

UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY — 2024-2025

Phys 137 : séance 10

A la découverte des exoplanètes

zelia.dionnet@universite-paris-saclay.fr (IAS)

Détection d'exoplanètes

“exo” : en dehors (grec ancien). Planètes situées hors du système solaire

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

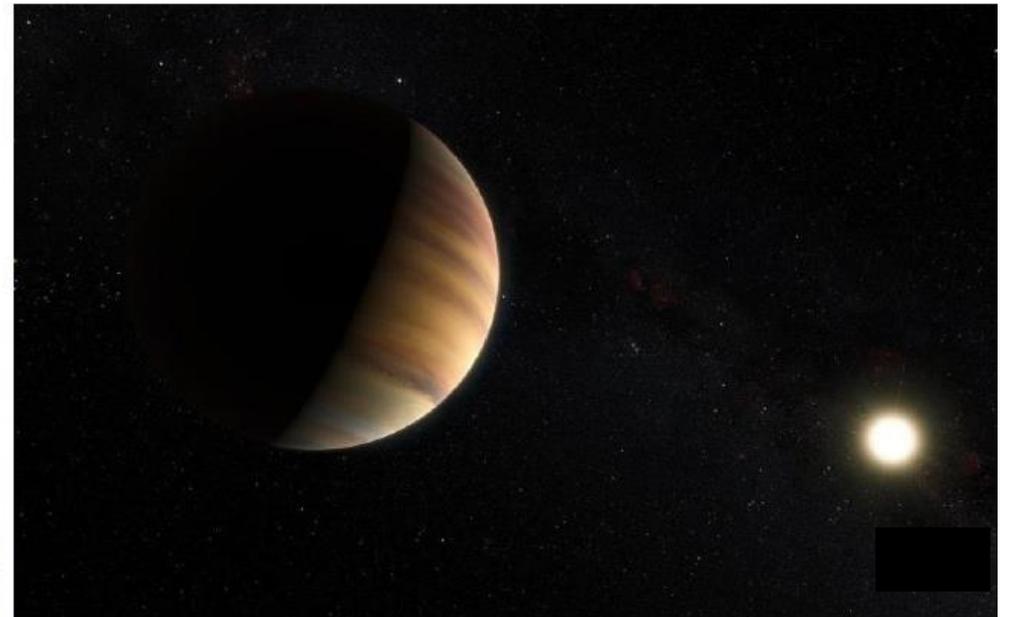
The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

1995 : Michel Mayor et Dider Queloz

Observatoire de Haute-Provence, détection par la méthode des vitesses radiales.

Exoplanète autour de l'étoile 51 Pegasi

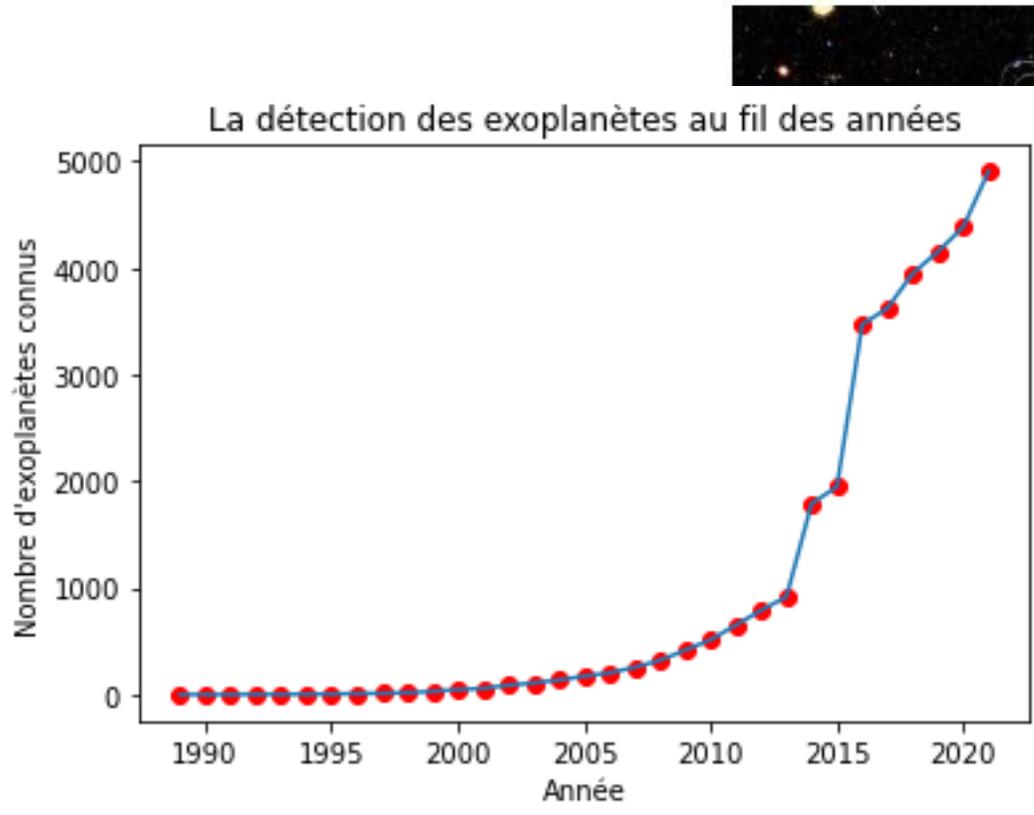
Prix Nobel en 2019 !



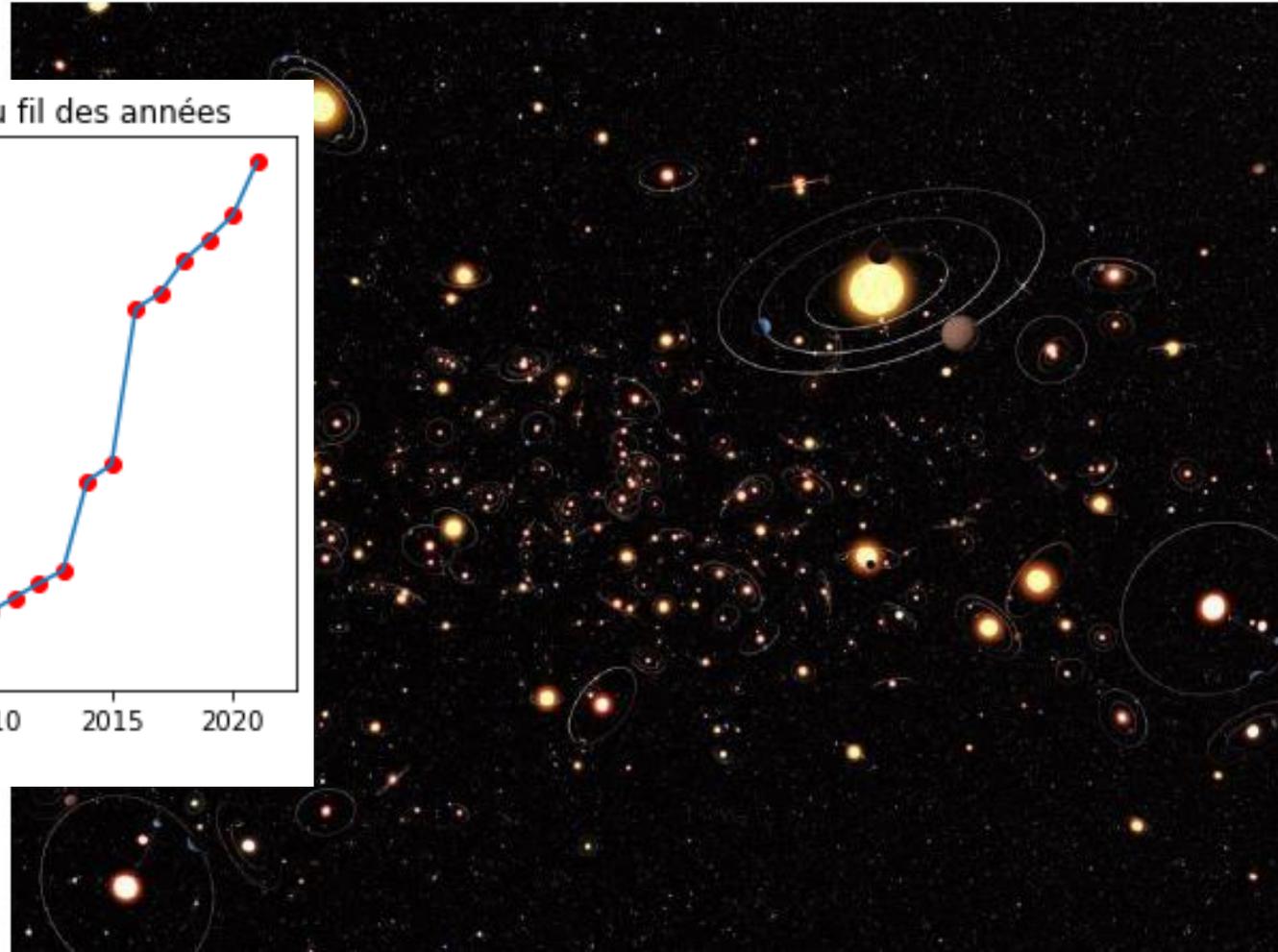
Vue d'artiste de 51 Pegasi b
credit : ESO/M. Kommesser/Nick Risinger
(skysurvey.org)

Détection d'exoplanètes

Aujourd'hui, on compte plus de 4 800 exoplanètes ! (exoplanet.eu)
Notre galaxie en compterait plus de 100 milliards.

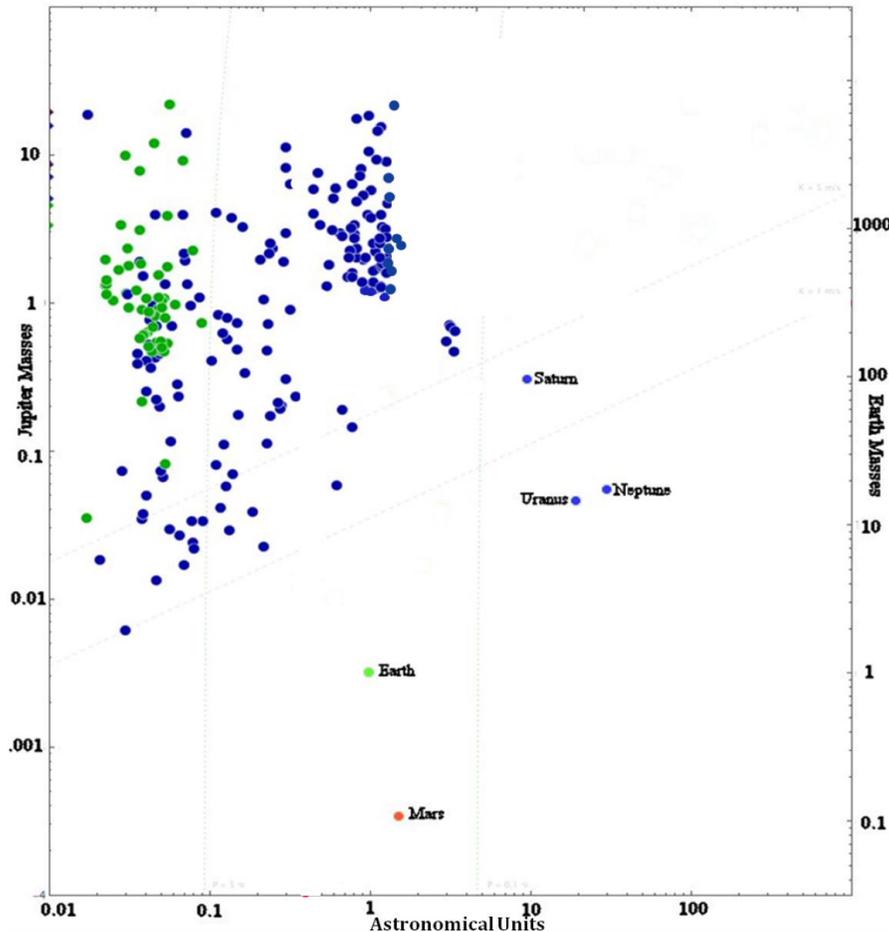


credit : ESA / HUBBLE / ESO /
M. KORNMESSE



Statistique de détection d'exoplanètes

La figure suivante représente les caractéristiques physiques des exoplanètes (masse en fonction de la distance à l'étoile) découvertes entre 1995 et 2015 par les deux principales méthodes de détection : vitesses radiales en bleu et transits en vert.



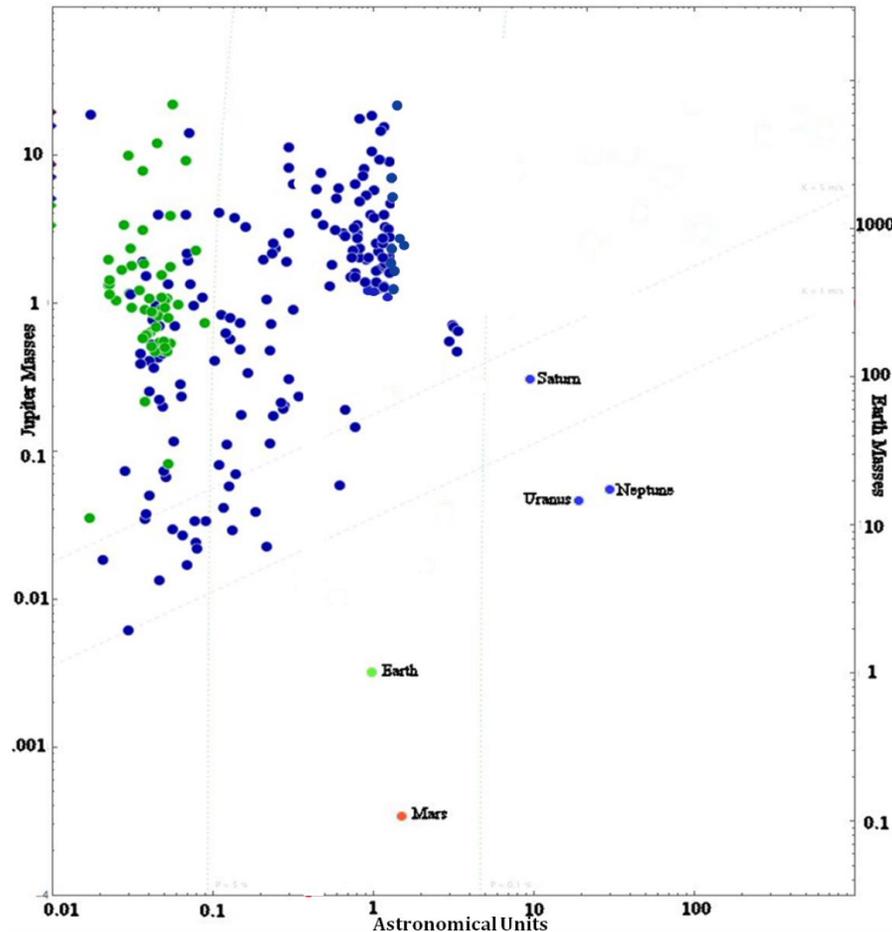
1. Quel type de planète semble être le plus souvent détecté : tellurique ou géante gazeuse ? Rappelez les principaux composants de ce type de planète.

2. Nous supposons que ces systèmes planétaires possèdent tous une étoile centrale de type solaire. Au vu de la gamme de distance à leur étoile où se trouve la majorité de ces planètes, vous attendiez-vous à trouver de tels composants ? Pourquoi ?

3. Par quel phénomène peut-on expliquer cette situation ?

Statistique de détection d'exoplanètes

La figure suivante représente les caractéristiques physiques des exoplanètes (masse en fonction de la distance à l'étoile) découvertes entre 1995 et 2015 par les deux principales méthodes de détection : vitesses radiales en bleu et transits en vert.

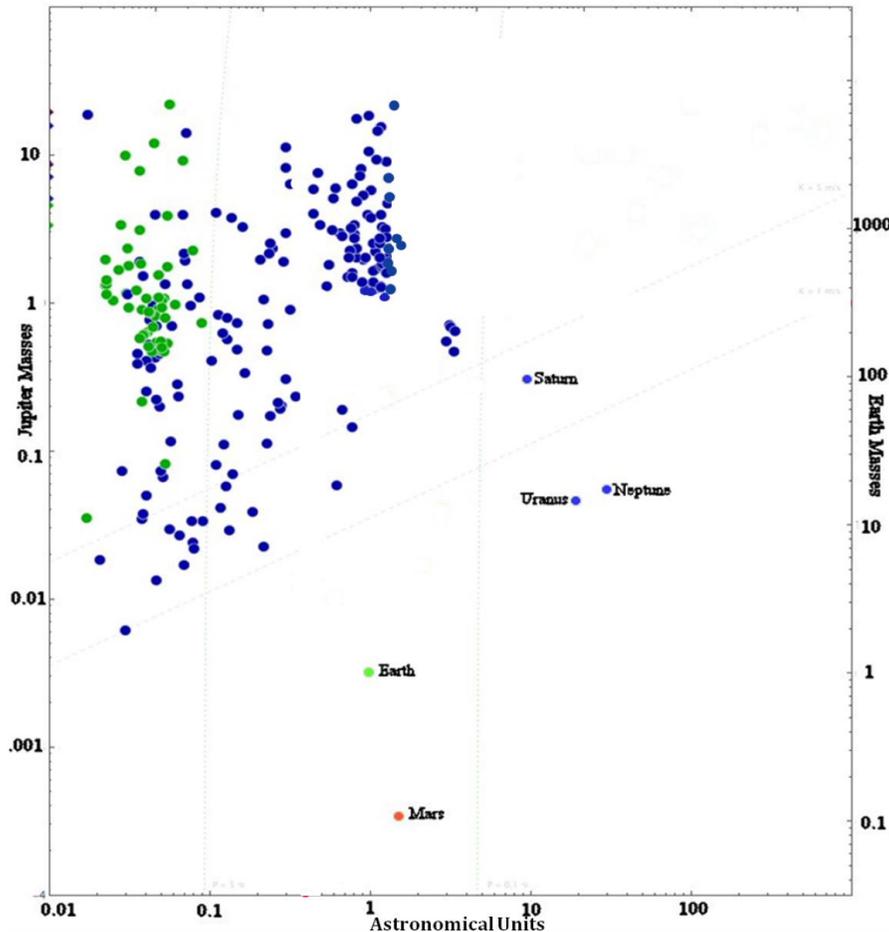


1. Quel type de planète semble être le plus souvent détecté : tellurique ou géante gazeuse ? Rappelez les principaux composants de ce type de planète.

Géantes gazeuses, composées de H et He

Statistique de détection d'exoplanètes

La figure suivante représente les caractéristiques physiques des exoplanètes (masse en fonction de la distance à l'étoile) découvertes entre 1995 et 2015 par les deux principales méthodes de détection : vitesses radiales en bleu et transits en vert.



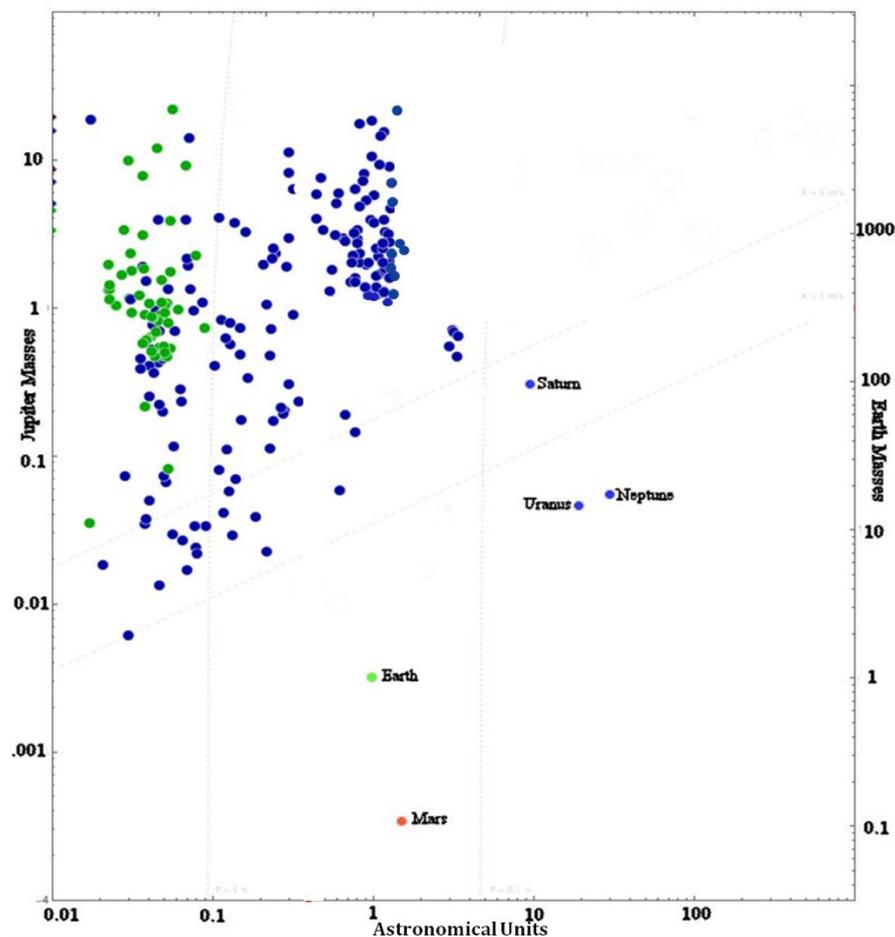
1. Quel type de planète semble être le plus souvent détecté : tellurique ou géante gazeuse ? Rappelez les principaux composants de ce type de planète.

2. Nous supposons que ces systèmes planétaires possèdent tous une étoile centrale de type solaire. Au vu de la gamme de distance à leur étoile où se trouve la majorité de ces planètes, vous attendiez-vous à trouver de tels composants ? Pourquoi ?

Non, il fait trop chaud si proche de l'étoile pour pouvoir former ici les éléments volatiles (H et He)

Statistique de détection d'exoplanètes

La figure suivante représente les caractéristiques physiques des exoplanètes (masse en fonction de la distance à l'étoile) découvertes entre 1995 et 2015 par les deux principales méthodes de détection : vitesses radiales en bleu et transits en vert.



1. Quel type de planète semble être le plus souvent détecté : tellurique ou géante gazeuse ? Rappelez les principaux composants de ce type de planète.

2. Nous supposons que ces systèmes planétaires possèdent tous une étoile centrale de type solaire. Au vu de la gamme de distance à leur étoile où se trouve la majorité de ces planètes, vous attendiez-vous à trouver de tels composants ? Pourquoi ?

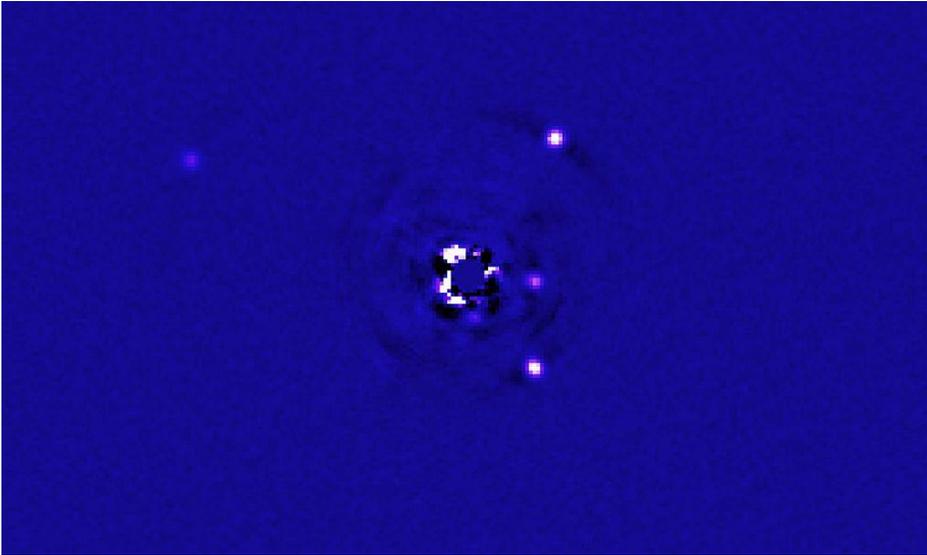
3. Par quel phénomène peut-on expliquer cette situation ?

La migration planétaire

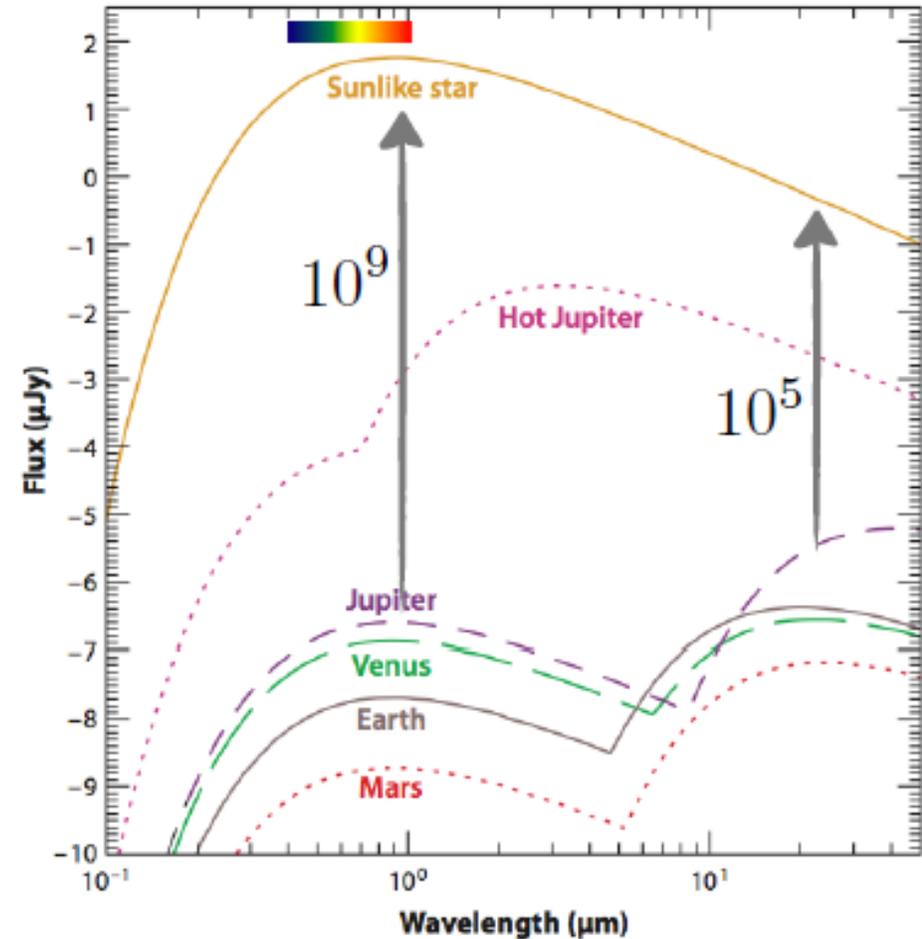
Les techniques de détection

Imagerie directe

Prendre une image du système planétaire.



Détection d'exoplanètes autour de HR8799



Difficulté : lumière de la planète est noyée par celle de l'étoile, nécessité d'avoir une haute résolution spatiale de l'instrument

Les techniques de détection

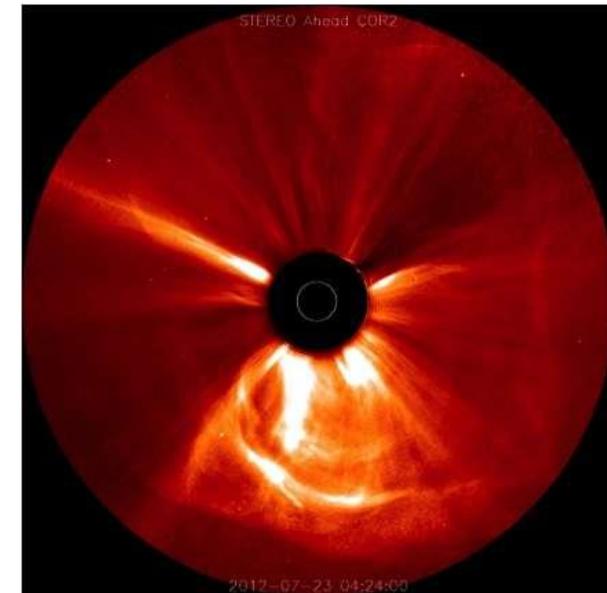
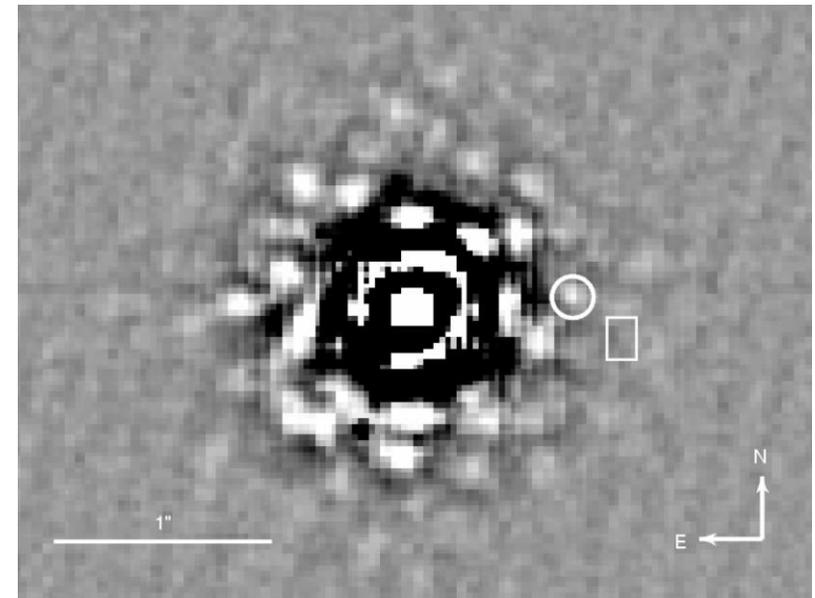
Imagerie directe

Solutions :

Imagerie différentielle (avec référence, spectrale, angulaire, polarimétrique)

Coronographie : masquer la lumière centrale (= lumière de l'étoile) en utilisant des cadrans (déphasage)

Interférométrie : interférence destructive au niveau de l'étoile. Chemin parcouru par les rayons issus de la planète \neq



Coronographie appliquée à la couronne solaire

Mesure de la vitesse de rotation d'une planète

Vous êtes en train d'explorer un système planétaire lointain. Arrivé sur une première planète, vous vous questionnez sur les autres planètes de ce système. Vous avez observé une exoplanète géante et vous désirez mesurer sa vitesse de rotation. Vous avez fait une mesure en spectroscopie visible de la planète géante le long de l'équateur (cf. figure) et vous vous lancez dans l'interprétation des données.

1. Vous remarquez sur ce spectre que certaines raies sont penchées alors que d'autres sont droites. Pourquoi y a-t-il et d'où viennent ces deux séries de raies ?

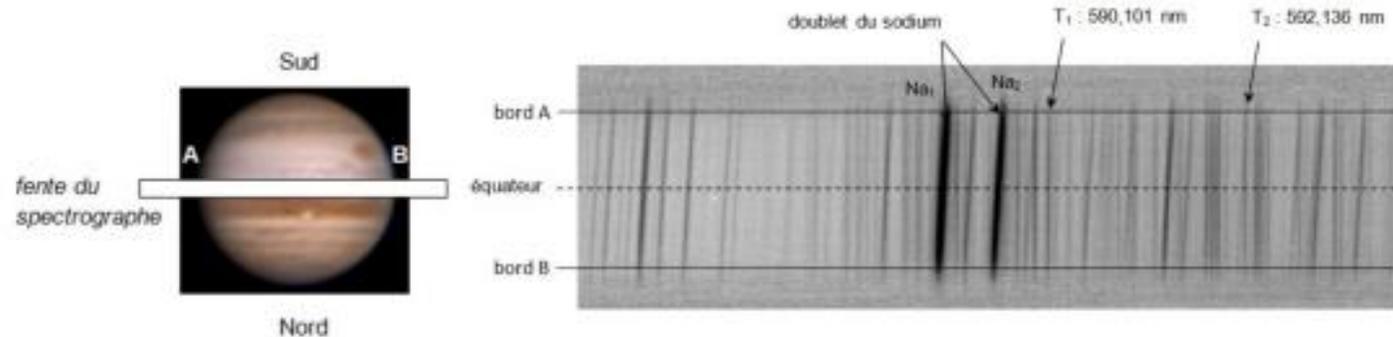


Figure montrant la configuration de la mesure et le spectre mesuré de la planète géante observée

2. Pourquoi les raies issues de la planète observée sont penchées ? Expliquer le phénomène physique à l'origine de cette observation.

3. Quel est le sens de rotation de la planète géante ? Rappelez-vous que pour preuve de l'expansion de l'univers on parle de 'décalage vers le rouge' (redshift).

4. L'effet Doppler se traduit ici par l'équation $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 4\frac{v}{c}$ ou v est la vitesse de rotation de la planète géante au niveau de l'équateur, c celle de la lumière, λ la longueur d'onde au repos et $\Delta\lambda$ la différence en longueur d'onde entre les deux bords du spectre. Vous avez mesuré une différence de 4 pixels (le spectre est obtenu via un capteur DD composé de pixels) entre le centre du spectre et l'un des bords. Vous savez qu'un pixel correspond à $1,12 \cdot 10^{-2}$ nm en longueur d'onde et que le doublet du sodium possède deux raies à 588.995 nm et 589.592 nm. Calculez la vitesse de rotation de la planète géant.

Mesure de la vitesse de rotation d'une planète

Vous êtes en train d'explorer un système planétaire lointain. Arrivé sur une première planète, vous vous questionnez sur les autres planètes de ce système. Vous avez observé une exoplanète géante et vous désirez mesurer sa vitesse de rotation. Vous avez fait une mesure en spectroscopie visible de la planète géante le long de l'équateur (cf. figure) et vous vous lancez dans l'interprétation des données.

1. Vous remarquez sur ce spectre que certaines raies sont penchées alors que d'autres sont droites. Pourquoi y a-t-il et d'où viennent ces deux séries de raies ?

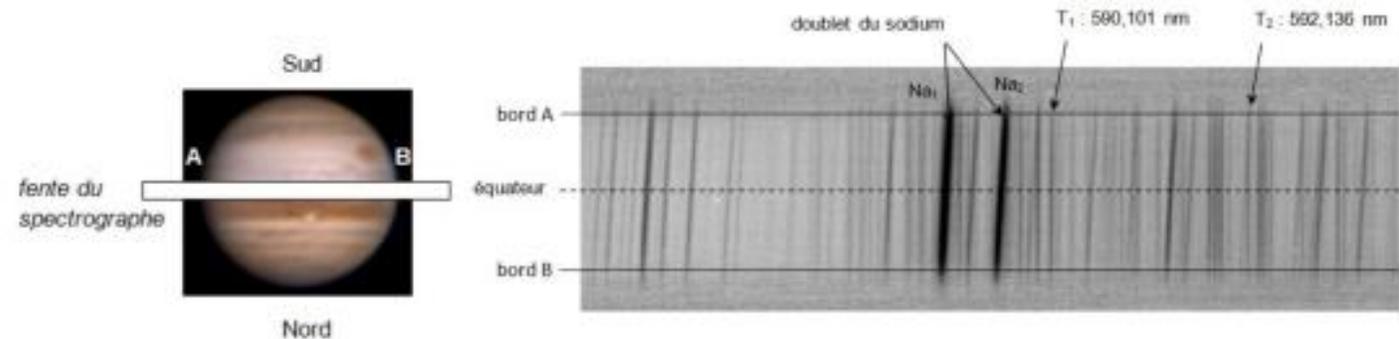


Figure montrant la configuration de la mesure et le spectre mesuré de la planète géante observée

La série de raies penchées vient de l'exoplanète observée. L'autre série de raies (raies droites) est due à l'atmosphère de la planète sur laquelle on se trouve.

Mesure de la vitesse de rotation d'une planète

Vous êtes en train d'explorer un système planétaire lointain. Arrivé sur une première planète, vous vous questionnez sur les autres planètes de ce système. Vous avez observé une exoplanète géante et vous désirez mesurer sa vitesse de rotation. Vous avez fait une mesure en spectroscopie visible de la planète géante le long de l'équateur (cf. figure) et vous vous lancez dans l'interprétation des données.

1. Vous remarquez sur ce spectre que certaines raies sont penchées alors que d'autres sont droites. Pourquoi y a-t-il et d'où viennent ces deux séries de raies ?

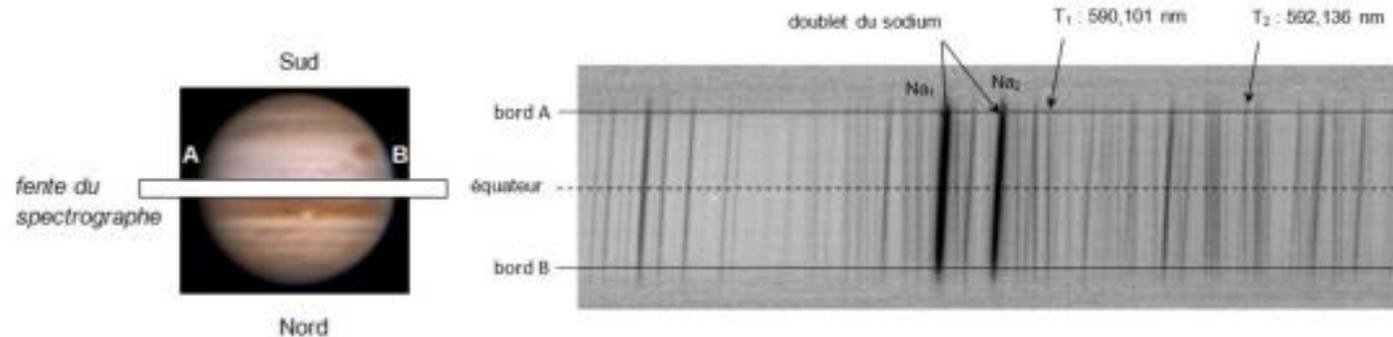


Figure montrant la configuration de la mesure et le spectre mesuré de la planète géante observée

2. Pourquoi les raies issues de la planète observée sont penchées ? Expliquer le phénomène physique à l'origine de cette observation.

L'effet Doppler nous renseigne sur un décalage des raies dû à un déplacement de l'objet par rapport à l'observateur. La planète géante, en tournant, va produire un décalage spectral entre ses bords et le centre : les raies sont penchées.

Mesure de la vitesse de rotation d'une planète

Vous êtes en train d'explorer un système planétaire lointain. Arrivé sur une première planète, vous vous questionnez sur les autres planètes de ce système. Vous avez observé une exoplanète géante et vous désirez mesurer sa vitesse de rotation. Vous avez fait une mesure en spectroscopie visible de la planète géante le long de l'équateur (cf. figure) et vous vous lancez dans l'interprétation des données.

1. Vous remarquez sur ce spectre que certaines raies sont penchées alors que d'autres sont droites. Pourquoi y a-t-il et d'où viennent ces deux séries de raies ?

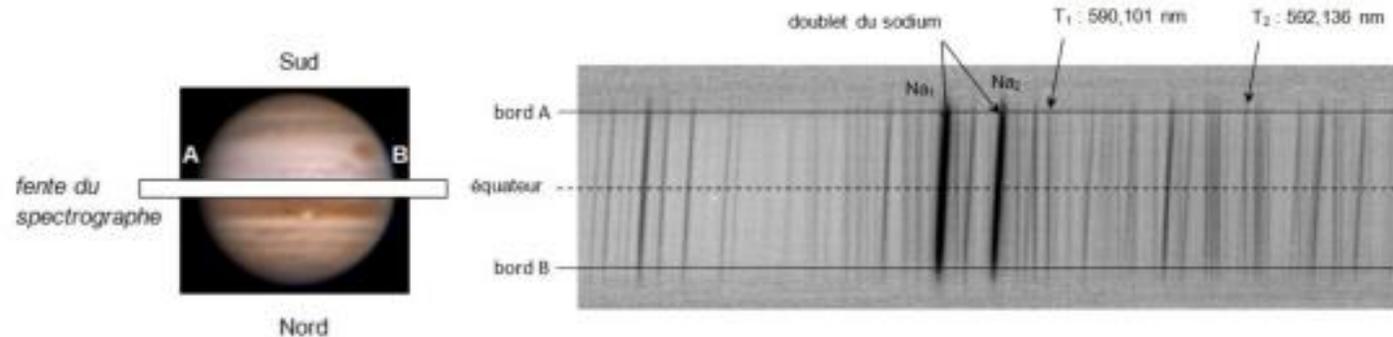


Figure montrant la configuration de la mesure et le spectre mesuré de la planète géante observée

2. Pourquoi les raies issues de la planète observée sont penchées ? Expliquer le phénomène physique à l'origine de cette observation.

3. Quel est le sens de rotation de la planète géante ? Rappelez-vous que pour preuve de l'expansion de l'univers on parle de 'décalage vers le rouge' (redshift).

Le bord A a les raies du doublet du sodium décalées vers le rouge : il s'éloigne de l'observateur.

Mesure de la vitesse de rotation d'une planète

Vous êtes en train d'explorer un système planétaire lointain. Arrivé sur une première planète, vous vous questionnez sur les autres planètes de ce système. Vous avez observé une exoplanète géante et vous désirez mesurer sa vitesse de rotation. Vous avez fait une mesure en spectroscopie visible de la planète géante le long de l'équateur (cf. figure) et vous vous lancez dans l'interprétation des données.

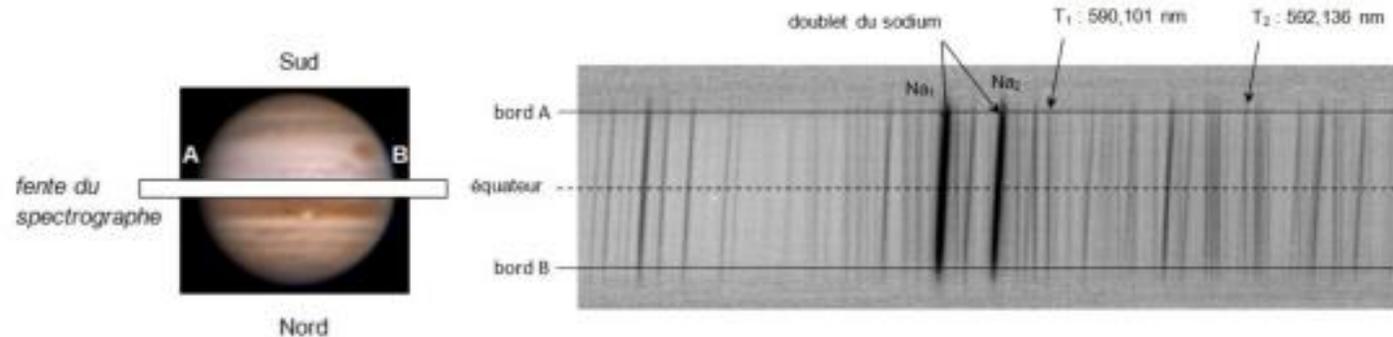


Figure montrant la configuration de la mesure et le spectre mesuré de la planète géante observée

4. L'effet Doppler se traduit ici par l'équation $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 4\frac{v}{c}$ ou v est la vitesse de rotation de la planète géante au niveau de l'équateur, c celle de la lumière, λ la longueur d'onde au repos et $\Delta\lambda$ la différence en longueur d'onde entre les deux bords du spectre. Vous avez mesuré une différence de 4 pixels (le spectre est obtenu via un capteur DD composé de pixels) entre le centre du spectre et l'un des bords. Vous savez qu'un pixel correspond à $1,12 \cdot 10^{-2}$ nm en longueur d'onde et que le doublet du sodium possède deux raies à 588.995 nm et 589.592 nm. Calculez la vitesse de rotation de la planète géant.

Il y a une différence de 8 pixels entre les 2 bords, soit $\Delta\lambda = 8.96 \cdot 10^{-2}$ nm.

Avec $\lambda = 588,995 \cdot 10^{-9}$ m, on en déduit $v = 11,4 \cdot 10^3$ m.s⁻¹

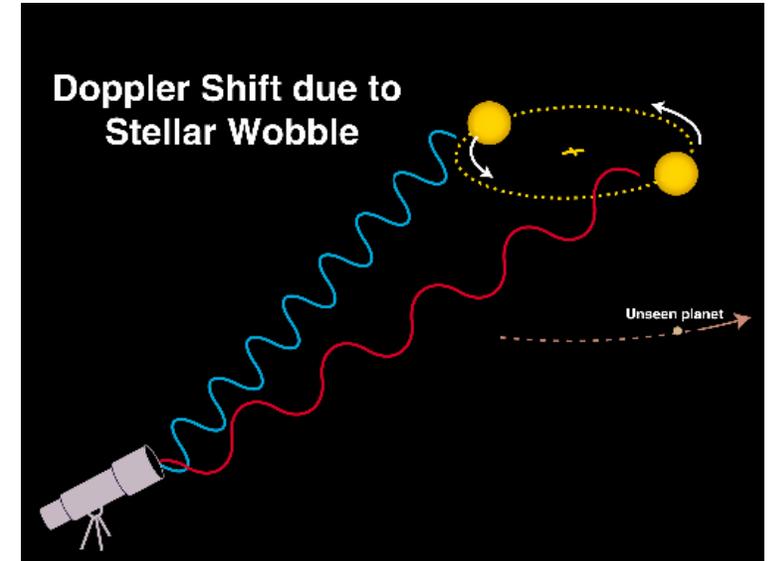
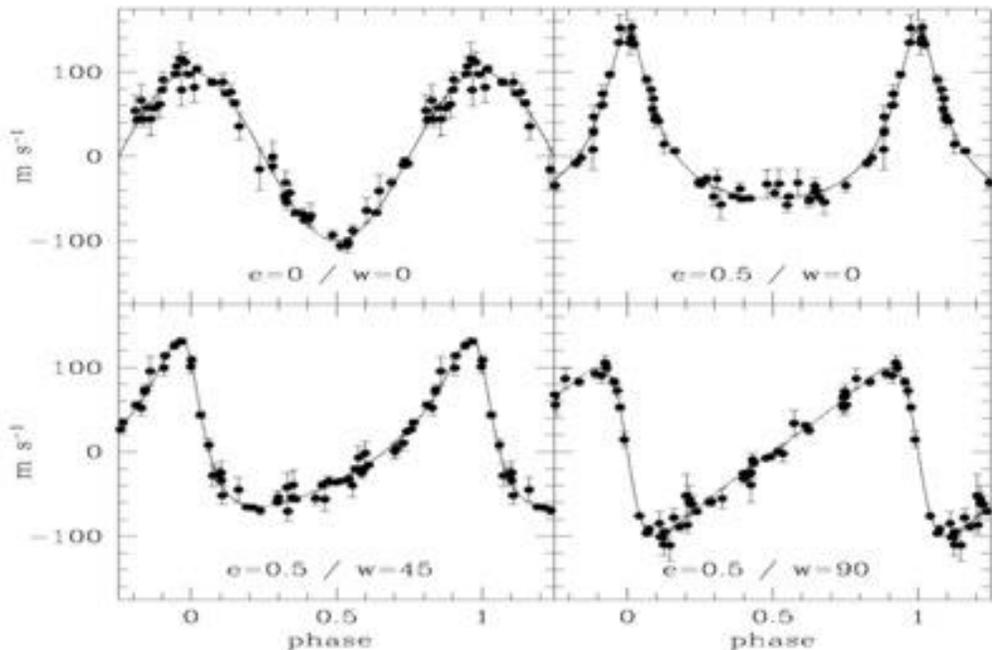
Les techniques de détection

Vitesses radiales

Méthode indirecte : mouvement de l'étoile par rapport au **centre de gravité** étoile-planète

Basée sur l'**effet Doppler** $\frac{\delta\lambda(t)}{\lambda} \approx \frac{\delta V(t)}{c}$

Courbes de **vitesses radiales** en fonction du **temps**



L'**amplitude** de la courbe K_* est liée à la masse de la planète : $M_{pl} \sin i$ (i : inclinaison de l'orbite par rapport au plan de référence = plan du ciel)

$$K_* = \frac{M_{pl} \sin i}{M_*} \sqrt{\frac{G M_*}{a}}$$

Détection d'une planète par la méthode des vitesses radiales

On rappelle la formule de l'amplitude la vitesse radiale :

$$K_* = \frac{M_{pl} \sin i}{M_*} \sqrt{\frac{G M_*}{a}}$$

1. D'après cette formule, est-il plus simple de détecter des planètes massives ou peu massives ? Proches ou éloignées de leur étoile ?
2. Que vaut l'amplitude de la vitesse radiale pour un système planétaire orbitant parallèlement au plan du ciel ?
3. On peut actuellement détecter des vitesses radiales de l'ordre de 1 m/s. Peut on détecter une planète de masse égale à celle de Jupiter située à 5 UA d'une étoile de type solaire et dont l'orbite est inclinée de 90° ?
4. Même question pour une planète de masse terrestre située à 1 UA.
5. Quelle peut être une solution pour réussir à détecter des planètes de faible masse ?

Détection d'une planète par la méthode des vitesses radiales

On rappelle la formule de l'amplitude la vitesse radiale :

$$K_* = \frac{M_{pl} \sin i}{M_*} \sqrt{\frac{G M_*}{a}}$$

1. D'après cette formule, est-il plus simple de détecter des planètes massives ou peu massives ?
Proches ou éloignées de leur étoile ?

$K \propto M_{pl}$. L'amplitude sera plus grande pour les planètes les plus massives : on détectera donc plus simplement les planètes massives.

$K \propto \frac{1}{\sqrt{a}}$ L'amplitude sera plus grande pour des distance étoile-planète faibles : on détectera donc plus simplement les planètes les plus proches de leur étoile.

Détection d'une planète par la méthode des vitesses radiales

On rappelle la formule de l'amplitude la vitesse radiale :

$$K_* = \frac{M_{pl} \sin i}{M_*} \sqrt{\frac{G M_*}{a}}$$

1. D'après cette formule, est-il plus simple de détecter des planètes massives ou peu massives ? Proches ou éloignées de leur étoile ?
2. Que vaut l'amplitude de la vitesse radiale pour un système planétaire orbitant parallèlement au plan du ciel ?

Lorsque l'orbite du système planétaire est dans le plan du ciel, $i = 0^\circ$, donc $\sin i = 0$ et $K_* = 0$. Dans le cas où $i = 0^\circ$, l'étoile va tourner autour du centre de gravité étoile-planète en restant dans le plan du ciel, elle ne se rapprochera pas et ne s'éloignera pas de l'observateur. On ne pourra donc pas observer de décalage des raies par effet Doppler et on ne mesurera pas de vitesse radiale.

Détection d'une planète par la méthode des vitesses radiales

3. On peut actuellement détecter des vitesses radiales de l'ordre de 1 m/s. Peut-on détecter une planète de masse égale à celle de Jupiter ($M_j = 0.001 M_{\text{soleil}}$) située à 5 UA ($1 \text{ UA} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$) d'une étoile de type solaire et dont l'orbite est inclinée de 90° ?

$$K_* = \frac{M_j \sin(90)}{M_{\text{soleil}}} \sqrt{\frac{G M_{\text{soleil}}}{5 \text{ UA}}}$$

$$K_* = \frac{0.001 * M_{\text{soleil}} * 1}{M_{\text{soleil}}} \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} * 1,98 \cdot 10^{30}}{5 * 1,5 \cdot 10^{11}}}$$

$$K_* = 13,3 \text{ m/s}$$

L'amplitude de la vitesse radiale est supérieure à la limite de détectabilité : on peut détecter cette planète.

Détection d'une planète par la méthode des vitesses radiales

3. On peut actuellement détecter des vitesses radiales de l'ordre de 1 m/s. Peut on détecter une planète de masse égale à celle de Jupiter située à 5 UA d'une étoile de type solaire et dont l'orbite est inclinée de 90° ?
4. Même question pour une planète de masse terrestre ($M_T = M_{\text{soleil}} / 332.10^3$) située à 1 UA.

$$K_* = \frac{M_T \sin(90)}{M_{\text{soleil}}} \sqrt{\frac{G M_{\text{soleil}}}{1 \text{ UA}}}$$

$$K_* = \frac{M_{\text{soleil}} * 1}{332.10^3 * M_{\text{soleil}}} \sqrt{\frac{6,67.10^{-11} * 1,98.10^{30}}{1 * 1,5.10^{11}}}$$

$$K_* = 0,1 \text{ m/s}$$

L'amplitude de la vitesse radiale est inférieure à la limite de détectabilité : on ne peut pas détecter cette planète.

Détection d'une planète par la méthode des vitesses radiales

3. On peut actuellement détecter des vitesses radiales de l'ordre de 1 m/s. Peut-on détecter une planète de masse égale à celle de Jupiter située à 5 UA d'une étoile de type solaire et dont l'orbite est inclinée de 90° ?
4. Même question pour une planète de masse terrestre située à 1 UA.
5. Quelle peut être une solution pour réussir à détecter des planètes de faible masse ?

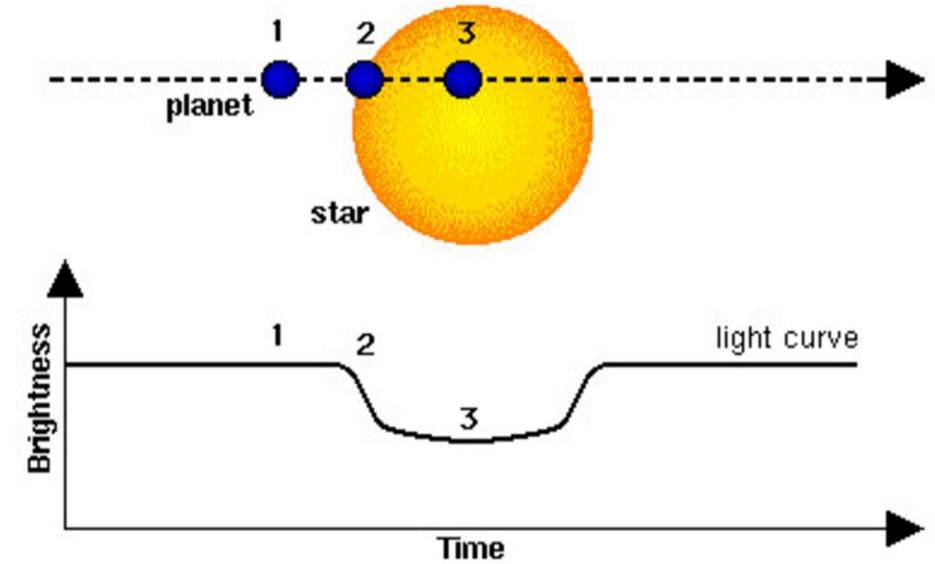
Pour détecter des planètes de faible masse, on peut essayer de les chercher autour d'étoiles moins massives que le Soleil, des naines rouges (entre 0.08 et $0.6 M_{\text{soleil}}$) par exemple.

Les techniques de détection

Méthode des transits

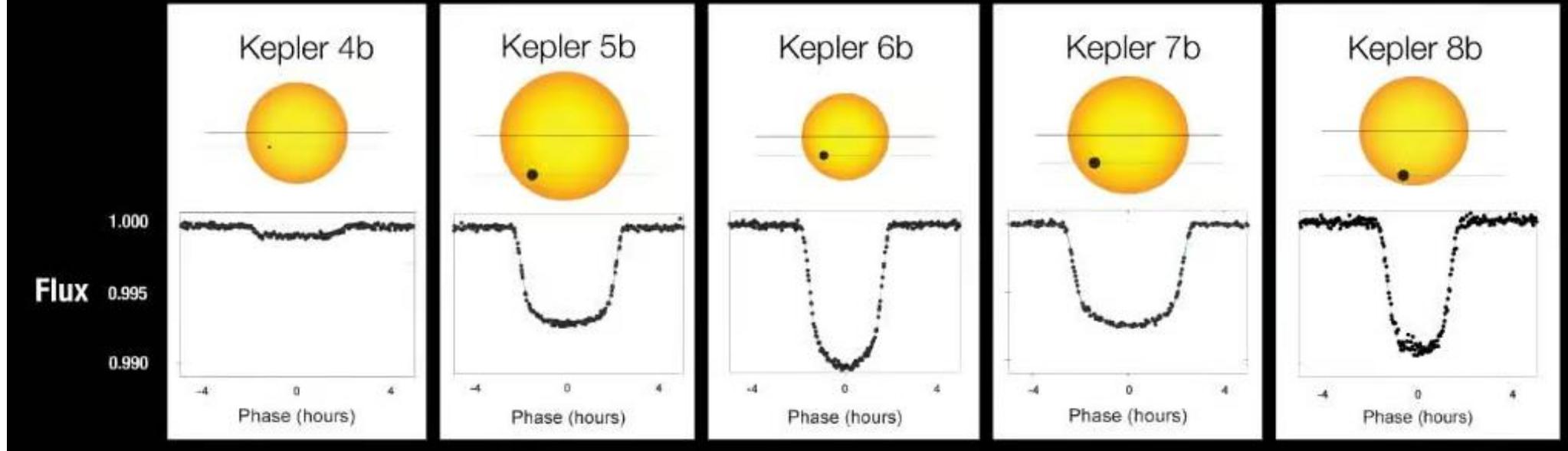
Technique indirecte, baisse du flux lumineux de l'étoile lorsque la planète transite devant son étoile

Quelle information peut on tirer de cette étude du flux lumineux ?



Quelques exemple de courbes de de transit

Transit Light Curves



Quels sont les paramètres qui influencent la modification du flux, comment ?

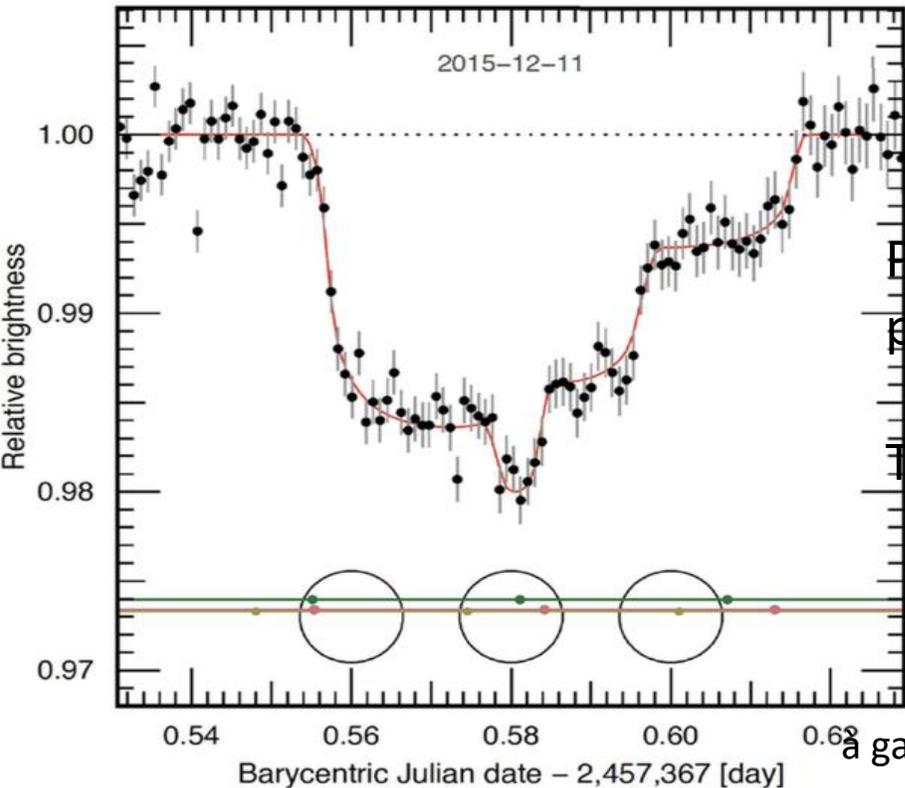
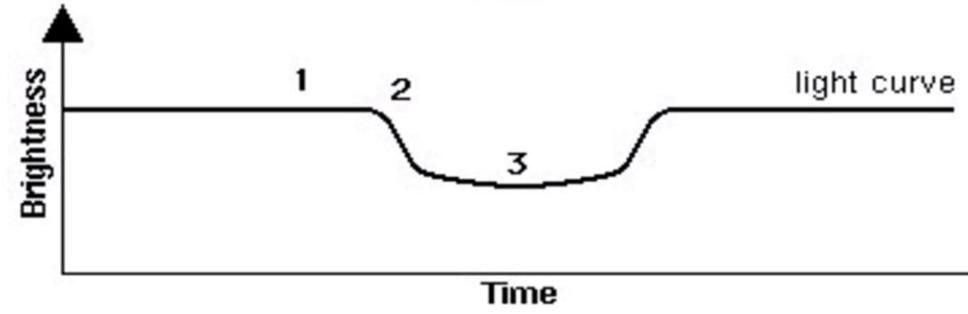
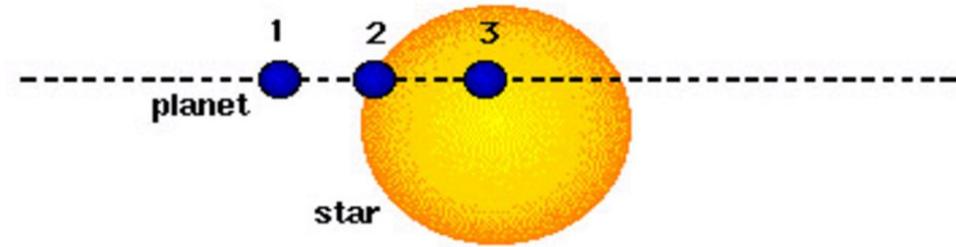
Les techniques de détection

Méthode des transits

Technique indirecte, baisse du flux lumineux de l'étoile lorsque la planète transite devant son étoile

Baisse du flux \propto Rayon de la planète

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$



Pas d'information sur la masse, **vérification avec vitesses radiales** (faux positifs)

Transit + vitesse radiales \rightarrow densité de la planète

à gauche : triple transit des planètes TRAPPIST-1c, 1e et 1f

Détection d'une planète par la méthode des transits

On rappelle la formule indiquant la baisse de flux d'une étoile lors du transit d'une exoplanète

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

1. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de la Terre ?
2. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de Jupiter ?
3. Pour quel type de planète la méthode du transit est-elle la mieux adaptée ?

Détection d'une planète par la méthode des transits

On rappelle la formule indiquant la baisse de flux d'une étoile lors du transit d'une exoplanète

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

1. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de la Terre ?

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{6400^2}{700\,000^2} = 0.01 \%$$

Détection d'une planète par la méthode des transits

On rappelle la formule indiquant la baisse de flux d'une étoile lors du transit d'une exoplanète

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

1. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de la Terre ?
2. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de Jupiter ?

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{70\,000^2}{700\,000^2} = 1\%$$

Détection d'une planète par la méthode des transits

On rappelle la formule indiquant la baisse de flux d'une étoile lors du transit d'une exoplanète

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{R_p^2}{R_*^2}$$

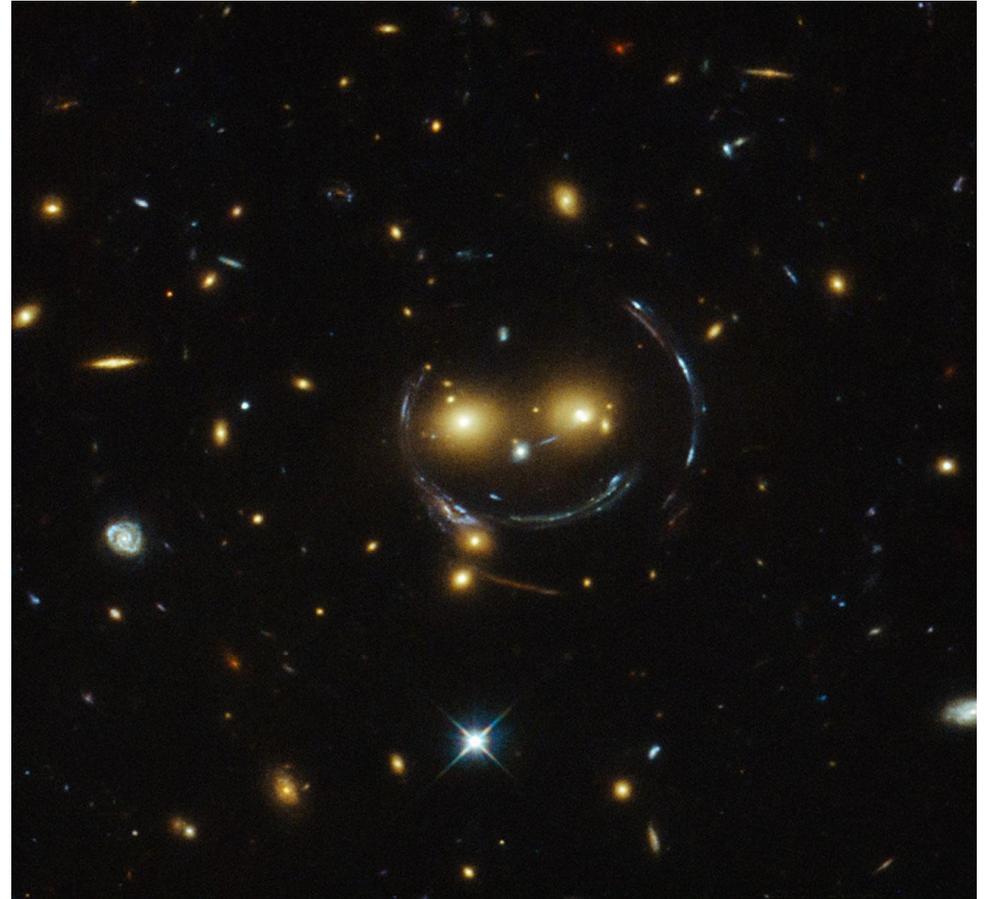
1. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de la Terre ?
2. Quelle est la baisse de flux d'une étoile de type solaire lors du transit d'une planète de la taille de celle de Jupiter ?
3. Pour quel type de planète la méthode du transit est-elle la mieux adaptée ?

Méthode du transit adaptée pour les planètes de grandes tailles – les géantes, proches de l'étoile. Cohérent avec els observations de l'exercice 1

Les techniques de détection

Micro-lentille gravitationnelle

Relativité Générale : rayons lumineux peuvent être courbés par un corps massif



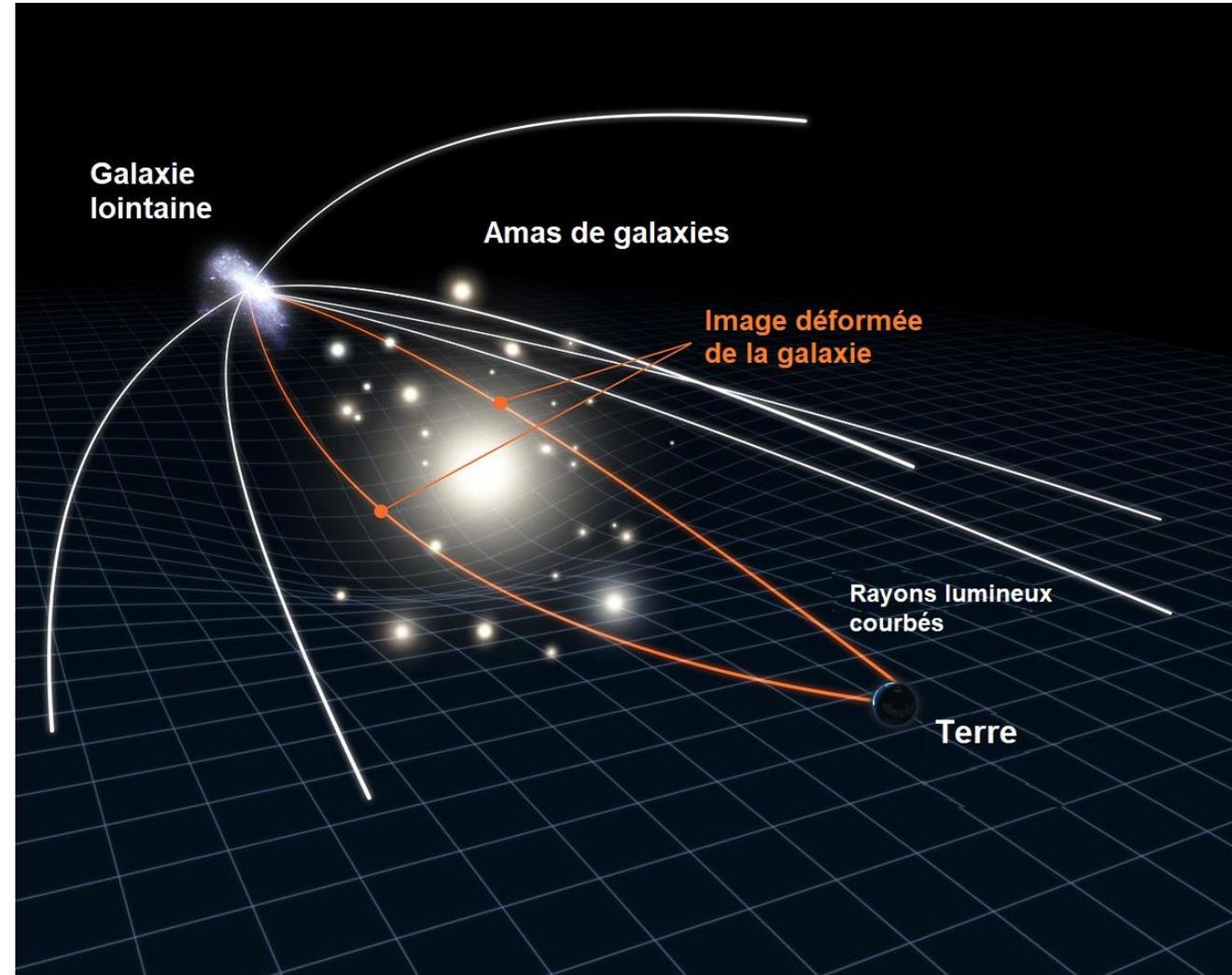
Les techniques de détection

Microlentille gravitationnelle

Relativité Générale : rayons lumineux peuvent être courbés par un corps massif

Principe : rayons d'une étoile source déviés par une lentille (étoile) → amplification de la lumière de l'étoile source.

Si lentille = étoile + planète, la masse de la lentille n'est plus concentrée en un seul point, anomalie dans la courbe de flux, une ou plusieurs autres amplifications plus petites



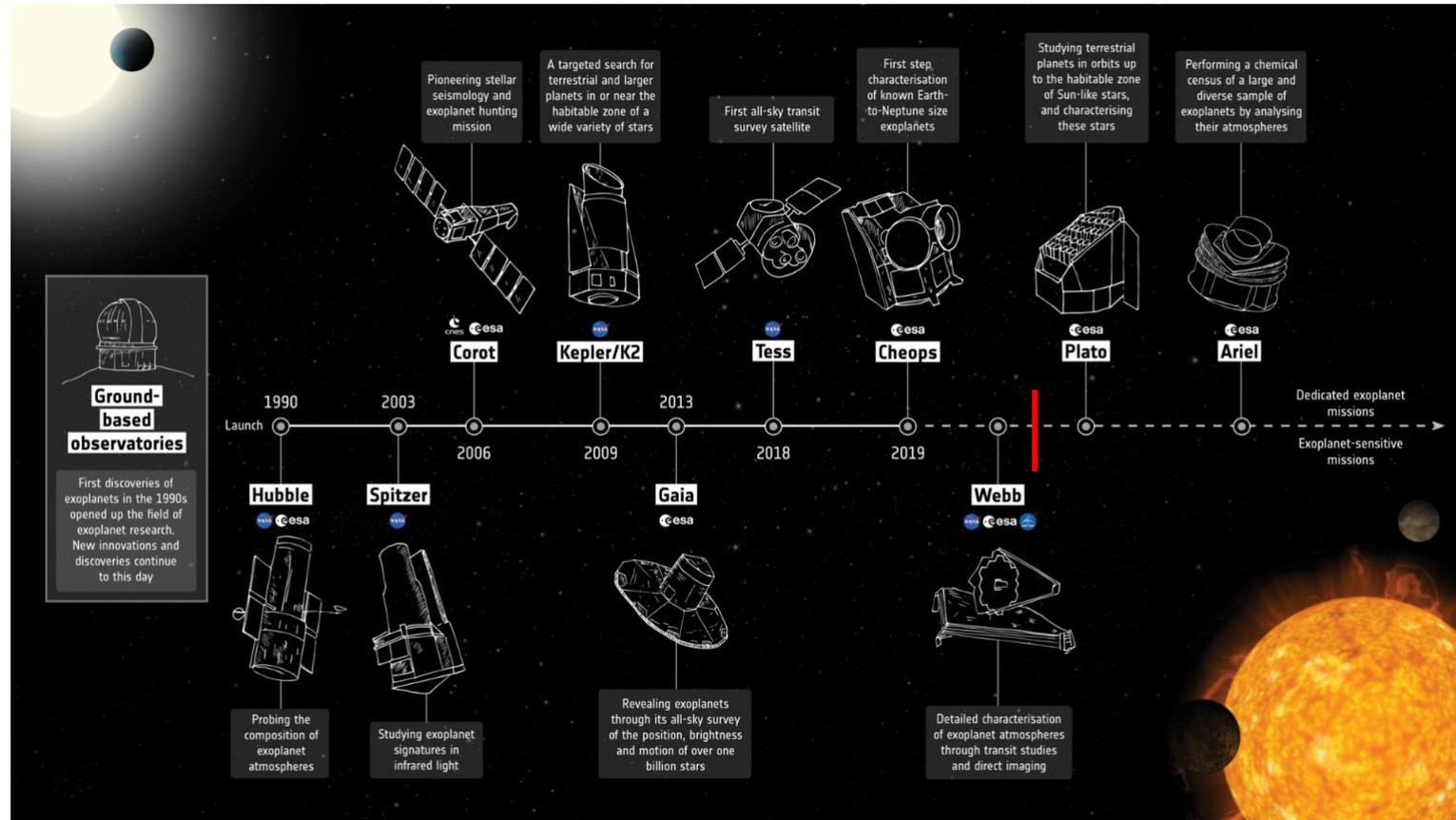
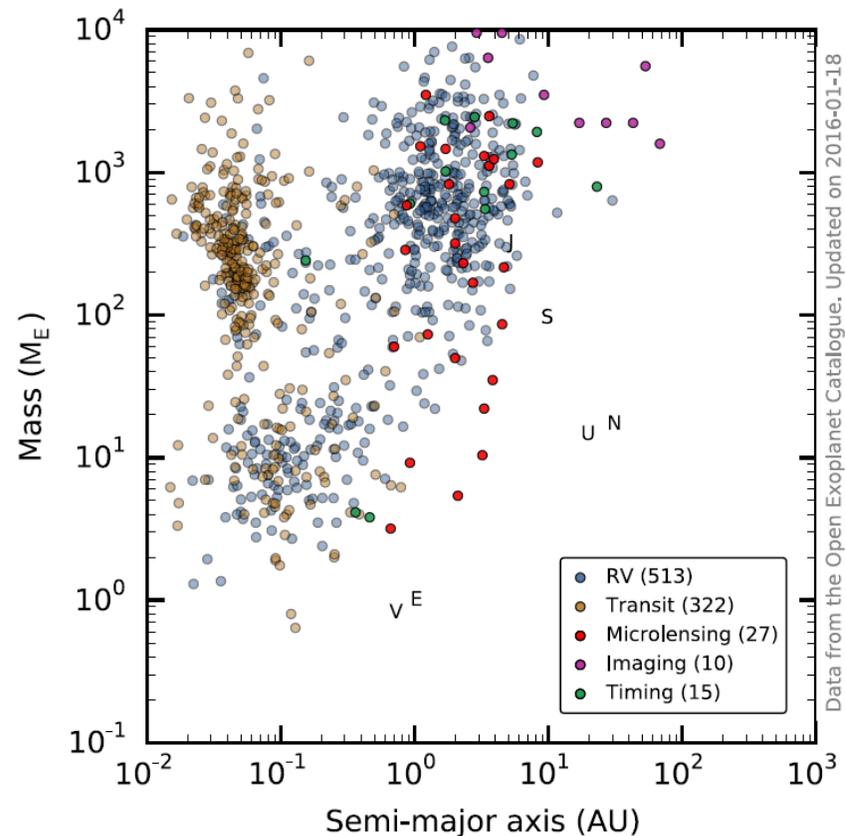
Les techniques de détection

Bilan des détections

Chaque technique a ses propres biais de détection

+ autres techniques qui n'ont pas été vues : chronométrage des pulsars, astrométrie

Premières détections : Jupiters chauds. Aujourd'hui : Super-Terres, Mini-Neptunes



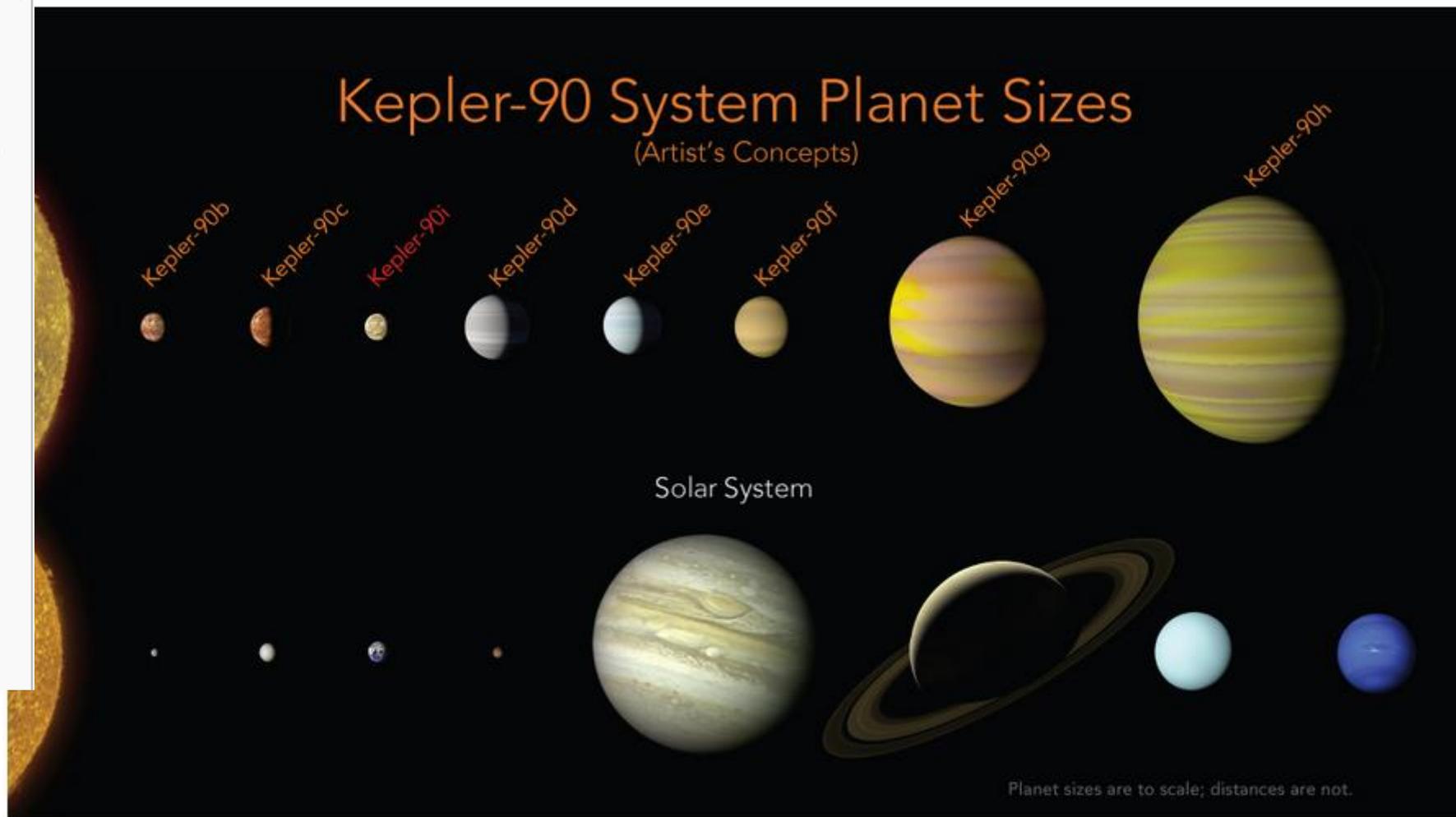
Quelques exemples de système exo planétaires

Kepler
Télescope spatial



Vue d'artiste du télescope spatial Kepler.

Kepler,
télescope
spatiale (NASA)

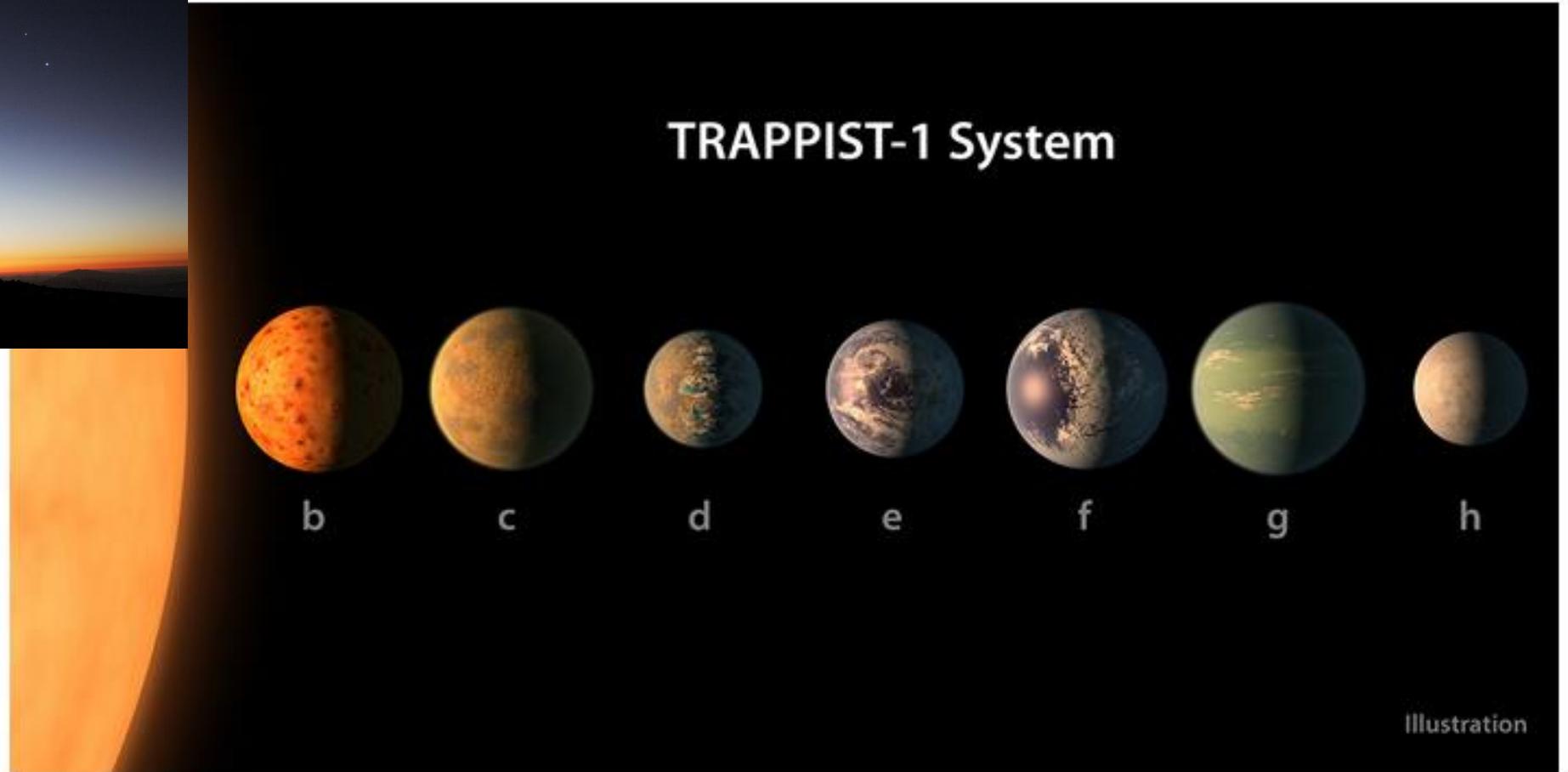


Artist's concept of the Kepler-90 system compared with our own solar system. Credit: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel

Quelques exemples de système exo planétaires

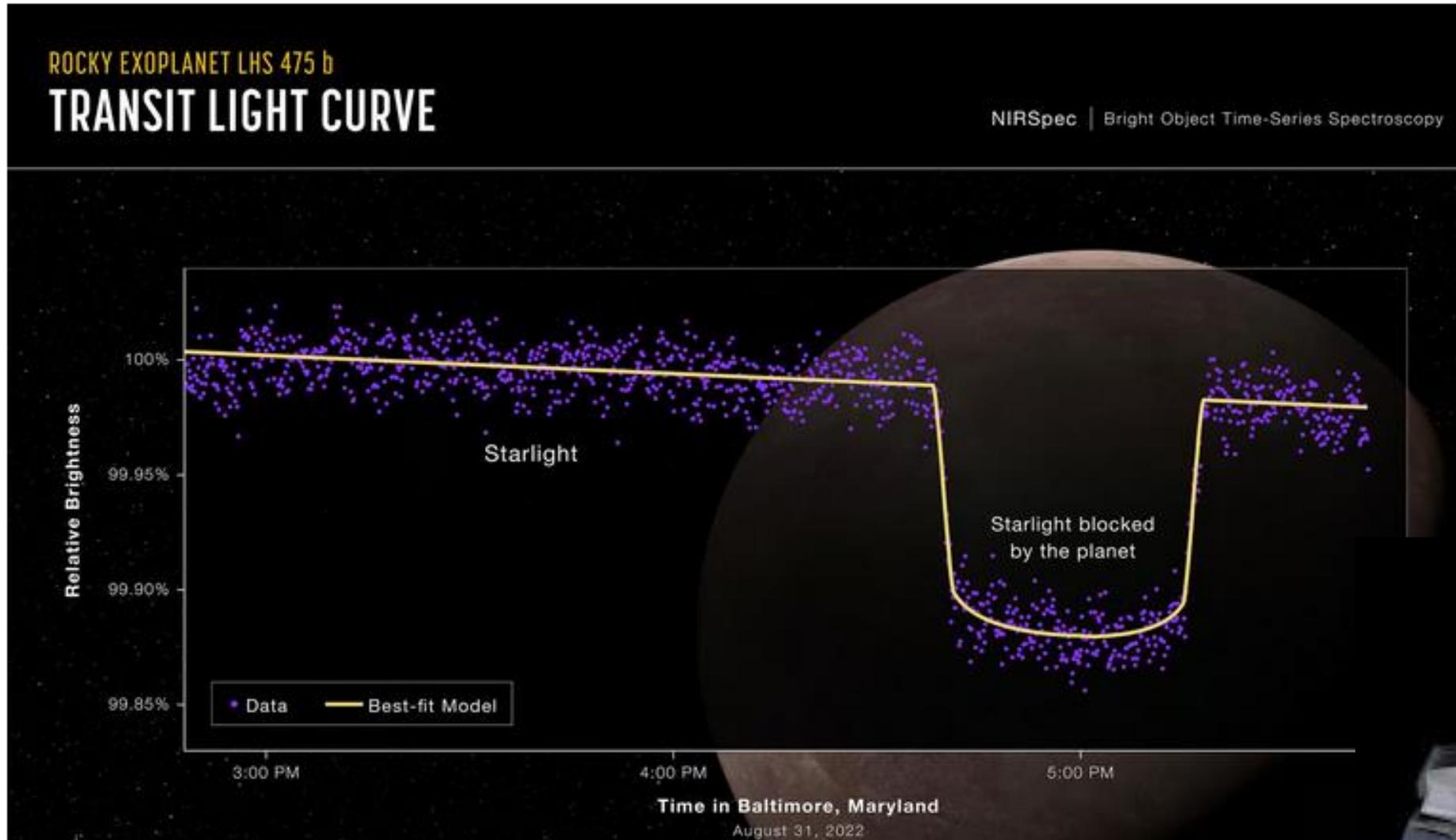


Trappist,
réseau de deux
télescopes
belges



This artist's concept shows what the TRAPPIST-1 planetary system may look like, based on available data about the planets' diameters, masses and distances from the host star. Credit: NASA-JPL/Caltech

Quelques exemples de système exo planétaires



JWST



Qu'en est t-il des système planétaires en formations ?

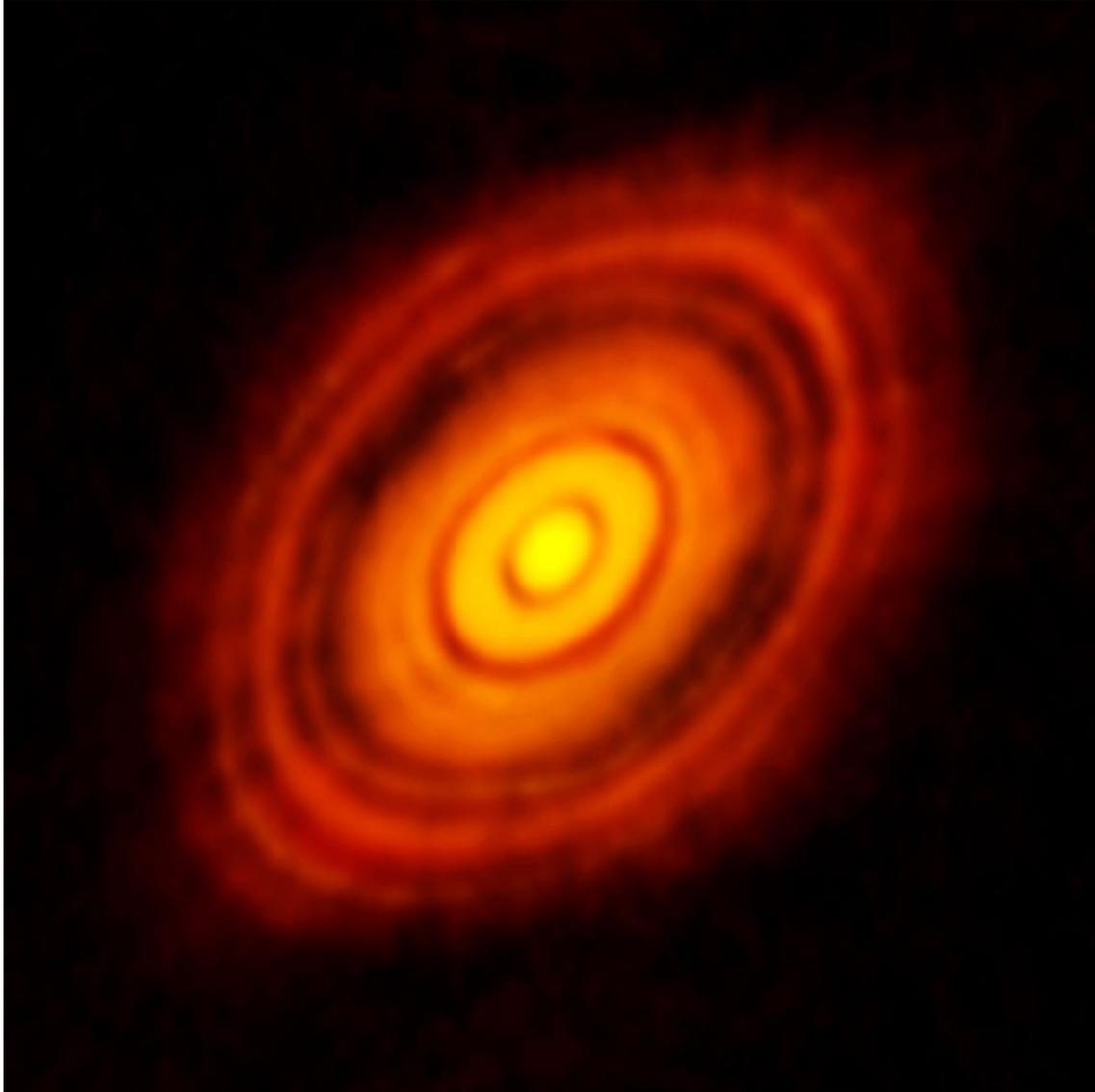
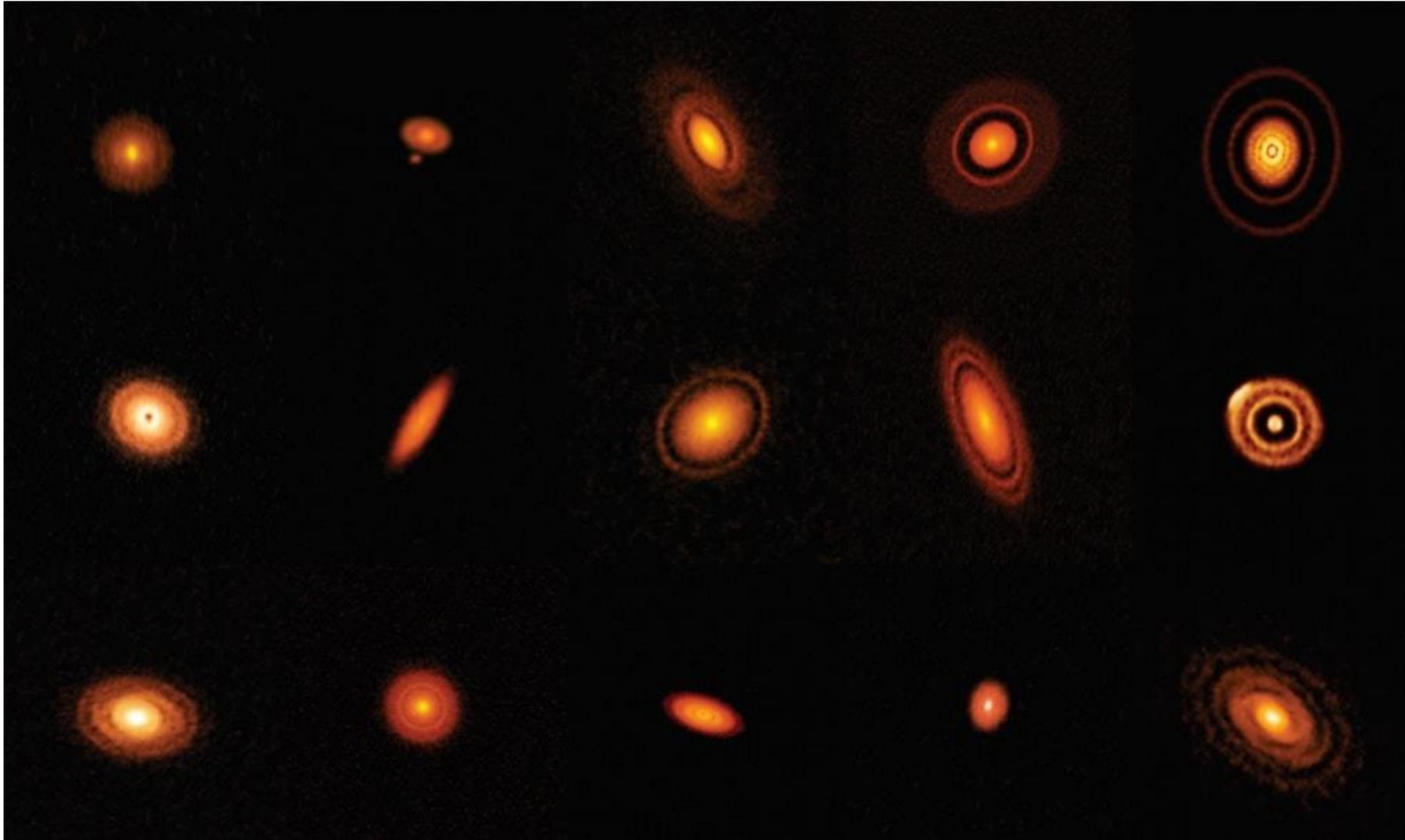


Image réalisée par ALMA du disque protoplanétaire qui entoure HL Tauri

- ALMA est le télescope le plus puissant pour observer **l'Univers froid – le gaz moléculaire et la poussière.**
- Les premières observations d'ALMA sur de jeunes disques protoplanétaires, datant d'environ un million d'années, révèlent **des structures étonnamment bien définies, notamment des anneaux et des trous saillants, qui semblent être les marques distinctives des planètes.**

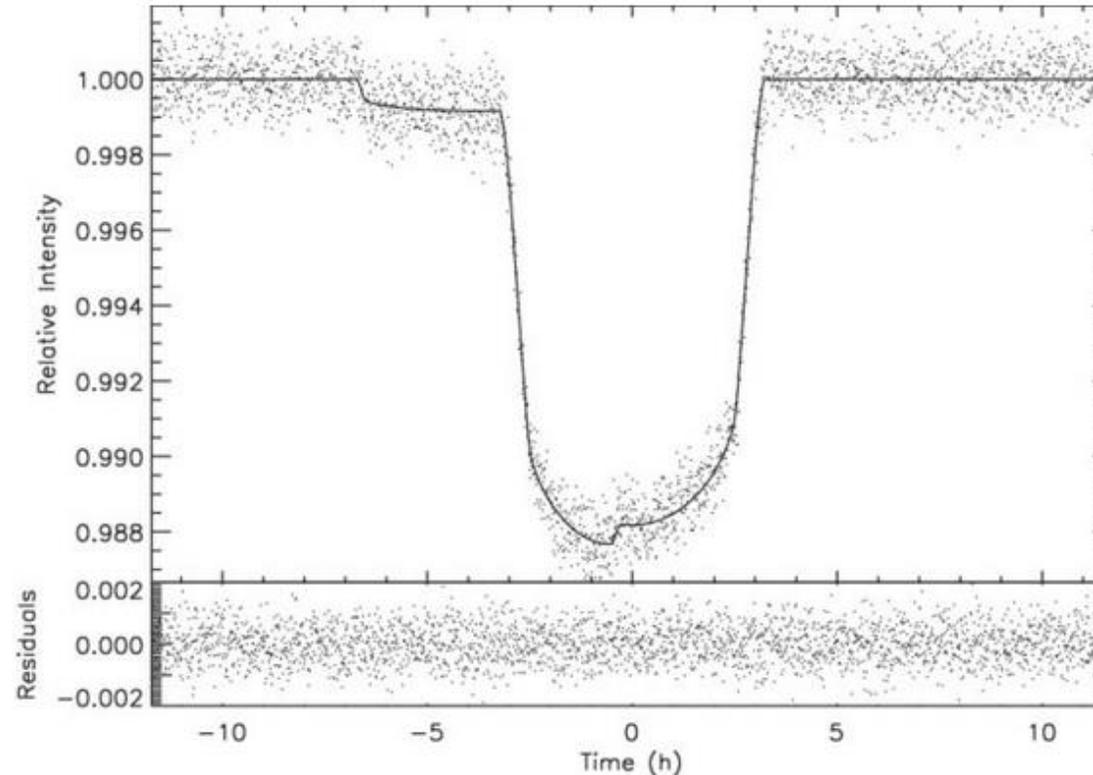
Etude des disques proto-planétaires



- Observation d'autres disques protoplanétaires par ALMA (différences et propriétés communes ?)
- Bientôt de nouvelles observations de disques grâce au JWST

Application de la méthode du transit sur l'étoile HD 209458

En utilise la méthode du transit pour détecter d'éventuelles exoplanètes. On obtient la courbe ci-dessous. Expliquer la courbe et en déduire le nombre d'exoplanètes minimum orbitant autour de HD 209458.

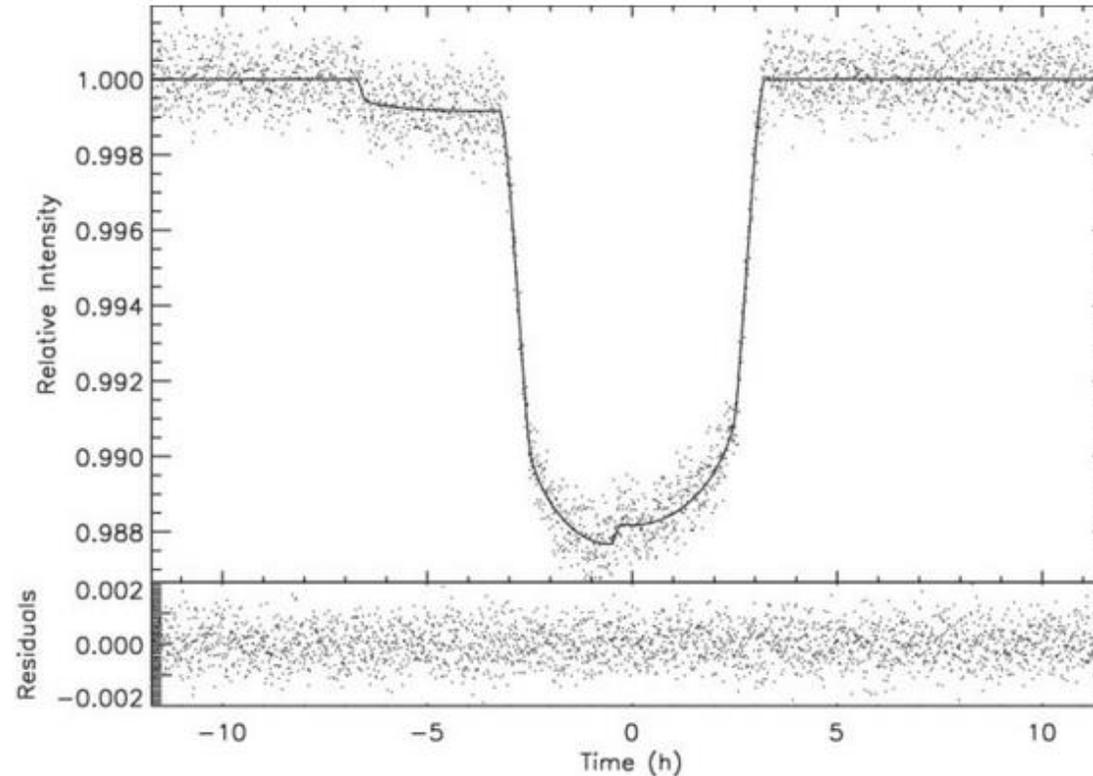


On rappelle la formule : $\Delta F / F = R_p^2 / R_e^2$

En connaissant le rayon de l'étoile $R_e = 7.10^5$ km. Estimer les rayons de ces objets. Les comparer entre eux et faire une hypothèse sur le type d'objet détecté.

Application de la méthode du transit sur l'étoile HD 209458

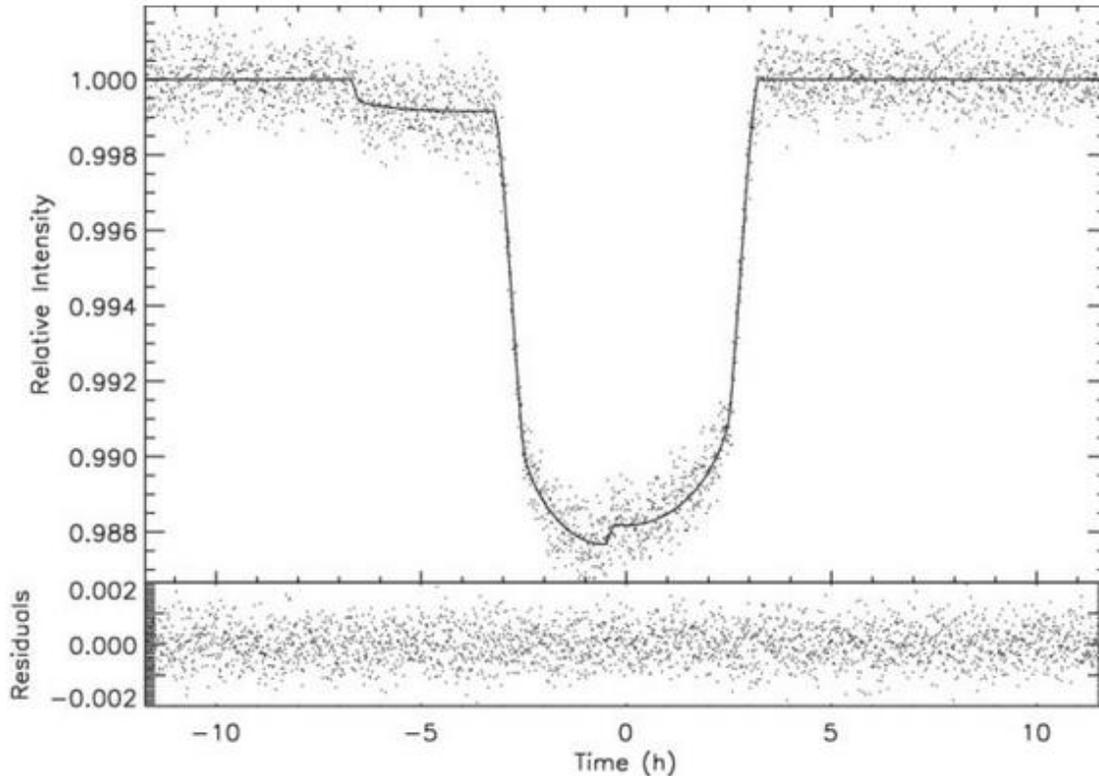
En utilise la méthode du transit pour détecter d'éventuelles exoplanètes. On obtient la courbe ci-dessous. Expliquer la courbe et en déduire le nombre d'exoplanètes minimum orbitant autour de HD 209458.



La méthode du transit se base sur l'étude de la baisse du flux lumineux de l'étoile lorsque la planète transite devant son étoile. Ici on voit une première baisse faible du flux lumineux, suivi d'une deuxième bcp plus importante. Il y a donc au minimum 2 corps qui transitent autour de HD 209458.

Application de la méthode du transit sur l'étoile HD 209458

En utilise la méthode du transit pour détecter d'éventuelles exoplanètes. On obtient la courbe ci-dessous. Expliquer la courbe et en déduire le nombre d'exoplanètes minimum orbitant autour de HD 209458.



Pour le premier corps :

$$\Delta F / F = 0.002. \text{ Donc } R_{p_1} = \sqrt{0.002} * R_e = 3,1. 10^4 \text{ km.}$$

Pour le deuxième corps :

$$\Delta F / F = 0.012. \text{ Donc } R_{p_2} = \sqrt{0.012} * R_e = 7,6. 10^4 \text{ km.}$$

$R_{p_1} < R_{p_2}$, le premier corps est plus petit que le deuxième, il s'agit peut être d'une planète tellurique et d'une planète gazeuse, ou d'une planète et de son satellite.

On rappelle la formule : $\Delta F / F = R_p^2 / R_e^2$

En connaissant le rayon de l'étoile $R_e = 7.10^5 \text{ km}$. Estimer les rayons de ces objets. Les comparer entre eux et faire une hypothèse sur le type d'objet détecté.