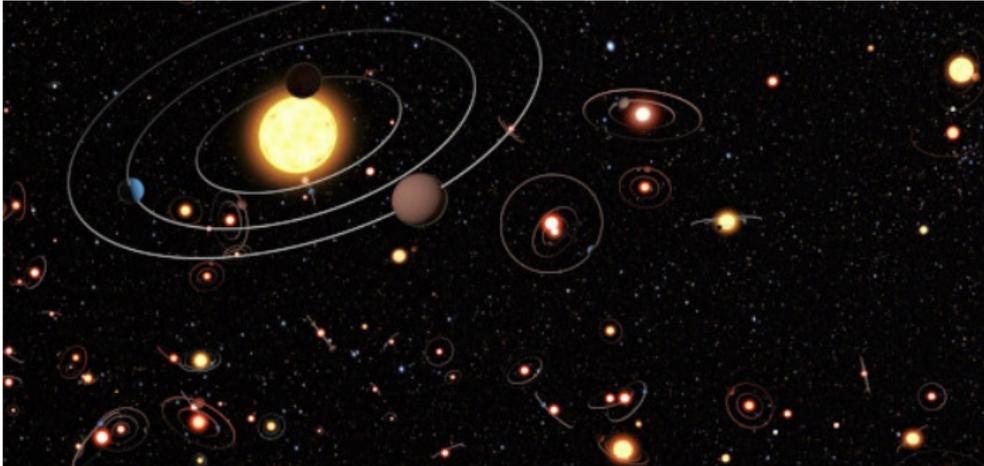


La détection d'exoplanètes



Loïc DENIS



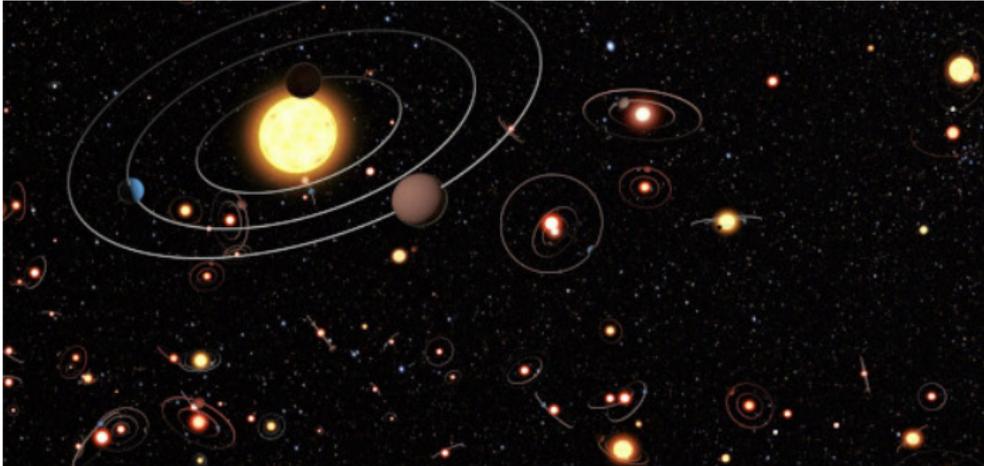
vue d'artiste (©ESO/M. Kornmesser)

jeudi 25 mai 2023

La détection d'exoplanètes



Loïc DENIS



vue d'artiste (©ESO/M. Kornmesser)

jeudi 25 mai 2023



Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

 Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Introduction :



- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

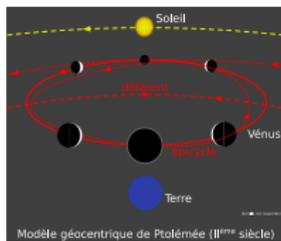
1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

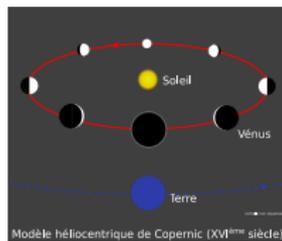
Impact de la technique sur notre représentation de l'Univers



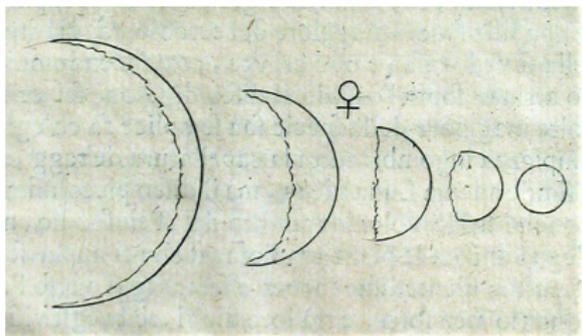
Portrait de Galilée par Justus Sustermans, 1636



Modèle géocentrique de Ptolémée (II^{ème} siècle)



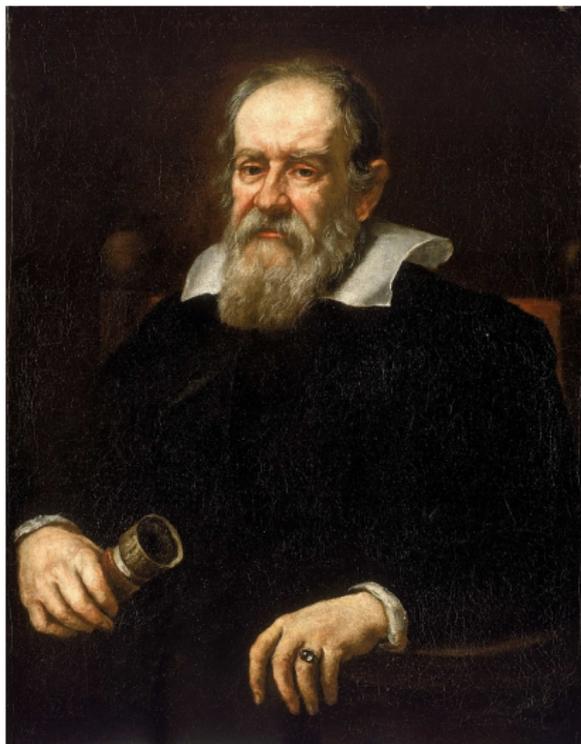
Modèle héliocentrique de Copernic (XVI^{ème} siècle)



Phases de Vénus, *The Assayer*, Galilée, 1623
bibliothèque de l'Université d'Oxford

Il y a 400 ans...

Impact de la technique sur notre représentation de l'Univers



Portrait de Galilée par Justus Sustermans, 1636



Observation avec un petit télescope ©Bob King



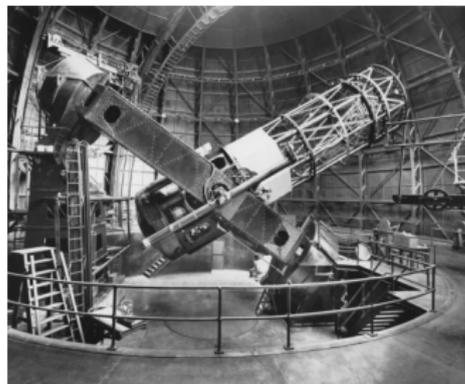
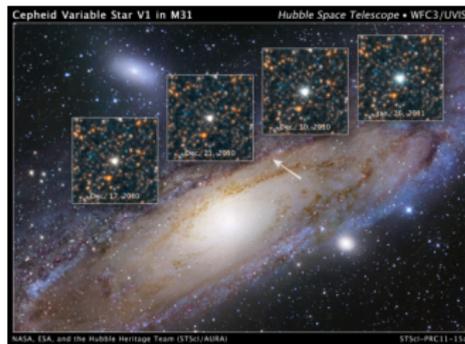
Observations de Galilée des 4 plus grosses lunes de Jupiter ©Royal Astronomical Society

Il y a 400 ans...

Impact de la technique sur notre représentation de l'Univers



Portrait d'Edwin Hubble
par Johan Hagemeyer



L'observation d'étoiles variables permet
à Hubble de montrer l'existence d'autres galaxies

Il y a 100 ans...



Impact de la technique sur notre représentation de l'Univers

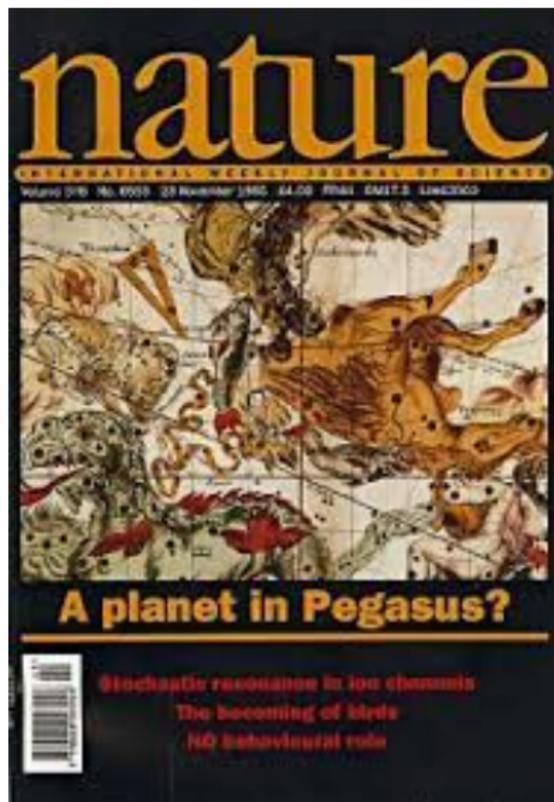


© Nobel Media. Photo: A.
Mahmoud
Michel Mayor



© Nobel Media. Photo: A.
Mahmoud
Didier Queloz

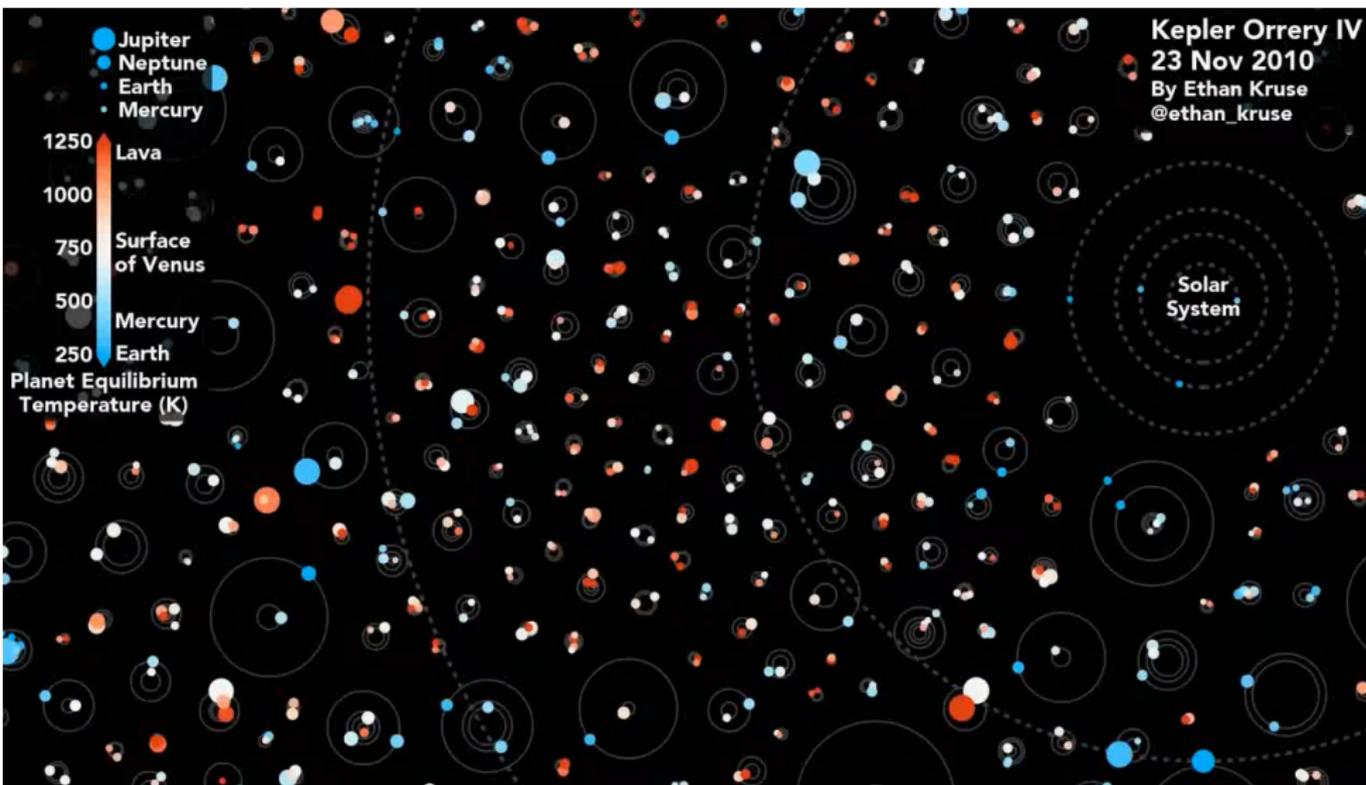
Les lauréats du prix Nobel de physique 2019 pour leur détection, en 1995, de la 1^{ère} exoplanète tournant autour d'une étoile analogue au Soleil



Publication de la découverte ©Springer Nature

Il y a un peu moins de 30 ans...

Impact de la technique sur notre représentation de l'Univers



Introduction :



- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes



Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Qu'est-ce qu'une planète ?



Montage illustrant le mouvement rétrograde de Mars
©T. Tézé

Depuis longtemps les Hommes ont repéré des "astres errants" dont la position change par rapport aux constellations :

- Mercure
- Vénus
- Mars
- Jupiter
- Saturne

Le système solaire

Les planètes intérieures :



©NASA-APL ; ESA/MPS/DLR/IDA, M. Pérez-Ayúcar & C. Wilson ; NASA ; ESA/Rosetta OSIRIS team

Les planètes extérieures :

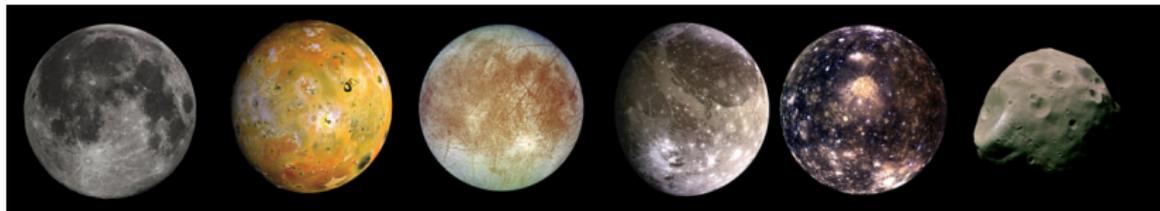


©NASA, ESA, and A. Simon ; NASA/JPL/Space Science Institute ; DLR ; NASA/JPL

Le système solaire

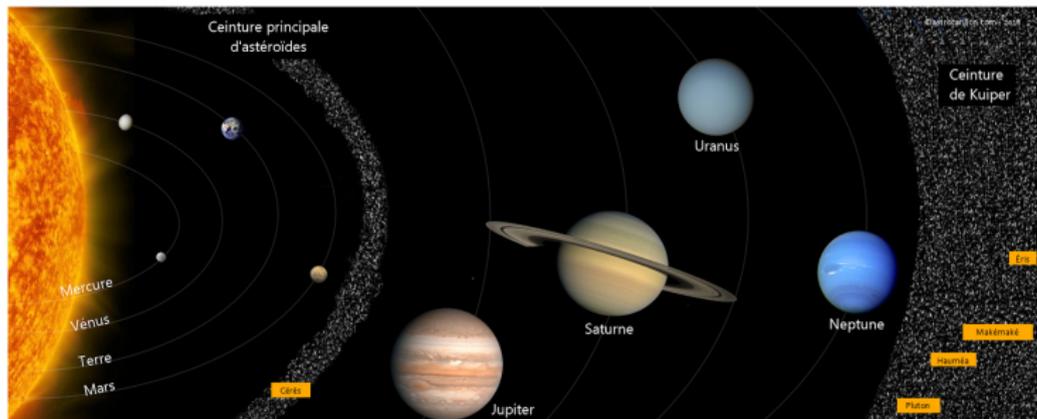
On trouve d'autres objets dans le système solaire :

– des lunes :



©Gregory H. Revera ; NASA/JPL-Caltech ; ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

– des astéroïdes et des comètes



Planètes telluriques

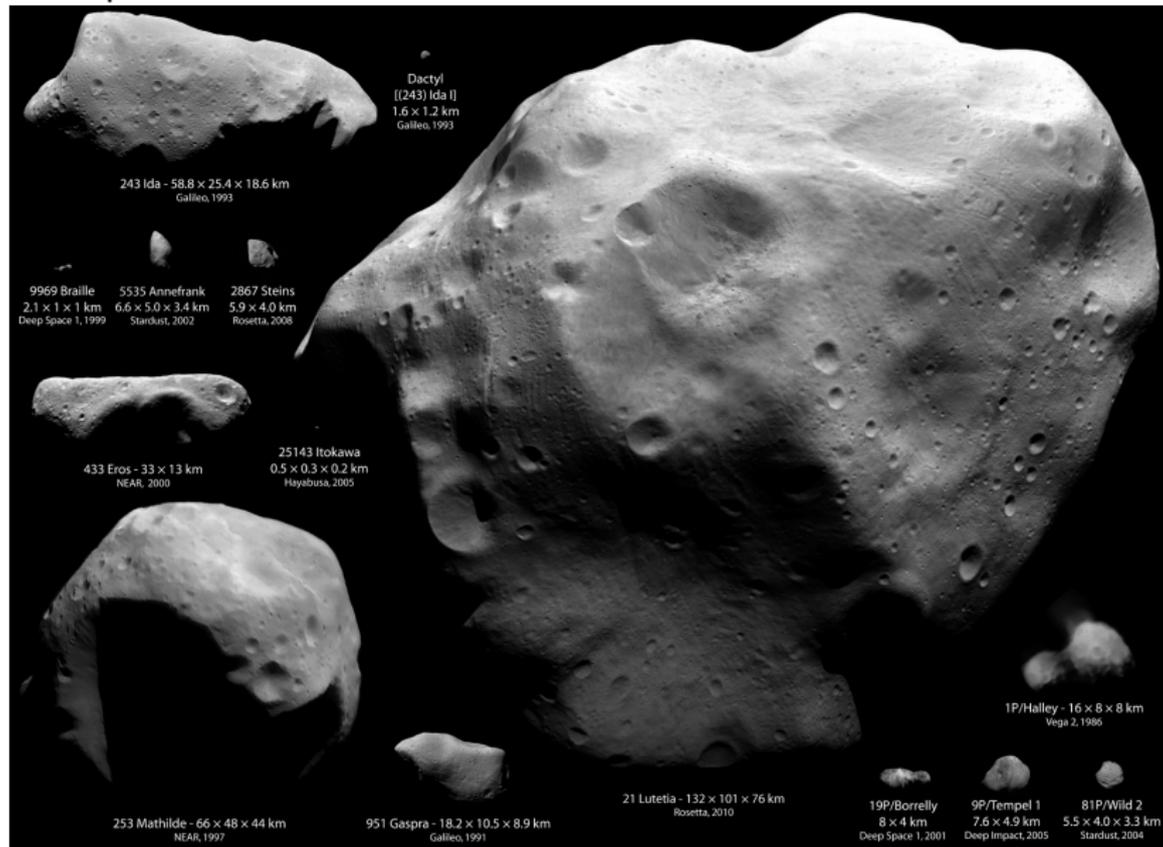
Planète naine
Astéroïdes

Planètes géantes

Planètes naines
Plutoïdes

Le système solaire

Exemples d'astéroïdes et de comètes :

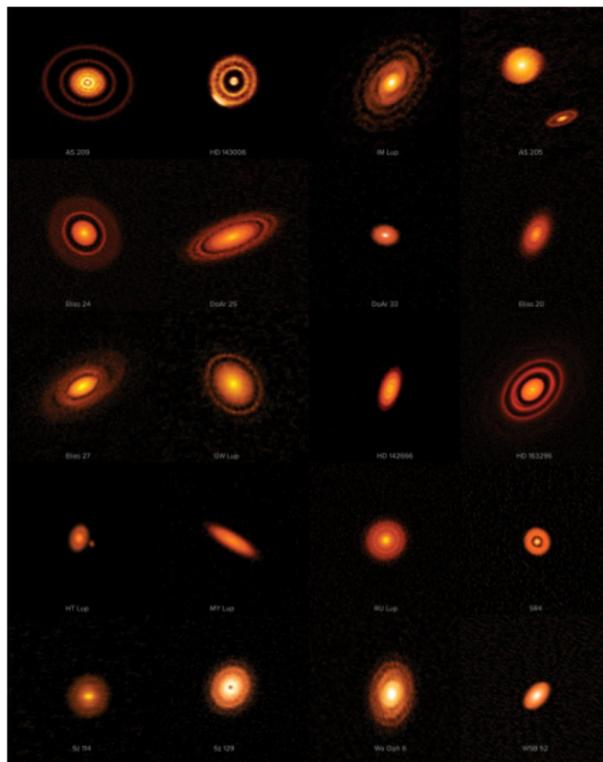


La formation des étoiles et des planètes



La formation des étoiles et des planètes

C'est dans le disque entourant les étoiles jeunes que naissent les planètes.



Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes



Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes



Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

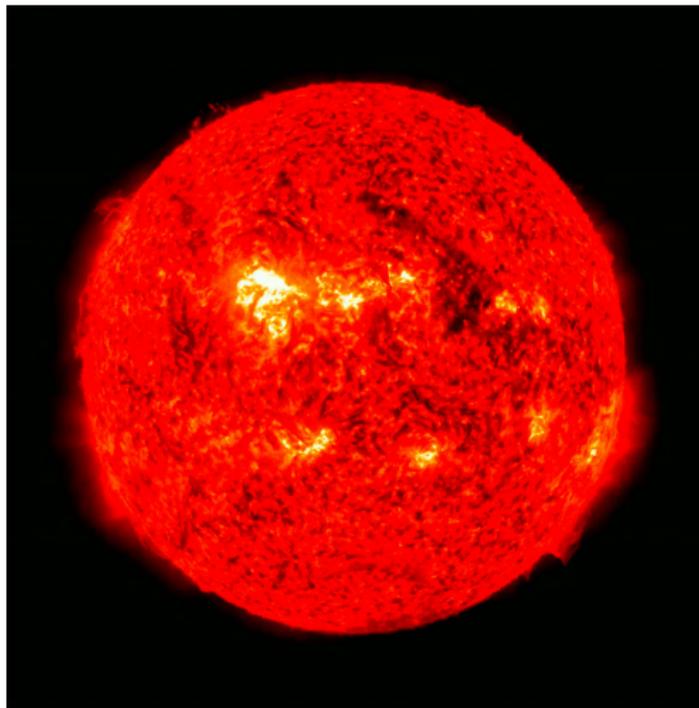
Comment détecter une exoplanète ?



1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

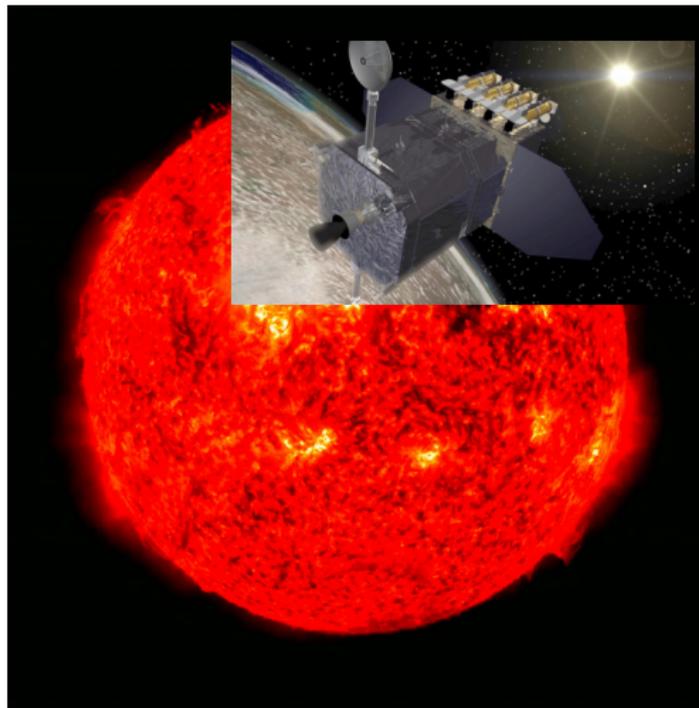
Le transit des planètes



Observation du transit de Vénus en 2012 (UV, Solar Dynamics Observatory)
©NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

On parle de transit quand une planète passe entre l'observateur et le soleil : ça a été le cas de Vénus en 2004 puis en 2012.

Le transit des planètes

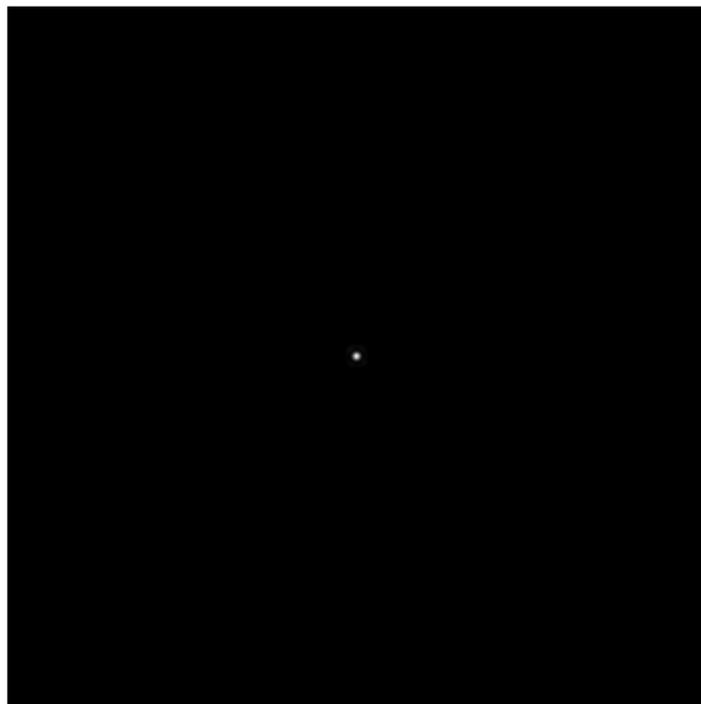


Observation du transit de Vénus en 2012 (UV, Solar Dynamics Observatory)

©NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

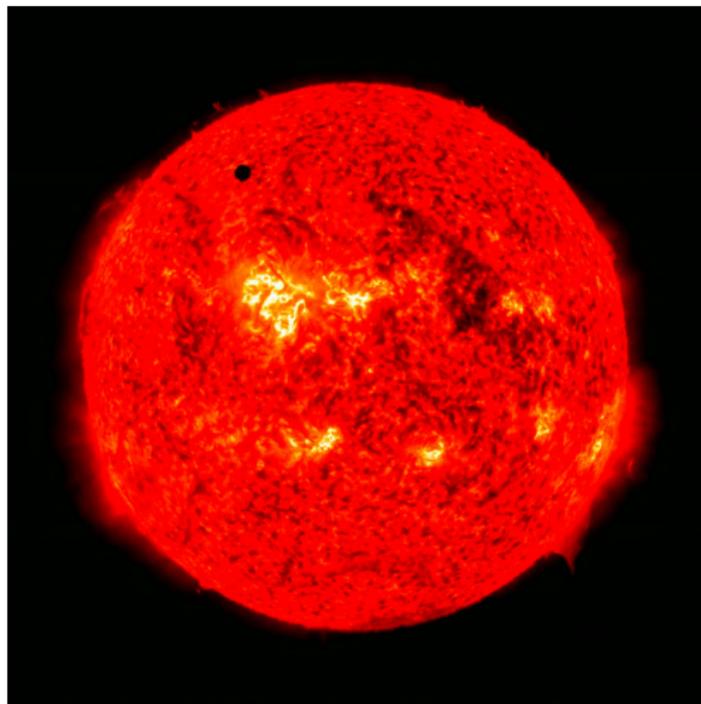
On parle de transit quand une planète passe entre l'observateur et le soleil : ça a été le cas de Vénus en 2004 puis en 2012.

Le transit des planètes



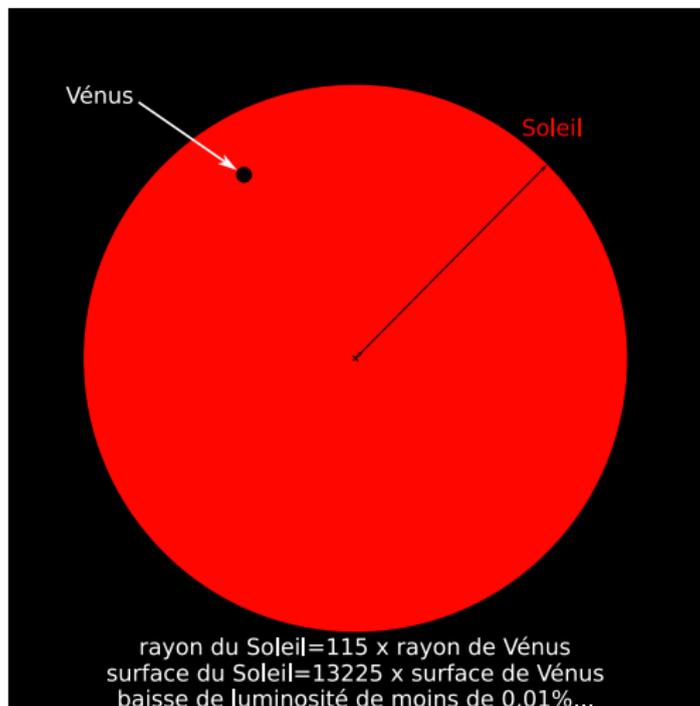
Le transit d'une planète comme Vénus devant son soleil,
vu depuis notre système solaire. . .

Le transit des planètes



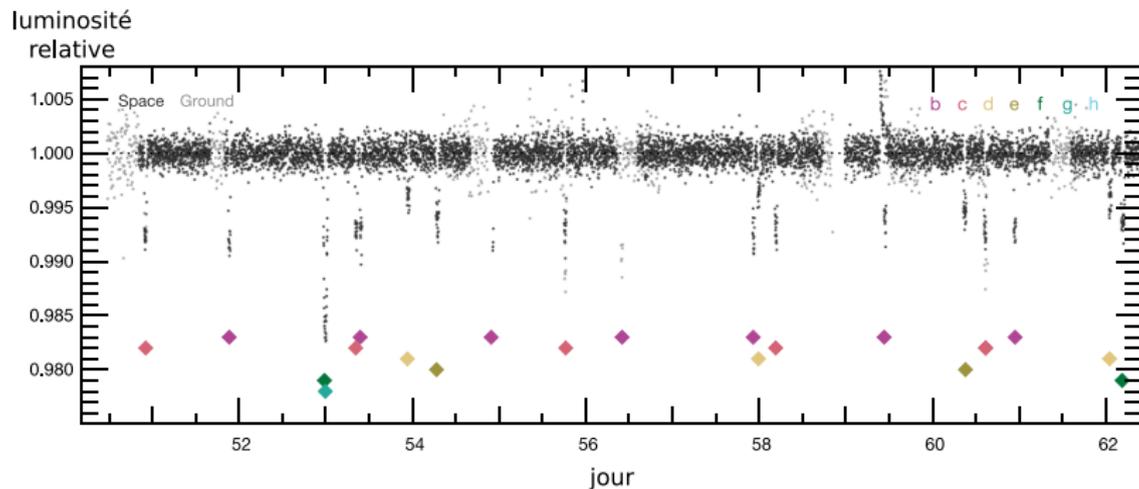
la variation de luminosité est très faible. . .

Le transit des planètes



la variation de luminosité est très faible. . .

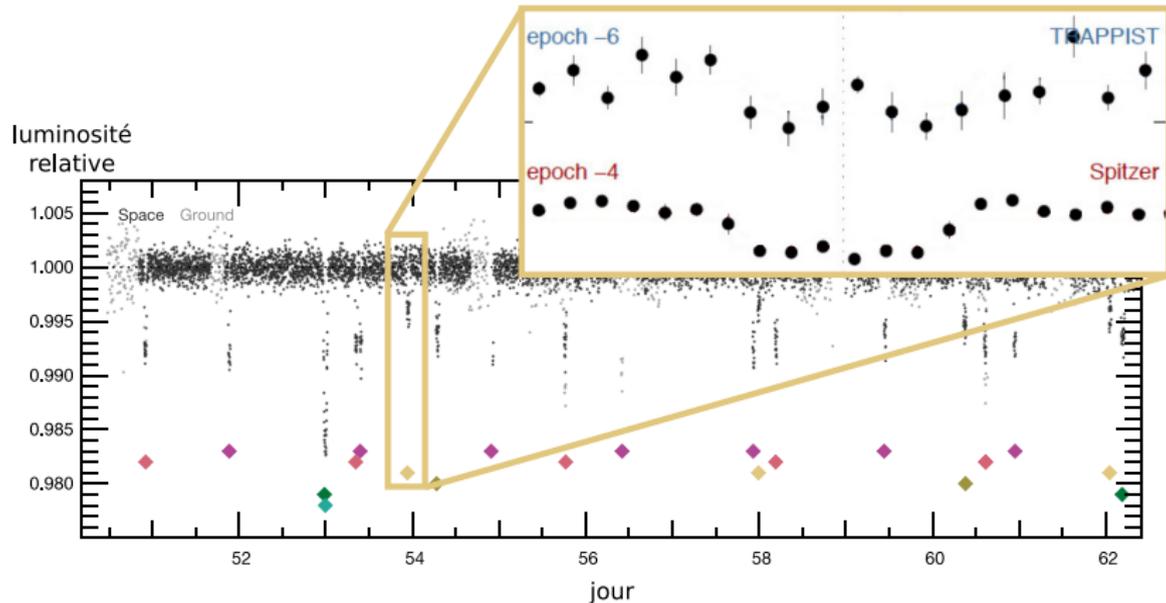
Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



source : Gillon et al., Nature, 2017

- il faut limiter/compenser les sources de fluctuation
 ↪ faire la mesure depuis l'espace
- et que l'exoplanète passe devant son étoile (observation dans le plan orbital, période orbitale suffisamment courte)

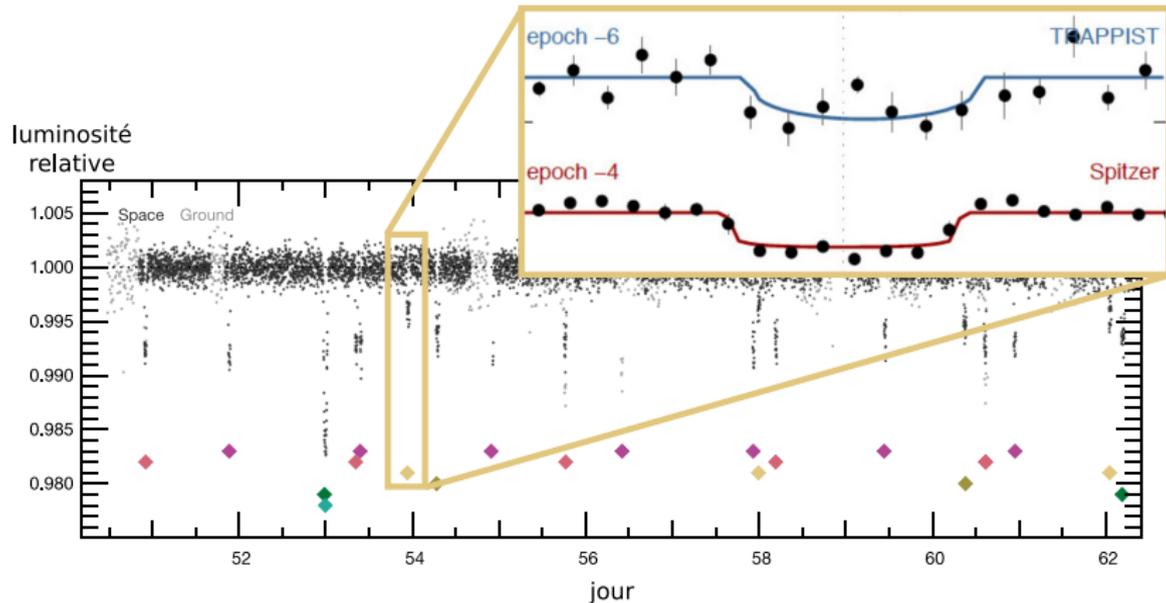
Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



source : Gillon et al., Nature, 2017

- il faut limiter/compenser les sources de fluctuation
 ↔ faire la mesure depuis l'espace
- et que l'exoplanète passe devant son étoile (observation dans le plan orbital, période orbitale suffisamment courte)

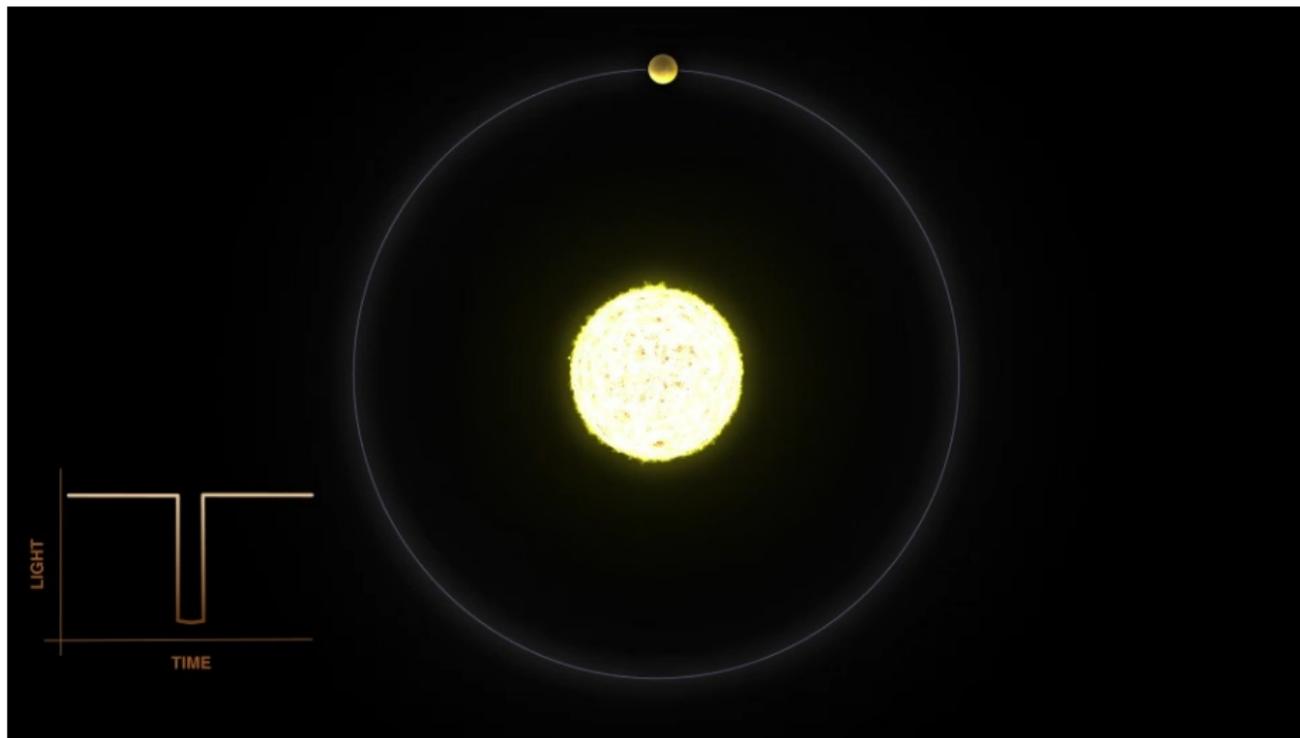
Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



source : Gillon et al., Nature, 2017

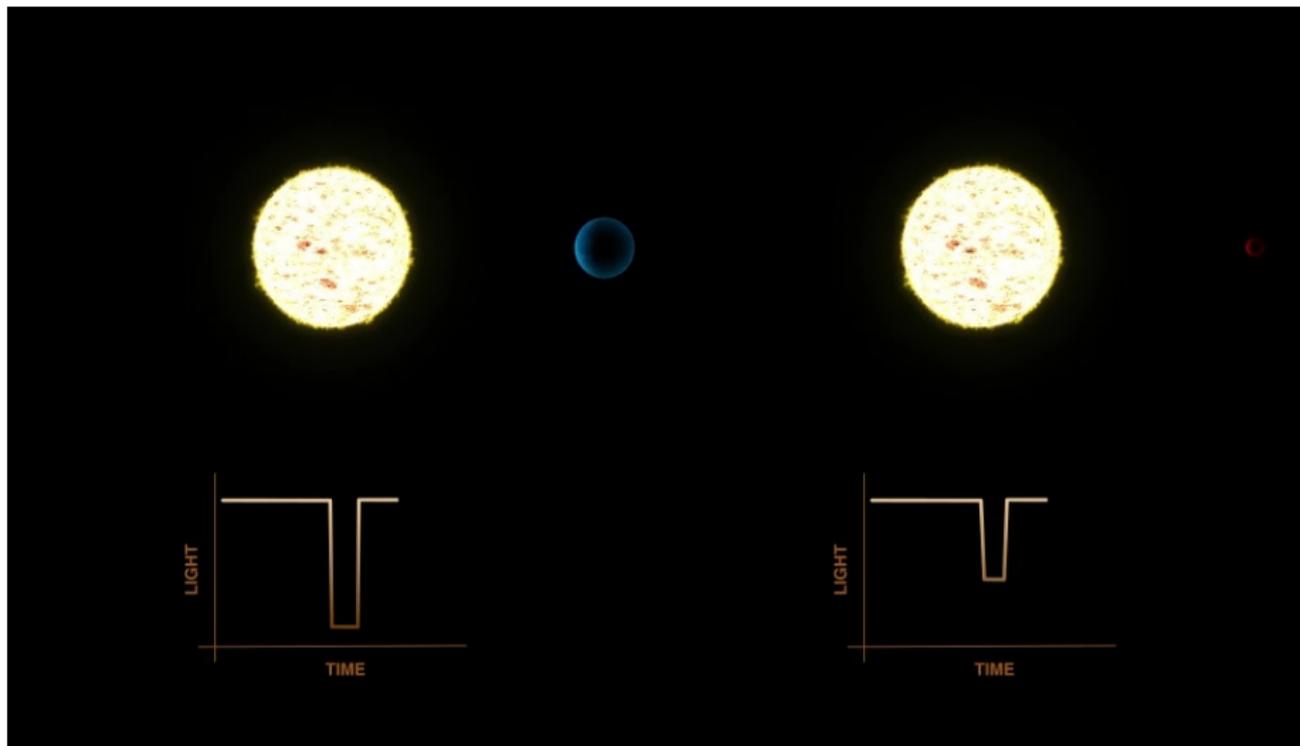
- il faut limiter/compenser les sources de fluctuation
 ↪ faire la mesure depuis l'espace
- et que l'exoplanète passe devant son étoile (observation dans le plan orbital, période orbitale suffisamment courte)

Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



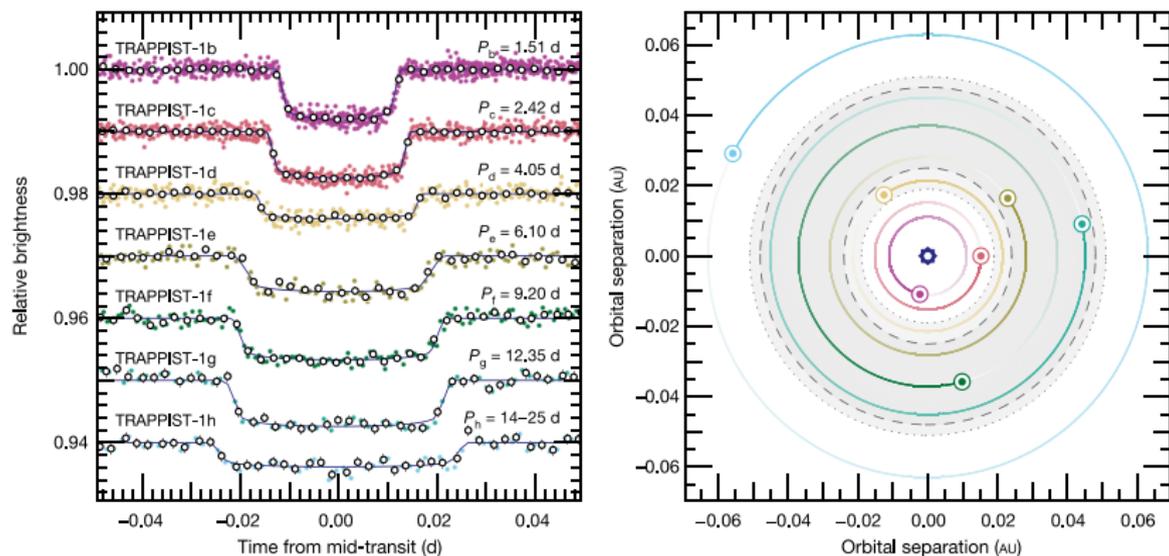
©NASA

Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



©NASA

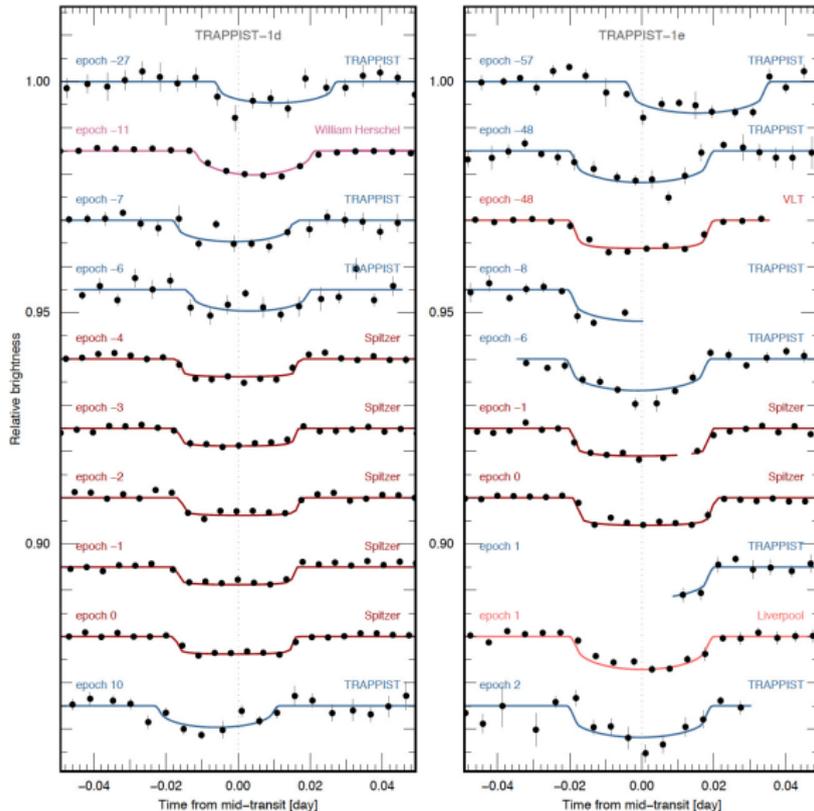
Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



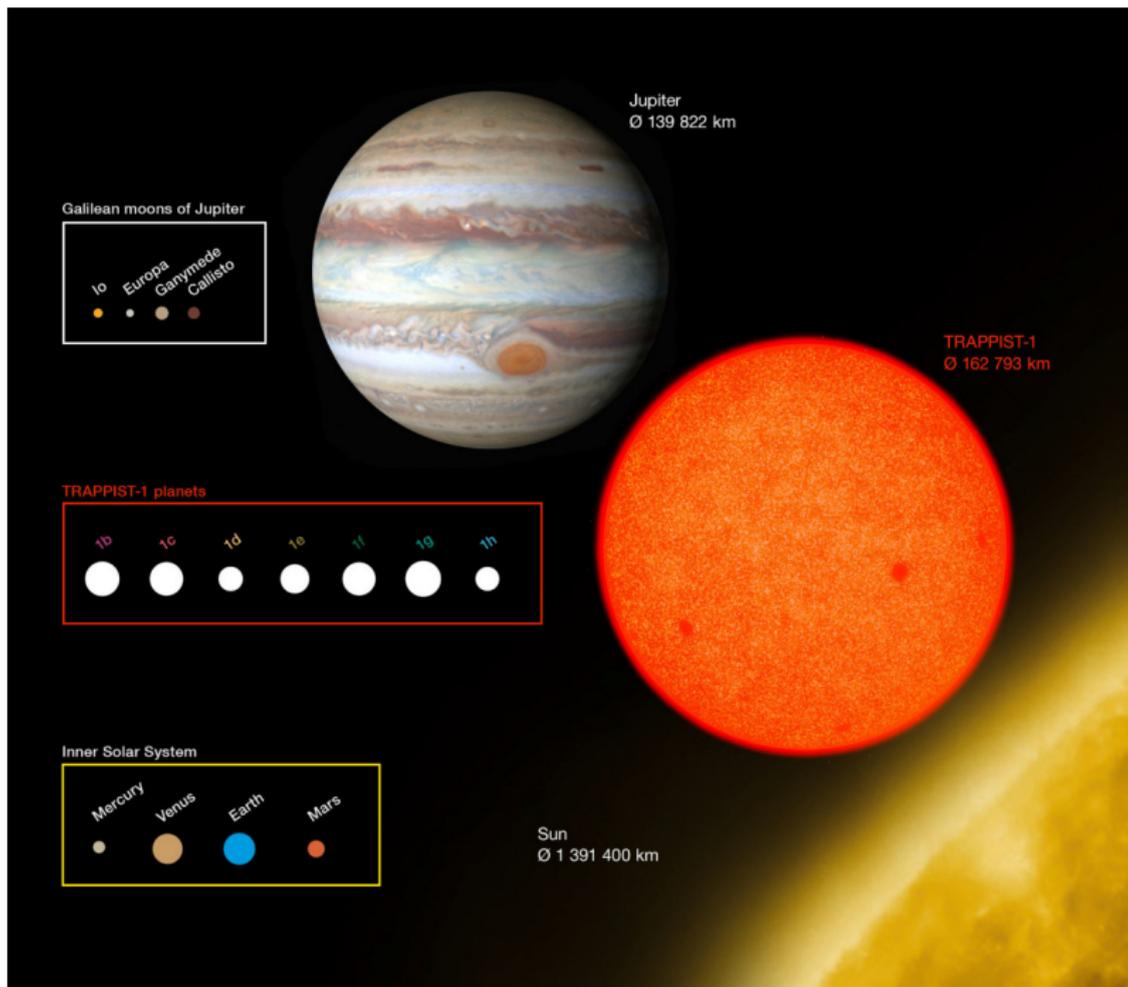
source : Gillon et al., Nature, 2017

Le système de 7 planètes détectées autour de TRAPPIST-1.

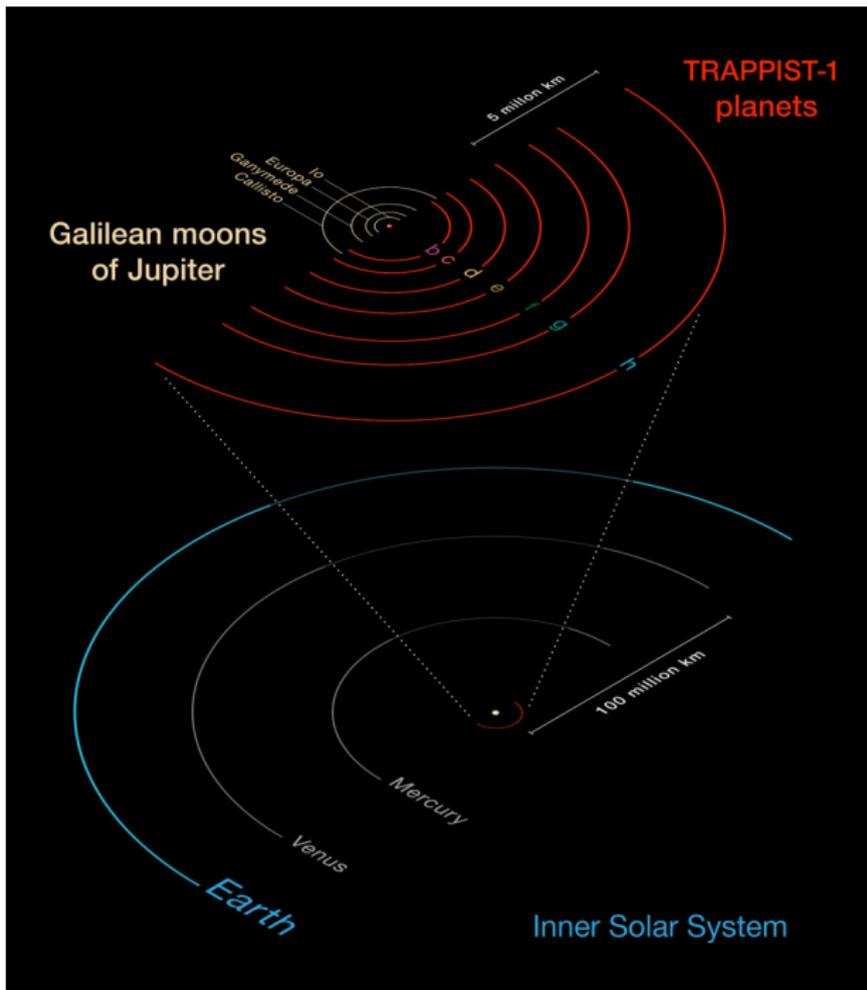
Détection d'exoplanètes par la méthode du transit



source : Gillon et al., Nature, 2017



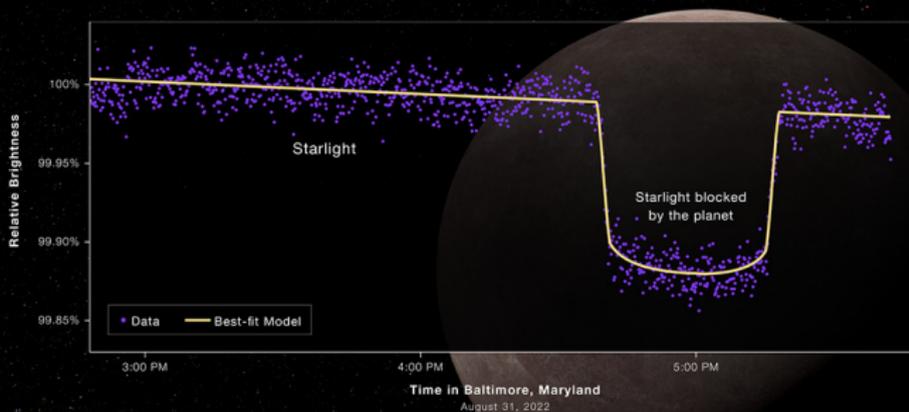
Comparaison de la taille des planètes du système Trappist-1. ©ESO / O. Furtak.



Comparaison des orbites des planètes du système Trappist-1. ©ESO / O. Furtak.

ROCKY EXOPLANET LHS 475 b TRANSIT LIGHT CURVE

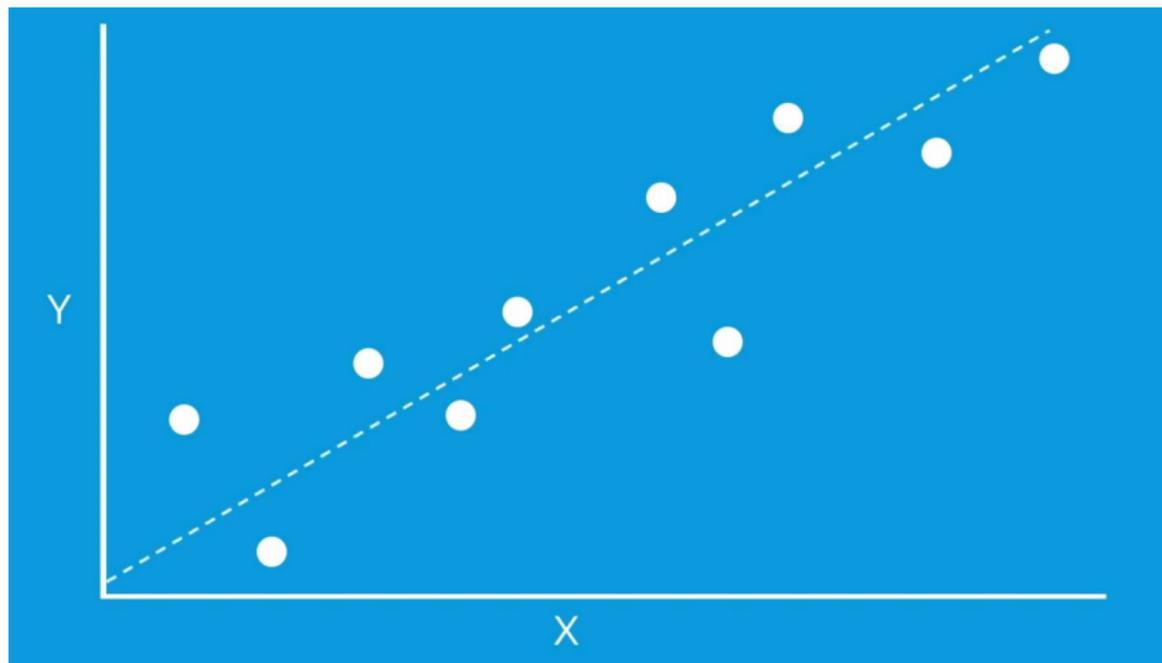
NIRSpec | Bright Object Time-Series Spectroscopy



WEBB
SPACE TELESCOPE

Une illustration d'un transit observé par le télescope spatial James Webb en août 2022, permettant de confirmer la présence d'une exoplanète.

L'ajustement d'un modèle sur des mesures expérimentales



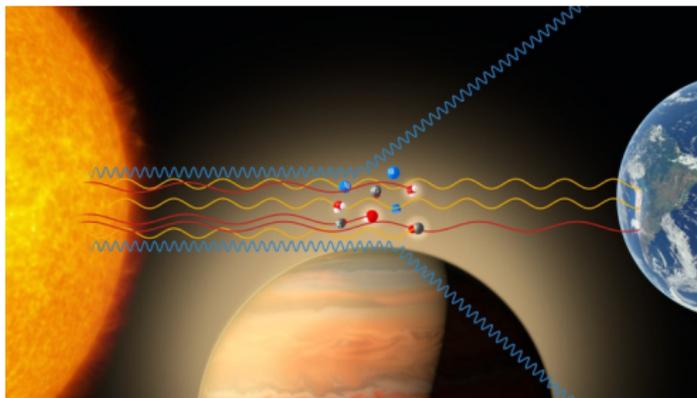
source : vidéo YouTube de AlphaOpt <https://www.youtube.com/watch?v=S0ptaAXNxBU>

Détection d'exoplanètes par la méthode du transit

La méthode des transits donne accès à la **taille** et à la période orbitale.

⚠ ne s'applique qu'à la fraction des systèmes planétaires vus sur la tranche. . .

Si l'exoplanète possède une atmosphère, l'analyse de la lumière qui l'a traversée peut permettre de détecter la présence de certaines molécules.



©ESO/M. Kornmesser

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?



1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Introduction :

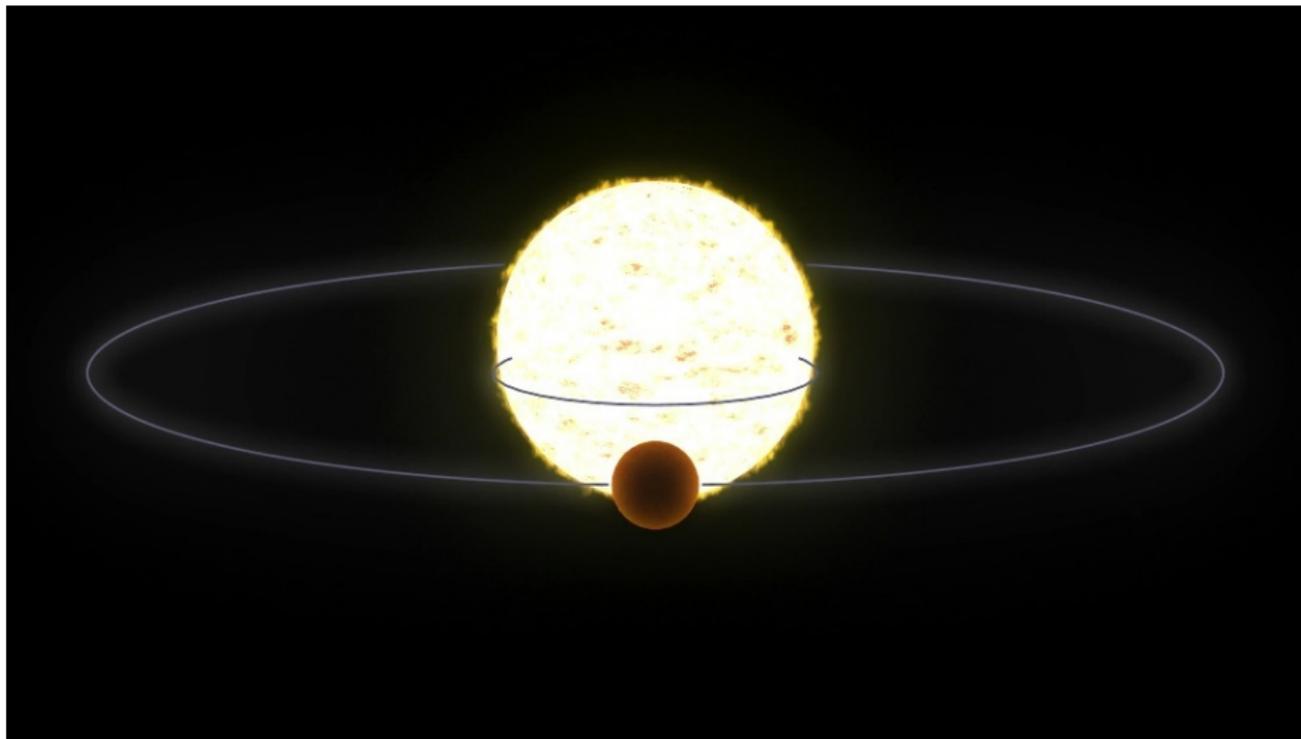
- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

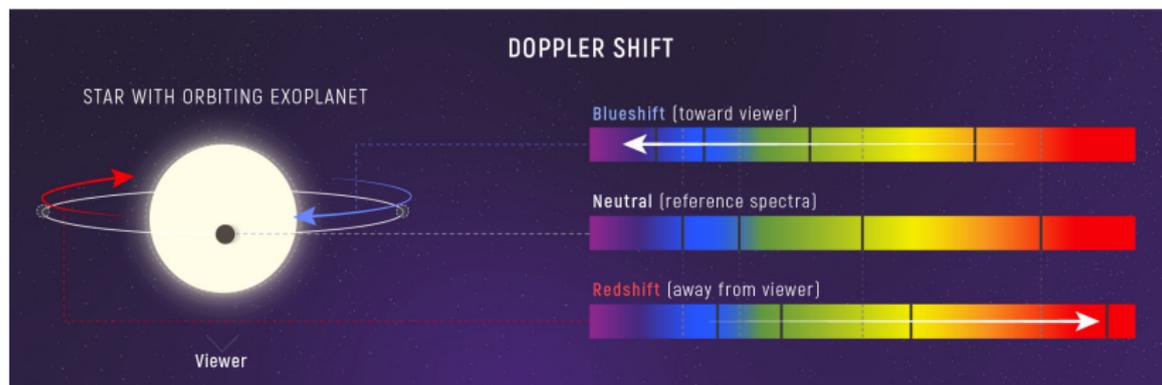
Détection du mouvement de l'étoile par astrométrie



©NASA

Mesure des vitesses radiales

La vitesse de rapprochement ou d'éloignement de l'étoile peut être mesurée par effet Doppler :



©NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)

Principe de dispersion de la lumière



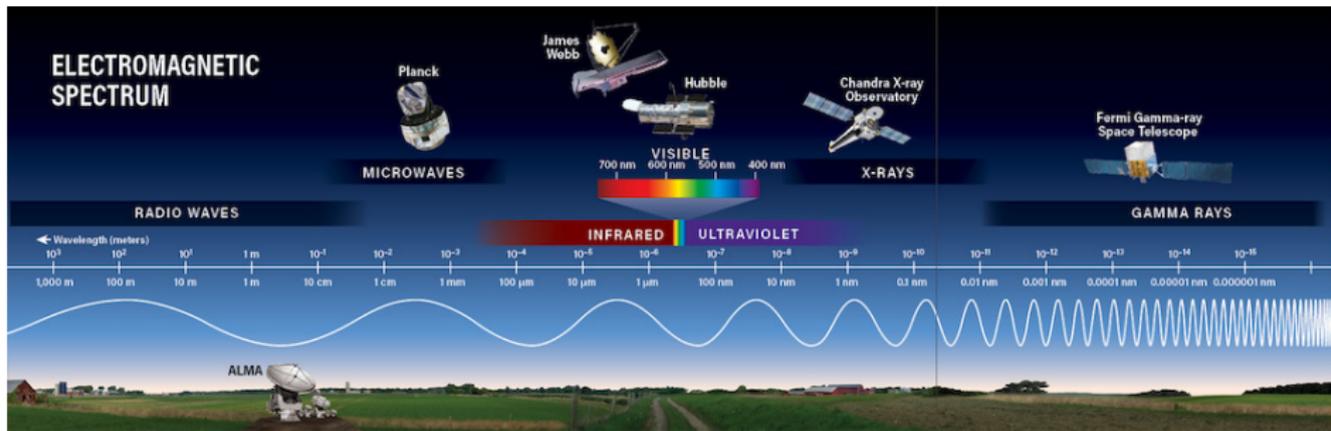
Un prisme décompose la lumière en blanche en un arc-en-ciel de couleurs :
les différentes composantes spectrales

Principe de dispersion de la lumière



Un CD ou DVD disperse la lumière à cause de la gravure des pistes
(effet de réseau de diffraction)

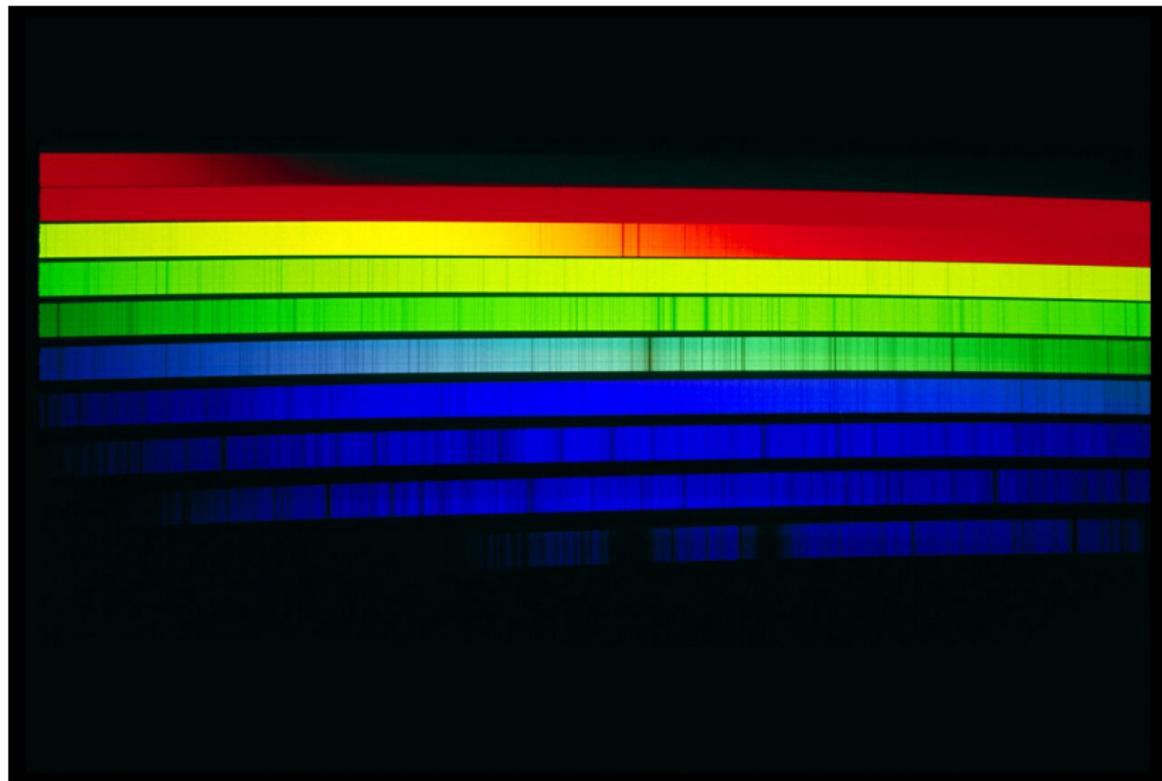
Le spectre électromagnétique



©Astronomy : Roen Kelly

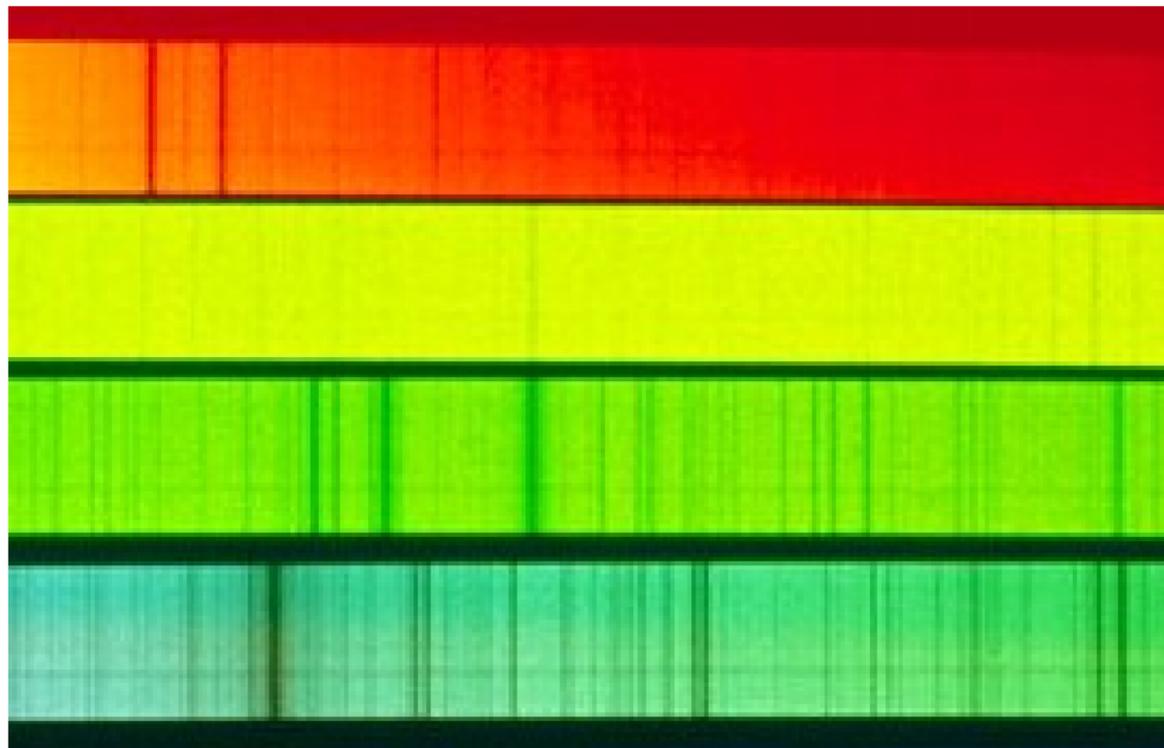
Au-delà de la lumière visible, on peut enregistrer des signaux dans différentes gammes de fréquence.

Le spectre du soleil et les raies d'absorption



Le spectre du soleil fait apparaître des raies d'absorption ©NSO/AURA/NSF

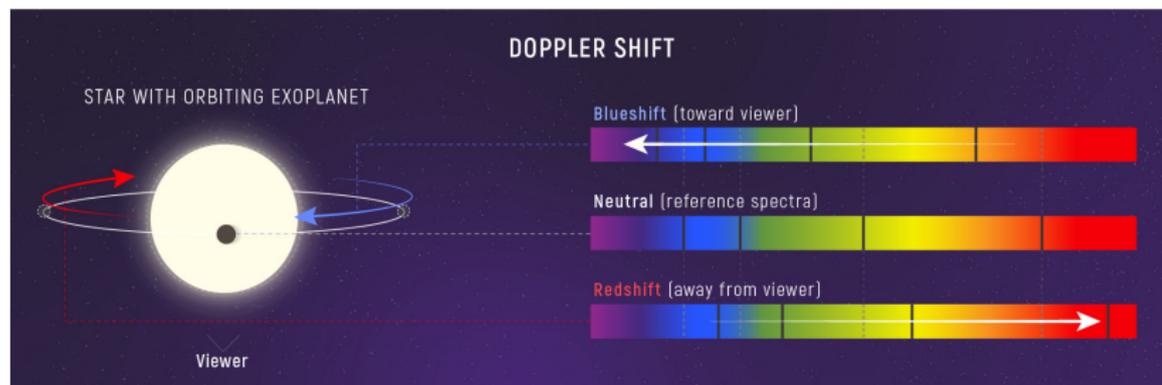
Le spectre du soleil et les raies d'absorption



Le spectre du soleil fait apparaître des raies d'absorption ©NSO/AURA/NSF

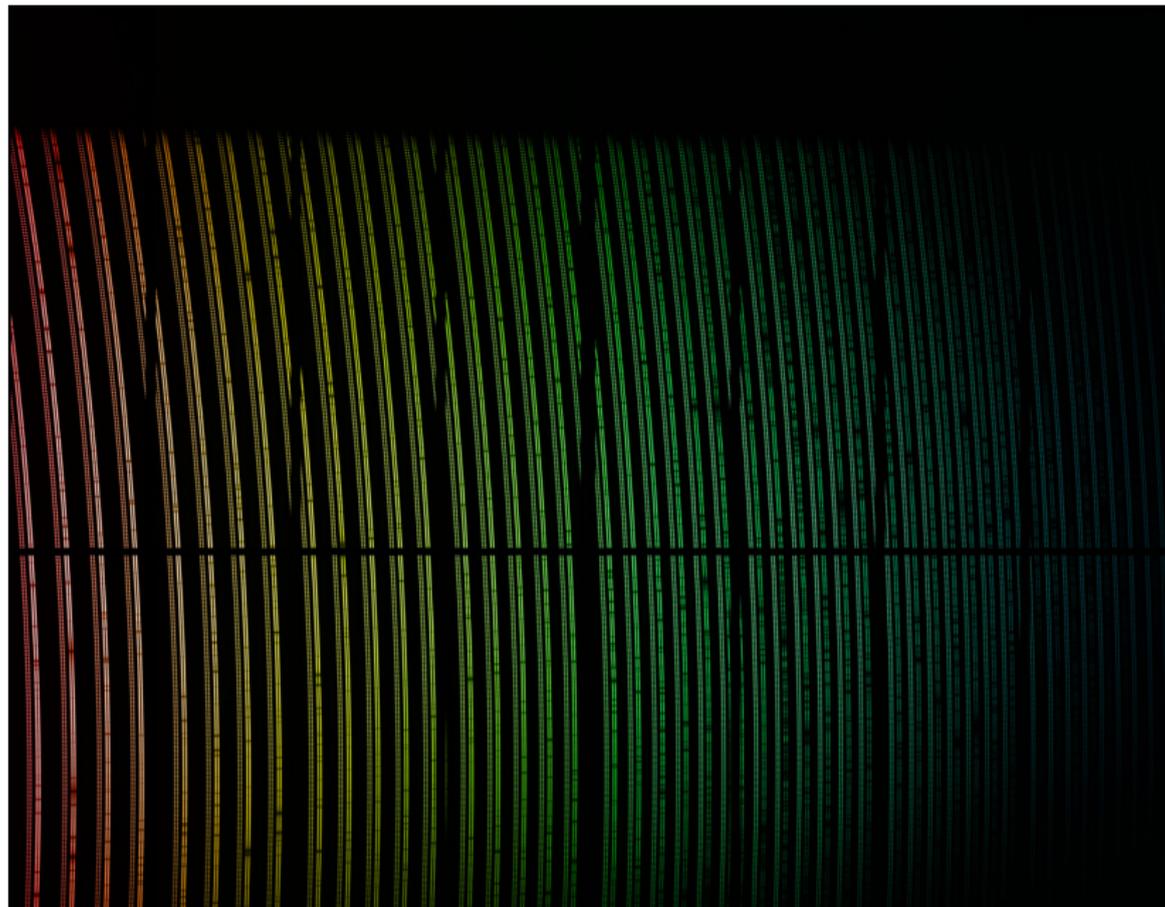
Mesure des vitesses radiales

La vitesse de rapprochement ou d'éloignement de l'étoile peut être mesurée par effet Doppler :

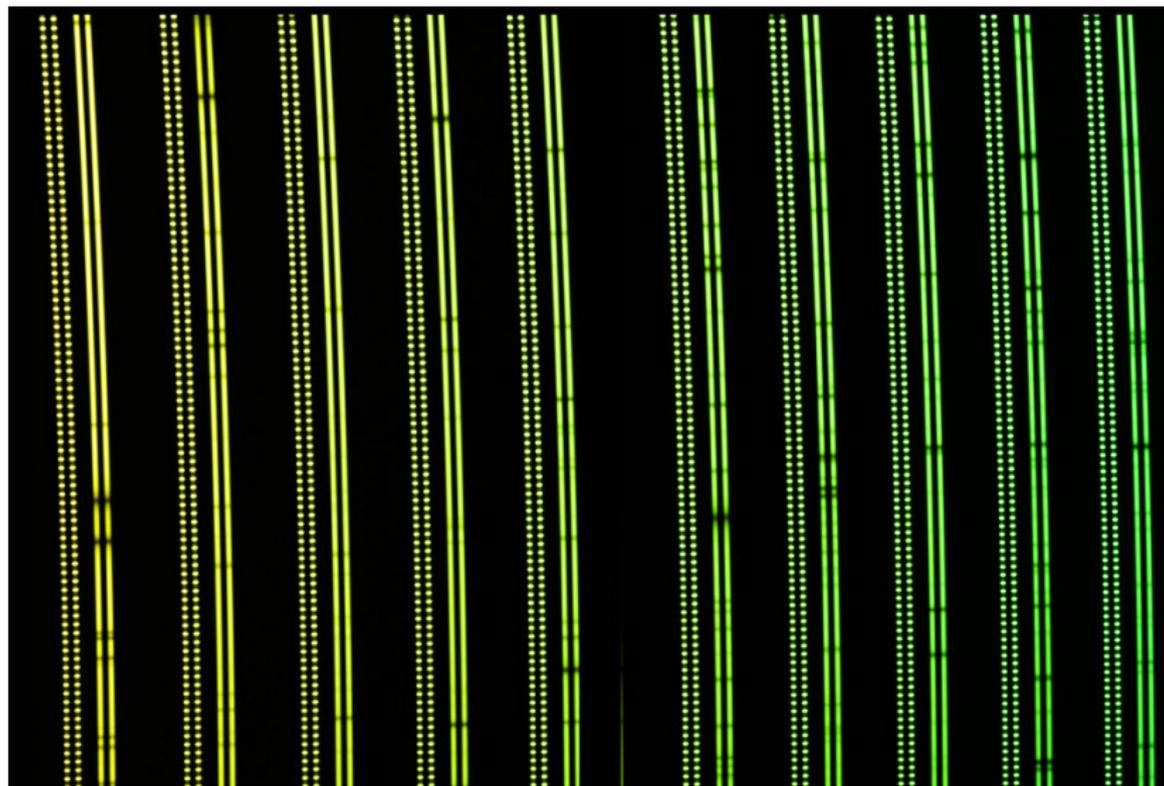


©NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)

Mesure des vitesses radiales



Mesure des vitesses radiales



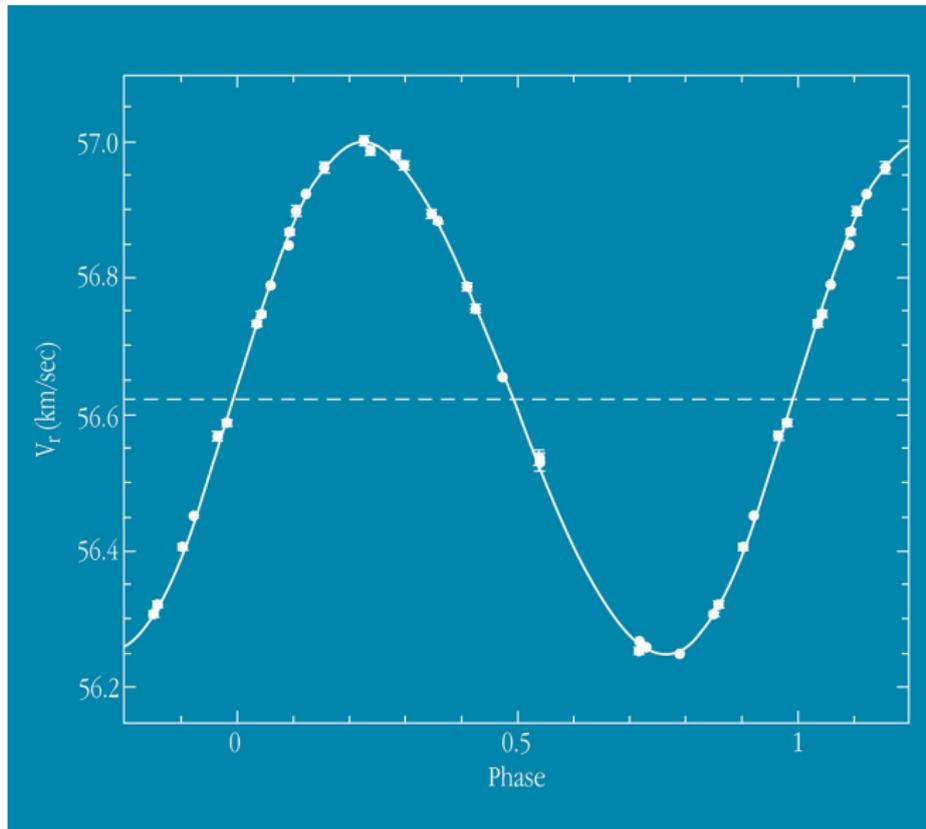
ESPRESSO instrument on ESO's Very Large Telescope in Chile © ESO/ESPRESSO team

Détection d'exoplanètes par mesure des vitesses radiales



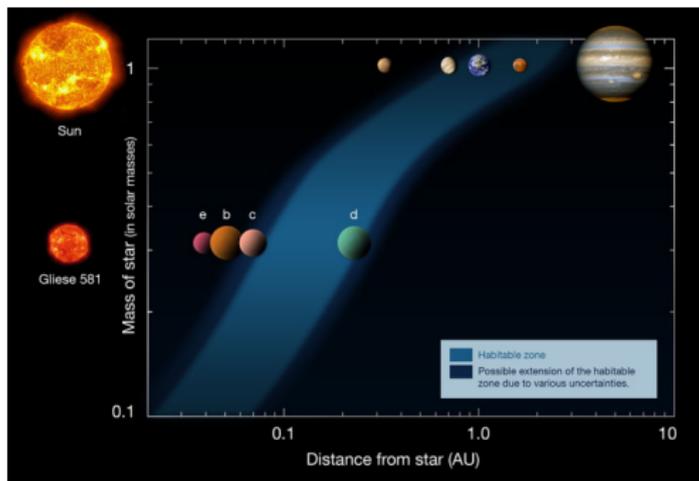
©NASA

Détection d'exoplanètes par mesure des vitesses radiales



Mesures de vitesses radiales (points) et meilleur modèle ajusté aux données ©ESO

Détection d'exoplanètes par mesure des vitesses radiales



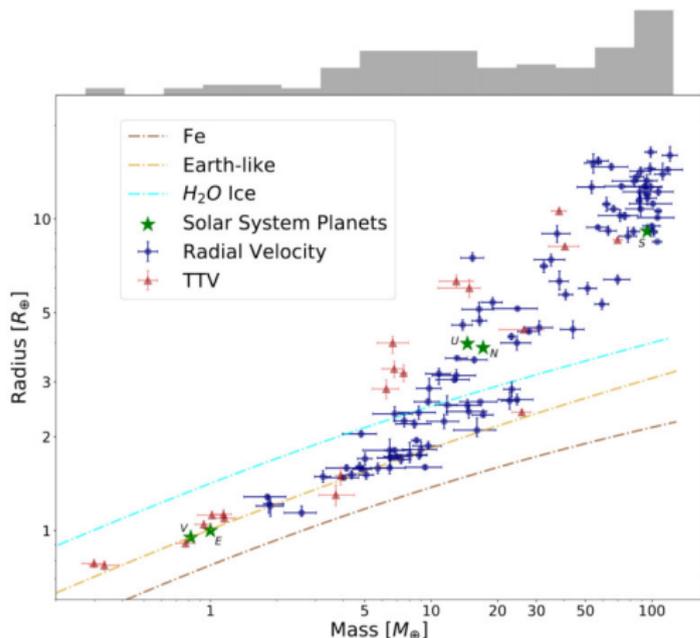
©ESO, basé sur un diagramme de Franck Selsis

L'exoplanète Gliese 581d détectée en 2007 (vitesses radiales) était la première située dans la zone habitable de son étoile (une étoile rouge de faible masse).

Des analyses ont par la suite montré qu'il s'agissait d'une fausse détection liée à l'activité périodique de l'étoile...

Détection d'exoplanètes par mesure des vitesses radiales

En combinant la méthode du transit et les vitesses radiales (lorsque c'est possible. . .) on peut en déduire la densité de l'exoplanète et sa nature (tellurique, gazeuse).



source : Otegi et al., Astronomy and Astrophysics, 2020

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

Mots de conclusion

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe



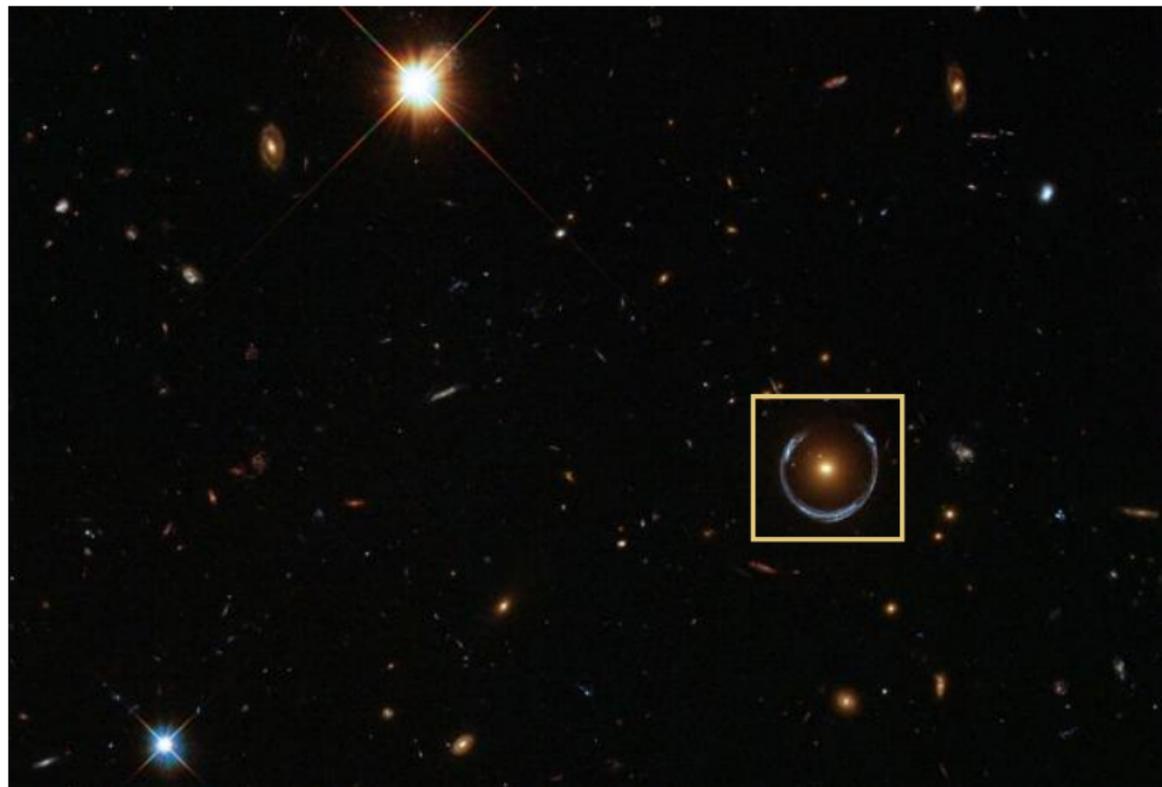
Mots de conclusion

L'effet de lentille gravitationnelle



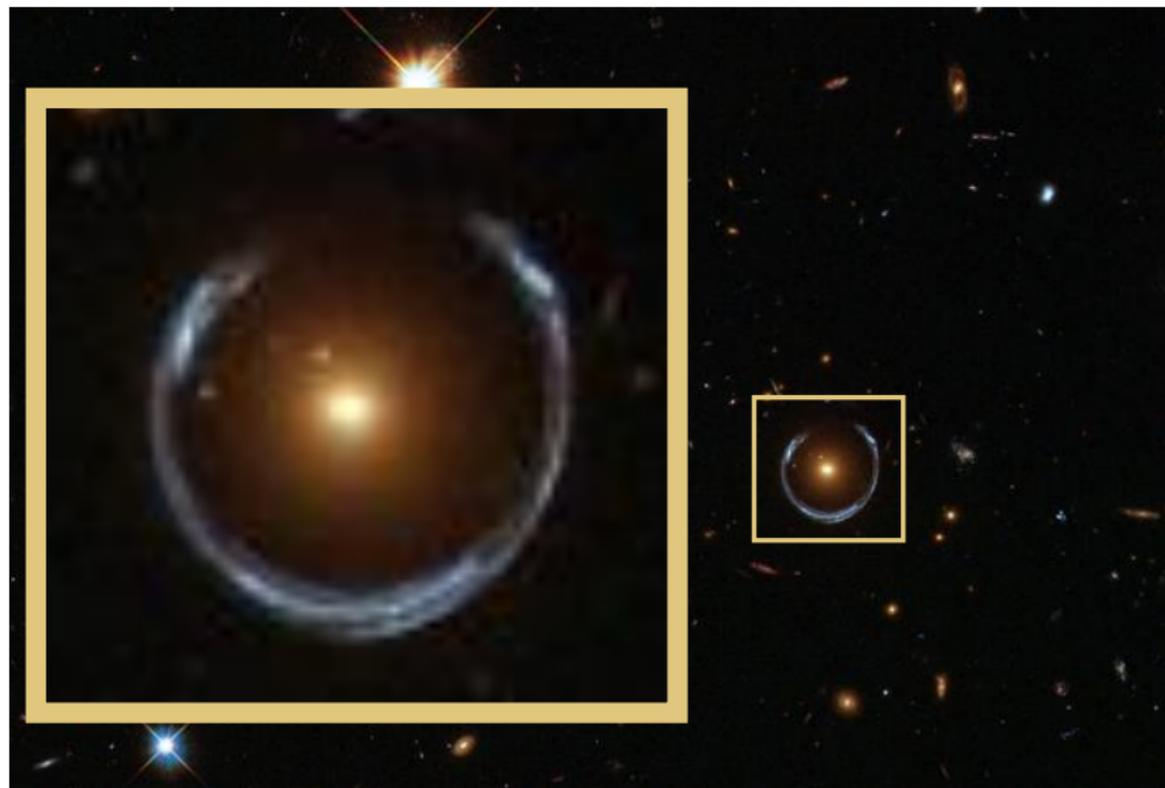
©ESA/Hubble & NASA

L'effet de lentille gravitationnelle



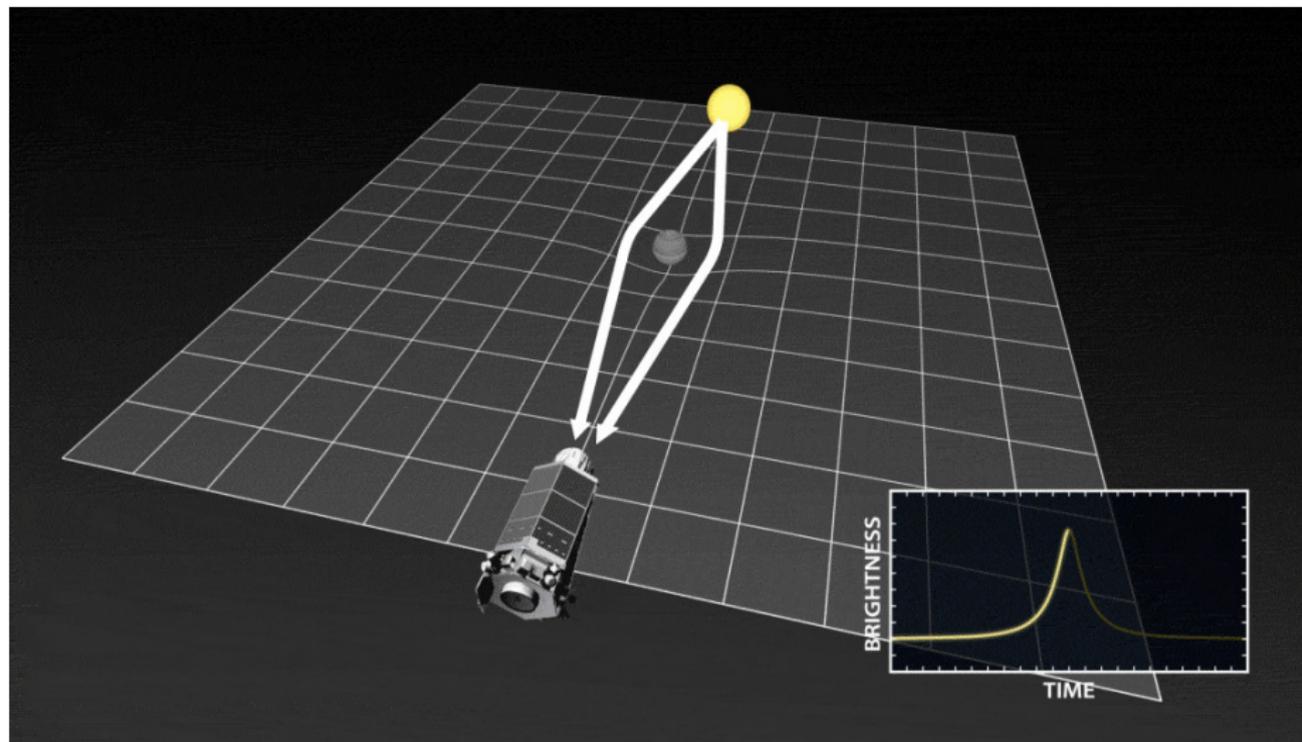
©ESA/Hubble & NASA

L'effet de lentille gravitationnelle



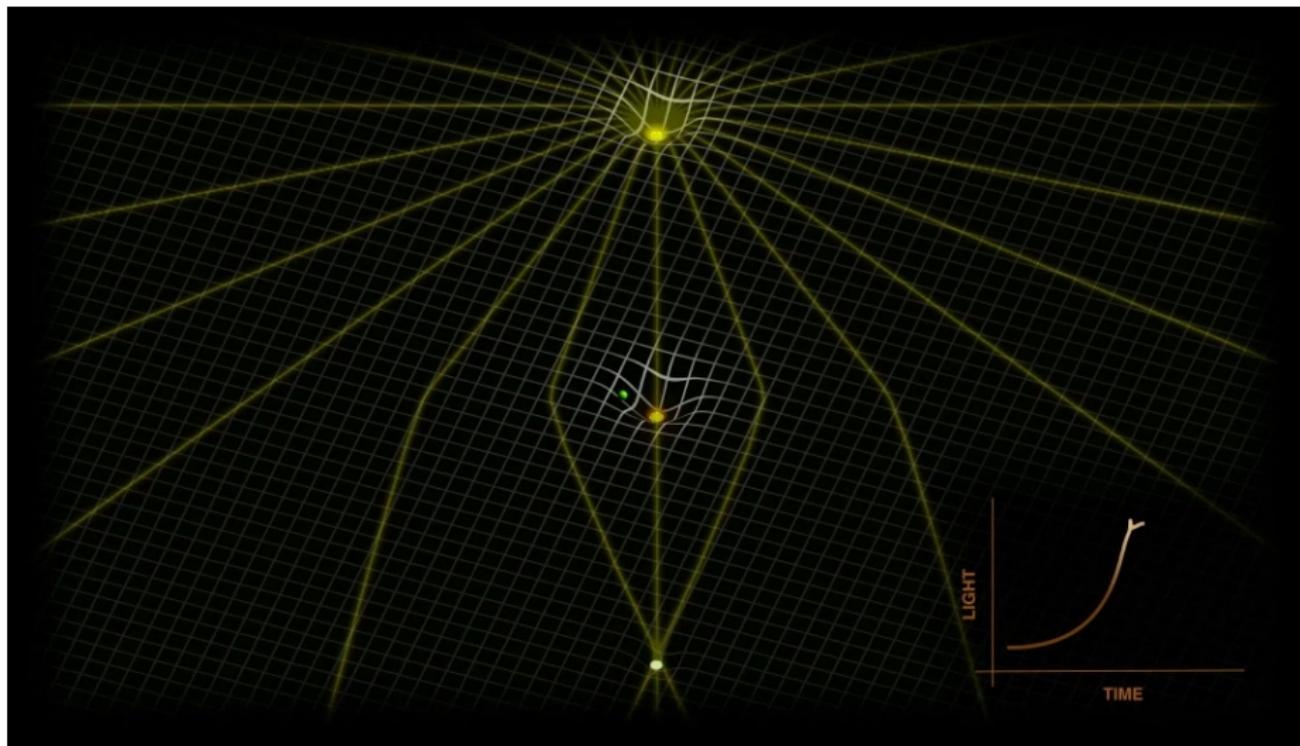
©ESA/Hubble & NASA

L'effet de lentille gravitationnelle



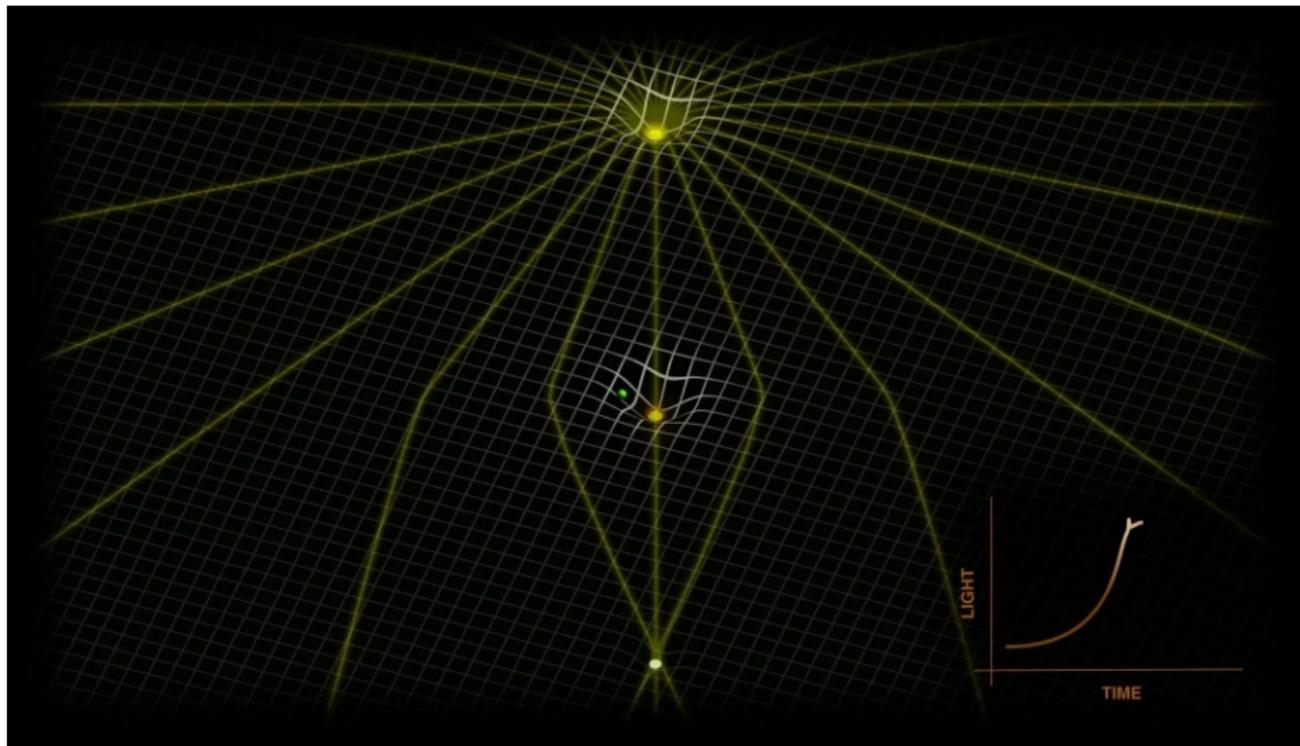
©NASA Ames/JPL-Caltech/T. Pyle

Détection par effet de lentille gravitationnelle



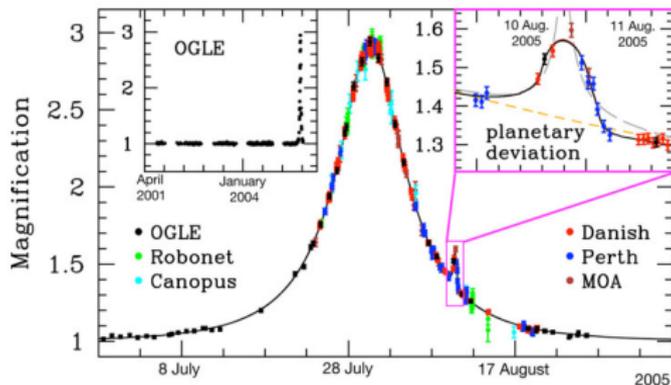
©NASA

Détection par effet de lentille gravitationnelle



©NASA

Détection par effet de lentille gravitationnelle



L'effet de microlentille gravitationnelle dû au passage d'une étoile et de son exoplanète devant une source de l'arrière plan ©ESO

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe



Mots de conclusion

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

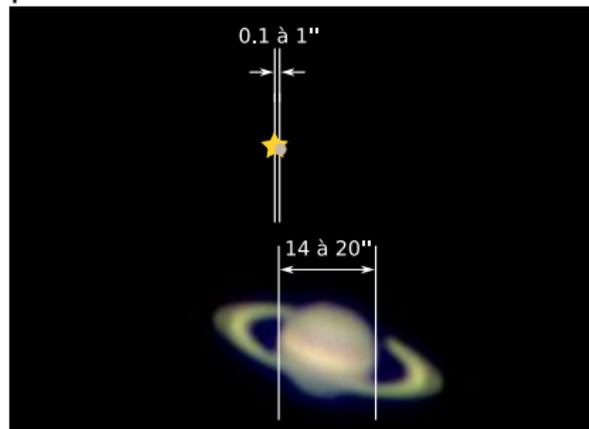
1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe



Mots de conclusion

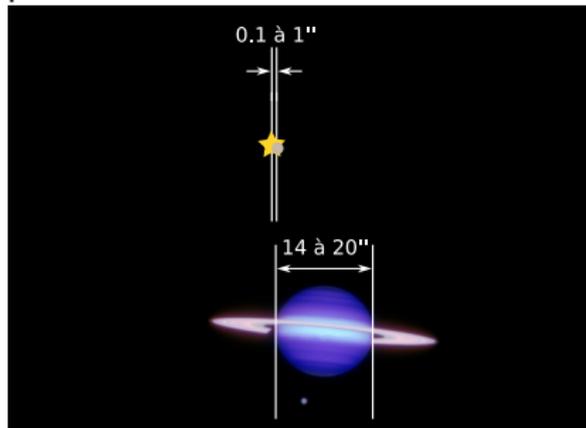


Faire une image d'exoplanètes est extrêmement difficile car l'étoile à proximité immédiate nous éblouit !





Faire une image d'exoplanètes est extrêmement difficile car l'étoile à proximité immédiate nous éblouit !



0.1 à 1''



14 à 20''



L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Le challenge scientifique de l'**imagerie directe** d'un système planétaire :

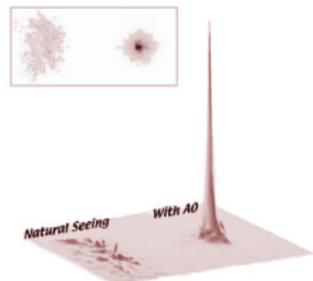
- **faible séparation angulaire :**
1/10 à quelques arcsecondes

↪ grand télescope

↪ optique adaptative



le Very Large Telescope (Chili)



effet d'une optique adaptative

- **fort contraste étoile/planète :**
 10^6 (Jupiter jeune) à 10^9 (super-Terre)

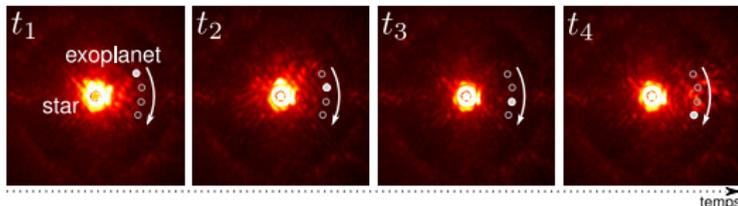
↪ masque coronographique



La couronne solaire rendue visible par un coronographe de Lyot

+ imagerie différentielle

+ **traitement des données**



temps

CORONAGRAPH

A diagram illustrating the concept of a coronagraph. It features a dark blue background filled with numerous small white stars. In the center, a large black circle represents the star being observed. A black cone, representing the coronagraph, extends downwards from the bottom of the star, blocking its light. To the right of the star, a small orange planet is visible. The text 'CORONAGRAPH' is written in white, bold, uppercase letters at the top, and 'SEE PLANETS NEXT TO STARS' is written in white, bold, uppercase letters at the bottom.

SEE PLANETS NEXT TO STARS

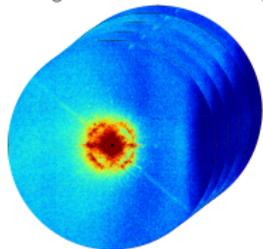
©NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Enjeux de traitement des données :

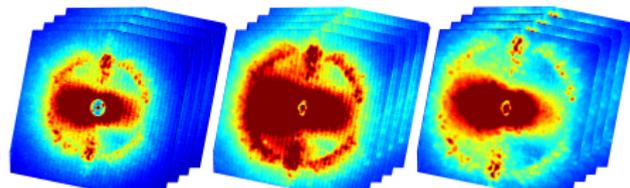
données :

ADI : angular differential imaging



$2D + t$

ASDI : angular and spectral differential imaging



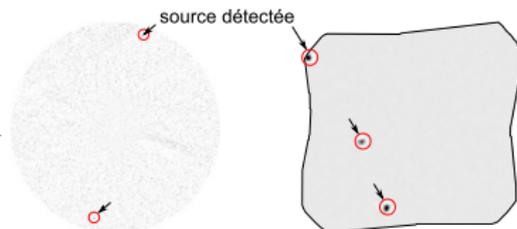
$\lambda = 0.96 \mu\text{m}$

$\lambda = 1.10 \mu\text{m}$

$\lambda = 1.29 \mu\text{m}$

$2D + t + \lambda$

tâche de détection :



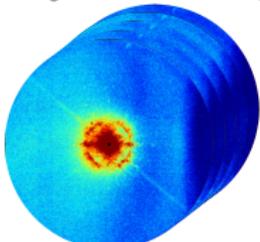
cartes de détection à probabilité de fausse alarme contrôlée

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Enjeux de traitement des données :

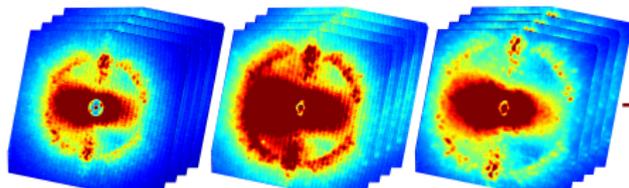
données :

ADI : angular differential imaging



$2D + t$

ASDI : angular and spectral differential imaging



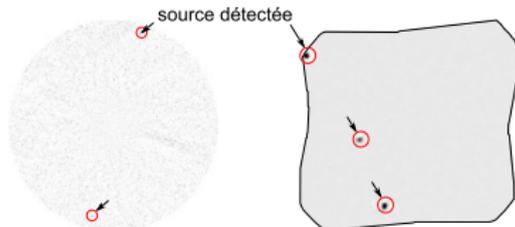
$\lambda = 0.96 \mu\text{m}$

$\lambda = 1.10 \mu\text{m}$

$\lambda = 1.29 \mu\text{m}$

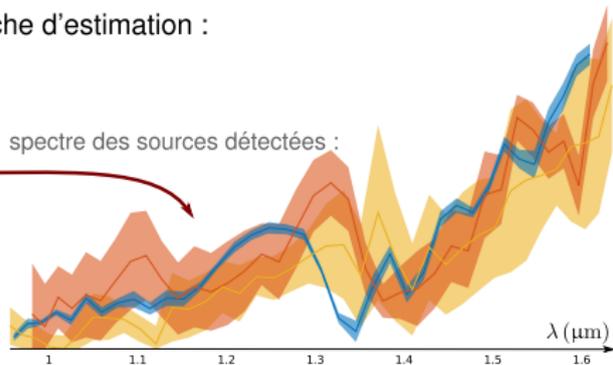
$2D + t + \lambda$

tâche de détection :



cartes de détection à probabilité de fausse alarme contrôlée

tâche d'estimation :

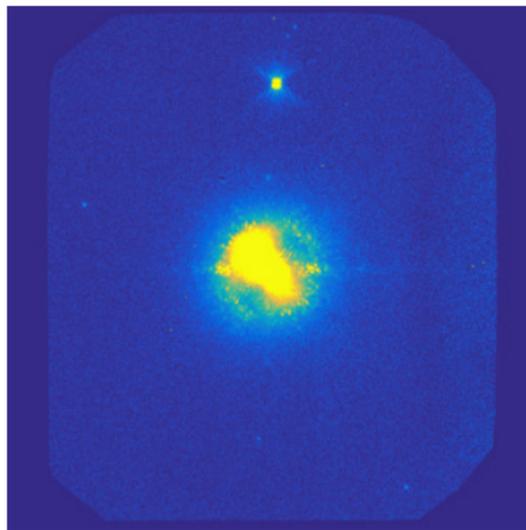


spectre des sources détectées :

$\lambda (\mu\text{m})$

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

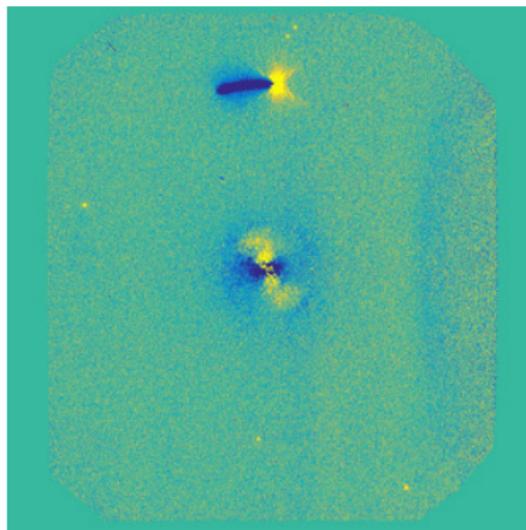
Enjeux de traitement des données :



séquence d'observations
avec l'instrument
SPHERE-IRDIS
au VLT (Chili)

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

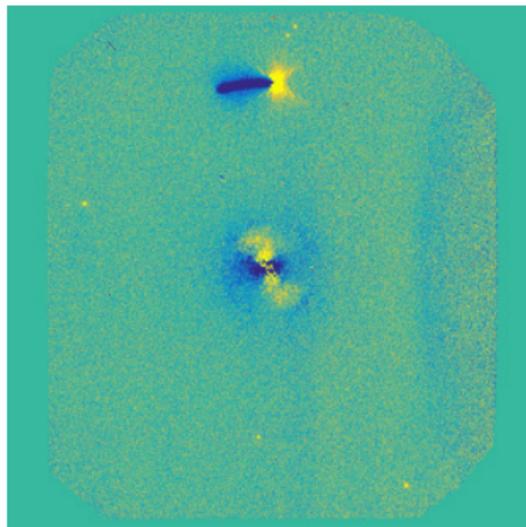
Enjeux de traitement des données :



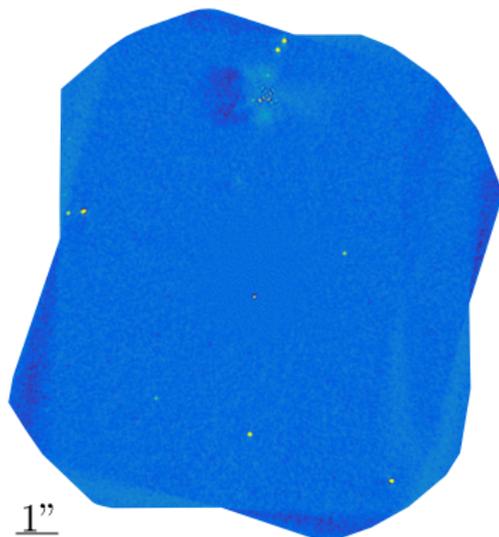
séquence d'observations
après soustraction
de l'image moyenne

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Enjeux de traitement des données :



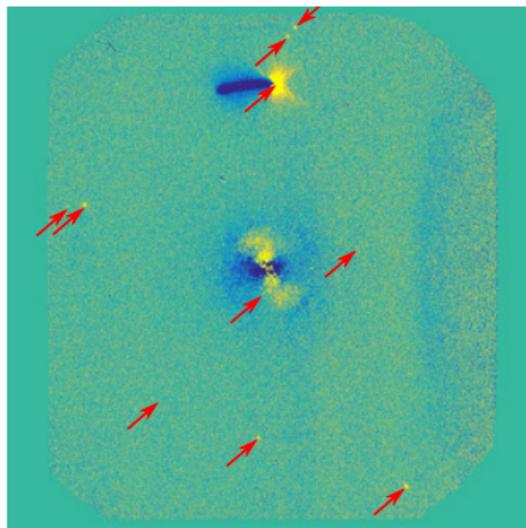
séquence d'observations
après soustraction
de l'image moyenne



carte de détection
(algorithme développé par
Olivier Flasseur dans une
thèse à l'UJM et à
l'Observatoire de Lyon)

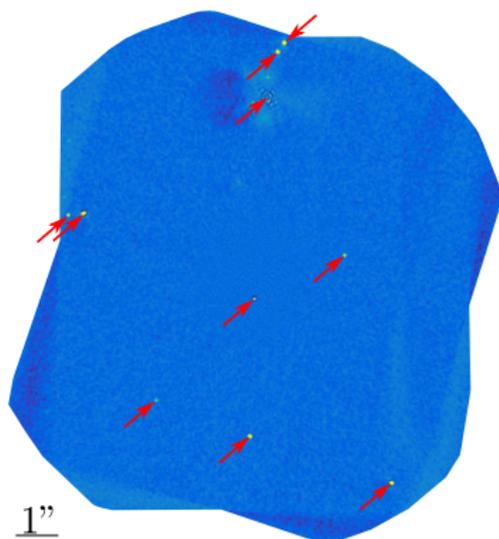
L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Enjeux de traitement des données :



séquence d'observations
après soustraction
de l'image moyenne

→



1''
carte de détection
(algorithme développé par
Olivier Flasseur dans une
thèse à l'UJM et à
l'Observatoire de Lyon)

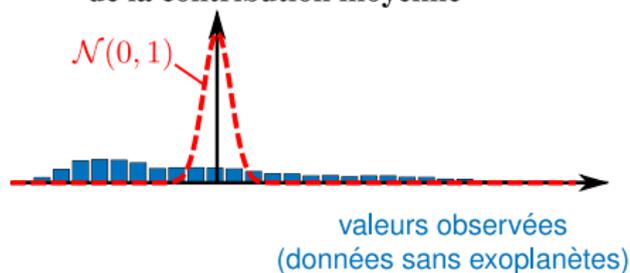
L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

1) Apprentissage d'un modèle des fluctuations des mesures

Retrancher la contribution moyenne de l'étoile ne permet pas d'avoir des détections fiables:

**histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne**



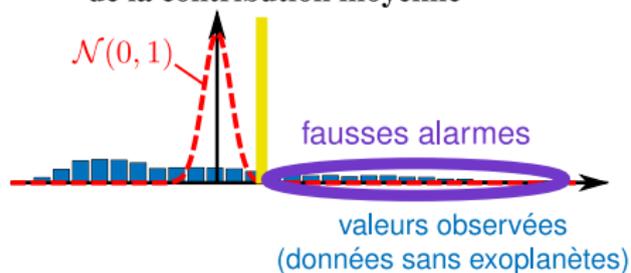
L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

1) Apprentissage d'un modèle des fluctuations des mesures

Retrancher la contribution moyenne de l'étoile ne permet pas d'avoir des détections fiables:

**histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne**



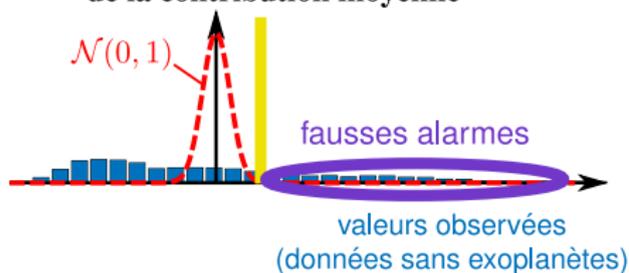
L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

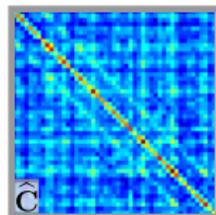
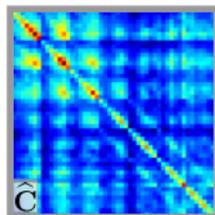
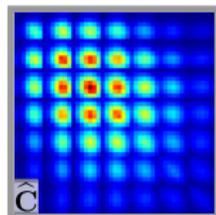
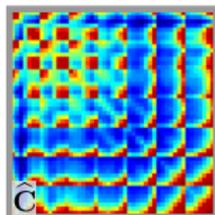
1) Apprentissage d'un modèle des fluctuations des mesures

Retrancher la contribution moyenne de l'étoile ne permet pas d'avoir des détections fiables:

**histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne**



Les corrélations spatiales ne sont pas négligeables et varient dans l'image:



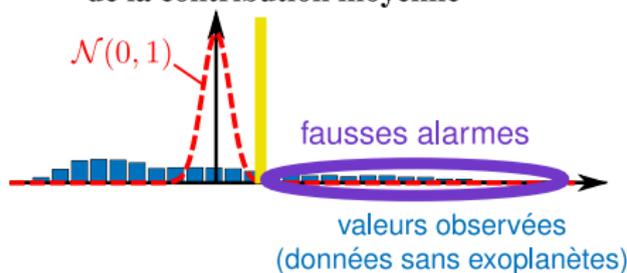
L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

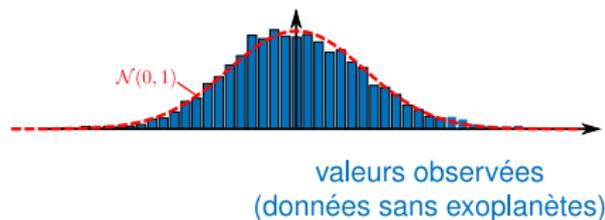
1) Apprentissage d'un modèle des fluctuations des mesures

Retrancher la contribution moyenne de l'étoile ne permet pas d'avoir des détections fiables:

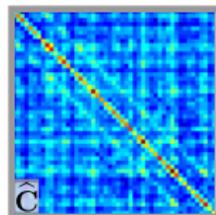
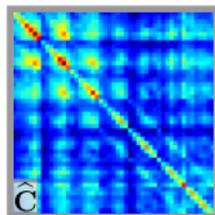
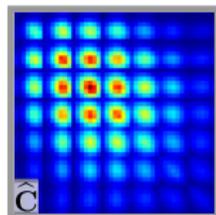
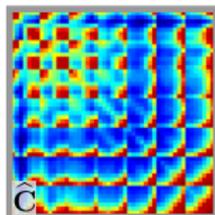
histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne



histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne,
compensation des corrélations spatiales
et des fluctuations temporelles



Les corrélations spatiales ne sont pas négligeables et varient dans l'image:



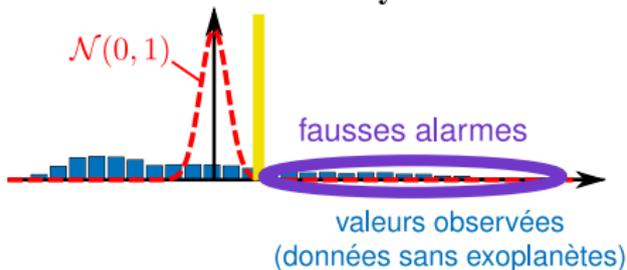
L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

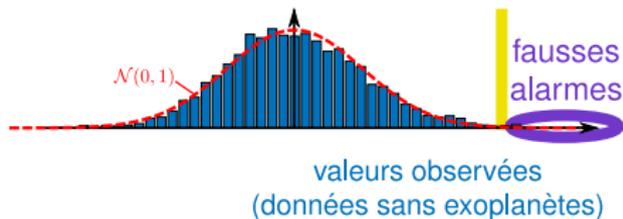
1) Apprentissage d'un modèle des fluctuations des mesures

Retrancher la contribution moyenne de l'étoile ne permet pas d'avoir des détections fiables:

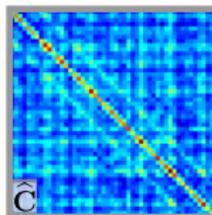
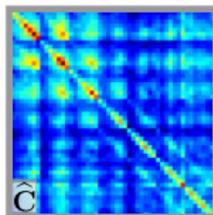
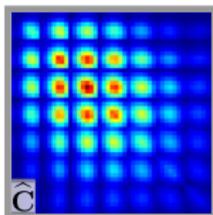
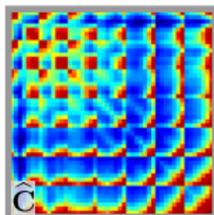
histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne



histogramme des mesures
après soustraction
de la contribution moyenne,
compensation des corrélations spatiales
et des fluctuations temporelles



Les corrélations spatiales ne sont pas négligeables et varient dans l'image:



L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

2) Détection d'exoplanètes

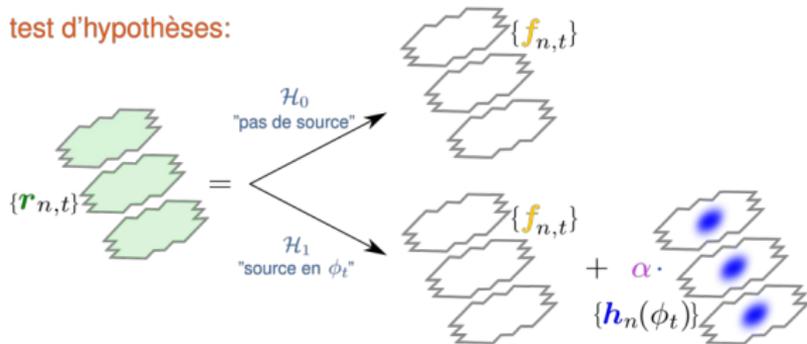
modèle d'un patche:

$$r_{n,t} = f_{n,t} + \alpha \cdot h_{n,t}$$

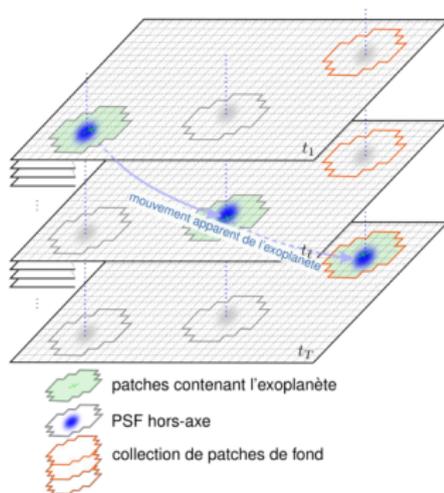
$r_{n,t}$: patche observé
 $f_{n,t}$: fond
 $h_{n,t}$: source (PSF hors-axe)

$f \gg \alpha \cdot h$ et f fluctue dans le temps

test d'hypothèses:



$$\text{GLRT: } \log \frac{\max_{\alpha \geq 0} \mathcal{L}(\{r_{n,t}\} | \alpha)}{\mathcal{L}(\{r_{n,t}\} | \alpha = 0)} \underset{\mathcal{H}_0}{\overset{\mathcal{H}_1}{\geq}} \eta$$

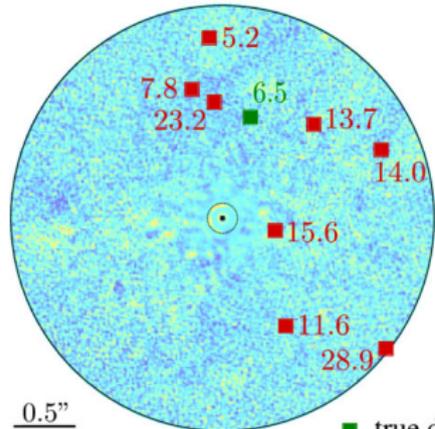


L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

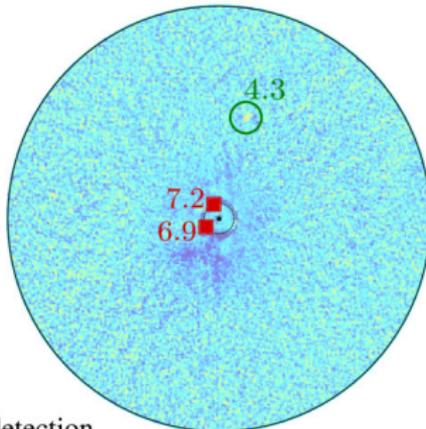
Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

2) Détection d'exoplanètes

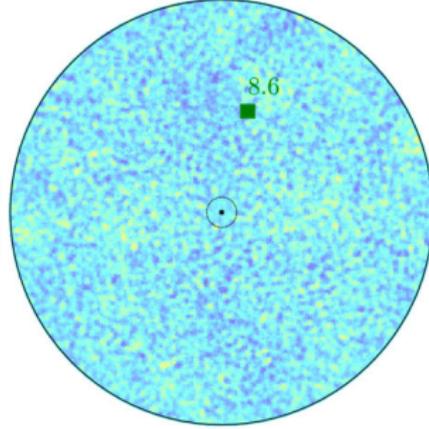
TLOCI algorithm



KLIP algorithm



proposed algorithm:
PACO



■ true detection
■ false alarm



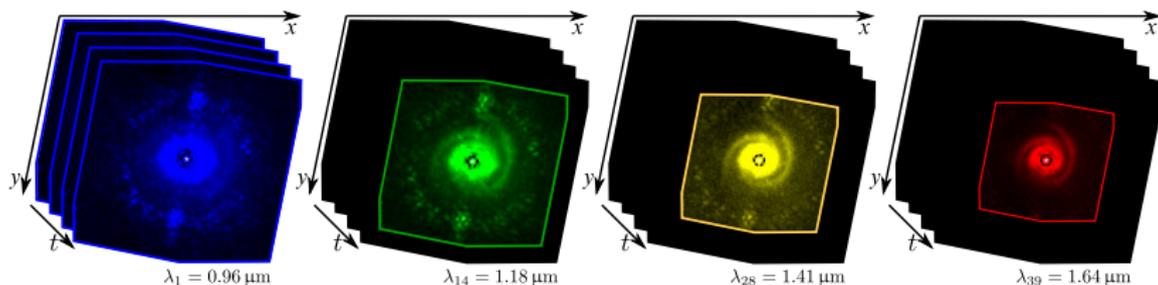
0.5''

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

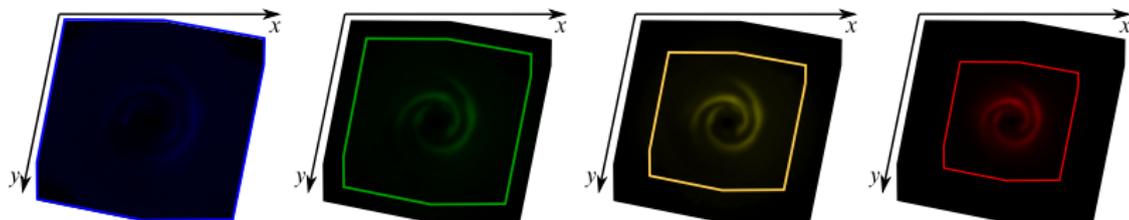
Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires

Données : observations multi-spectrales par imagerie haut contraste



Composante d'intérêt : disque circumstellaire



↪ problème de démixage : résidus de l'étoile + disque

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires

$$\hat{\mathbf{u}} = \arg \min_{\mathbf{u} \geq \mathbf{0}} \min_{\substack{\{\hat{\mu}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\hat{\sigma}_n^2\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spat}}\}_{n \in \mathbb{K}}} \sum_{n \in \mathbb{K}} \mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n - [\mathbf{M}\mathbf{u}]_n) + \mathcal{R}(\mathbf{u}),$$

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires

$$\hat{\mathbf{u}} = \arg \min_{\mathbf{u} \geq \mathbf{0}} \min_{\substack{\{\hat{\mu}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\hat{\sigma}_n^2\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spat}}\}_{n \in \mathbb{K}}} \sum_{n \in \mathbb{K}} \underbrace{\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n - \underbrace{[\mathbf{M}\mathbf{u}]_n}_{\substack{\text{données} \\ \text{modèle}}})}_{\text{accord aux données}} + \underbrace{\mathcal{R}(\mathbf{u})}_{\text{régularité}},$$

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires

$$\hat{\mathbf{u}} = \arg \min_{\mathbf{u} \geq \mathbf{0}} \min_{\substack{\{\hat{\mu}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\hat{\sigma}_n^2\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spat}}\}_{n \in \mathbb{K}}} \sum_{n \in \mathbb{K}} \underbrace{\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n - [\mathbf{M}\mathbf{u}]_n)}_{\text{accord aux données}} + \underbrace{\mathcal{R}(\mathbf{u})}_{\text{régularité}},$$

accord aux données : $\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n) = \frac{T}{2} \log |\text{diag}(\sigma_n^2) \otimes \mathbf{C}_n^{\text{spec}} \otimes \mathbf{C}_n^{\text{spat}}| + \sum_{t=1}^T \frac{1}{2\sigma_{n,t}^2} \|\mathbf{v}_{n,t} - \mu_n^{\text{spec}}\|_{\Gamma}^2$

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires

$$\hat{\mathbf{u}} = \arg \min_{\mathbf{u} \geq \mathbf{0}} \min_{\substack{\{\hat{\mu}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\hat{\sigma}_n^2\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spat}}\}_{n \in \mathbb{K}}} \sum_{n \in \mathbb{K}} \underbrace{\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n - [\mathbf{M}\mathbf{u}]_n)}_{\text{accord aux données}} + \underbrace{\mathcal{R}(\mathbf{u})}_{\text{régularité}},$$

accord aux données : $\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n) = \frac{T}{2} \log |\text{diag}(\sigma_n^2) \otimes \mathbf{C}_n^{\text{spec}} \otimes \mathbf{C}_n^{\text{spat}}| + \sum_{t=1}^T \frac{1}{2\sigma_{n,t}^2} \|\mathbf{v}_{n,t} - \mu_n^{\text{spec}}\|_{\Gamma}^2$

régularité : $\mathcal{R}(\mathbf{u}) = \beta_{\text{smooth}} \sum_{n=1}^{N'} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \|\nabla_n \mathbf{u}_{\cdot, \ell}\|_2^2} + \epsilon^2 + \beta_{\text{sparse}} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{\ell=1}^L |u_{n, \ell}|$

L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires

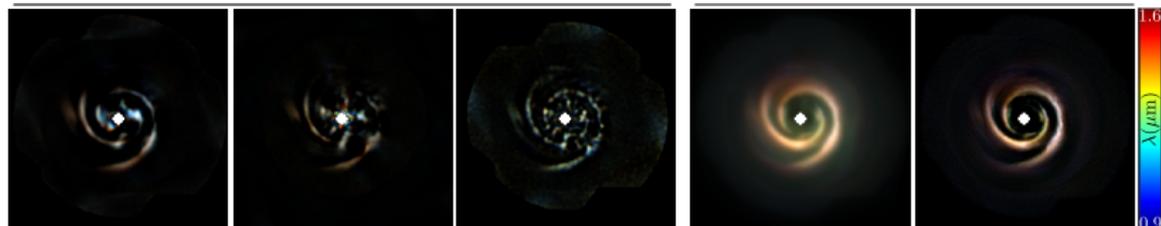
$$\hat{\mathbf{u}} = \arg \min_{\mathbf{u} \geq \mathbf{0}} \min_{\substack{\{\hat{\mu}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\hat{\sigma}_n^2\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spec}}\}_{n \in \mathbb{K}} \\ \{\tilde{\mathbf{C}}_n^{\text{spat}}\}_{n \in \mathbb{K}}} \sum_{n \in \mathbb{K}} \underbrace{\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n - [\mathbf{M}\mathbf{u}]_n)}_{\text{accord aux données}} + \underbrace{\mathcal{R}(\mathbf{u})}_{\text{régularité}},$$

accord aux données : $\mathcal{D}_n(\mathbf{v}_n) = \frac{T}{2} \log |\text{diag}(\sigma_n^2) \otimes \mathbf{C}_n^{\text{spec}} \otimes \mathbf{C}_n^{\text{spat}}| + \sum_{t=1}^T \frac{1}{2\sigma_{n,t}^2} \|\mathbf{v}_{n,t} - \mu_n^{\text{spec}}\|_{\Gamma}^2$

régularité : $\mathcal{R}(\mathbf{u}) = \beta_{\text{smooth}} \sum_{n=1}^{N'} \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \|\nabla_n \mathbf{u}_{\cdot, \ell}\|_2^2} + \epsilon^2 + \beta_{\text{sparse}} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{\ell=1}^L |u_{n, \ell}|$

État de l'art

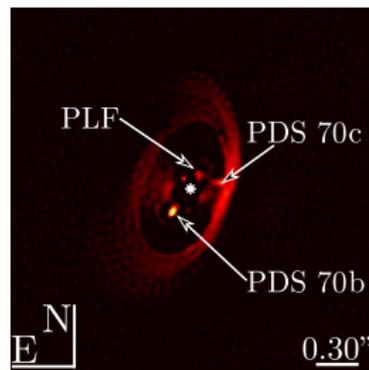
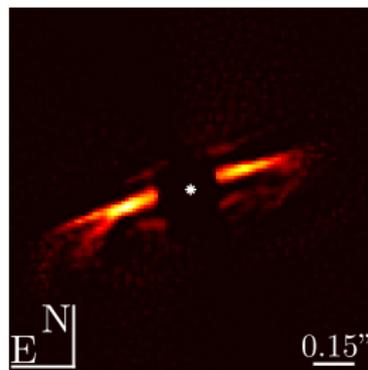
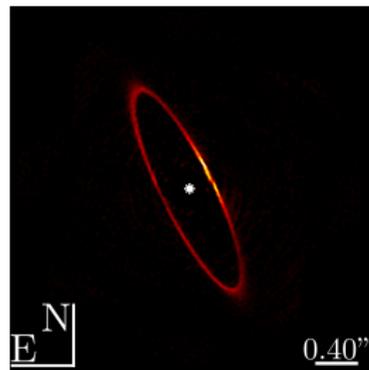
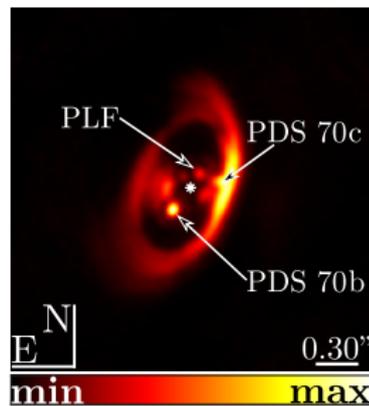
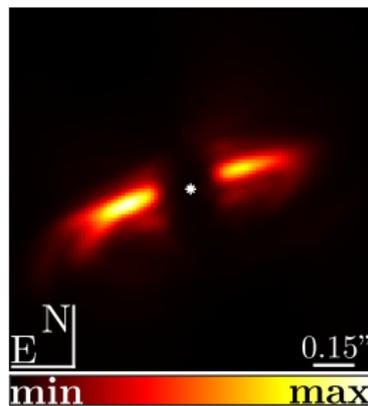
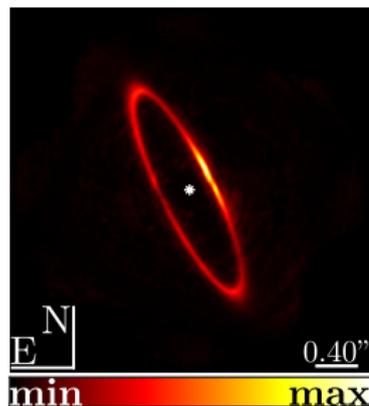
Méthode basée IA



L'imagerie directe : imagerie à haut contraste

Ce que nous avons développé (UJM+Obs. de Lyon) :

3) Reconstruction de disques circumstellaires



Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe



Mots de conclusion

Introduction :

- Impact de la technique sur notre représentation de la place de la Terre dans l'Univers
- Les planètes

Comment détecter une exoplanète ?

1. Grâce au transit devant son étoile hôte
2. Grâce au mouvement de l'étoile hôte
3. Via l'effet de la masse de l'exoplanète
4. Par observation directe

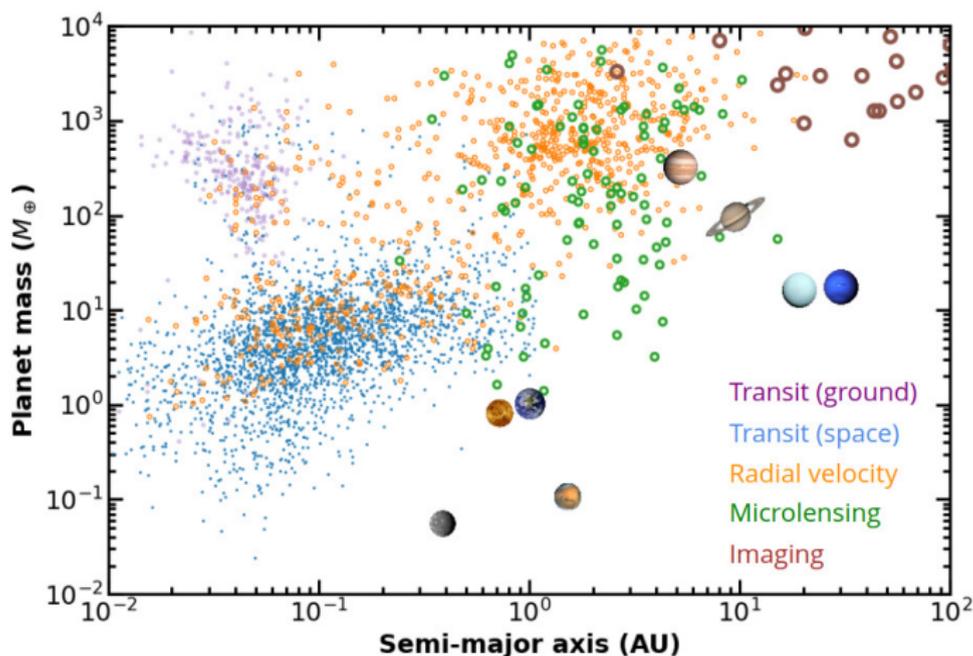


Mots de conclusion

Conclusion

- la détection d'exoplanètes nécessite une sensibilité et une précision extrêmes en photométrie, astrométrie, spectroscopie, imagerie ;
- travail pluridisciplinaire : astrophysique + astronomie + optique + mécanique + traitement des données
- la science des données joue un rôle grandissant pour l'exploitation optimale des observations
- les méthodes développées servent également dans d'autres domaines : microscopie, imagerie médicale, observation de la Terre, ...

Complémentarité des méthodes de détection

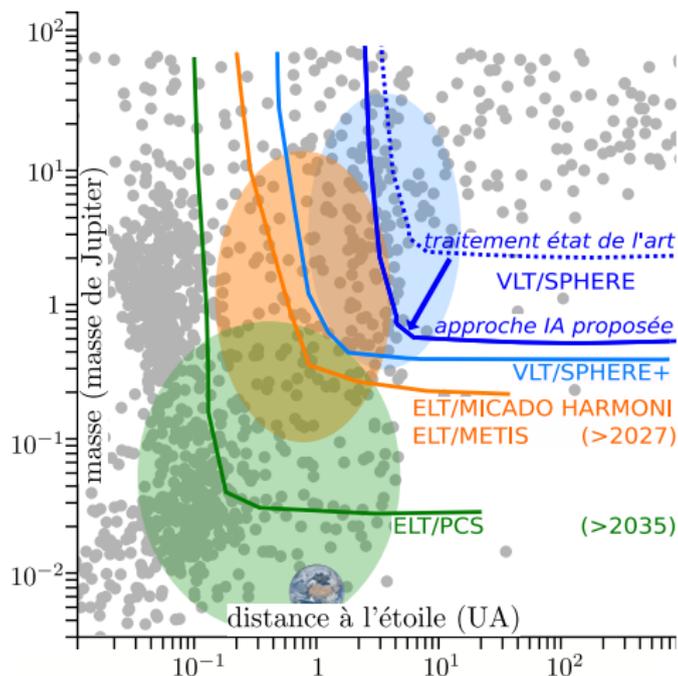


Based on data from NASA Exoplanet Archive.

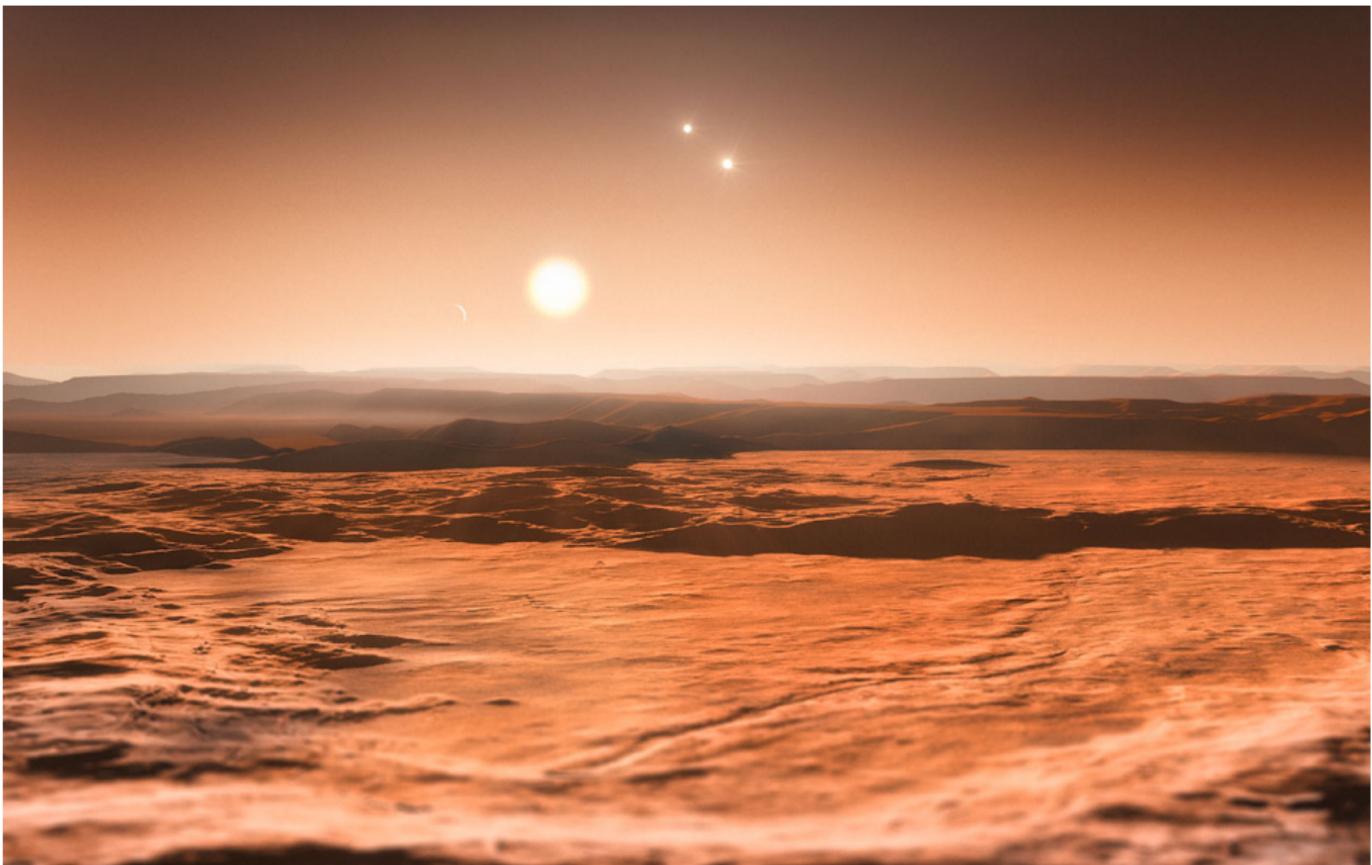
Les méthodes de détection sont complémentaires car elles sont sensibles à des domaines distincts et donnent accès à des informations différentes (taille, masse, orbite, température, spectre).

Quête : détection et caractérisation d'exo-Terres

Progrès attendus en imagerie directe :



(figure créée par Olivier Flasseur, Observatoire de Lyon)



Cette vue d'artiste imagine l'exoplanète Gliese 667Cd et les trois soleils de ce système triple. ©ESO/M. Kornmesser