

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

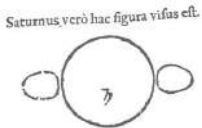
Contexte de nos travaux de recherche

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



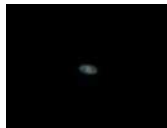
Saturne
dessinée
par Galilée
(1609)



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

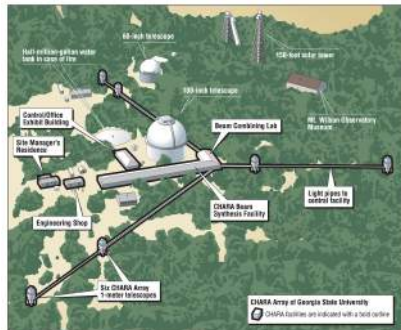


GCT / île de La Palma / \varnothing 10,4 m

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

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

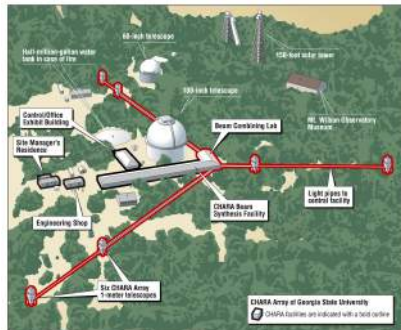
b : base (distance entre les télescopes)



- 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)



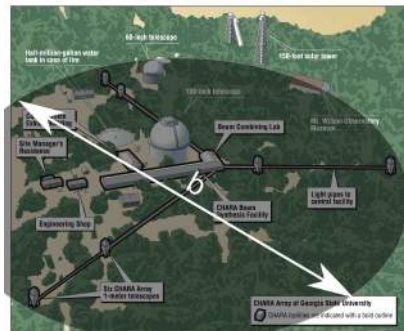
Contexte

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)

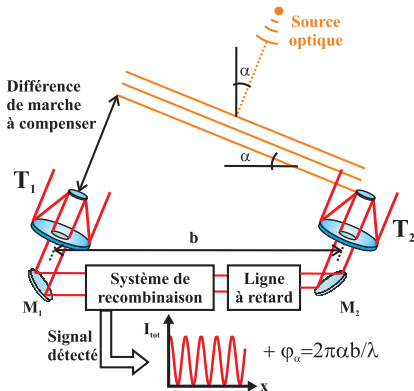


- Théorème de VAN CITTERT / ZERNIKE :

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

$V(b)$: fonction de visibilité complexe

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



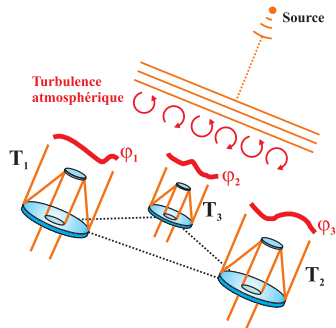
- Pour un couple de télescopes $T_i - T_j$: $V_{ij} = C_{ij} \exp(j\Phi_{ij})$
- Le spectre des fréquences spatiales (u, v) est échantillonné par plusieurs bases de télescopes
- une image approchée est reconstruite (algorithmes itératifs)

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

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

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

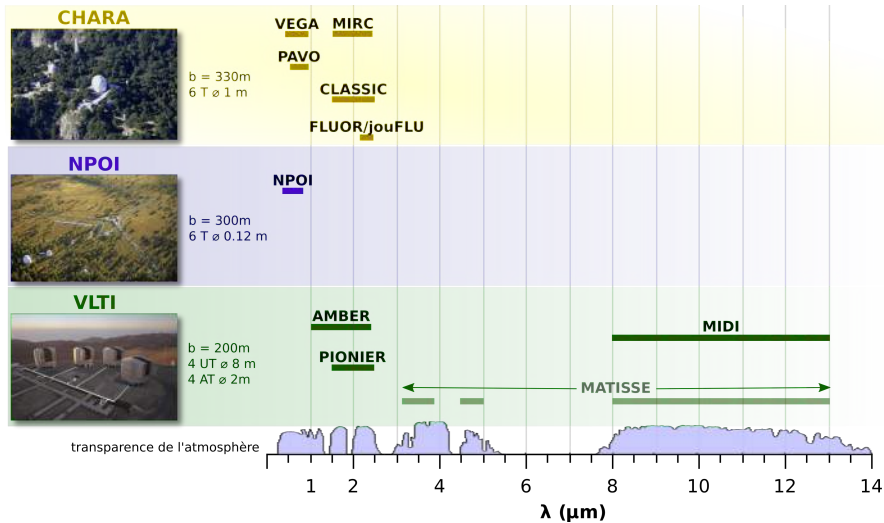
$$V_{31} = C_{31} \exp j(\phi_{31} + \phi_1 - \phi_3)$$



- 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

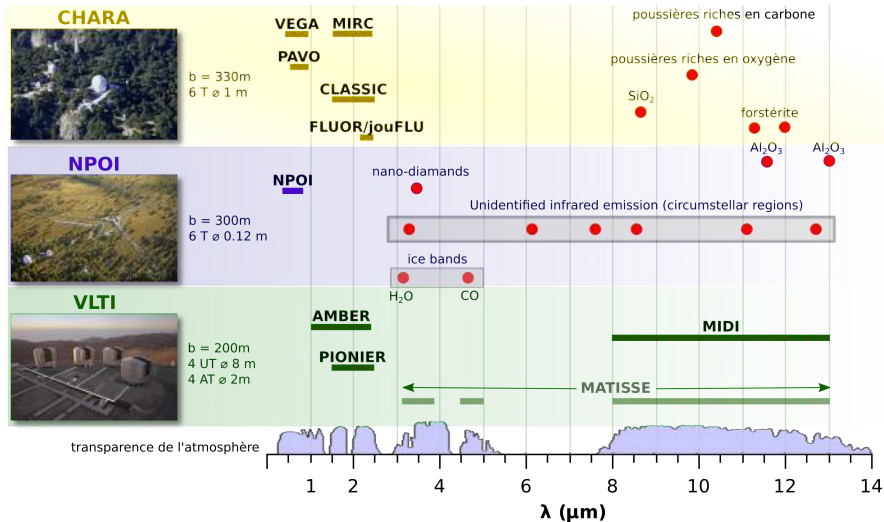
Contexte

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.

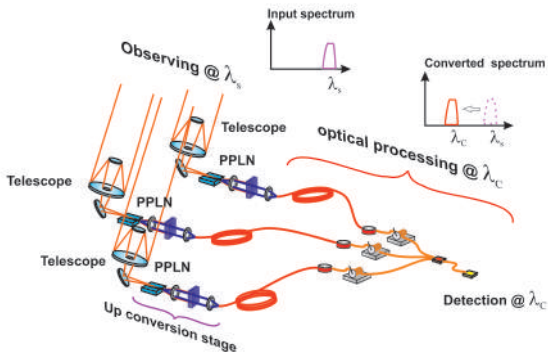
- 
- 1 Contexte de nos travaux de recherche
 - 2 Présentation du projet ALOHA**
 - 3 Validation en laboratoire
 - 4 Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel
 - 5 Conclusion et perspectives

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)

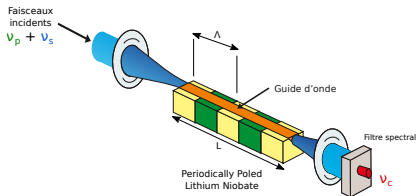


- utilisation d'optiques guidées (filtrage spatial, maintien de polarisation),
- détection des franges dans le domaine temporel.

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

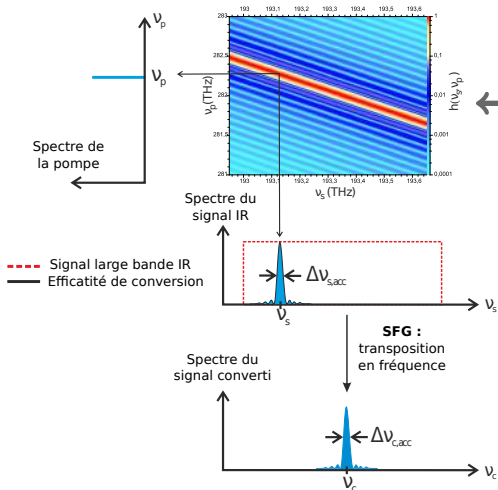
$$\Delta k = \frac{2\pi}{c} (n_s \cdot \nu_s + n_p \cdot \nu_p - n_c \cdot \nu_c - \frac{c}{\Lambda}) = 0$$

- 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

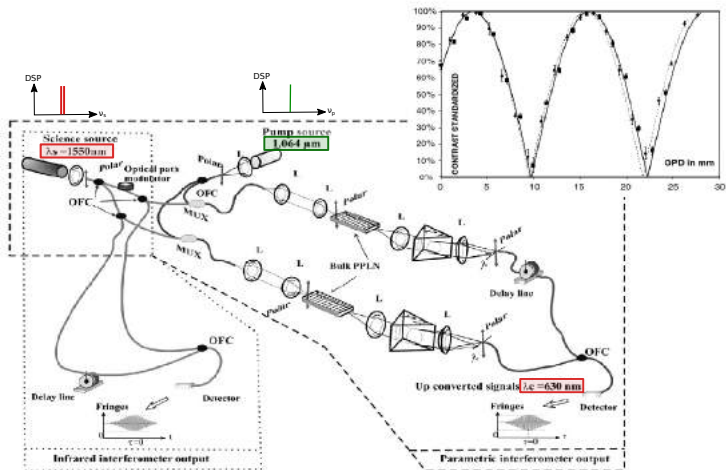
- Études de principe dans la bande H (1550 nm)
→ limite l'effort technologique,
- démonstration en laboratoire
- validation expérimentale sur le ciel.



- 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

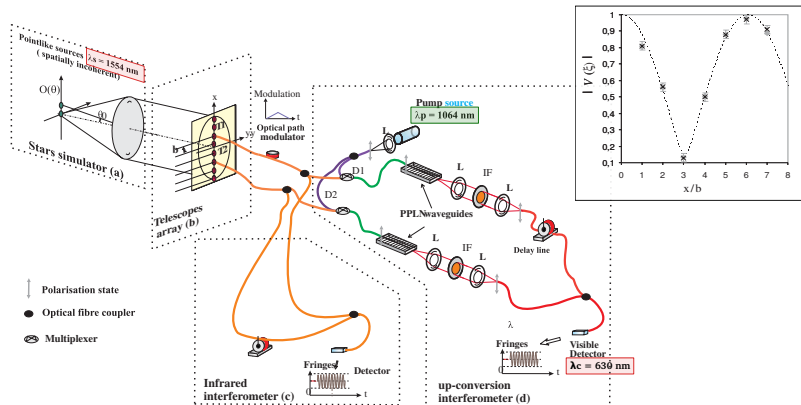
Conservation de la cohérence temporelle : mesure du contraste



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

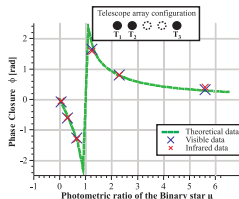
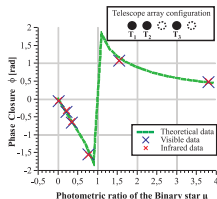
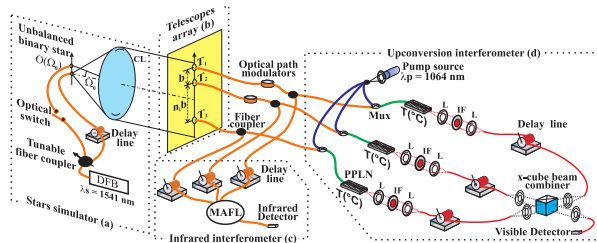
Conservation de la cohérence spatiale : mesure de contraste



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)

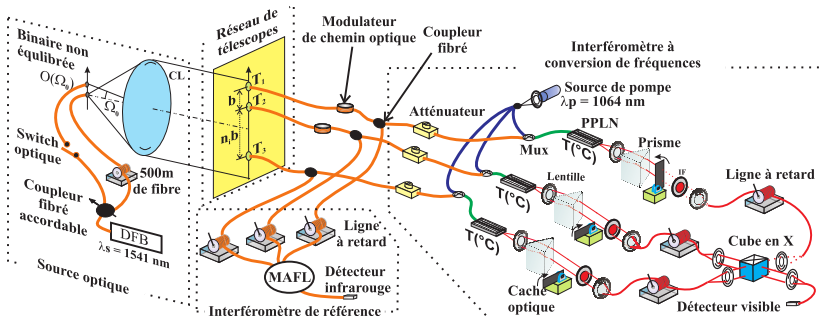
Validation en laboratoire

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)

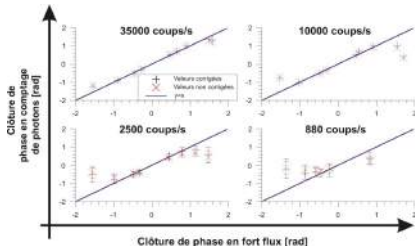
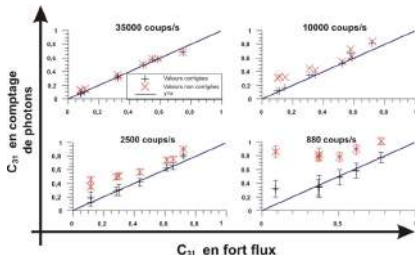
Montage expérimental



■ 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



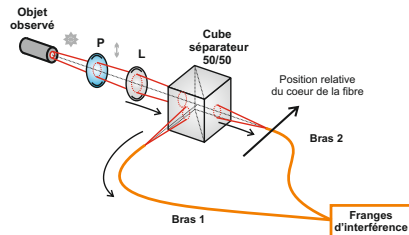
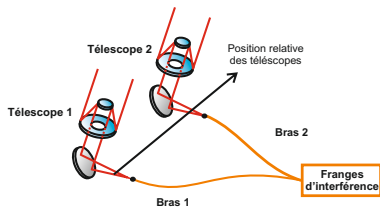
→ **Interféromètre à conversion de fréquence compatible avec le régime de comptage de photons**

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

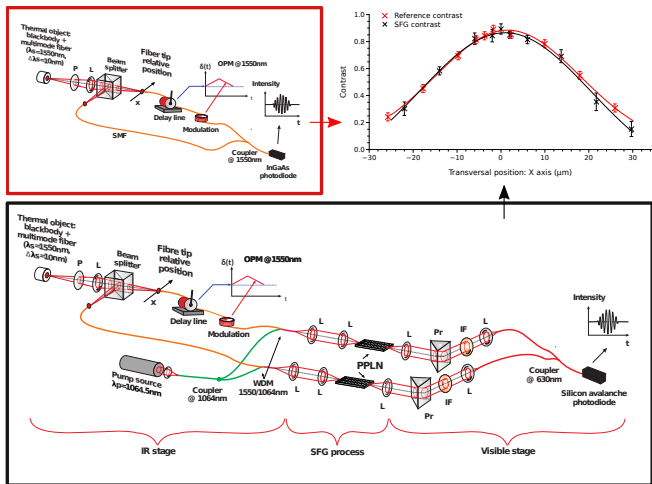
Analyser la cohérence spatiale d'une source thermique (corps noir) avec l'interféromètre à somme de fréquences

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

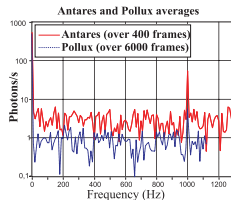
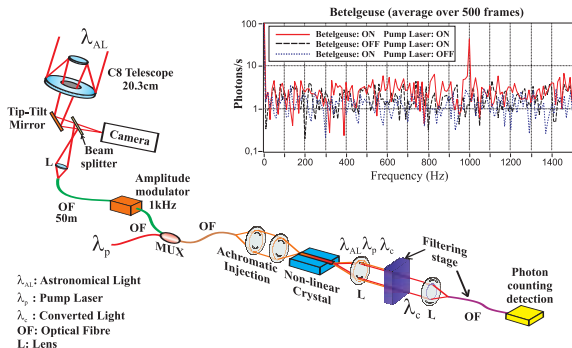
Contexte

- 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)



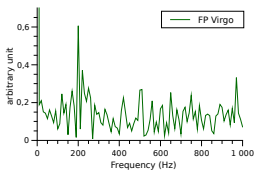
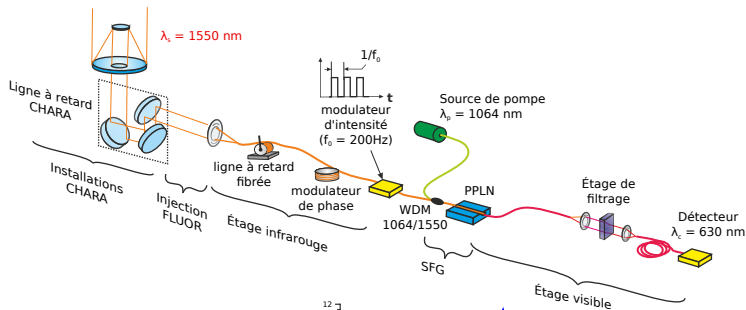
Objectifs

- 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)

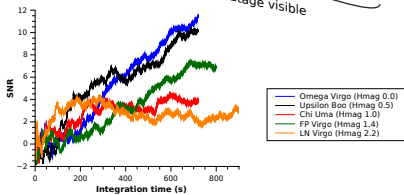


Résultats expérimentaux obtenus sur le ciel

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

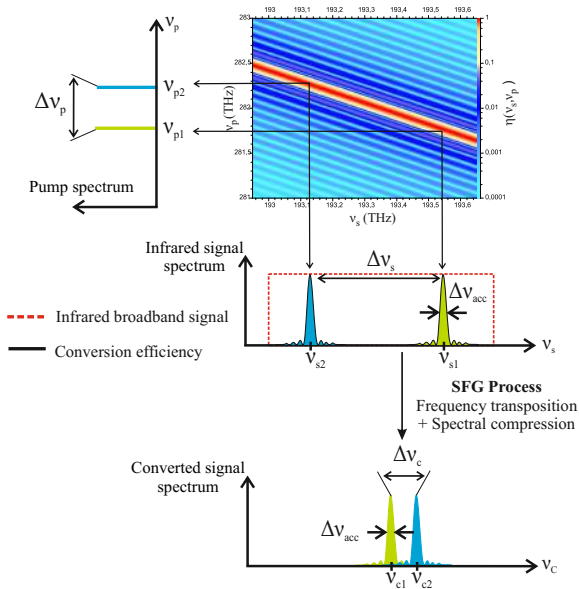
Sur site

- 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)

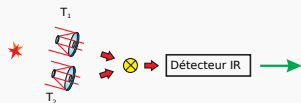




- échantillonnage spectral
- compression spectrale en fréquence
- modification des propriétés de cohérence temporelle
- publication soumise à Optics Express

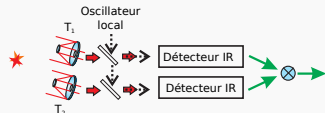
Présentation du projet ALOHA

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



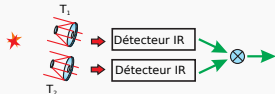
Fizeau Michelson Labeyrie

"On the application of interference methods to astronomical measurements", A. Michelson, American Journal of Science, 1890



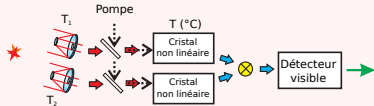
Townes

"10 μm Heterodyne stellar interferometer", M. A. Johnson, A. L. Betz, C. H. Towns, Physical Review Letters, vol33 (27), pp. 1617–1620, 1974



Brown & Twiss

"Correlation between photons in two coherent beams of light", R.H. Brown, G. Twiss, Nature, vol 177, pp 27–29, 1956



ALOHA

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