

Interférométrie et Astronomie

A. Gilloire Club Astro Trégor 4 Juin 2022

Plan

L'interférométrie : c'est quoi ?

Ondes et interférences

Les premières applications en astronomie

L'interférométrie radio

L'interférométrie optique

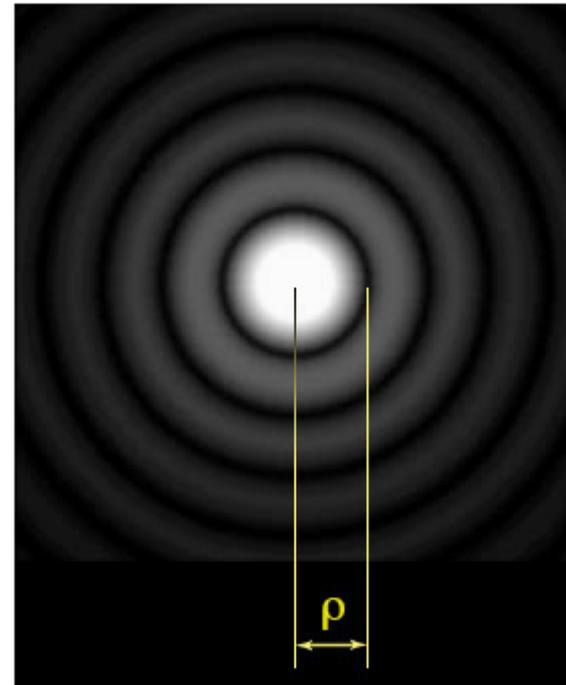
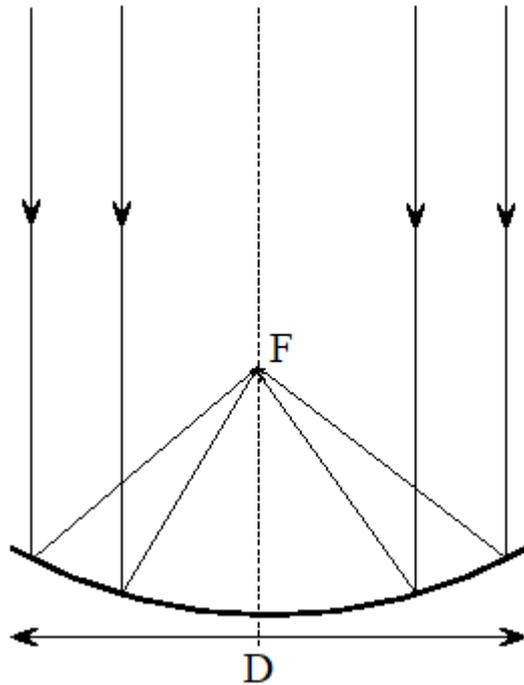
L'interférométrie en astronomie :

outil pour améliorer la résolution spatiale des observations

permet de s'affranchir des limites des instruments « classiques » pour observer les détails fins d'objets astronomiques distants

Limite des instruments optiques

l'image d'un point est une tache à cause de la diffraction de la lumière : « FEP » ou « PSF »



l'image d'une étoile est la **tache d'Airy** du télescope

Pouvoir séparateur : capacité à distinguer deux objets proches

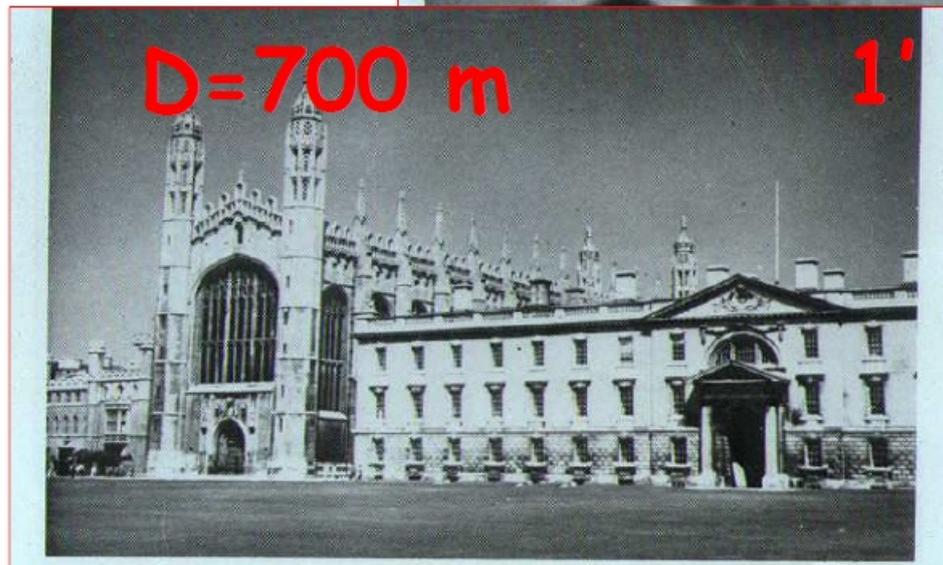
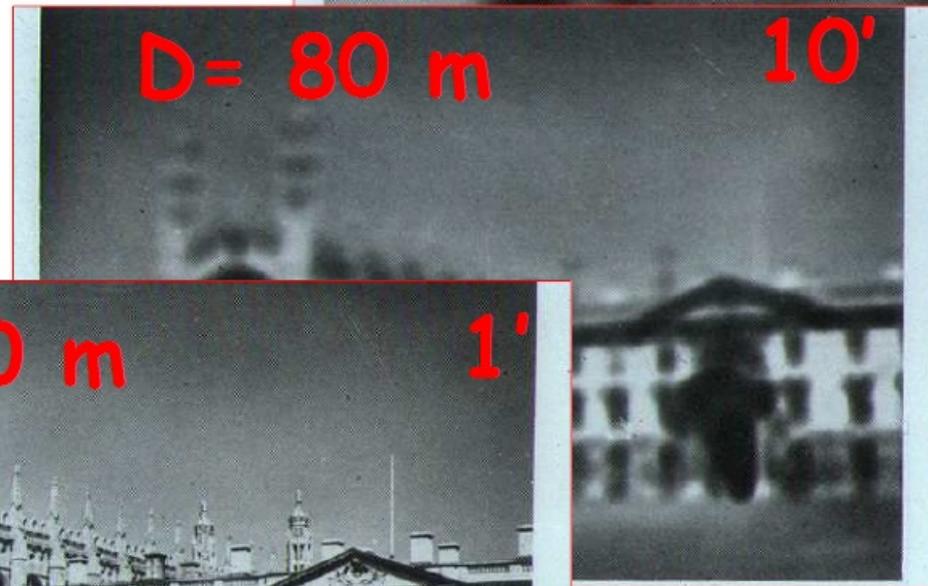
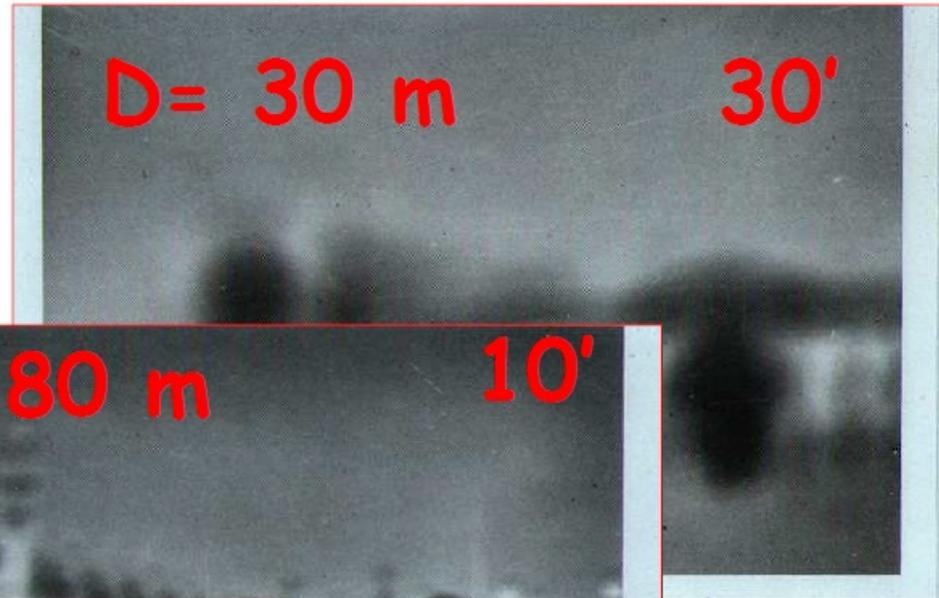
Rayon du disque lumineux central : $\rho = 1,22 \lambda / D$

- En lumière verte : $\lambda = 0,55 \mu$
oeil humain $D = 6 \text{ mm}$: $\rho = 0,4'$
téléscope $D = 2 \text{ m}$: $\rho = 0,07''$

Noter que le pouvoir séparateur théorique des télescopes au sol n'est pas atteint à cause des turbulences atmosphériques

→ l'optique adaptative permet de l'approcher

- En radio à 21 cm



Diamètre croissant :
le lissage diminue

(D'après J. J. Maintoux, l'Astronomie, 2012)

Ondes et interférences

La **diffraction** apparaît dans tous les phénomènes de propagation des ondes quelle que soit leur nature physique

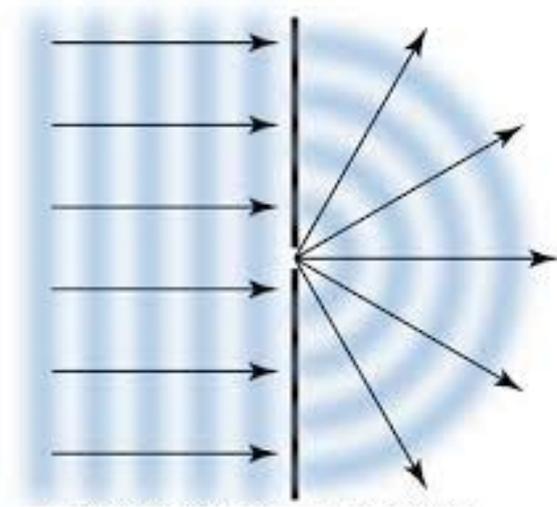
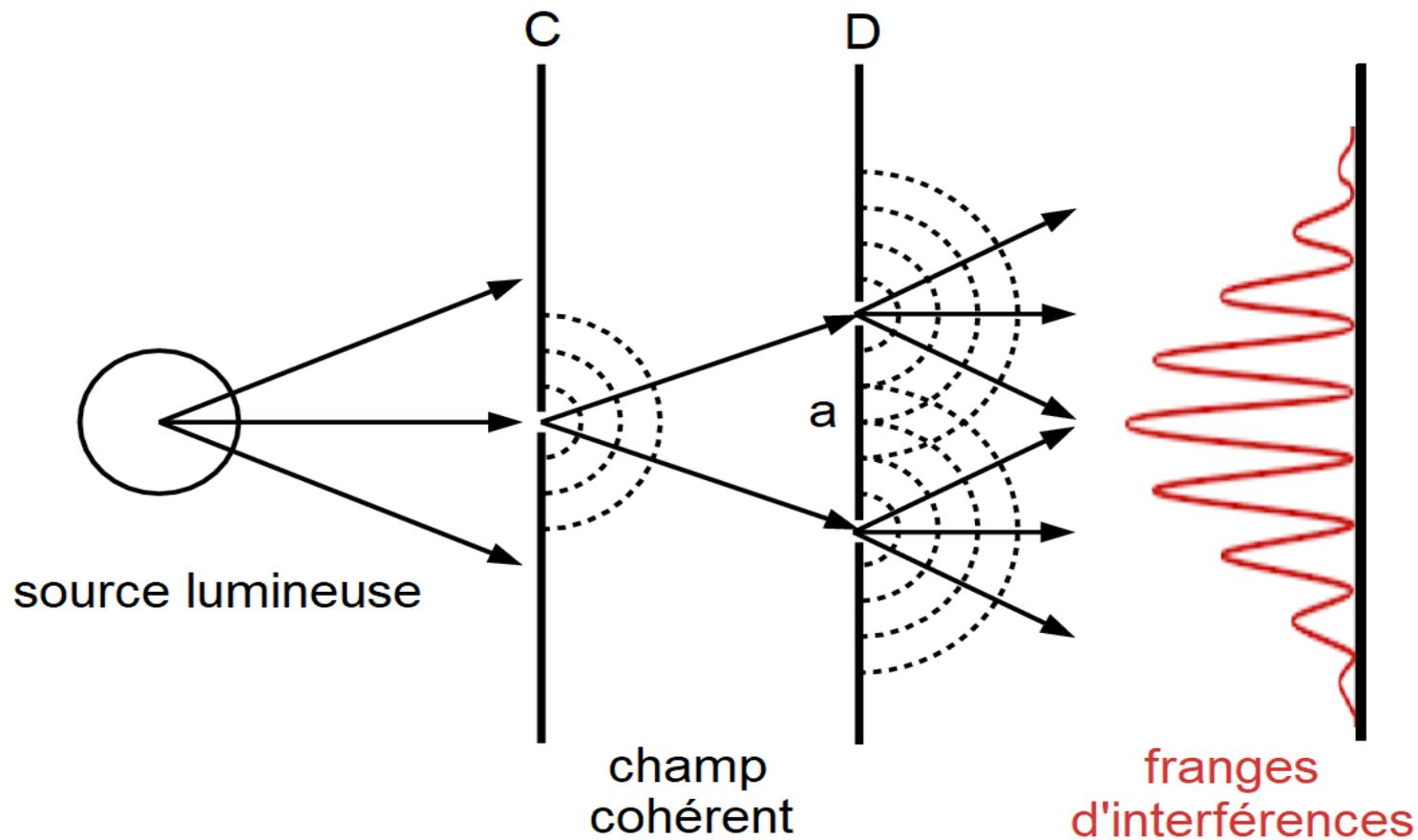


illustration du principe de Huyghens

Interférences : expérience des trous (ou fentes) d'Young



animation

Observations à tirer de cette expérience :

- Les interférences se produisent si le champ incident sur le diaphragme D est **cohérent**
→ effet du masque collimateur C, ou éclairage par faisceau laser
- L'interfrange **croît avec la longueur d'onde** et **décroît si on augmente la distance a** entre les fentes : $i \approx \lambda / a$
- Les franges produites par une **source étendue** sont brouillées, et même s'estompent et disparaissent
- Source non monochromatique : le **mélange des couleurs** estompe le système de franges
- Les franges s'estompent lorsqu'on s'éloigne du centre de l'écran d'autant plus vite que la **largeur des fentes** augmente

Les premières applications en astronomie

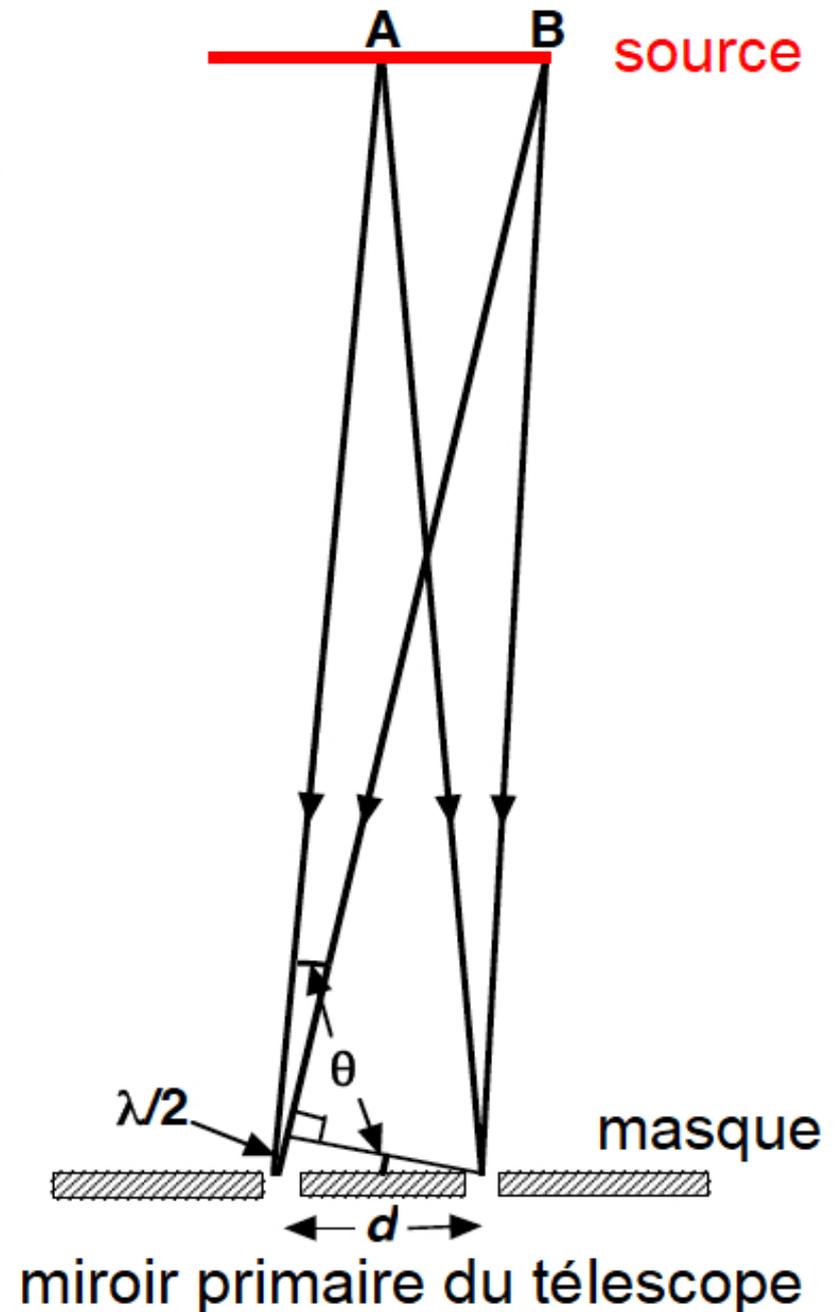
- Des astronomes au XIX^{ème} siècle souhaitent pouvoir mesurer les diamètres stellaires, inaccessibles aux télescopes de l'époque.
- Idée de Fizeau (1851) : adapter un télescope pour faire interférer deux faisceaux lumineux provenant d'une étoile et observer la modification de la **visibilité** du système de franges suivant la distance entre les fentes.

Source ponctuelle : tous les rayons arrivent en phase sur les deux trous: **franges toujours visibles**

Source de dimension angulaire 2θ : les rayons provenant de A arrivent en phase sur les deux trous, mais ceux provenant de B arrivent en opposition de phase et détruisent les franges créées par A, si on a :
 $d = \lambda / 2\theta$.

Idem pour tout couple de points de la source séparés de θ . Il en résulte la disparition des franges, dont **la visibilité devient nulle**.

La source est alors dite **complètement résolue**.



Stephan met en pratique l'idée de Fizeau sur le télescope de 80 cm de l'Observatoire de Marseille avec $d = 65$ cm et observe (1873-1874) des étoiles brillantes pour tenter de mesurer leur diamètre apparent.

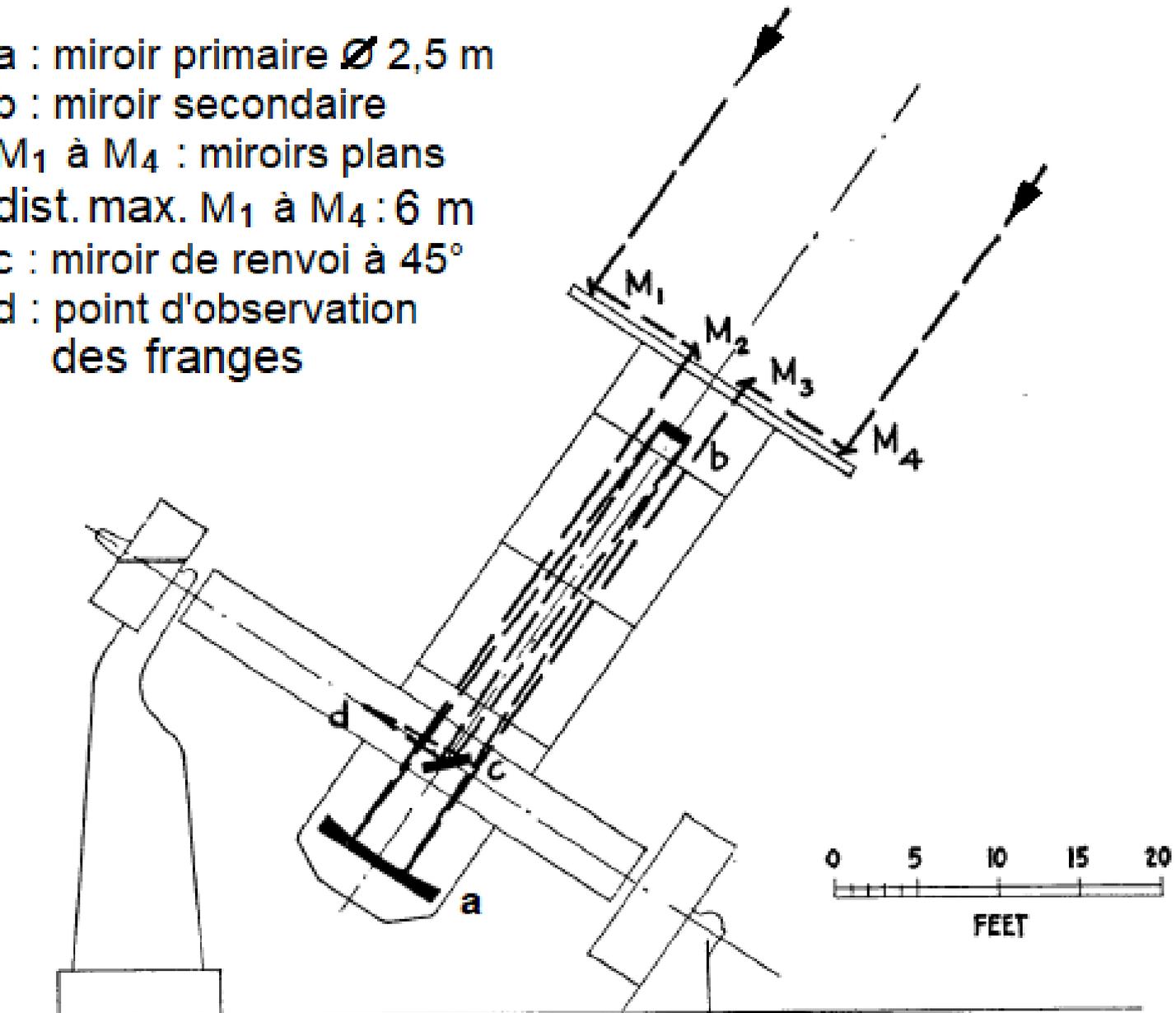
Echec : les franges persistent : le diamètre du télescope n'est pas assez grand. Sa conclusion :

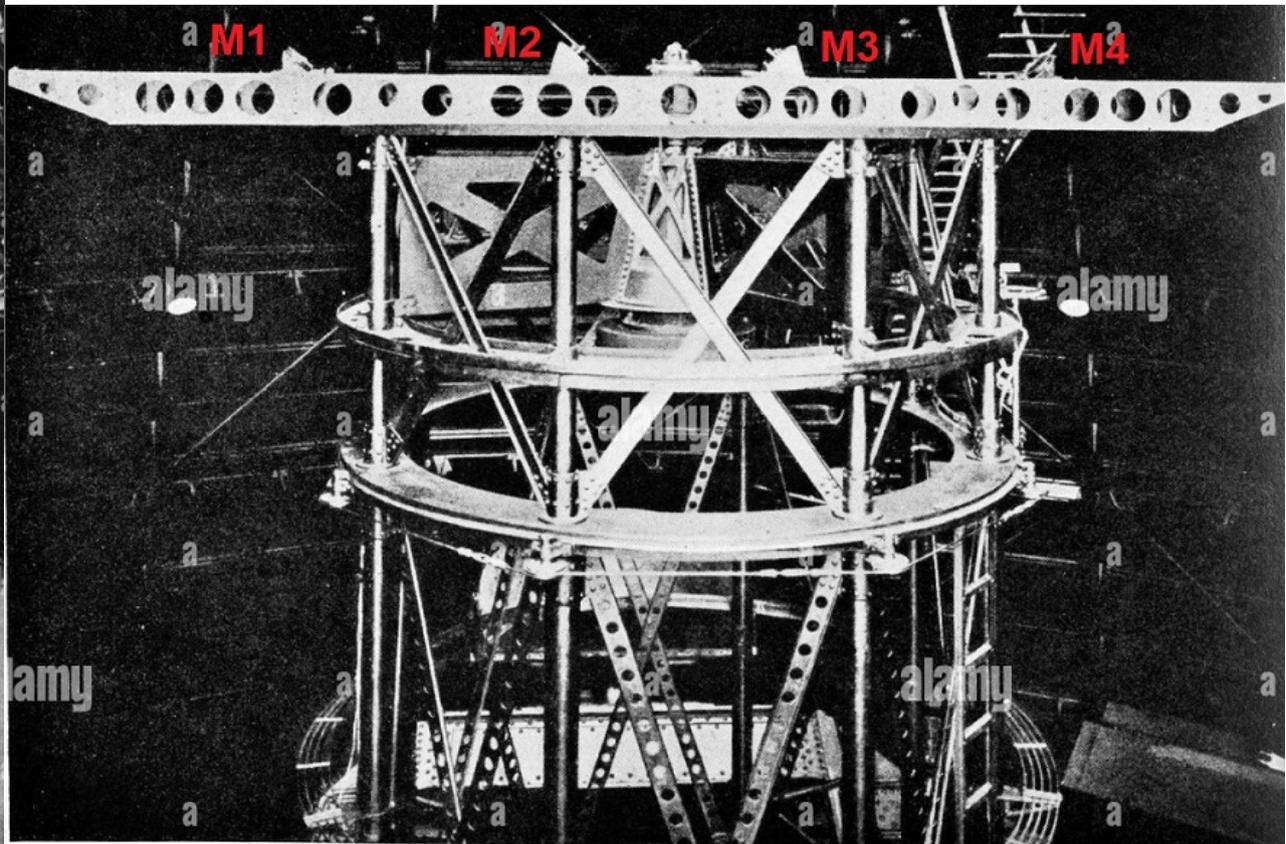
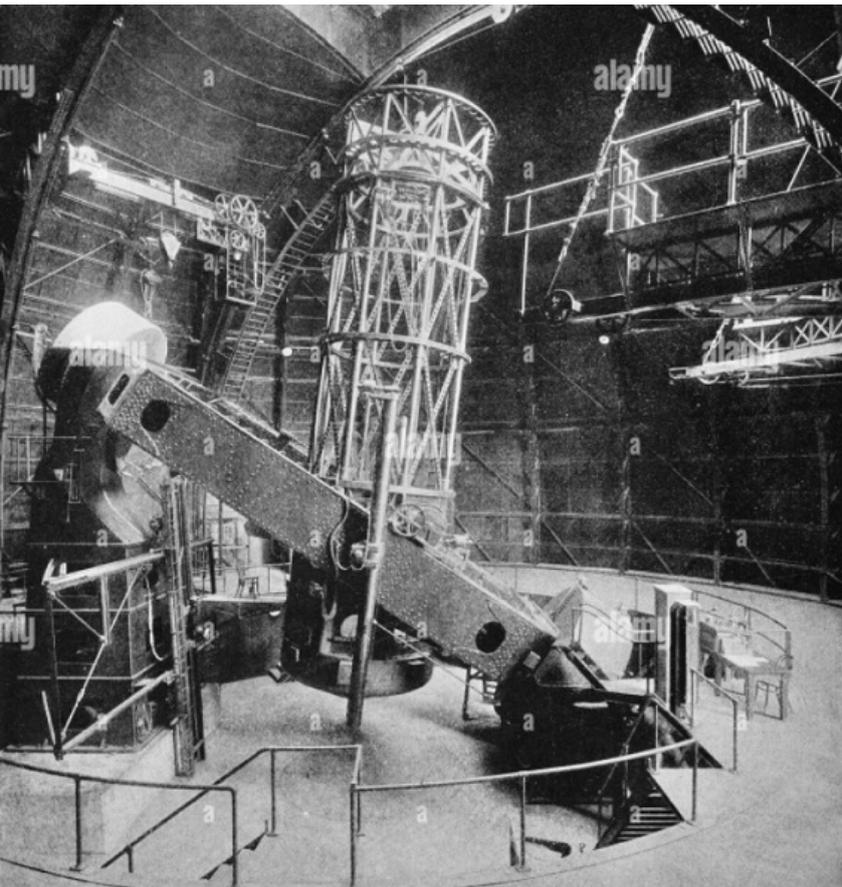
Ainsi, le diamètre apparent de toutes les étoiles observées est considérablement inférieur à 1/6 de seconde d'arc.

Michelson (USA) mesure avec la même méthode le diamètre apparent des principaux satellites de Jupiter, puis en 1919 avec **Pease** il adapte sur le télescope de 2,50 m du mont Wilson un interféromètre à **longueur de base d** variable jusqu'à 6 m. Il parvient à mesurer le diamètre apparent de la géante rouge Bételgeuse (α Orionis), soit 0,047 seconde d'arc.

Interféromètre stellaire de Michelson

- a : miroir primaire \varnothing 2,5 m
- b : miroir secondaire
- M₁ à M₄ : miroirs plans
- dist. max. M₁ à M₄ : 6 m
- c : miroir de renvoi à 45°
- d : point d'observation des franges





Télescope Hooker de 100 pouces (2,5 m) du Mont Wilson
et interféromètre de 20 pieds (6 m) – vues prises en 1925

Pouvoir séparateur pour $d = M1-M4 = 6 \text{ m}$ à $\lambda = 0,55 \mu$:

$$2\theta = 1,22 \lambda / d \quad \text{soit } 1,12 \cdot 10^{-7} \text{ rd} = \mathbf{0,023''}$$

Michelson définit la **visibilité des franges** :

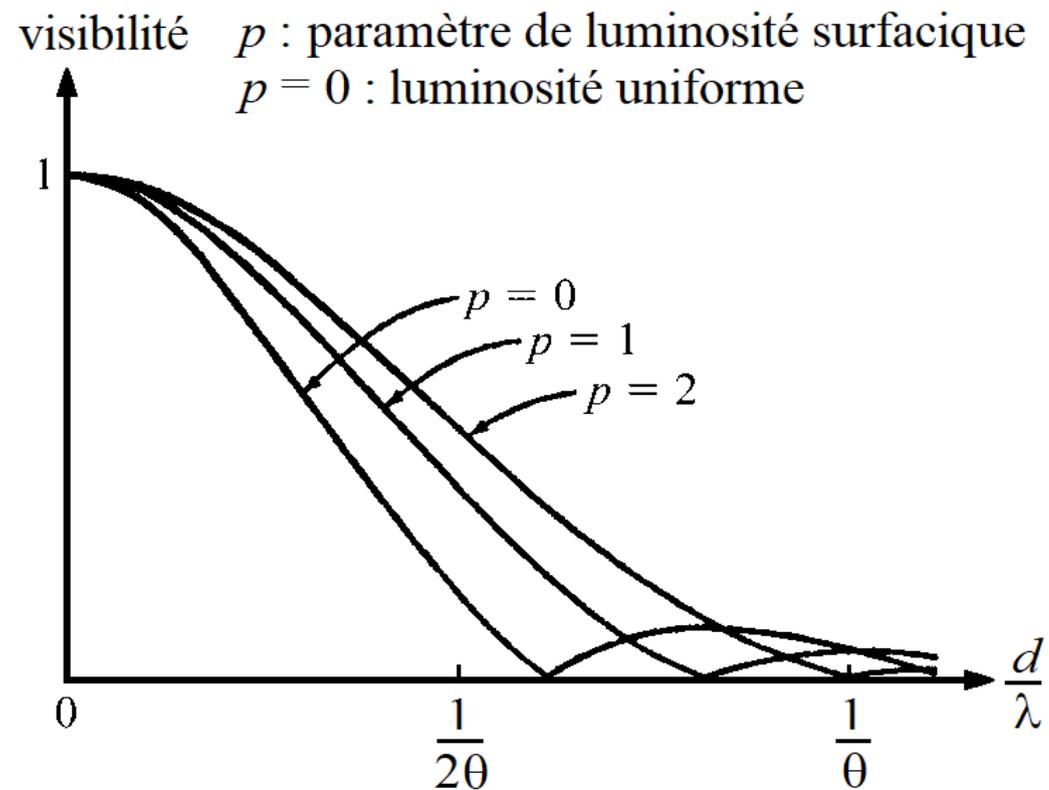
$$v = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

où I est l'intensité lumineuse des franges mesurée en chaque point de l'écran.

En variant la **longueur de base d** , on modifie la visibilité, qui s'annule lorsque la source est résolue

soit pour une étoile de luminosité de surface uniforme :

$$d = 1,22 \lambda / 2\theta$$



(D'après M. Born & E. Wolf, *op. cit.*, fig. 7.15)

Quelques remarques générales

La quantité d / λ est homogène à une fréquence, en nombre de périodes de franges par unité d'angle. C'est la **fréquence spatiale**.

La courbe de visibilité est analogue à un **spectre spatial**, caractéristique de la distribution de luminosité sur la surface de l'objet observé.

Les trois courbes montrées correspondent à des profils de luminosité stellaire différents : on a accès à un **paramètre caractéristique** de l'objet.

L'interférométrie optique n'a pas progressé jusqu'aux travaux d'[Antoine Labeyrie](#) (à partir de 1975), puis la maîtrise des techniques d'acheminement des faisceaux lumineux préservant leur [cohérence temporelle](#) a abouti à des instruments très performants (CFHT, interféromètres de l'ESO au Paranal, etc). On y reviendra.

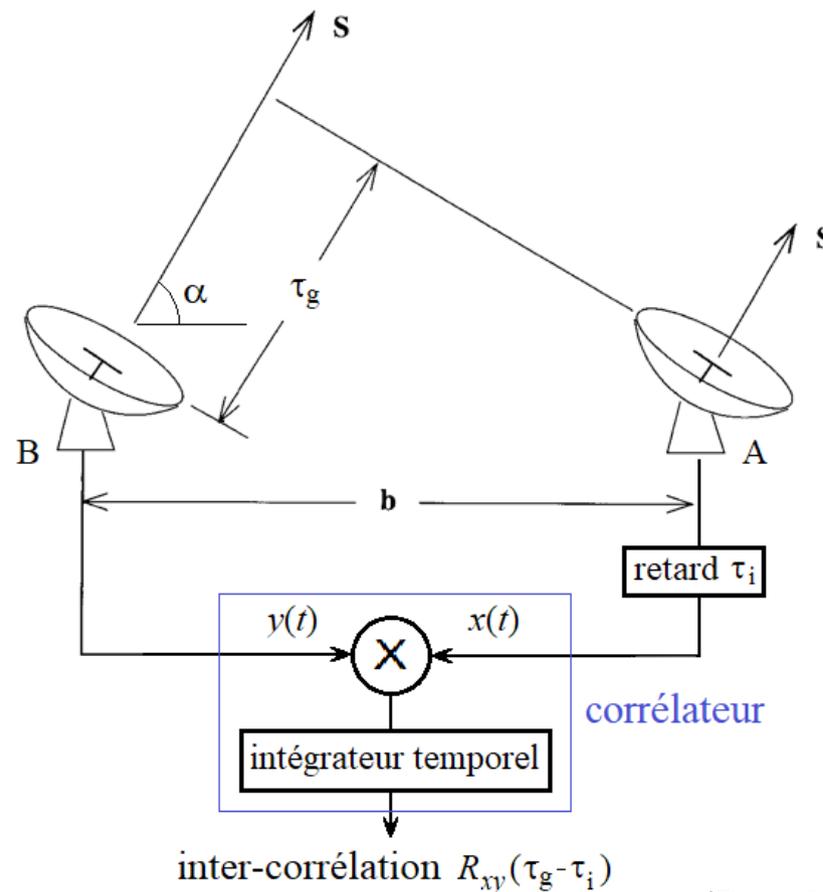
Interférométrie radio

Elle a pris corps dans le cadre du développement de la radioastronomie à partir de la fin des années 1940, et s'est considérablement perfectionnée

Elle a permis d'obtenir des résultats spectaculaires en imagerie radio pour déterminer la structure des radio-sources

Des interféromètres radio géants à l'échelle de la planète ont permis l'« observation » directe de trous noirs

Principe de l'interféromètre à deux antennes



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, fig. 5.2)

- adaptation du schéma de Michelson - Fizeau
- les franges sont obtenues par **inter-corrélation**
- Le retard géométrique τ_g est compensé par τ_i pour préserver la **cohérence temporelle** entre les signaux x et y

Interféromètre de base orientée Est-Ouest : franges en sortie du corrélateur au cours du transit d'une source ponctuelle monochromatique

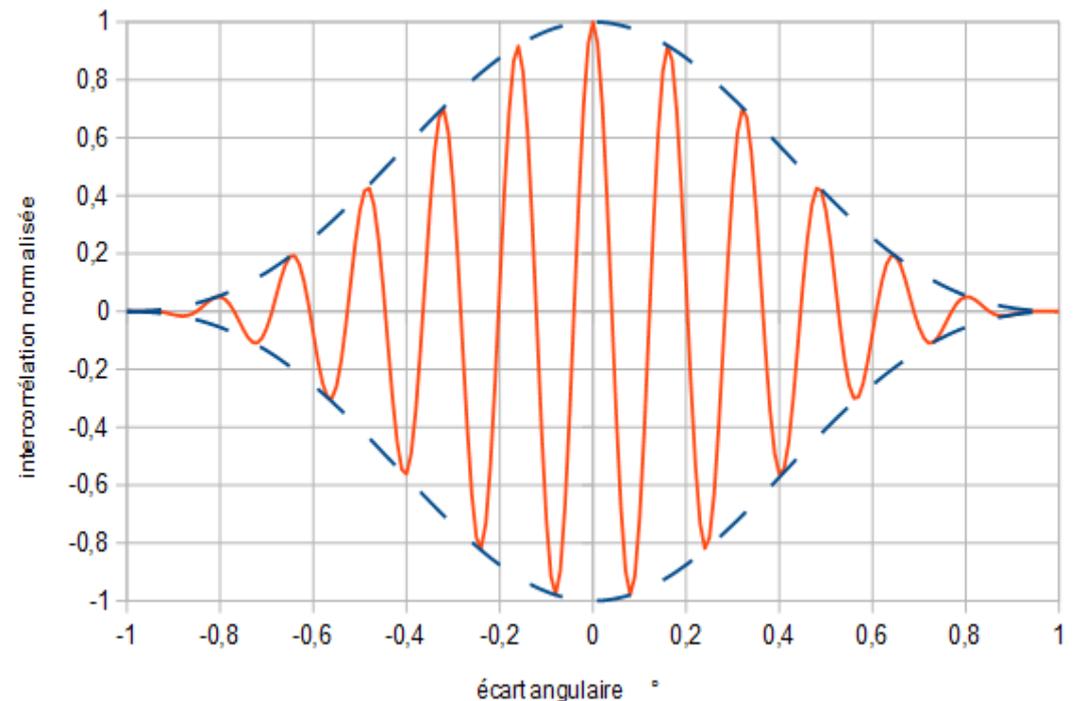
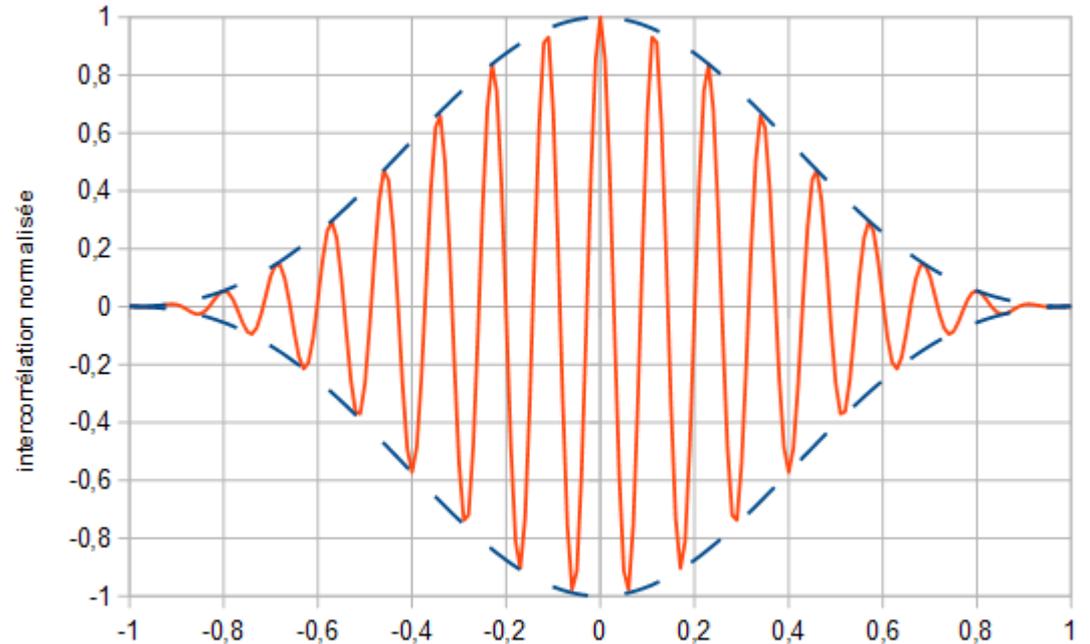
- Passage au méridien

fréquence spatiale $b/\lambda = 500$,
inter-frange $0,115^\circ$

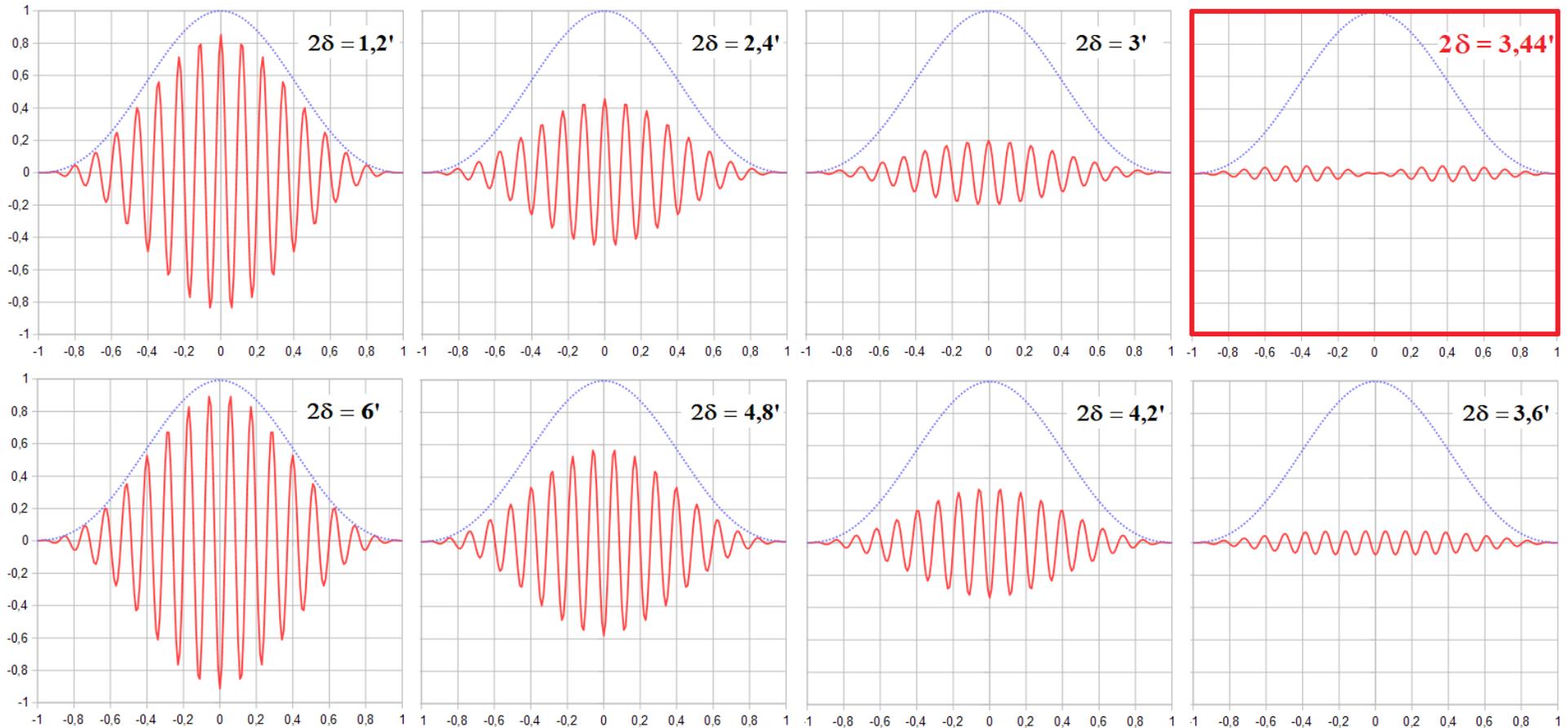
- Passage à 45° Ouest

fréquence spatiale $b/\lambda = 353$,
inter-frange $0,162^\circ$

- Enveloppe : gain d'antenne



Qu'observe-t-on dans le cas de deux sources ponctuelles proches de distance angulaire 2δ ?



avec $b/\lambda = 500$, la frange centrale est nulle pour $2\delta = 3,44'$ qui est la distance angulaire effective entre les deux sources : **le système binaire est résolu !**

Autres résultats intéressants :

- L'interférogramme d'un système de deux sources de luminosités différentes fournit aussi le **rapport de leurs luminosités**
- Sources non ponctuelles : comme en optique, l'interférométrie radio fournit une **fonction de visibilité** dont les valeurs, pour les fréquences spatiales accessibles, forment le **spectre spatial** caractéristique de la distribution angulaire observable de la luminosité de l'objet

propriété fondamentale : visibilité et distribution de la luminosité sont liées par la transformation de Fourier

- Noter que la largeur de bande utilisée pour l'observation des sources réelles non monochromatiques influence la **cohérence temporelle**

[Voir mémoire ORPB 2021 cité pour plus de détails]

La synthèse d'ouverture

- L'interféromètre à deux antennes permet l'accès à la distribution de luminosité de la source uniquement suivant la direction de la ligne de base
- Pour obtenir une « image » de la source il faut plusieurs lignes de base orientées dans différentes directions, qui constituent un réseau interférométrique
- Le réseau synthétise une antenne d'ouverture égale à sa dimension

Relation fondamentale de l'interférométrie

ensemble des inter-corrélations entre les signaux des différentes bases, dépendant des écarts angulaires

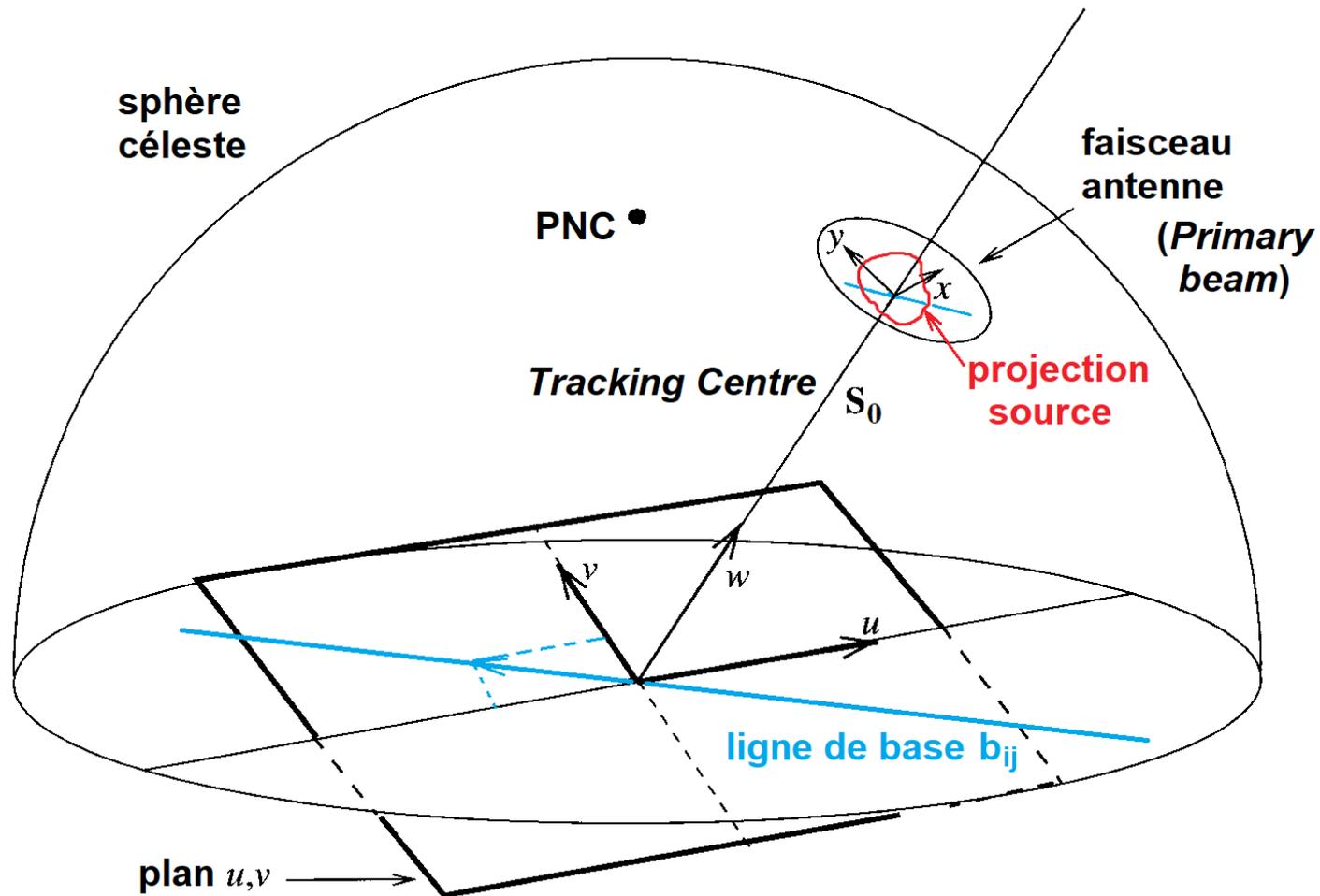
→ fonction de cohérence équivalente à

la visibilité fonction des fréquences spatiales $(u, v) =$
spectre spatial de la source

→ qui donne par transformation de Fourier 2D inverse

la distribution spatiale de luminosité de la source

C'est un cas particulier du **théorème de van Cittert – Zernike**
fondamental en optique



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, fig. 5.4)

correspondance géométrique entre la projection d'une source sur la sphère céleste et le plan (u,v) des fréquences spatiales

la ligne de base b_{ij} est associée à l'interféromètre formé par les antennes i et j du réseau

Un réseau emblématique : le Karl Jansky *Very Large Array* (VLA), USA



Crédit NRAO
Public Outreach

28 antennes paraboliques de 25 m disposées suivant
3 bras en Y de longueur 21 km
extension du réseau : b_{ij} max = 35 km

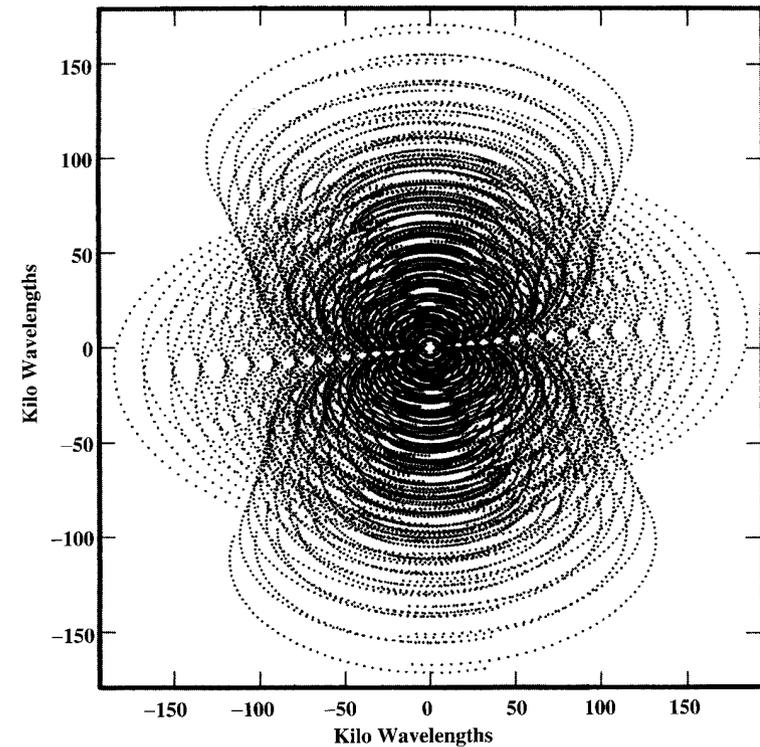
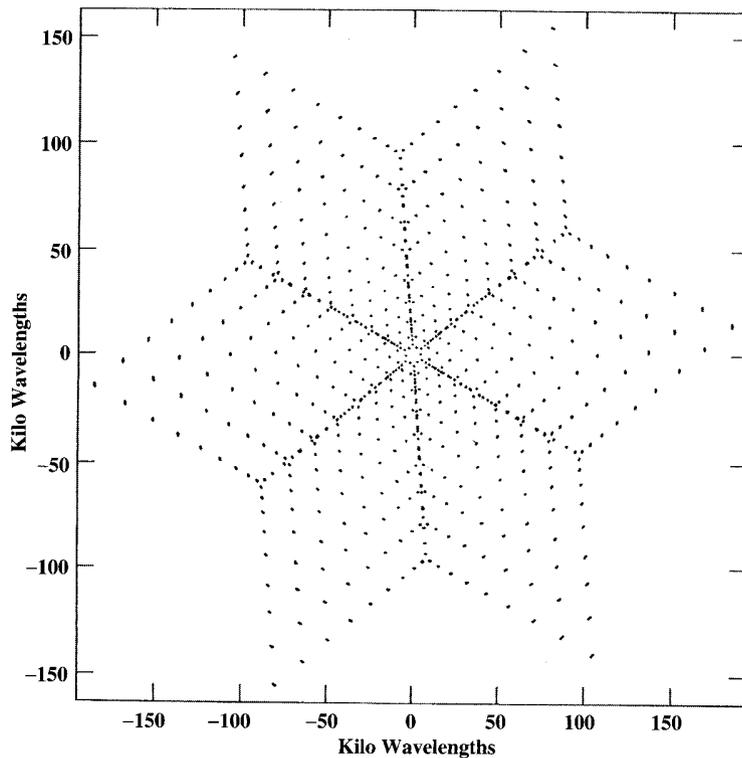
- Réseau mis en service en 1980, « upgrade » en 2010
- Coût actualisé (2021) : 258 M\$

- masse de chaque antenne : 209 t
- déplacement sur rails à des emplacements prédéterminés
- transmission des signaux par fibres optiques



- fréquences couvertes : 74 MHz ($\lambda=4$ m) à 50 GHz (0,7 cm)
- 351 lignes de base indépendantes
- résolution angulaire : de 0,2 " à 0,04 "

Echantillonnage du spectre spatial



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, figs. 6.5 & 6.6)

VLA, $\lambda = 5$ cm - visée au zénith instantanée (G) et suivi sur 8h à la déclinaison $\delta = 30^\circ$ (D)

n éléments (antennes) : $n(n-1)/2$ bases indépendantes au maximum (VLA : 351)

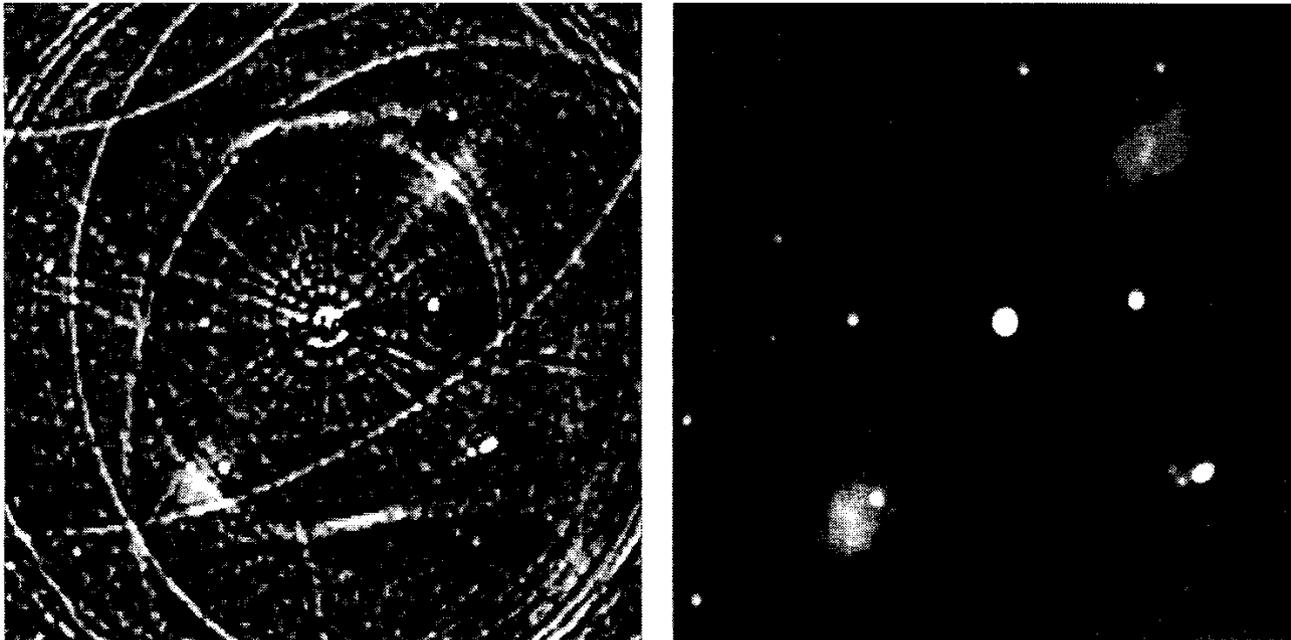
→ couverture incomplète et lacunaire du plan (u, v)

Obtention de l' « image » : carte de luminosité

Supposant les éléments correctement calibrés et leurs positions respectives connues précisément :

inter-corrélations \rightarrow visibilité \rightarrow Fourier⁻¹ \rightarrow « dirty picture »
(image sale) due au sous-échantillonnage du plan (u,v)

\rightarrow CLEAN : procédure itérative de nettoyage, exploite la connaissance de la géométrie du réseau



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, fig. 6.9)

Des réseaux interférométriques récents et en projet

- **ALMA : Atacama Large Millimeter Array** (ESO, Chili)
66 antennes de 12 m (~PB8), longueur de base max. 16 km,
 λ : 0,32 mm à 3,6 mm
- **SKA : Square Kilometer Array**, sur deux sites : Afrique du Sud ,
réseau interférométrique de 200 antennes paraboliques ;
Australie, réseau phasé de 1 km², 130000 antennes Vivaldi
 λ : 15 mm (20 GHz) à 6 m (50 MHz)
- **LOFAR : Low Frequency Array** , nombreux sites répartis en
Europe, extension ~2000 km, antennes spirales
basses fréquences : 30 à 250 MHz
- ...



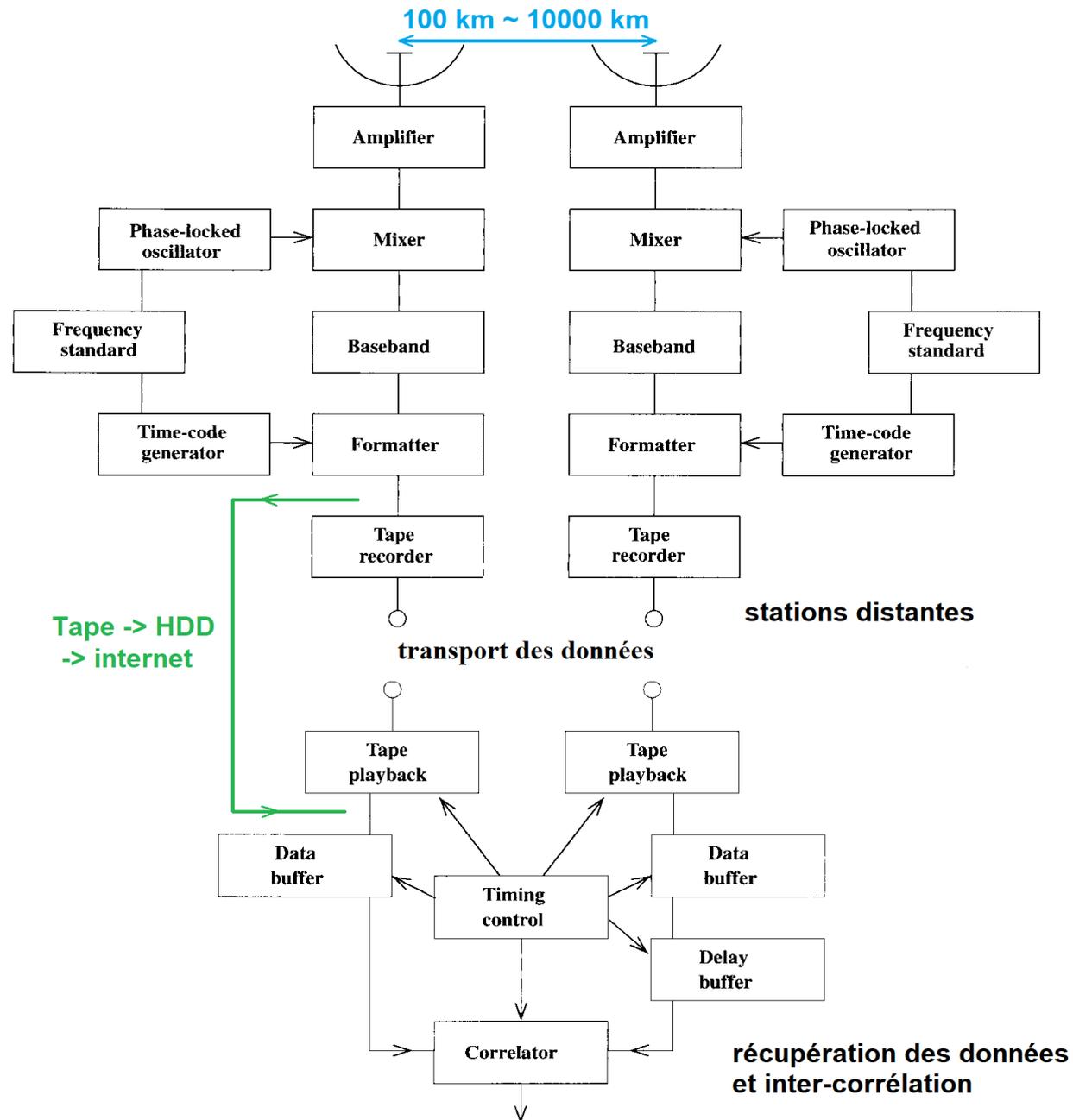
Réseau SKA Afrique du Sud

Vue d'artiste – crédit SKA Project Development Office and Swinburne Astronomy Productions

Interférométrie à très longues bases (VLBI)

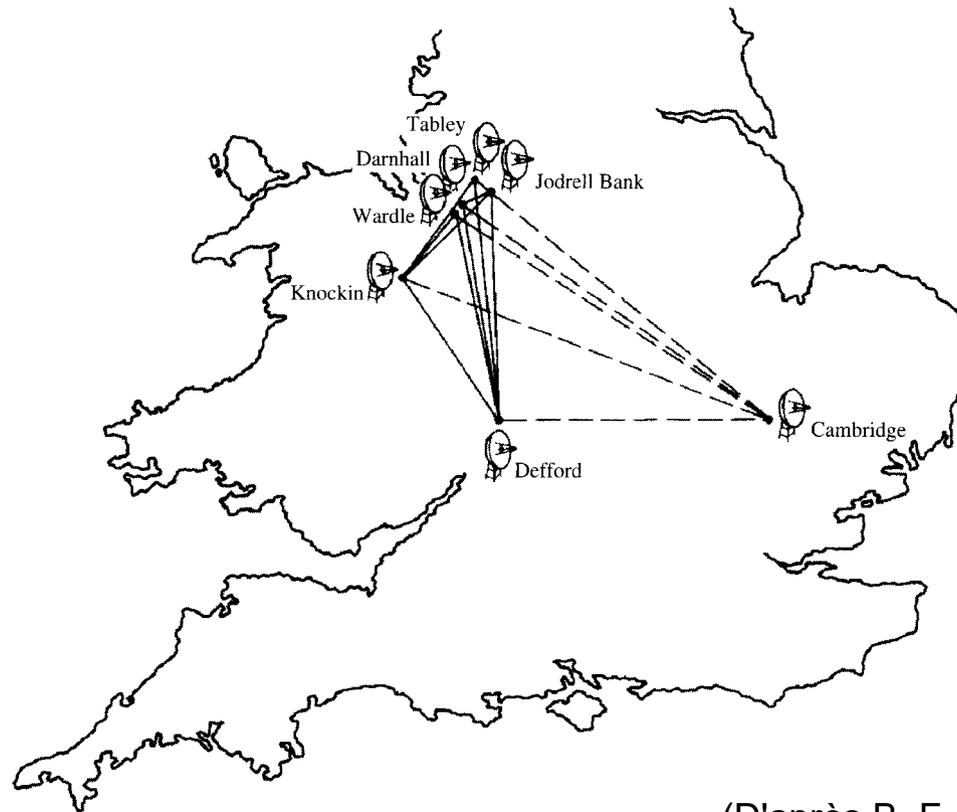
- avantage : **très grandes longueurs de base** (terrestre : $\sim 100 \text{ km} \rightarrow \sim 10000 \text{ km}$) \rightarrow **très haute résolution angulaire** : mieux que le millième de seconde d'arc
- **pb principal** : **synchronisation temporelle** des différents sites d'acquisition \rightarrow étiquetage temporel des données (horloges Cs, GPS ...), stabilité OL
- **Mesure précise des longueurs de base** (géodésie...)
- Le **transport des données** après étiquetage vers le corrélateur central n'est pas un pb : bandes puis disques durs puis maintenant internet
- Calcul des **inter-corrélations en temps différé**

Elément de réseau VLBI « old style »



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, fig. 5.7)

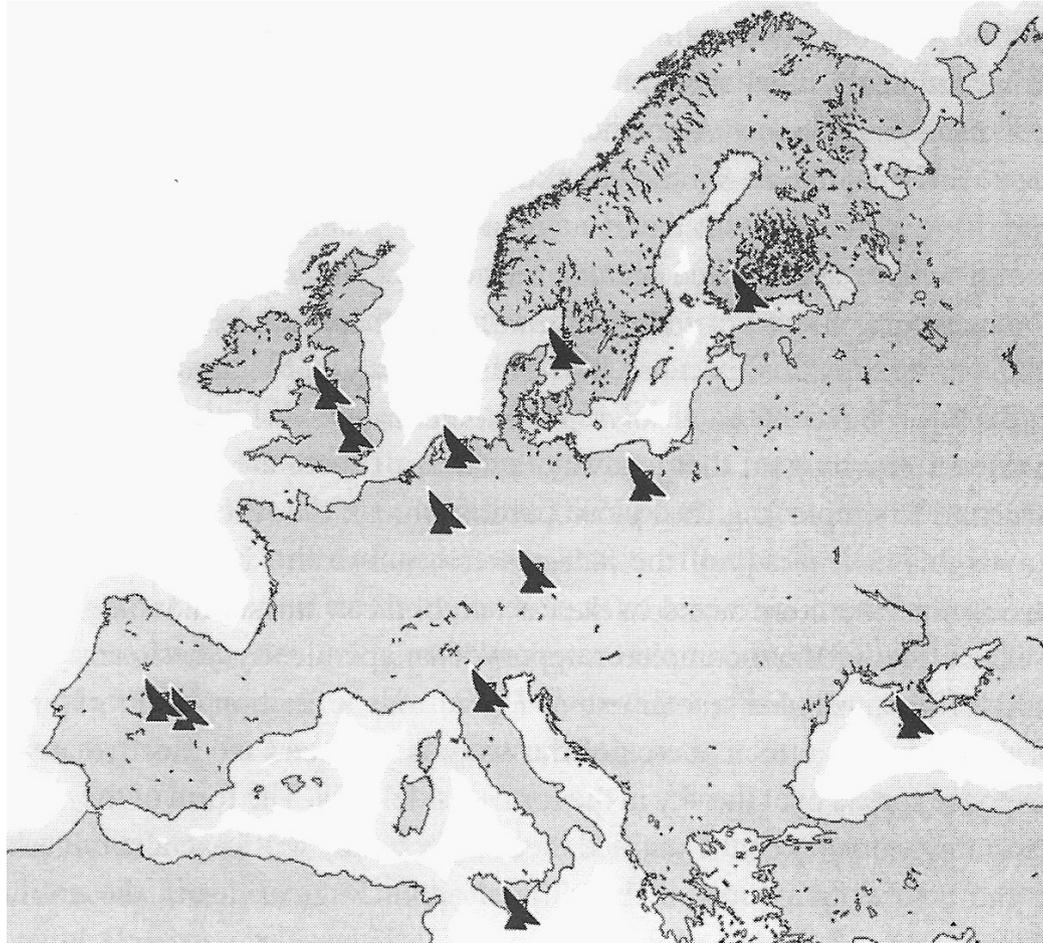
Un précurseur : le réseau MERLIN (UK)



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, fig. 6.3)

- UK pionnier en radioastronomie (Pawsey, Ryle, ...)
- MERLIN : 6 antennes fixes, longueur de base max. ~200 km
- transport des signaux par faisceaux hertziens puis par fibres optiques

Réseau européen EVN



(D'après B. F. Burke & coll., *op. cit.*, fig. 6.12)

JIVE : Joint Institute for VLBI European Research Infrastructure Consortium



- VLBA (USA)
- Réseau mondial VLBI: regroupe des éléments de réseaux continentaux (USA, Europe, Asie) → EHT
- Projet d'interféromètre dans l'espace : VSOP
VLBI Space Observatory Program puis VSOP2
résolution attendue ~ microseconde d'arc
(où en est-on?)
- ...

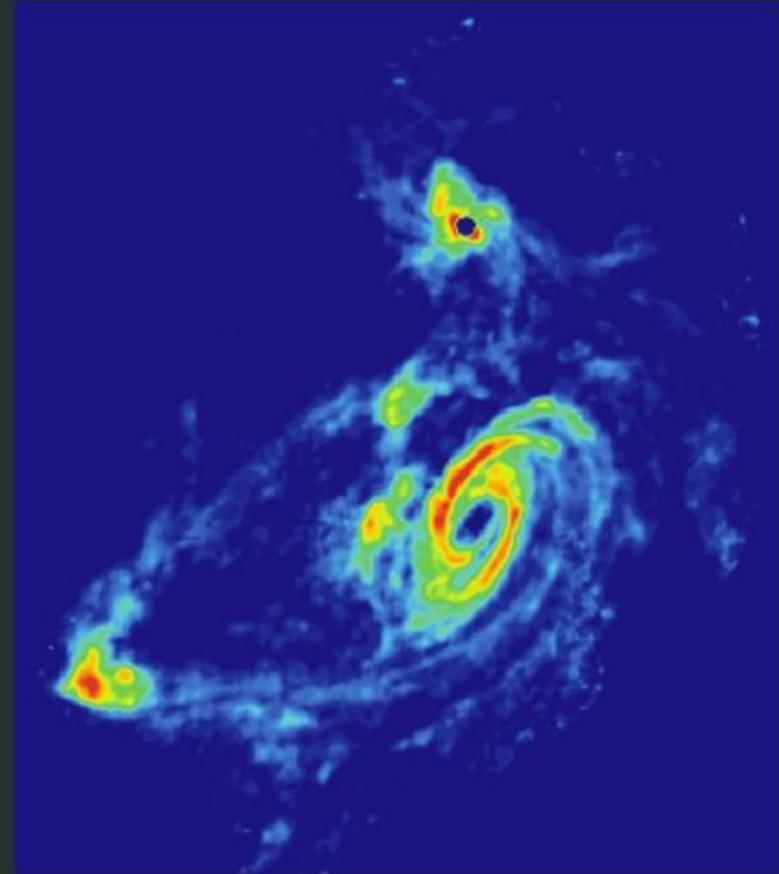
Des résultats

Interactions de marée dans le groupe de galaxies M81

Observation dans le visible

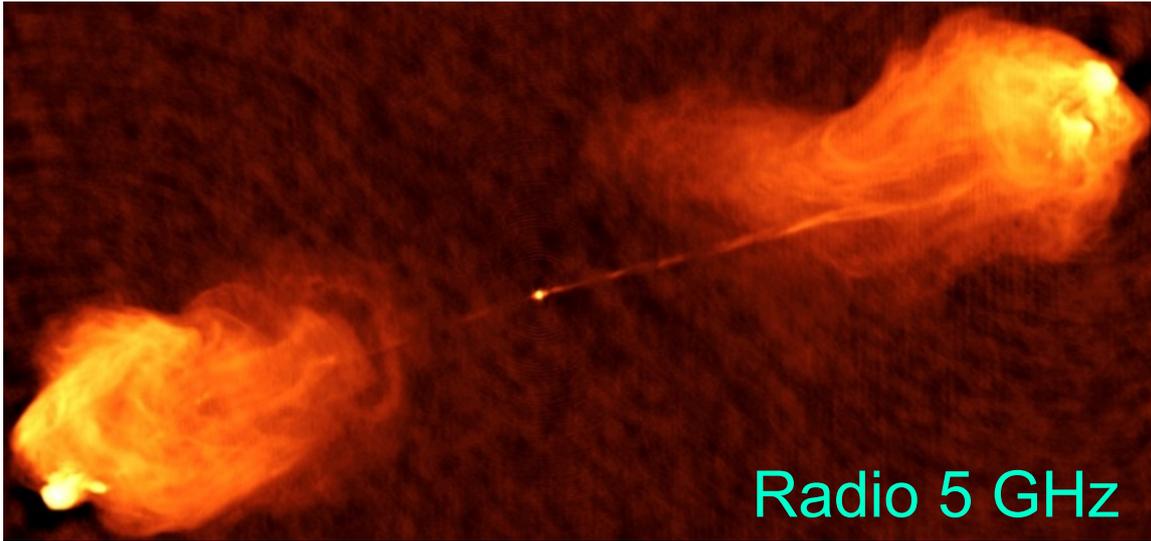


Observation raie radio H1 21cm

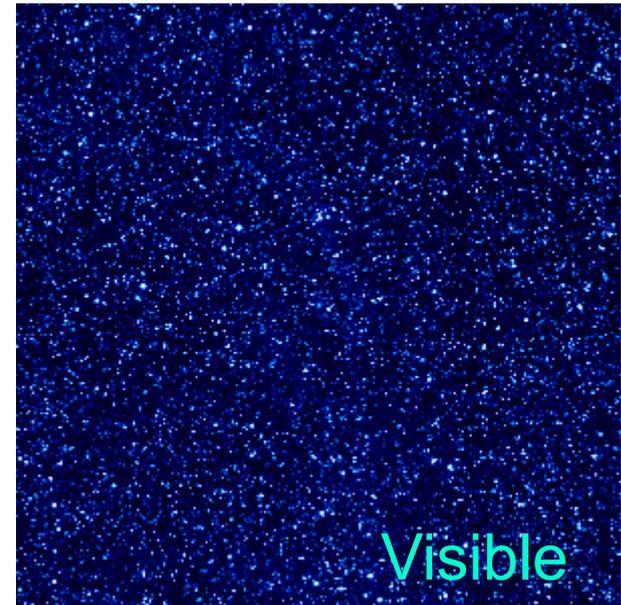


Champ ~ 150' x 170'

Cygnus A



Champ 2' x 1'



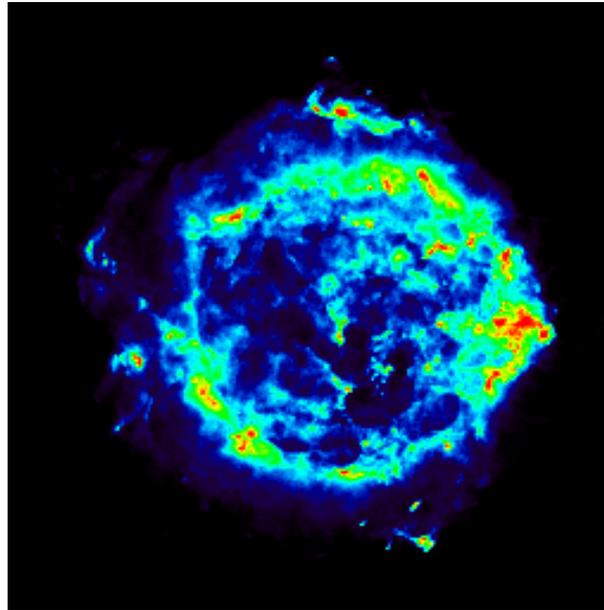
La **radiosource Cygnus A** se situe à 700 millions d'années-lumière; elle est beaucoup plus étendue que notre Galaxie.

Le rayonnement radio est produit par des électrons relativistes éjectés depuis le point central – noyau actif d'une galaxie contenant un trou noir massif – qui interagissent avec la matière intergalactique formant les deux lobes.

Radiosource Cassiopée A
résidu d'une supernova observée fin XVII^e siècle
distance 9100 AL



lumière visible

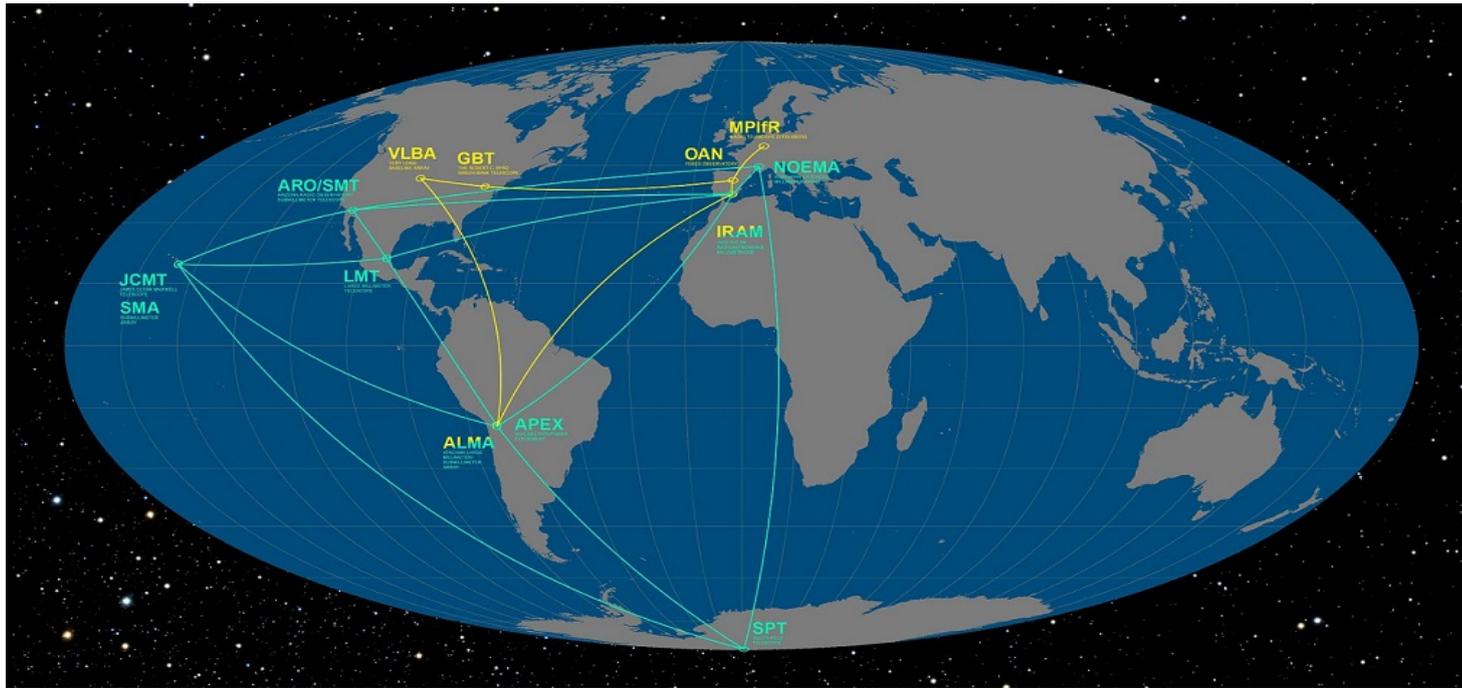


radio décimétrique

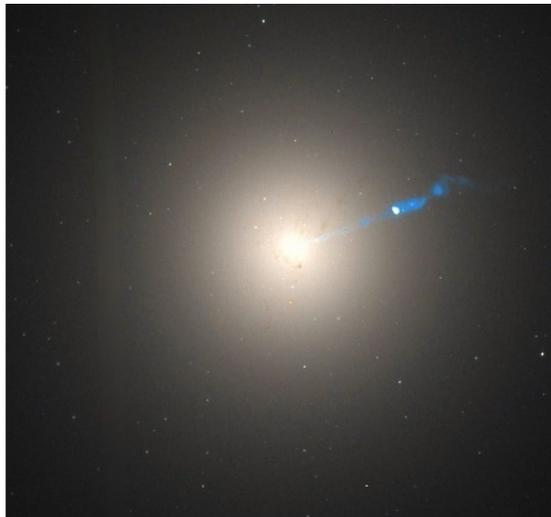
Champ ~ 6' x 6'

L'image radio obtenue par le réseau VLA à $\lambda=21\text{cm}$ montre des zones d'émission intense de rayonnement synchrotron produit par des électrons accélérés par des champs magnétiques

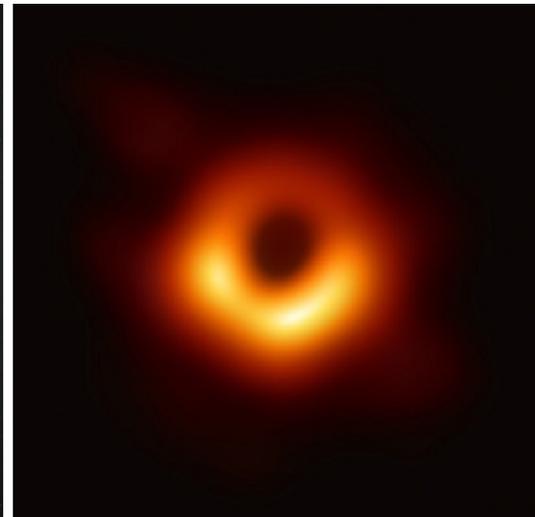
Event Horizon Telescope : « voir » les trous noirs



galaxie elliptique M87
taille noyau central ~
10000 AL
distance ~ 53 millions AL
~500 milliards de
milliards de km !
radio-source Virgo A



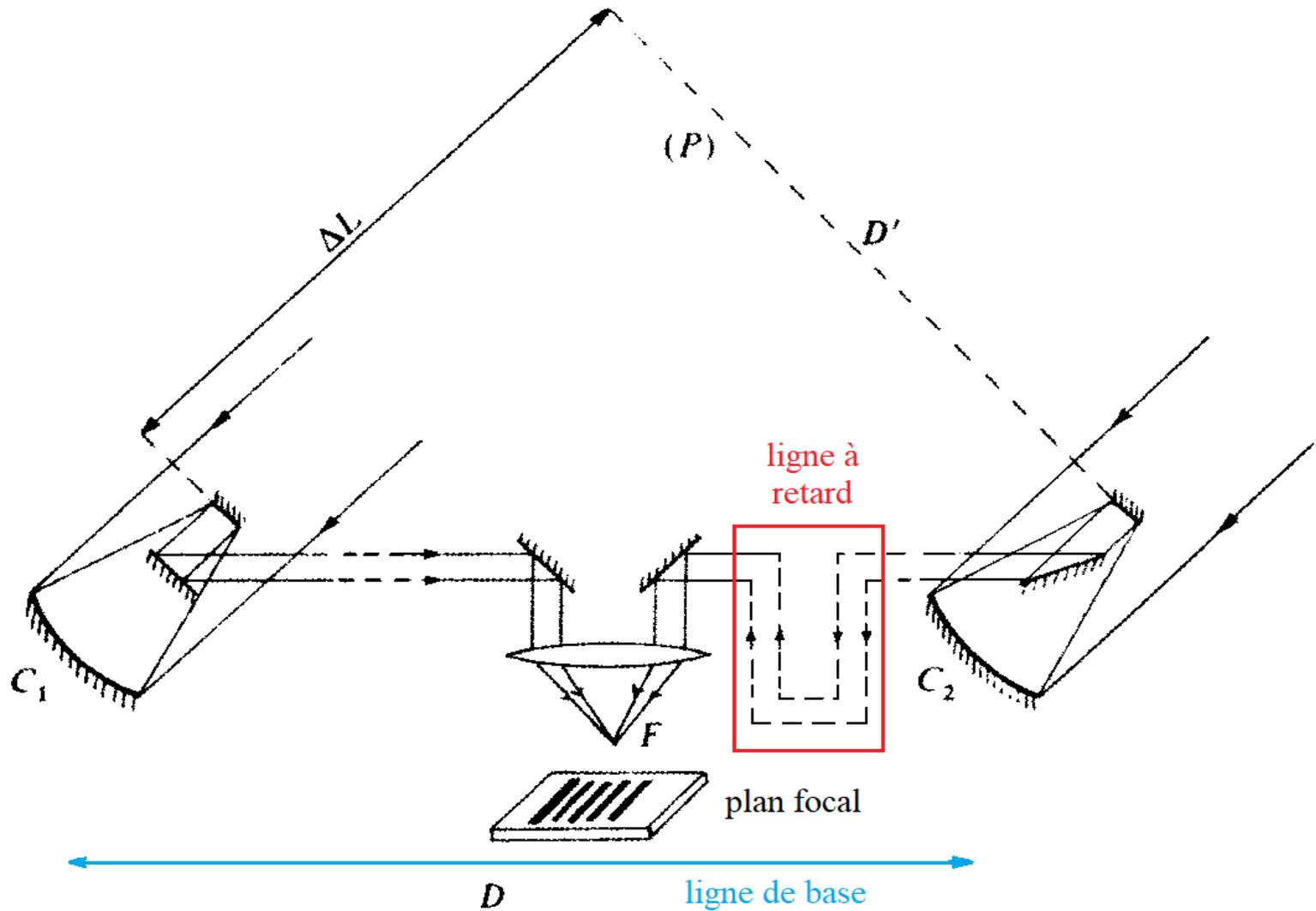
trou noir central M87*
taille ~10 milliards km
masse ~ 6 milliards M_{\odot}
image obtenue en 2019
grâce à l'EHT



L'interférométrie optique

- Plus difficile à réaliser qu'en radio :
 $\lambda \sim \mu \rightarrow$ contraintes géométriques fortes, cohérence de phase difficile à maintenir sur de grandes longueurs de base et en large bande, sensibilité à la scintillation atmosphérique
- Franges mesurées en intensité lumineuse (*mais visibilité complexe*)
- Plusieurs types de combinaison des faisceaux ; méthode directe (modes Michelson ou Fizeau), hétérodyne, comptage de photons ...
- Résultats obtenus et attendus sur : étoiles jeunes et disques proto-planétaires, exoplanètes, astéroïdes, objets binaires, galaxies à noyau actif, trous noirs, etc...

Interféromètre optique mode Michelson



(D'après P. Léna & coll., *op. cit.*, fig. 6.26)

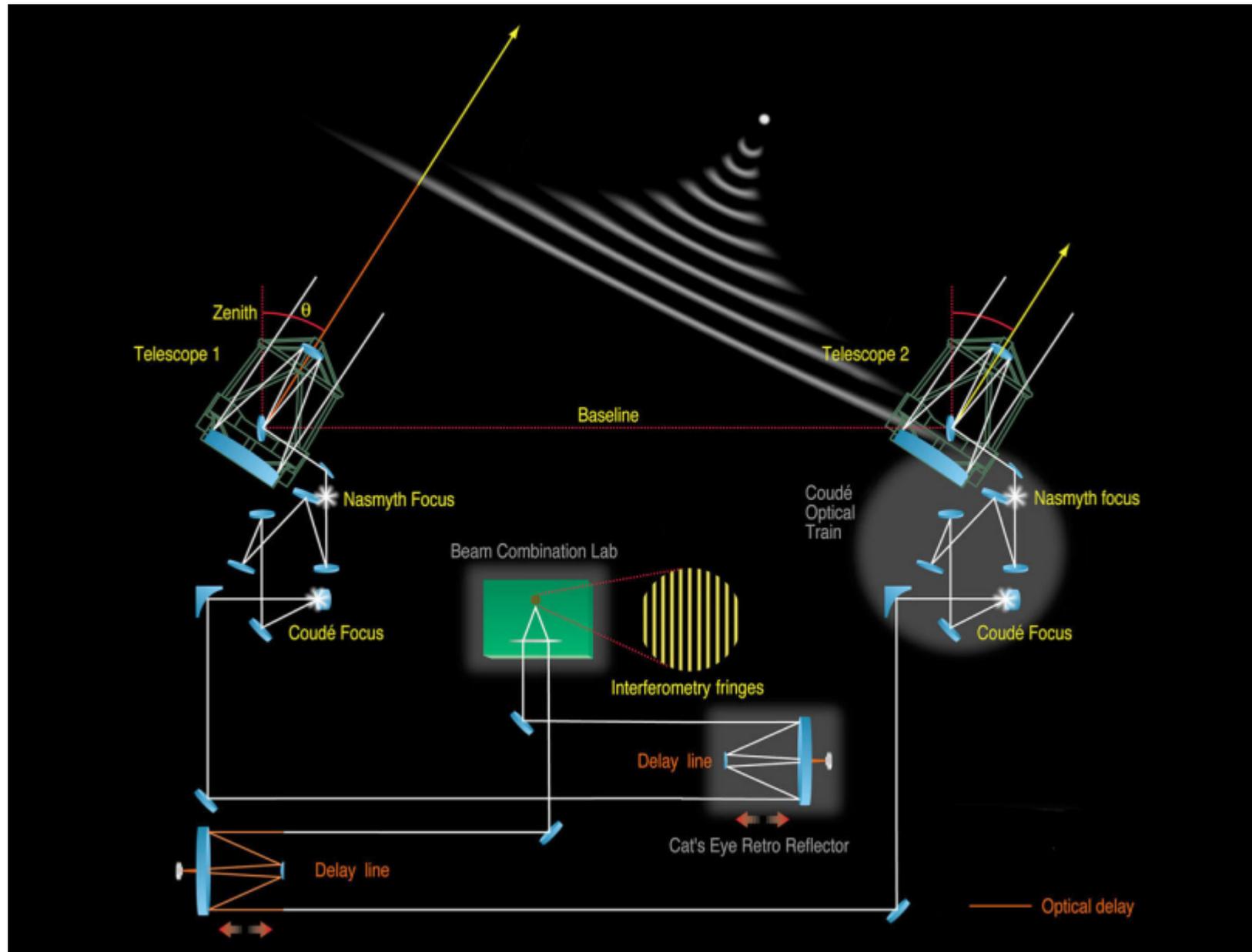
Le VLT → VLTI de l'ESO (Paranal, Chili)



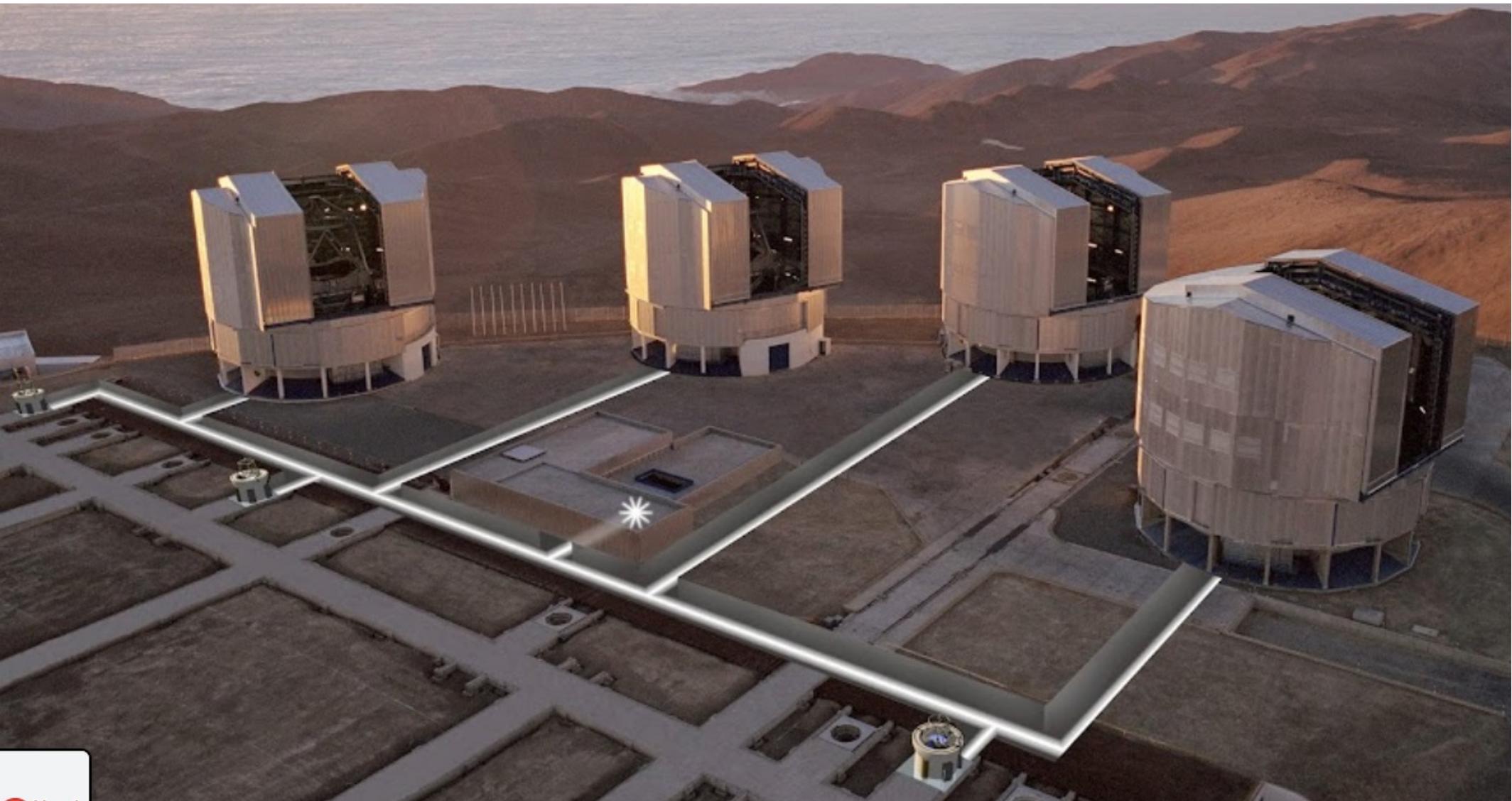
Crédit ESO

- 4 télescopes principaux de 8,2 m + 4 télescopes auxiliaires de 1,8 m
- Leur combinaison forme le réseau interférométrique optique VLTI
- Les télescopes principaux ont des positions fixes, et les télescopes auxiliaires peuvent être positionnés sur 30 emplacements prédéfinis
- Instruments : MATISSE, PIONIER et GRAVITY combinent 4 faisceaux dans l'infra-rouge proche et moyen – résolution ~ milli-seconde d'arc ⁴⁵

VLTi : chemin optique avec deux télescopes



VLTI : lignes de lumière



VLT : télescopes auxiliaires



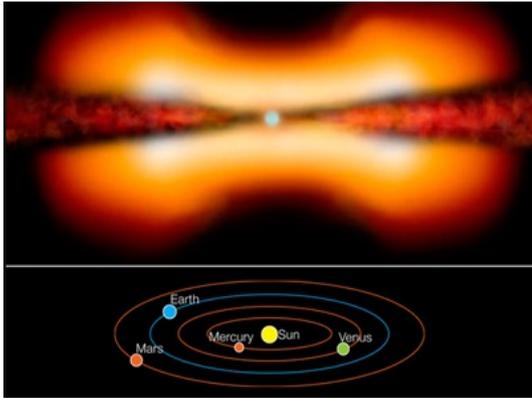
VLTI : instrument MATISSE



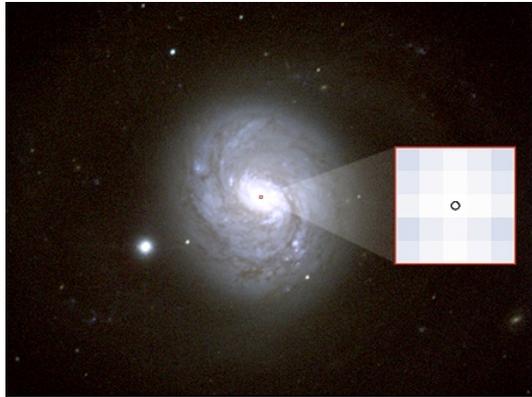
Crédit ESO - VLTI

- spectrographe-imageur offrant 3 résolutions spectrales
- combine 4 faisceaux dans 3 bandes en IR moyen 3,2 à 13 μ
- résolution angulaire 3,5 mas (millième d'arc-seconde) à 3,2₄₉ μ

VLTi : quelques résultats



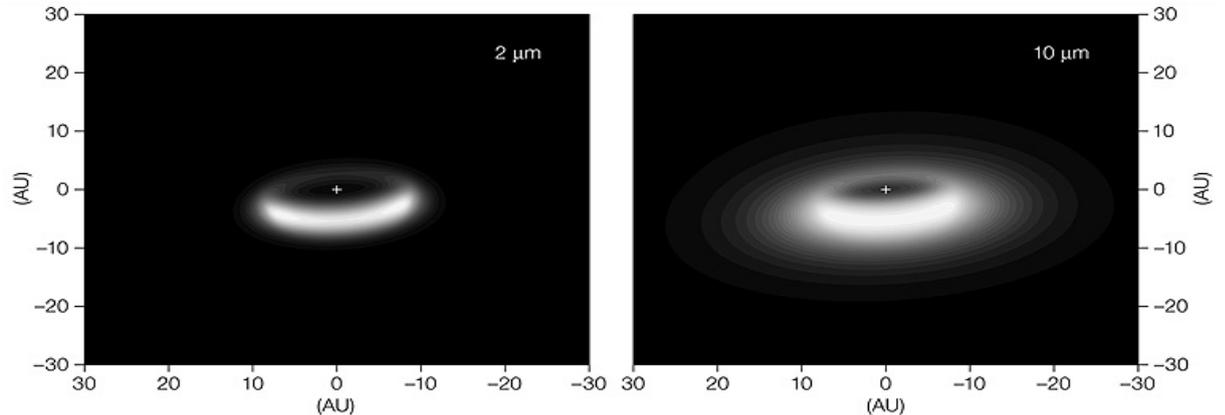
Objet MWC 297 (prévu) :
disque proto-planétaire autour
d'une étoile jeune



région au centre de NGC 1068
résolue par VLTi-MIDI : noyau actif
(AGN)

Crédit ESO - VLTi

disque de matière
perdue par une étoile
en fin de vie
(VLTi-MIDI 2007)



Crédit ESO - VLTi

Quelques références bibliographiques et sites web

J. Lequeux, La mesure du diamètre des étoiles, 2014

<https://journals.openedition.org/bibnum/687?lang=en>

P. Léna et Coll., L'observation en astrophysique, EDP Sciences, CNRS Editions, 2008

B. F. Burke et Coll., An Introduction to Radio Astronomy. Cambridge University Press, 3rd Ed., 2010

K. Rohlfs & T. L. Wilson, Tools of Radio Astronomy. A&A Library, Springer, 4th Ed., 2004
(*en particulier le chapitre 8*)

A. R. Thompson, J. M. Moran & G. W. Swenson Jr., Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. A&A Library, Springer, 3rd Ed., 2016

M. Born & E. Wolf, Principles of Optics. Cambridge University Press, 7th Ed. Reprinted, 2005

Mémoire ORPB 2021-02 : L'interférométrie en radioastronomie - Théorie et pratique - première partie. Nov. 2021

http://www.orpb.fr/wp-content/uploads/2021/11/memoire_interferometrie_partie-1_v1.pdf

Web : Wikipedia : articles Very Large Array, Square Kilometer Array ... ; ESO : ALMA ; jive.eu (EVN, JIVE project), ...

<https://www.eso.org/public/france/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>

<https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/vlti.html>

<https://www.btregon-astro.org/interferometre-amateur-a-poutre-de-fizeau-michelson/> 51