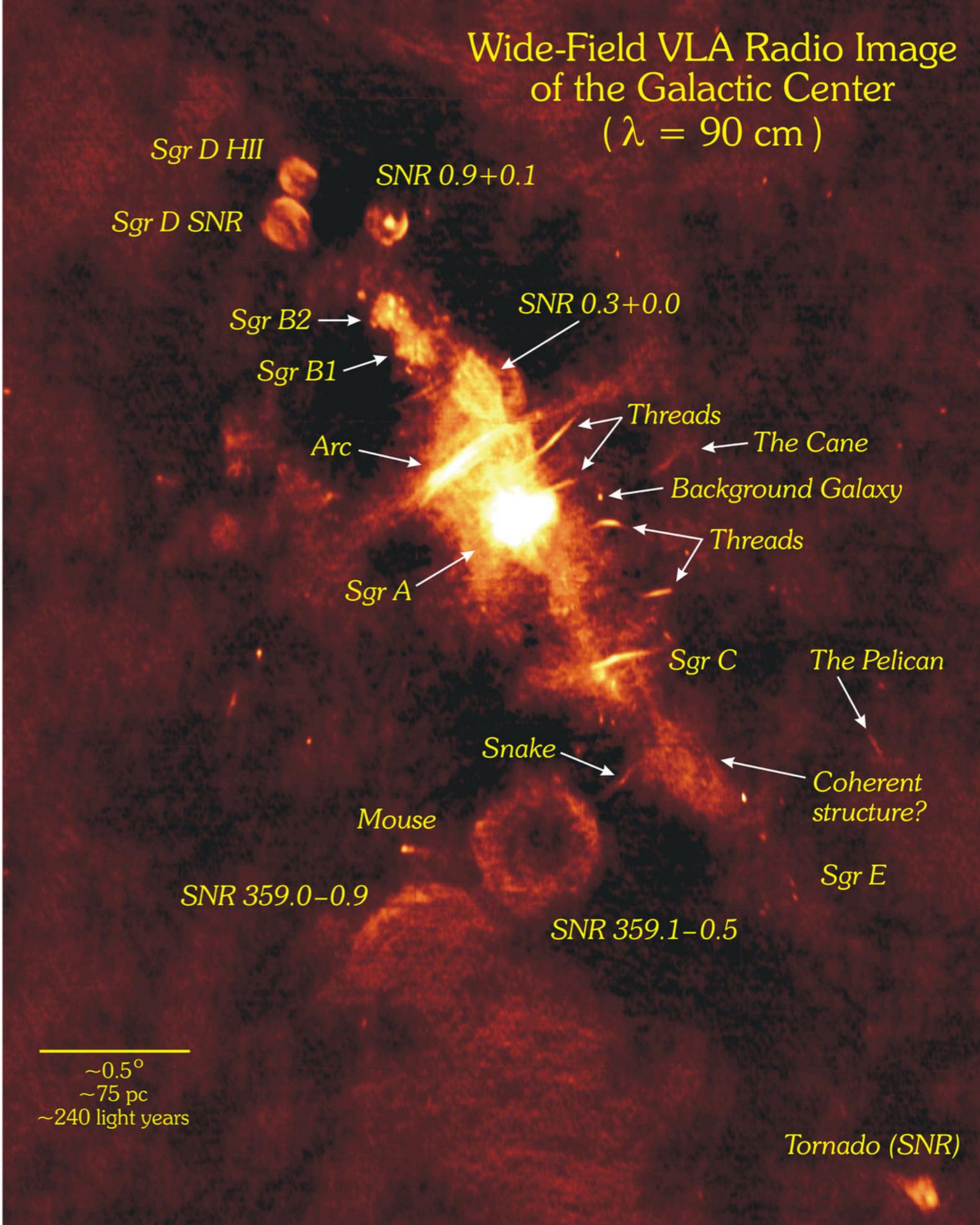
Nuages Moléculaires

Filaments

Régions HII

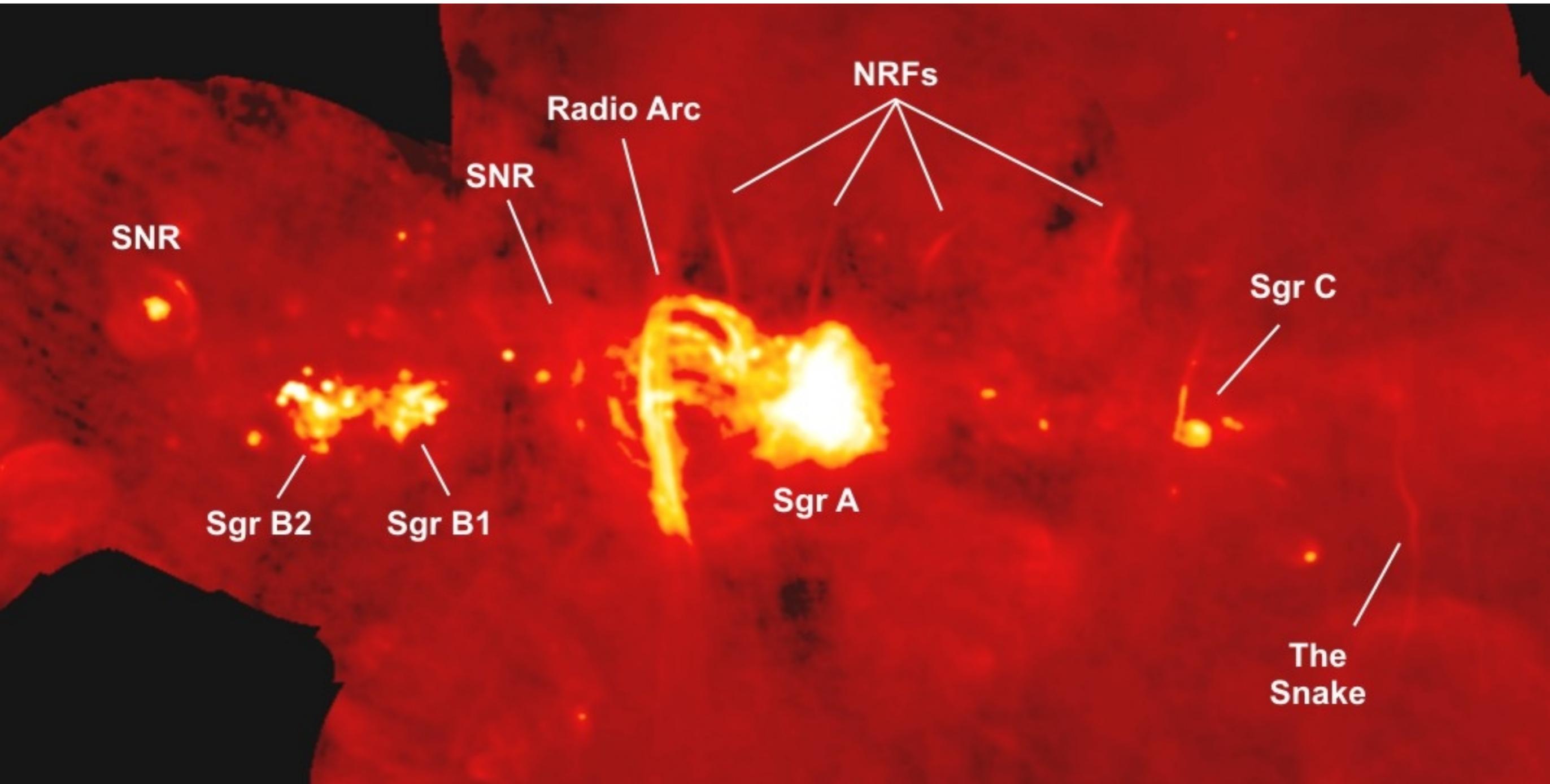
Synchrotron diffus

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



Diversité des sources radio

La voie Lactée

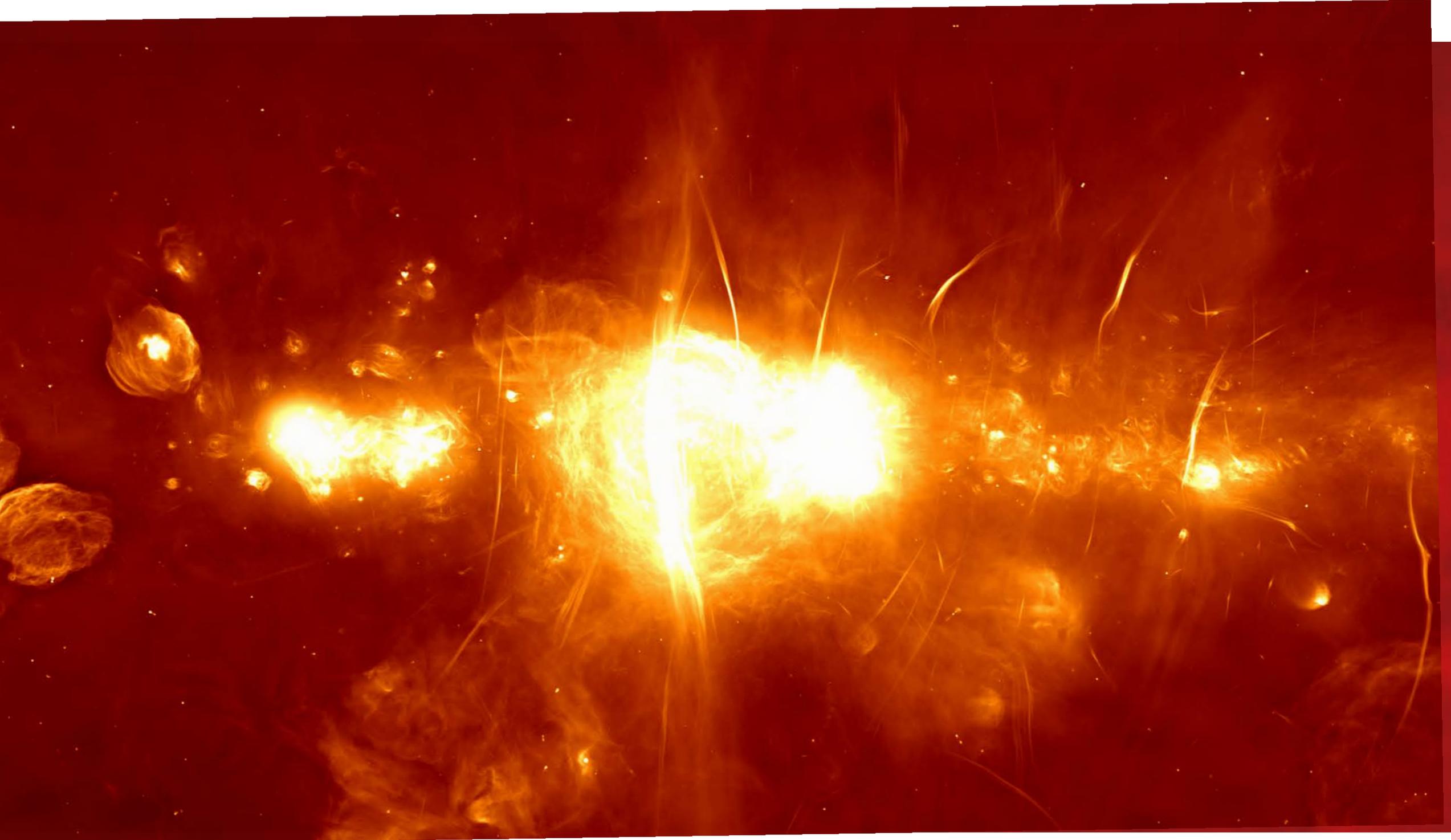


Credit: NRAO/AUI/NSF Yusef-Zadeh, et al.

MeerKAT

Diversité des sources radio

La voie Lactée

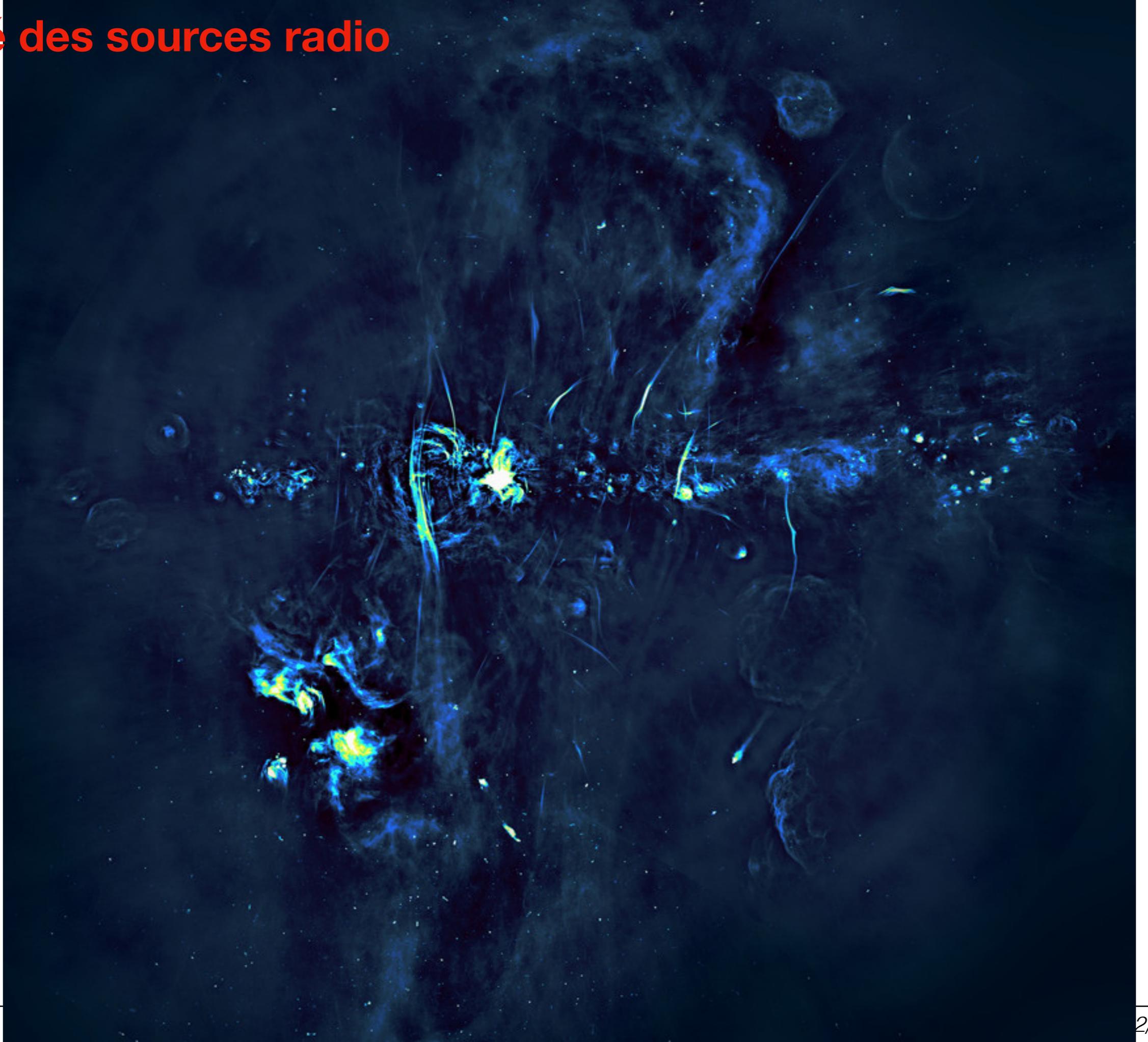


Credit: NRAO/AUI/NSF Yusef-Zadeh, et al.

MeerKAT

Diversité des sources radio

La voie
Lactée



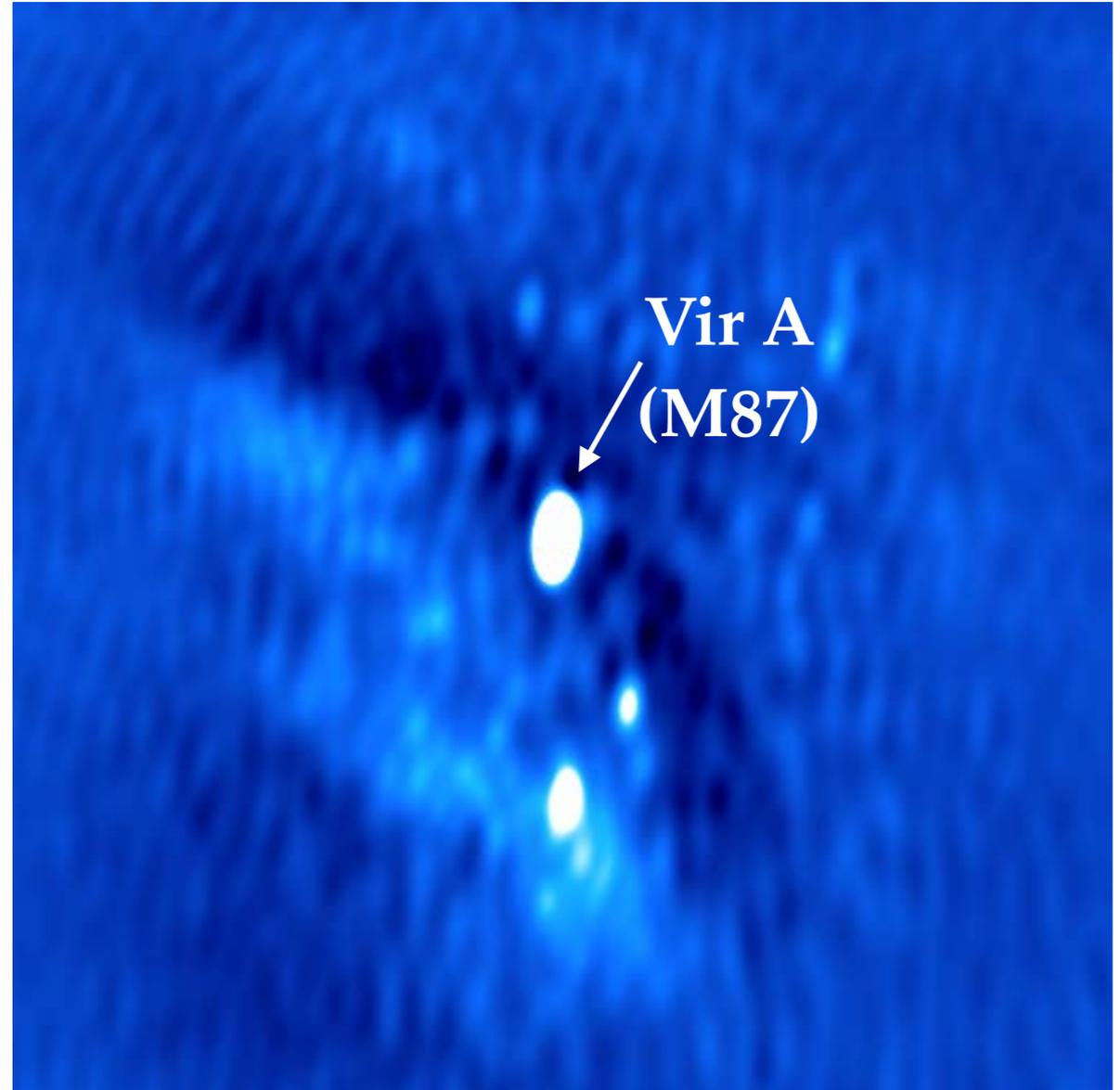
MeerKAT

Heywood et
al., 2019

Diversité des sources radio

étudiants de Master 2
AAIF 2019-2020

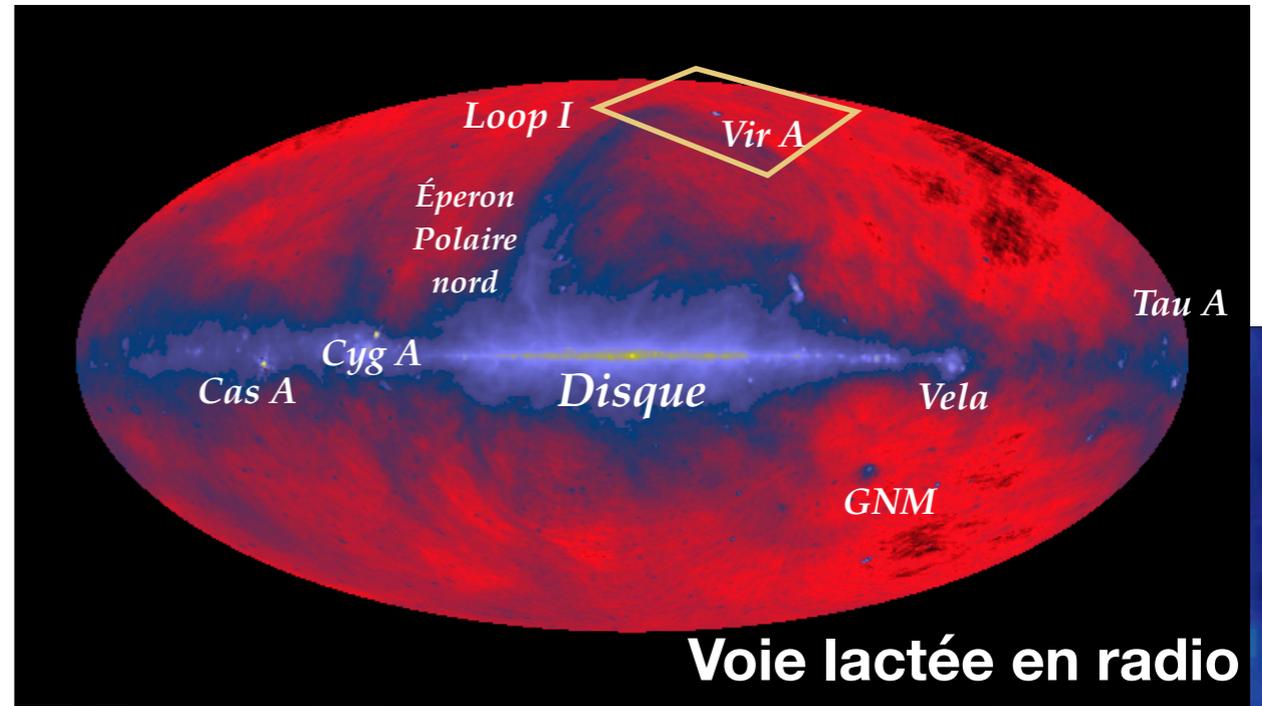
Champ de Virgo A



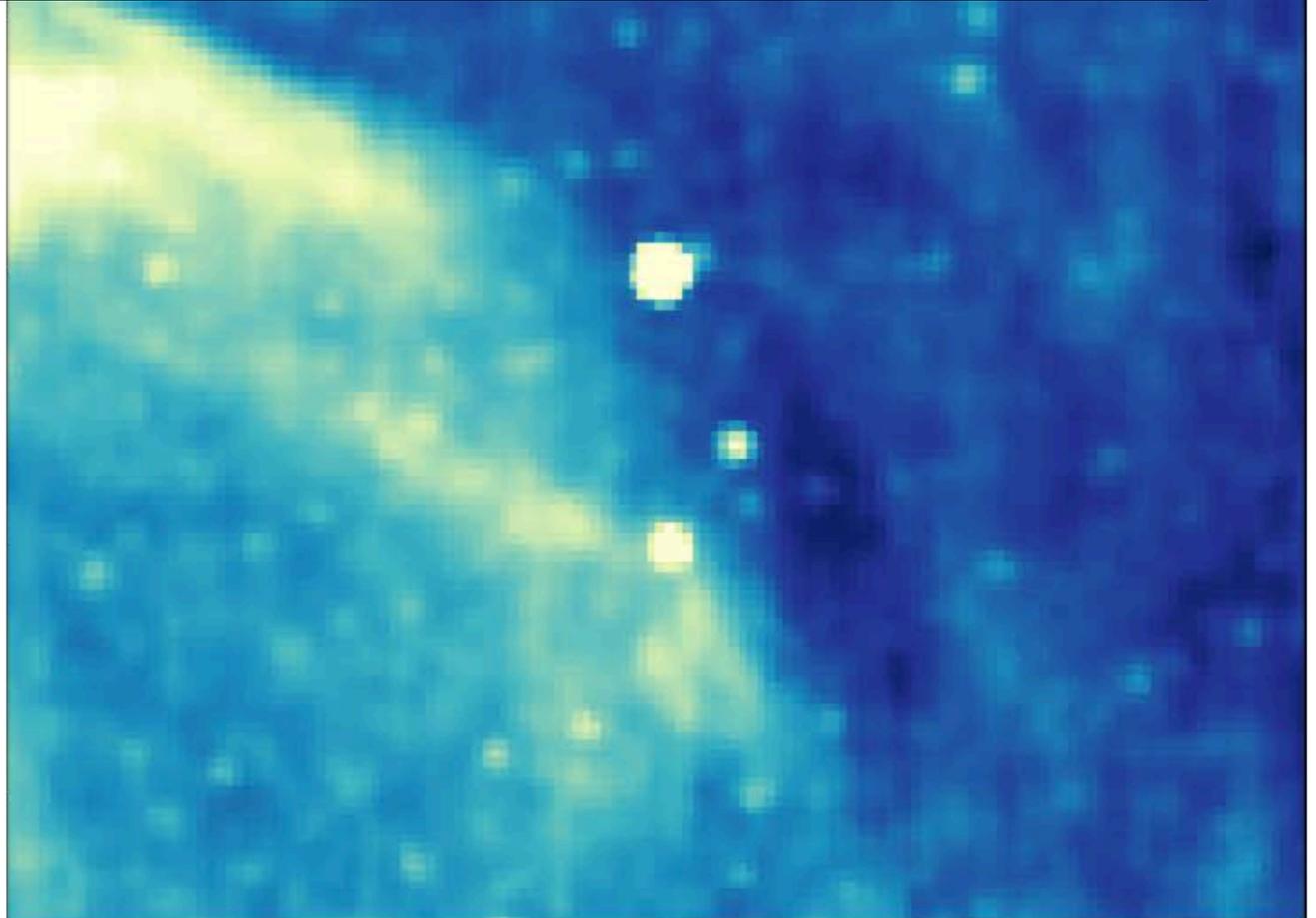
41°x41° 1 px = 5' Lune •

31 MHz

(Collaboration NenuFAR, 2020)



Voie lactée en radio



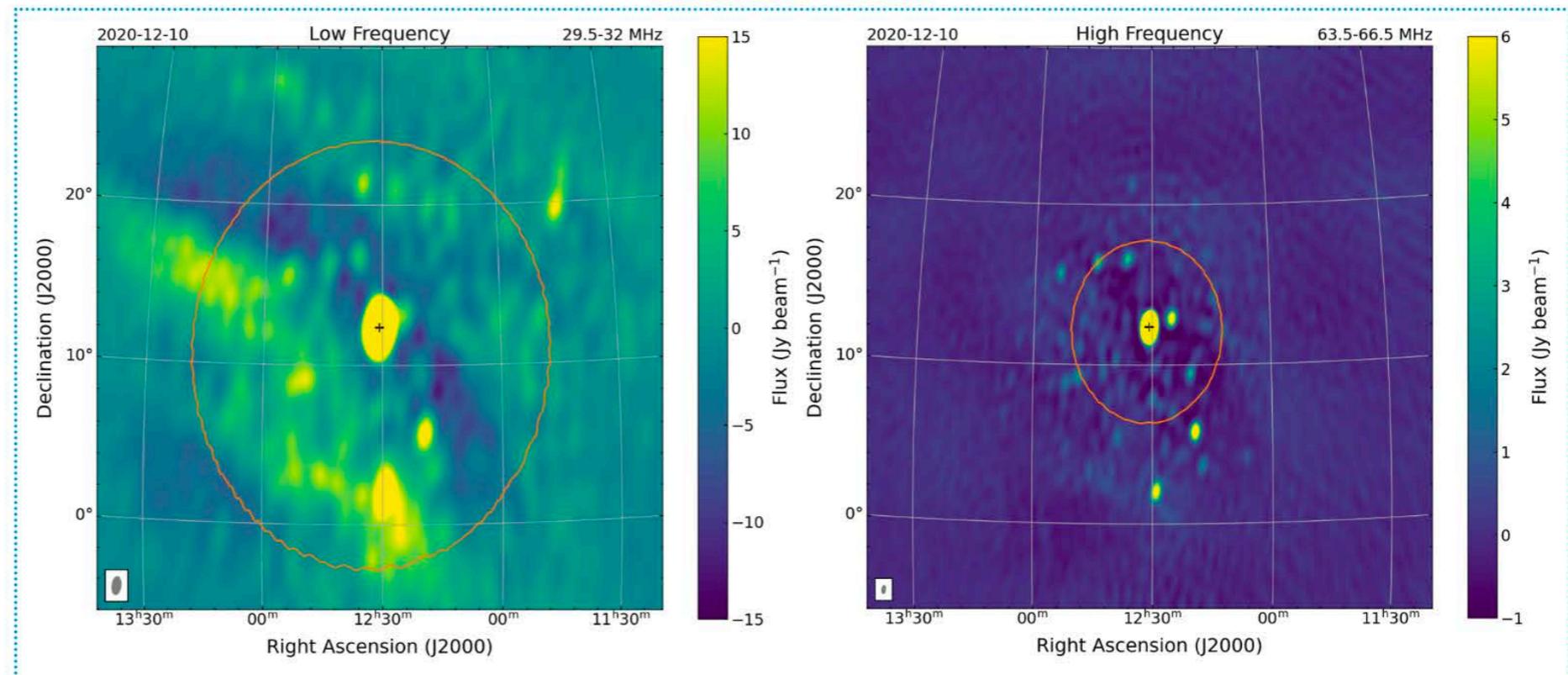
31 MHz

(GSM adapté de Haslam, 1982)

Daily Image

01-02-2021

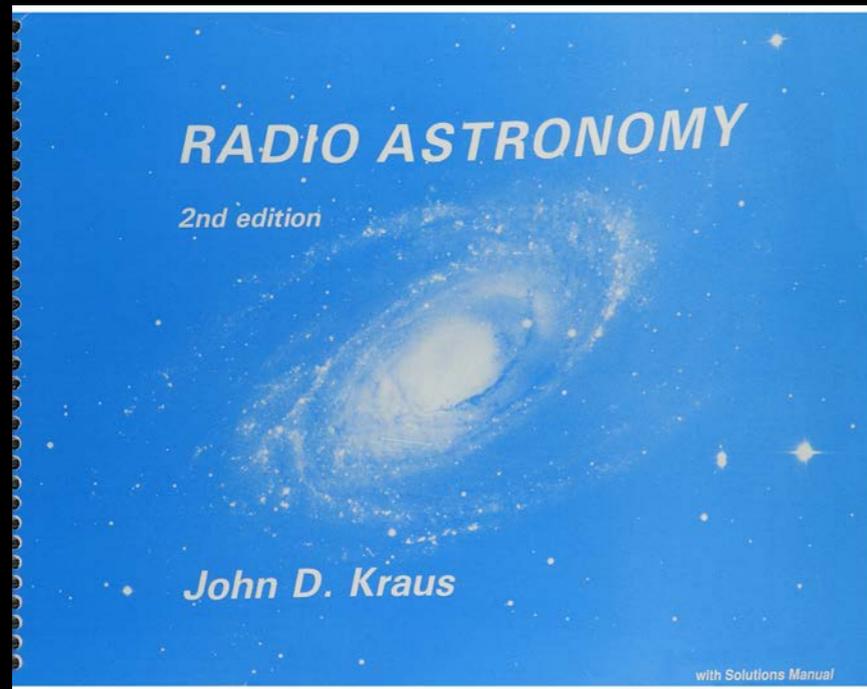
[Previous](#) [Next](#)



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

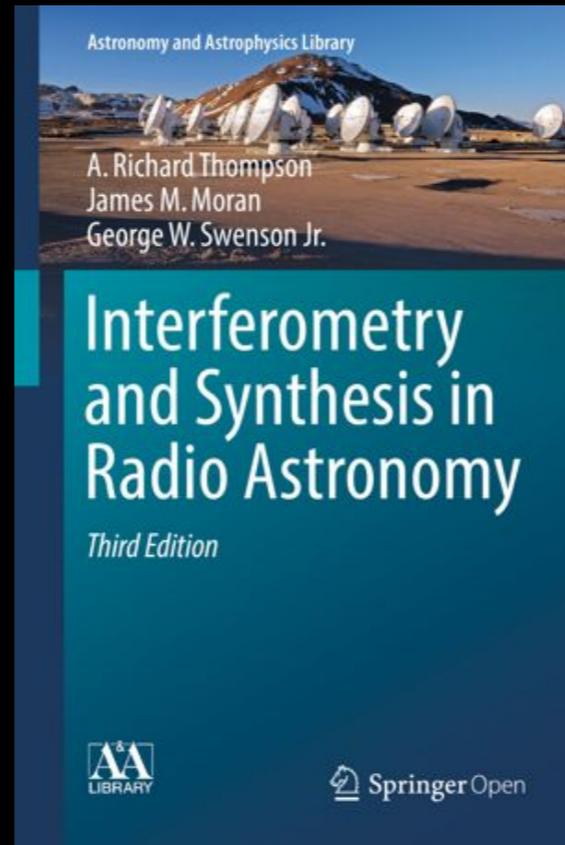
Merci de votre attention !

Quelques ressources bibliographiques

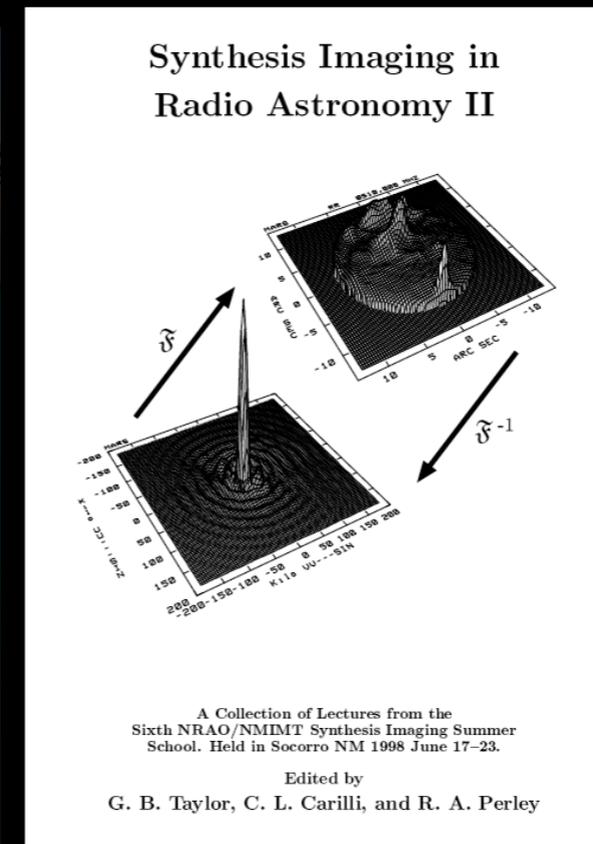


Kraus, Radio Astronomy

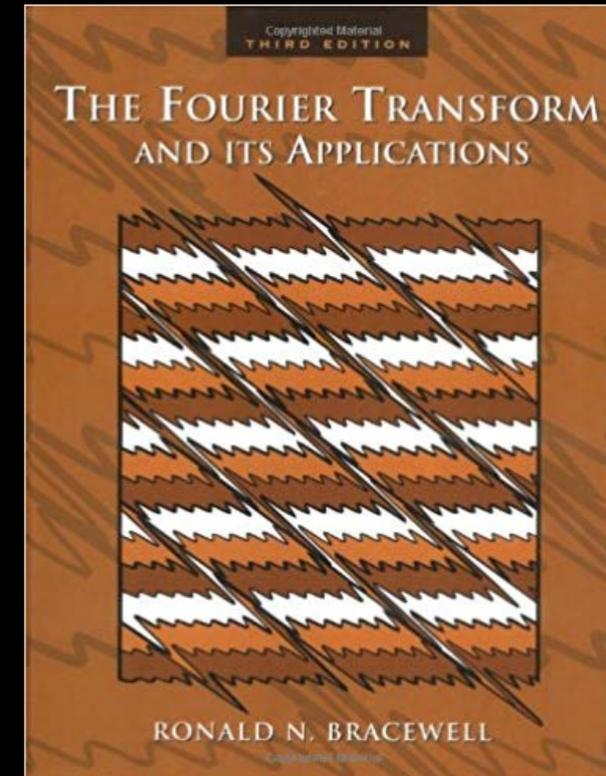
Cygnus-Quasar Book, 2nd ed.



**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>

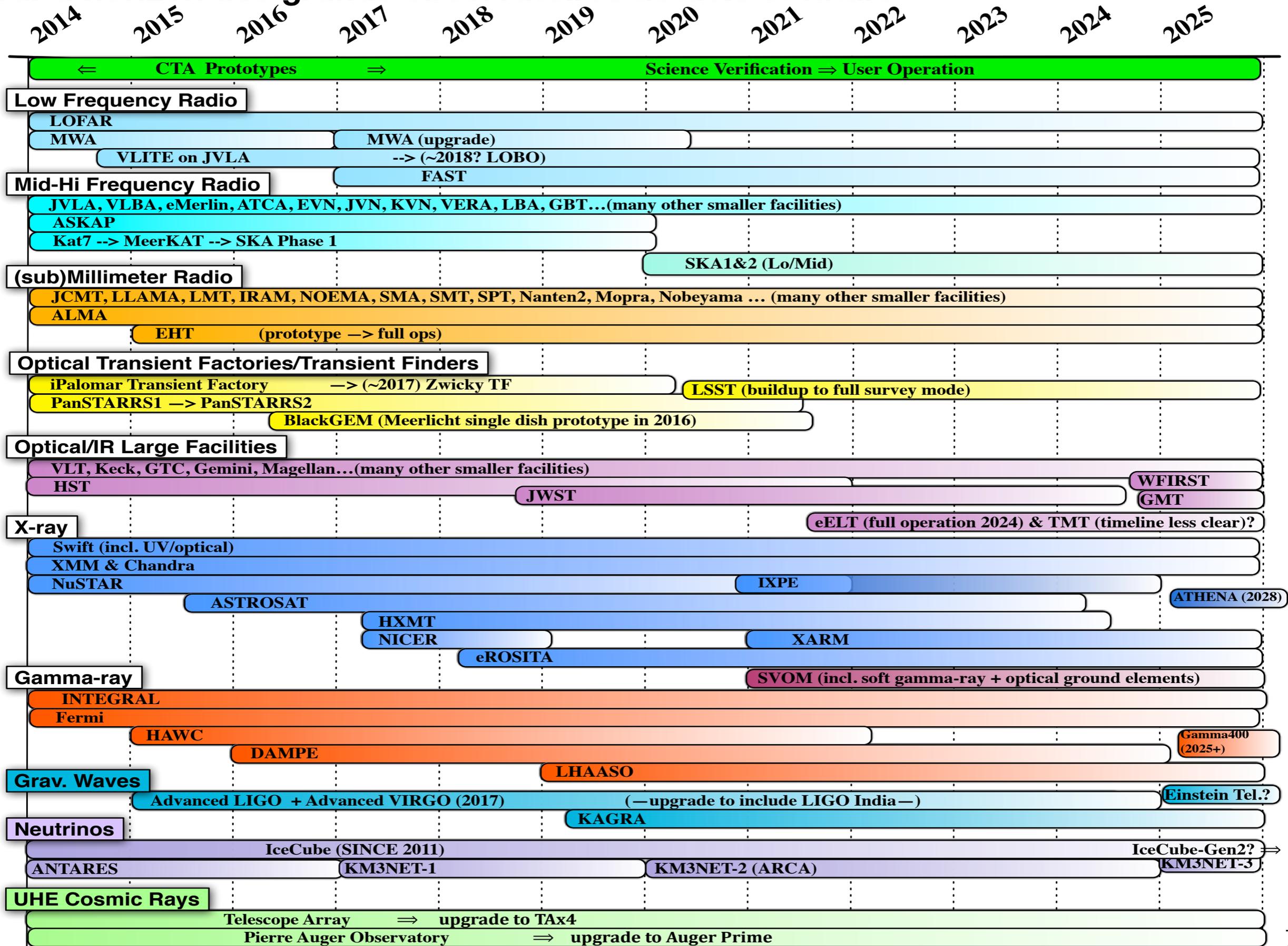
Fundamentals of interferometry

https://github.com/ratt-ru/fundamentals_of_interferometry

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

Mesure par interférométrie

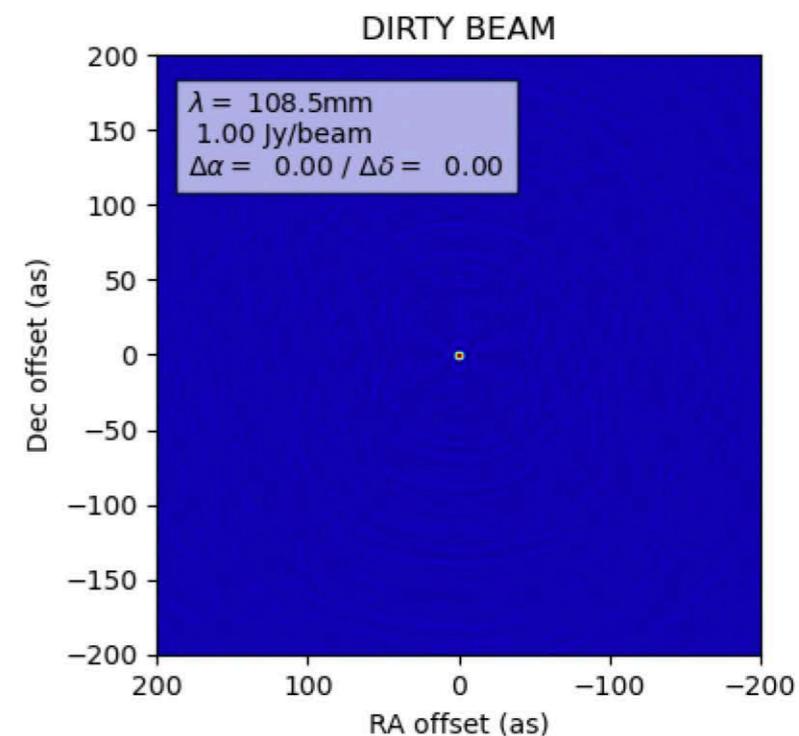
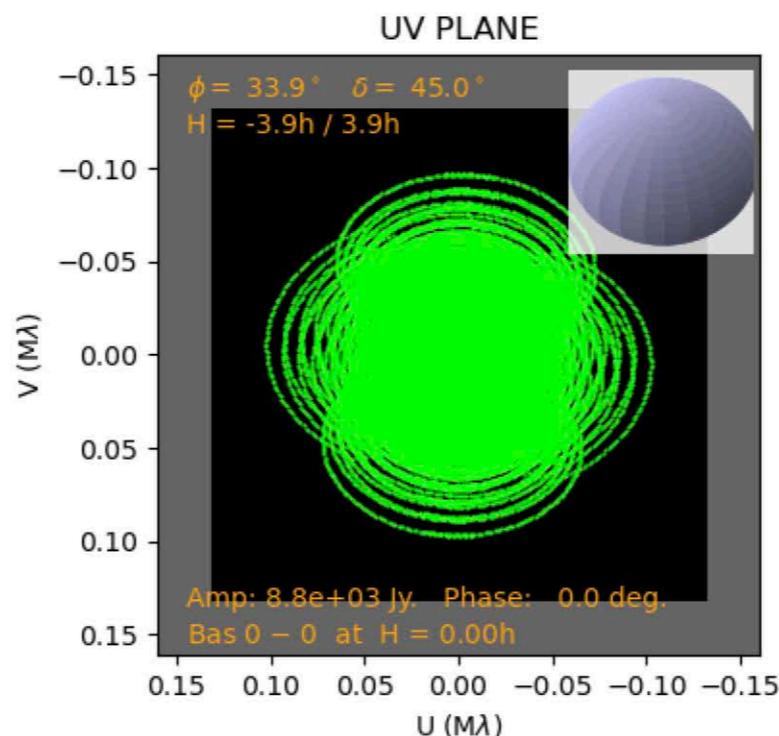
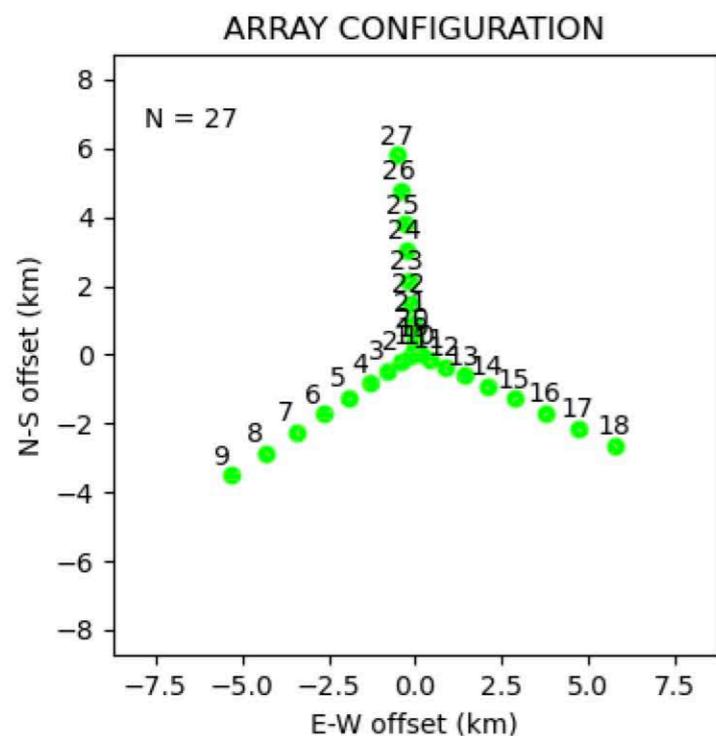
Tour d'horizon des grands observatoires actuels et futurs



APSYNSIM

Aperture Synthesis Simulator

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

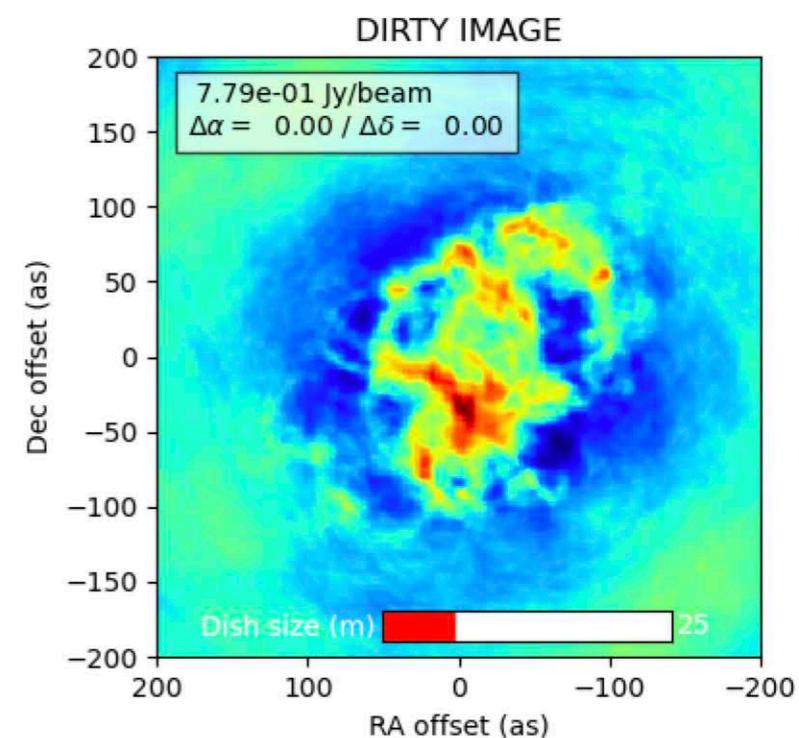
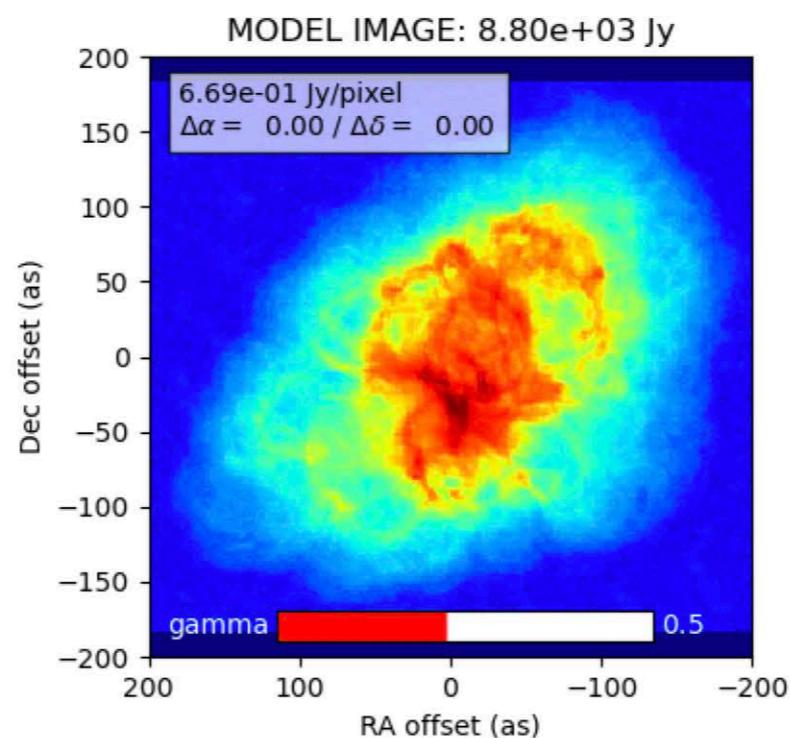


Lat (deg)	<input type="text" value="33.9"/>	33.9
Dec (deg)	<input type="text" value="45"/>	45
H ₀ (h)	<input type="text" value="-3.94"/>	-3.94
H ₁ (h)	<input type="text" value="3.94"/>	3.94
λ (mm)	<input type="text" value="108.5"/>	108.5
Robust	<input type="text" value="0"/>	0

+ Antenna - Antenna Reduce data

Save array Load array Load model

Quit



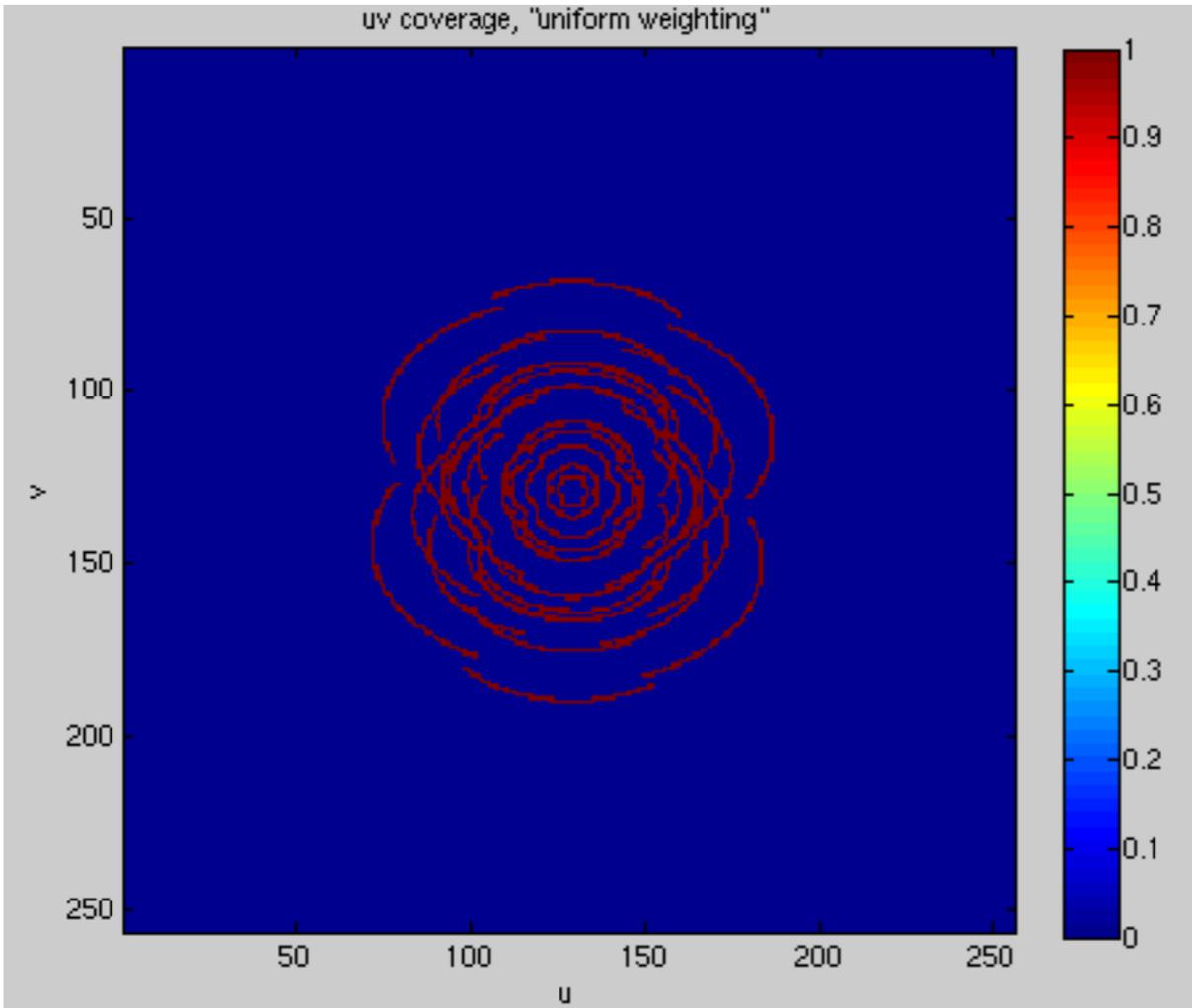
<https://arxiv.org/abs/1706.00936>

Gridding + pondération

On a le choix de pouvoir pondérer les échantillons entre eux

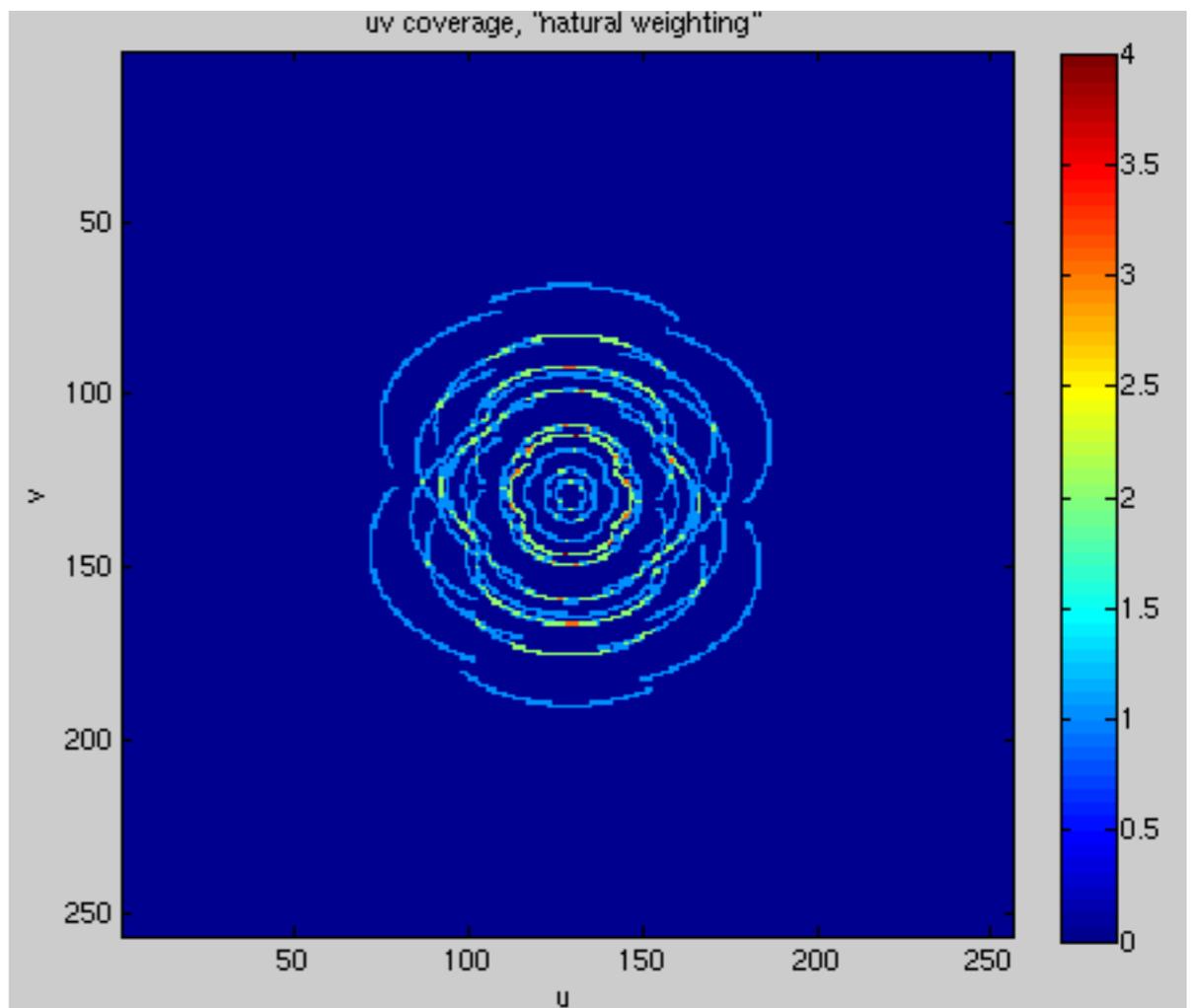
Pondération "uniforme"

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

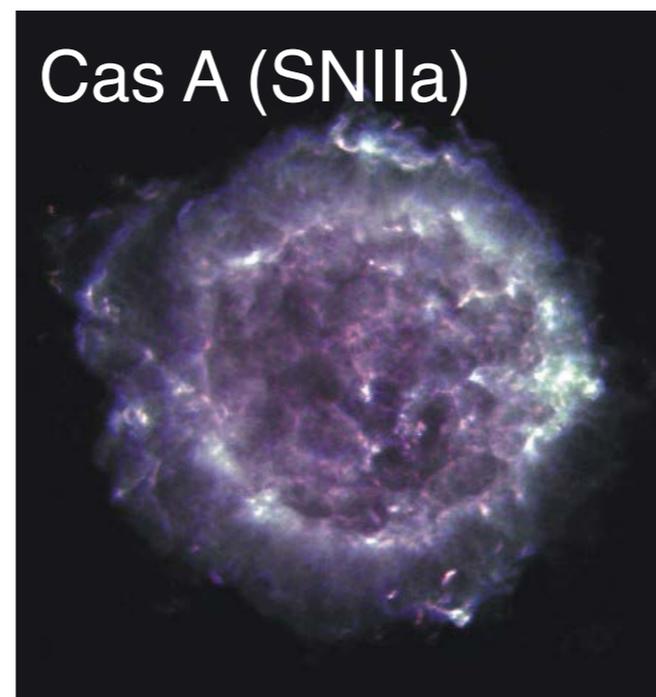
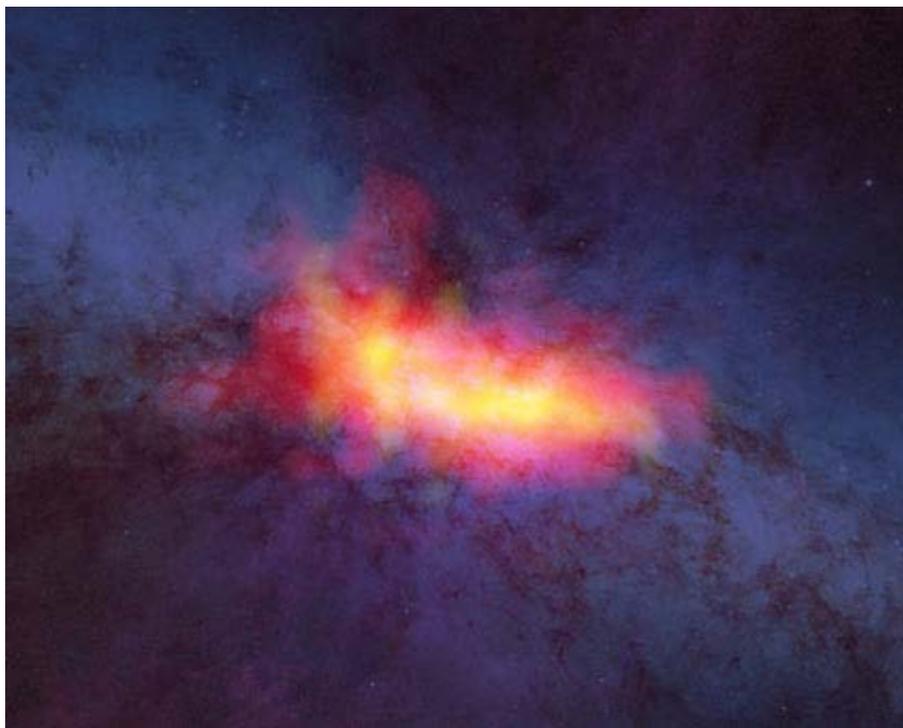
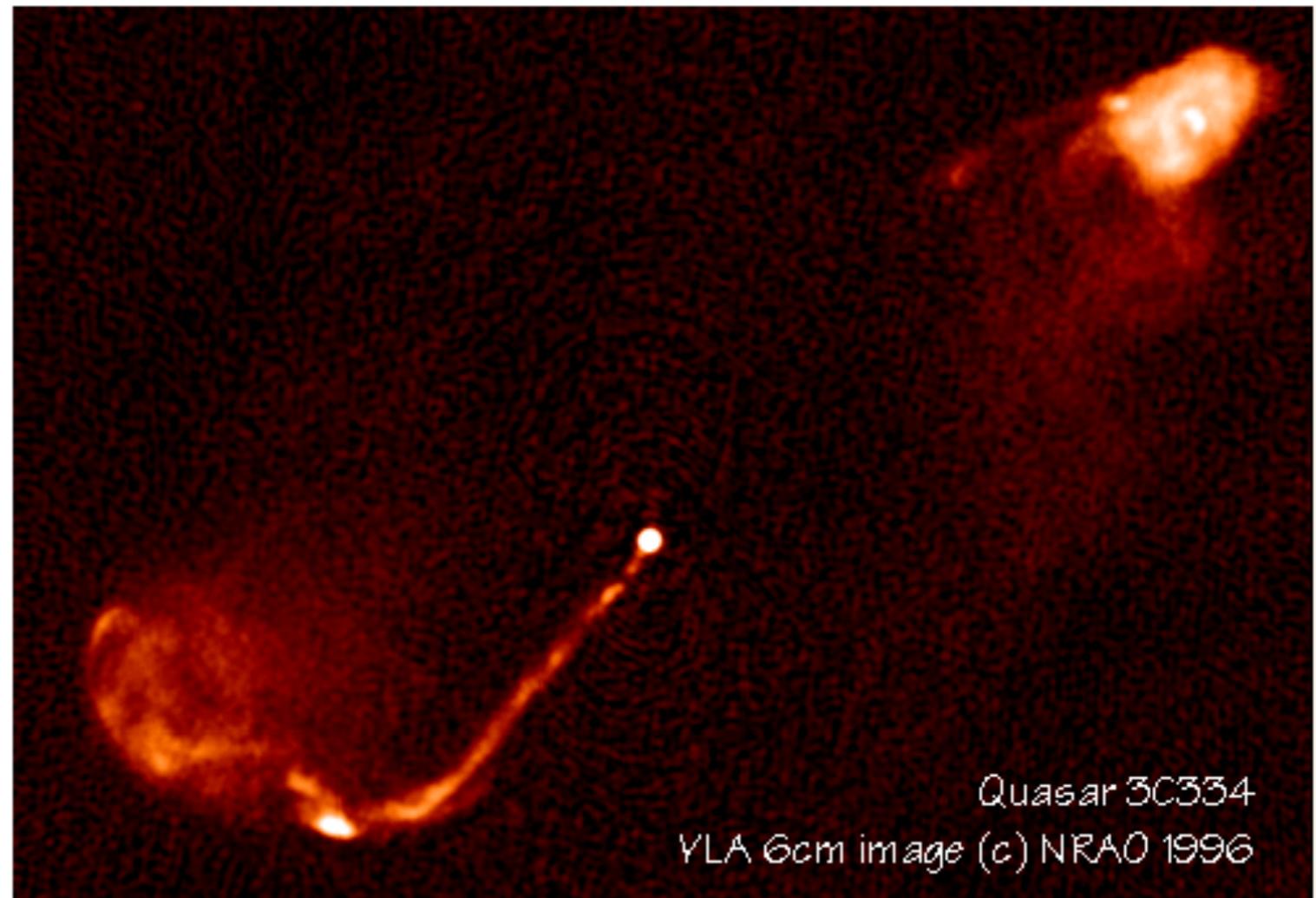
HI gas (neutral hydrogen)

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

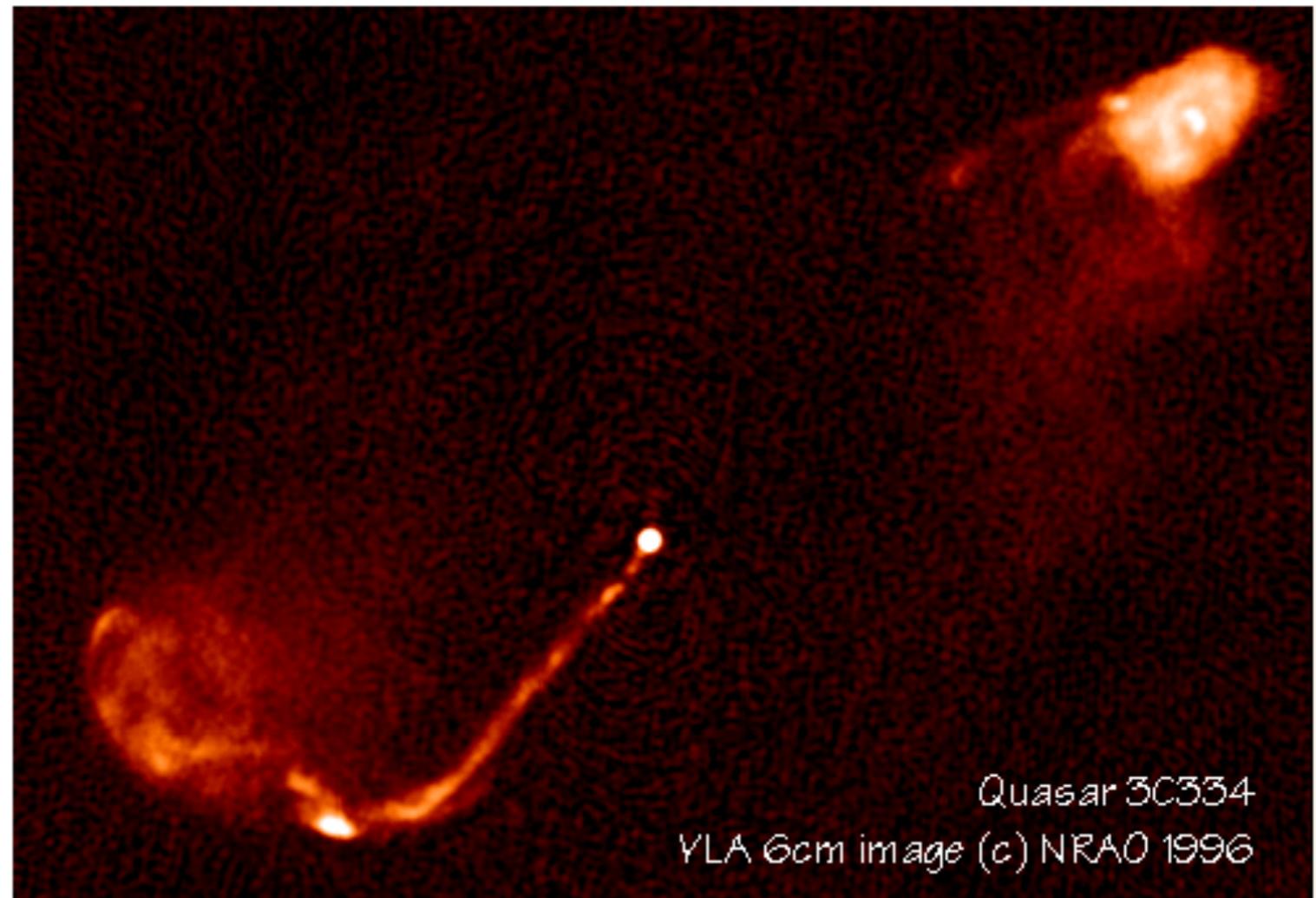
HI gas (neutral hydrogen)

Molecular Clouds

HII regions

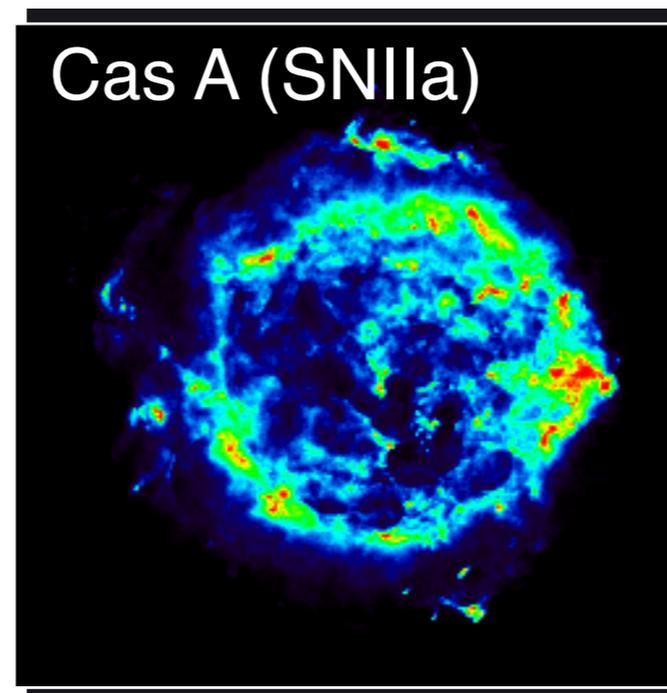
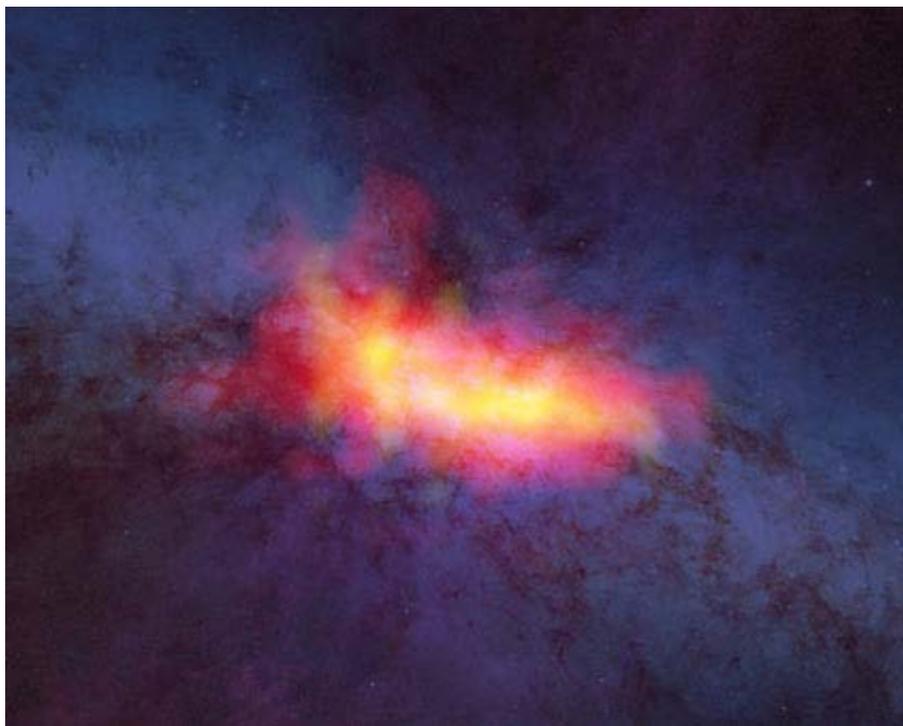
Sun

Planets and moons...



Quasar 3C334

YLA 6cm image (c) NRAO 1996



Cas A (SNIIa)

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

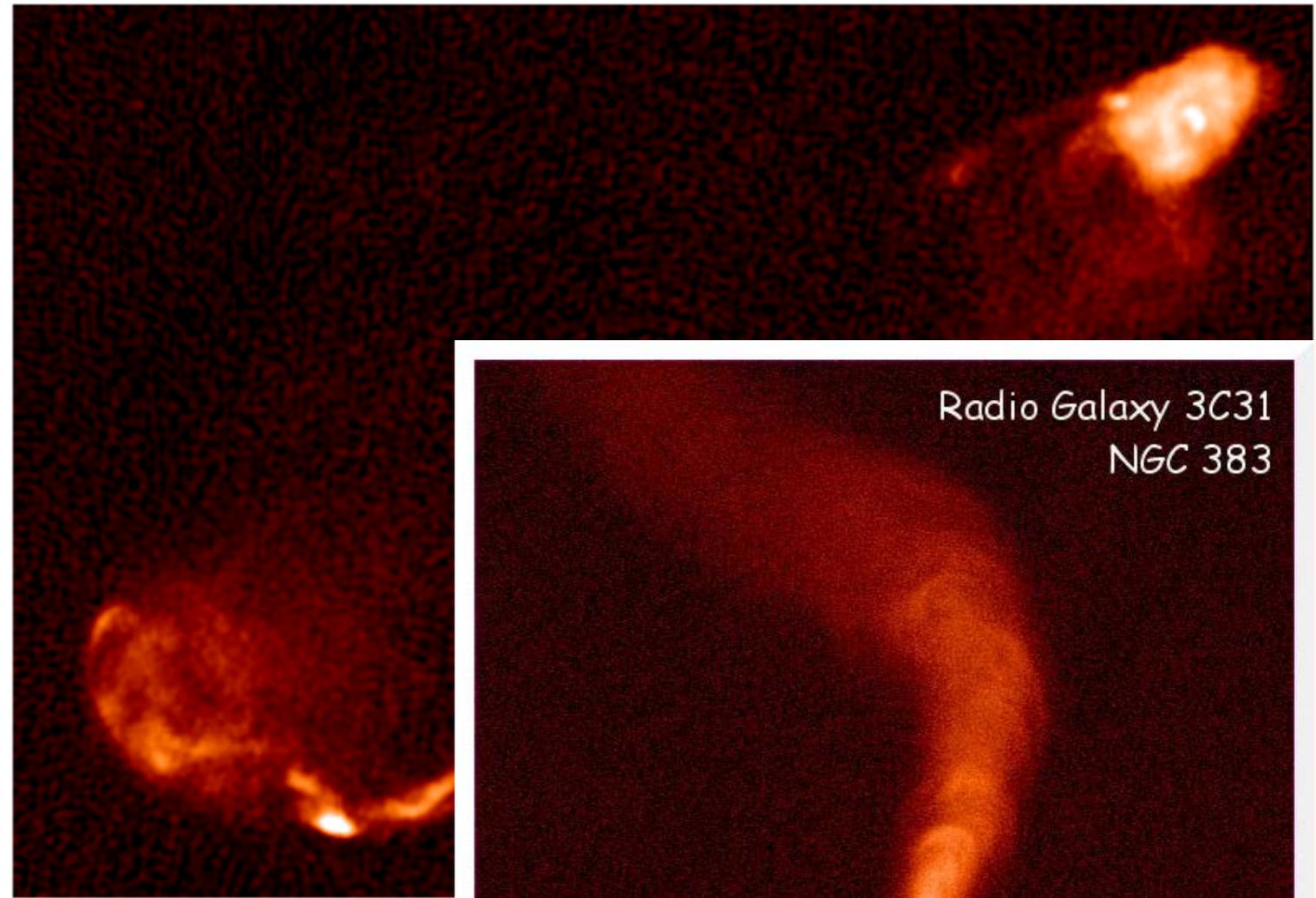
HI gas (neutral hydrogen)

Molecular Clouds

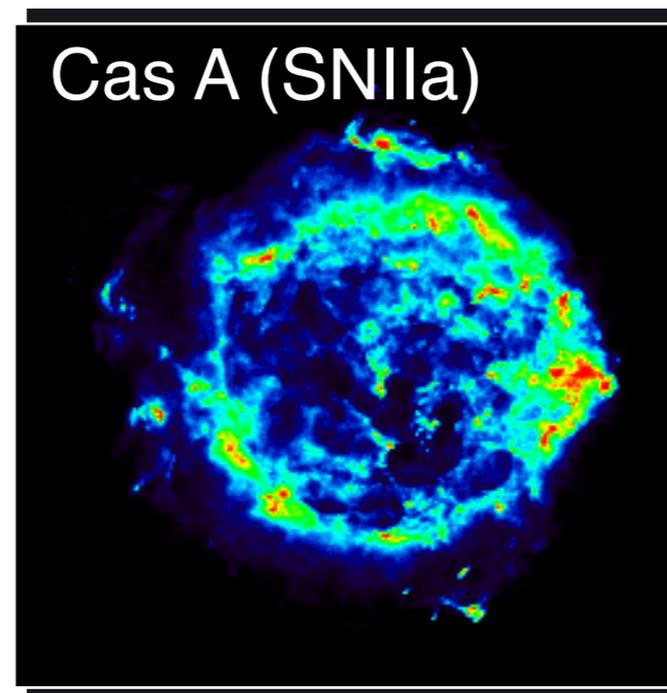
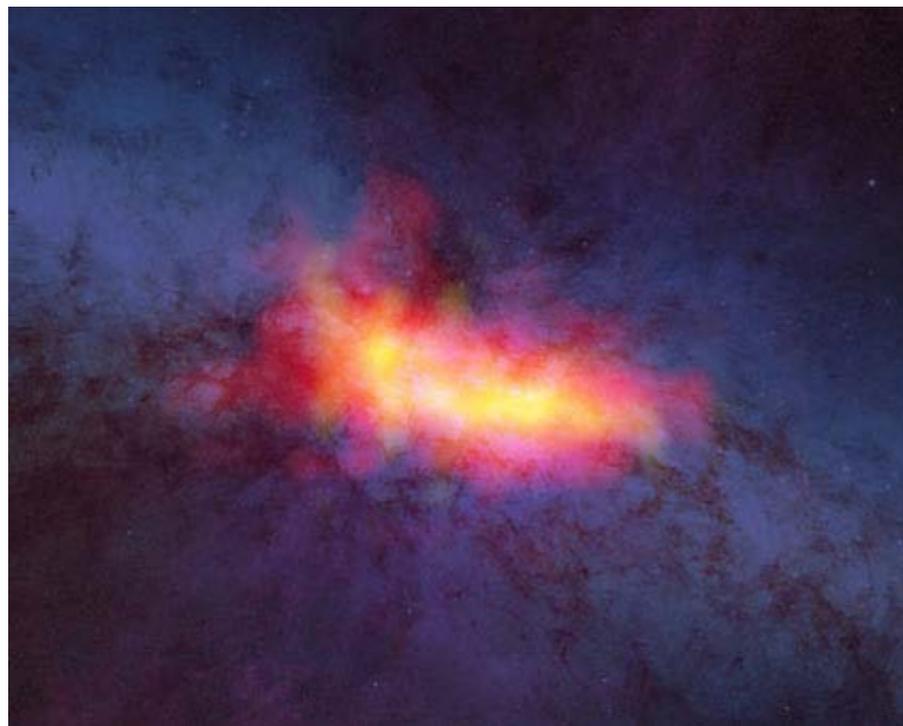
HII regions

Sun

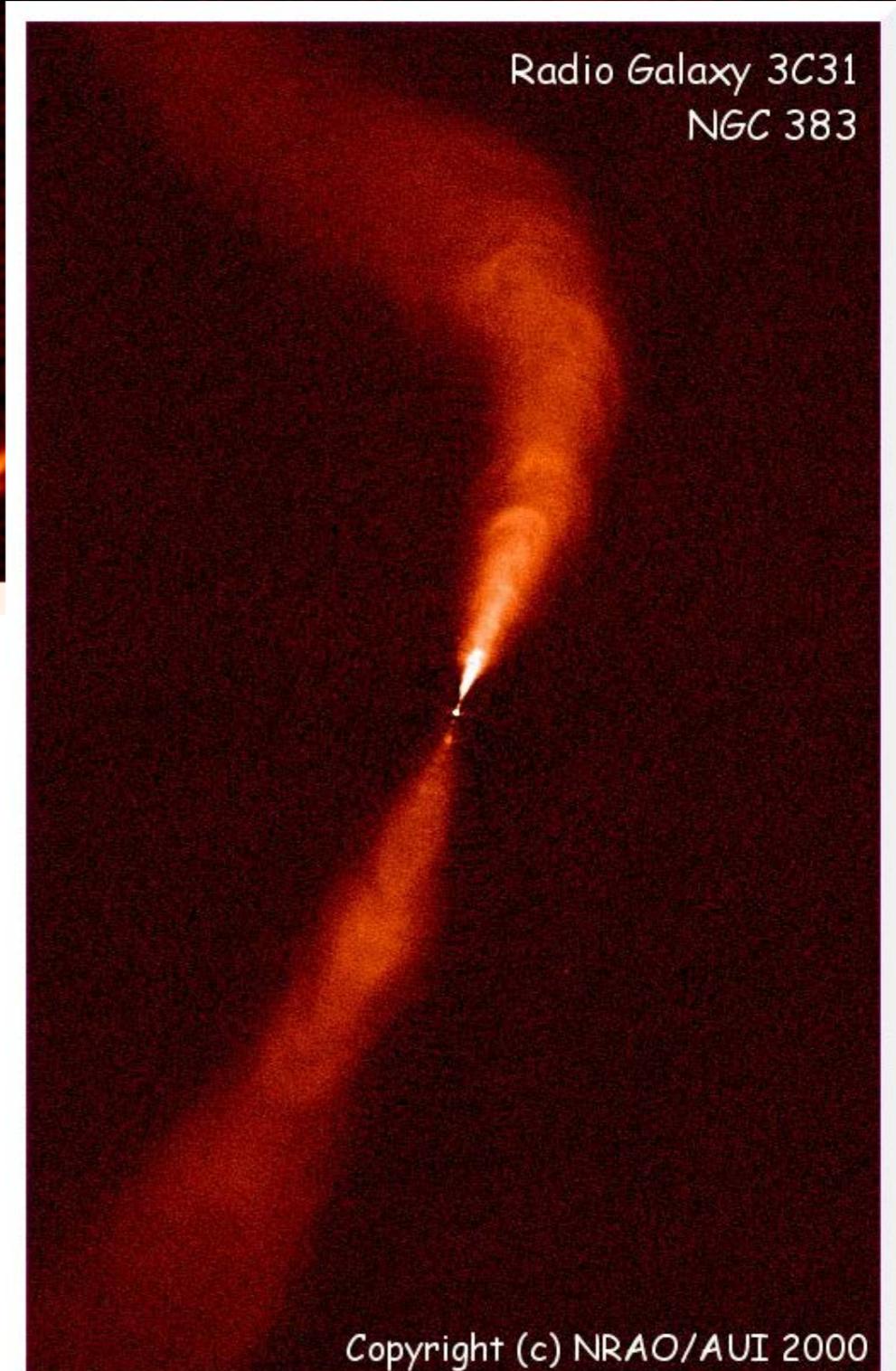
Planets and moons...



Radio Galaxy 3C31
NGC 383



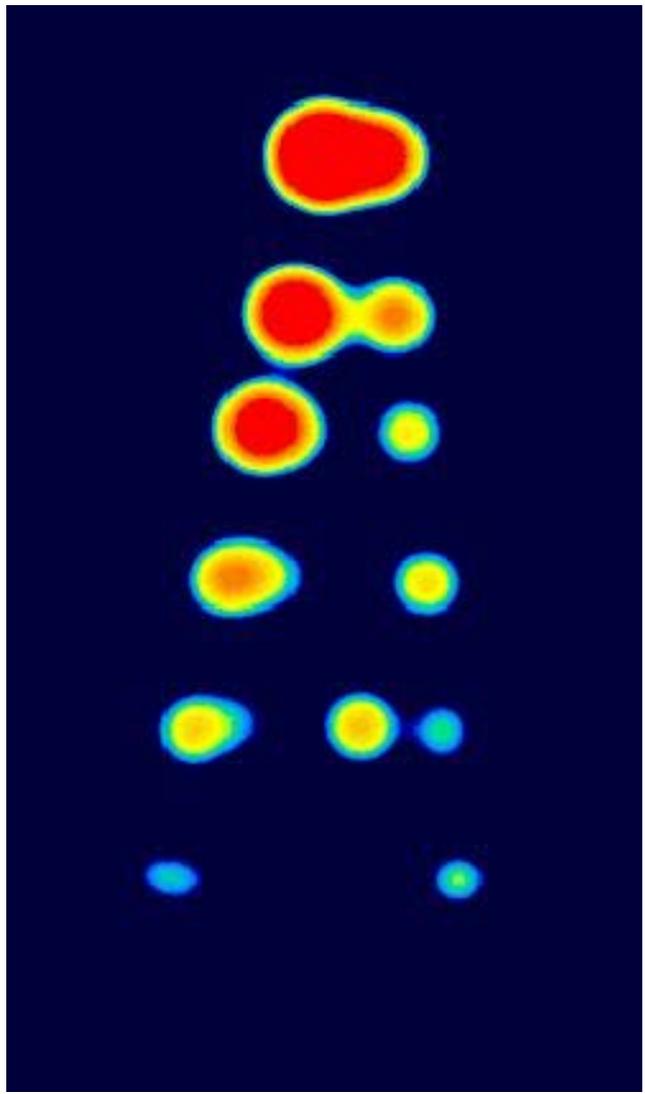
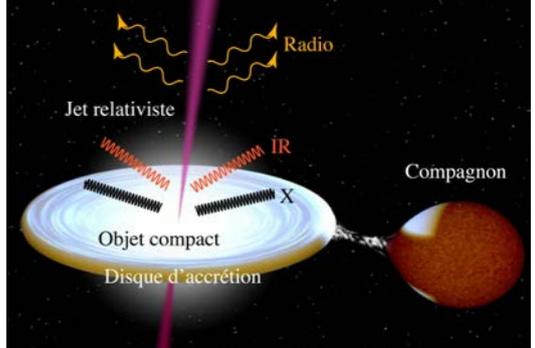
Cas A (SNIa)



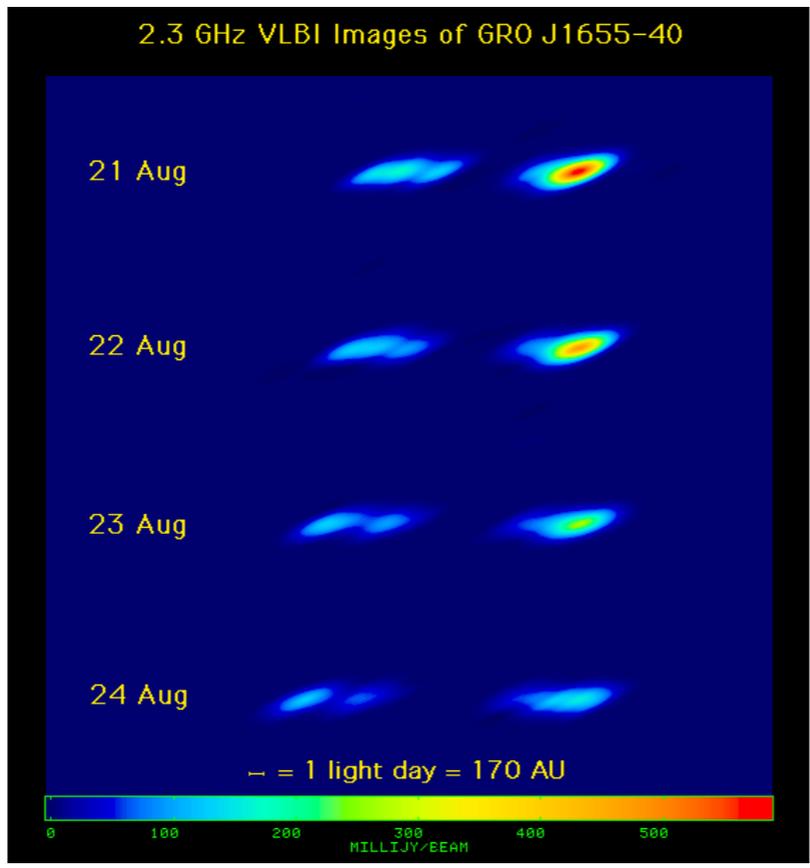
Copyright (c) NRAO/AUI 2000

Diversité des sources radio

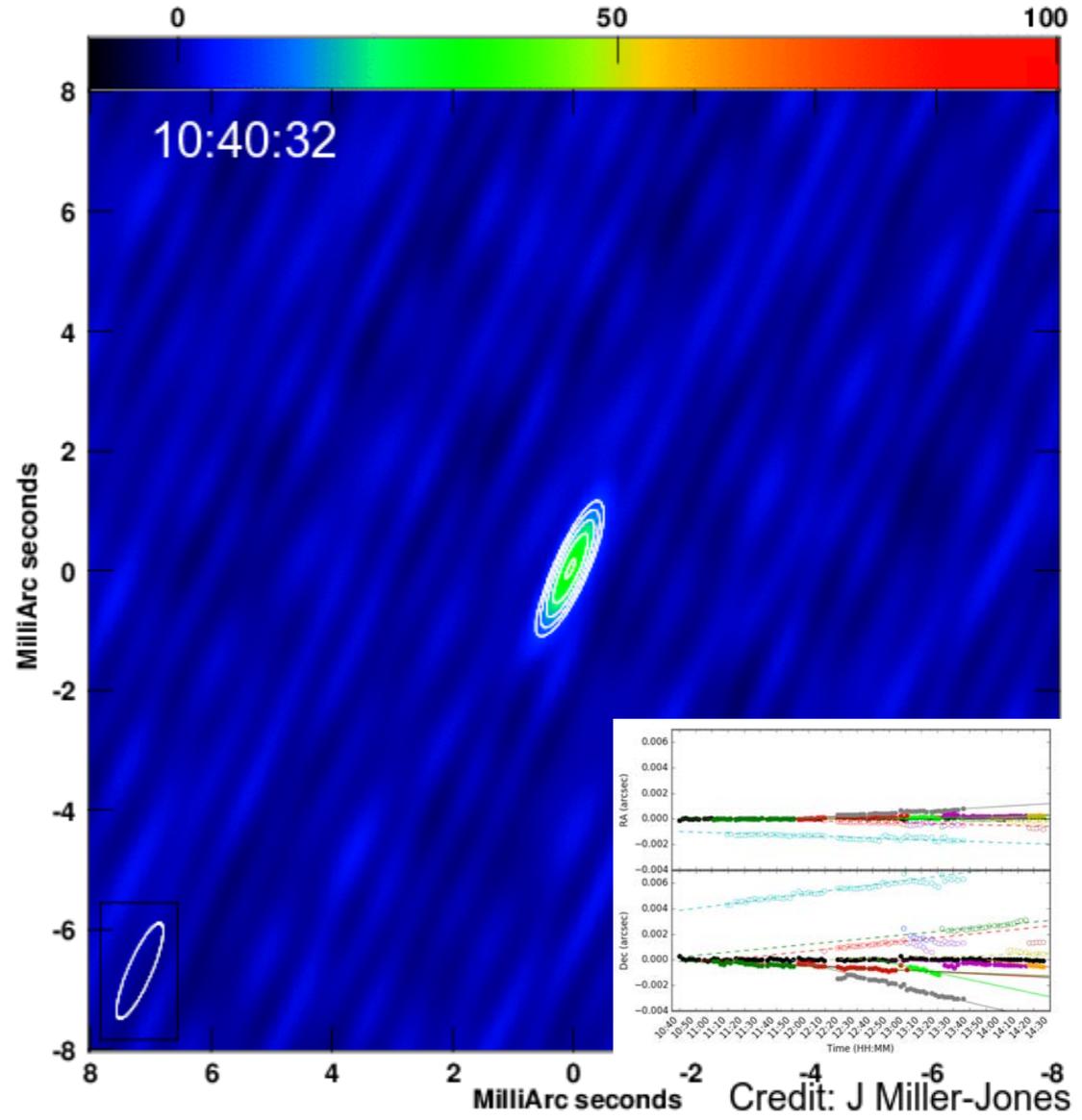
Observation **rapide** et **VLBI** du microquasars V404 Cygni



GRS1915
Mirabel & Rodriguez (1994)



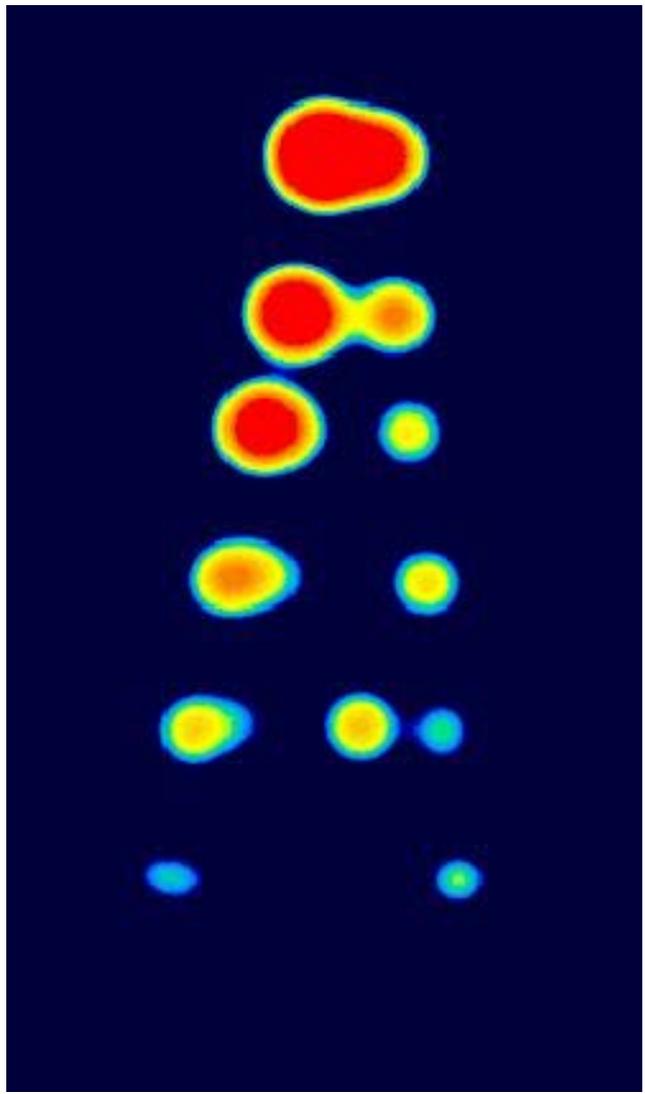
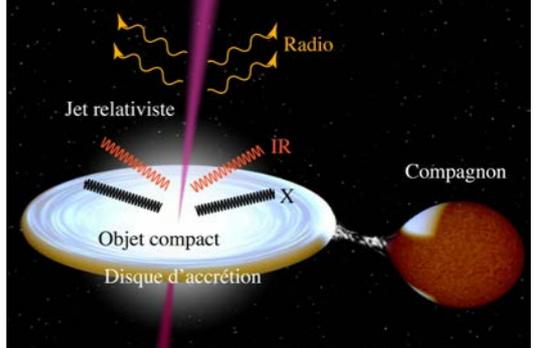
GRO J1655-40
Tingay et al. (1995)



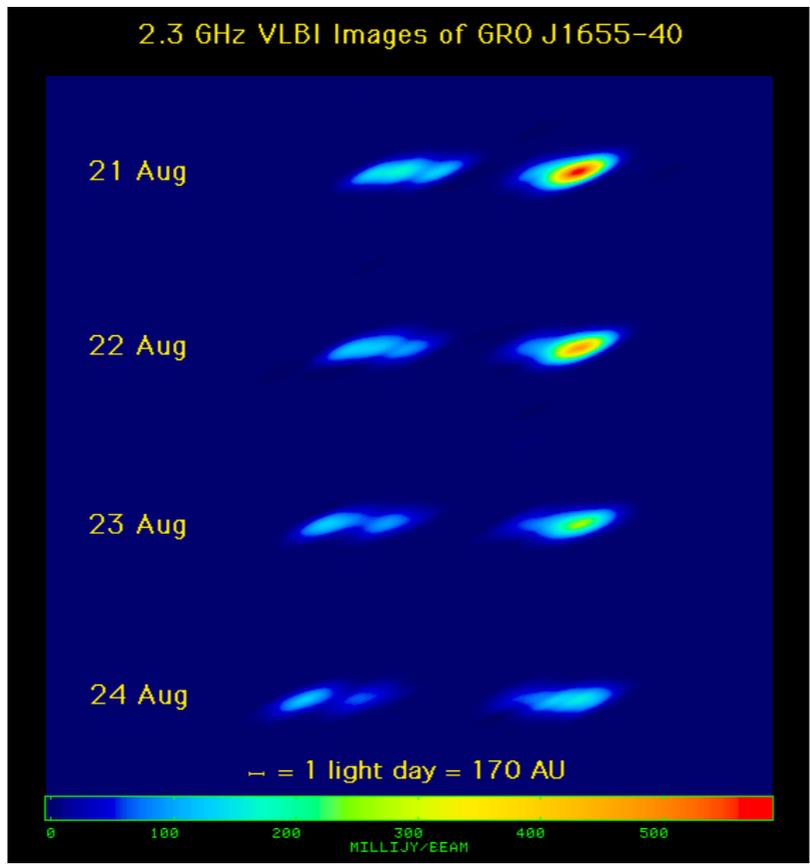
V404 Cygni
J. Miller-Jones

Diversité des sources radio

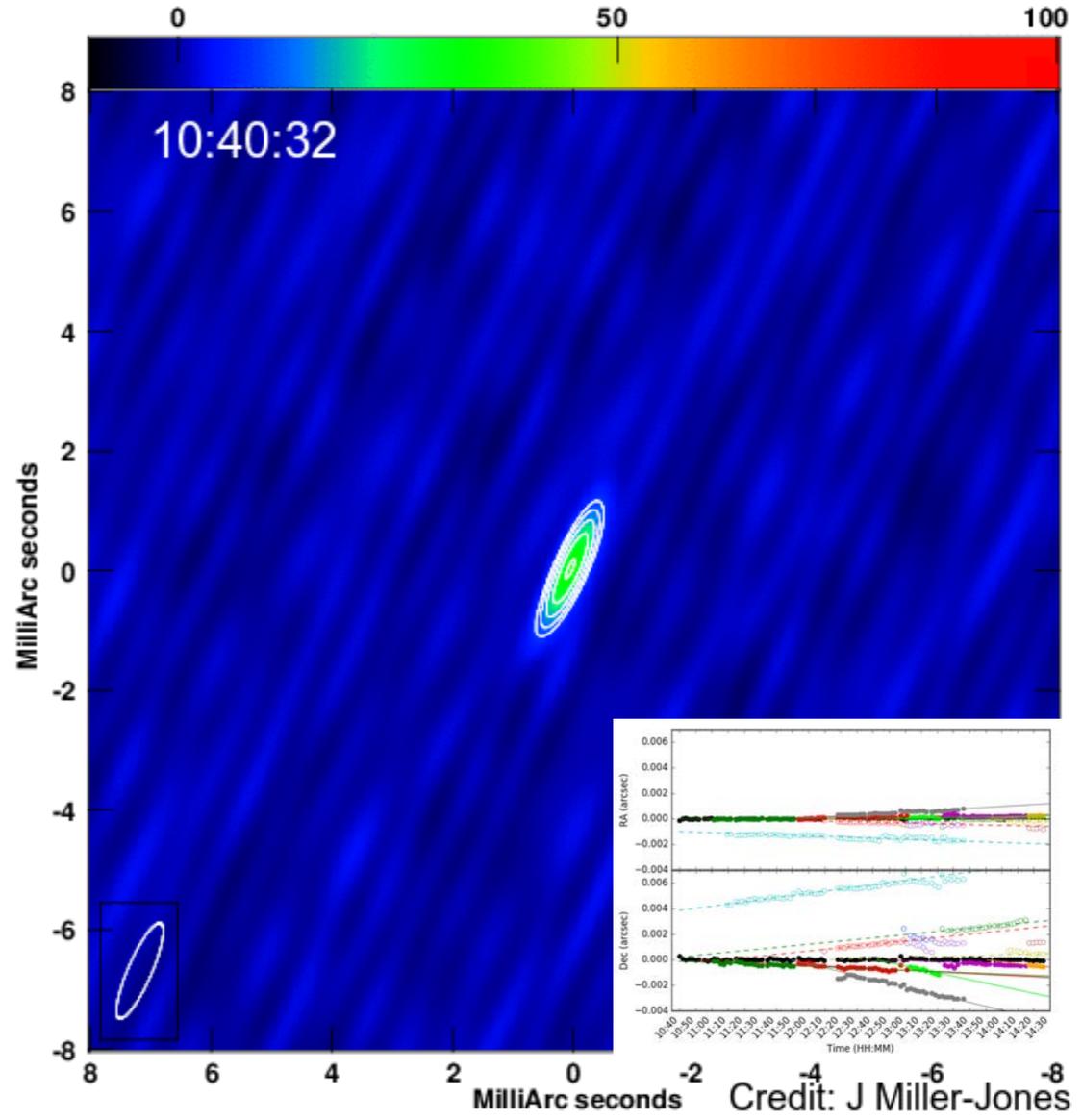
Observation **rapide** et **VLBI** du microquasars V404 Cygni



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

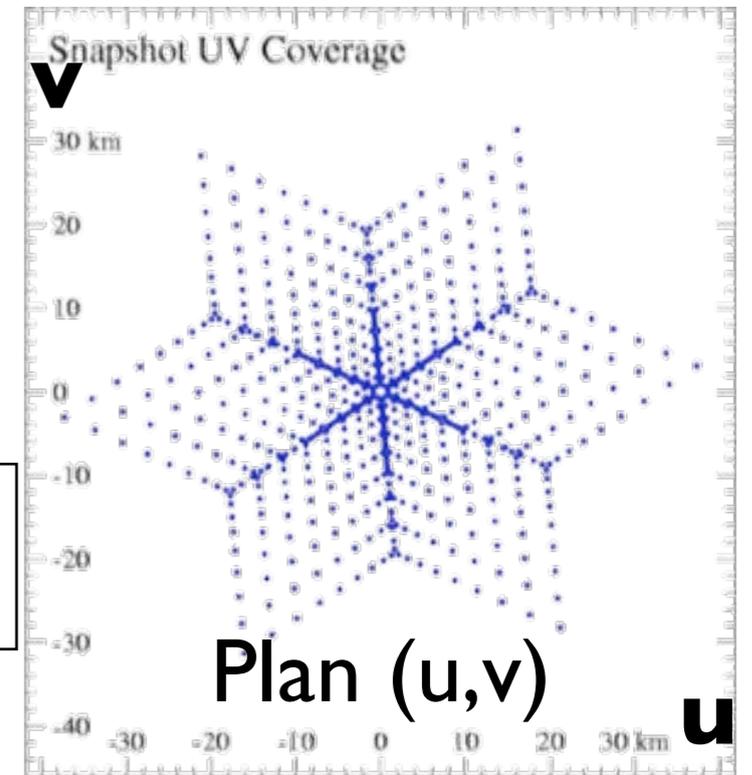
Étalonnage des interféromètres



$\sim \mathcal{F}$

➔

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

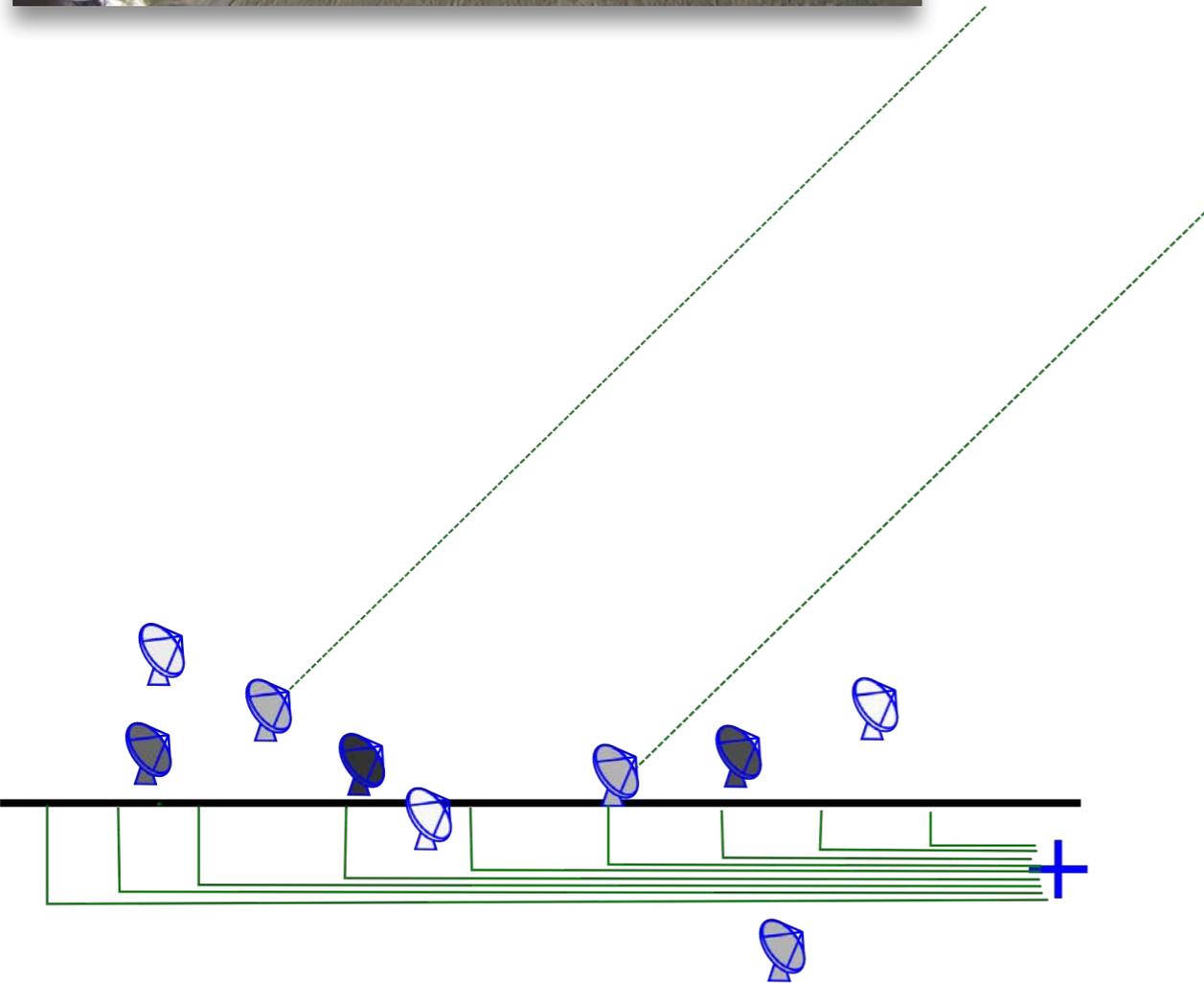
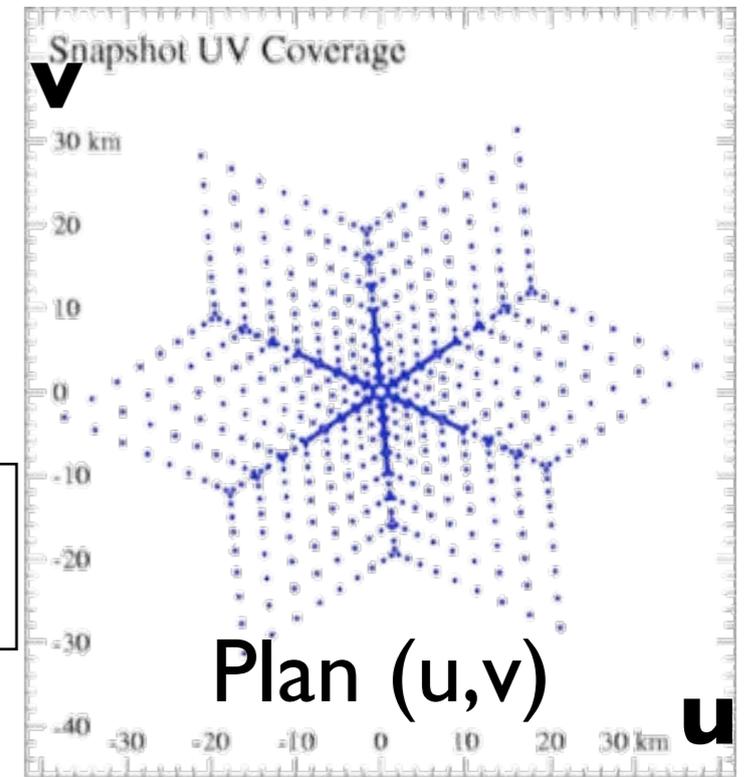


Étalonnage des interféromètres



$\sim \mathcal{F}$
→

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

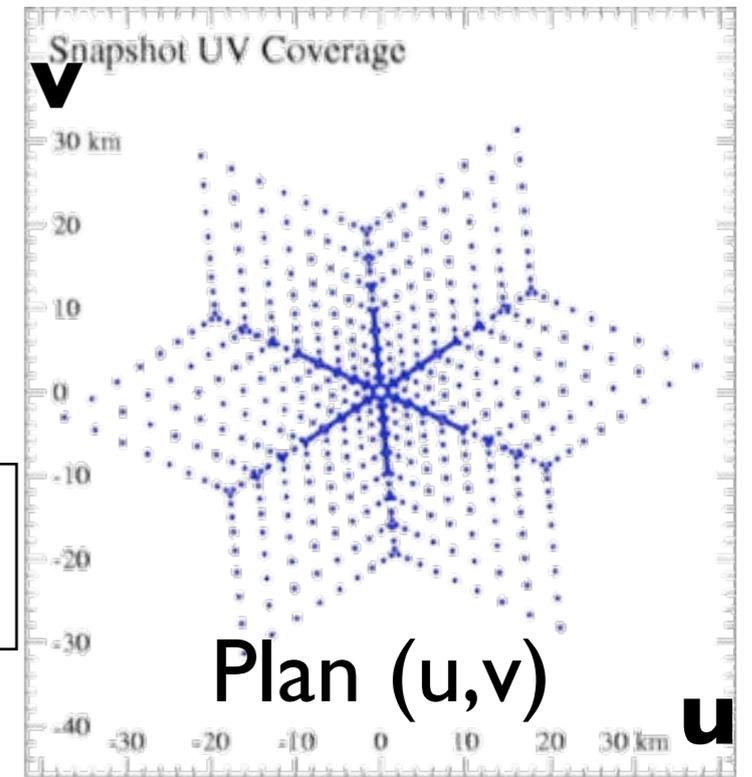


Étalonnage des interféromètres

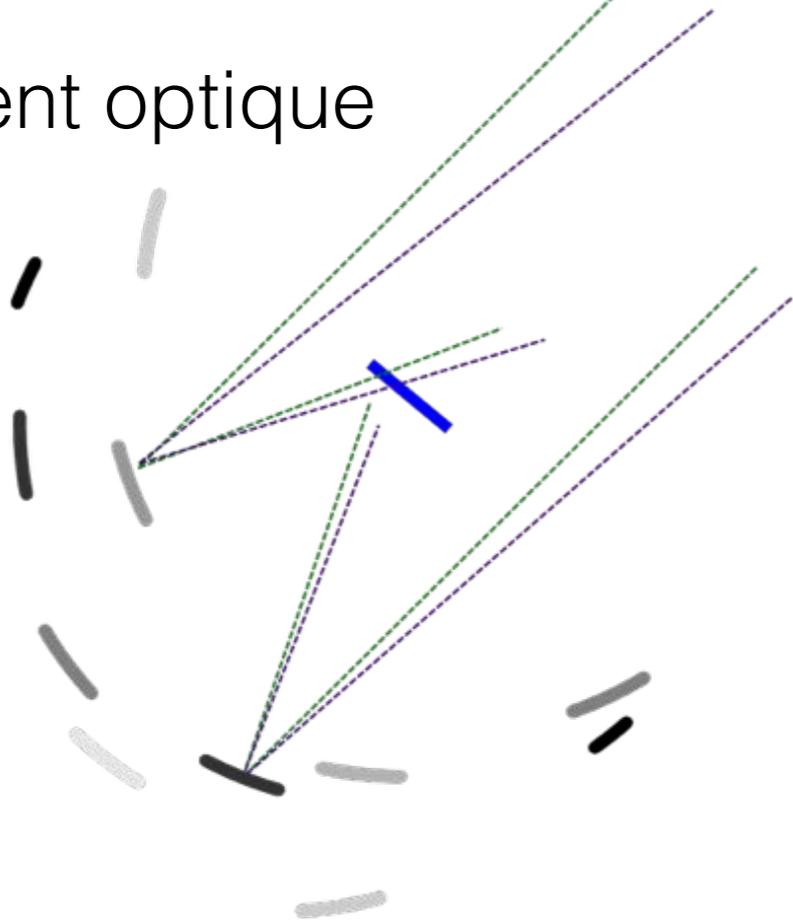


$\sim \mathcal{F}$
➔

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



équivalent optique

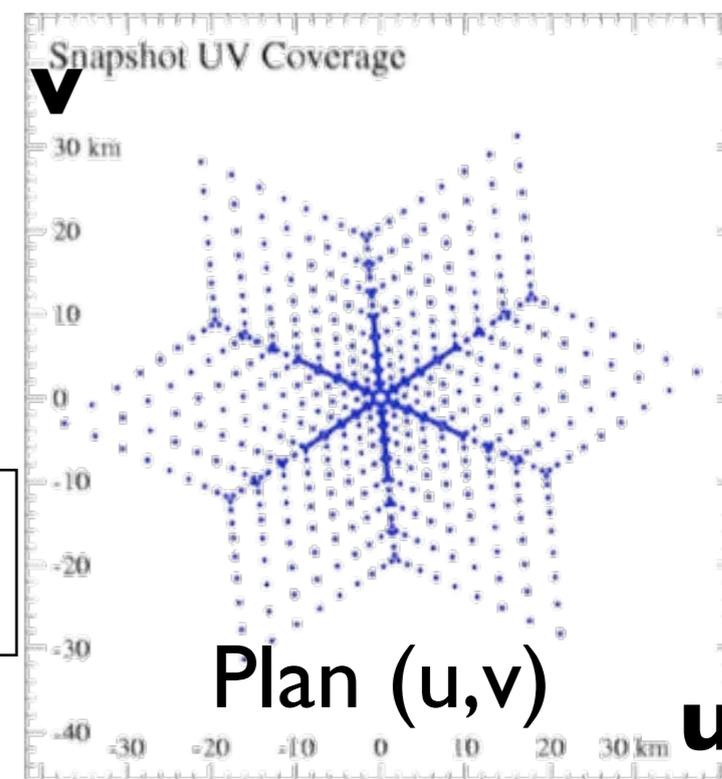


Étalonnage des interféromètres

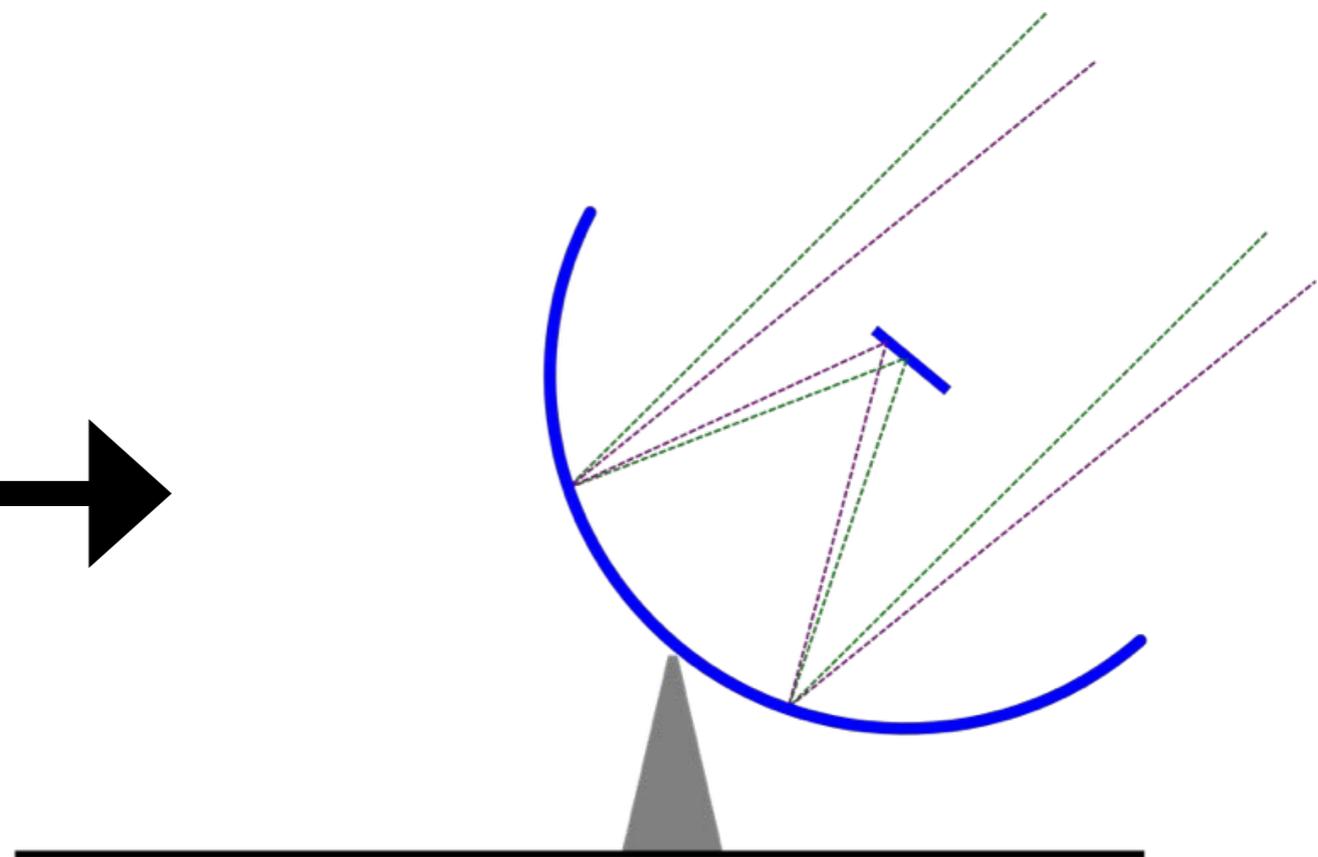
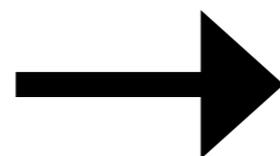
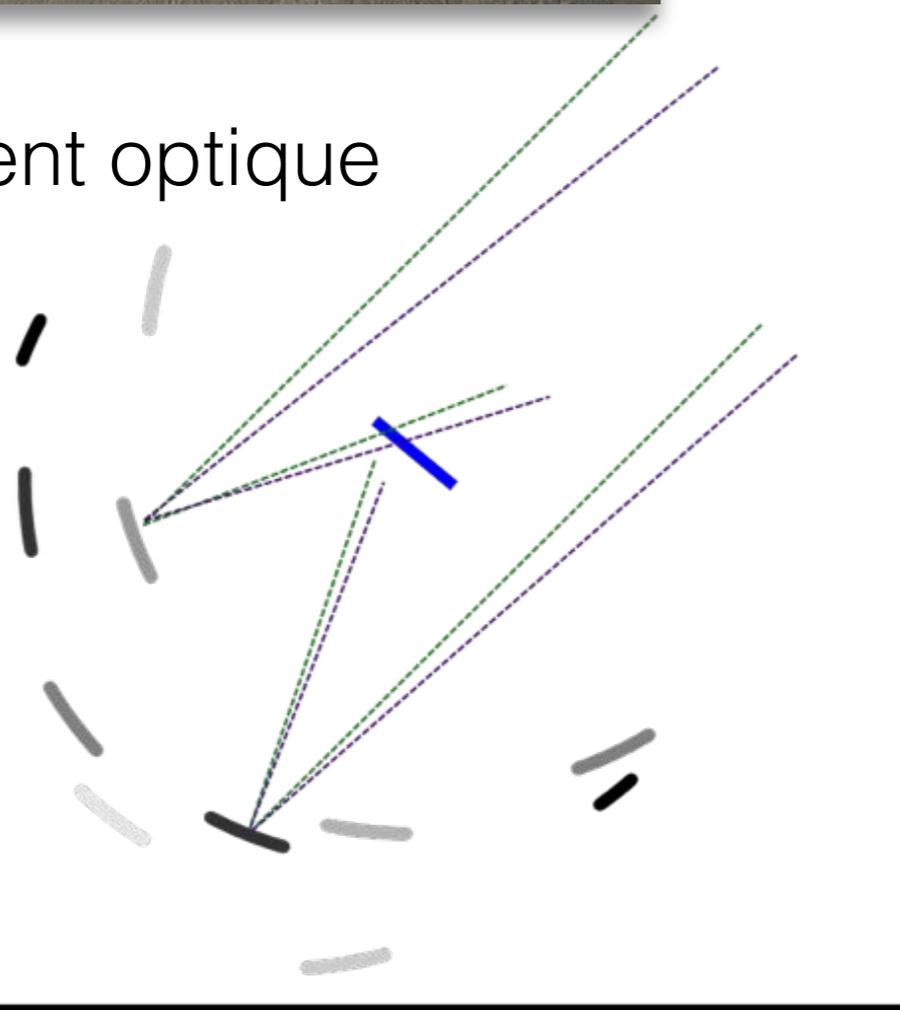


$\sim \mathcal{F}$

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



équivalent optique

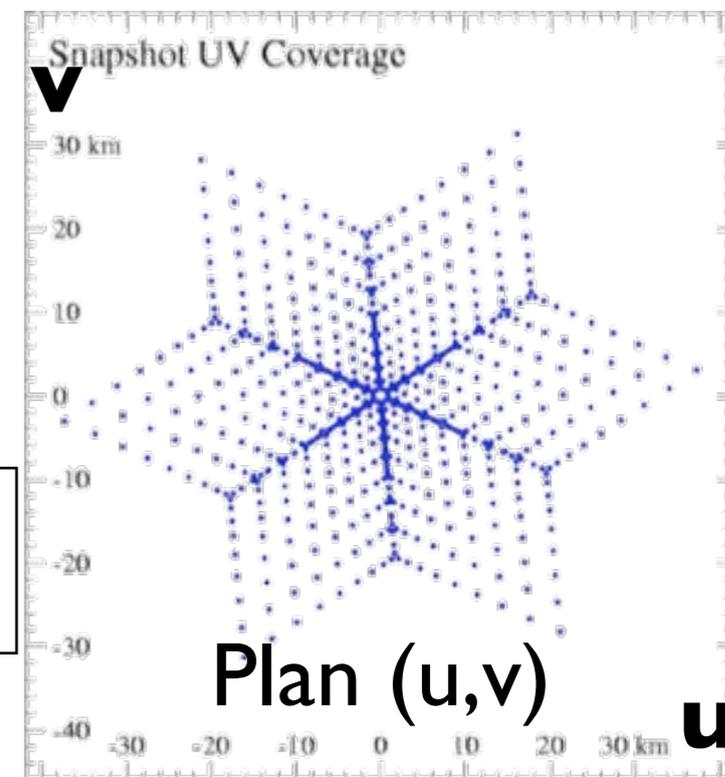


Étalonnage des interféromètres

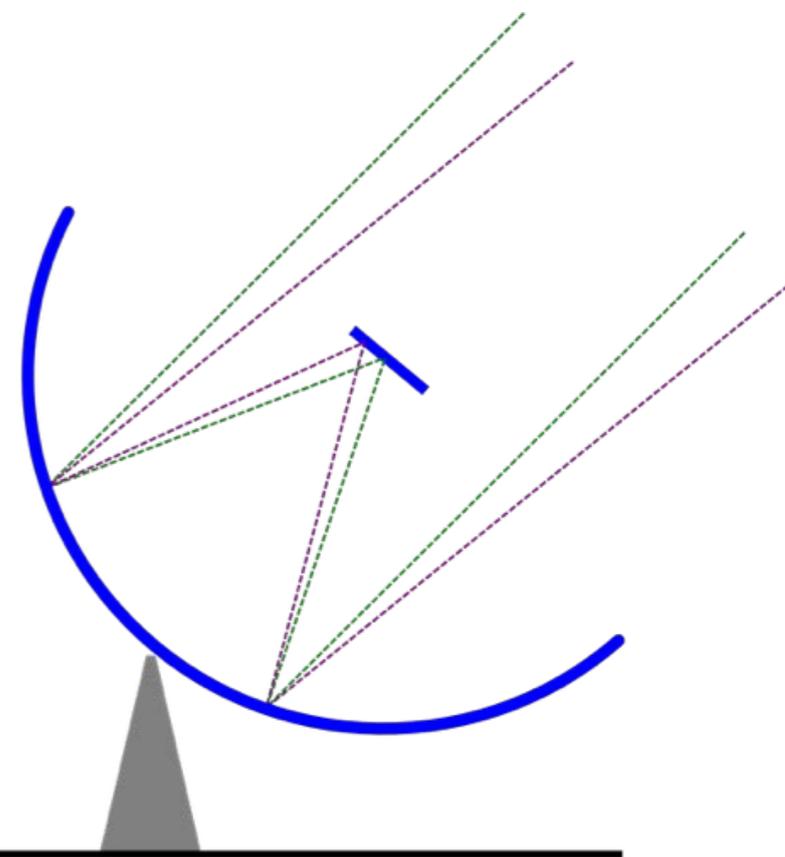
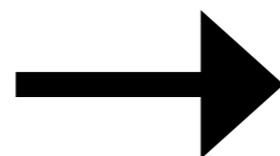
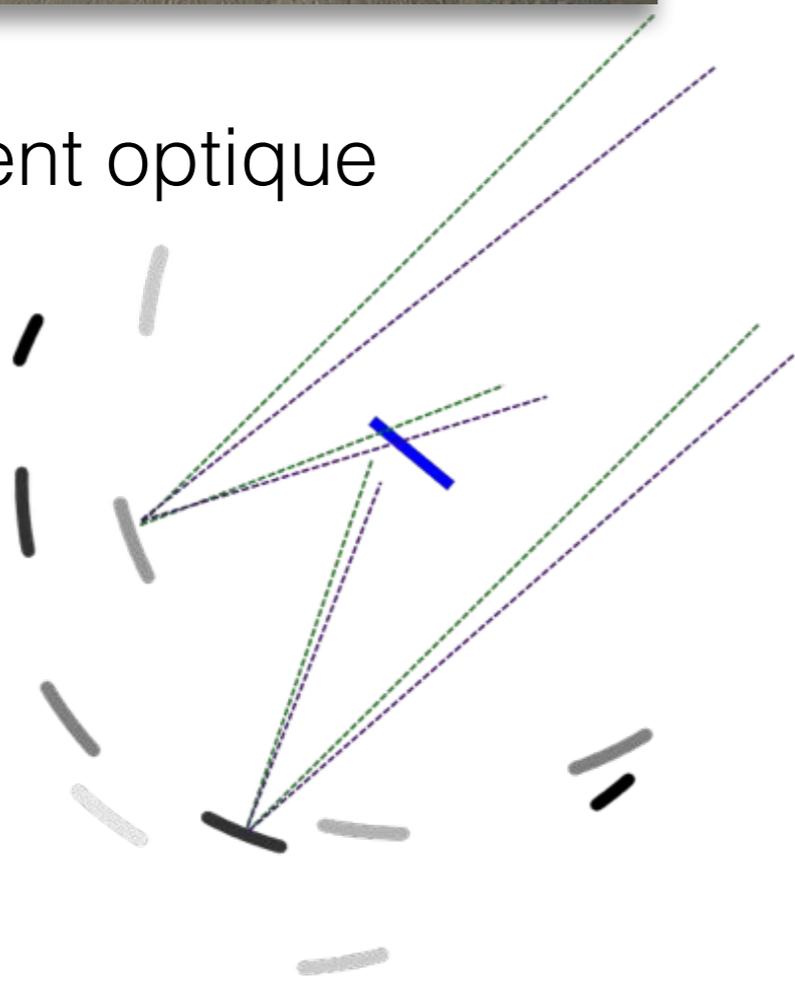


$\sim \mathcal{F}$
→

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



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

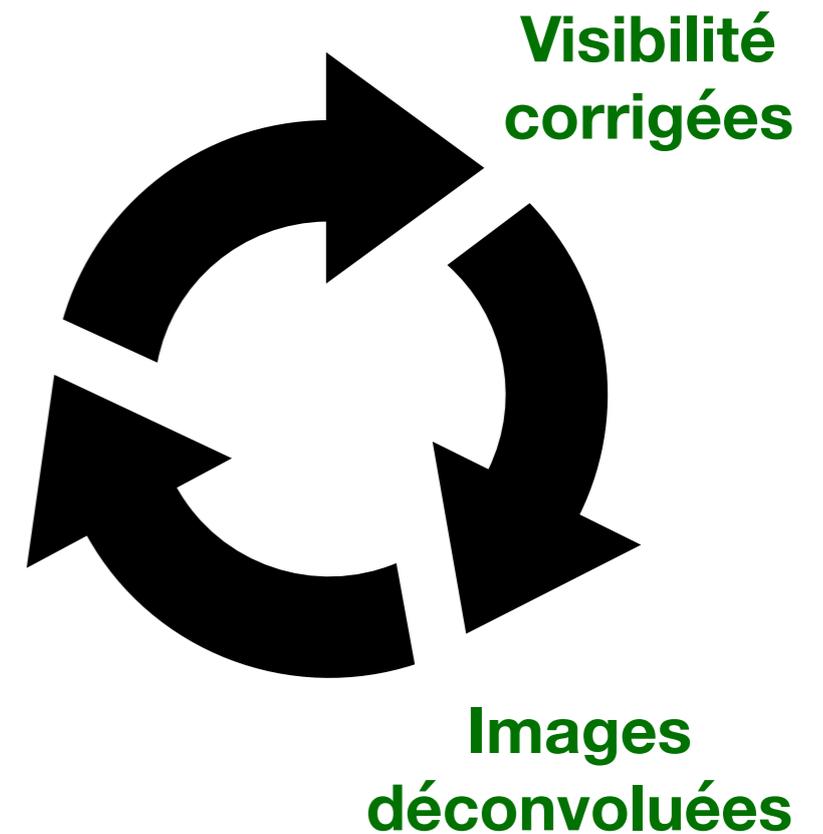
bruit sur la ligne
de base (p,q)

"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

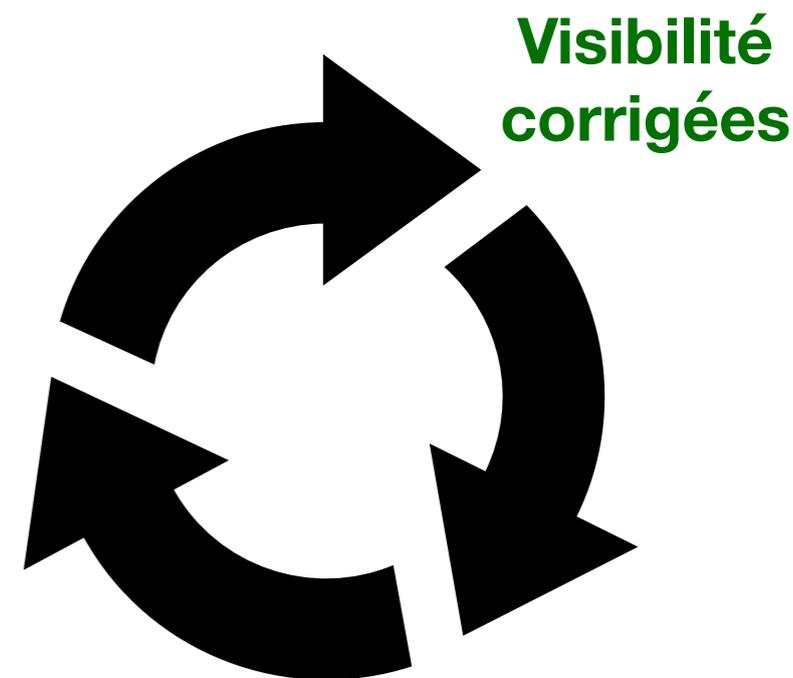
bruit sur la ligne
de base (p,q)

"2ème génération" (2GC)

Amélioration de l'étalonnage
données grâce au contenu du champ

"Self-calibration"

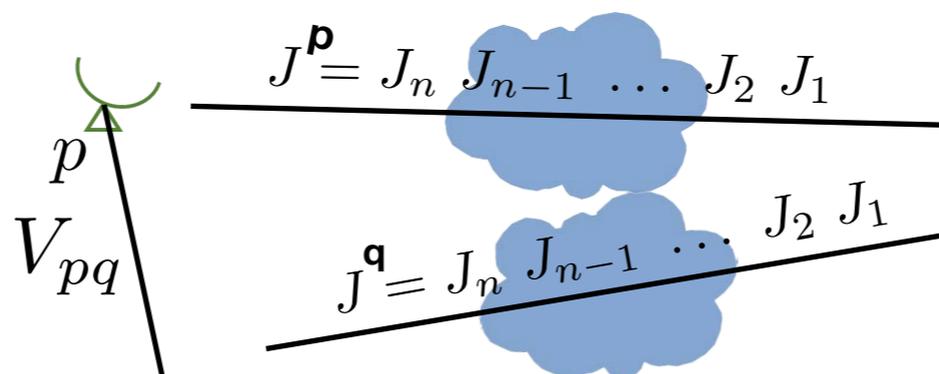
Visibilité
brutes



"3ème génération" (3GC)

Equation de la mesure

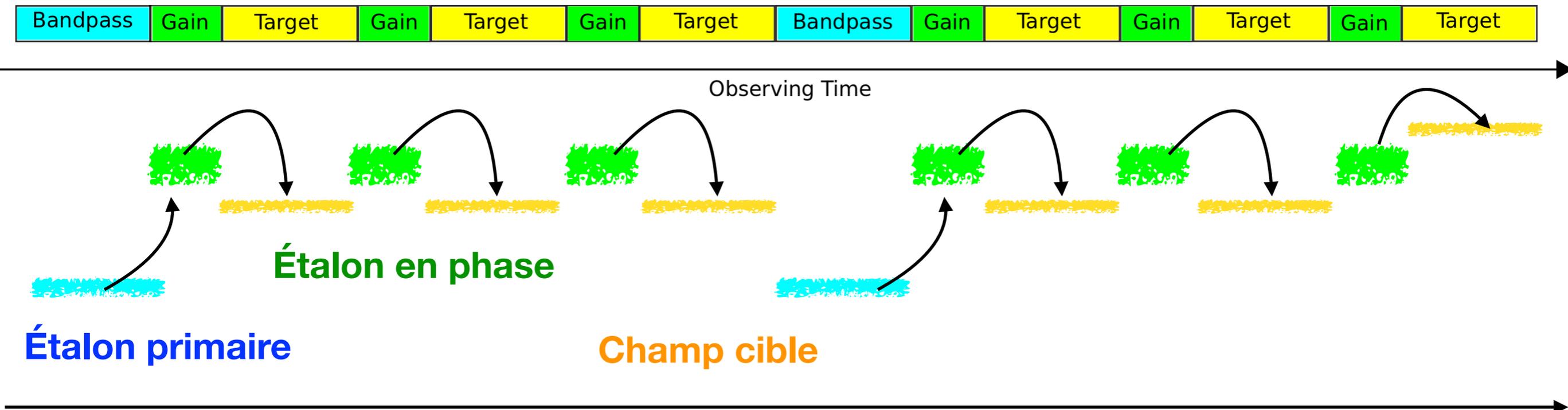
Effets dépendants de la direction
non uniformes dans le champ



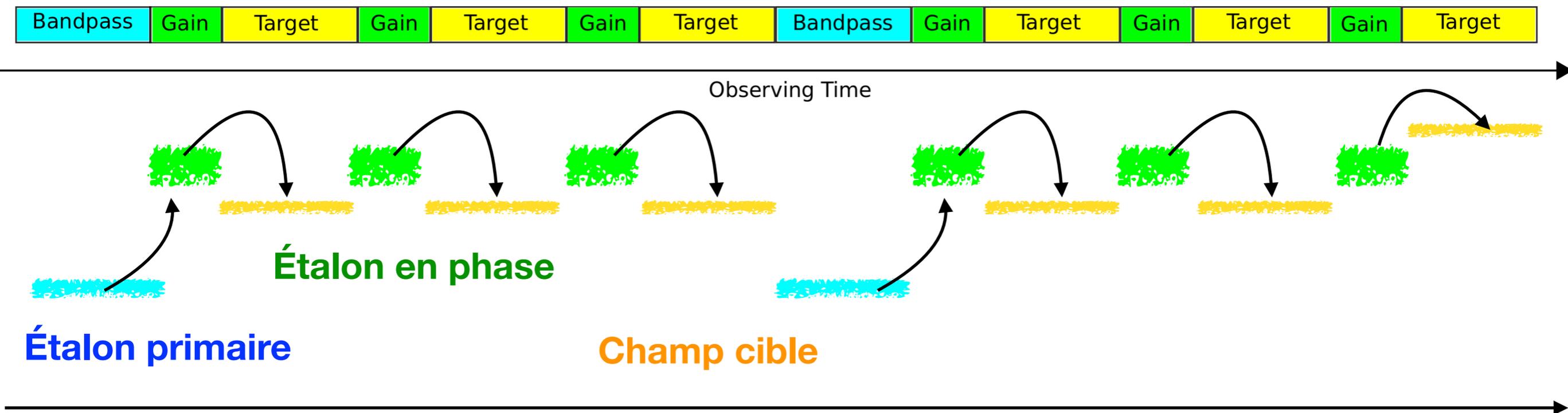
Images
déconvoluées

- 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

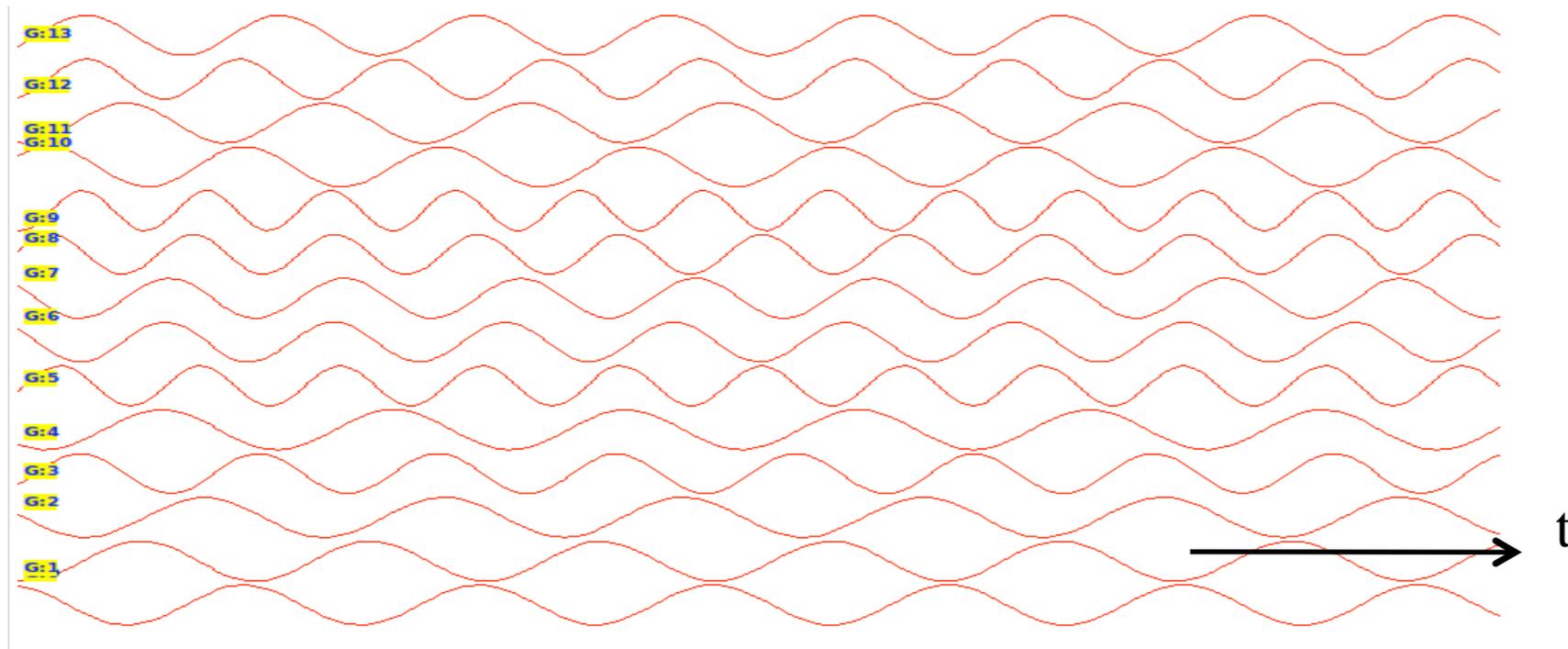


- La source étalon permet de suivre les variations de la réponse de l'instrument (~étoile guide)
- On détermine les **gains complexes** des antennes g_p qui seront utilisé pour corriger les visibilitées du champ cible.
- On peut **sélectionner, lisser, interpoler** ces solutions suivant le degré de correction

- 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

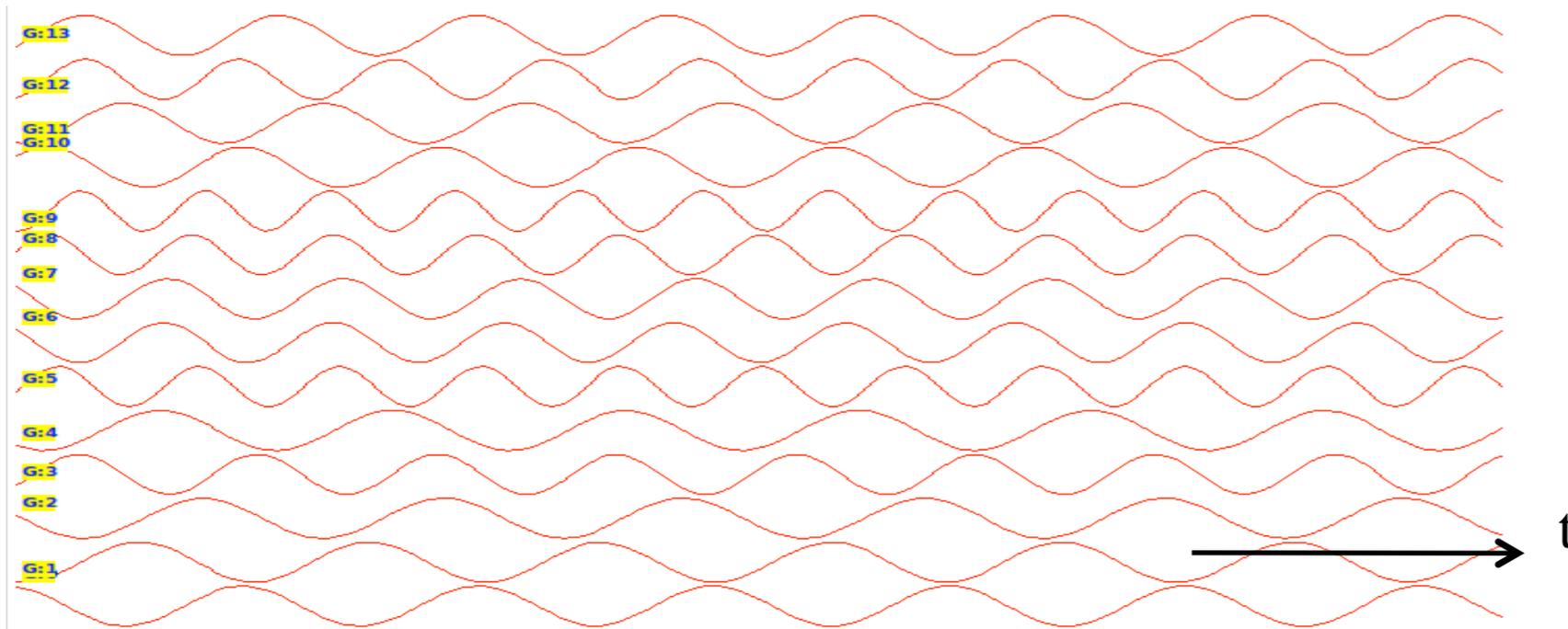


Gain des 14 antennes du
WSRT (Westerbork
Synthesis Radio Telescope)

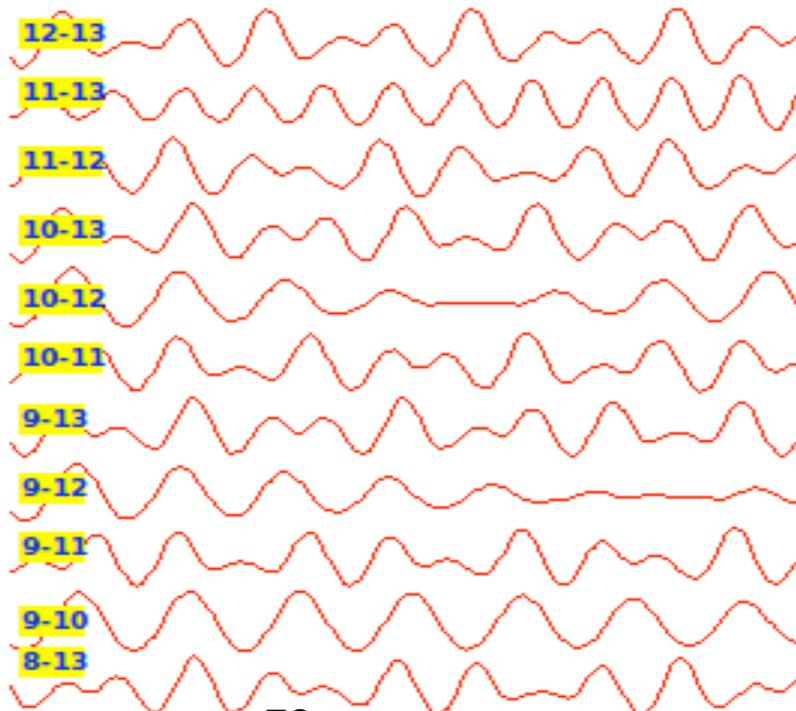
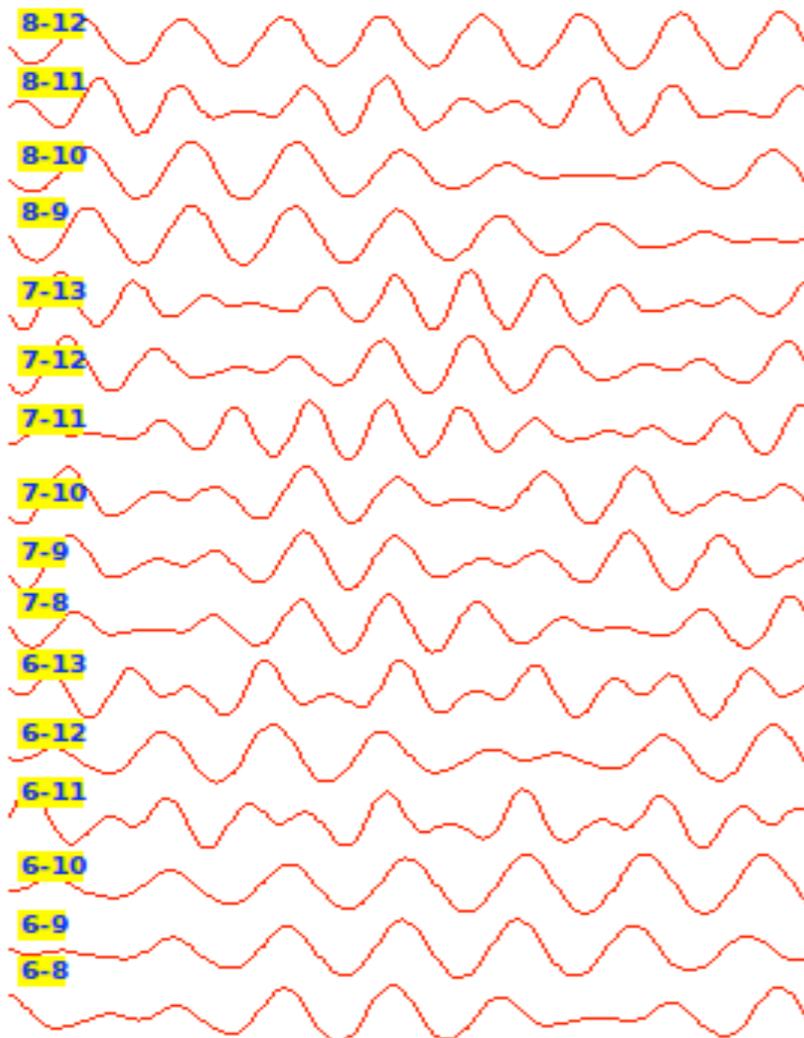
Étalonnage des interféromètres

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)

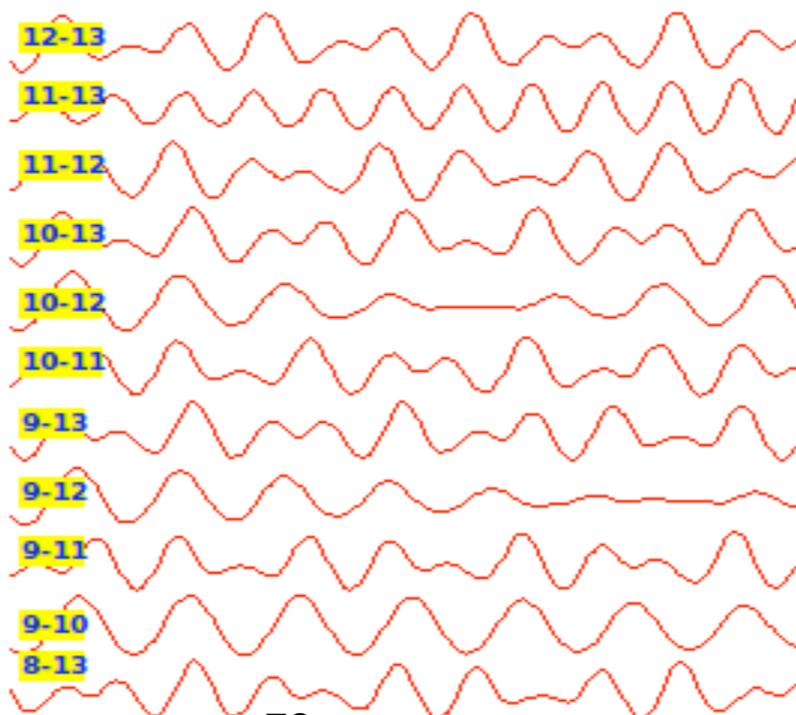
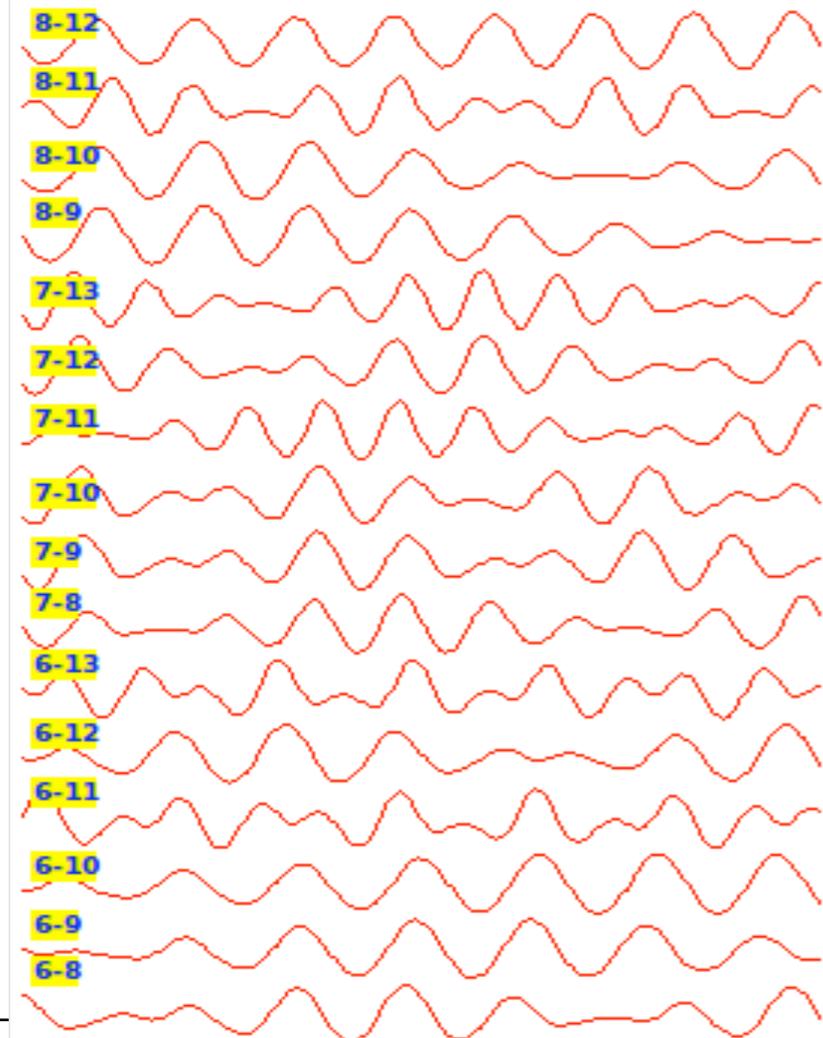
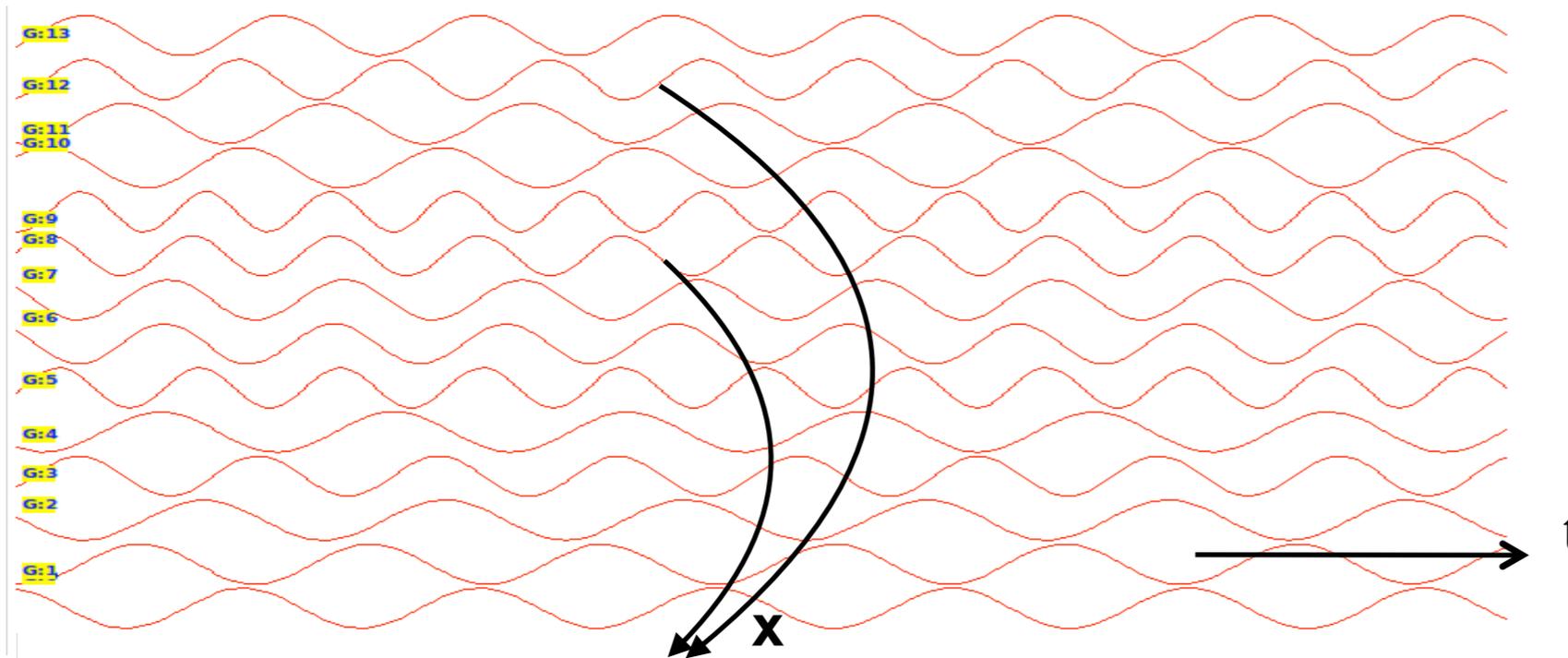


→ Amplitude de la visibilité pour quelques lignes de bases (en fonction de t)

Étalonnage des interféromètres

1GC

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

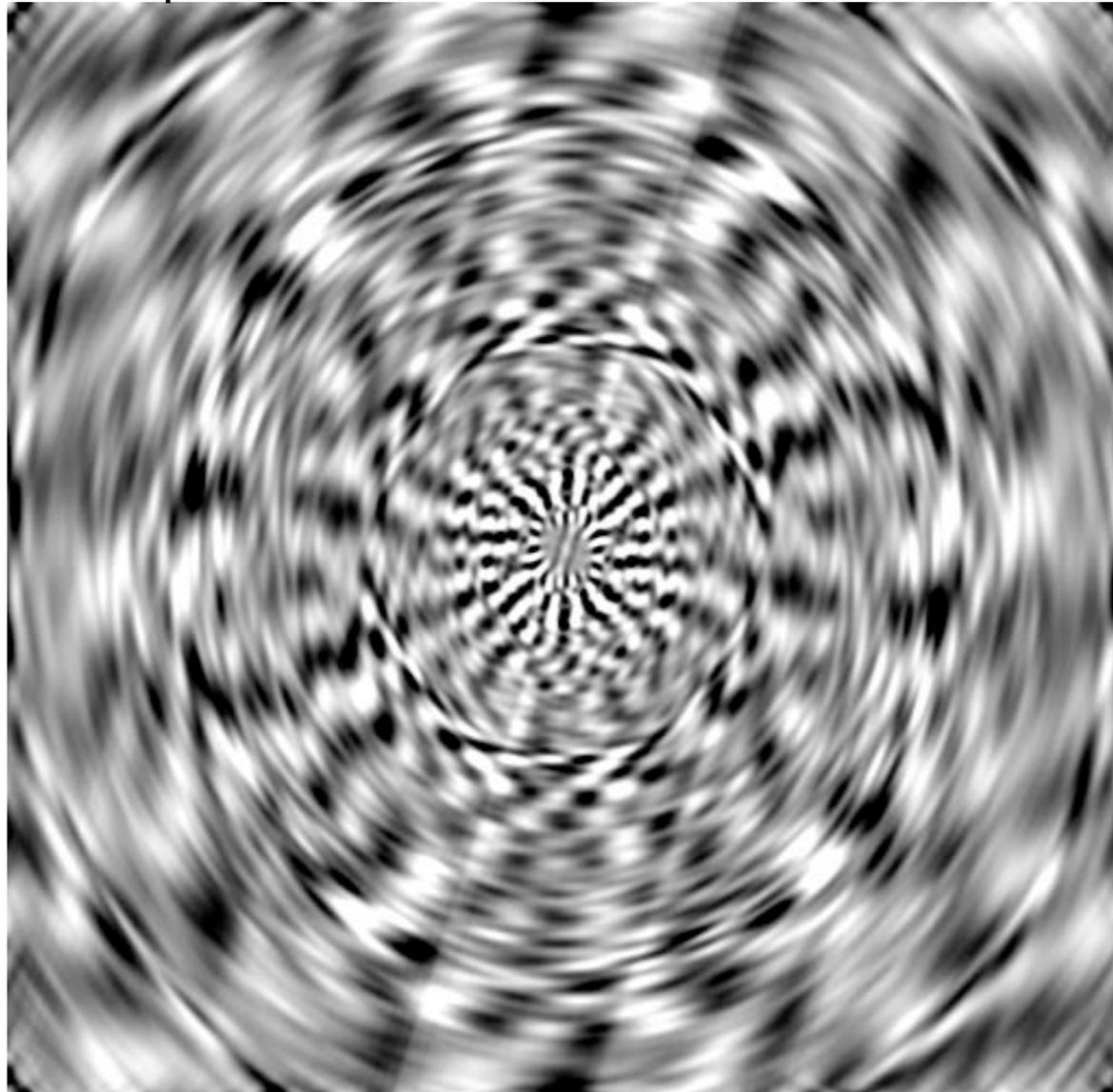


→ Amplitude de la visibilité pour quelques lignes de bases (en fonction de t)

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

Avant étalonnage des Gains

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



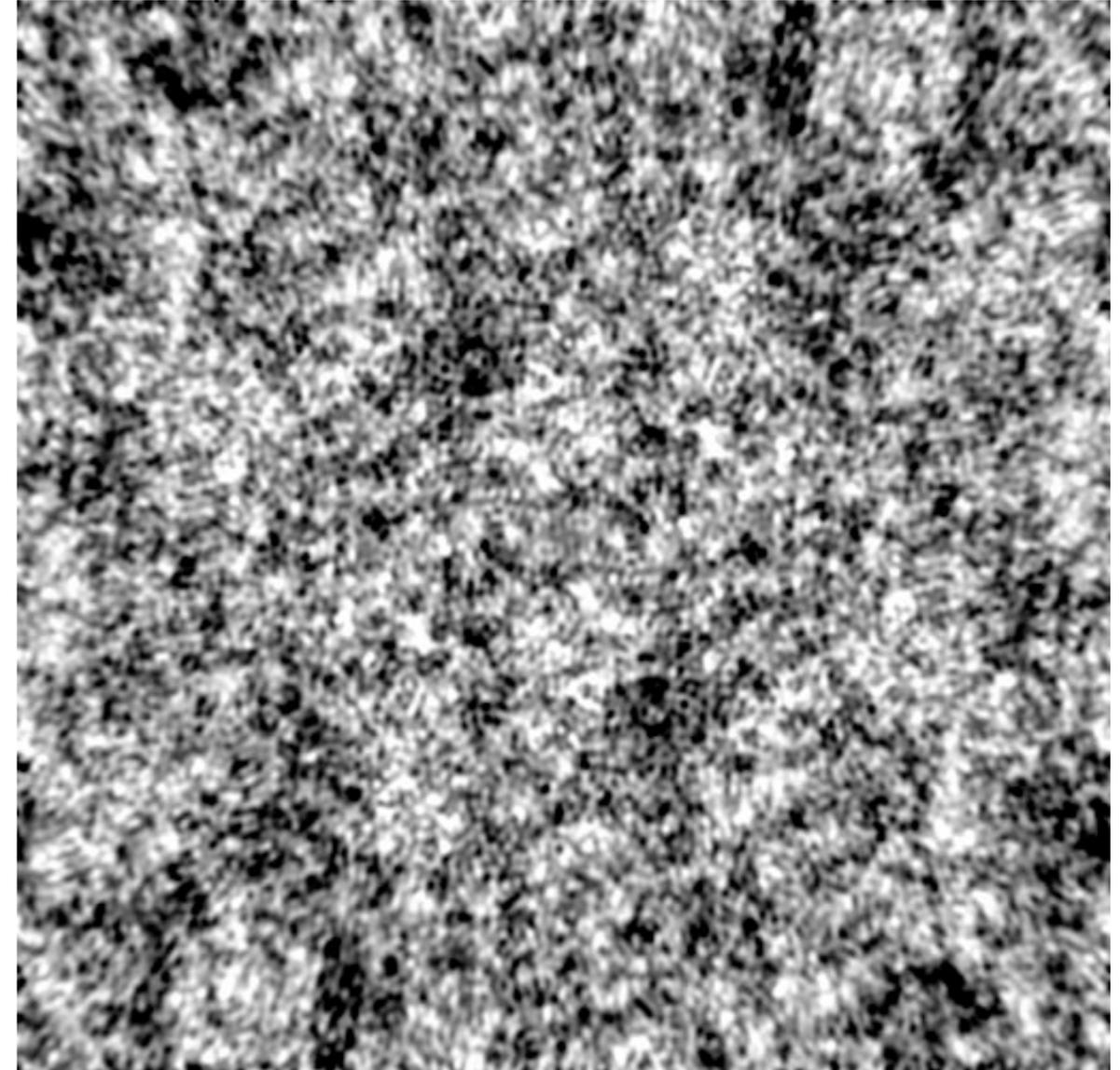
Min = -0.03 Jy

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

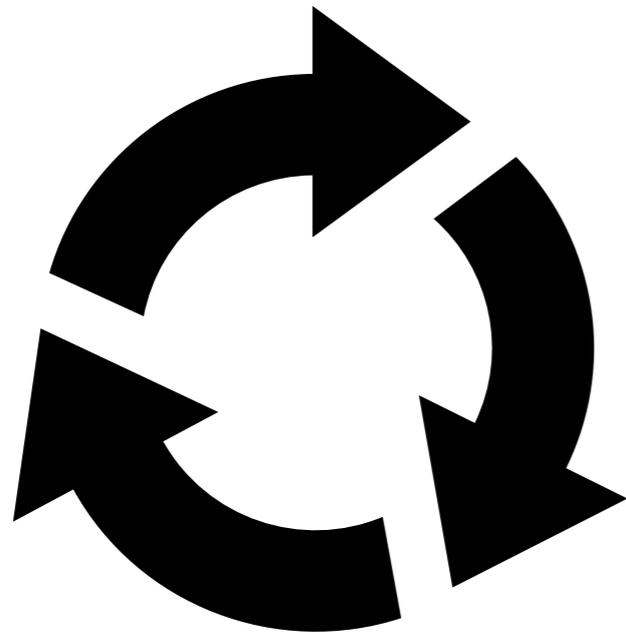
Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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

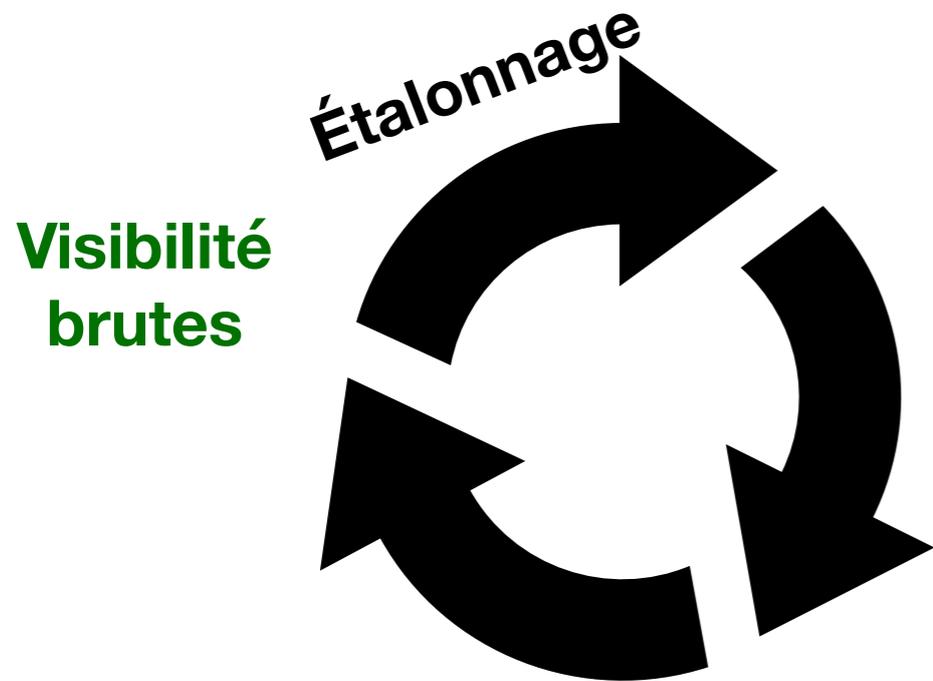


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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

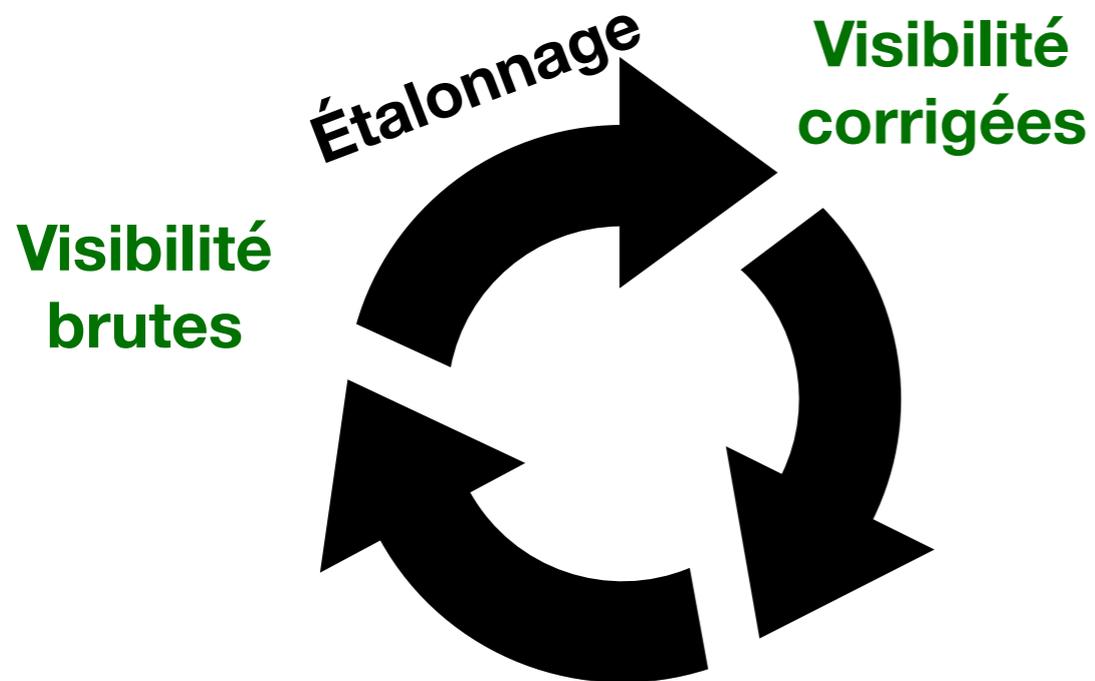


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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

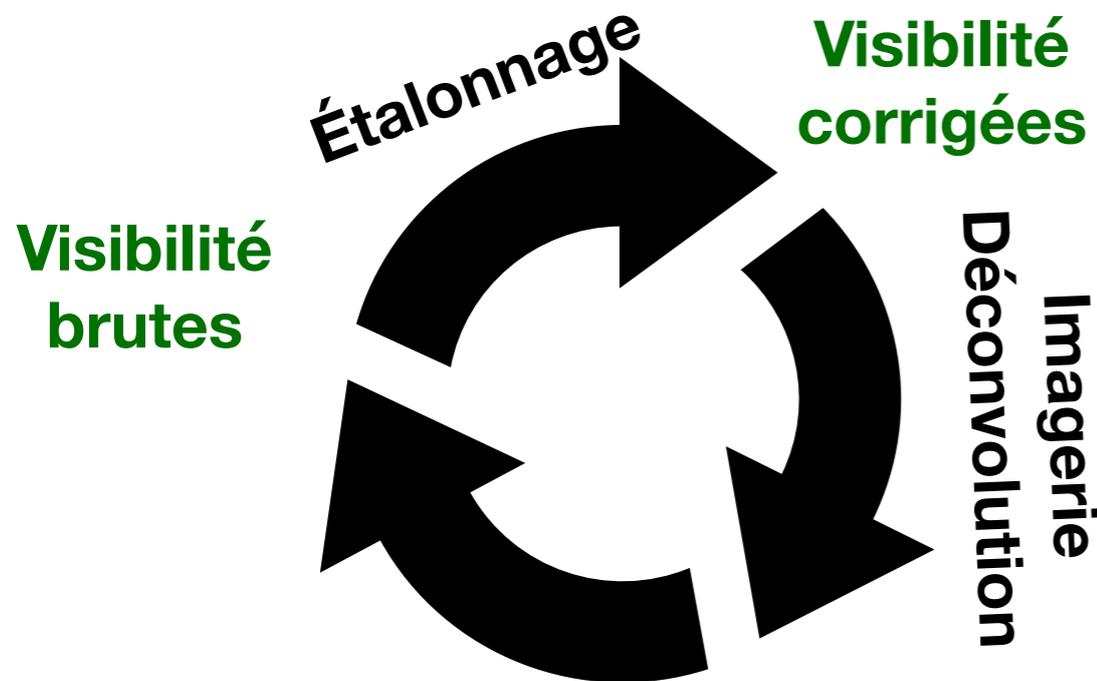


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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

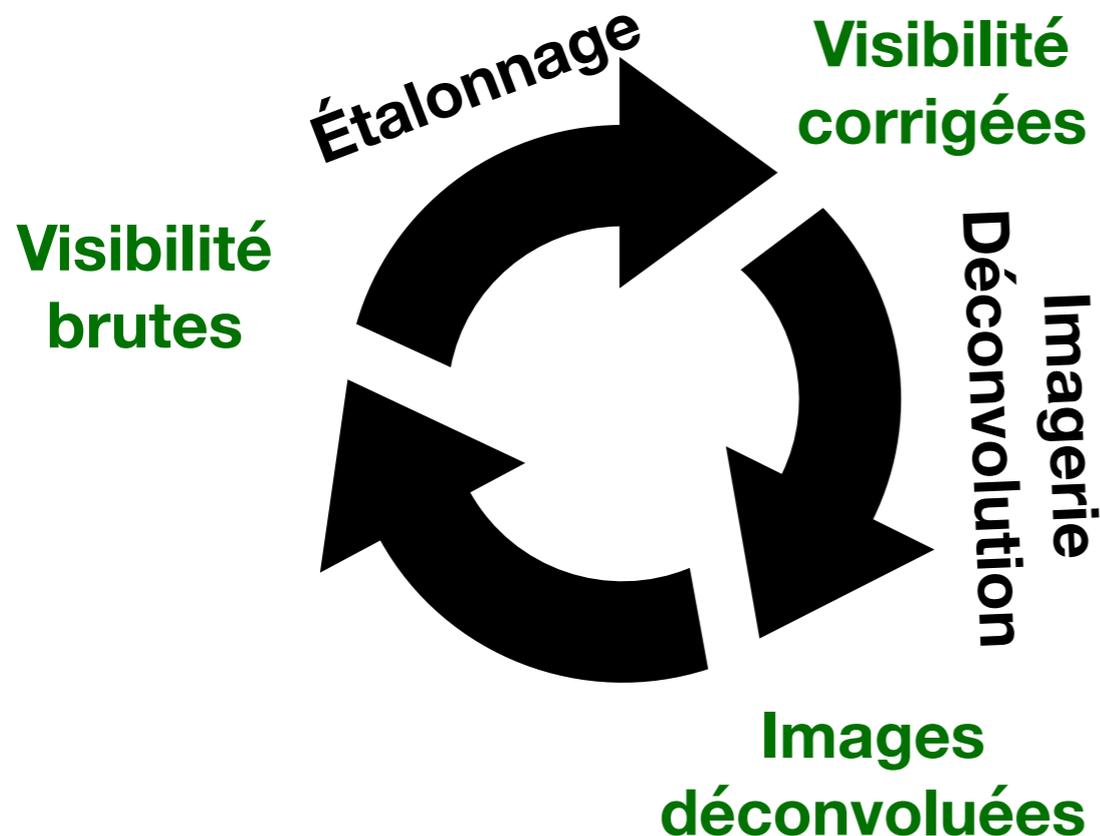


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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

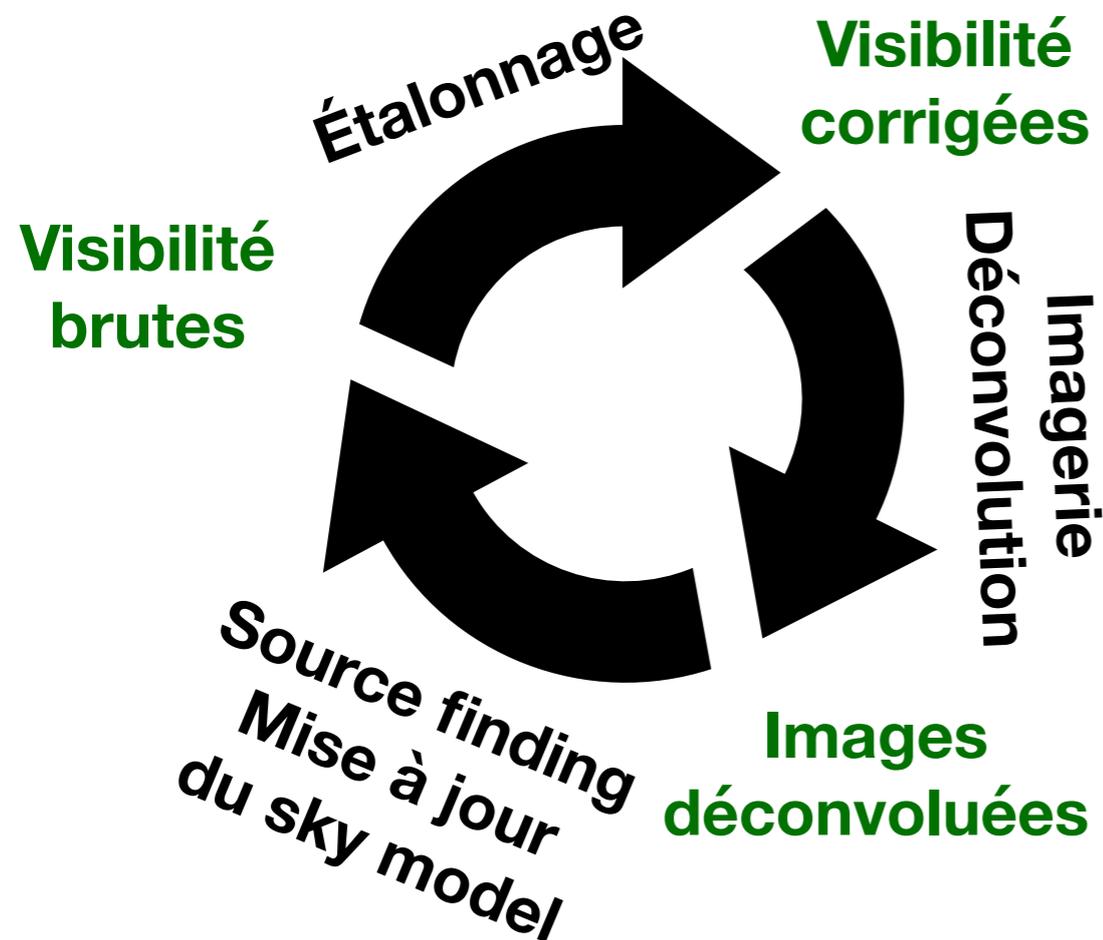


Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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



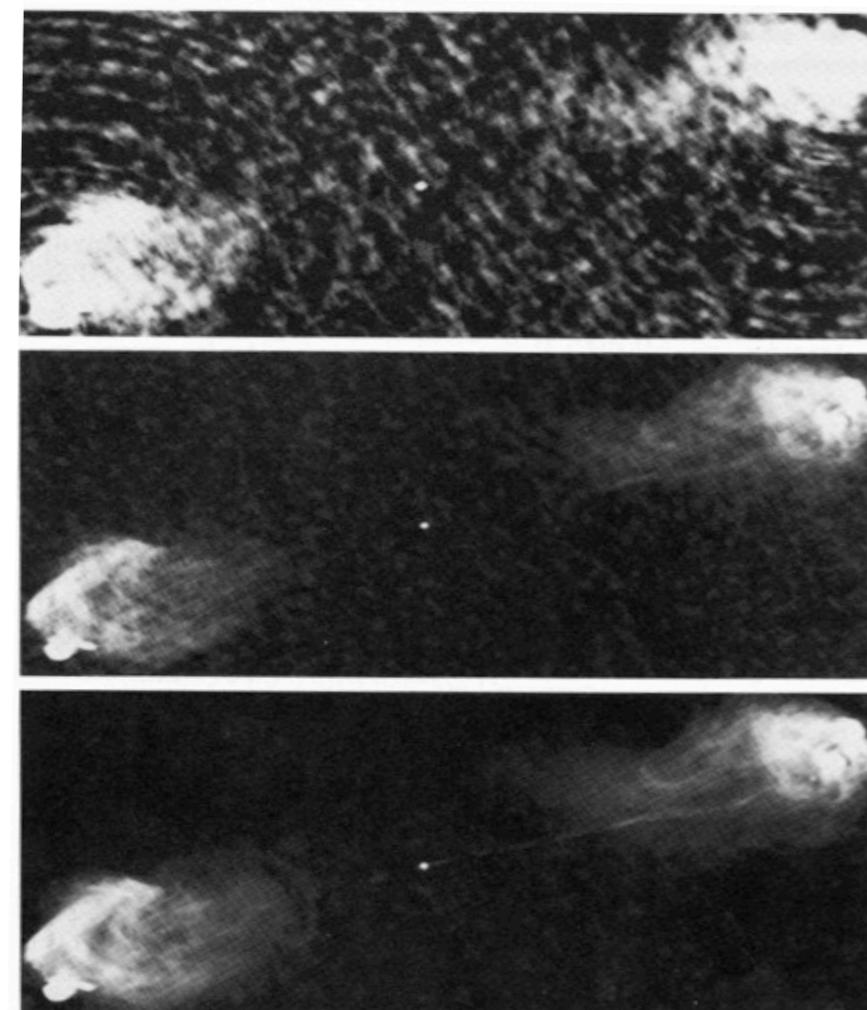
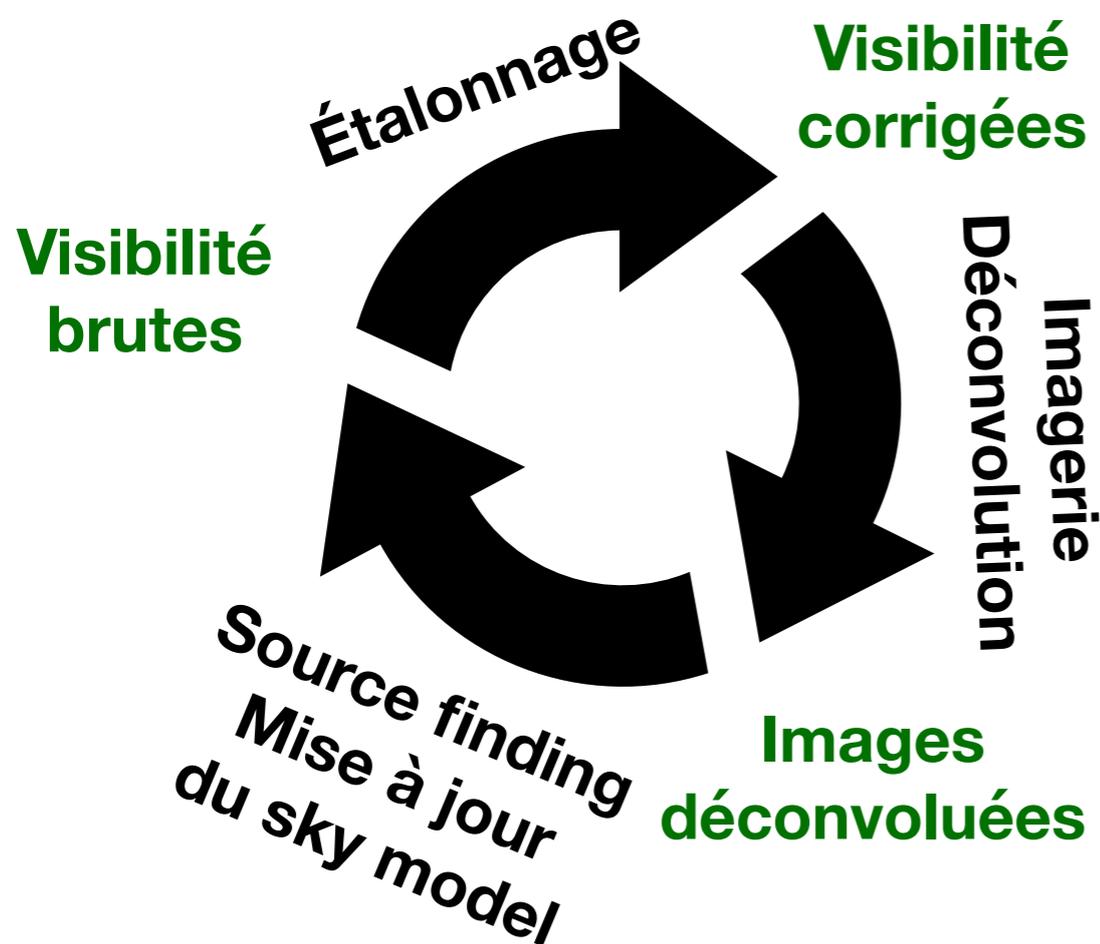
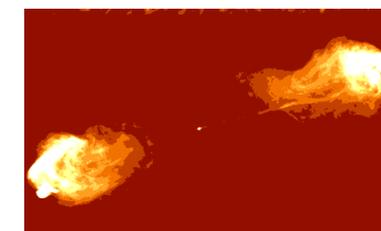
Après l'étalonnage 1GC et application des solutions au champ cible, il est possible de faire une première image "décente"

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

$$DR = \frac{\max(I)}{\sigma_I}$$

ex: DR = 1:1000 , 1:10⁶

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



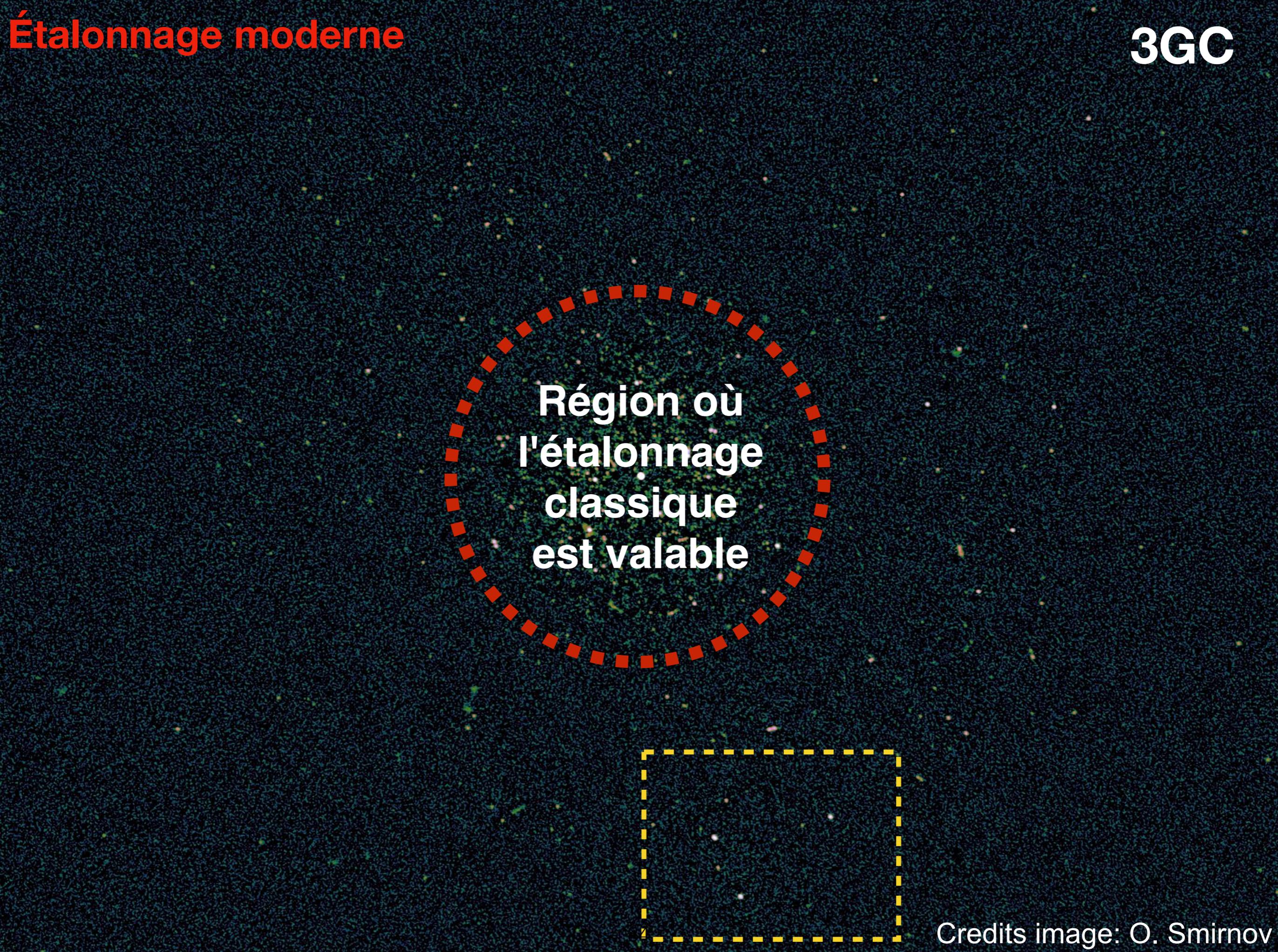
Après plusieurs itérations de self-calibration, l'image ne s'améliore plus. Cependant il peut rester des artefacts non désirés et non capturés par l'étaonnage (surtout si on veut imager dans un grand champ)



Région où
l'étaonnage
classique
est valable

Étalonnage des interféromètres

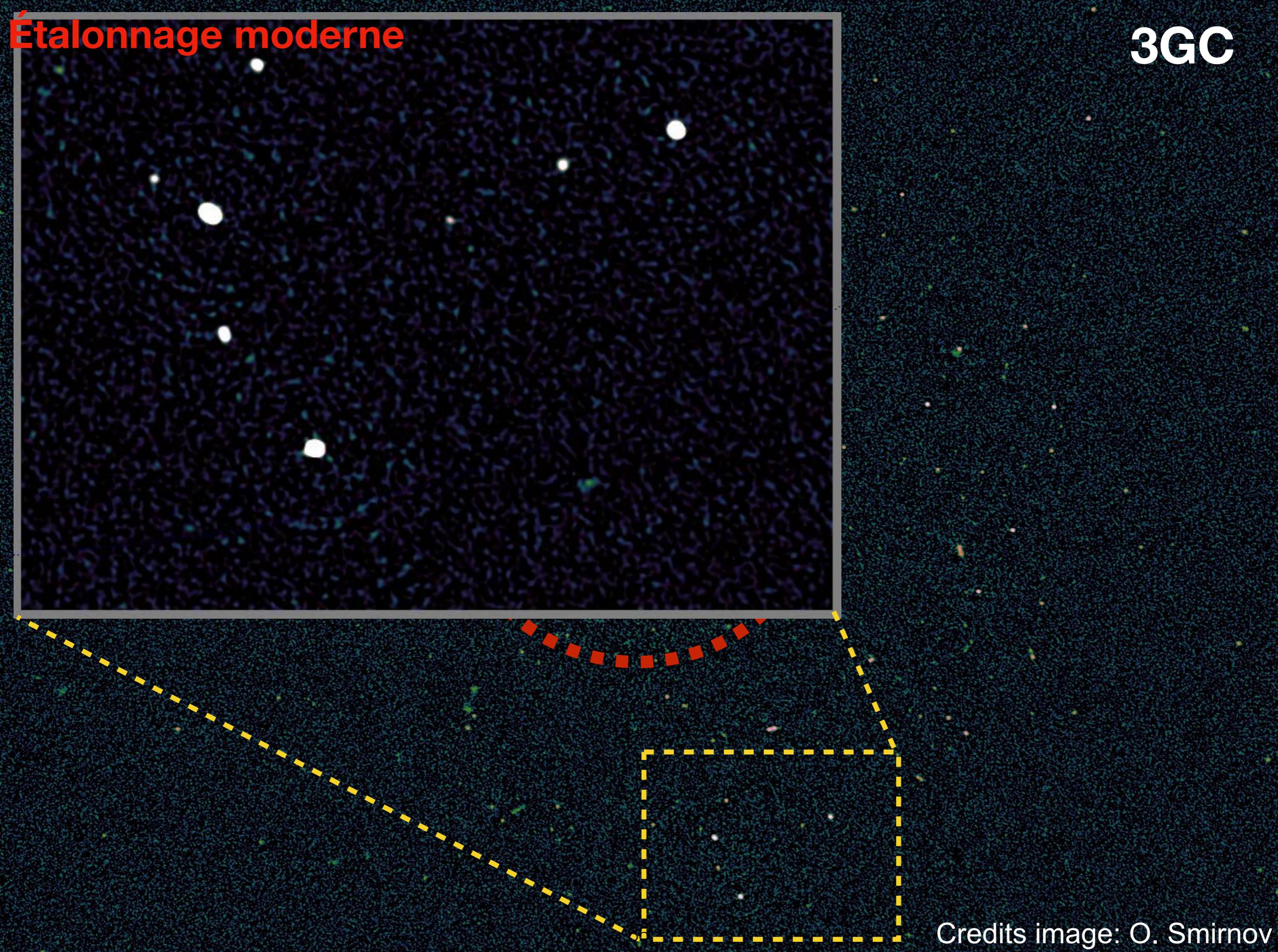
Différentes générations de calibration
Étalonnage moderne

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 rectangle is located in the lower right quadrant.

Région où
l'étalonnage
classique
est valable

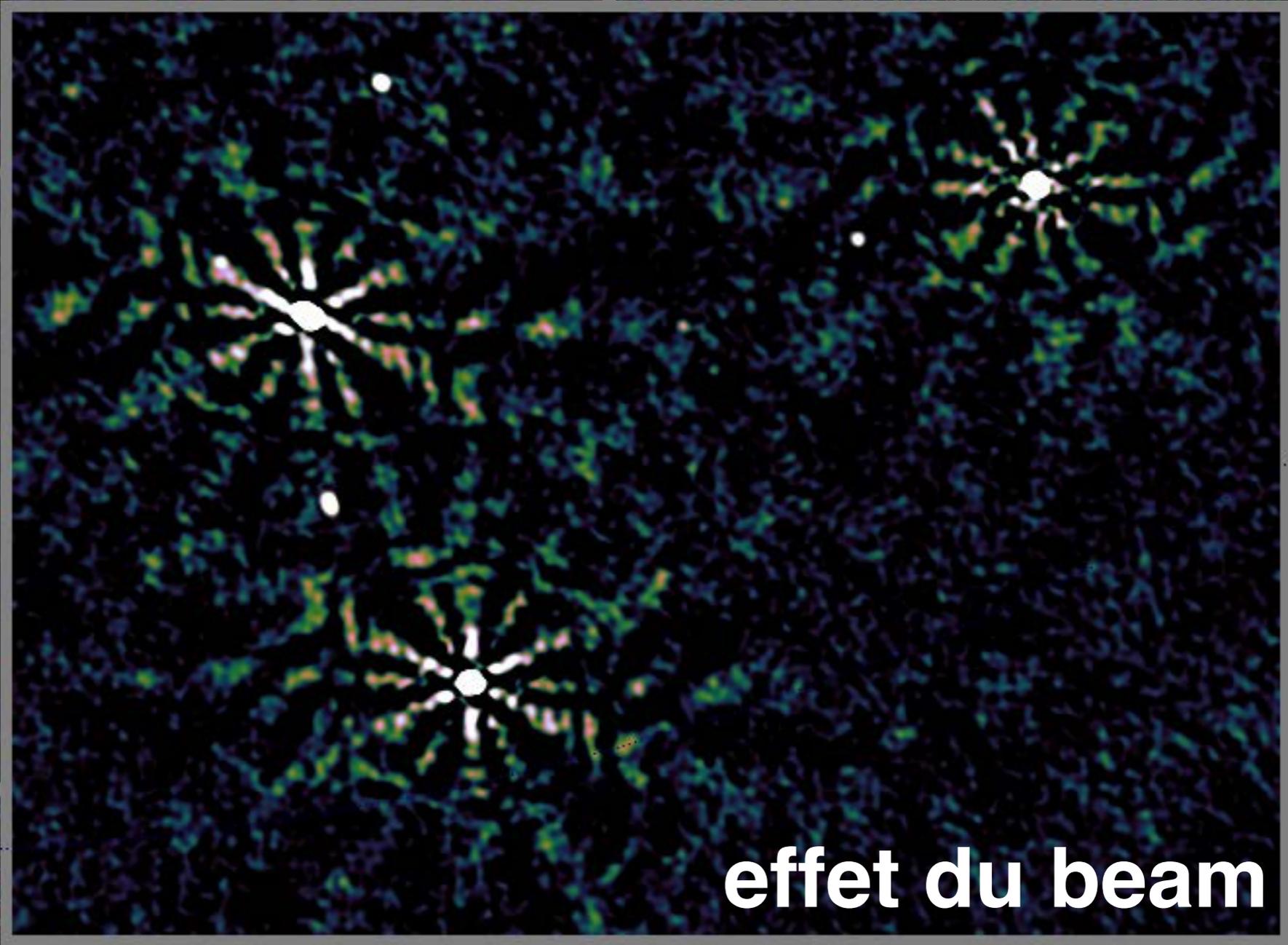
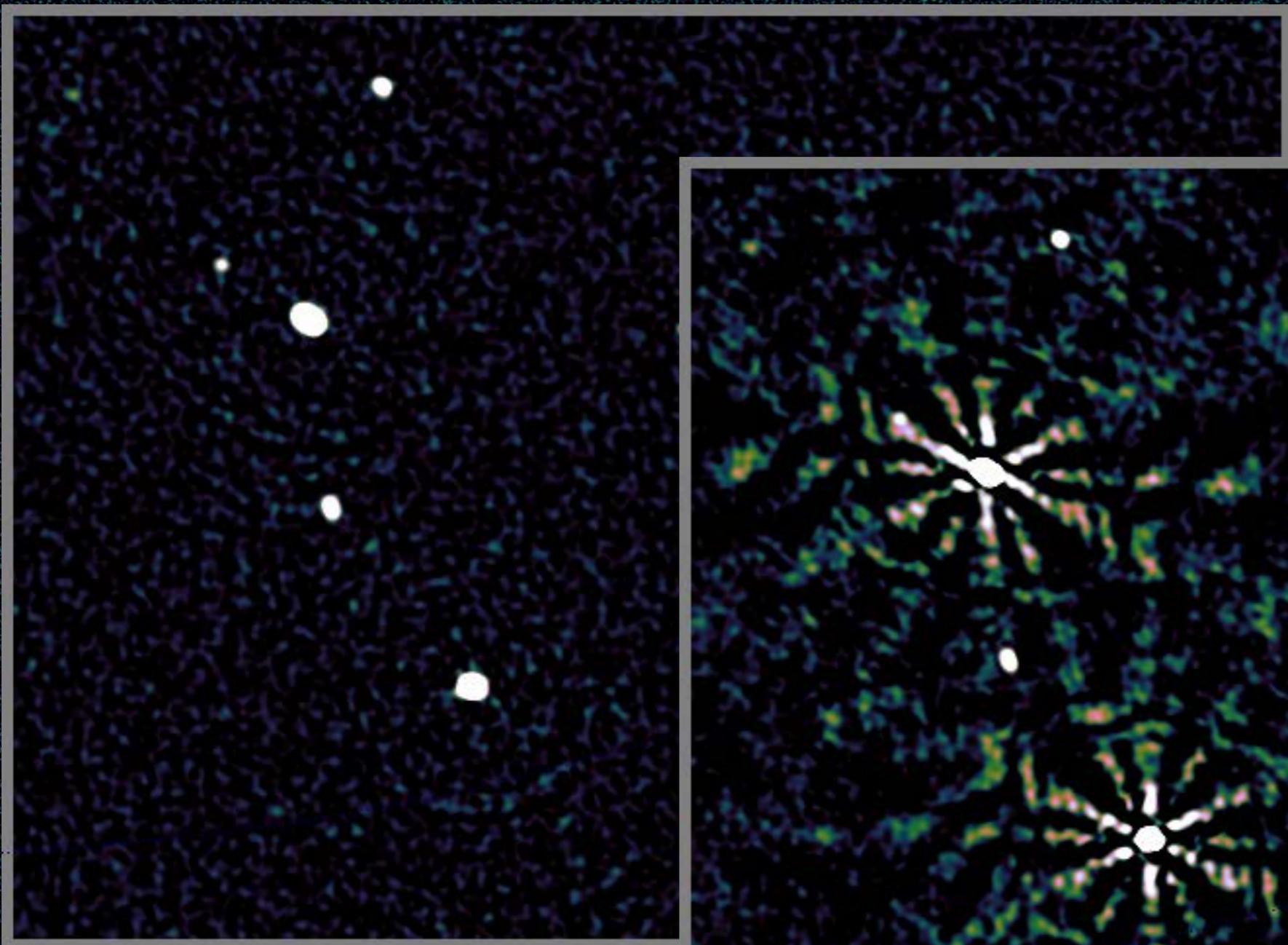
Étalonnage moderne

3GC

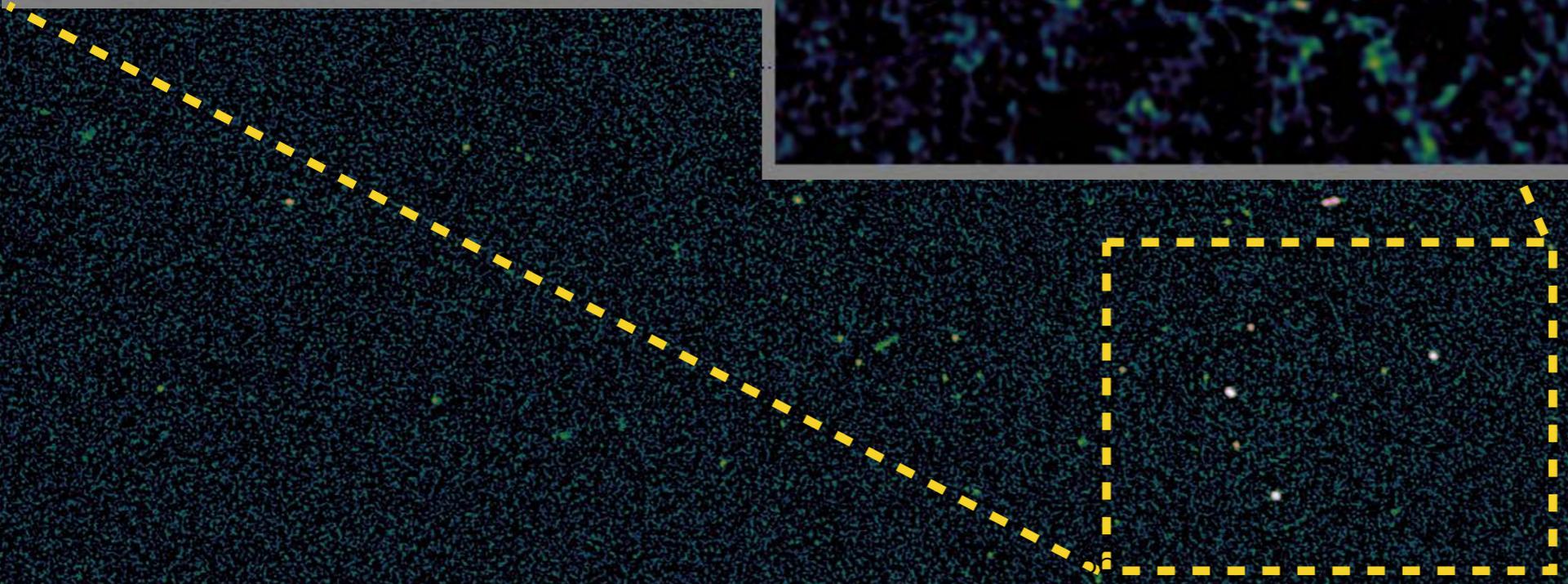


Credits image: O. Smirnov

3GC



effet du beam



Credits image: O. Smirnov

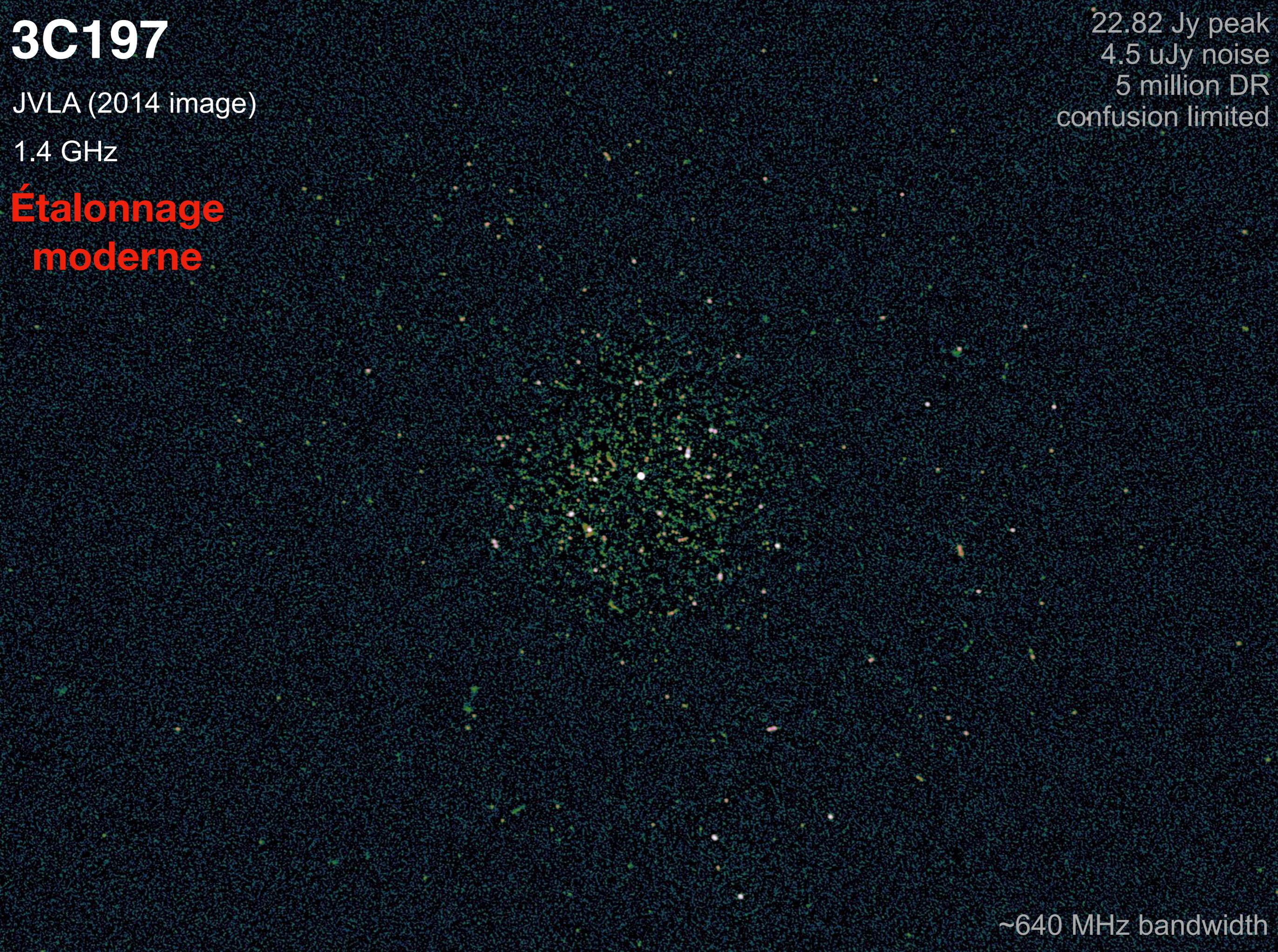
3C197

JVLA (2014 image)

1.4 GHz

Étalonnage
moderne

22.82 Jy peak
4.5 μ 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 μ Jy noise
5 million DR
confusion limited



~640 MHz bandwidth

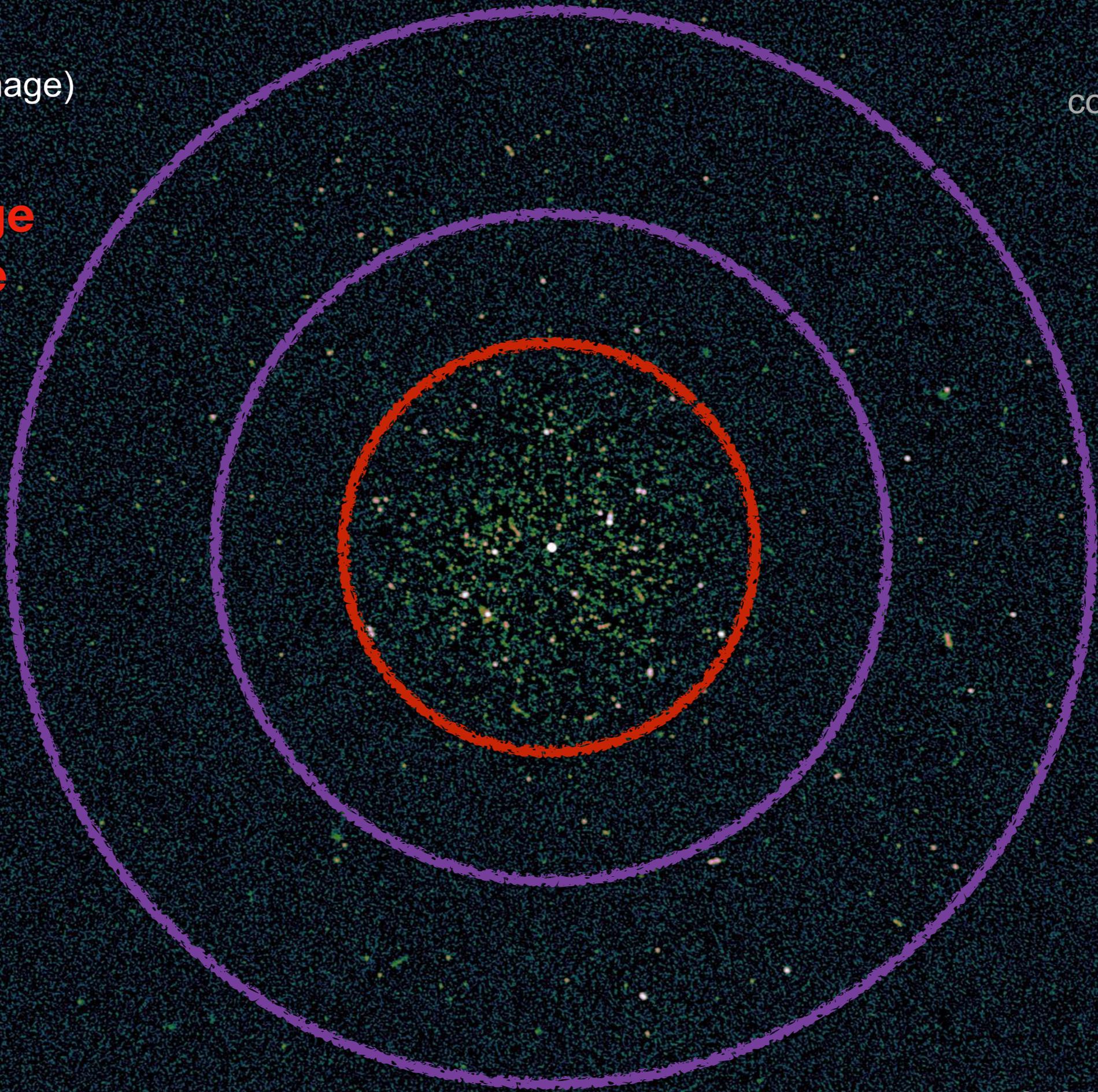
3C197

JVLA (2014 image)

1.4 GHz

Étalonnage
moderne

22.82 Jy peak
4.5 μ Jy noise
5 million DR
confusion limited



~640 MHz bandwidth

3C197

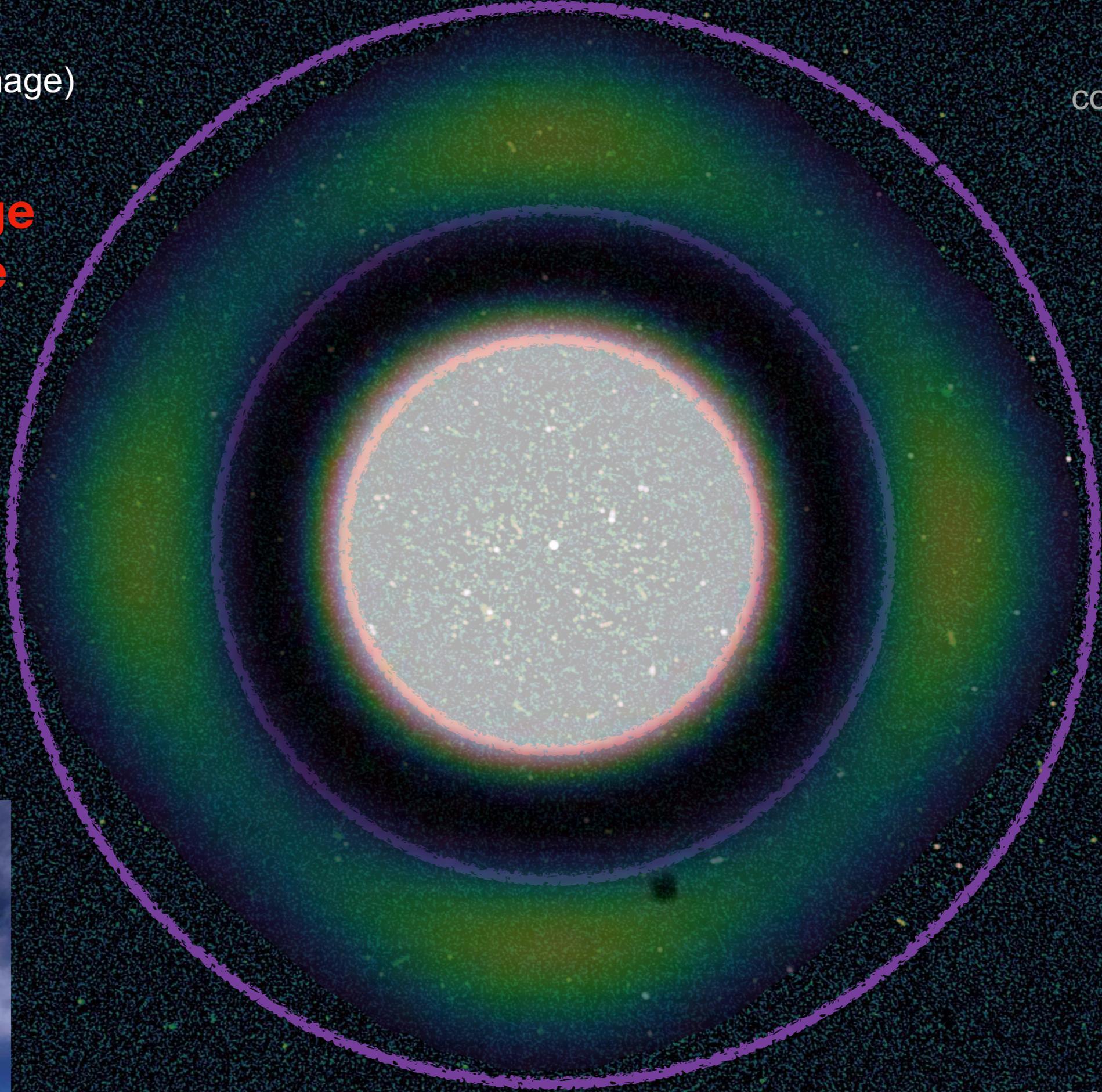
Antenna beam

22.82 Jy peak
4.5 μ Jy noise
5 million DR
confusion limited

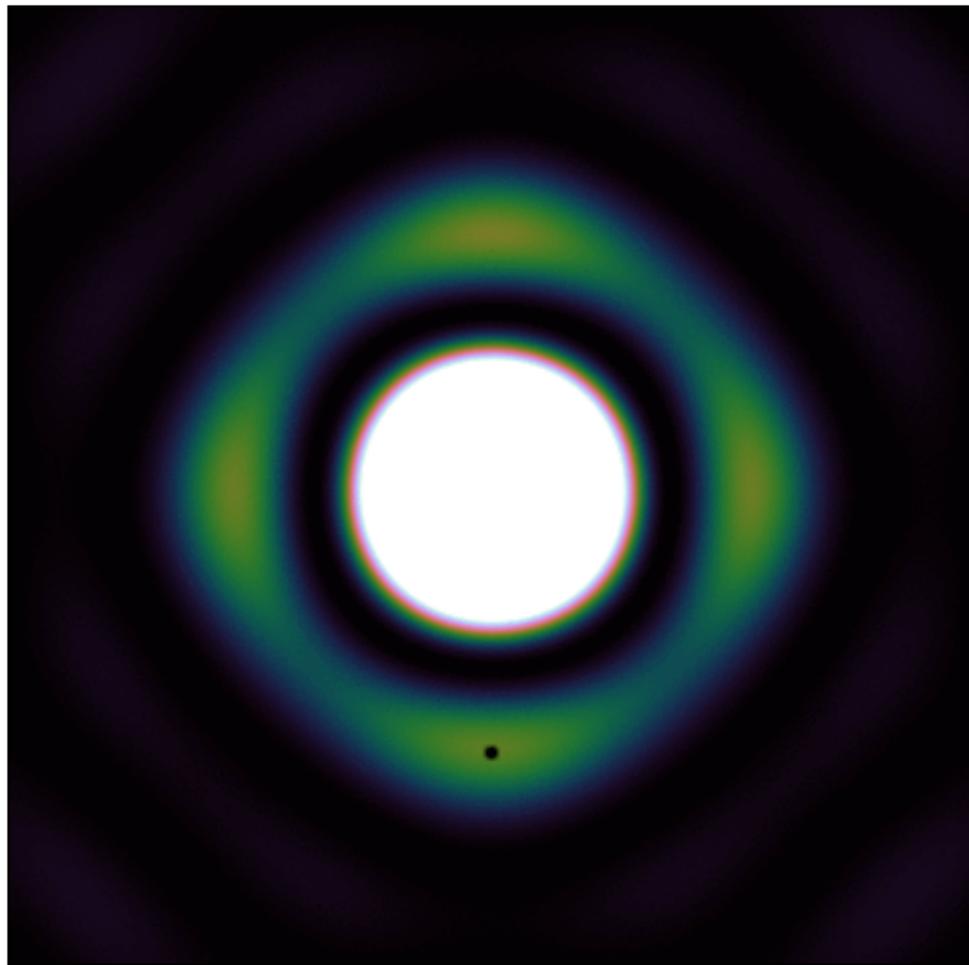
JVLA (2014 image)

1.4 GHz

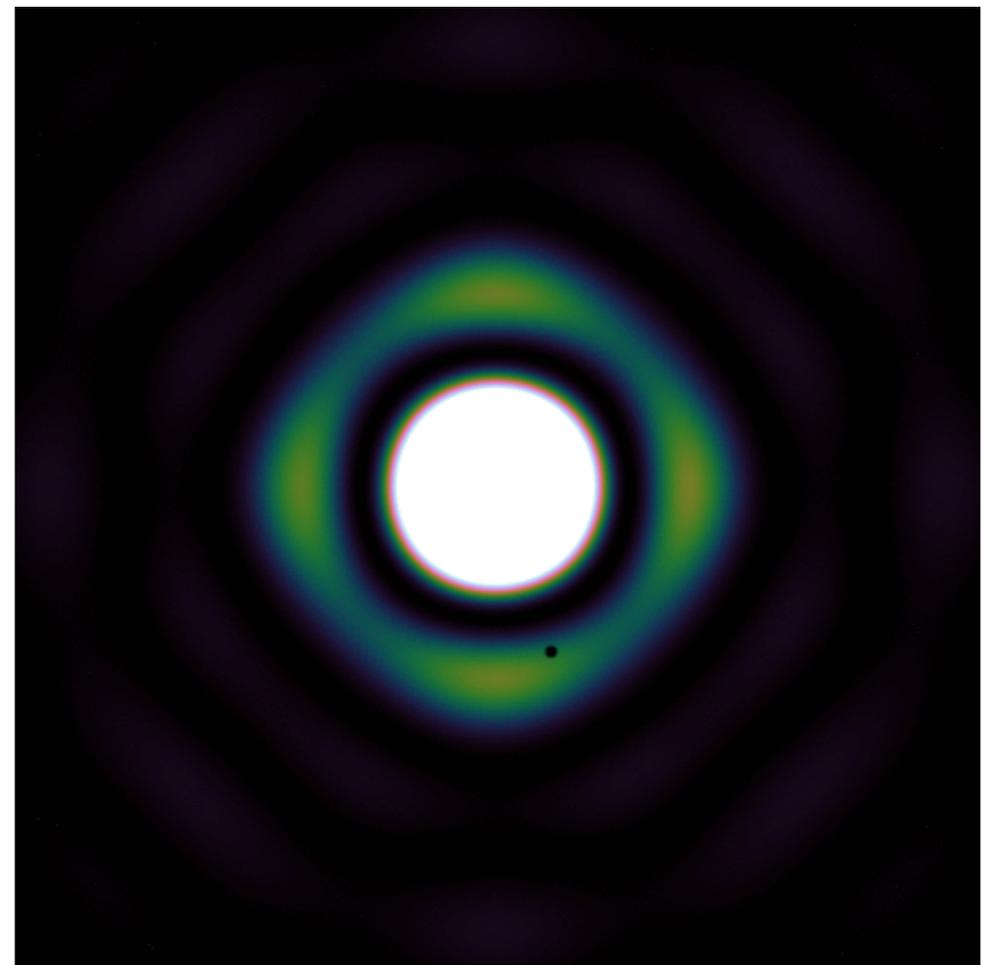
Étalonnage
moderne



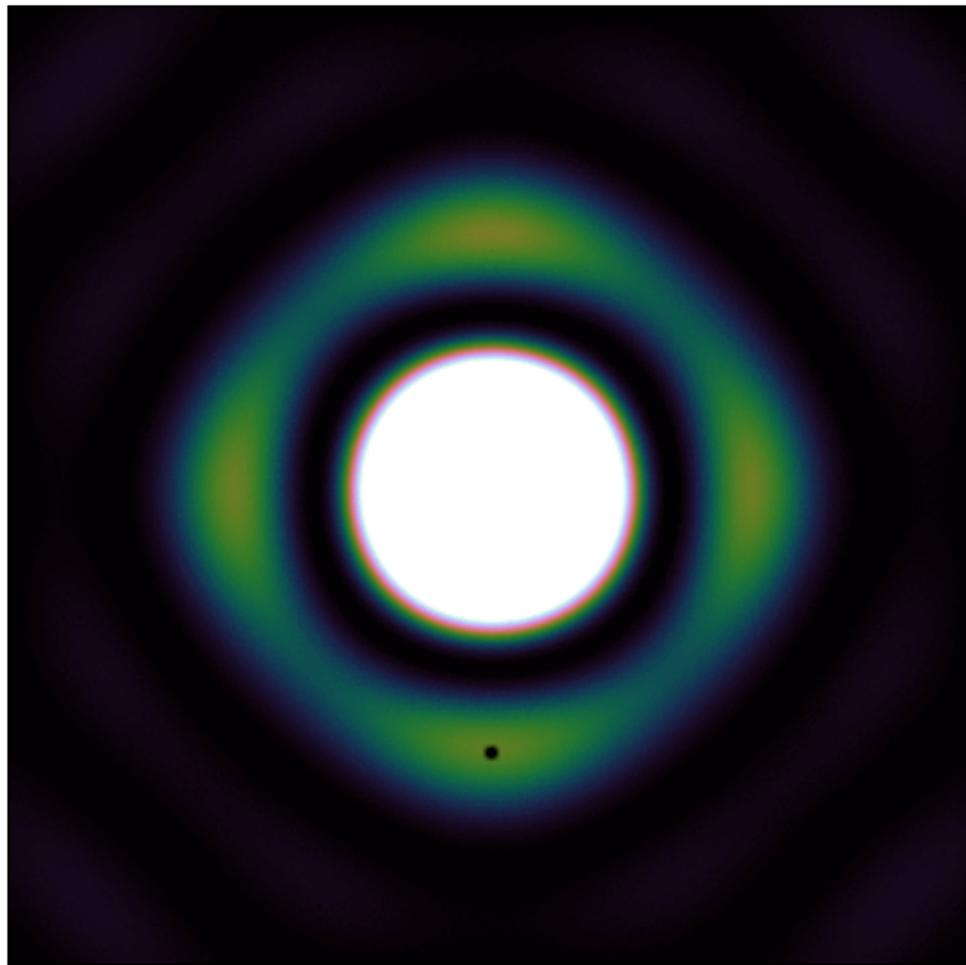
~640 MHz bandwidth



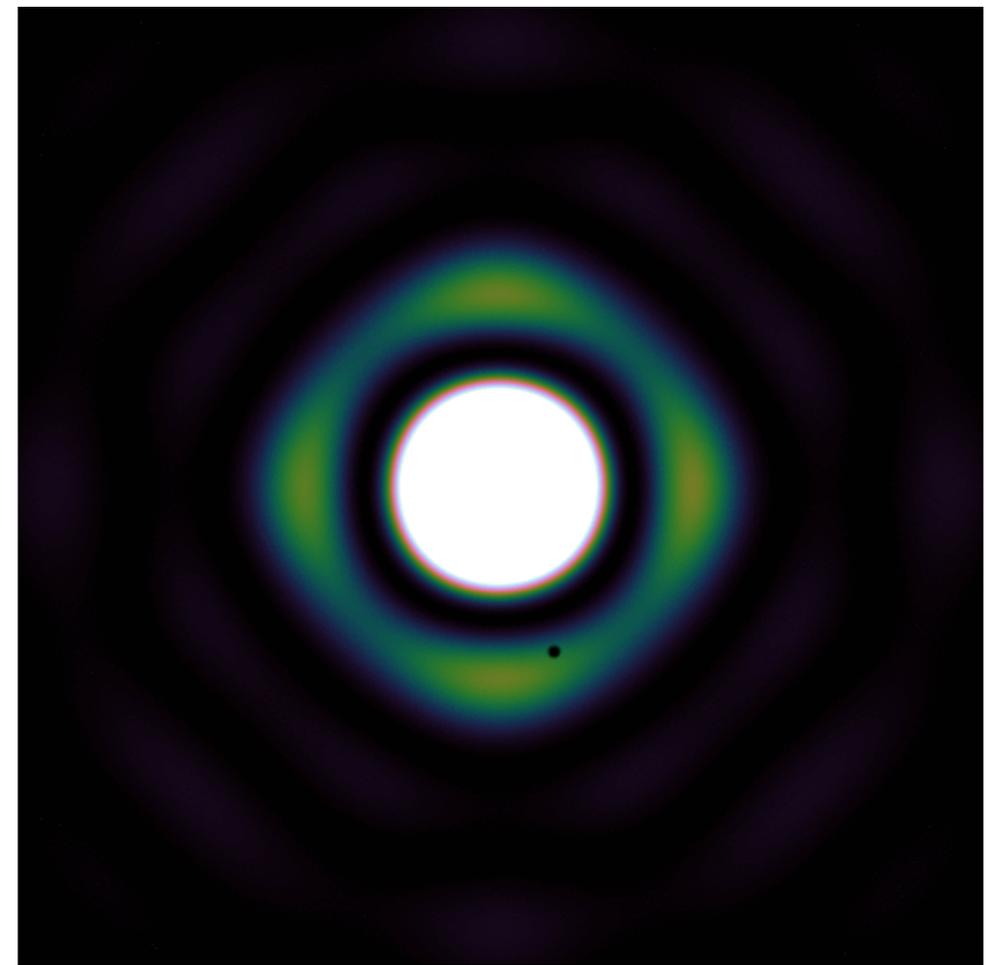
Rotation du lobe



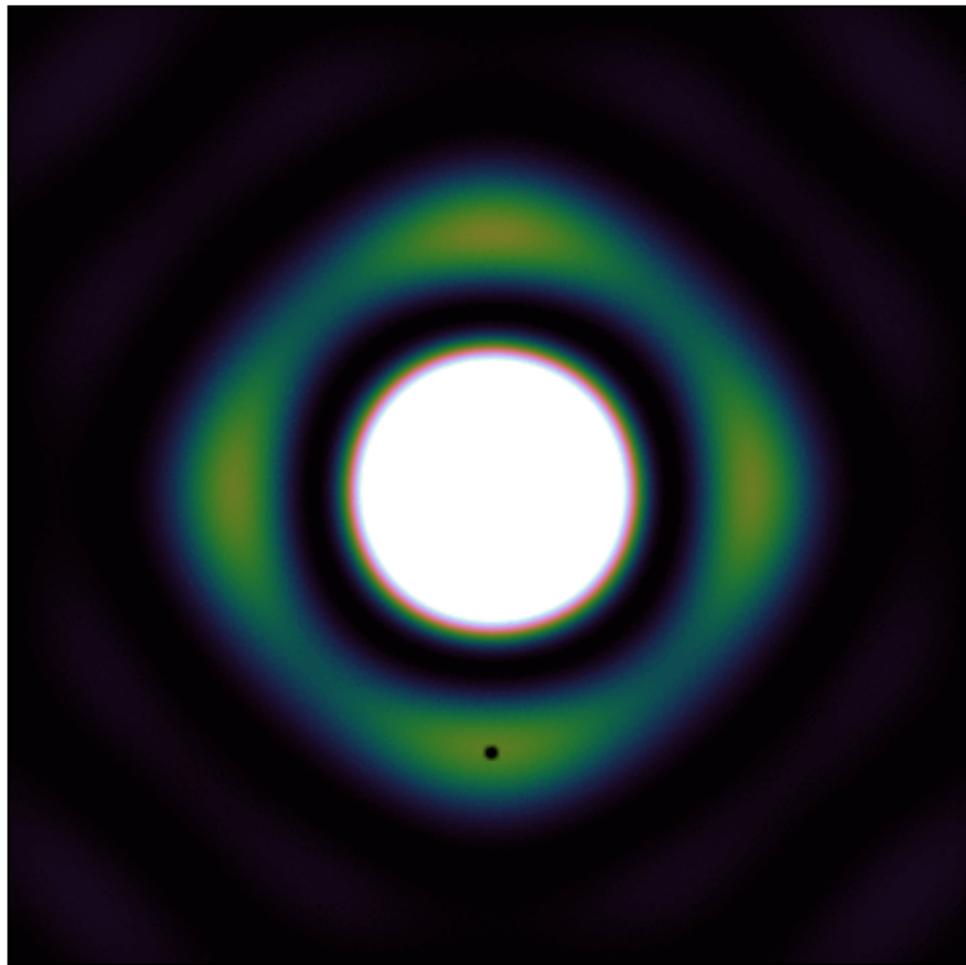
Changement d'échelle du lobe



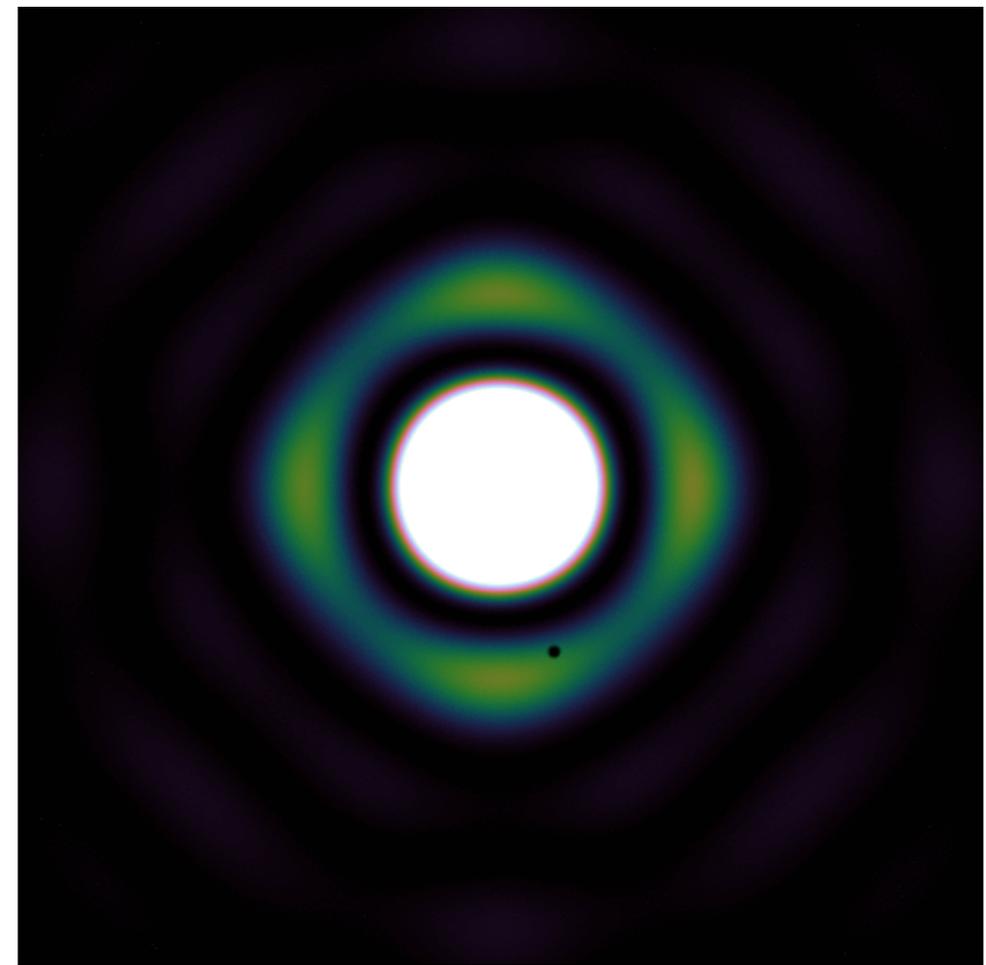
Rotation du lobe



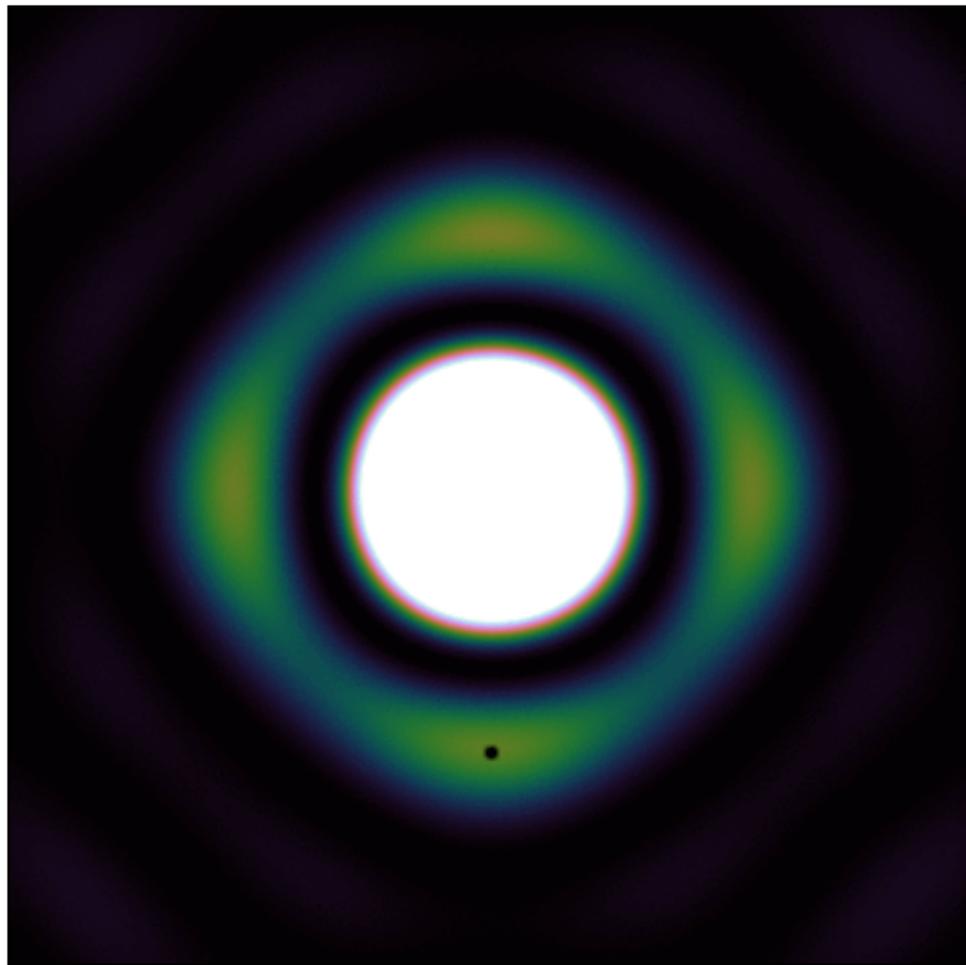
Changement d'échelle du lobe



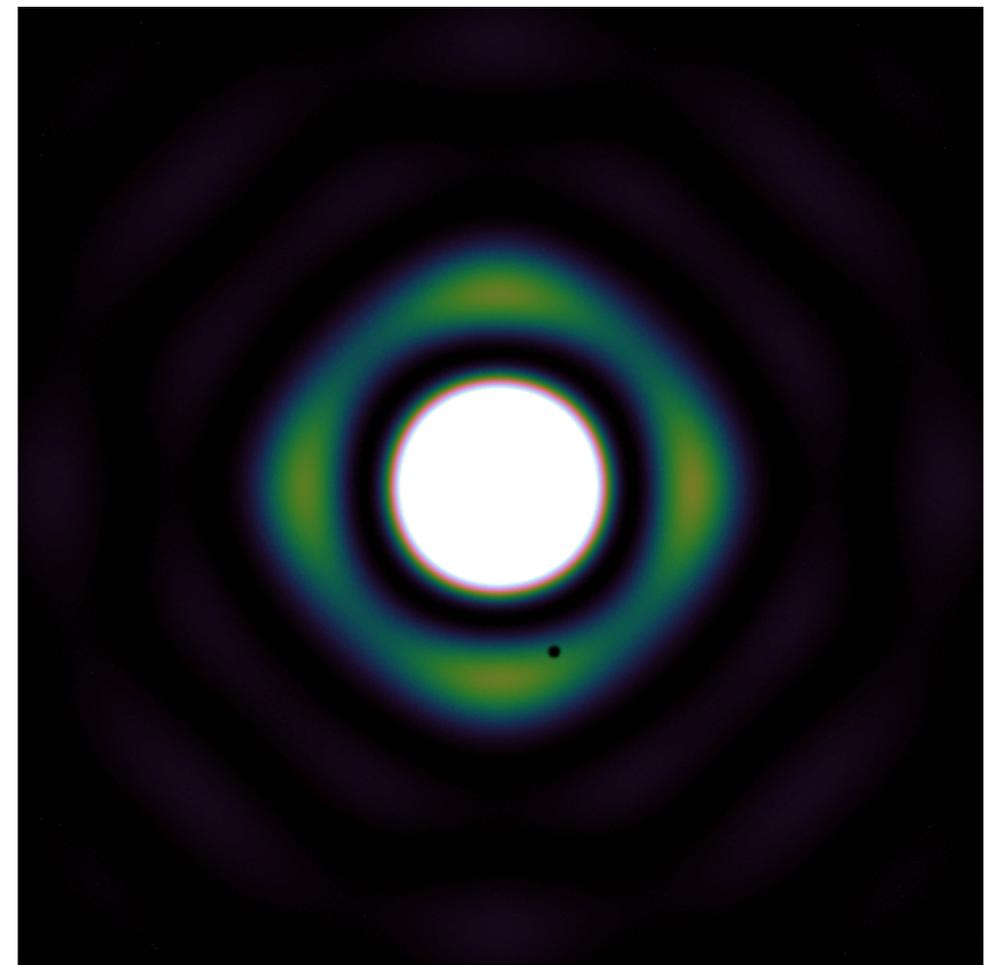
Rotation du lobe



Changement d'échelle du lobe

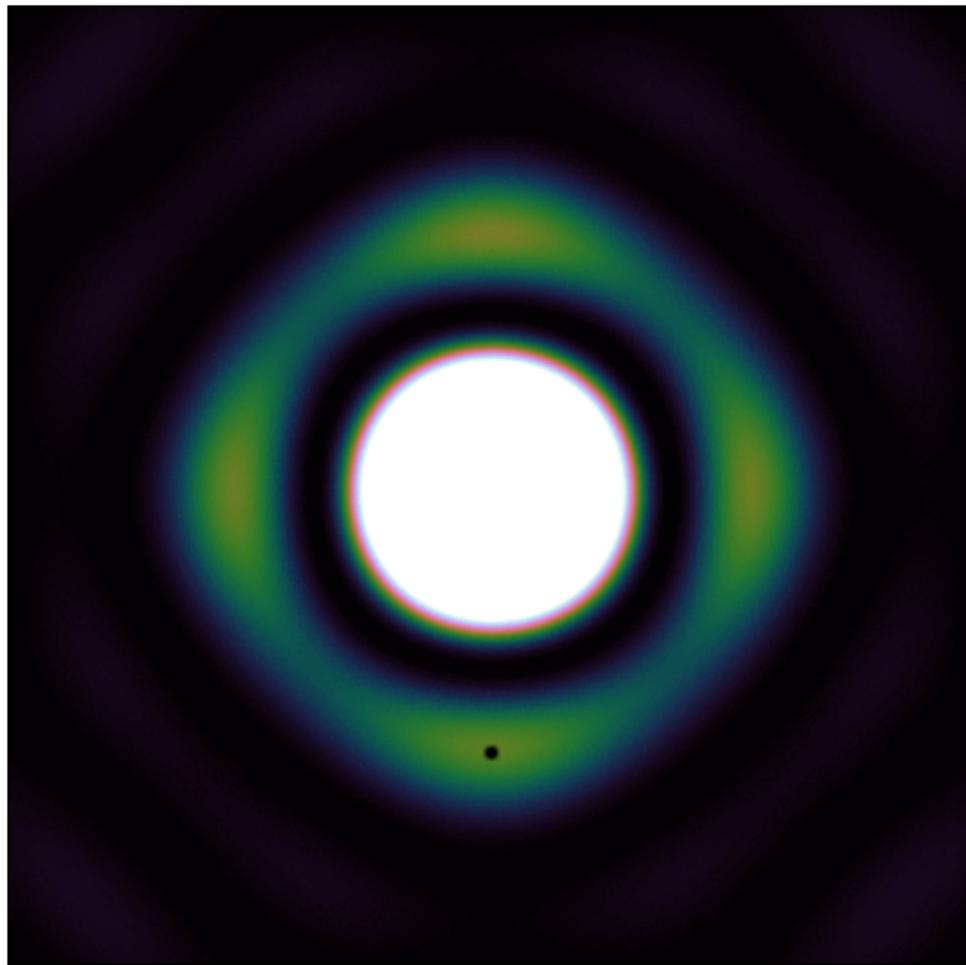


Rotation du lobe

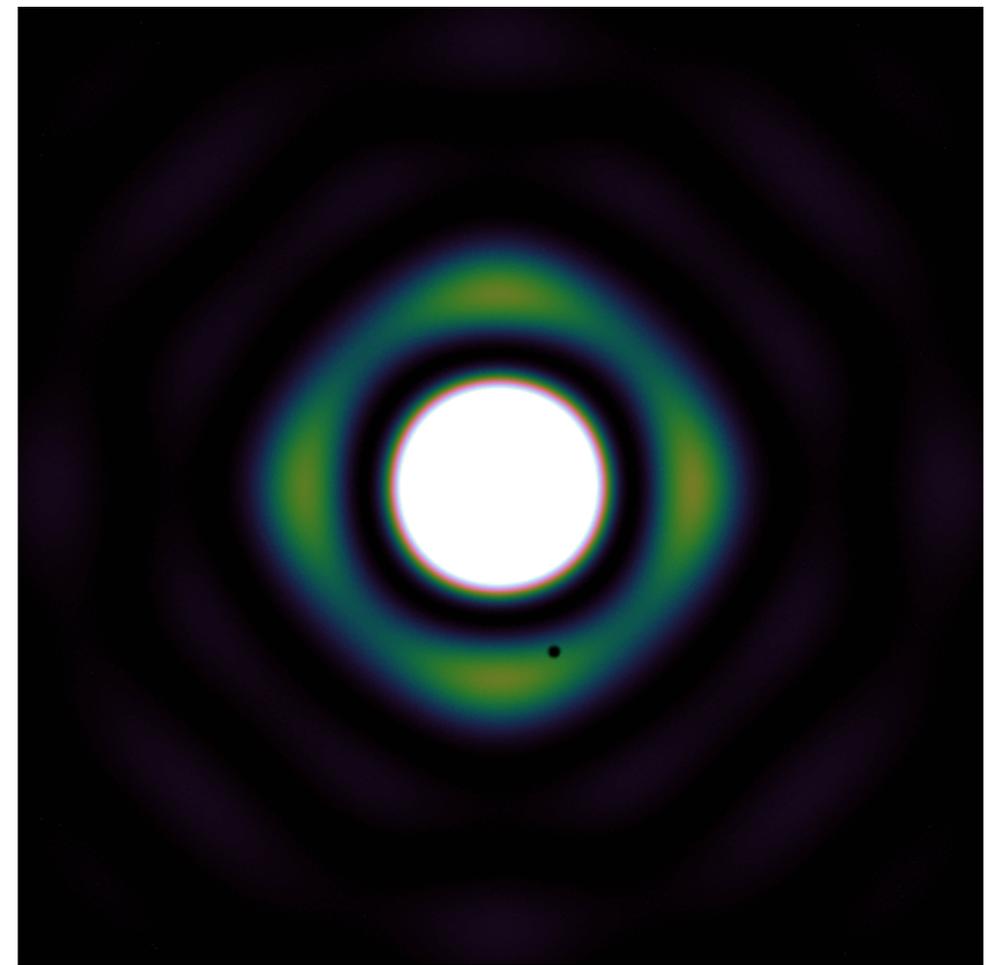


Changement d'échelle du lobe

Quelle origine possible?



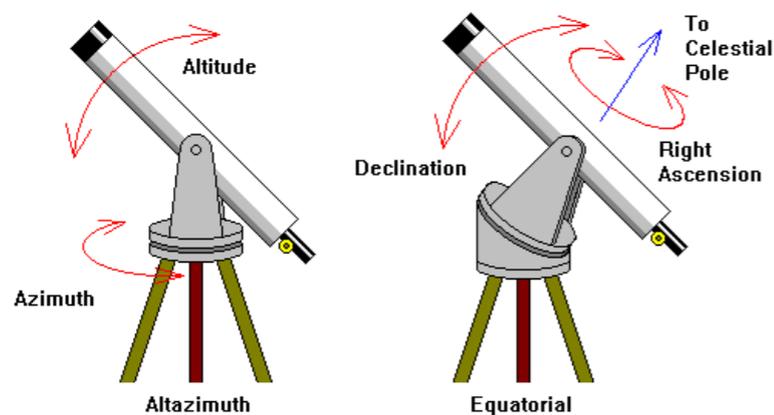
Rotation du lobe

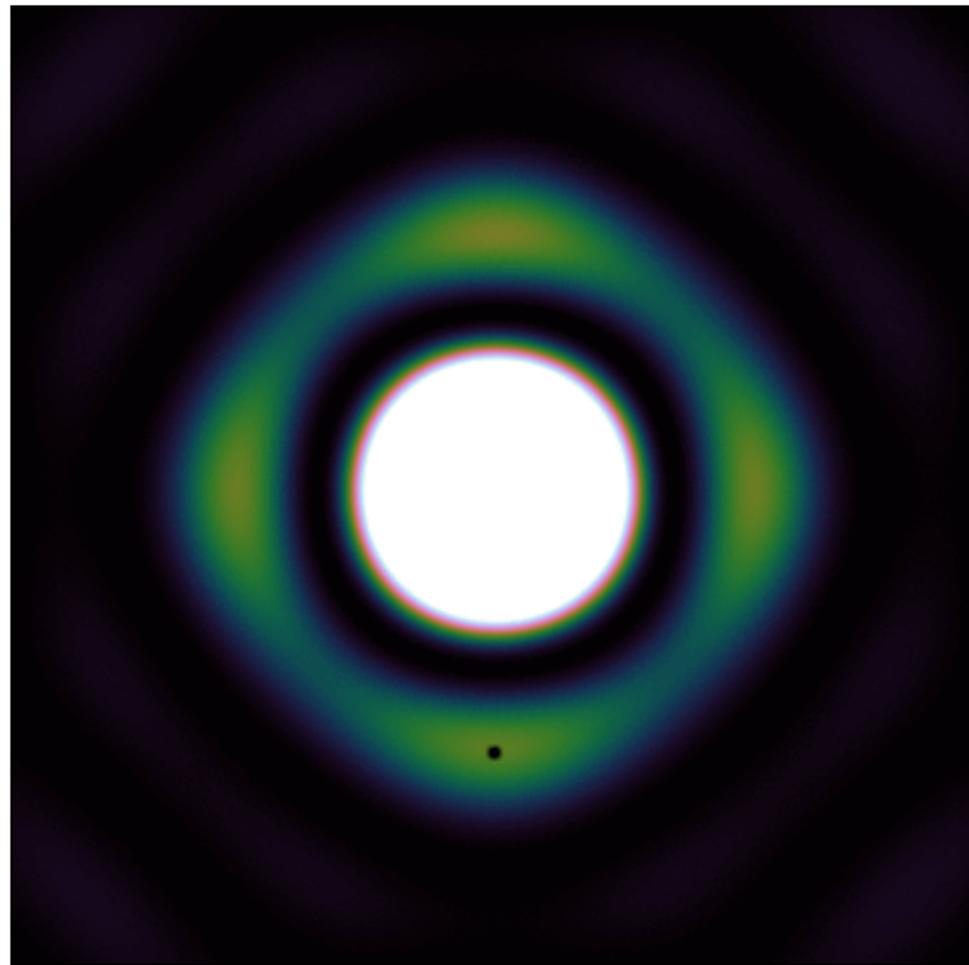


Changement d'échelle du lobe

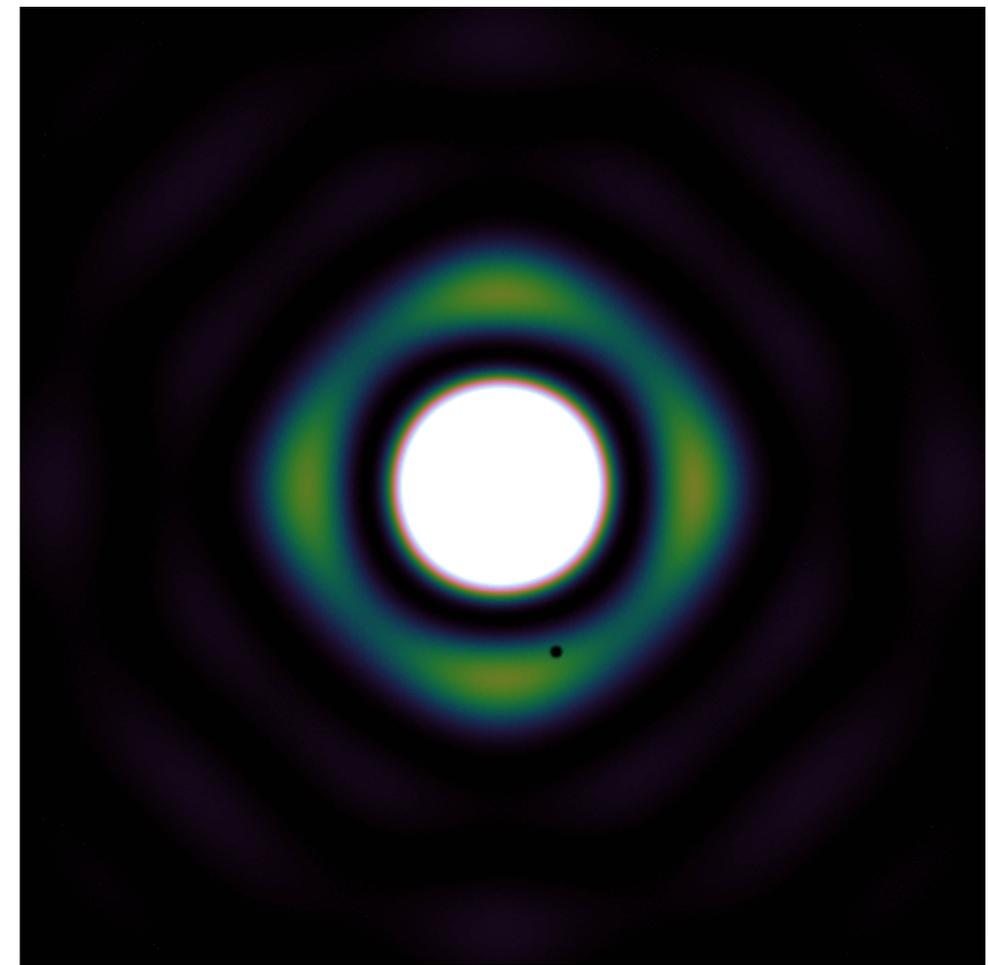
Quelle origine possible?

Type de monture du télescope





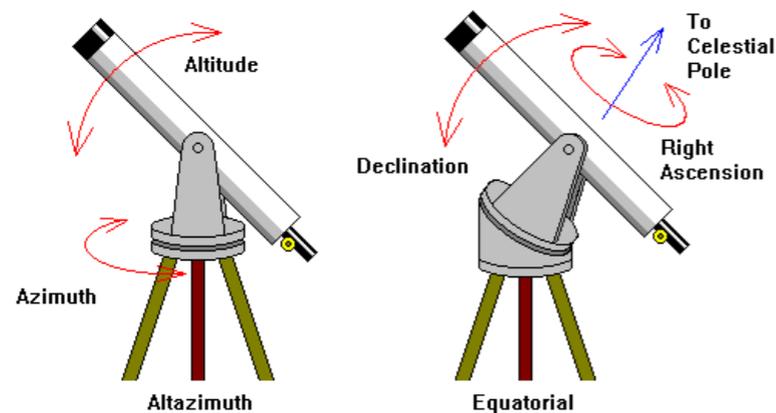
Rotation du lobe



Changement d'échelle du lobe

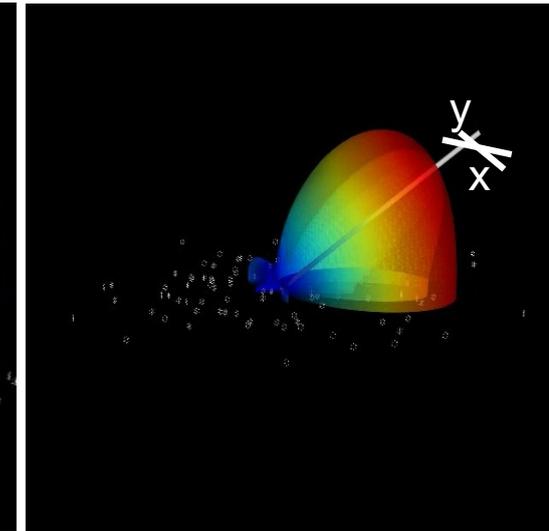
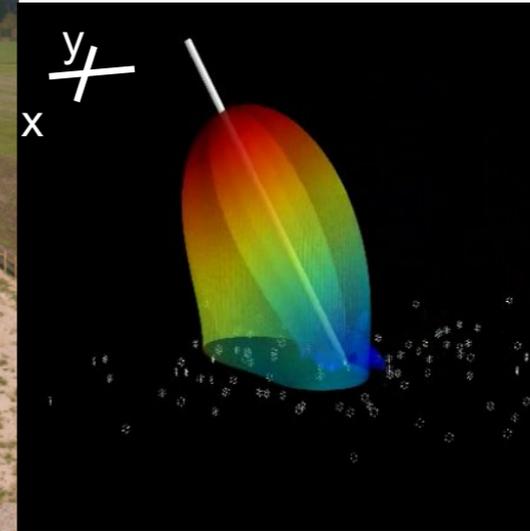
Quelle origine possible?

Type de monture du télescope



Changement de fréquence

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



Direction 1
affecte le gain

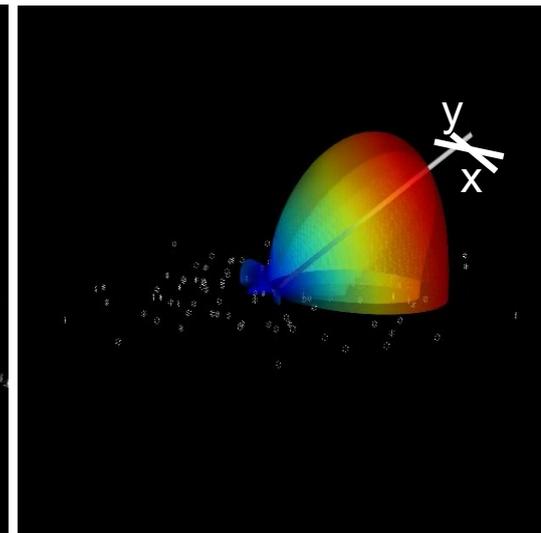
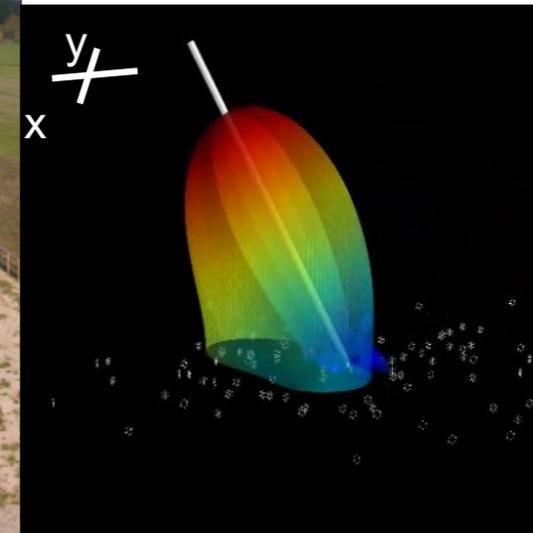
Direction 2

la polarisation

Diagramme d'antenne

Étalonnage moderne

Effets dépendants de la direction

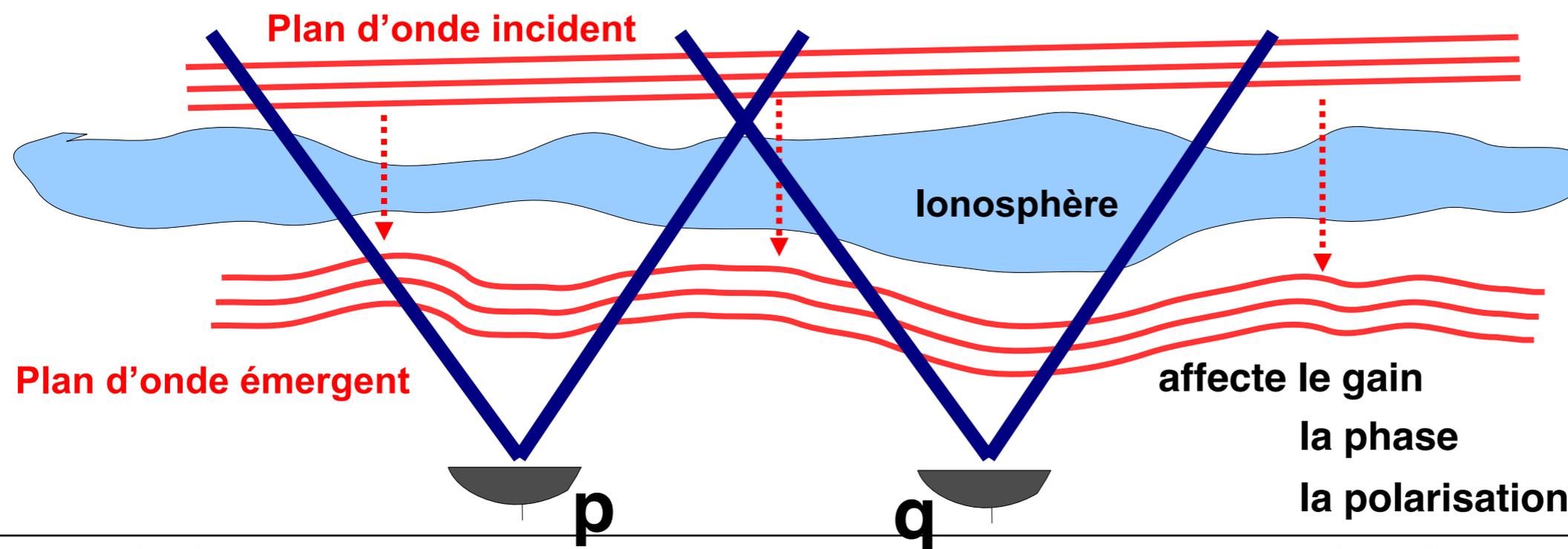


Direction 1
affecte le gain

Direction 2
la polarisation

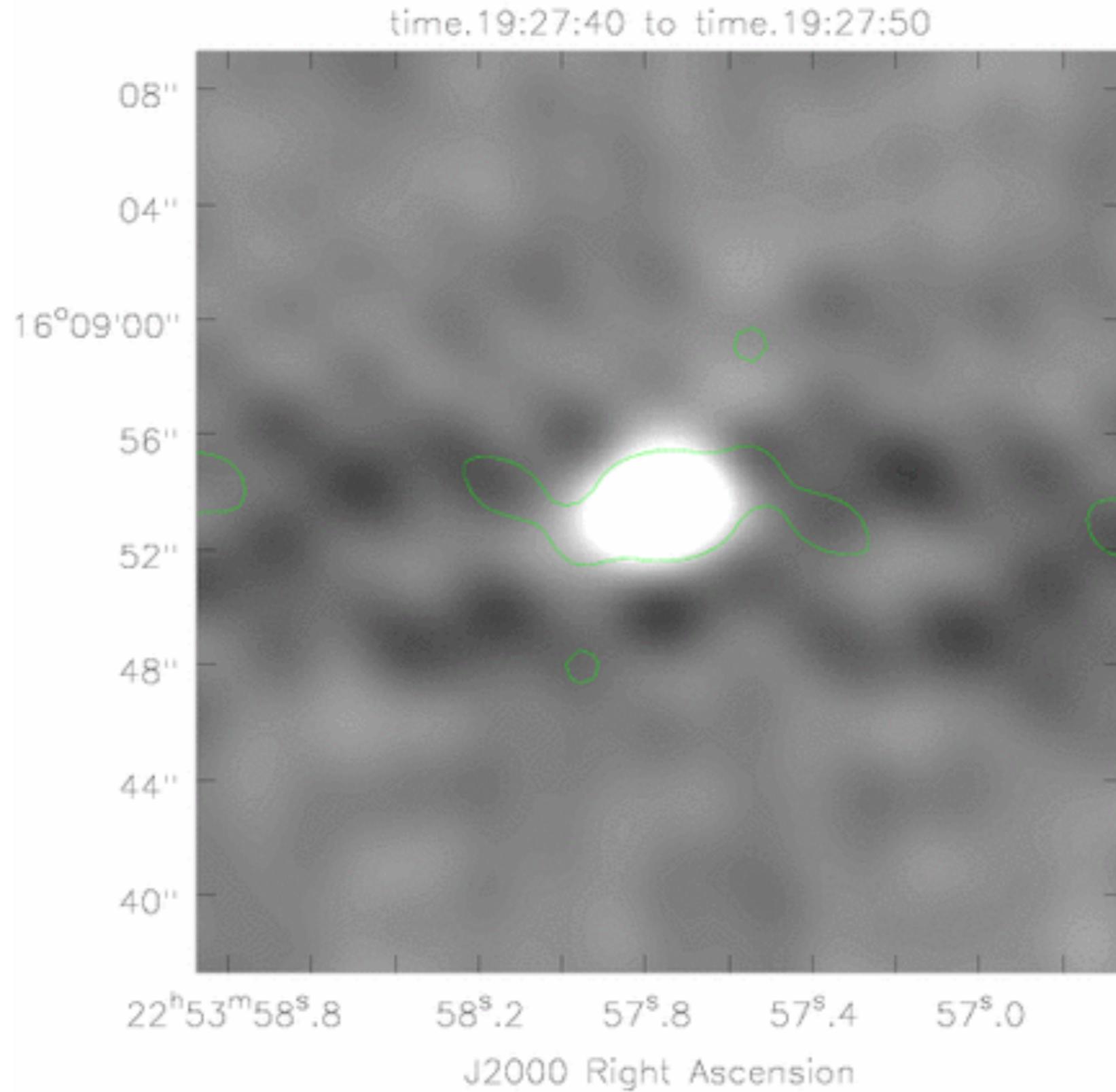
Diagramme d'antenne

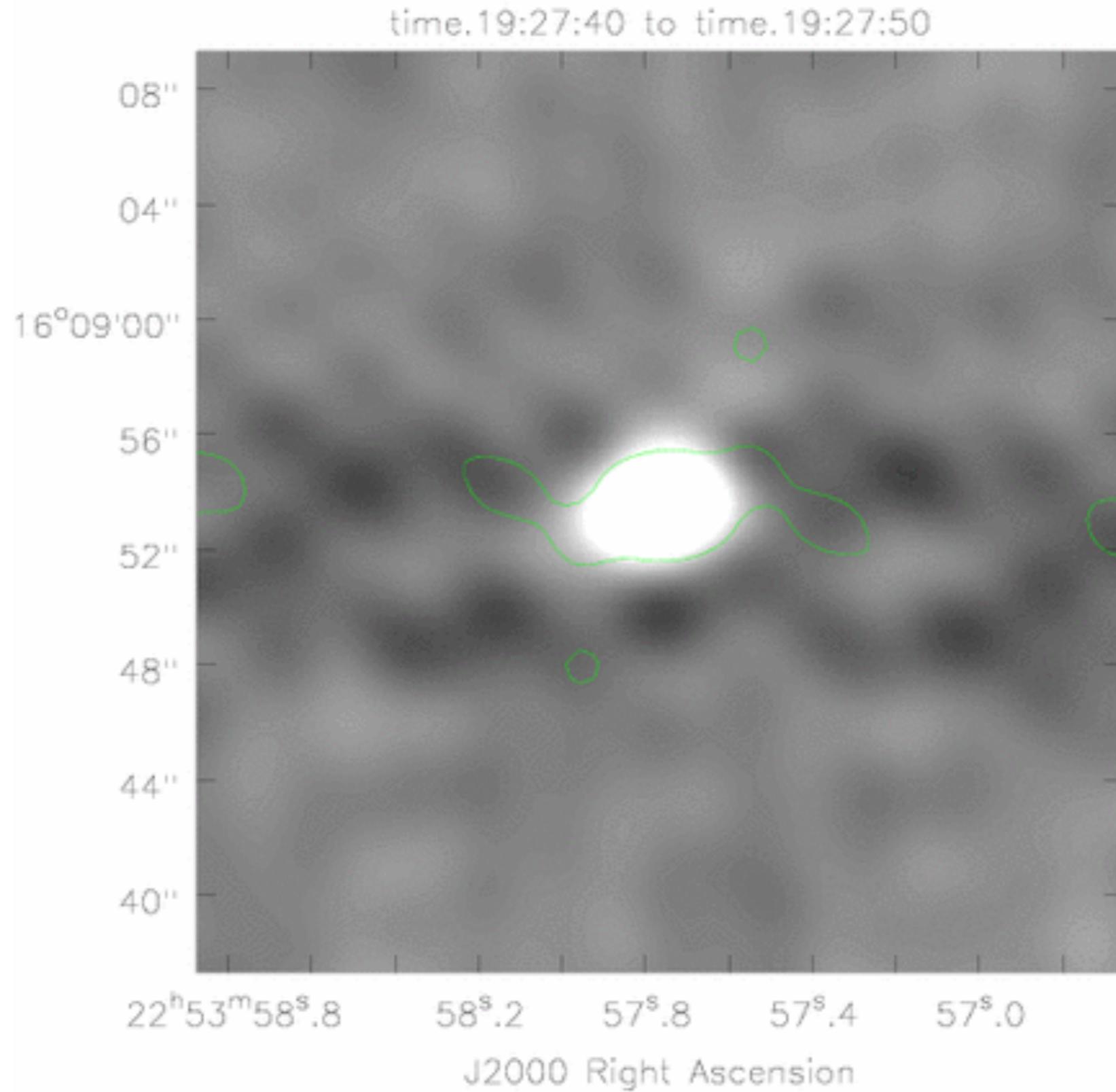
Fluctuations ionosphériques/atmosphériques



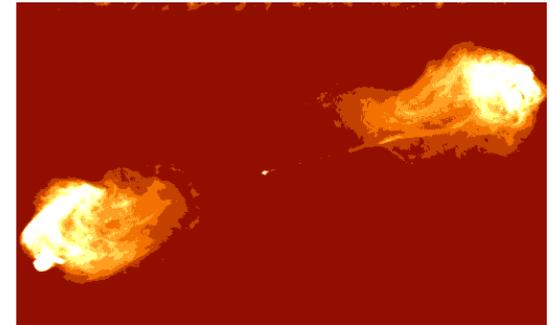
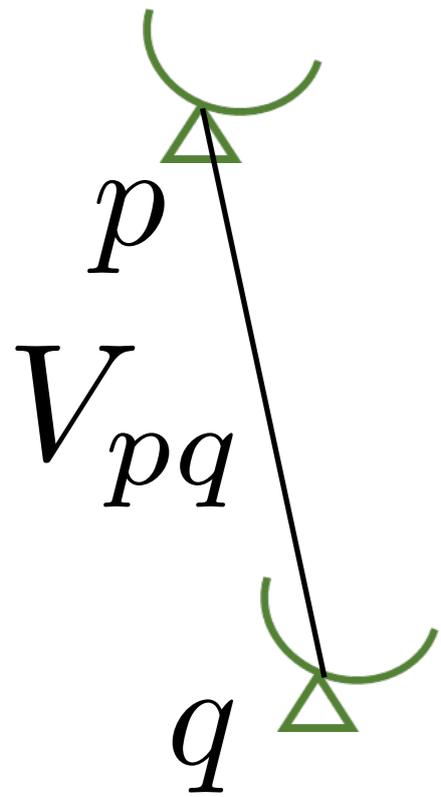
PSF

PSF + ionosphère

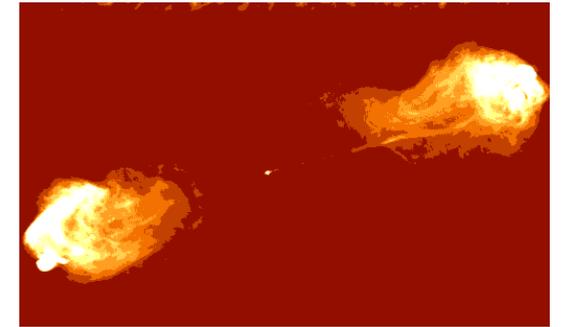
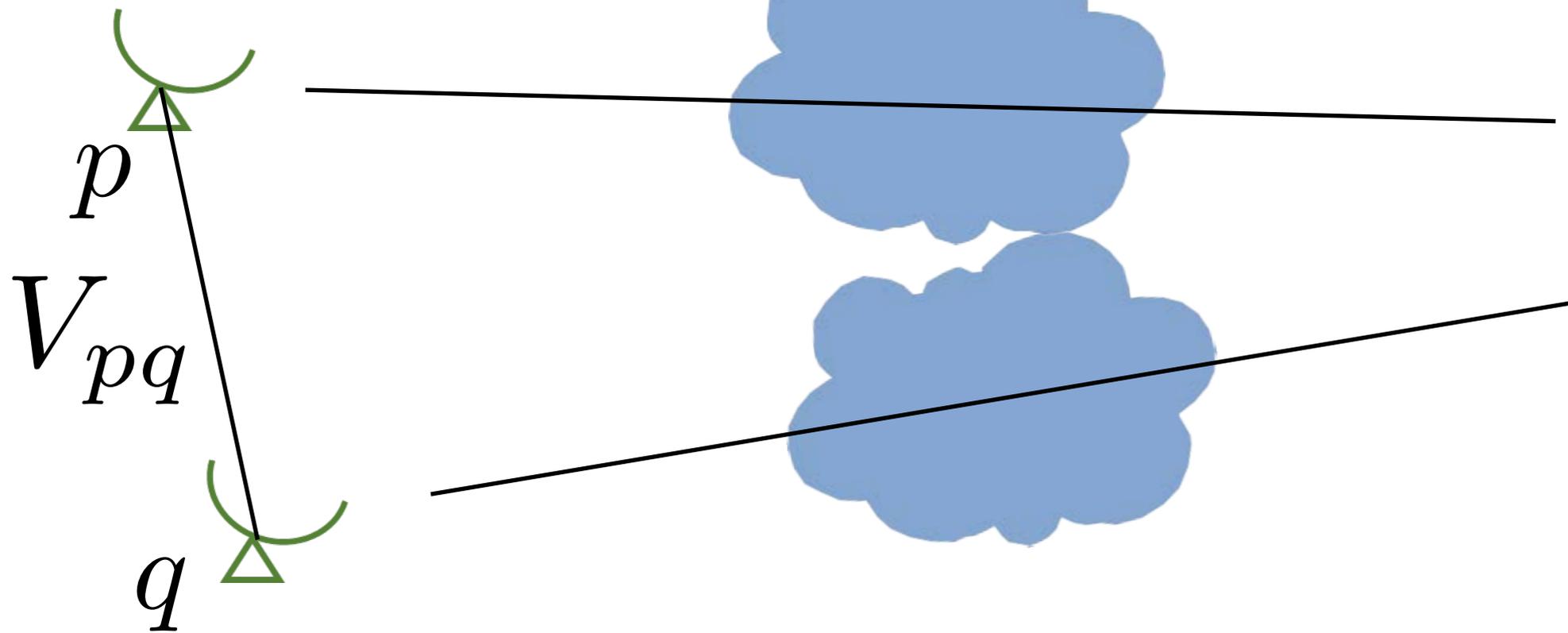




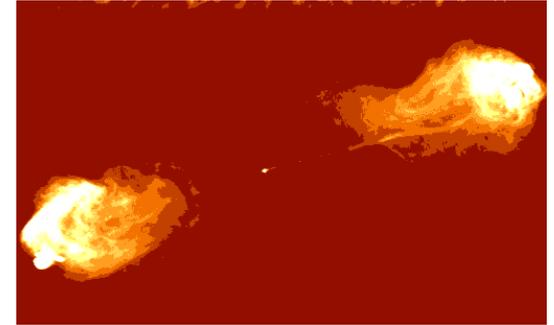
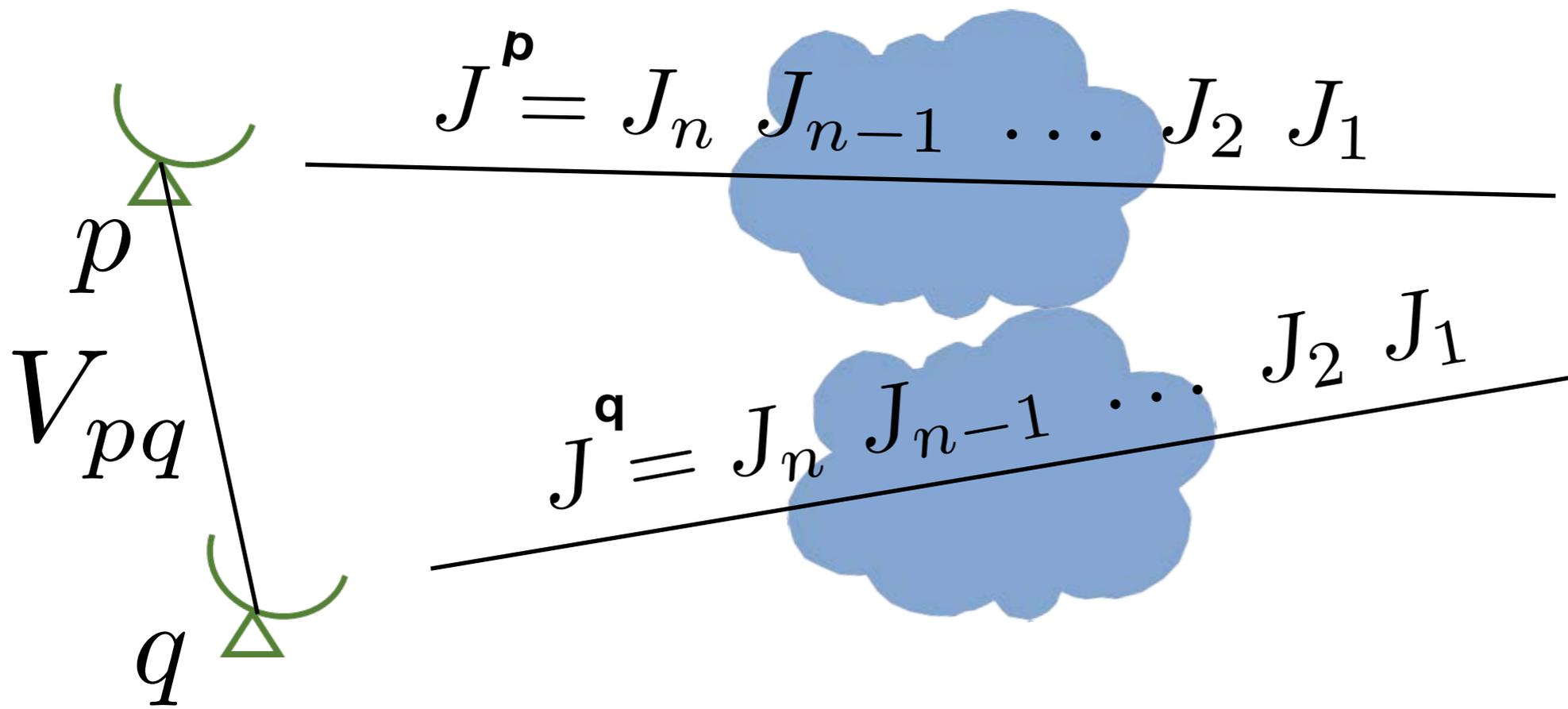
\mathcal{B}



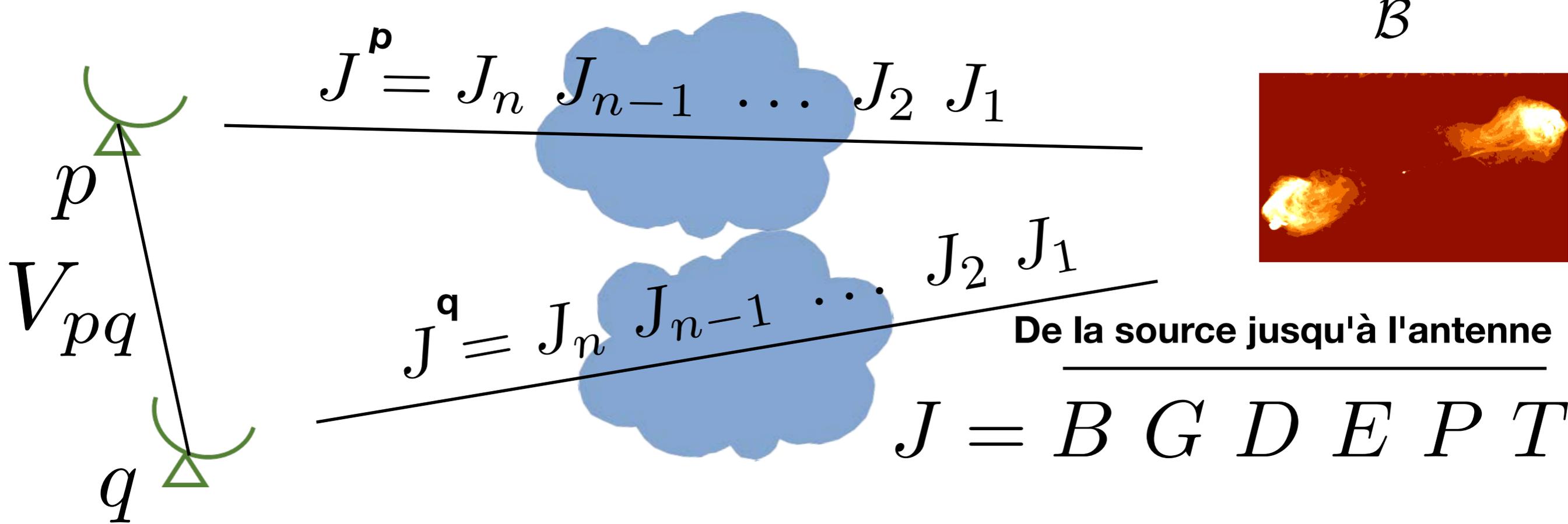
\mathcal{B}

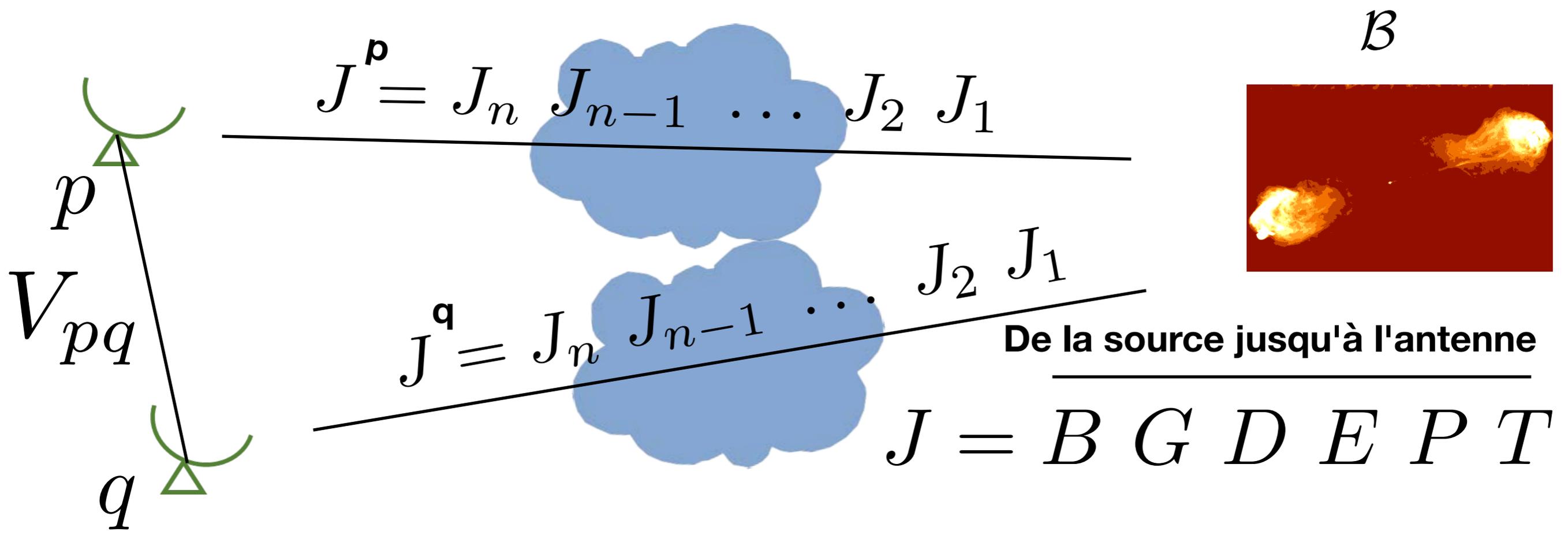


\mathcal{B}



\mathcal{B}

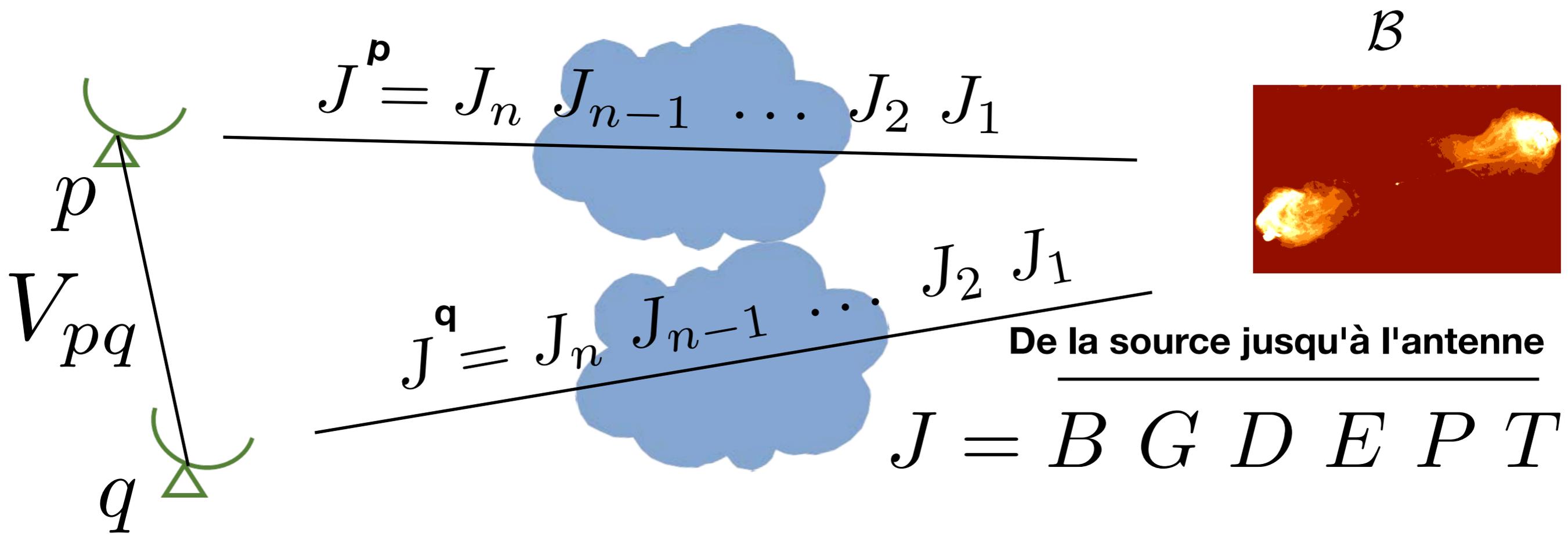




Radio Interferometer Measurement Equation (RIME)

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

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

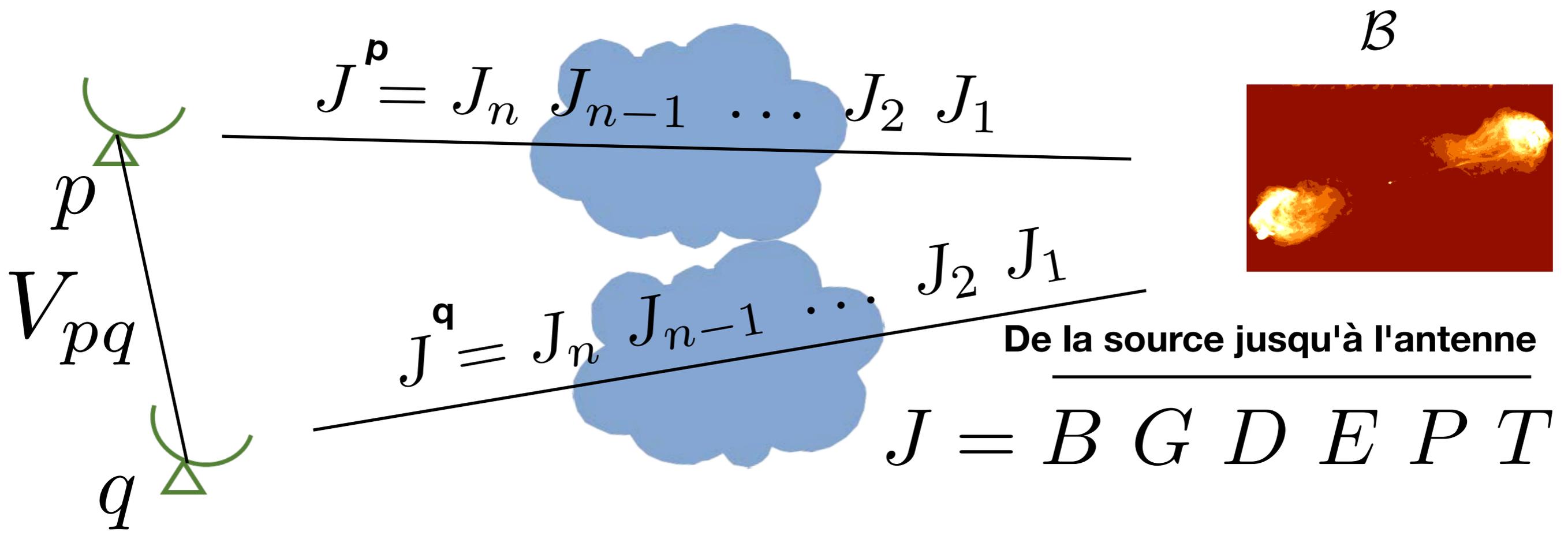


Radio Interferometer Measurement Equation (RIME)

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

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

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