

Utilisation de la conversion de fréquence pour l'imagerie haute résolution en astronomie

L. Grossard, D. Ceus, J.-T. Gomes, R. Baudoin, P. Darré, L. Szemendera, L. Delage, F. Reynaud

Équipe Imagerie Radar et Optique / Département Photonique, XLIM, Université de Limoges,
UMR CNRS 7252, 123 Av. Albert Thomas, 87060 Limoges CEDEX, France



- 1 Contexte de nos travaux de recherche
- 2 Présentation du projet ALOHA
- 3 Validation en laboratoire
- 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel
- 5 Conclusion et perspectives

- 1 Contexte de nos travaux de recherche
- 2 Présentation du projet ALOHA
- 3 Validation en laboratoire
- 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel
- 5 Conclusion et perspectives

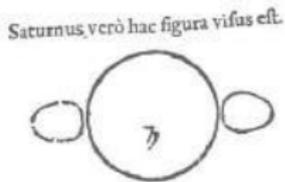
Contexte de nos travaux de recherche

Les débuts de l'observation aux instruments en astronomie

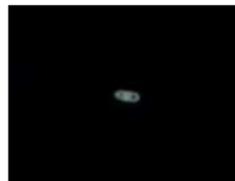
- début du XVII^e siècle : premières lunettes d'observation tournées vers le ciel.
- optiques de mauvaise qualité (aberrations importantes, forte perte de luminosité)
- diamètres faibles (25 mm) → faible résolution angulaire



Saturne
dessinée
par Galilée
(1609)



Photos
saplimges
(30/06/15)



Ø 102 mm



Ø 25 mm

Contexte

Les grands télescopes aujourd'hui

Aujourd'hui, plus de 20 « grands télescopes » dans le monde

Le diamètre élevé du miroir primaire permet :

- de collecter un grand nombre de photons → permet d'accéder à des cibles très peu lumineuses
- d'atteindre une résolution angulaire élevée :

$$R = \frac{\lambda}{D}$$

le diamètre D du miroir primaire est limité par des contraintes technologiques :

- ≈ 8 m en monolithique
- ≈ 10 m en segmenté (≈ 40 m en projet)



Subaru / Mauna Kea / \varnothing 8,3 m



GCT / île de La Palma / \varnothing 10,4 m

- réseau de télescopes
- combinaison cohérente des flux collectés
- création d'un système d'interférences (intercorrélation des champs)
- l'image est reconstruite (model fitting)
- résolution :

$$R = \frac{\lambda}{b}$$

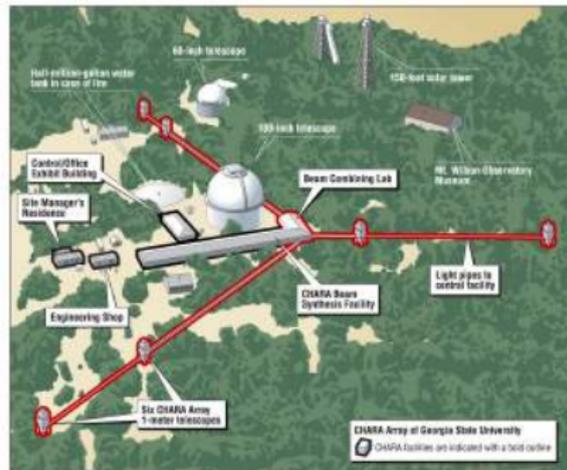
b : base (distance entre les télescopes)



- réseau de télescopes
- combinaison cohérente des flux collectés
- création d'un système d'interférences (intercorrélation des champs)
- l'image est reconstruite (model fitting)
- résolution :

$$R = \frac{\lambda}{b}$$

b : base (distance entre les télescopes)



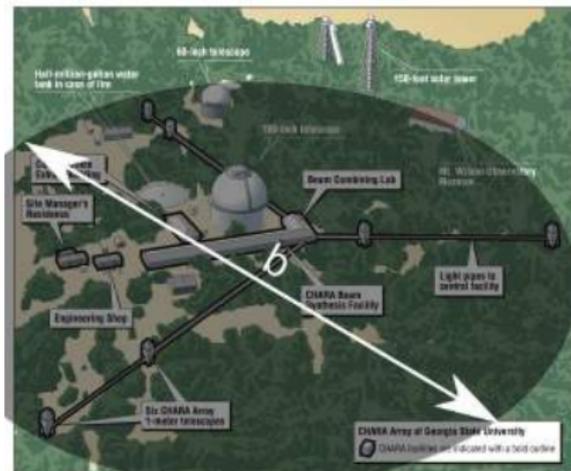
Contexte

Principe de l'imagerie haute résolution en astronomie

- réseau de télescopes
- combinaison cohérente des flux collectés
- création d'un système d'interférences (intercorrélation des champs)
- l'image est reconstruite (model fitting)
- résolution :

$$R = \frac{\lambda}{b}$$

b : base (distance entre les télescopes)

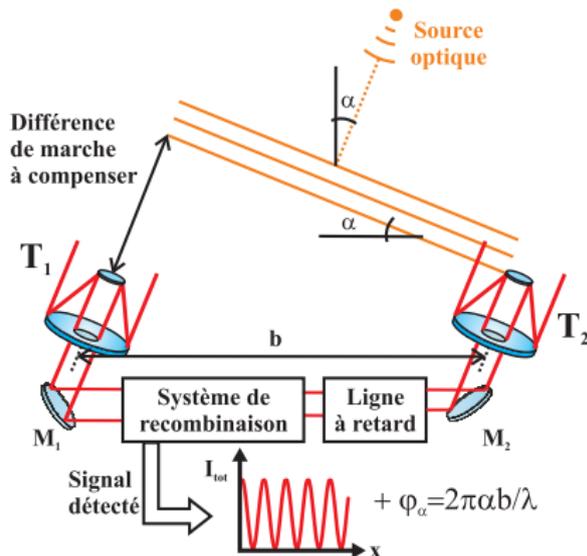


- Théorème de VAN CITTERT / ZERNIKE :

$$V(b) = \int O(\Omega) \exp\left(j2\pi \frac{b\Omega}{\lambda}\right) d\Omega$$

$V(b)$: fonction de visibilité complexe

$O(\Omega)$: distribution angulaire en intensité de l'objet



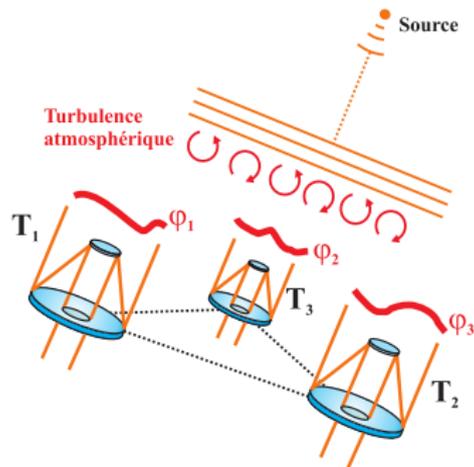
- Pour un couple de télescopes $T_i - T_j$: $V_{ij} = C_{ij} \exp(j\Phi_{ij})$
- Le spectre des fréquences spatiales (u,v) est échantillonné par plusieurs bases de télescopes
- une image approchée est reconstruite (algorithmes itératifs)

- effet de la turbulence atmosphérique : ajout d'un défaut de phase aléatoire :

$$V_{12} = C_{12} \exp j(\phi_{12} + \phi_2 - \phi_1)$$

$$V_{23} = C_{23} \exp j(\phi_{23} + \phi_3 - \phi_2)$$

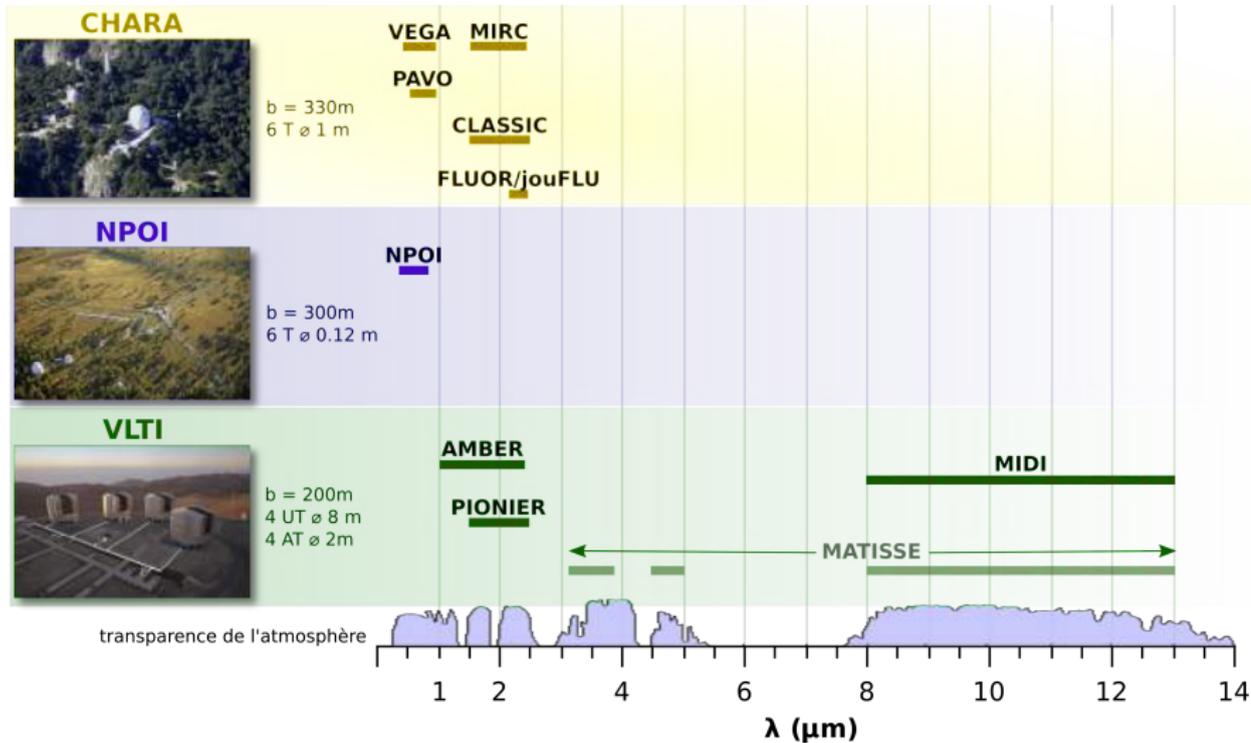
$$V_{31} = C_{31} \exp j(\phi_{31} + \phi_1 - \phi_3)$$



- Technique de clôture de phase (Jennison en 1958)
- Terme de clôture de phase : $\phi = \arg [V_{12} V_{23} V_{31}] = \phi_{12} + \phi_{23} + \phi_{31}$
- → insensible aux turbulences et vibrations

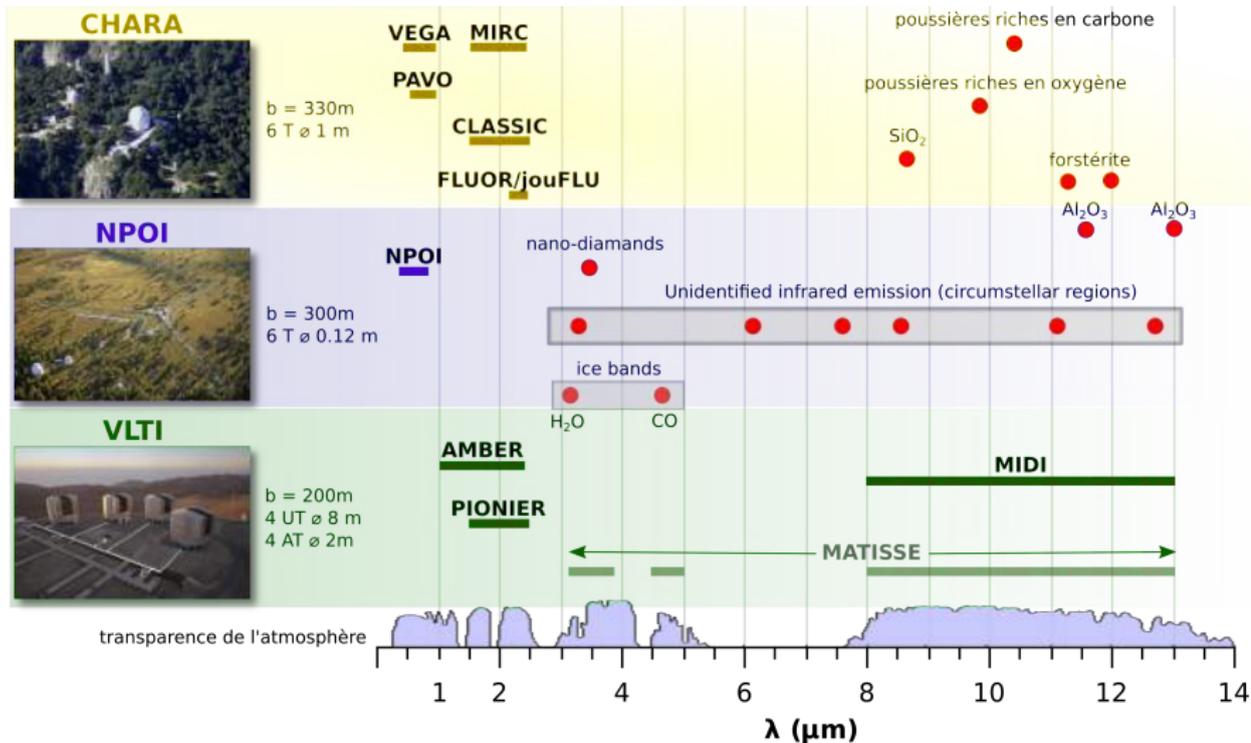
Contexte

Les grands interféromètres aujourd'hui



Contexte

Les grands interféromètres aujourd'hui



Difficultés technologiques de l'observation dans le MIR :

- absence de filtrage spatial efficace.
- rayonnement thermique du ciel,
- rayonnement thermique des miroirs,

Il est nécessaire d'utiliser :

- des systèmes cryogéniques complexes (4 K à 80 K),
- des capteurs complexes et coûteux.

Solution alternative :

- transposer le rayonnement vers les basses longueurs d'onde par un processus non-linéaire.

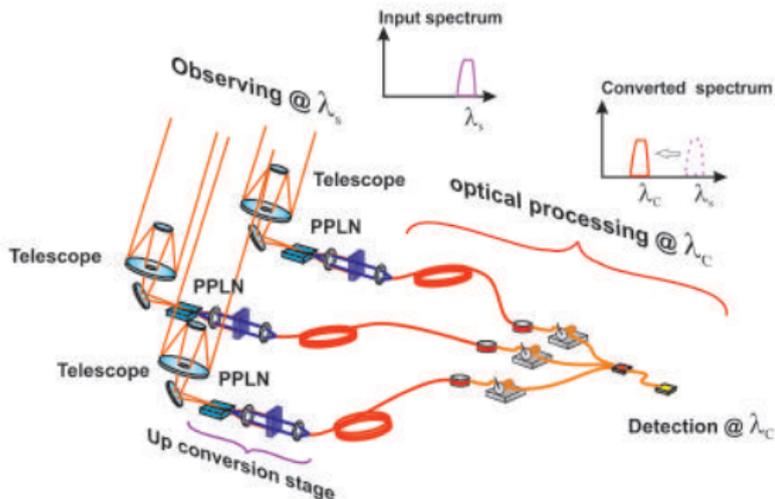
- 
- 1 Contexte de nos travaux de recherche
 - 2 Présentation du projet ALOHA**
 - 3 Validation en laboratoire
 - 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel
 - 5 Conclusion et perspectives

Présentation du projet ALOHA

Un nouveau concept d'imagerie haute résolution utilisant l'analyse de cohérence spatiale

ALOHA : Astronomical Light Optical Hybrid Analysis

- lumière astro. transposée vers le visible / proche infrarouge par somme de fréquence
- chaîne expérimentale optimisée : transmission, filtrage, mélange, détection (efficace, peu bruitée)

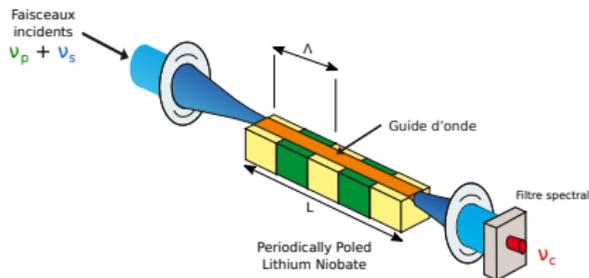


- utilisation d'optiques guidées (filtrage spatial, maintien de polarisation),
- détection des franges dans le domaine temporel.

C. Froehly, "Coherence and interferometry through optical fibers", in : Proceeding of the ESO Conference on "Scientific Importance of High Angular Resolution at Infrared and Optical Wavelengths.", Garching, pp. 285-293 (1981)

Présentation du projet ALOHA

Conversion par somme de fréquences



Somme de fréquence :

$$h\nu_p + h\nu_s = h\nu_c$$

Quasi-accord de phase

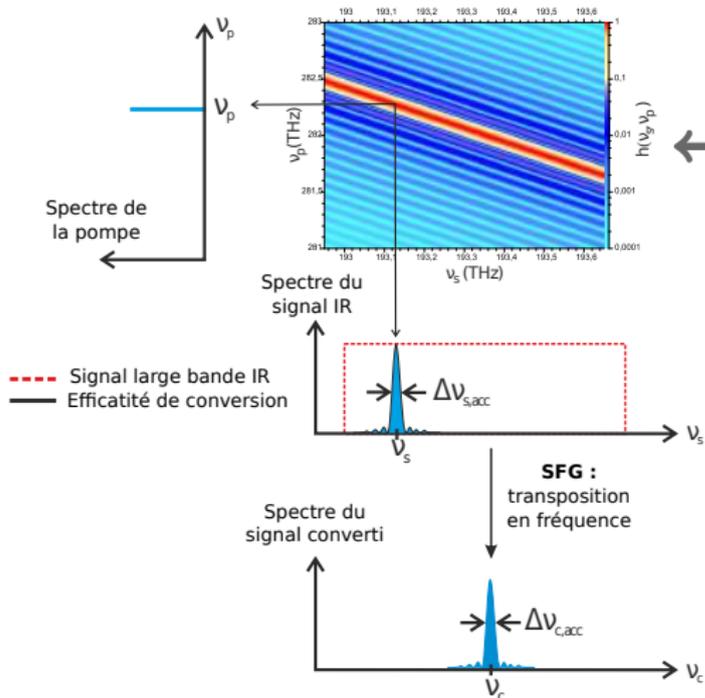
$$\Delta k = \frac{2\pi}{c} (n_s \cdot \nu_s + n_p \cdot \nu_p - n_c \cdot \nu_c - \frac{c}{\Lambda}) = 0$$

- utilisation d'un laser de pompe,
- phase de l'onde signal conservée lors de la conversion,
- processus intrinsèquement non bruité.

W. H. Louisell, A. Yariv, and A. E. Siegman, Phys. Rev. **124**, 1646 (1961)

Présentation du projet ALOHA

Conversion par somme de fréquences



- Efficacité de conversion :

$$\eta(v_s, v_p) = \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta kL}{2}\right)$$

- Acceptance spectrale définie par les propriétés de dispersion du matériau
- Fonctionnalité spectromètre (pouvoir de résolution élevé)

Objectif scientifique

développer de nouveaux instruments capables de transposer un rayonnement MIR vers le domaine du visible ou du proche IR

- utilisation de composants télécoms existants,
- et de détecteurs Silicium très performants.

Démarche expérimentale

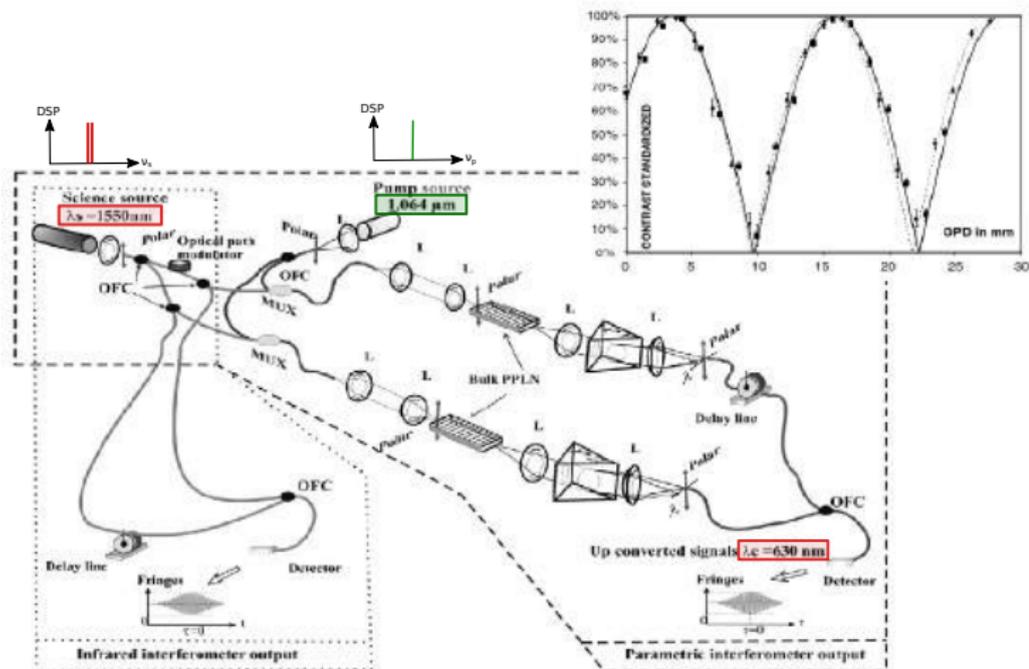
- Études de principe dans la bande H (1550 nm)
→ limite l'effort technologique,
- démonstration en laboratoire
- validation expérimentale sur le ciel.



- 1 Contexte de nos travaux de recherche
- 2 Présentation du projet ALOHA
- 3 Validation en laboratoire**
- 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel
- 5 Conclusion et perspectives

Validation en laboratoire

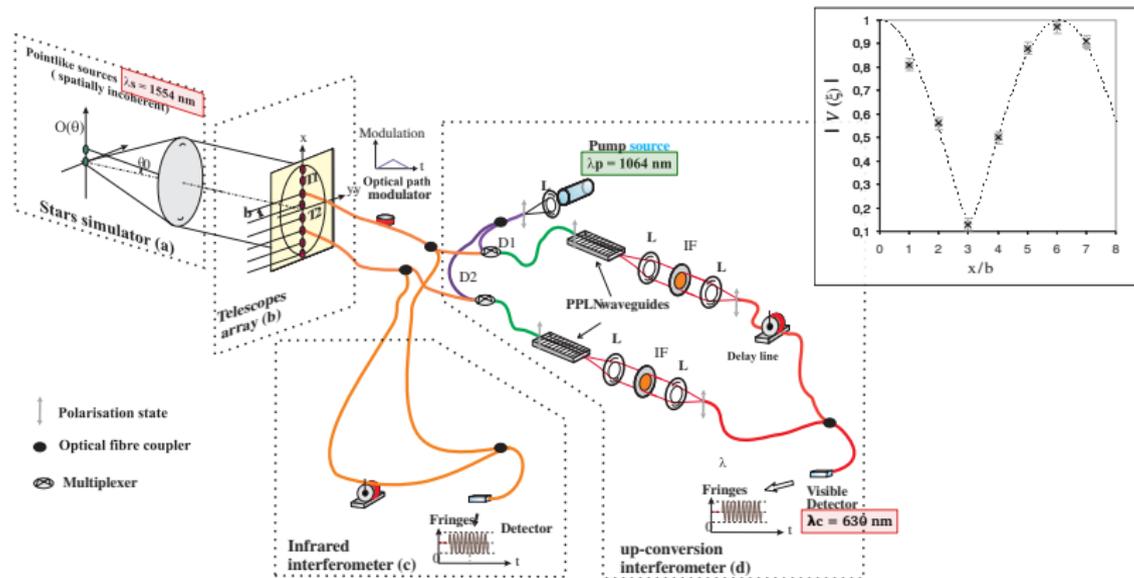
Conservation de la cohérence temporelle : mesure du contraste



L. Del Rio, M. Ribiere, L. Delage & F. Reynaud. "First demonstration of a temporal coherence analysis through a parametric interferometer." Optics Communications, vol. 281, no. 10, pages 2722-2726, (2008)

Validation en laboratoire

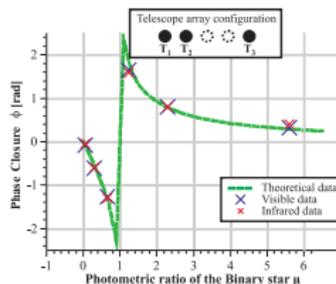
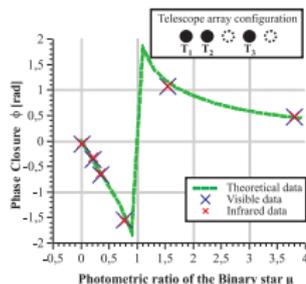
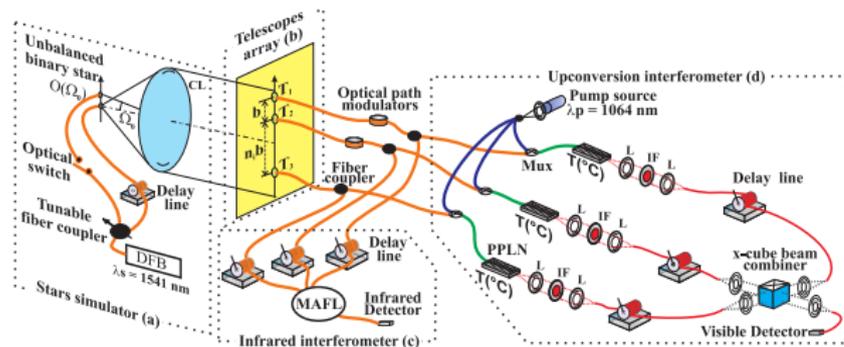
Conservation de la cohérence spatiale : mesure de contraste



S. Brustlein et. al. "Laboratory Demonstration of an Infrared-to-Visible Up-Conversion Interferometer for Spatial Coherence Analysis." Phys. Rev. Lett., vol. 100, no. 15, page 153903, (2008)

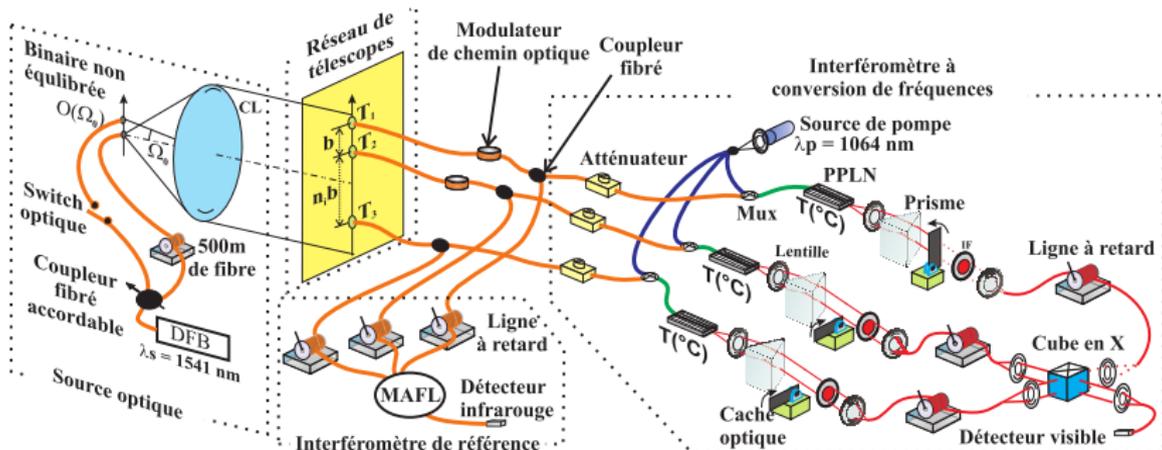
Validation en laboratoire

Conservation de la cohérence spatiale : mesure de la clôture de phase



Ceus et. al. "Phase closure retrieval in an infrared-to-visible upconversion interferometer for high resolution astronomical imaging.", *Optics Express* 19, 8616, (2011)

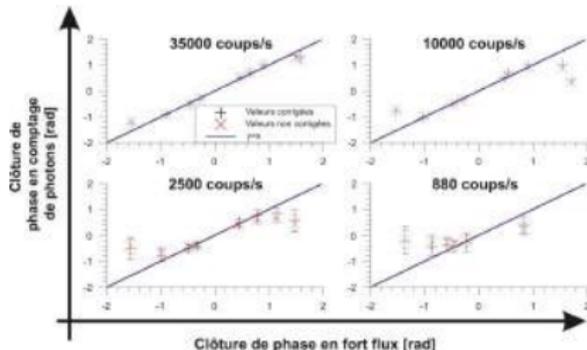
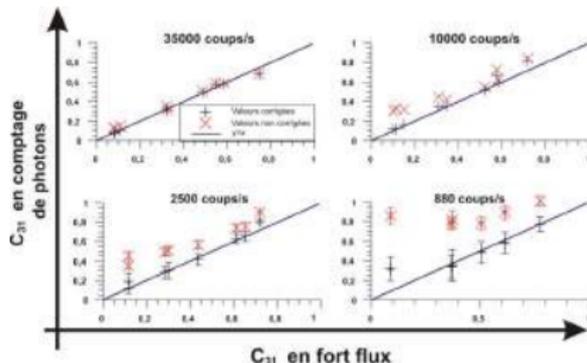
Montage expérimental



■ bruit de photon corrigé par la méthode de Wirnitzer

B. Wirnitzer, "Bispectral analysis at low light levels and astronomical speckle masking.", JOSA A 2, 14 (1985).

Résultats expérimentaux



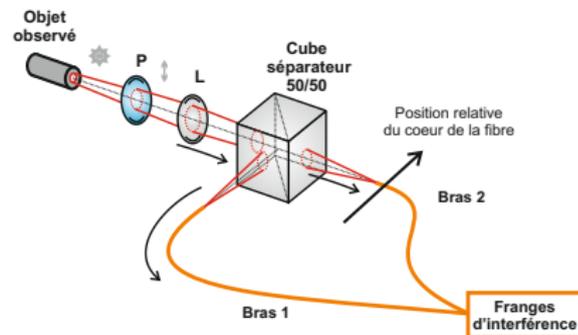
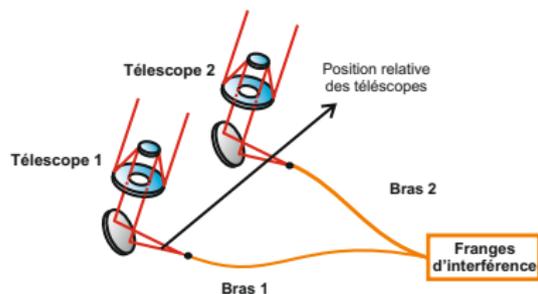
→ **Interféromètre à conversion de fréquence compatible avec le régime de comptage de photons**

Ceus et. al. "Contrast and phase closure acquisitions in photon counting regime using a frequency upconversion interferometer for high angular resolution imaging." MNRAS, 430, 1529-1537, (2013)

Objectif

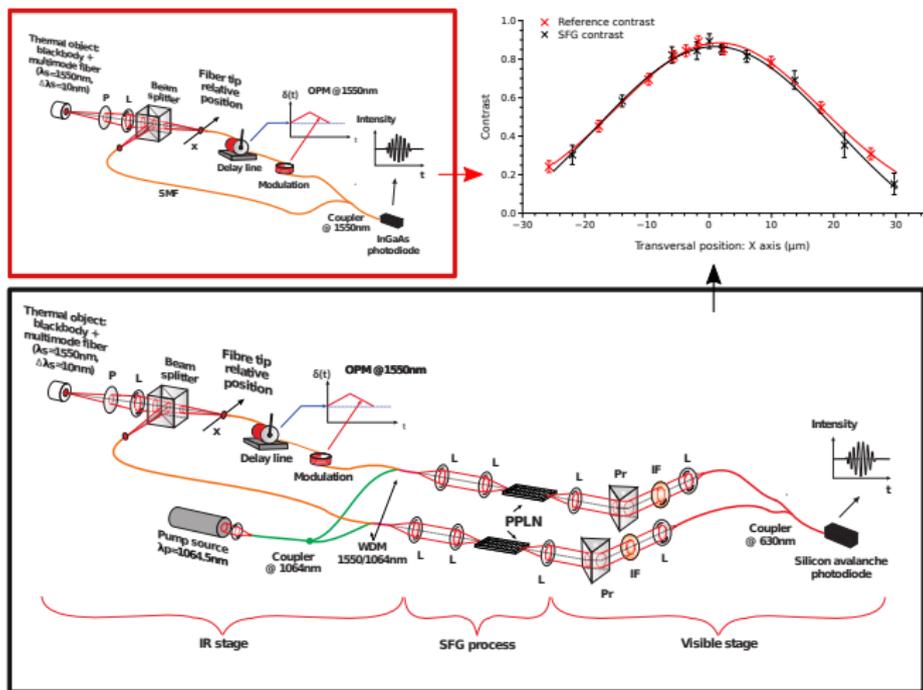
Analyser la cohérence spatiale d'une source thermique (corps noir) avec l'interféromètre à somme de fréquences

Méthode



Validation en laboratoire

Analyse de la cohérence spatiale d'un corps noir



J.-T. Gomes et. al. "Laboratory Demonstration of Spatial-Coherence Analysis of a Blackbody through an Up-Conversion Interferometer." Phys. Rev. Lett. 112, 143904 (2014)

- 1 Contexte de nos travaux de recherche
- 2 Présentation du projet ALOHA
- 3 Validation en laboratoire
- 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel**
- 5 Conclusion et perspectives

Objectif

Convertir le flux issu d'étoiles sur site

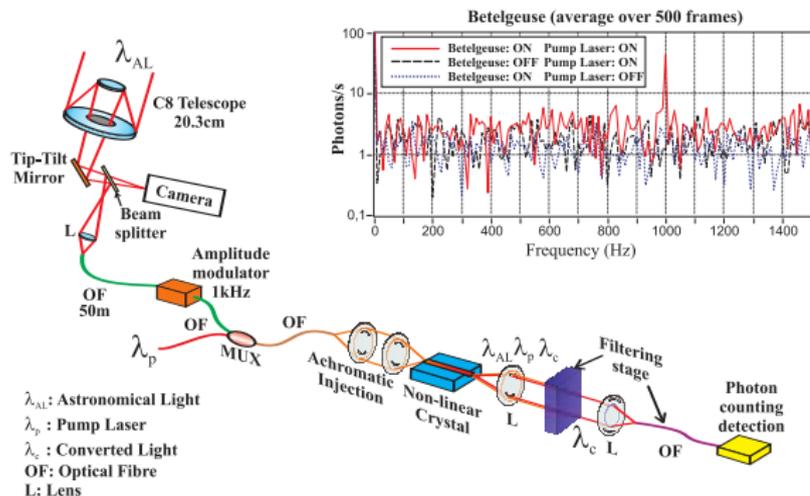
Contexte

- test en photométrie sur un seul bras de l'interféromètre
- bande H (1550 nm)
- Télescope C8
- Bonnes conditions atmosphériques



Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel

Mission 2012 au CFHT



Betelgeuse : Hmag = -3.9
Antares : Hmag = -3.6
Pollux : Hmag = -0.9

- bande spectrale convertie : 0,3 nm,
- validation sur le ciel de la sensibilité d'un bras de l'interféromètre,
- à faire : tests en sensibilité sur un véritable réseau de télescopes.

D. Ceus et. al. "Application of frequency conversion of starlight to high-resolution imaging interferometry. On-sky sensitivity test of a single arm of the interferometer.", MNRAS Letters 427, L95-L98. (2012)

Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel

Missions 2013 / 2014 sur le réseau de télescopes CHARA (observatoire du Mont Wilson)

- Collaboration avec l'Université de Géorgie (USA) / LESIA (Obs. Paris Meudon)
- Utilisation du réseau de télescopes CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy)



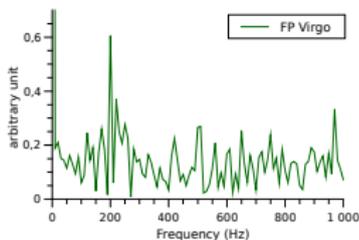
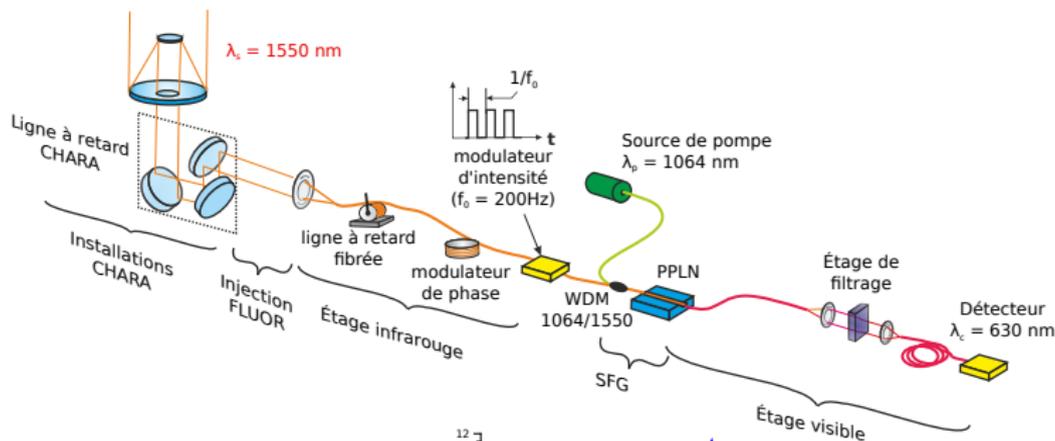
Objectifs

- tests en sensibilité sur un seul bras de l'interféromètre (mode photométrique, utilisation de l'instrument FLUOR)
- calibrer nos simulations numériques (en vue d'une implémentation sur le réseau de télescopes CHARA en mode interférométrique)

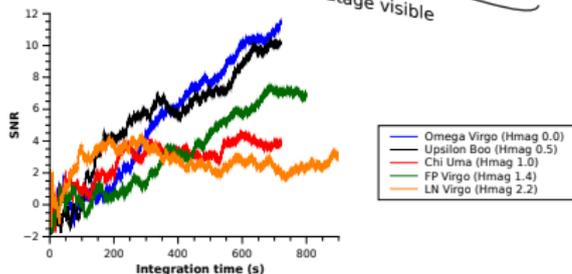


Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel

Missions 2013 / 2014 sur le réseau de télescopes CHARA (observatoire du Mont Wilson)



Spectre du signal



Rapport signal sur bruit

soumis à publication dans MNRAS



- 1 Contexte de nos travaux de recherche
- 2 Présentation du projet ALOHA
- 3 Validation en laboratoire
- 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel
- 5 Conclusion et perspectives**

ALOHA

- nouvel instrument pour l'imagerie haute résolution
- utilise la somme de fréquence pour transposer le rayonnement du MIR vers le visible ou proche IR

Démonstrations en laboratoire

- conservation de la cohérence temporelle et spatiale
- compatible avec la technique de clôture de phase
- compatible avec le régime de comptage de photons

Démonstrations sur le CIEL

- tests photométriques à 1550 nm avec un C8, puis sur CHARA
- sensibilité suffisante pour envisager l'obtention de franges en mode interférométrique

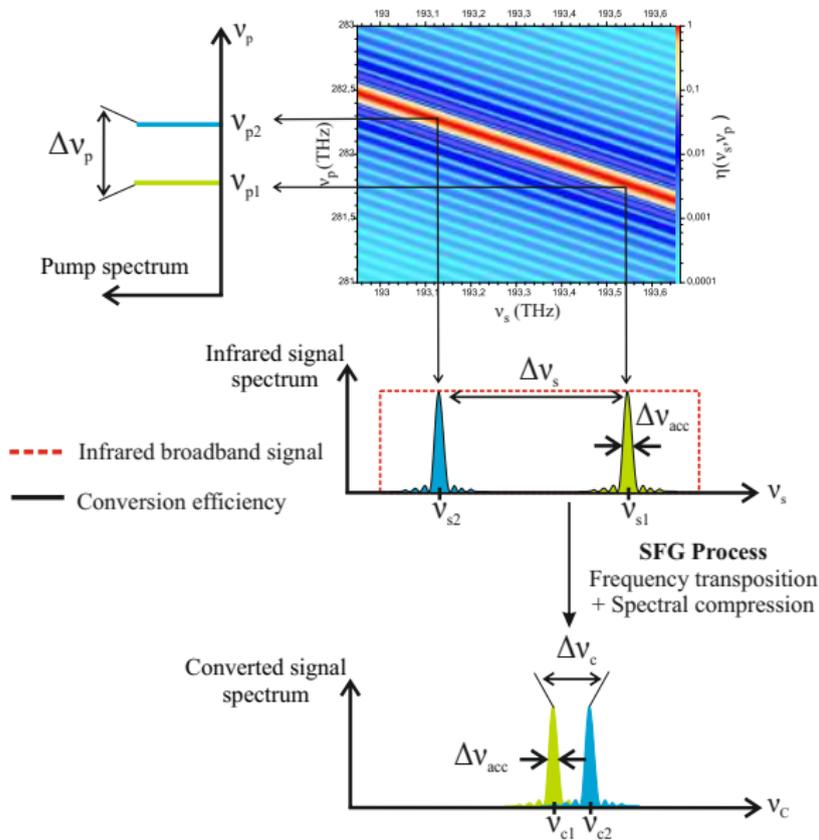
Sur site

- Franges d'interférences avec ALOHA sur le réseau CHARA,

En laboratoire

- augmentation de la sensibilité de l'instrument en utilisant une pompe en peigne de fréquences
 - échantillonnage spectral de la source à analyser
 - élargissement de la bande spectrale convertie
- montée en longueur d'onde : conversion d'un signal infrarouge à $3.4 \mu\text{m}$
 - source laser (HeNe)
 - puis corps noir (comptage de photons)
- recherche de nouveaux cristaux non linéaires permettant la conversion d'un flux autour de $10 \mu\text{m}$ (bande N)

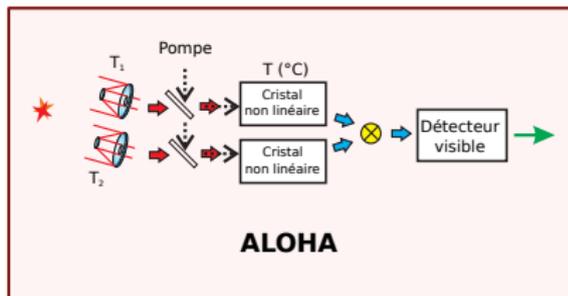
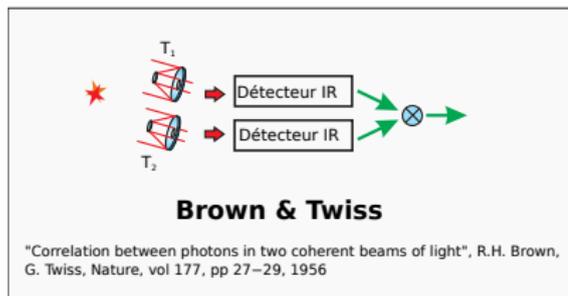
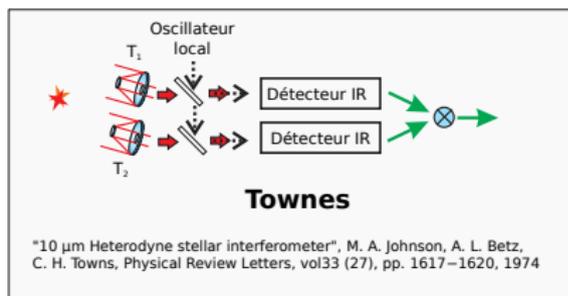
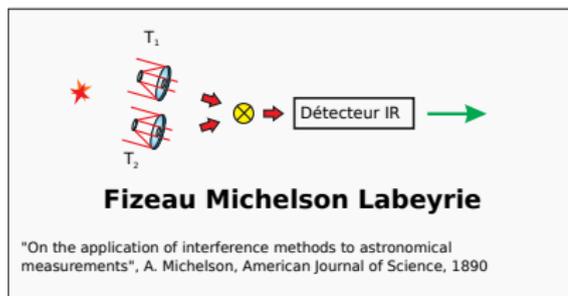




- échantillonnage spectral
- compression spectrale en fréquence
- modification des propriétés de cohérence temporelle
- publication soumise à Optics Express

Présentation du projet ALOHA

Un nouveau concept d'imagerie haute résolution utilisant l'analyse de cohérence spatiale



- ➡ Signal optique IR
- ➡ Signal optique visible
- ➡ Signal électrique
- ★ Source optique à l'infini
- ⊗ Corrélateur électrique
- ⊗ Mélange interférométrique