

# Problèmes inverses en imagerie astronomique

Jean-Baptiste Courbot

IRIMAS, Université de Haute-Alsace, Mulhouse

[jean-baptiste.courbot@uha.fr](mailto:jean-baptiste.courbot@uha.fr)

# Sommaire

## 1 Introduction aux problèmes inverses

## 2 Détection

Détection de galaxies

Détection de halos

Détection d'ondes gravitationnelles

## 3 Déconvolution

Un télescope au sol

En radio-astronomie

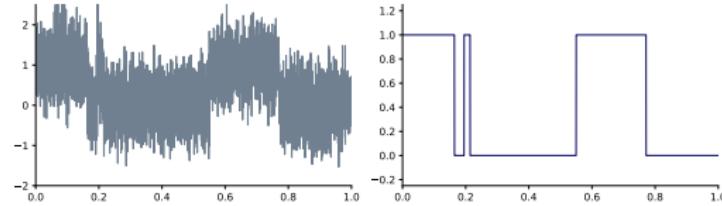
En microscopie

## 4 Pour conclure

# Le traitement du signal et des images

Le traitement du signal :

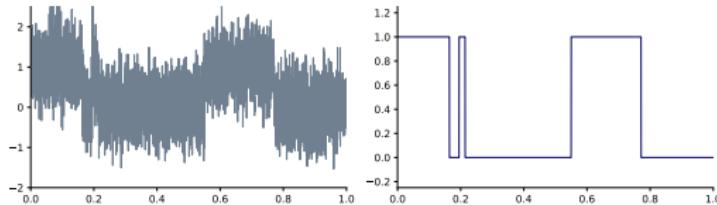
- ▶ Une discipline relativement récente (depuis 1950)
- ▶ Originellement, « ce qui permet de séparer un message du bruit qui le dégrade »



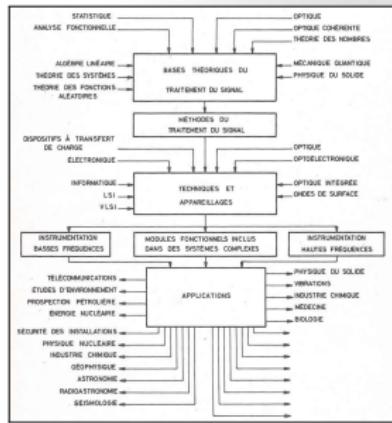
# Le traitement du signal et des images

## Le traitement du signal :

- ▶ Une discipline relativement récente (depuis 1950)
- ▶ Originellement, « ce qui permet de séparer un message du bruit qui le dégrade »



- ▶ Plus généralement : les outils permettant d'extraire une information utile de données
- ▶ Interaction avec de nombreuses autres disciplines



# Le traitement du signal et des images

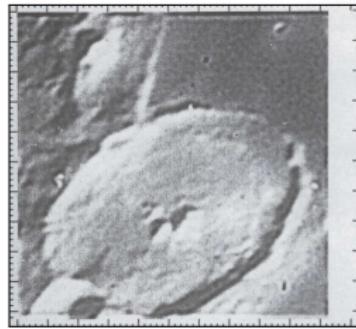
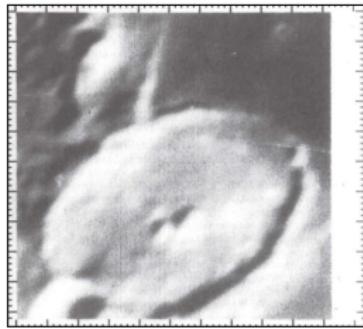
Le traitement d'images :

- ▶ Plus récent, lié aux développements numériques (depuis 1970)
- ▶ Problèmes d'amélioration d'images de mauvaise qualité
- ▶ Gain en popularité avec les outils de *machine* et *deep learning*

# Le traitement du signal et des images

Le traitement d'images :

- ▶ Plus récent, lié aux développements numériques (depuis 1970)
- ▶ Problèmes d'amélioration d'images de mauvaise qualité
- ▶ Gain en popularité avec les outils de *machine* et *deep learning*



A. Rosenfeld & A.C. Kak, Digital picture processing, 1982 / d'après D. O'Handley & W. Green, Recent developments in digital image processing, 1972

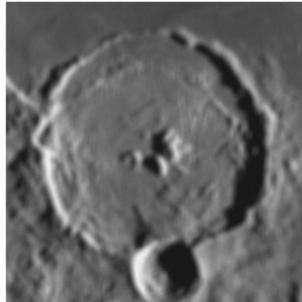
# Introduction aux problèmes inverses

- ▶ De manière générale : recherche d'information dans des données.
- ▶ Problème : en général la solution n'est pas unique.
- ▶ Autrement dit, trouver *une* solution est facile, trouver *la* solution ne l'est pas.

# Introduction aux problèmes inverses

- ▶ De manière générale : recherche d'information dans des données.
- ▶ Problème : en général la solution n'est pas unique.
- ▶ Autrement dit, trouver *une* solution est facile, trouver *la* solution ne l'est pas.

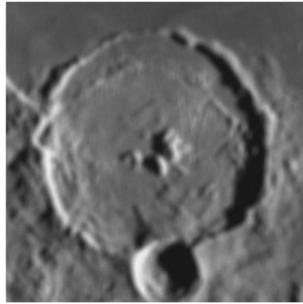
Observation :



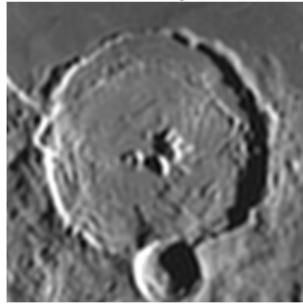
# Introduction aux problèmes inverses

- ▶ De manière générale : recherche d'information dans des données.
- ▶ Problème : en général la solution n'est pas unique.
- ▶ Autrement dit, trouver *une* solution est facile, trouver *la* solution ne l'est pas.

Observation :



Solutions possibles :



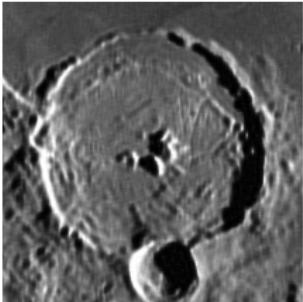
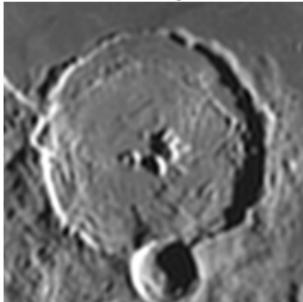
# Introduction aux problèmes inverses

- ▶ De manière générale : recherche d'information dans des données.
- ▶ Problème : en général la solution n'est pas unique.
- ▶ Autrement dit, trouver *une* solution est facile, trouver *la* solution ne l'est pas.

Observation :



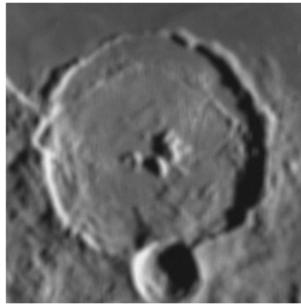
Solutions possibles :



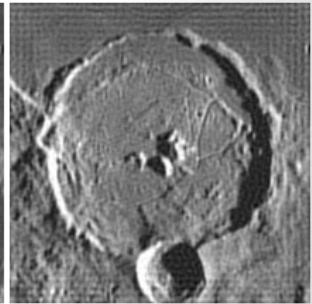
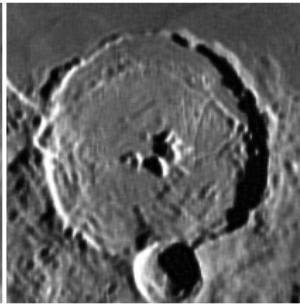
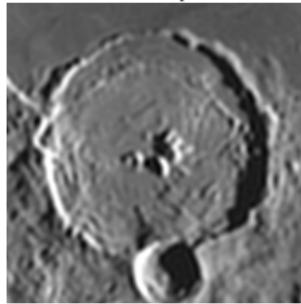
# Introduction aux problèmes inverses

- ▶ De manière générale : recherche d'information dans des données.
- ▶ Problème : en général la solution n'est pas unique.
- ▶ Autrement dit, trouver *une* solution est facile, trouver *la* solution ne l'est pas.

Observation :



Solutions possibles :



---

Cratère Gassendi, Lunar Reconnaissance Orbiter. NASA.

# Pourquoi des problèmes « inverses » ?

- ▶ Le processus de formation d'image est en général connu :  
$$\text{image} = \text{donnée recherchée} + \text{dégradation}$$
- ▶ On parle de formulation *directe*
- ▶ Le problème *inverse* est celui de la restitution des données recherchées

# Pourquoi des problèmes « inverses » ?

- Le processus de formation d'image est en général connu :

$$\text{image} = \text{donnée recherchée} + \text{dégradation}$$

- On parle de formulation *directe*
- Le problème *inverse* est celui de la restitution des données recherchées

Le plus souvent, les problèmes concernent :

- le flou : un point « bave » sur ses voisins

# Pourquoi des problèmes « inverses » ?

- Le processus de formation d'image est en général connu :

$$\text{image} = \text{donnée recherchée} + \text{dégradation}$$

- On parle de formulation *directe*
- Le problème *inverse* est celui de la restitution des données recherchées

Le plus souvent, les problèmes concernent :

- le flou : un point « bave » sur ses voisins
- le bruit : dégradations aléatoires

# Pourquoi des problèmes « inverses » ?

- Le processus de formation d'image est en général connu :

$$\text{image} = \text{donnée recherchée} + \text{dégradation}$$

- On parle de formulation *directe*
- Le problème *inverse* est celui de la restitution des données recherchées

Le plus souvent, les problèmes concernent :

- le flou : un point « bave » sur ses voisins
- le bruit : dégradations aléatoires



# Pourquoi des problèmes « inverses » ?

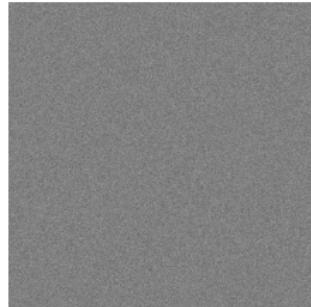
- Le processus de formation d'image est en général connu :

$$\text{image} = \text{donnée recherchée} + \text{dégradation}$$

- On parle de formulation *directe*
- Le problème *inverse* est celui de la restitution des données recherchées

Le plus souvent, les problèmes concernent :

- le flou : un point « bave » sur ses voisins
- le bruit : dégradations aléatoires



# Pourquoi des problèmes « inverses » ?

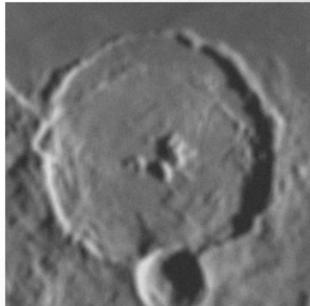
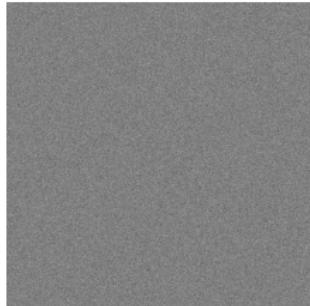
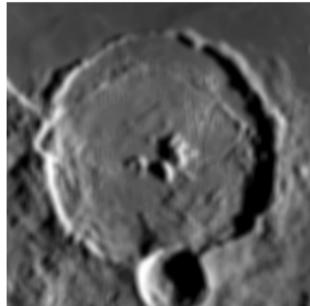
- Le processus de formation d'image est en général connu :

$$\text{image} = \text{donnée recherchée} + \text{dégradation}$$

- On parle de formulation *directe*
- Le problème *inverse* est celui de la restitution des données recherchées

Le plus souvent, les problèmes concernent :

- le flou : un point « bave » sur ses voisins
- le bruit : dégradations aléatoires



# Introduction aux problèmes inverses

Les problèmes inverses sont mathématiquement difficiles à résoudre.

Les ingrédients pour ce faire sont :

- ▶ quel est le lien direct entre l'observation et ce qui est recherché ?
  - ▶ quel est la forme attendue pour la solution ?
- Les outils de résolution font souvent un compromis entre ces deux termes.

# Introduction aux problèmes inverses

Les problèmes inverses sont mathématiquement difficiles à résoudre.

Les ingrédients pour ce faire sont :

- ▶ quel est le lien direct entre l'observation et ce qui est recherché ?
  - ▶ quel est la forme attendue pour la solution ?
- Les outils de résolution font souvent un compromis entre ces deux termes.

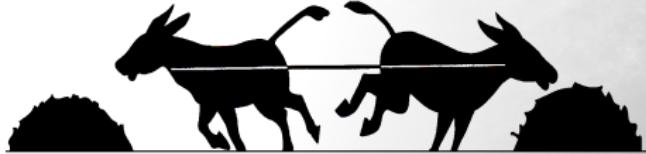


# Introduction aux problèmes inverses

Les problèmes inverses sont mathématiquement difficiles à résoudre.

Les ingrédients pour ce faire sont :

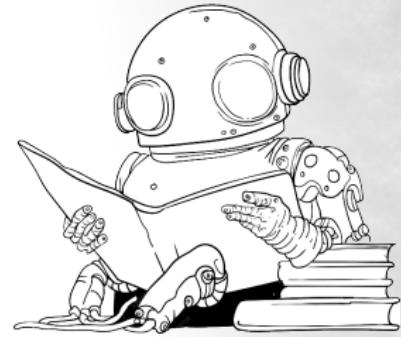
- ▶ quel est le lien direct entre l'observation et ce qui est recherché ?
  - ▶ quel est la forme attendue pour la solution ?
- Les outils de résolution font souvent un compromis entre ces deux termes.



# Et l'intelligence artificielle ?

Quel lien avec l'IA ?

- ▶ L'immense majorité des outils d'IA apprennent des correspondance observation ↔ cible
- ▶ Pour cela, ils nécessitent un grand nombre d'exemples
- ▶ L'IA est *supervisée*



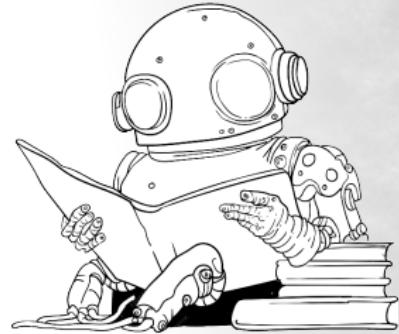
# Et l'intelligence artificielle ?

Quel lien avec l'IA ?

- ▶ L'immense majorité des outils d'IA apprennent des correspondance observation ↔ cible
- ▶ Pour cela, ils nécessitent un grand nombre d'exemples
- ▶ L'IA est *supervisée*

... ce qui n'est pas adapté pour :

- ▶ Observer des objets inconnus
- ▶ Travailler avec une instrumentation spécifique



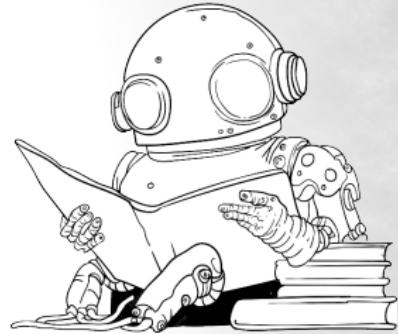
# Et l'intelligence artificielle ?

Quel lien avec l'IA ?

- ▶ L'immense majorité des outils d'IA apprennent des correspondance observation ↔ cible
- ▶ Pour cela, ils nécessitent un grand nombre d'exemples
- ▶ L'IA est *supervisée*

... ce qui n'est pas adapté pour :

- ▶ Observer des objets inconnus
- ▶ Travailler avec une instrumentation spécifique
- ▶ Fournir des solutions explicables



# Dans cette présentation

La présentation portera sur deux types de problèmes :

1. la détection d'objets célestes
2. la déconvolution d'images du ciel (« défloutage »)

# Dans cette présentation

La présentation portera sur deux types de problèmes :

1. la détection d'objets célestes
2. la déconvolution d'images du ciel (« défloutage »)

Les ingrédients sous-jacents seront...

- ▶ Mathématiques et statistiques
- ▶ Informatiques
- ▶ Optiques
- ▶ Astronomiques



# Sommaire

- ① Introduction aux problèmes inverses
- ② Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- ③ Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- ④ Pour conclure

# Sommaire

1 Introduction aux problèmes inverses

2 Détection

Détection de galaxies

Détection de halos

Détection d'ondes gravitationnelles

3 Déconvolution

Un télescope au sol

En radio-astronomie

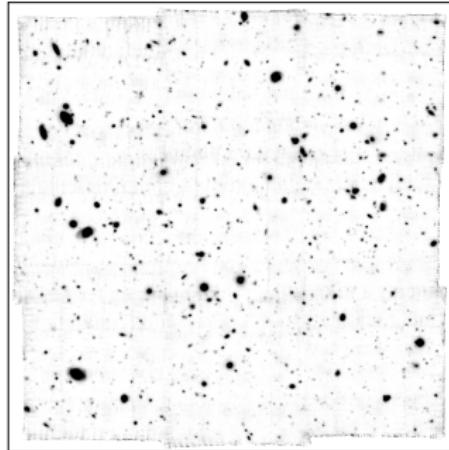
En microscopie

4 Pour conclure

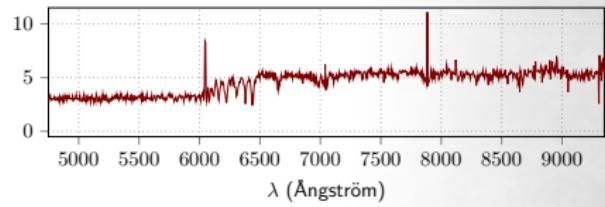
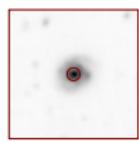
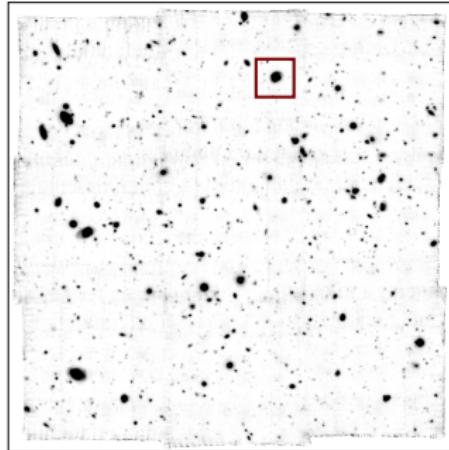
# Détection de galaxies : l'instrument MUSE



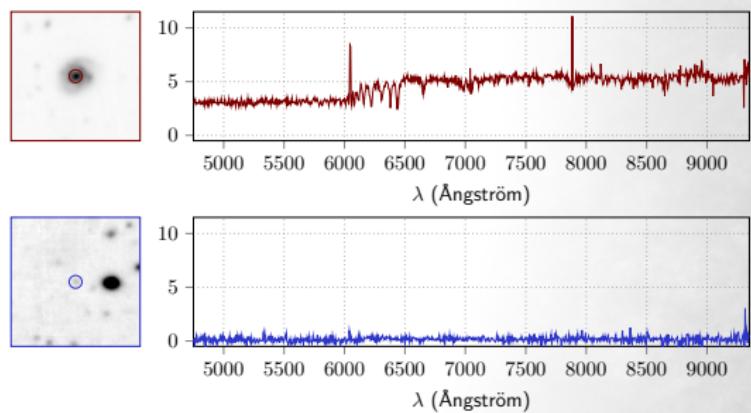
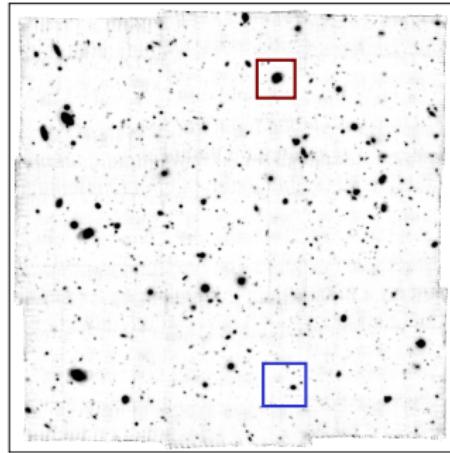
# Détection de galaxies : l'instrument MUSE



# Détection de galaxies : l'instrument MUSE



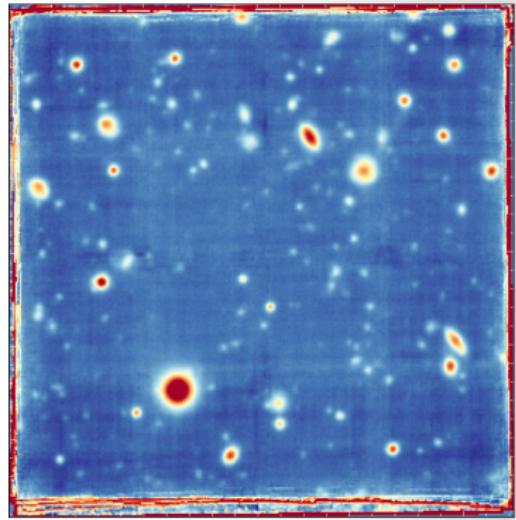
# Détection de galaxies : l'instrument MUSE



# Détection de galaxies

## Les données :

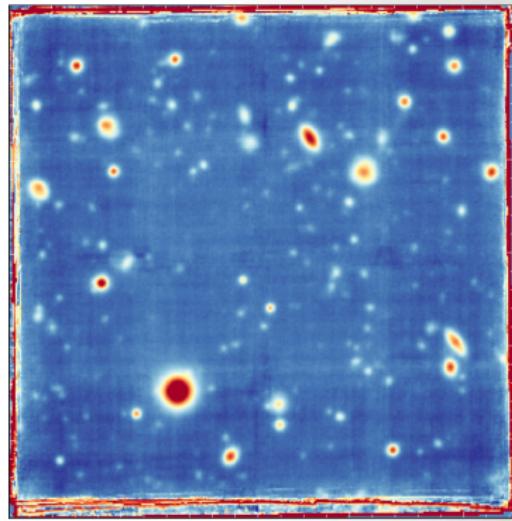
- ▶ Un « cube » de données MUSE
- ▶ Une observation du ciel profond



# Détection de galaxies

Les données :

- ▶ Un « cube » de données MUSE
- ▶ Une observation du ciel profond

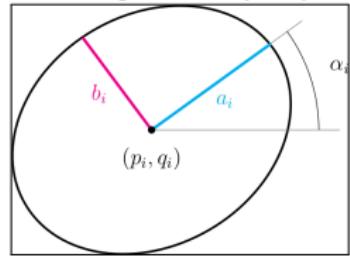


**Problème :** Déetecter toutes les galaxies présentes, et leurs configuration.

# Détection de galaxies

L'a priori :

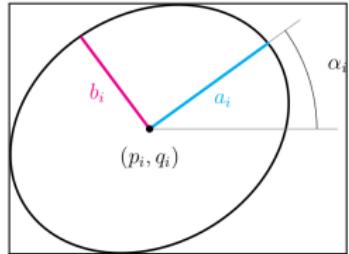
- des objets elliptiques



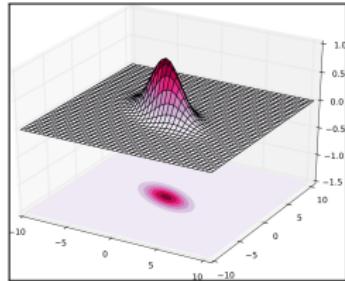
# Détection de galaxies

L'a priori :

- des objets elliptiques



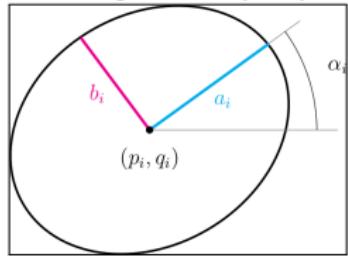
- des profils d'intensité



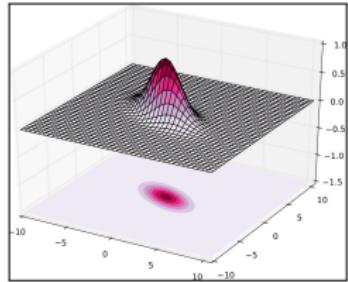
# Détection de galaxies

L'a priori :

- des objets elliptiques



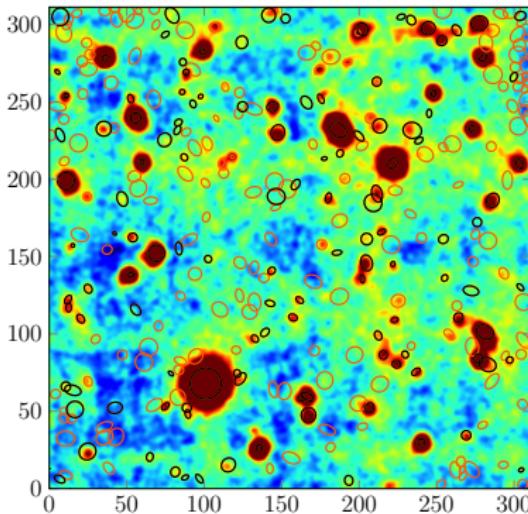
- des profils d'intensité



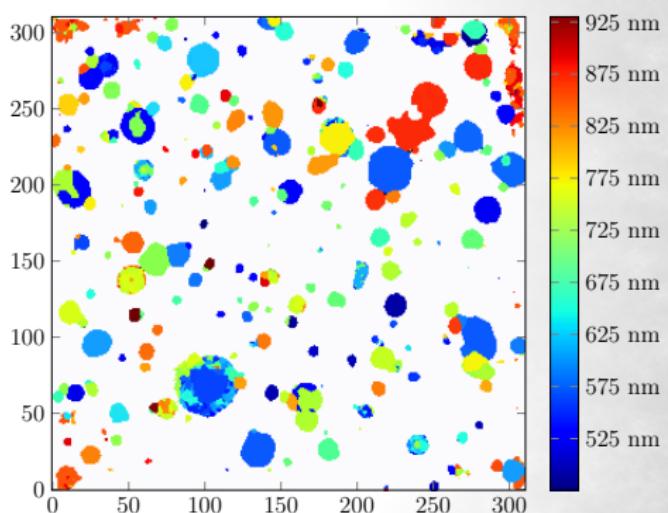
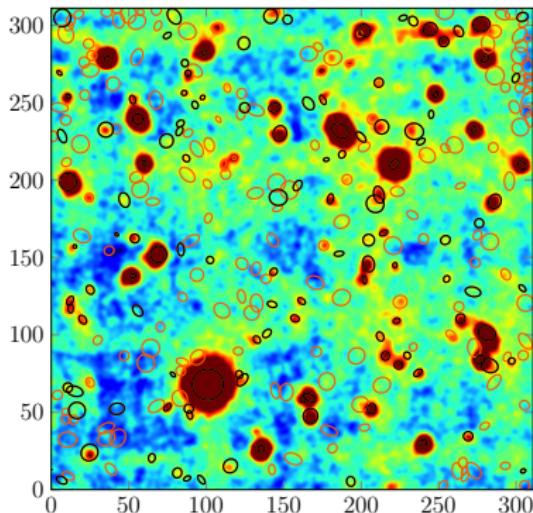
Points délicats :

- nature du bruit
- validation des résultats
- généralisation
- problème de comptage

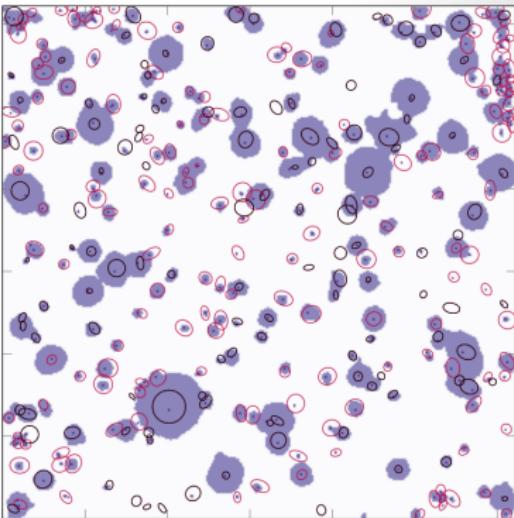
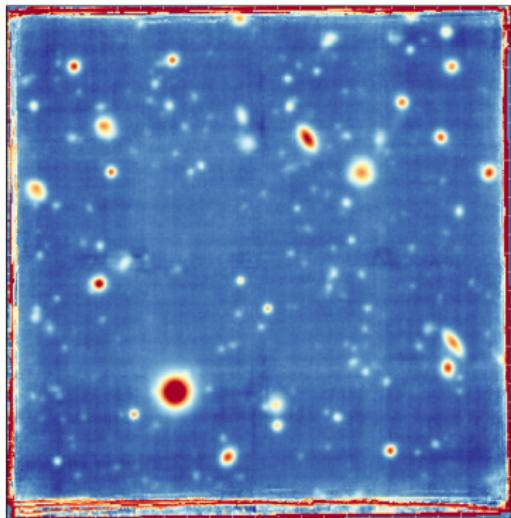
# Détection de galaxies



# Détection de galaxies



# Détection de galaxies



- ▶ Détection automatisée
- ▶ Nouvelles sources par rapport à Hubble

# Sommaire

1 Introduction aux problèmes inverses

2 Détection

Détection de galaxies

Détection de halos

Détection d'ondes gravitationnelles

3 Déconvolution

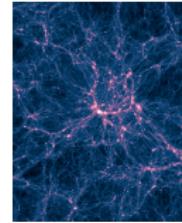
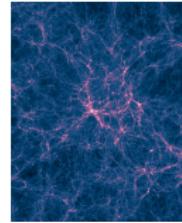
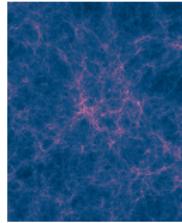
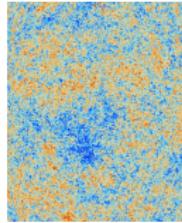
Un télescope au sol

En radio-astronomie

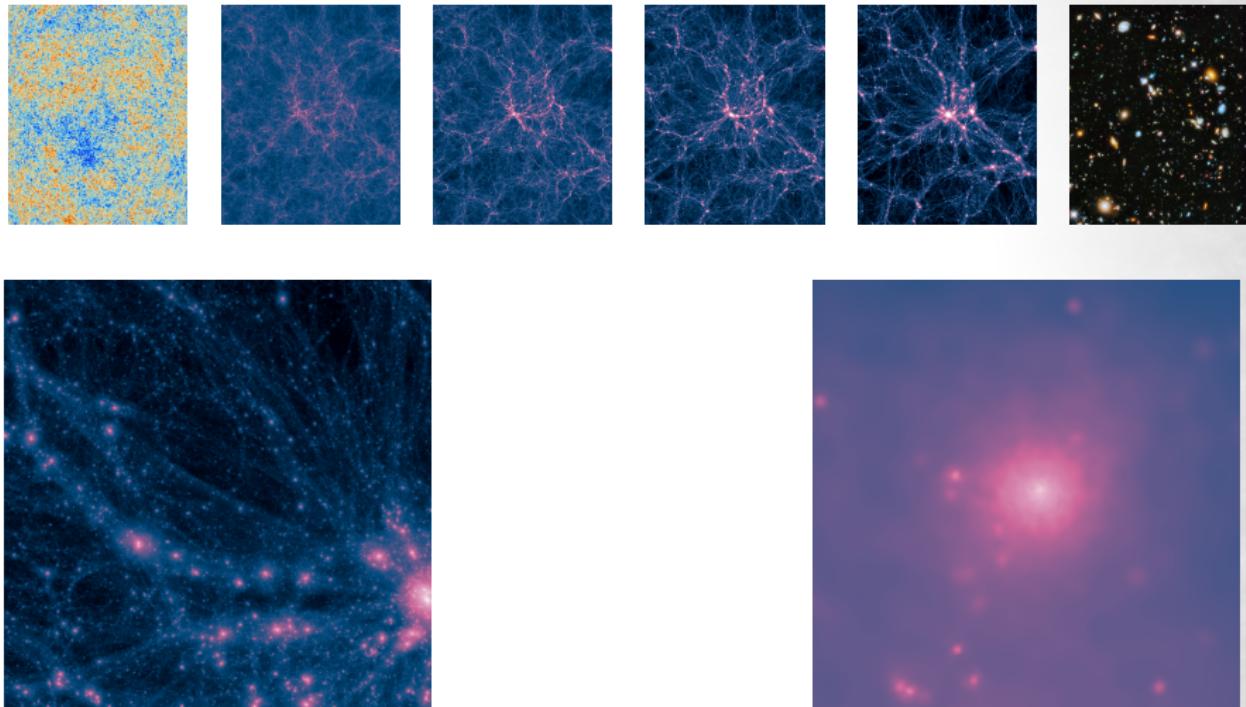
En microscopie

4 Pour conclure

# Détection de halos

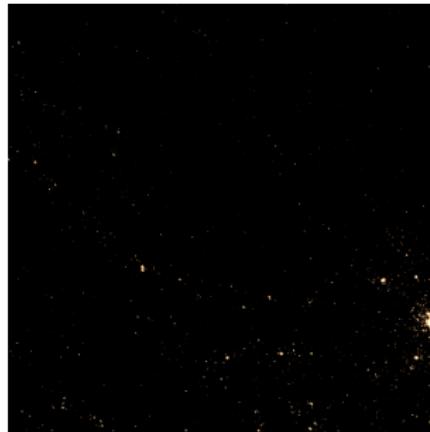
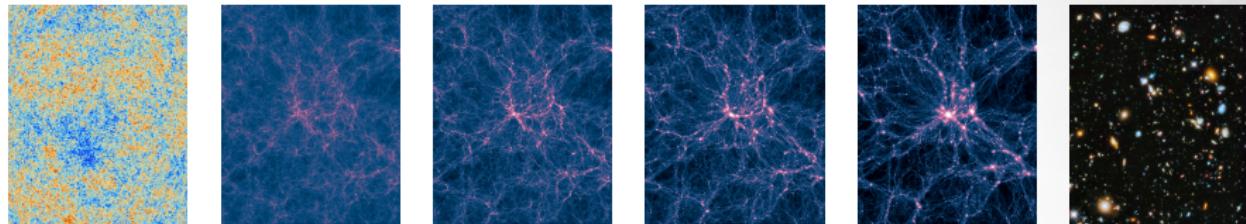


# Détection de halos



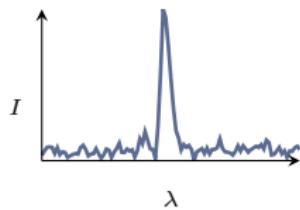
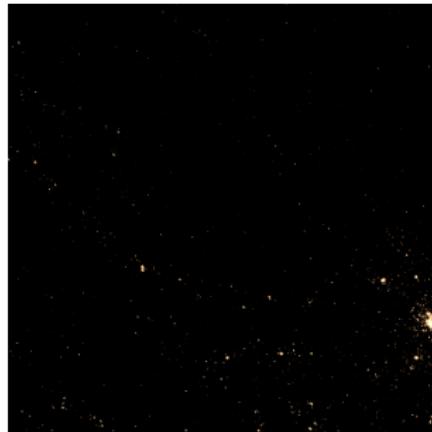
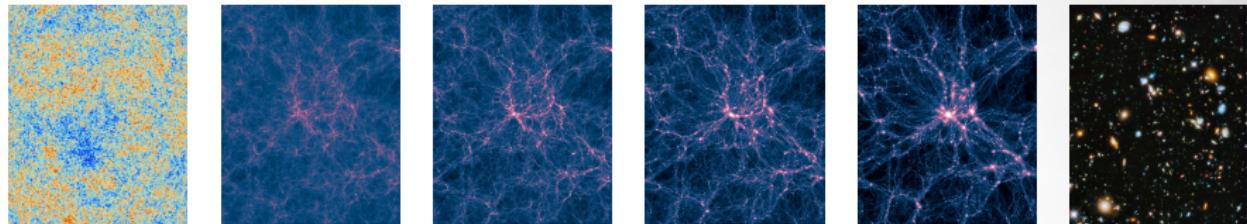
ESA/Planck, Illustris collaboration, NASA/HST

# Détection de halos



ESA/Planck, Illustris collaboration, NASA/HST

# Détection de halos

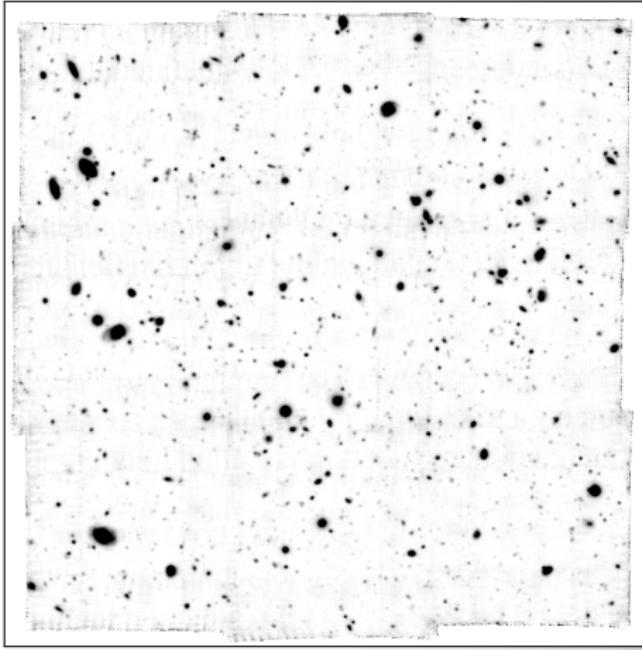


# Détection de halos

## Données :

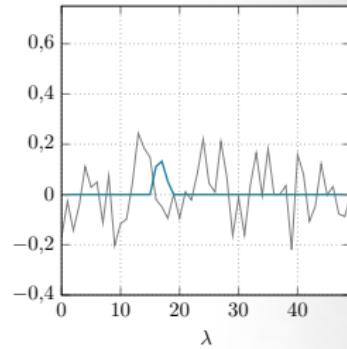
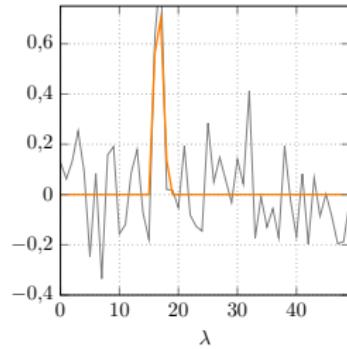
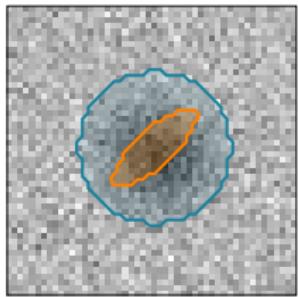
- Un « cube » de données MUSE
- Une plus grande observation du ciel profond

**Problème** : détection des halos de gaz au voisinage des galaxies dans l'univers jeune

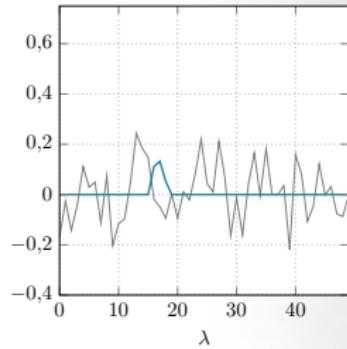
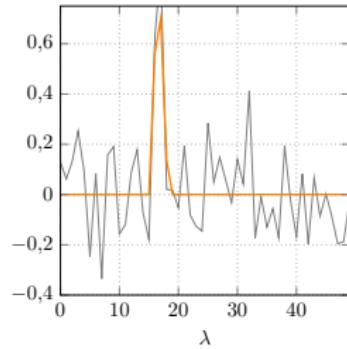
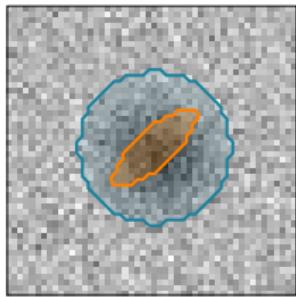


J.-B. Courbot, Traitement statistique d'images hyperspectrales pour la détection d'objets diffus : application aux données astronomiques du spectro-imageur MUSE, thèse de doctorat, 2017.

# Détection de halos



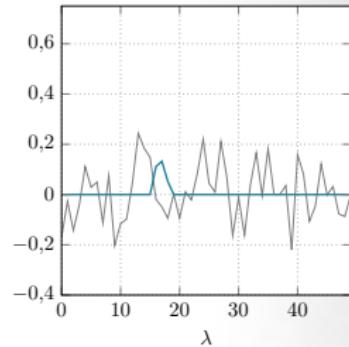
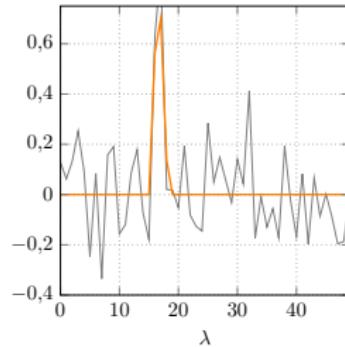
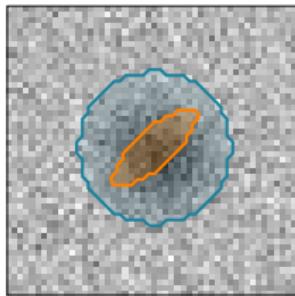
# Détection de halos



Éléments du modèle :

- ▶ forme spectrale
- ▶ dispersion spatiale (FSF)
- ▶ similarité brillant/tenu
- ▶ multiples observations

# Détection de halos



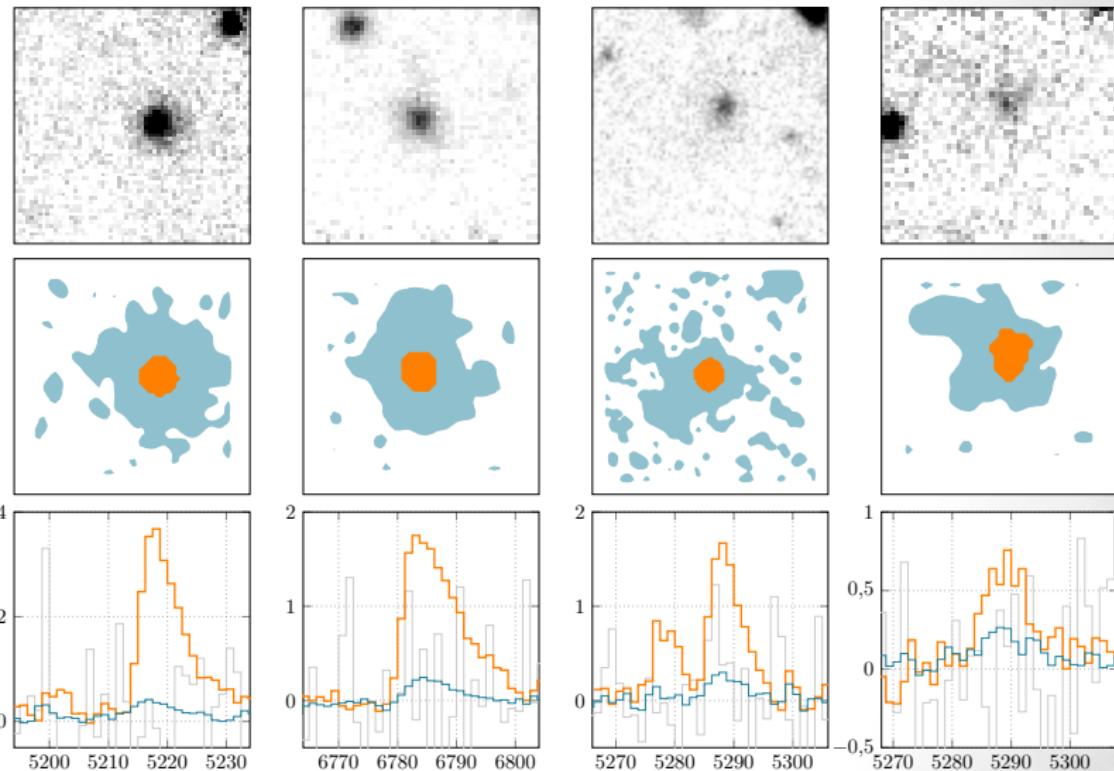
Éléments du modèle :

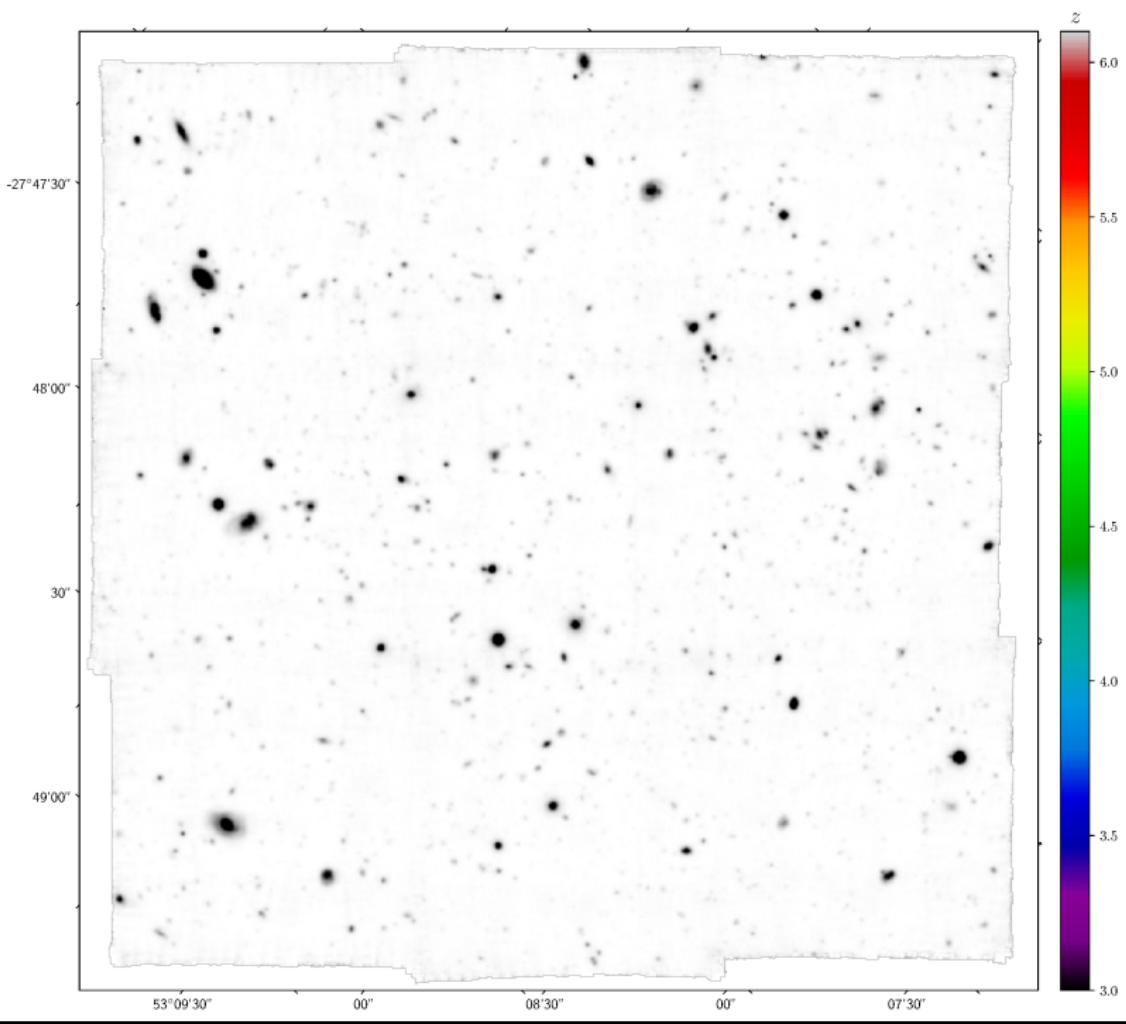
- ▶ forme spectrale
- ▶ dispersion spatiale (FSF)
- ▶ similarité brillant/tenu
- ▶ multiples observations

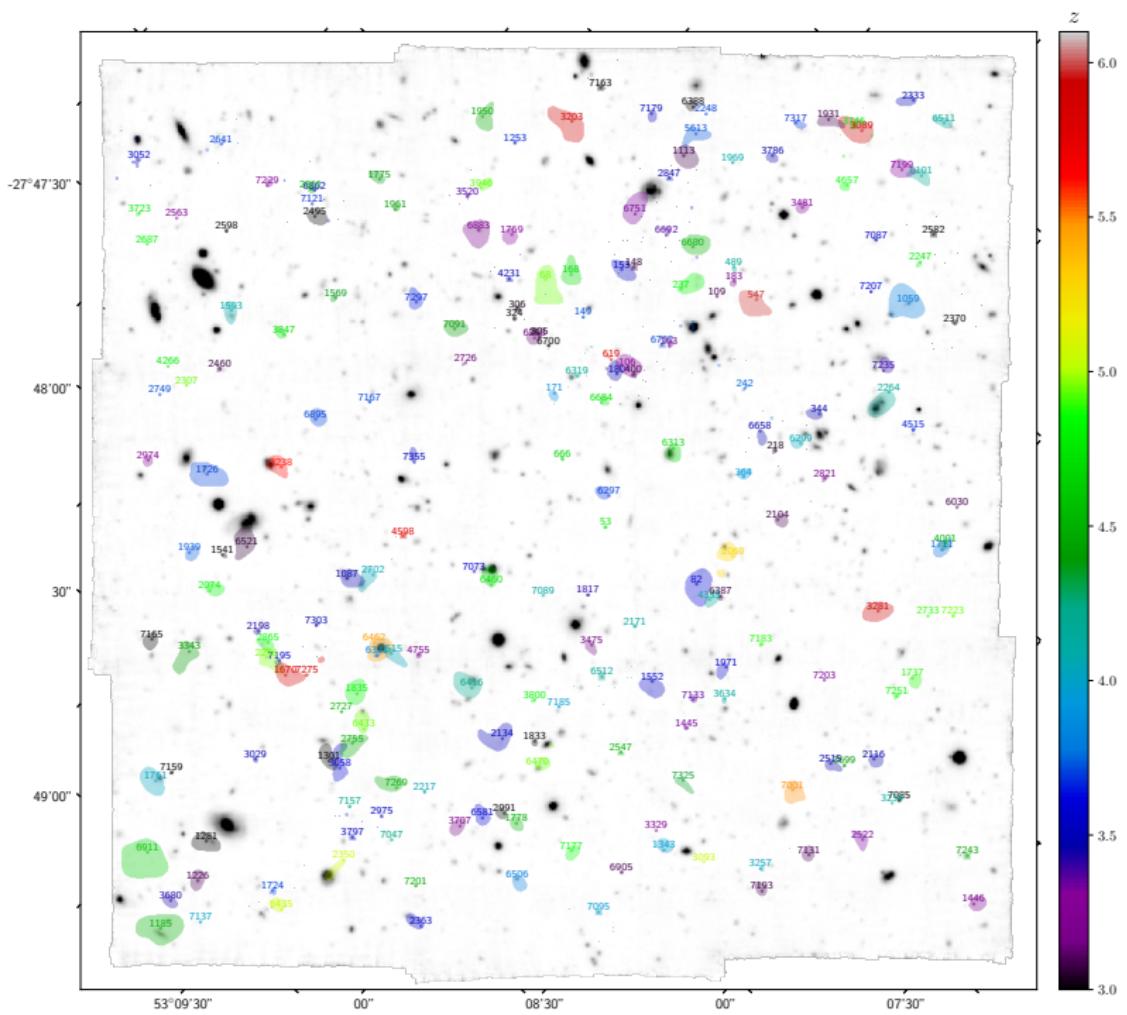
Deux étapes :

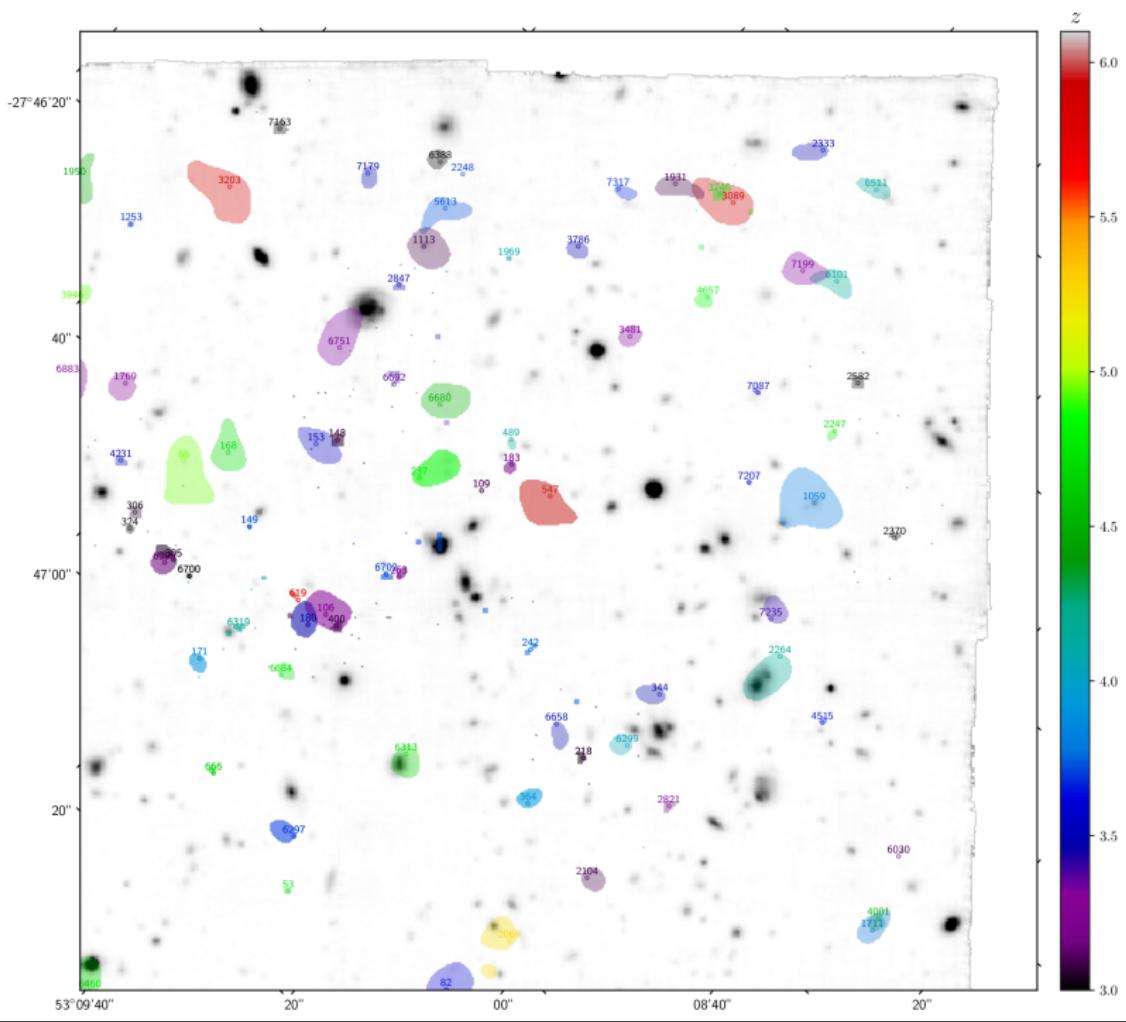
1. Détection de sources brillantes
2. Détection de sources ténues étendue

# Détection de halos : quelques résultats









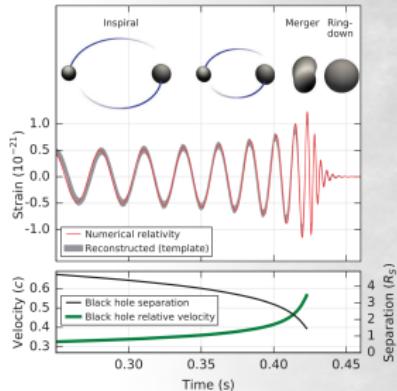
# Sommaire

- 1 Introduction aux problèmes inverses
- 2 Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- 3 Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- 4 Pour conclure

# Détection d'ondes gravitationnelles

Problématique :

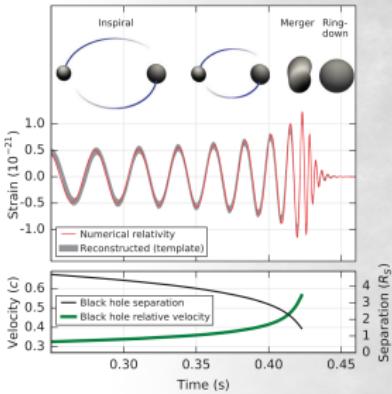
- ▶ Connaissance théorique des trous noirs
- ▶ Observations indirectes uniquement



# Détection d'ondes gravitationnelles

Problématique :

- ▶ Connaissance théorique des trous noirs
- ▶ Observations indirectes uniquement



Instrumentation :

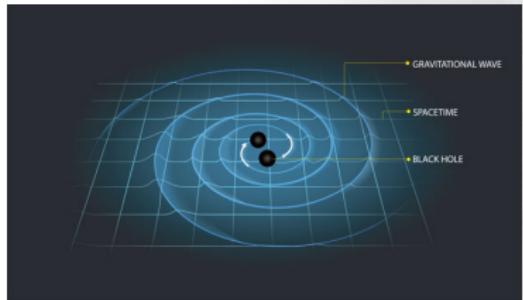


Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2016

# Détection d'ondes gravitationnelles

Ingrédients :

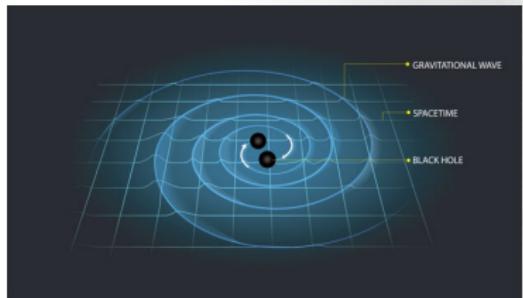
- ▶ La structure de l'instrument
- ▶ La forme attendue des ondes (théorie)



# Détection d'ondes gravitationnelles

Ingédients :

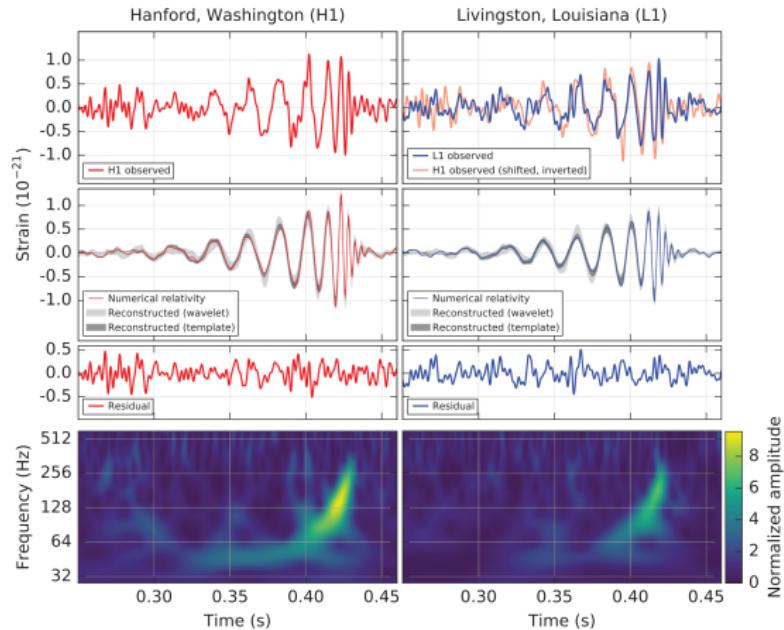
- ▶ La structure de l'instrument
- ▶ La forme attendue des ondes (théorie)



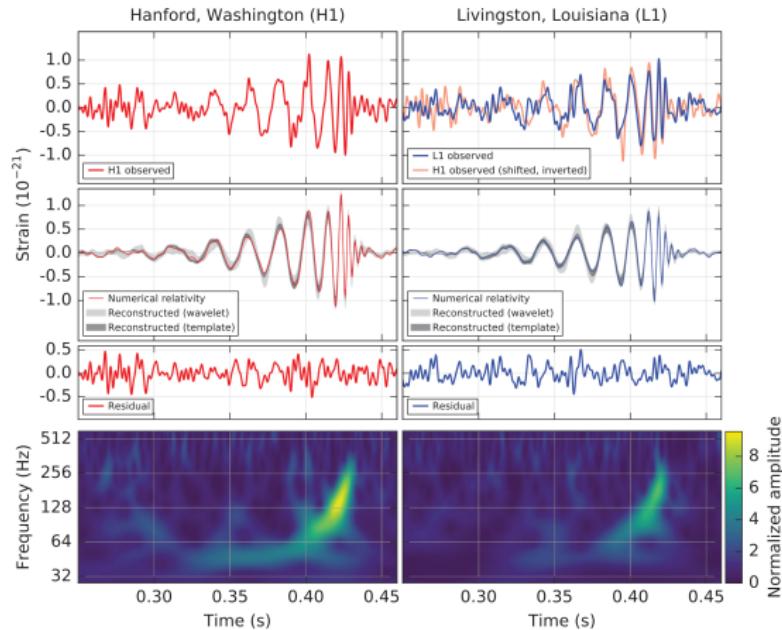
Problèmes soulevés :

- ▶ Est-on sûr d'avoir détecté un « vrai » signal ?
- ▶ Localiser l'événement dans l'espace
- ▶ Identifier l'événement : trous noirs, étoiles à neutrons

# Détection d'ondes gravitationnelles



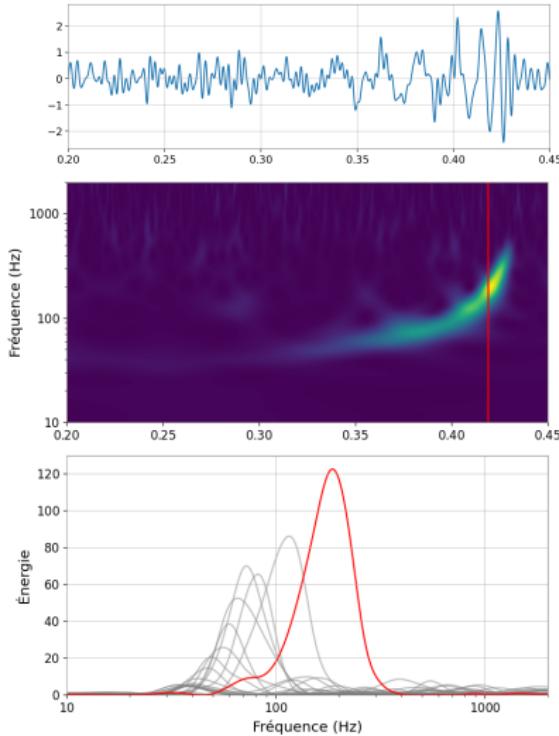
# Détection d'ondes gravitationnelles



- ▶ Observation
- ▶ Reconstruction
- ▶ Différence
- ▶ Spectrogramme

Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2016

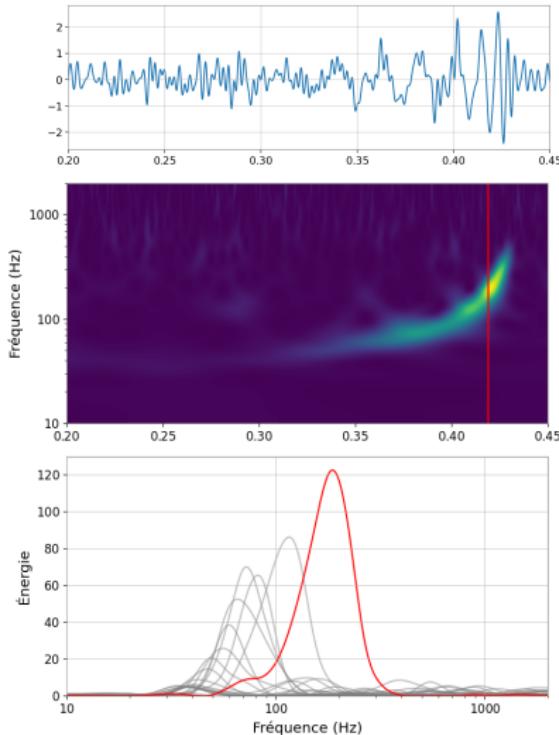
# Détection d'ondes gravitationnelles : les fréquences



Une représentation particulière : le temps-fréquence

- ▶ Basse fréquences : variations lentes
- ▶ Hautes fréquences : variations rapides

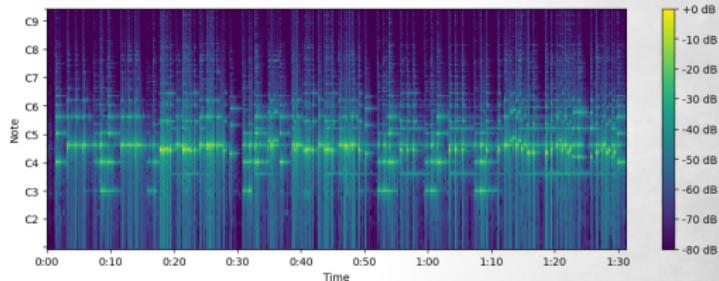
# Détection d'ondes gravitationnelles : les fréquences



Une représentation particulière : le temps-fréquence

- ▶ Basse fréquences : variations lentes
- ▶ Hautes fréquences : variations rapides

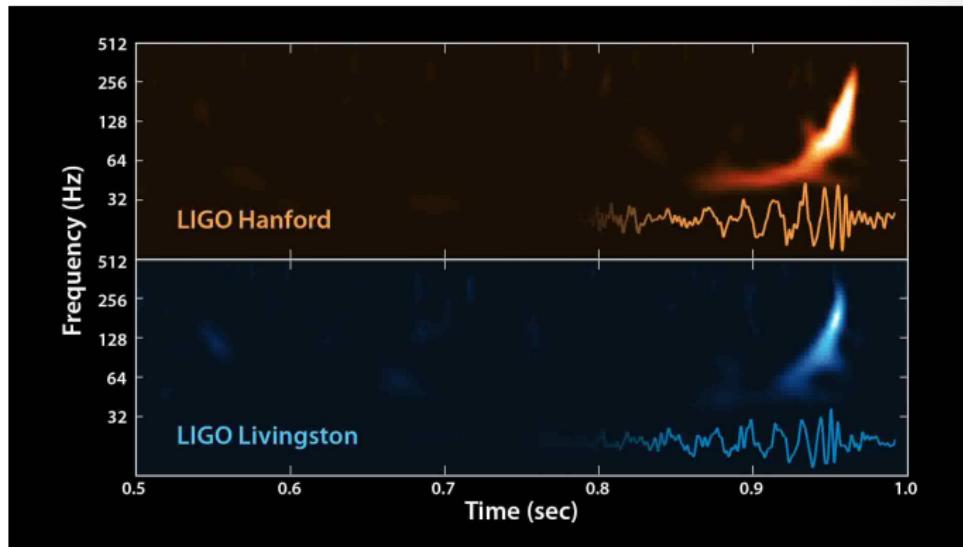
→ Similaire à une partition :



Morceau de setâr, S. Khodaverdi

# Détection d'ondes gravitationnelles : les fréquences

Effet secondaire : on peut écouter des ondes gravitationnelles !



→ [Lien vers la vidéo](#)

The sound of two black holes colliding, Caltech/MIT/LIGO Lab, 2016

# Récap

Nous avons vu...

- ▶ le principe des problèmes inverses
- ▶ trois problèmes de détection en astronomie
- ▶ les ingrédients principaux : un dosage judicieux entre
  - ▶ les données
  - ▶ l'objet recherché
- ▶ une représentation fréquentielle

# Récap

Nous avons vu...

- ▶ le principe des problèmes inverses
- ▶ trois problèmes de détection en astronomie
- ▶ les ingrédients principaux : un dosage judicieux entre
  - ▶ les données
  - ▶ l'objet recherché
- ▶ une représentation fréquentielle



# Sommaire

- 1 Introduction aux problèmes inverses
- 2 Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- 3 Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- 4 Pour conclure

# Sommaire

- 1 Introduction aux problèmes inverses
- 2 Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- 3 Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- 4 Pour conclure

# Un télescope au sol : problématique

- ▶ Données : une image prise depuis le sol
- ▶ Modèle : l'atmosphère comme flou

# Un télescope au sol : problématique

- ▶ Données : une image prise depuis le sol
- ▶ Modèle : l'atmosphère comme flou

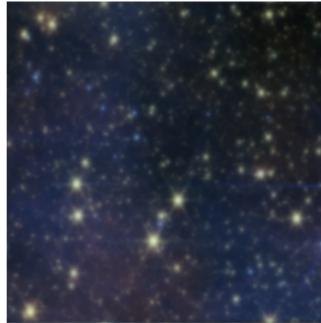
Depuis l'espace :



# Un télescope au sol : problématique

- ▶ Données : une image prise depuis le sol
- ▶ Modèle : l'atmosphère comme flou

Depuis l'espace :



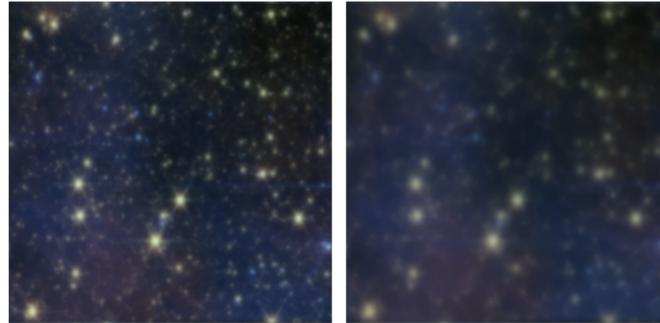
Au sol :



# Un télescope au sol : problématique

- ▶ Données : une image prise depuis le sol
- ▶ Modèle : l'atmosphère comme flou

Depuis l'espace :



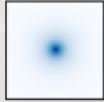
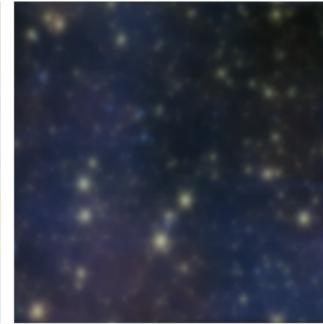
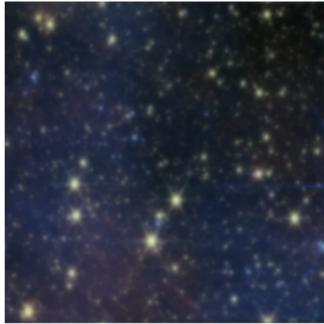
# Un télescope au sol : problématique

- ▶ Données : une image prise depuis le sol
- ▶ Modèle : l'atmosphère comme flou

Depuis l'espace :



Au sol :



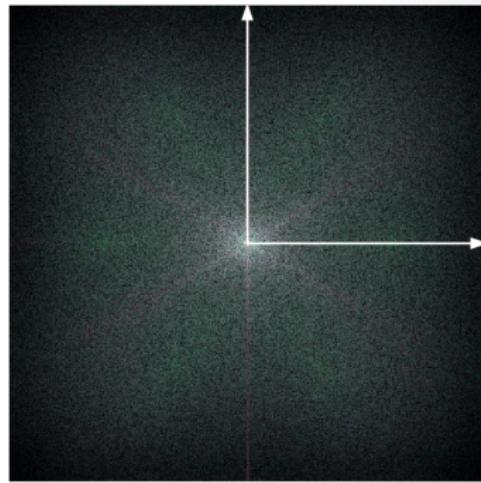
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



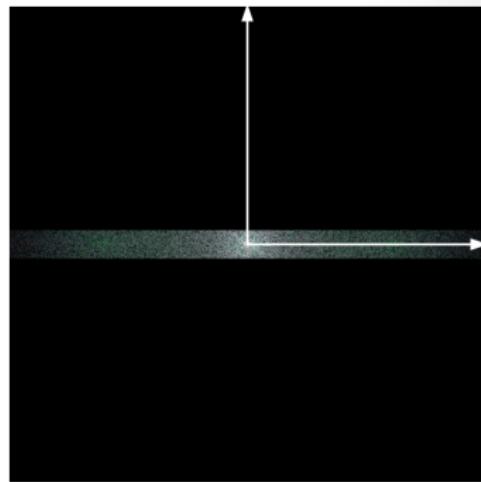
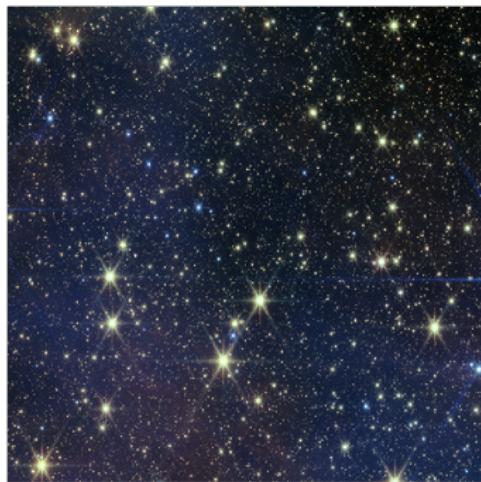
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



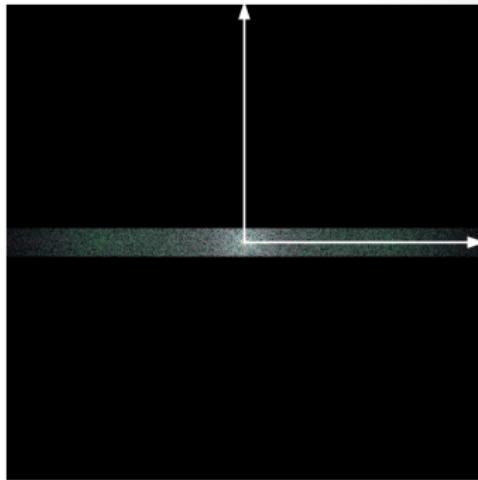
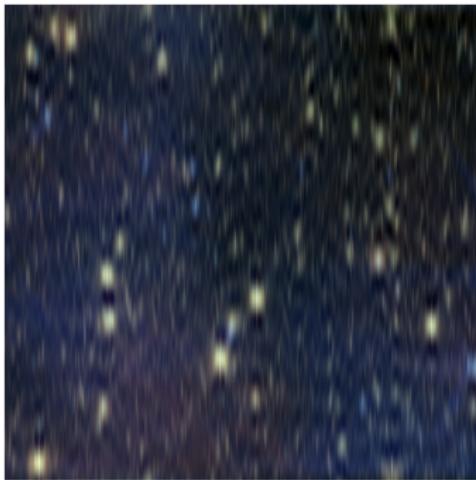
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



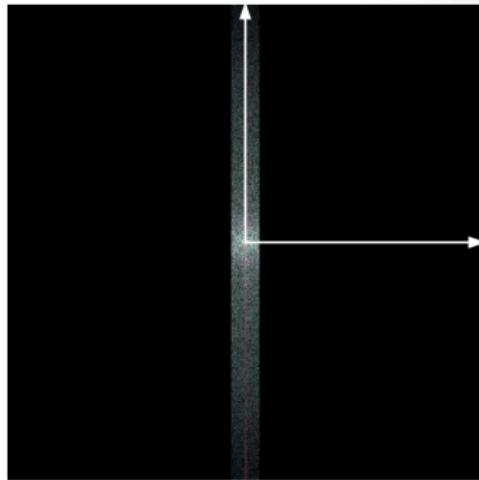
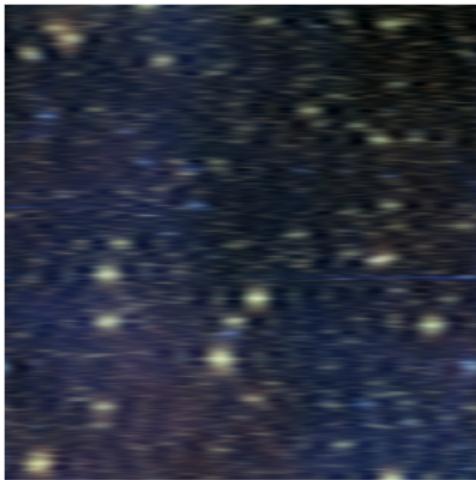
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



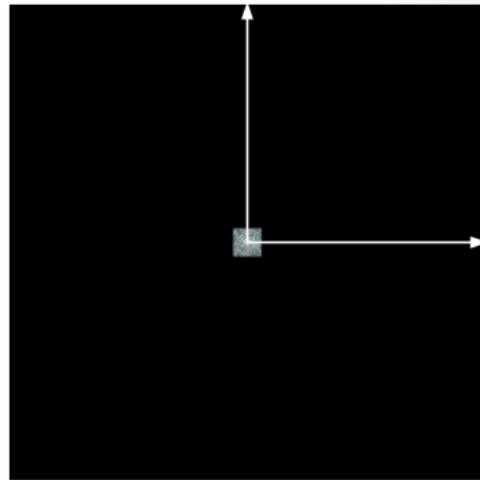
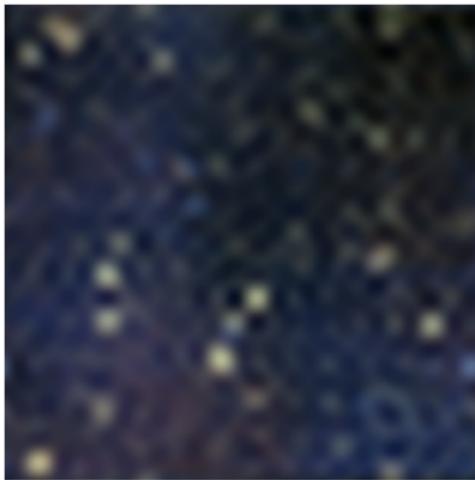
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



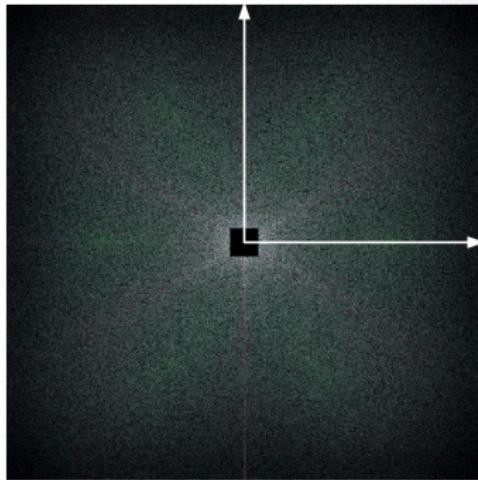
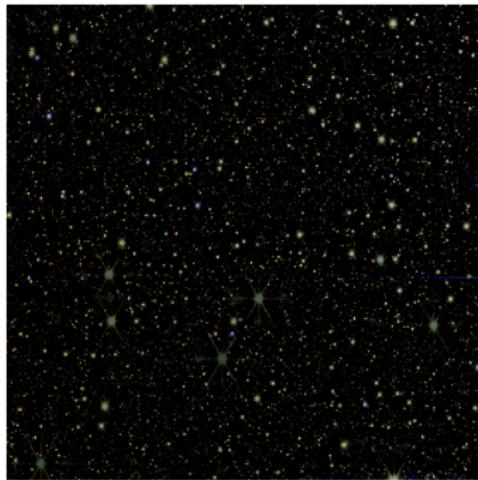
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



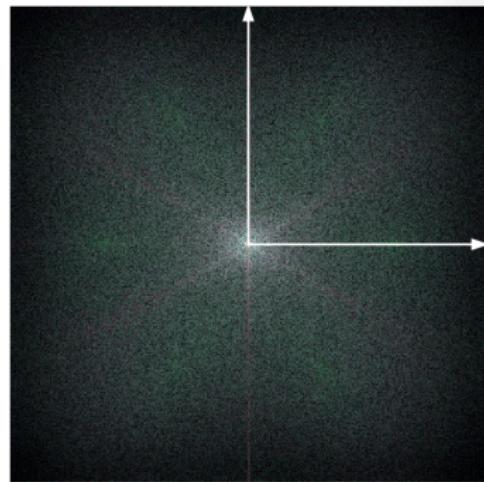
# Un télescope au sol : représentations en fréquences

Les images peuvent également être représentées en fréquences :



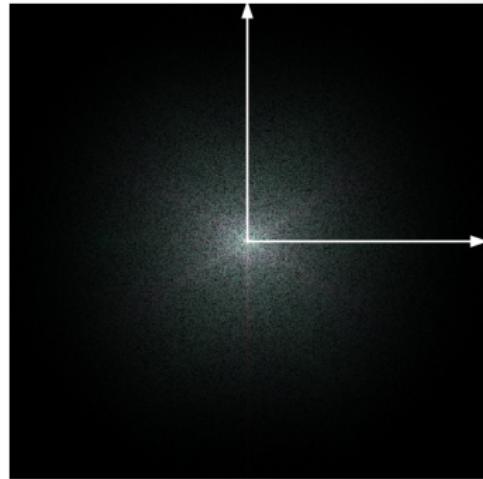
# Un télescope au sol : fréquences et flou

Et les fréquences sont affectées par la présence de flou :



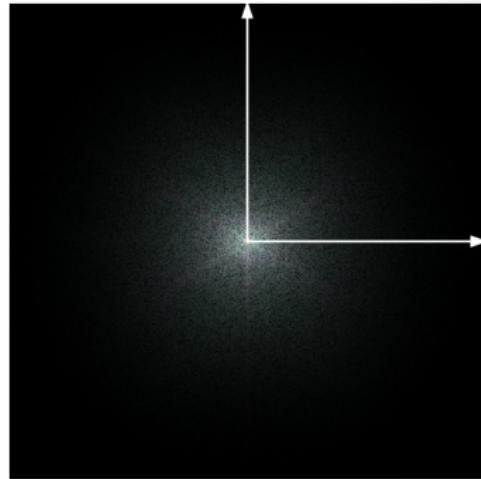
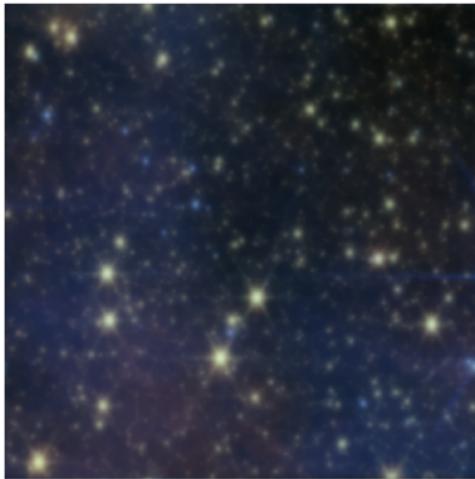
# Un télescope au sol : fréquences et flou

Et les fréquences sont affectées par la présence de flou :



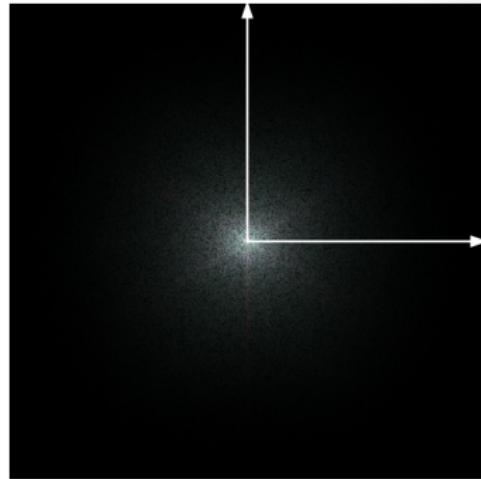
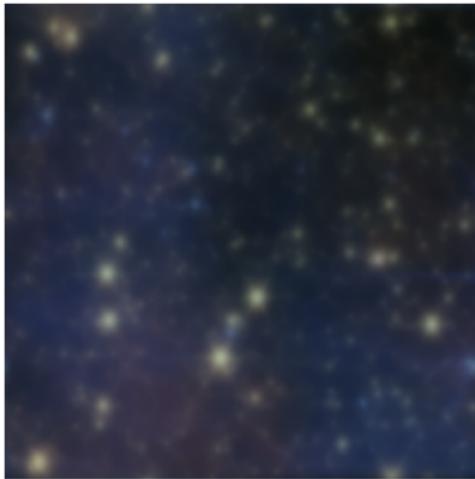
# Un télescope au sol : fréquences et flou

Et les fréquences sont affectées par la présence de flou :



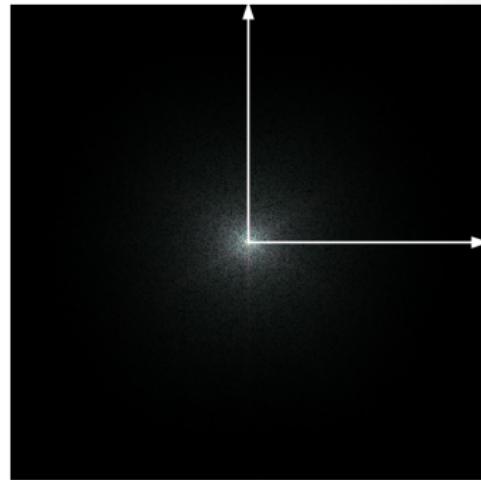
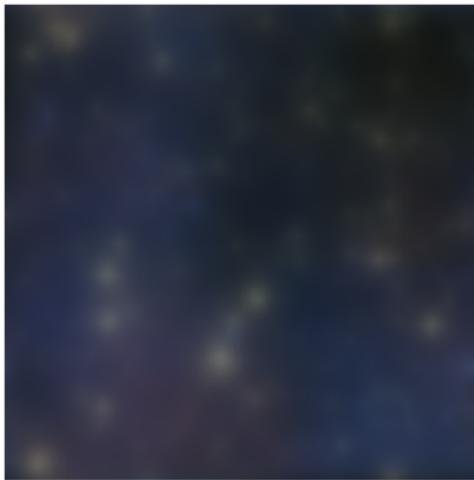
# Un télescope au sol : fréquences et flou

Et les fréquences sont affectées par la présence de flou :



# Un télescope au sol : fréquences et flou

Et les fréquences sont affectées par la présence de flou :



# Un télescope au sol : fréquences et flou

**Problématique** : compenser le flou – réattribuer la bonne intensité au bon pixel

Démarche de travail :

- ▶ générer une image de synthèse
- ▶ rechercher une solution
- ▶ évaluer la validité en comparant le résultat avec l'image d'origine



# Un télescope au sol : fréquences et flou

**Problématique** : compenser le flou – réattribuer la bonne intensité au bon pixel

Démarche de travail :

- ▶ générer une image de synthèse
- ▶ rechercher une solution
- ▶ évaluer la validité en comparant le résultat avec l'image d'origine



# Un télescope au sol : fréquences et flou

**Problématique** : compenser le flou – réattribuer la bonne intensité au bon pixel

Démarche de travail :

- ▶ générer une image de synthèse
- ▶ rechercher une solution
- ▶ évaluer la validité en comparant le résultat avec l'image d'origine

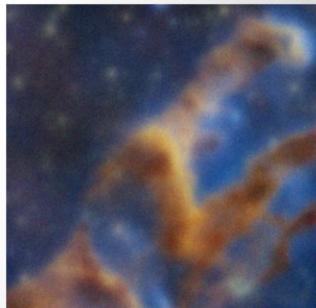


# Un télescope au sol : fréquences et flou

**Problématique** : compenser le flou – réattribuer la bonne intensité au bon pixel

Démarche de travail :

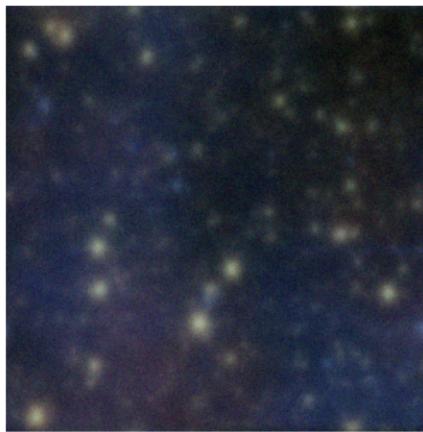
- ▶ générer une image de synthèse
- ▶ rechercher une solution
- ▶ évaluer la validité en comparant le résultat avec l'image d'origine



# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

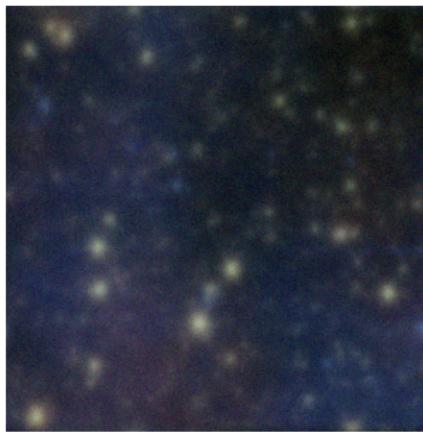
$\lambda \times$  pénalité sur les fortes intensités



# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les fortes intensités

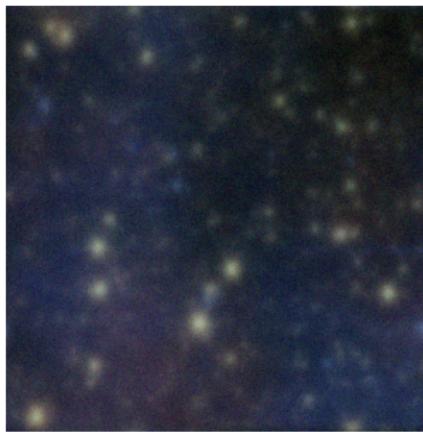


$$\lambda = 0.005$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les fortes intensités

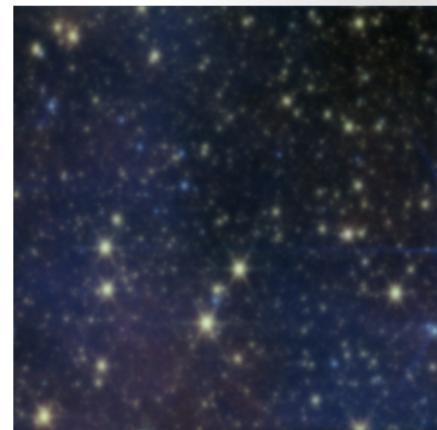
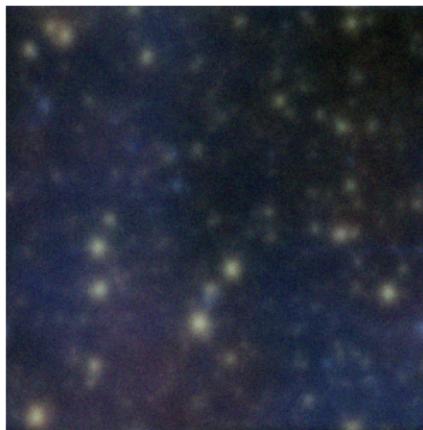


$$\lambda = 0.01$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les fortes intensités

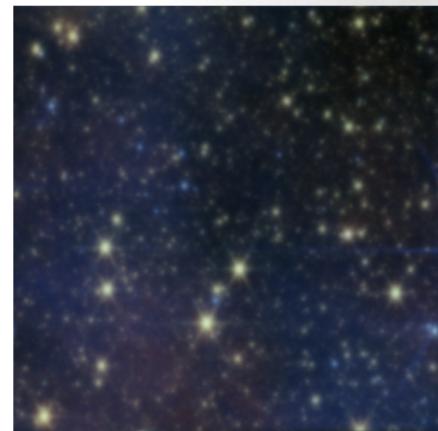
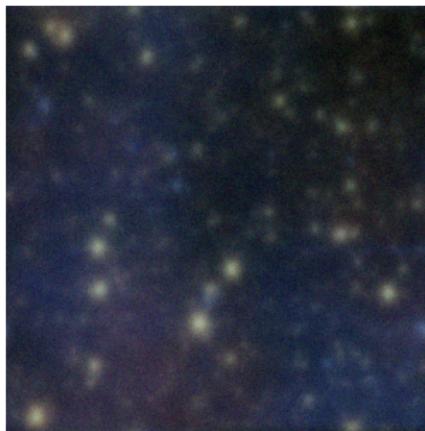


$$\lambda = 0.05$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les fortes intensités

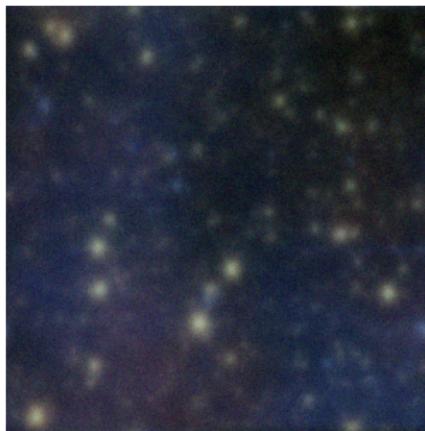


$$\lambda = 0.1$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

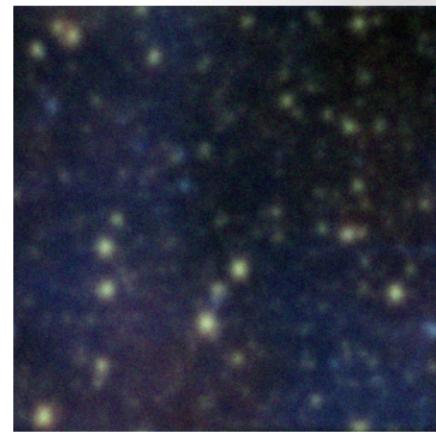
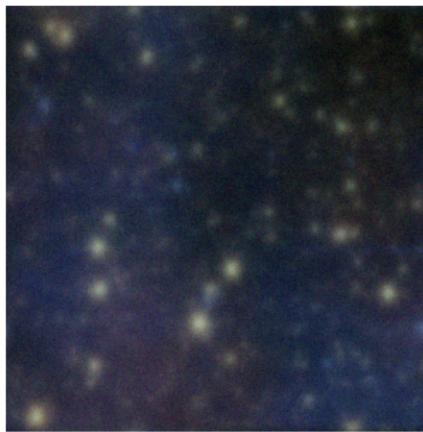
$\lambda \times$  pénalité sur toutes les intensités



# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur toutes les intensités

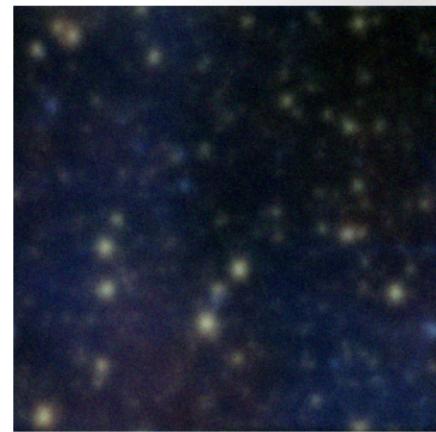
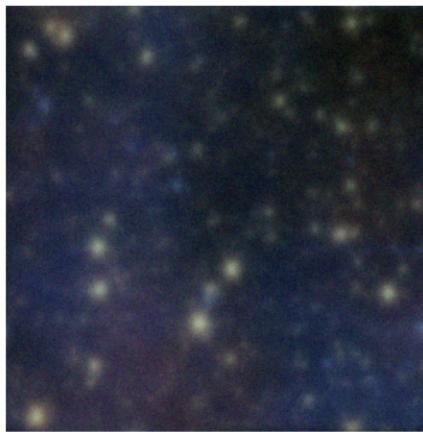


$$\lambda = 0.01$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur toutes les intensités

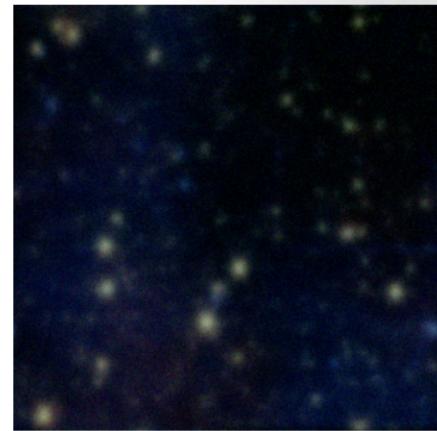
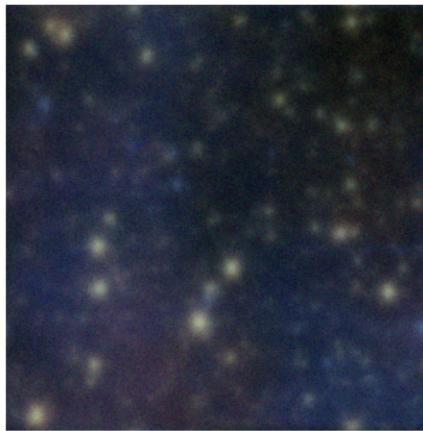


$$\lambda = 0.05$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur toutes les intensités

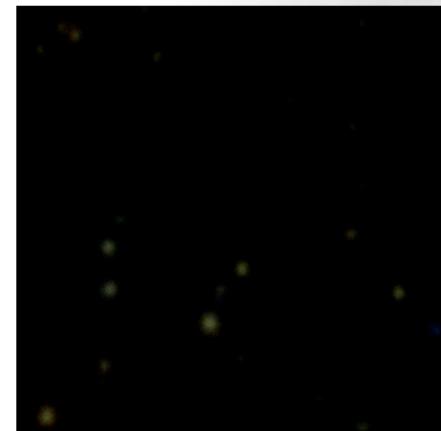
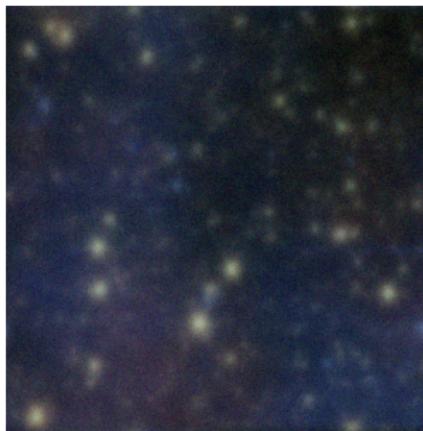


$$\lambda = 0.1$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur toutes les intensités

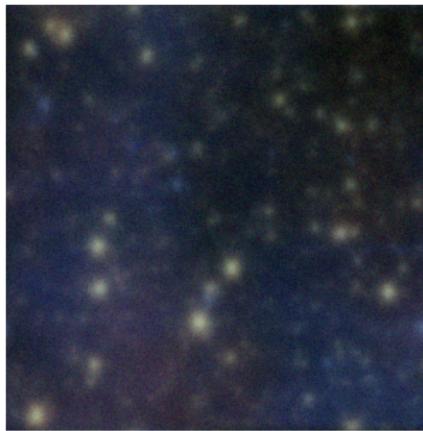


$$\lambda = 1.0$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

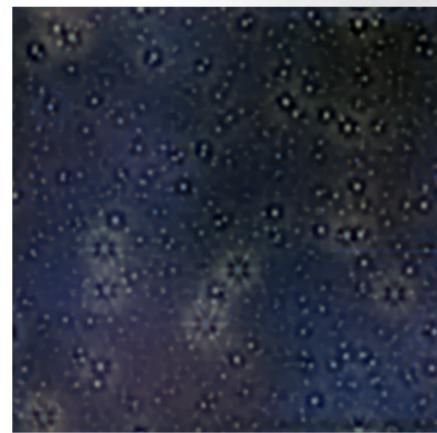
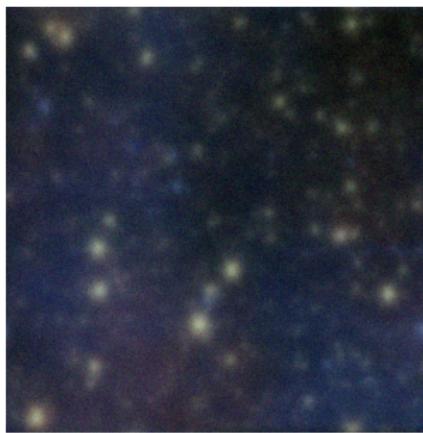
$\lambda \times$  pénalité sur les variations dans l'image



# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les variations dans l'image

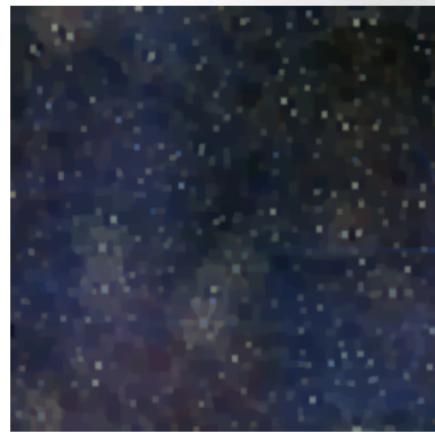
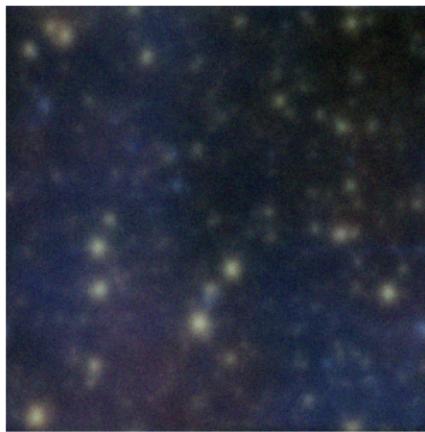


$$\lambda = 0.01$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les variations dans l'image

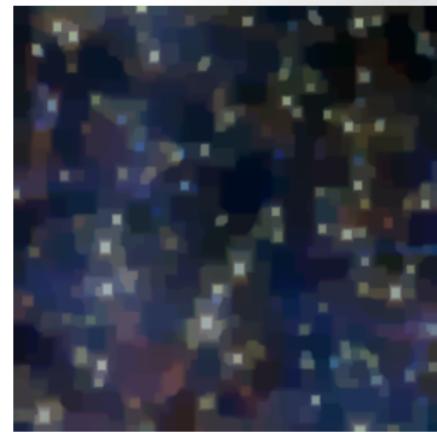
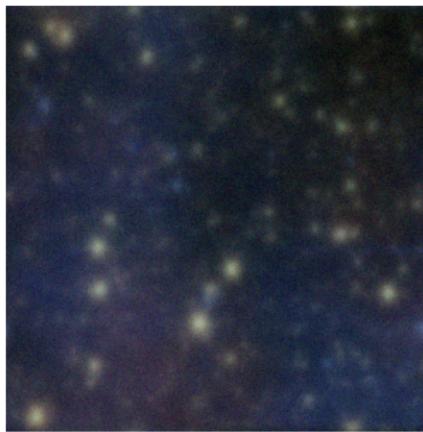


$$\lambda = 0.1$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les variations dans l'image

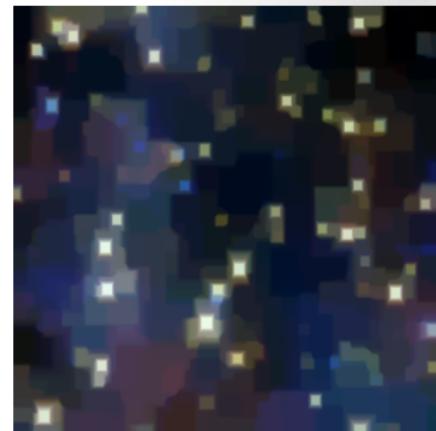
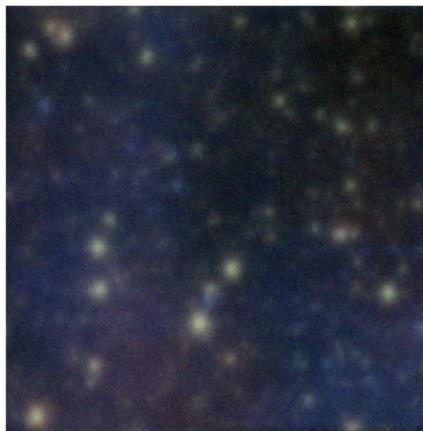


$$\lambda = 0.5$$

# Un télescope au sol : quelques solutions

On ajuste en fonction des données et de...

$\lambda \times$  pénalité sur les variations dans l'image



$$\lambda = 0.1$$

# Un télescope au sol : bilan

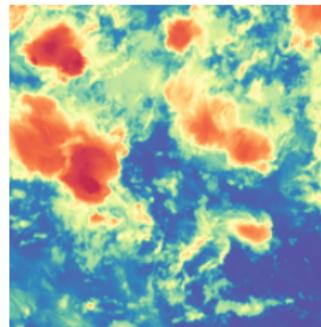
- ▶ Une question de critère : que recherche-t'on exactement ?
- ▶ Validation : lien avec l'expertise (optique, astronomie)
- ▶ Dans le meilleur des cas : une autre source d'observation (JWST, Hubble)

# Un télescope au sol : bilan

- ▶ Une question de critère : que recherche-t'on exactement ?
- ▶ Validation : lien avec l'expertise (optique, astronomie)
- ▶ Dans le meilleur des cas : une autre source d'observation (JWST, Hubble)

... remarques généralisables à d'autres applications :

- ▶ météorologie
- ▶ médecine
- ▶ végétal

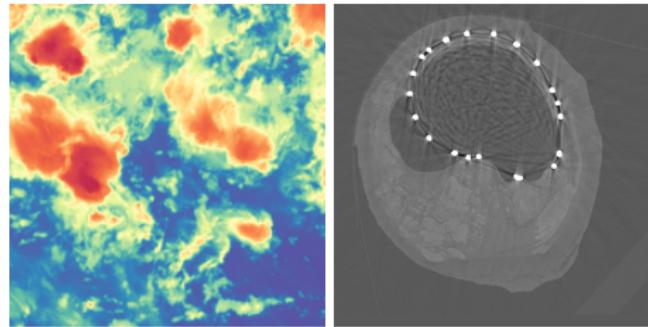


# Un télescope au sol : bilan

- ▶ Une question de critère : que recherche-t'on exactement ?
- ▶ Validation : lien avec l'expertise (optique, astronomie)
- ▶ Dans le meilleur des cas : une autre source d'observation (JWST, Hubble)

... remarques généralisables à d'autres applications :

- ▶ météorologie
- ▶ médecine
- ▶ végétal

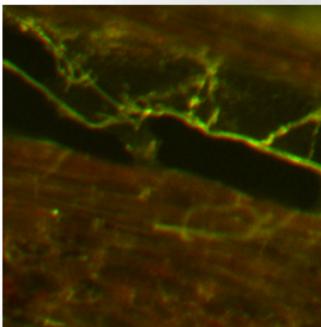
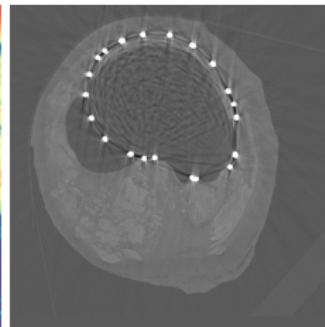
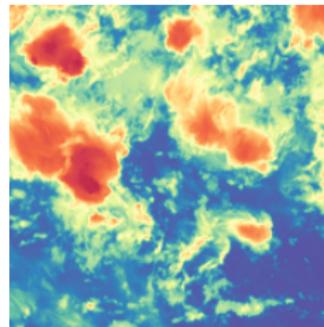


# Un télescope au sol : bilan

- ▶ Une question de critère : que recherche-t'on exactement ?
- ▶ Validation : lien avec l'expertise (optique, astronomie)
- ▶ Dans le meilleur des cas : une autre source d'observation (JWST, Hubble)

... remarques généralisables à d'autres applications :

- ▶ météorologie
- ▶ médecine
- ▶ végétal



# Sommaire

- 1 Introduction aux problèmes inverses
- 2 Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- 3 Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- 4 Pour conclure

# Radio-astronomie



Contexte : radio-astronomie

- ▶ observations dans le domaine des ondes radio
- ▶ très faible / sensible aux interférences humaines
- ▶ imagerie indirecte

# Quelques principes d'interférométrie

En interférométrie, l'acquisition se fait dans l'espace des fréquences 2D.



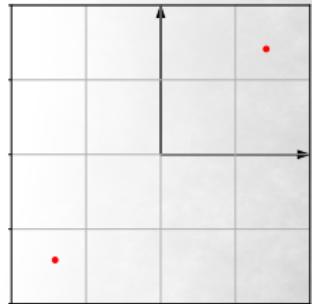
# Quelques principes d'interférométrie

En interférométrie, l'acquisition se fait dans l'espace des fréquences 2D.



Principe :

- ▶ Faire interférer deux observations  
→ une position en fréquences 2D



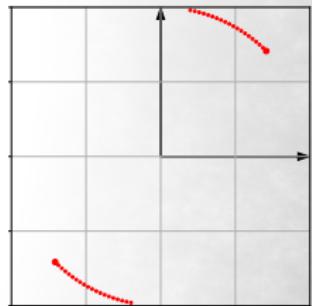
# Quelques principes d'interférométrie

En interférométrie, l'acquisition se fait dans l'espace des fréquences 2D.



Principe :

- ▶ Faire interférer deux observations  
→ une position en fréquences 2D
- ▶ Répéter régulièrement              → des arcs de cercles



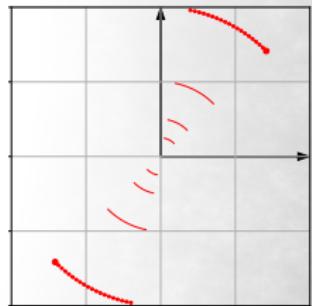
# Quelques principes d'interférométrie

En interférométrie, l'acquisition se fait dans l'espace des fréquences 2D.

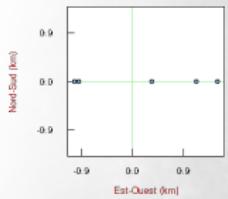
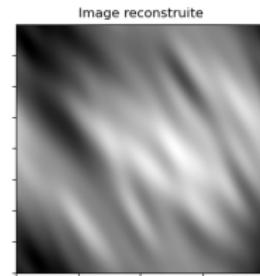
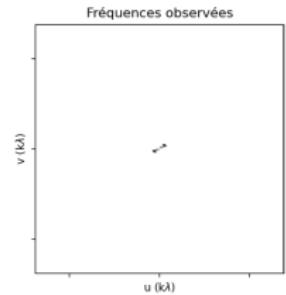
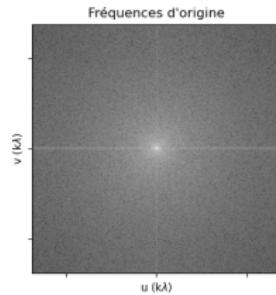
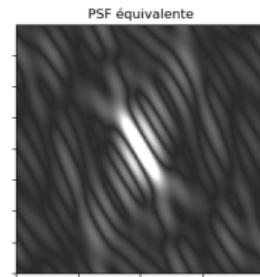
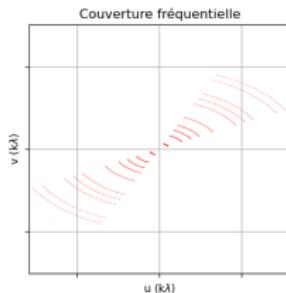
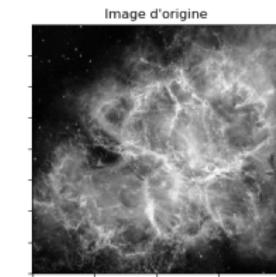


Principe :

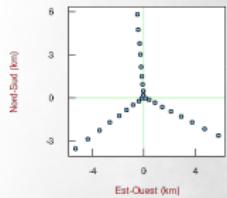
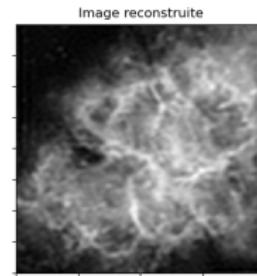
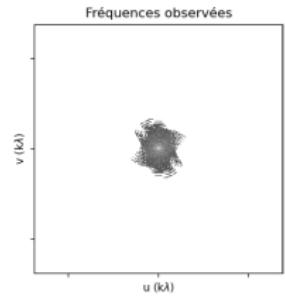
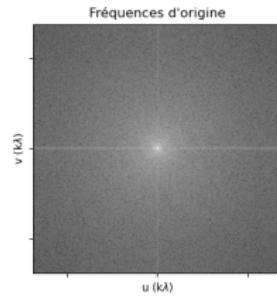
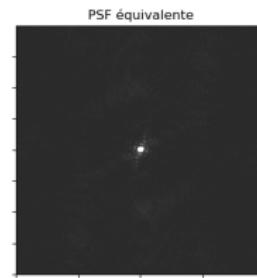
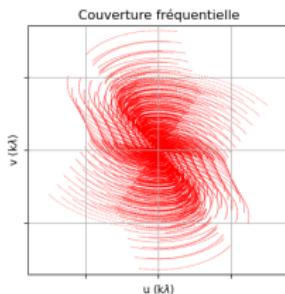
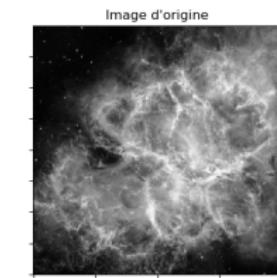
- ▶ Faire interférer deux observations  
→ une position en fréquences 2D
- ▶ Répéter régulièrement → des arcs de cercles
- ▶ Reproduire avec plus de deux antennes  
→ un remplissage de plus en plus complet



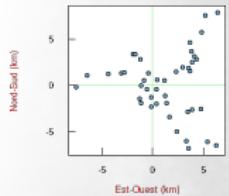
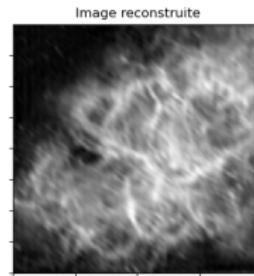
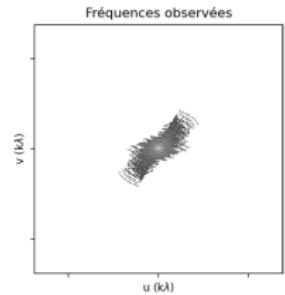
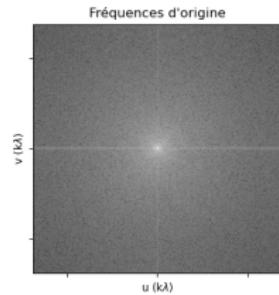
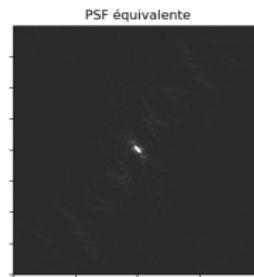
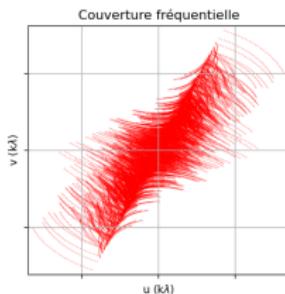
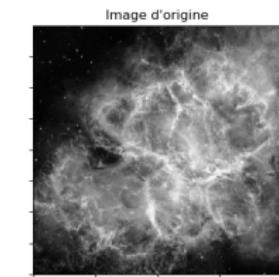
# Interférométrie : exemples pratiques



# Interférométrie : exemples pratiques

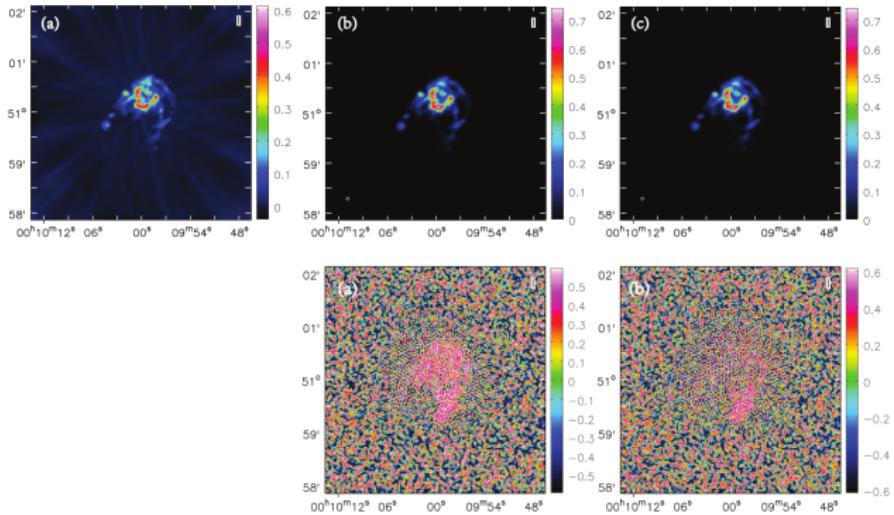


# Interférométrie : exemples pratiques



# Interférométrie : quelques résultats

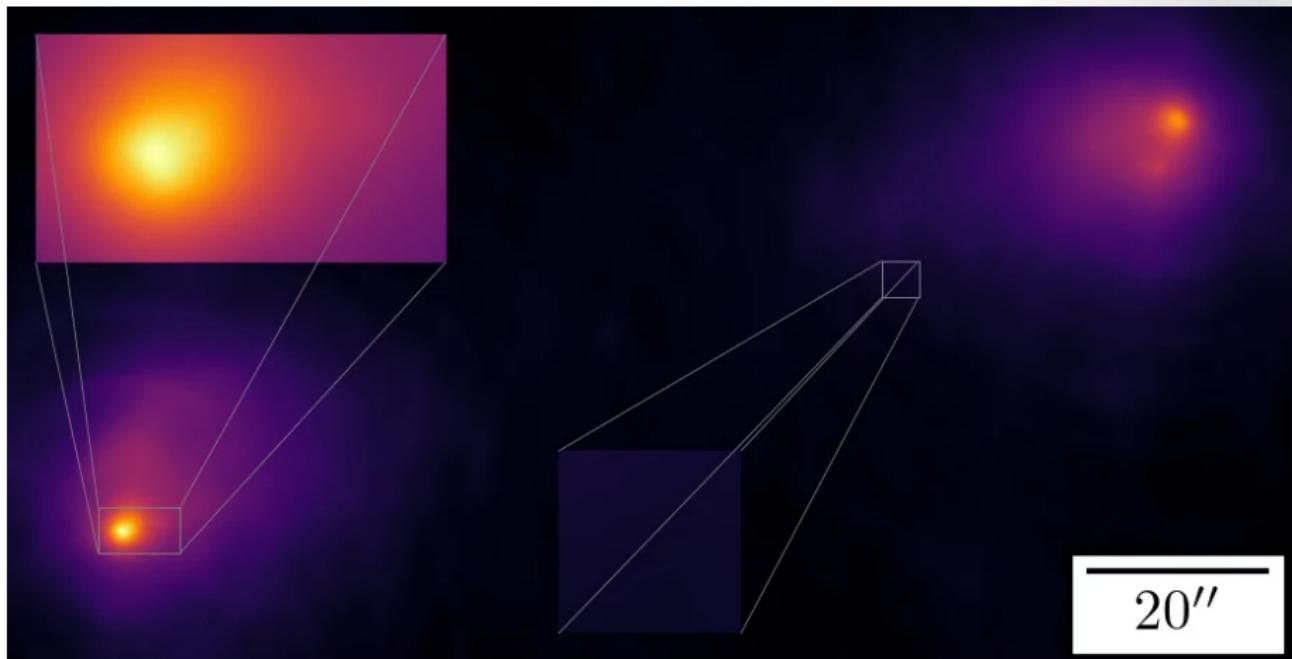
## Problématique : compenser le « flou »



- ▶ relativement peu de travaux
- ▶ validation « par résidu »

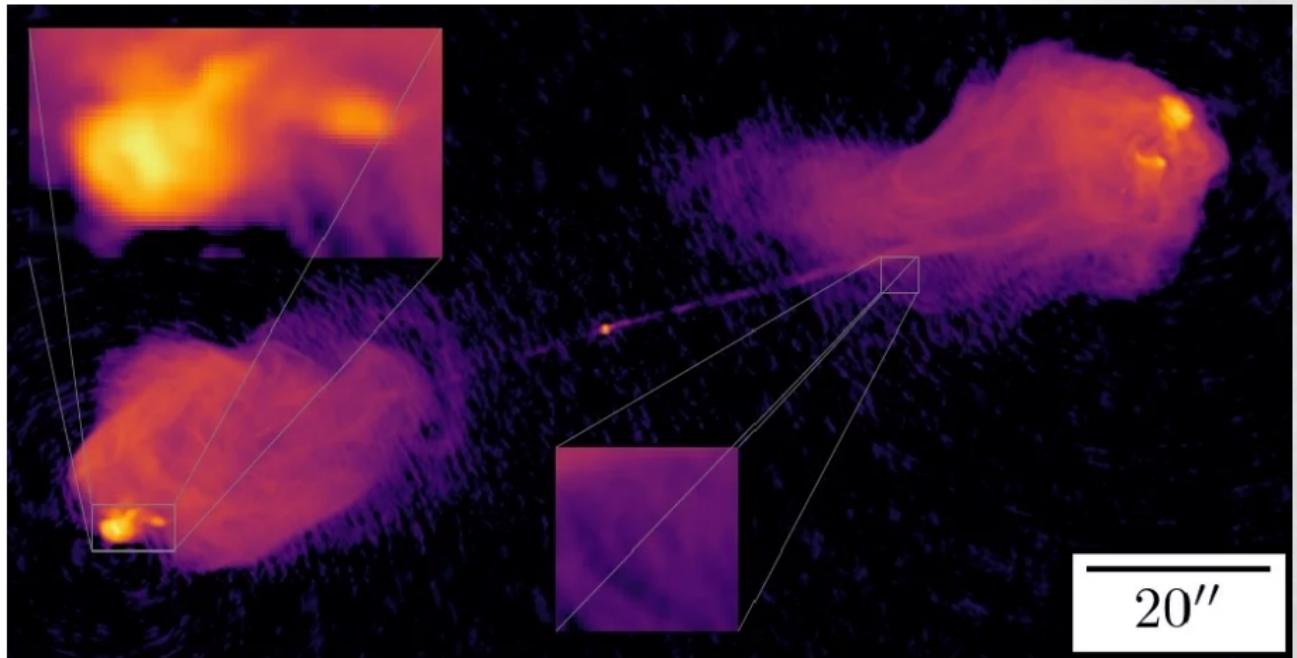
Zhang, L., et al. (2019). An adaptive loop gain selection for CLEAN deconvolution algorithm. Research in Astronomy and Astrophysics, 19(6), 079.

# Interférométrie : quelques résultats



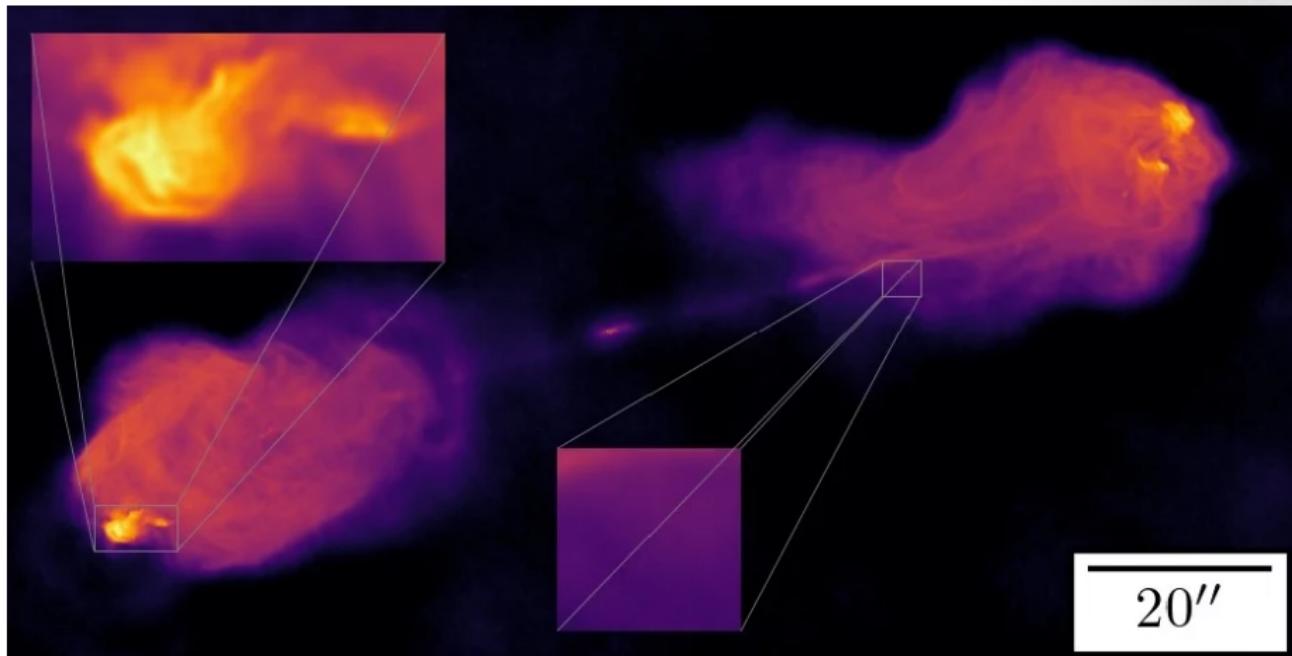
P. Arras *et al.*, Comparison of classical and Bayesian imaging in radio interferometry. Cygnus A with CLEAN and resolve, preprint ArXiv

# Interférométrie : quelques résultats



P. Arras et al., Comparison of classical and Bayesian imaging in radio interferometry. Cygnus A with CLEAN and resolve, preprint ArXiv

# Interférométrie : quelques résultats



P. Arras et al., Comparison of classical and Bayesian imaging in radio interferometry. Cygnus A with CLEAN and resolve, preprint ArXiv

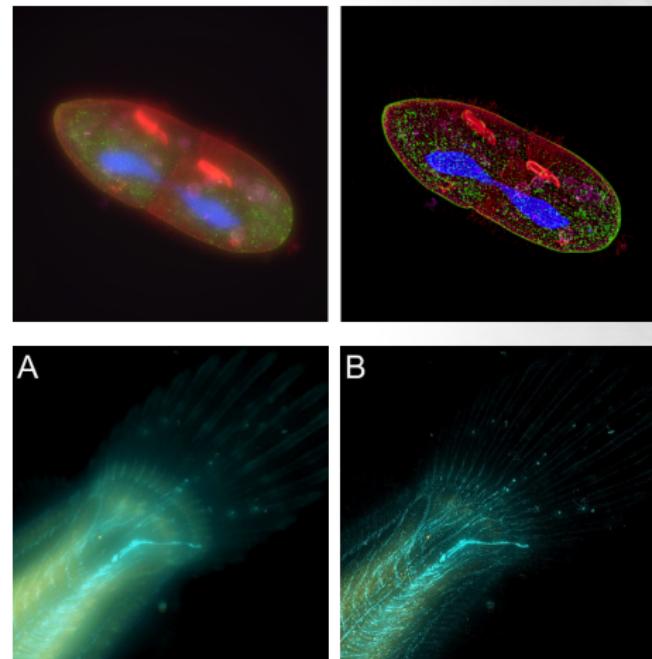
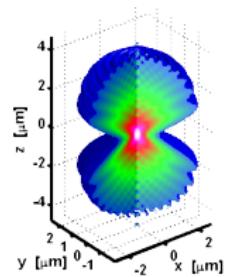
# Sommaire

- 1** Introduction aux problèmes inverses
- 2** Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- 3** Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- 4** Pour conclure

# Pourquoi la microscopie ?

Des phénomènes communs :

- ▶ Flou (en 3D)
- ▶ Bruit (aux faibles intensités)

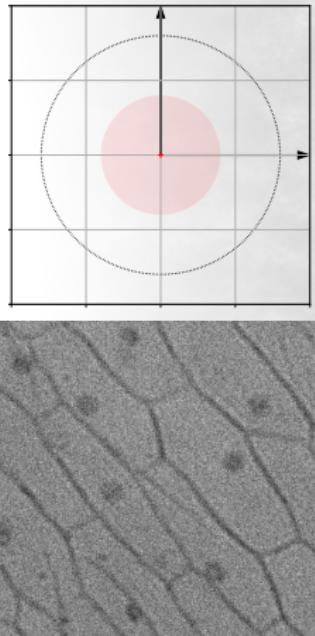
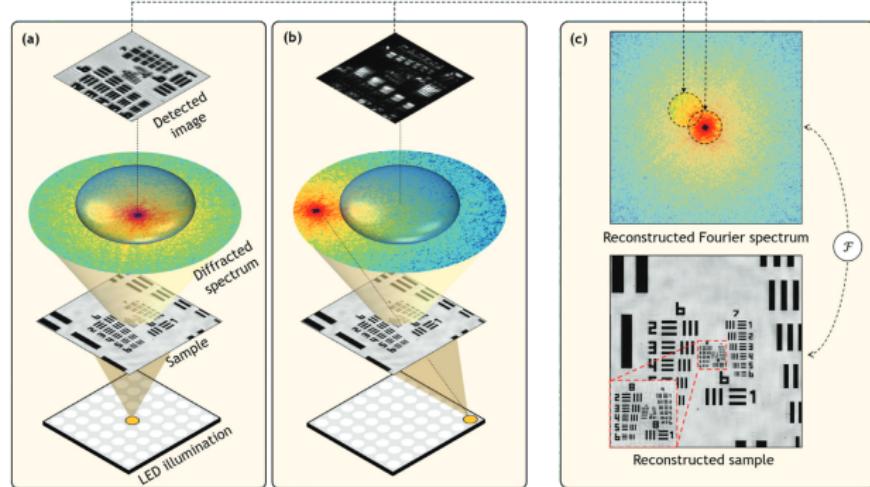


Wiki : Optical Transfer Function, image de Tom Vettenburg

Paramétrie, Leica Microsystems  
Exploring Microscopy Techniques Confocal, Widefield,  
Transmitted Light & Deconvolution, Claudia Florindo, 2021

# Microscopie et interférométrie : la ptychographie

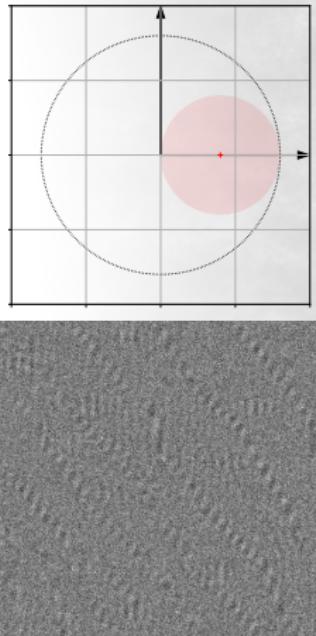
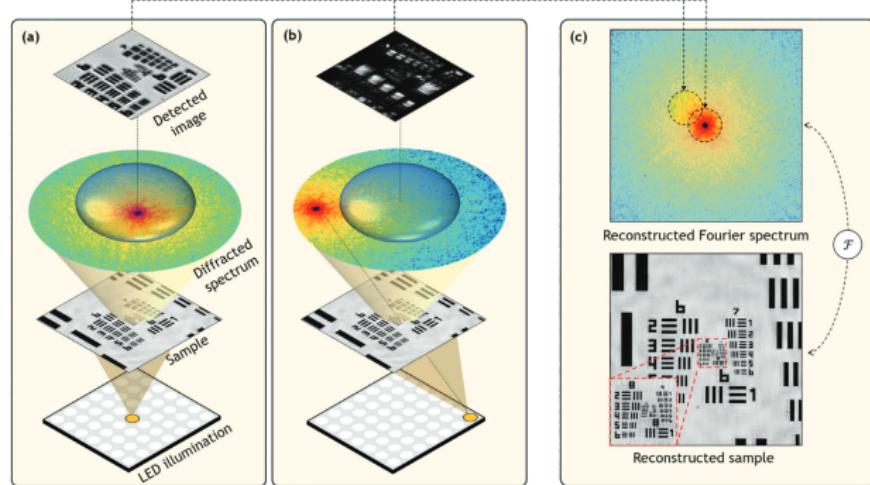
- ▶ sonder l'espace des fréquences
  - ▶ système dédié
  - ▶ une acquisition « par lot »
- interférométrie, en microscopie



Zhou, K. C., Aidukas, T., Loetgering, L., Wechsler, F., & Horstmeyer, R. (2022). Introduction to fourier ptychography : Part i. Microscopy Today, 30(3), 36-41.

# Microscopie et interférométrie : la ptychographie

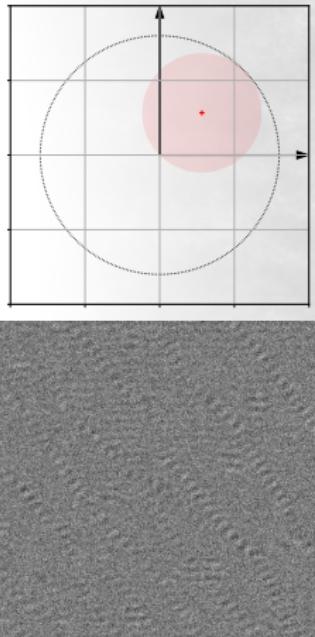
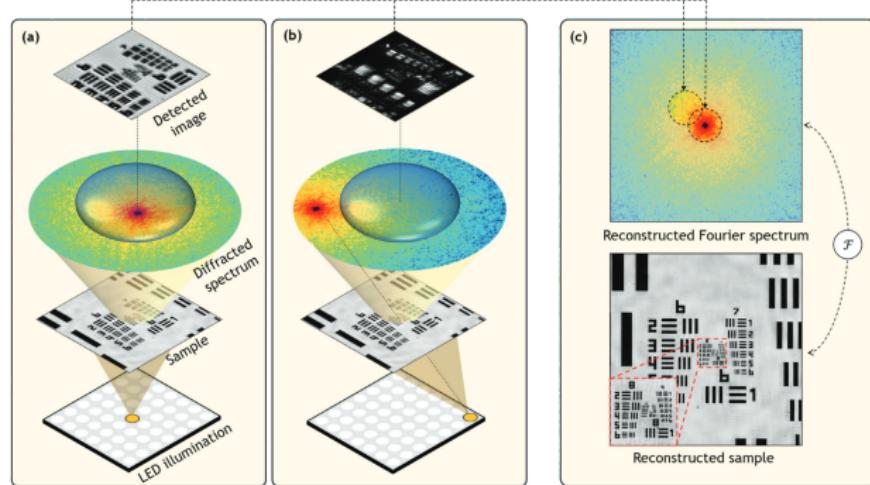
- ▶ sonder l'espace des fréquences
  - ▶ système dédié
  - ▶ une acquisition « par lot »
- interférométrie, en microscopie



Zhou, K. C., Aidukas, T., Loetgering, L., Wechsler, F., & Horstmeyer, R. (2022). Introduction to fourier ptychography : Part i. Microscopy Today, 30(3), 36-41.

# Microscopie et interférométrie : la ptychographie

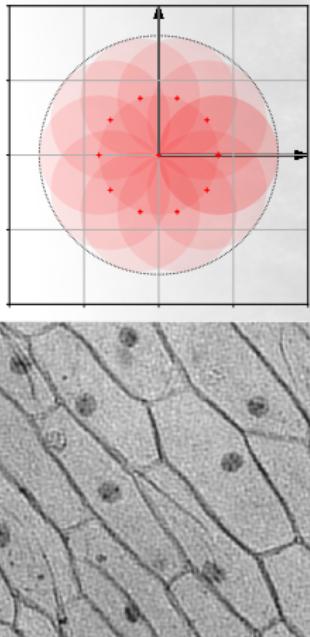
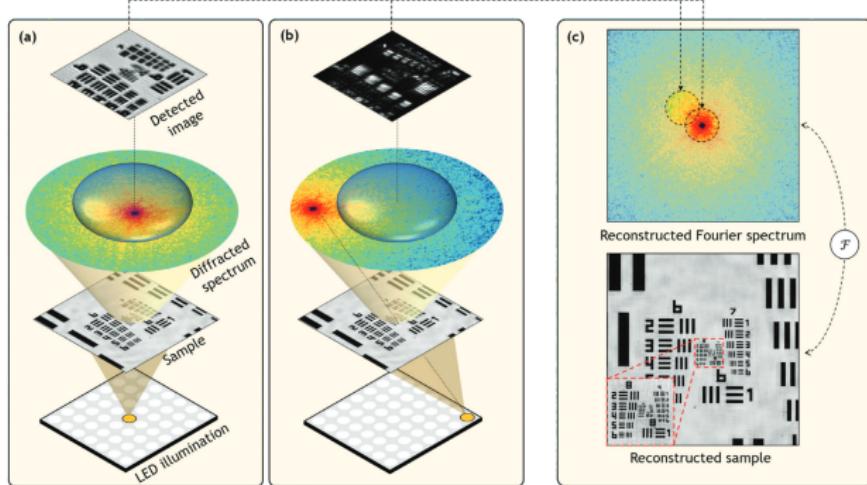
- ▶ sonder l'espace des fréquences
  - ▶ système dédié
  - ▶ une acquisition « par lot »
- interférométrie, en microscopie



Zhou, K. C., Aidukas, T., Loetgering, L., Wechsler, F., & Horstmeyer, R. (2022). Introduction to fourier ptychography : Part i. Microscopy Today, 30(3), 36-41.

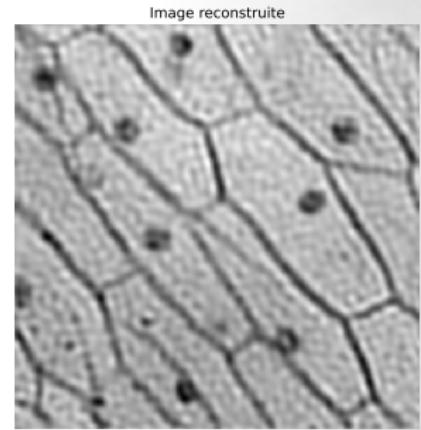
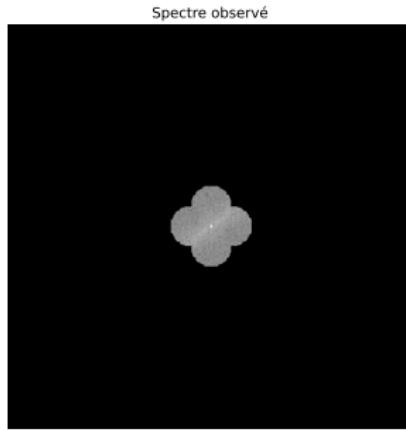
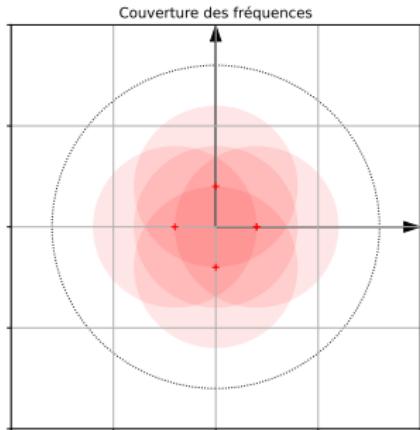
# Microscopie et interférométrie : la ptychographie

- ▶ sonder l'espace des fréquences
  - ▶ système dédié
  - ▶ une acquisition « par lot »
- interférométrie, en microscopie

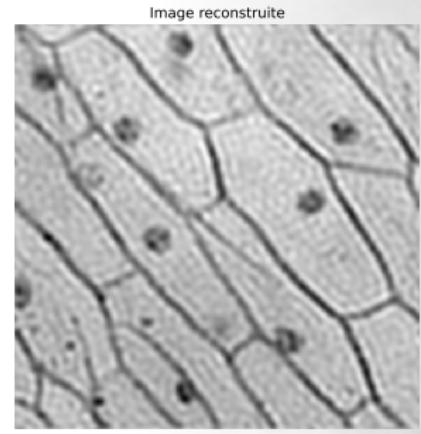
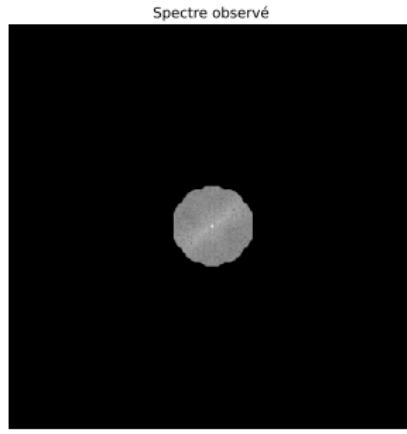
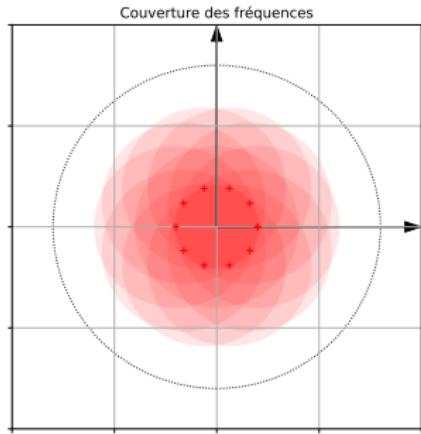


Zhou, K. C., Aidukas, T., Loetgering, L., Wechsler, F., & Horstmeyer, R. (2022). Introduction to fourier ptychography : Part i. Microscopy Today, 30(3), 36-41.

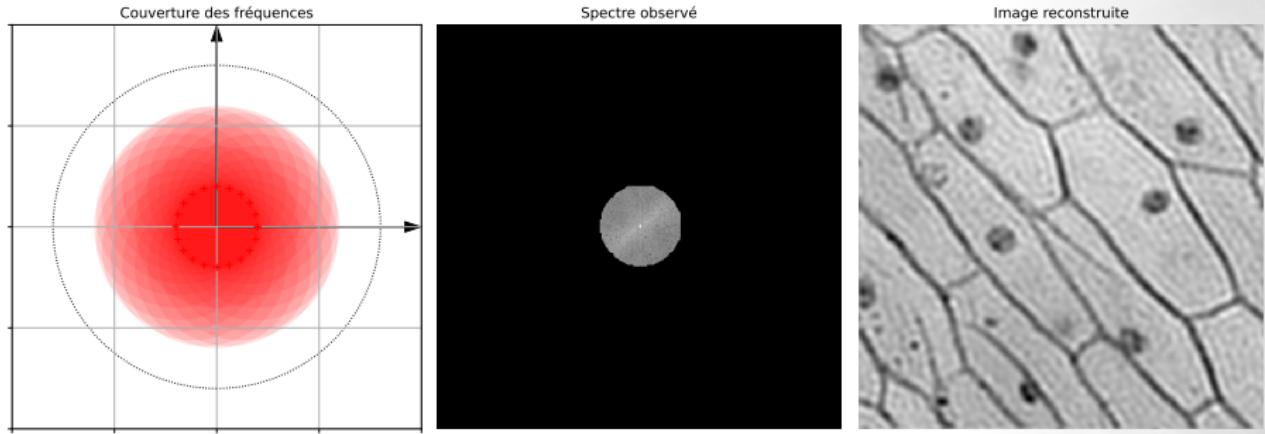
# Microscopie et interférométrie : la ptychographie



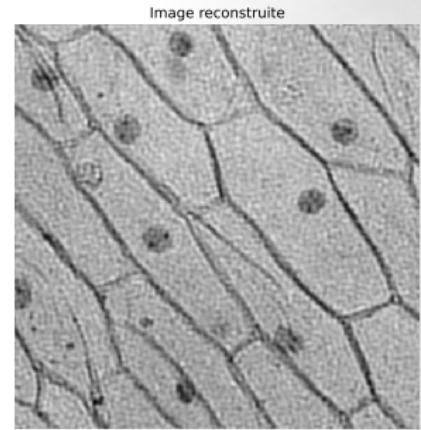
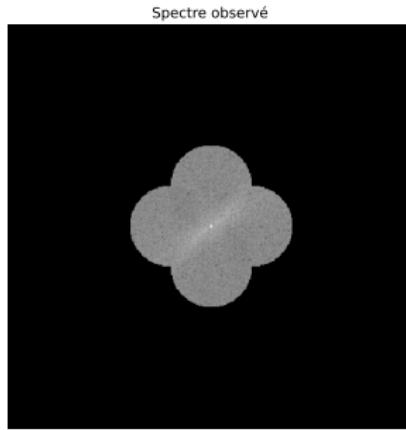
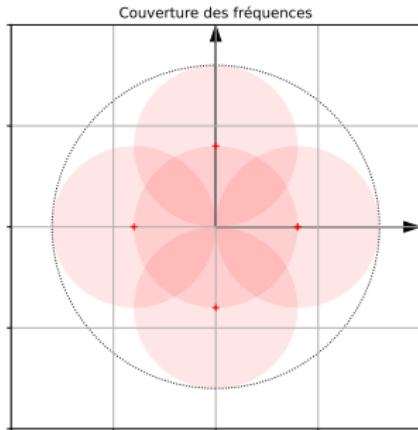
# Microscopie et interférométrie : la ptychographie



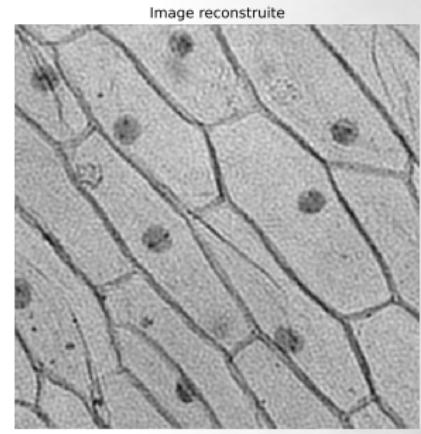
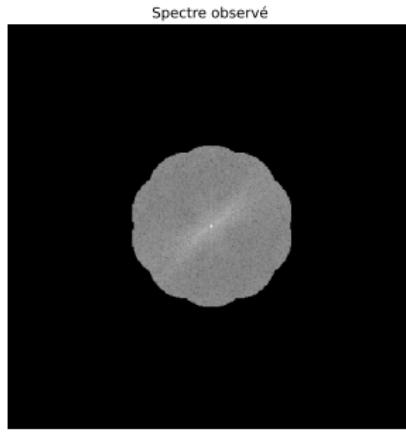
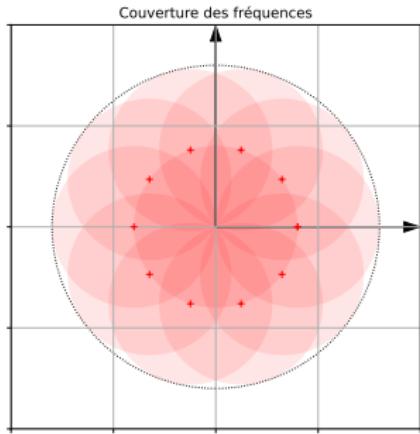
# Microscopie et interférométrie : la ptychographie



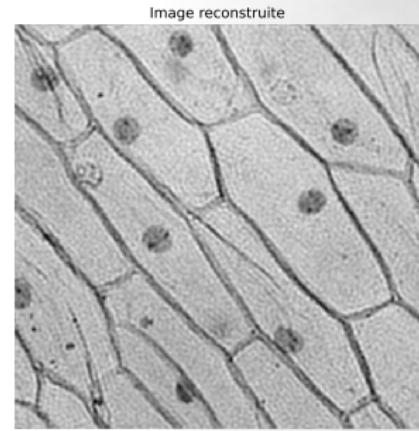
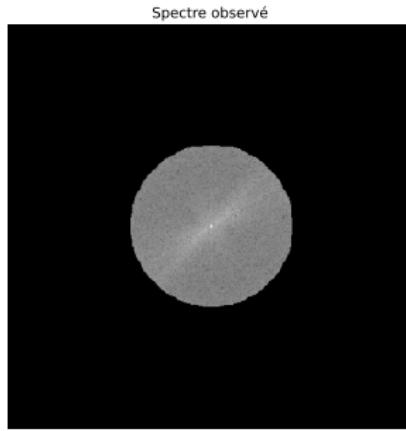
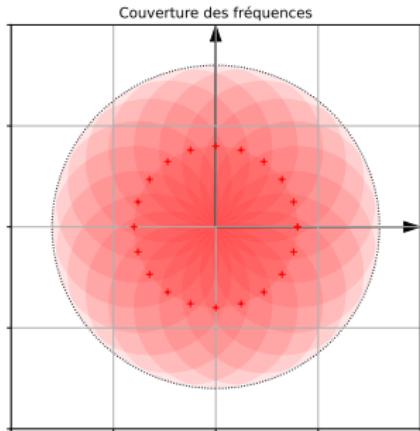
# Microscopie et interférométrie : la ptychographie



# Microscopie et interférométrie : la ptychographie

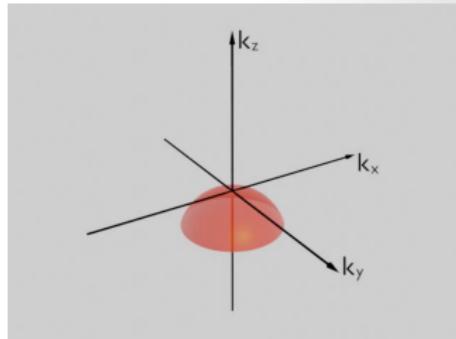
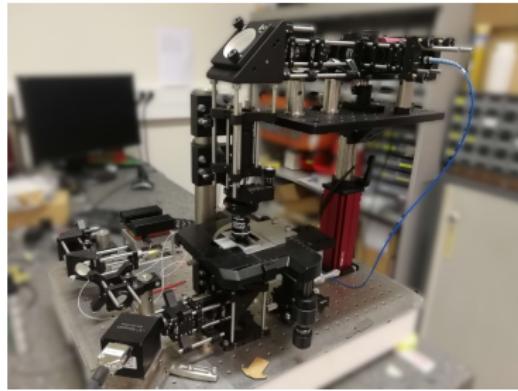


# Microscopie et interférométrie : la ptychographie

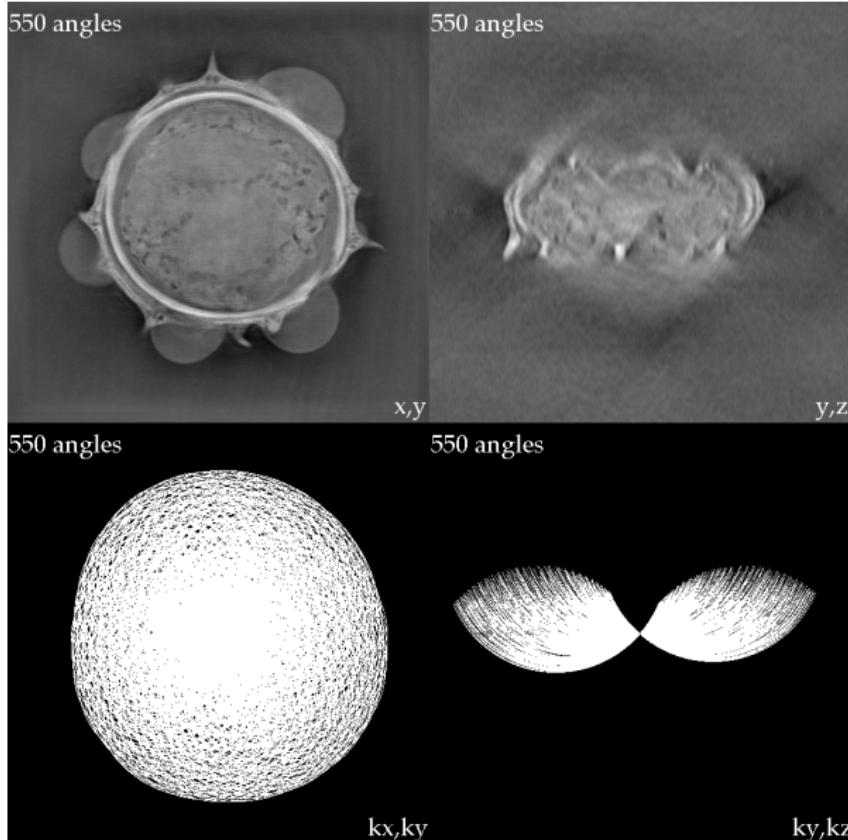


# Microscopie tomographique de diffraction (MTD)

- ▶ Une généralisation de la ptychographie
- ▶ Échantillonnage en 3 dimensions d'un échantillon



# Microscopie tomographique de diffraction (MTD) : exemple



N. Verrier, pollen de topinambour.

# Sommaire

- 1** Introduction aux problèmes inverses
- 2** Détection
  - Détection de galaxies
  - Détection de halos
  - Détection d'ondes gravitationnelles
- 3** Déconvolution
  - Un télescope au sol
  - En radio-astronomie
  - En microscopie
- 4** Pour conclure

# Récap

« Problèmes inverses en imagerie astronomique »

- ▶ pas uniquement en imagerie
- ▶ ni en astronomie

# Récap

## « Problèmes inverses en imagerie astronomique »

- ▶ pas uniquement en imagerie
- ▶ ni en astronomie

Plusieurs problèmes :

- ▶ détection
- ▶ comptage
- ▶ déconvolution

... pas toujours indépendants !

# Récap

## « Problèmes inverses en imagerie astronomique »

- ▶ pas uniquement en imagerie
- ▶ ni en astronomie

Plusieurs problèmes :

- ▶ détection
- ▶ comptage
- ▶ déconvolution

... pas toujours indépendants !

Une question de représentation :

- ▶ en intensité
- ▶ morphologique
- ▶ fréquentielle

# Récap

## « Problèmes inverses en imagerie astronomique »

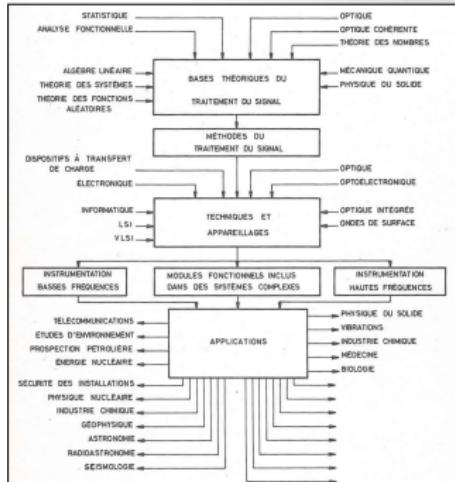
- ▶ pas uniquement en imagerie
- ▶ ni en astronomie

Plusieurs problèmes :

- ▶ détection
  - ▶ comptage
  - ▶ déconvolution
- ... pas toujours indépendants !

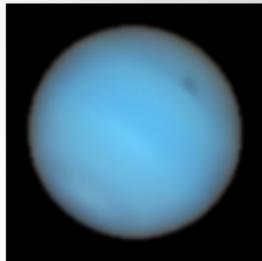
Une question de représentation :

- ▶ en intensité
- ▶ morphologique
- ▶ fréquentielle



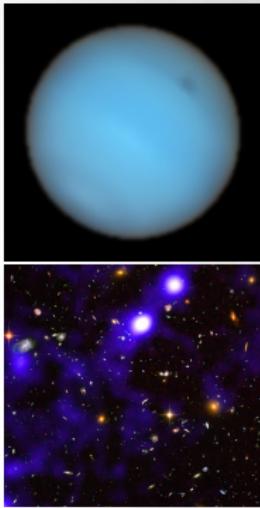
Quelques actualités :

- ▶ Une mystérieuse tache sombre de Neptune détectée pour la première fois depuis la Terre, ESO, 2023



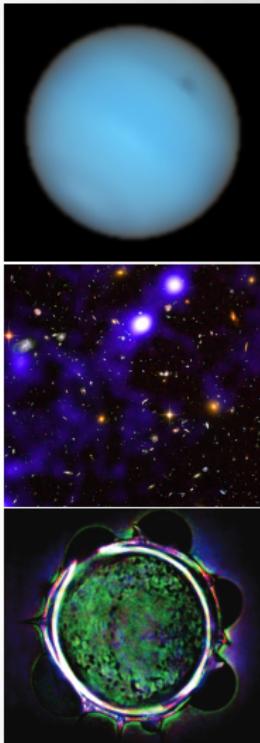
Quelques actualités :

- ▶ Une mystérieuse tache sombre de Neptune détectée pour la première fois depuis la Terre, ESO, 2023
- ▶ La toile cosmique – conférence du musée des confluences, R. Bacon, 2022



Quelques actualités :

- ▶ Une mystérieuse tache sombre de Neptune détectée pour la première fois depuis la Terre, ESO, 2023
- ▶ La toile cosmique – conférence du musée des confluences, R. Bacon, 2022
- ▶ Vers un microscope optique universel « tout-en-un » ?  
The Conversation, avril 2023



# Merci !

Et merci aux collègues :

- ▶ Céline Meillier (ICube, Strasbourg)
- ▶ Nicolas Verrier (IRIMAS ; Mulhouse)

# Merci !

Et merci aux collègues :

- ▶ Céline Meillier (ICube, Strasbourg)
- ▶ Nicolas Verrier (IRIMAS ; Mulhouse)

