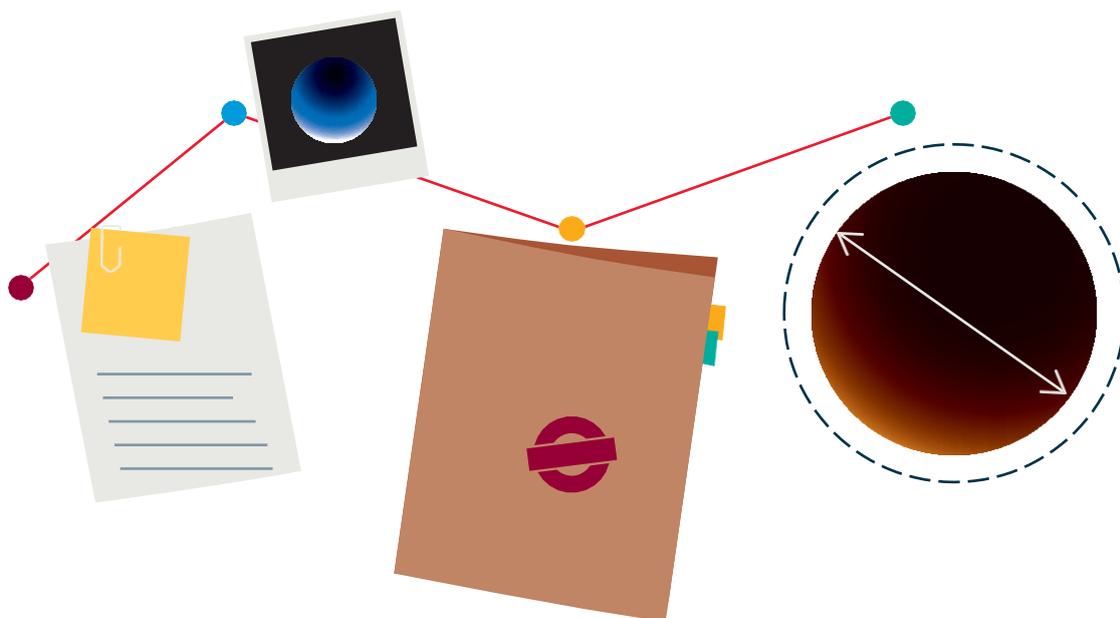


enseigner avec l'espace

→ PIRATER UNE EXOPLANÈTE

Devenir détective de l'espace





GUIDE DE L'ENSEIGNANT

<i>Faits marquants</i>	03
<i>Introduction</i>	04
<i>Activité</i>	05
<i>Défi 1 : Analyse des données de KELT-3b</i>	07
<i>Défi 2 : Analyse des données TOI-560c</i>	08
<i>Liens</i>	14
<i>Annexes</i>	15

enseigner avec l'espace - pirater une exoplanète | P39
www.esa.int/education

Le Bureau de l'éducation de l'ASE accueille favorablement les réactions et les commentaires
teachers@esa.int

Une production de l'ESA Education en collaboration avec l'ESA Science
Copyright 2023 © Agence spatiale européenne

→ PIRATER UNE EXOPLANÈTE

Devenir détective de l'espace

En bref

Sujet : Physique, Mathématiques, Astronomie

Âge de l'enfant : 14 - 19 ans

Type : activité étudiante et/ou hackathon

Complexité : moyenne

Temps de préparation de l'enseignant : 1 heure

Temps de leçon nécessaire : 90 minutes par défi (3 heures au total)

Coût : faible (0-10 euros)

Lieu : salle de classe

Utilise : ordinateur (si ce n'est pas possible, une alternative est suggérée)

Mots-clés : Physique, Mathématiques, Astronomie Exoplanète, Transit

Brève description

Dans cette activité, les élèves caractériseront deux exoplanètes en analysant les données acquises par le satellite Cheops de l'ESA. Les élèves travailleront comme de vrais scientifiques et ajusteront un modèle aux données pour en extraire les paramètres les mieux adaptés.

L'activité peut être réalisée dans un format guidé ou dans un format d'apprentissage par projet, par exemple dans le cadre d'un hackathon. Le guide de l'enseignant présente les deux options.

Les activités sont complétées par des explications vidéo préparées par des experts en exoplanètes.

Objectifs d'apprentissage

- Travailler scientifiquement avec des données satellitaires réelles.
- Appliquer des techniques d'analyse de données mathématiques en adaptant un modèle à des données réelles.
- Découvrez la troisième loi de Kepler et la mécanique orbitale.
- Comprendre ce qu'est un transit d'exoplanète.
- Renforcer les capacités de travail en équipe dans un délai limité.

Vous avez également besoin de

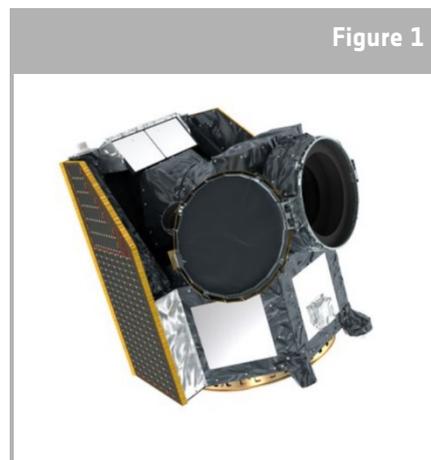
Matériel vidéo de soutien. Voir la section Liens.

- Introduction à Hack an Exoplanet - devenez un détective de l'exoplanète
- Mini-tutoriel *Allesfitter* - guide étape par étape sur la manière d'ajuster le meilleur modèle aux données
- Comment déterminer la taille d'une exoplanète ?
- La période orbitale et la distance d'une exoplanète, en utilisant la troisième loi de Kepler
- Les exoplanètes peuvent-elles être habitables ?
- De quoi sont faites les exoplanètes ?

→ Introduction

Cette activité éducative a été développée dans le cadre du tout premier hackathon de l'ESA Education pour les élèves du secondaire : "**Hack an Exoplanet**". Ces défis permettent aux élèves d'utiliser des données satellitaires réelles pour étudier des mondes extraterrestres et devenir des détectives d'exoplanètes pour une journée.

En janvier 2023, le satellite Cheops (CHaracterising ExOPlanet Satellite) de l'ESA a observé deux exoplanètes, KELT-3b et TOI-560c, spécialement pour cette activité. En analysant les données de Cheops, les élèves peuvent rejoindre les scientifiques de l'ESA dans la recherche de réponses et les aider à comprendre ces deux mondes extraterrestres mystérieux.



↑ Impression d'artiste de Khéops.

Les défis sont des activités pratiques où les étudiants doivent analyser les données fournies par le satellite Cheops de l'ESA. Les élèves devront caractériser les principales propriétés des exoplanètes, en utilisant les supports et la version éducative de l'outil d'ajustement, *allesfitter*, préparée spécifiquement pour ces ensembles de données. Les activités sont accompagnées d'explications et d'exemples écrits et vidéo, préparés par des experts en exoplanètes.

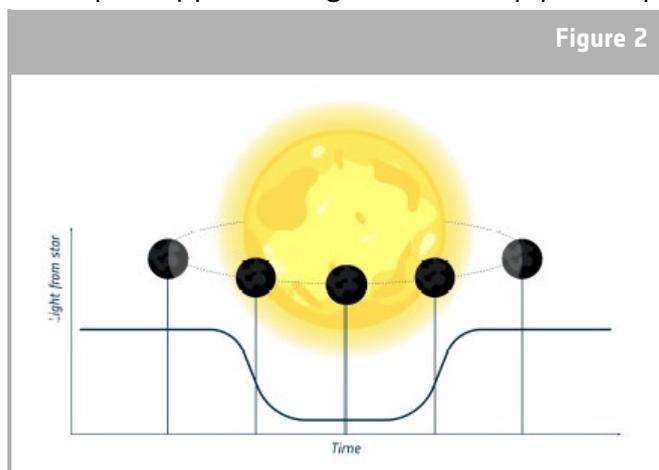
Les activités peuvent être présentées sous forme guidée ou sous forme d'apprentissage par projet, par exemple dans le cadre d'un hackathon. Le guide de l'enseignant présente les deux options.

Qu'est-ce qu'une exoplanète ?

Les exoplanètes, ou planètes extrasolaires, sont des planètes situées en dehors de notre système solaire et gravitant autour d'une étoile autre que le Soleil.

Comment étudier les exoplanètes ?

Il existe actuellement plus de 5 000 exoplanètes confirmées, dans environ 4 000 systèmes stellaires, mais les exoplanètes sont difficiles à détecter. Le signal que nous recevons d'une exoplanète est très faible par rapport au signal beaucoup plus important provenant de leur étoile hôte, plus grosse et plus brillante, et est généralement inférieur à 1 %.



↑ Représentation de la méthode de photométrie de transit.

Il existe différentes méthodes pour détecter et caractériser les exoplanètes. Dans cette activité, nous utiliserons la **méthode de la photométrie de transit**. Il s'agit de la méthode la plus courante pour trouver des exoplanètes.

Photométrie - le mot photométrie vient du grec : photo "lumière" et metry "mesure". Il s'agit d'une technique utilisée en astronomie pour mesurer la lumière des étoiles de manière quantitative.

Transit - l'exoplanète est détectée en mesurant un affaiblissement de la lumière provenant de l'étoile.

→ Activité

L'activité *Hack an Exoplanet* est composée de deux défis. Le premier défi est l'analyse de la courbe de lumière du transit de l'exoplanète géante KELT-3b. En suivant les instructions du matériel d'accompagnement et/ou les informations contenues dans les vidéos pédagogiques, les élèves seront en mesure de déduire les propriétés de KELT-3b.

Le deuxième défi est l'analyse de la courbe de lumière du transit de l'exoplanète mini-Neptune TOI-560c. Après avoir suivi le processus pour KELT-3b, les étudiants devraient être en mesure de réaliser l'analyse des données de TOI-560c de manière autonome en suivant un processus similaire.

Equipement

- Ordinateur avec accès à l'internet pour accéder au logiciel de navigation *allesfitter*. Si cette étape n'est pas possible, les équipes peuvent utiliser les meilleurs paramètres d'ajustement fournis dans l'**Annexe 1** - Courbe de lumière de transit de l'exoplanète KELT-3b et l'**Annexe 2** - Courbe de lumière de transit de l'exoplanète TOI-560c.
- Feuille de travail de l'élève imprimée pour chaque groupe :
 - Carte d'investigation des exoplanètes
 - Dossiers KELT-3b et TOI-560c
 - Informations sur les planètes du système solaire
 - Guide *allesfitter* étape par étape
- Calculatrice (facultatif)
- Cette activité comporte également six vidéos de soutien pour guider les équipes (voir la section Liens)
 - Introduction à Hack an Exoplanet - devenez un détective de l'exoplanète
 - Mini-tutoriel *Allesfitter* - guide étape par étape sur la manière d'ajuster le meilleur modèle aux données
 - Comment déterminer la taille d'une exoplanète ?
 - La période orbitale et la distance d'une exoplanète, en utilisant la troisième loi de Kepler
 - Les exoplanètes peuvent-elles être habitables ?
 - De quoi sont faites les exoplanètes ?

Les informations fournies dans les vidéos sont également présentées dans ce guide de l'enseignant.

Exercice :

Les ensembles de données pour les deux cibles ont été obtenus par le satellite Cheops de l'ESA les 22 et 23 janvier 2023, spécifiquement pour cette activité éducative. Les données ont été traitées par les experts de l'ESA et sont prêtes à être utilisées par les élèves.

Cette activité peut être présentée sous forme guidée ou sous forme d'apprentissage par projet, par exemple dans le cadre d'un hackathon. Le guide de l'enseignant présente les deux options.

Nous recommandons de réaliser cette activité en équipes de 3 à 4 étudiants. Cela leur permettra de débattre de la meilleure approche à adopter pour relever chaque défi et de discuter des résultats.

Remarque : si l'analyse des données est trop complexe, les équipes peuvent également compléter le dossier en recherchant les informations en ligne.

Format guidé

- Commencez par présenter le sujet des exoplanètes à la classe. Nous vous suggérons d'utiliser cette vidéo d'introduction : *Introduction à la recherche d'une exoplanète*.
- Divisez la classe en équipes de 3 ou 4 élèves.
- Présentez le défi aux élèves. Chaque équipe devra caractériser les principales propriétés de l'exoplanète KELT-3b en complétant le dossier disponible dans les fiches élèves. Les équipes devront déterminer la taille, la période orbitale, la distance orbitale, la température et la composition de KELT-3b, et comparer ses propriétés à celles des planètes de notre système solaire. La carte d'investigation des exoplanètes fournit plus d'informations pour chaque propriété mentionnée.
- Distribuez les documents d'appui aux équipes et donnez-leur quelques minutes pour les analyser.
- Fixez un temps pour que les équipes déterminent chaque propriété de l'exoplanète. ***Avant que*** les équipes ne commencent à déterminer chaque caractéristique, présentez-leur la vidéo d'accompagnement correspondante. Les vidéos d'accompagnement comprennent des informations sur la manière de déterminer chaque propriété et la solution pour KELT-3b.
- Assurez-vous que les équipes comprennent comment déterminer chaque paramètre avant de passer au suivant.
- Après avoir déterminé tous les paramètres, les équipes doivent présenter et discuter leurs conclusions avec la classe.
- Pour la prochaine étape, vous pouvez proposer de relever le défi 2 et de déterminer les caractéristiques de l'exoplanète TOI-560c.

Format basé sur un projet - hackathon

- Divisez la classe en équipes de 3 ou 4 élèves.
- Commencez par présenter le concept du hackathon aux élèves en utilisant cette vidéo d'introduction : *Introduction au hackathon d'une exoplanète*
- Vous pouvez laisser les équipes réaliser les défis de manière autonome (par exemple comme devoir ou comme projet de classe) ou les réaliser dans le cadre d'une classe commune ou d'un événement scolaire.
- Si nécessaire, renforcez le concept du défi auprès des étudiants. Chaque équipe devra caractériser les principales propriétés de l'exoplanète KELT-3b en complétant le dossier disponible dans les fiches élèves. Les équipes devront déterminer la taille, la période orbitale, la distance orbitale, la température et la composition de KELT-3b, et comparer ses propriétés à celles des planètes de notre système solaire. La carte d'investigation des exoplanètes fournit plus d'informations pour chaque propriété mentionnée.
- Distribuez la documentation aux équipes et donnez-leur un délai pour réaliser l'ensemble du défi. Nous suggérons environ 90 minutes pour l'analyse de KELT-3b.
- Pour s'assurer que les équipes progressent régulièrement, vous pouvez fixer un délai pour la détermination de chaque caractéristique ou montrer la vidéo d'accompagnement correspondante et donner des conseils à des moments précis. Les vidéos de soutien comprennent des informations sur la manière de déterminer chaque propriété et la solution pour KELT-3b.
- Après avoir déterminé tous les paramètres, les équipes doivent présenter et discuter leurs conclusions avec l'ensemble du groupe.
- Pour la prochaine étape, vous pouvez proposer de relever le défi 2 et de déterminer les caractéristiques de l'exoplanète TOI-560c.

→ Défi 1 - Analyse des données de KELT-3b

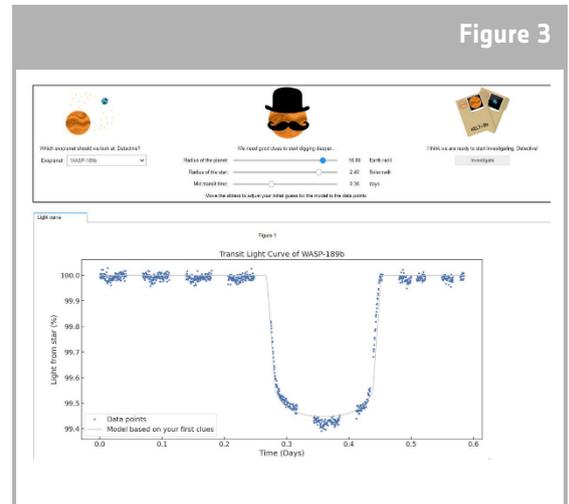
Accéder aux données satellitaires et les adapter

Les données peuvent être consultées en suivant ce lien : hackanexoplanet.esa.int/allesfitter

Cette version d'*allesfitter* est une application en ligne qui offre un accès facile et gratuit aux données du satellite Cheops, permettant de modéliser plusieurs exoplanètes à partir des mesures de transit. Elle est accessible à partir d'un navigateur de bureau.

Pour récupérer les paramètres de meilleur ajustement des données, les étudiants doivent suivre le guide étape par étape d'*allesfitter* dans la feuille de travail de l'étudiant ou suivre le tutoriel vidéo. Ce guide fournit des instructions sur la manière d'utiliser la version éducative de l'outil *allesfitter* basée sur un navigateur. Cette version de l'outil dispose déjà des ensembles de données téléchargés et ne permet que l'exploration de paramètres spécifiques : rayon de la planète, rayon de l'étoile et temps de transit à mi-parcours.

Note : Si cette étape n'est pas possible, les équipes peuvent utiliser les paramètres les mieux adaptés fournis dans l'**Annexe 1** - Courbe de lumière de transit de l'exoplanète KELT-3b et l'**Annexe 2** - Courbe de lumière de transit de l'exoplanète TOI-560c.



↑ Interface *Allesfitter*.

Comment déterminer la taille d'une exoplanète ?

Lors de l'utilisation de la méthode de photométrie de transit, le télescope mesure la quantité de lumière de l'étoile sur une période donnée. Les scientifiques adaptent des modèles aux données pour tenter de détecter des variations de la lumière de l'étoile qui pourraient être causées par une exoplanète.

Lorsque l'on utilise la méthode de photométrie de transit, on ne détecte pas directement l'exoplanète (sauf dans des cas très spécifiques). Nous mesurons plutôt la quantité de lumière de l'étoile que l'exoplanète bloque lorsqu'elle passe entre l'étoile et le télescope.

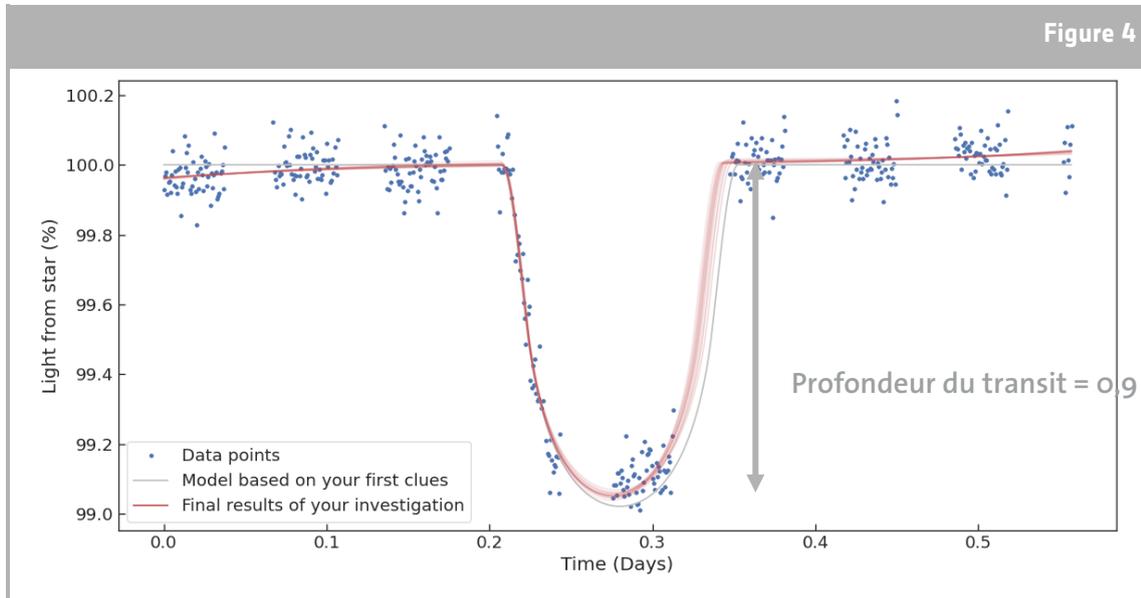
La quantité de lumière stellaire bloquée par l'exoplanète est normalement appelée profondeur du transit. Cette valeur est proportionnelle à la surface projetée de l'exoplanète.

Il est possible de déterminer le rayon de l'exoplanète (R_p) si l'on connaît le rayon de l'étoile (R_s) et la profondeur du transit :

$$\text{transit depth (\%)} \approx \frac{\pi \cdot R_p^2}{\pi \cdot R_s^2} \times 100$$

Exemple KELT-3b :

Analysons maintenant les données de KELT-3b à titre d'exemple.



↑ Données KELT-3b de Cheops avec le modèle de courbe de lumière de transit le mieux ajusté de *allesfitter*.

Le rayon de l'étoile KELT-3 est connu et fourni dans le dossier : $R_s = 1,70 R_{Sun}$

En analysant les données de Cheops, nous pouvons mesurer la profondeur de transit à environ 0,9 % (figure 4).

$$\text{En utilisant l'équation ci-dessus : } R_p = \sqrt{R_s^2 \times \frac{\text{transit depth}}{100}} = \sqrt{1,70^2 \times \frac{0,9}{100}} = 0,161 R_{Sun}$$

$$\text{Conversion en unités de rayon terrestre : } R_p = 0,161 \times 109 = \mathbf{17,5 R_{Earth}}$$

Lorsque les élèves exécutent le logiciel *allesfitter*, ils obtiennent une valeur d'ajustement optimale pour le rayon. Cette valeur peut être très différente de cette simple estimation. Sur l'interface, les élèves ne peuvent faire varier que trois paramètres, mais le logiciel *allesfitter* ajuste les données à l'aide d'un modèle complexe comportant plusieurs autres paramètres cachés qui peuvent fournir un ajustement plus complet aux données.

Comment déterminer la période orbitale et la distance, à l'aide de la troisième loi de Kepler ?

La période orbitale, T , d'une planète est le temps nécessaire à la planète pour effectuer une orbite complète autour de son étoile. Elle peut être mesurée en trouvant le temps de transit moyen (le centre du transit) de deux transits consécutifs de la même exoplanète et en mesurant l'intervalle de temps qui les sépare.

Pour ces observations, nous n'avons qu'un seul transit, mais nous pouvons extrapoler la période orbitale en comparant les données d'observation actuelles avec les données d'observation précédentes trouvées dans les archives de données.

Une fois la période orbitale de l'exoplanète connue, nous pouvons utiliser la troisième loi de Kepler pour calculer la distance orbitale moyenne, d , entre la planète et l'étoile.

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM_s} \right) d^3$$

Où G est la constante gravitationnelle et M_s la masse de l'étoile.

Exemple KELT-3b :

Analysons maintenant les données de KELT-3b à titre d'exemple. Dans cet exercice, les élèves doivent prêter une attention particulière aux unités.

- La constante gravitationnelle en unités SI est $G = 6,67430 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
- La masse de l'étoile KELT-3 est connue : $M_s = 1,96 M_{Sun}$
- Nous devons convertir sa masse en unités SI : $M_s = 3,90 \times 10^{30} \text{ kg}$
- L'ajustement du modèle nous a appris que la période orbitale, $T = 2,70339 \text{ jours}$. Conversion de la période orbitale en secondes : $T = 233\,573 \text{ s}$

Nous disposons maintenant de toutes les informations nécessaires pour déterminer la distance entre l'étoile et l'exoplanète.

$$d = \sqrt[3]{\frac{GM_s}{4\pi^2} T^2} = \sqrt[3]{\frac{6,67430 \times 10^{-11} \times 3,90 \times 10^{30}}{4\pi^2} 233\,573^2} = 7,112 \times 10^9 \text{ m} = \mathbf{0,048 \text{ au}}$$

Comparons maintenant la période et la distance orbitale moyenne de KELT-3b aux planètes de notre système solaire :

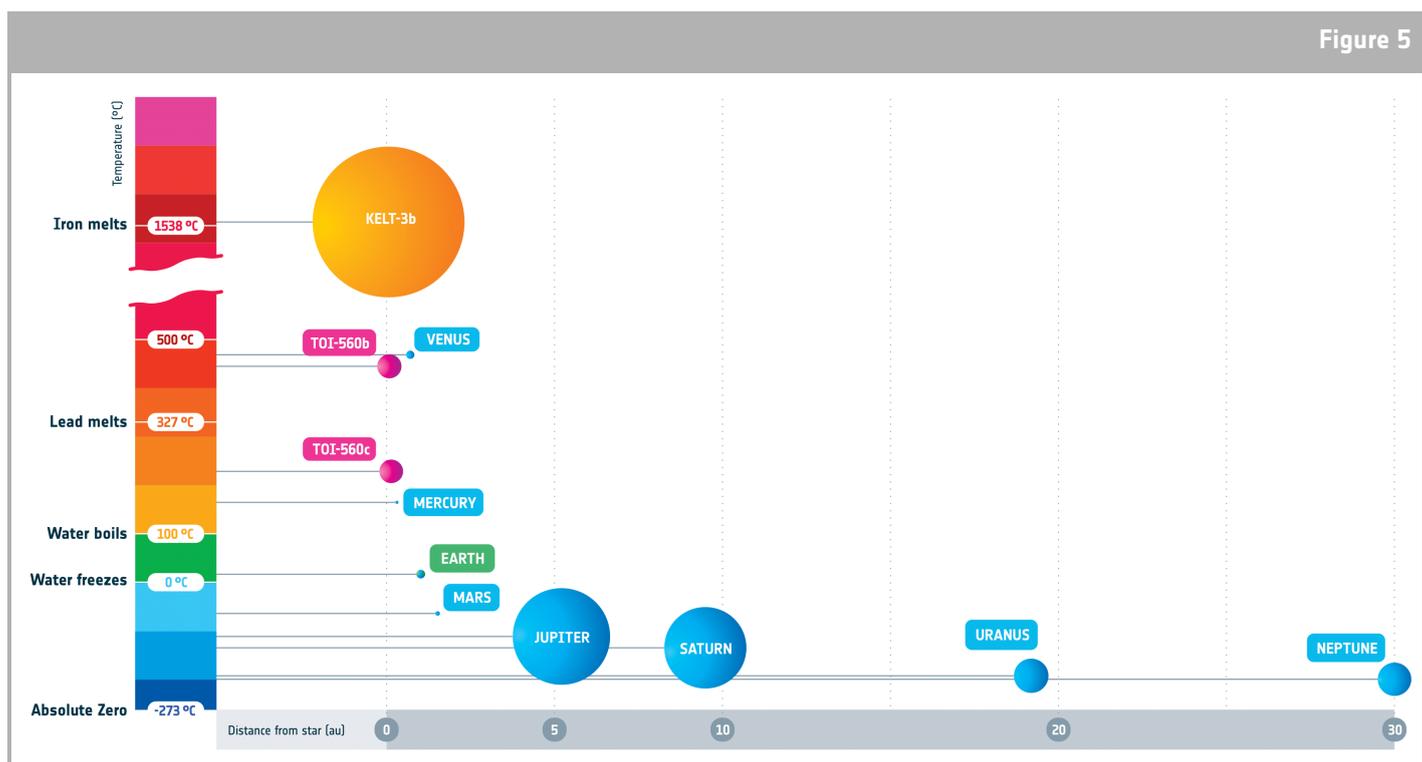
Planète	Période (jours)	Distance orbitale moyenne (au)
KELT-3b	2,70339	0,048
Mercure	87,97	0,4
Terre	365,25	1
Neptune	60 266,25	30

↑ Comparaison de la période et de la distance orbitale moyenne de KELT-3b et des planètes du système solaire

La période orbitale de KELT-3b est beaucoup plus courte que celle de Mercure, la planète la plus proche du Soleil dans notre système solaire, en raison de la faible distance qui sépare l'exoplanète de son étoile hôte. La méthode de photométrie de transit permet d'identifier plus facilement des planètes sur ce type d'orbite que des planètes comme celles de notre système solaire.

Comment savoir si une exoplanète est habitable ?

À ce jour, la Terre est le seul endroit de l'univers où l'on sait qu'il y a de la vie. On ne sait pas non plus si la vie pourrait se développer et exister dans des conditions très différentes de celles qui existent sur notre planète. Lorsqu'ils examinent les exoplanètes et définissent les conditions possibles d'habitabilité, les scientifiques tentent d'identifier des conditions similaires à celles de la Terre, comme la température. Un facteur important à prendre en compte pour l'habitabilité est la température. La température d'une planète est principalement définie par la distance qui la sépare de son étoile hôte. Lorsqu'une planète orbite autour d'une étoile à une distance telle que de l'**eau liquide** peut être présente à sa surface, la planète se trouve dans la **zone habitable** de son étoile hôte.



↑ Diagramme présentant la taille et la température des planètes en fonction de la distance à l'étoile hôte. La taille et la distance des planètes sont représentées par deux échelles différentes.

Vénus : l'exception dans le système solaire

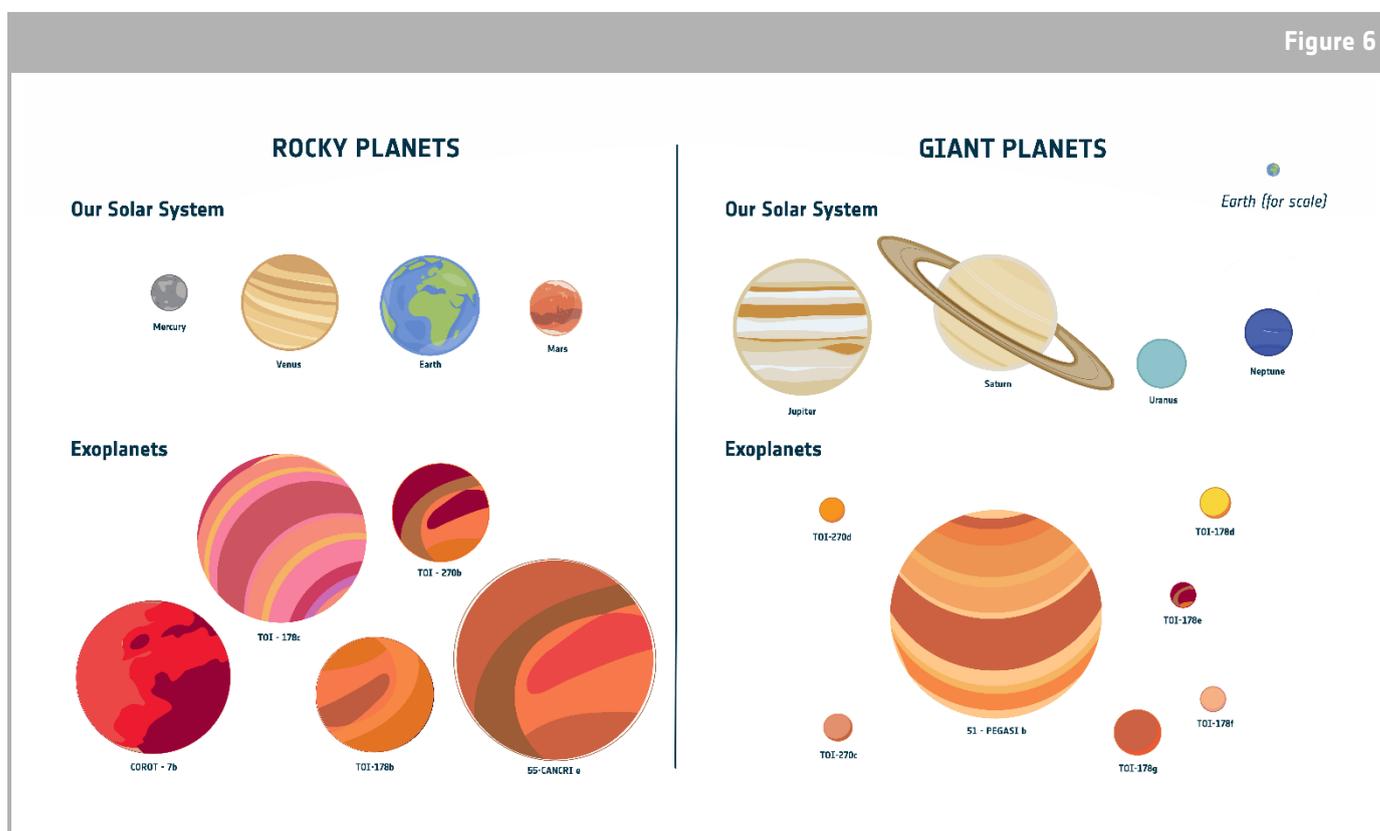
La température mesurée à la surface d'une planète est également influencée par son atmosphère. Dans le système solaire, Vénus est un exemple extrême. Son épaisse atmosphère agit comme une serre et chauffe la surface au-dessus du point de fusion du plomb, ce qui en fait une planète plus chaude que Mercure, bien qu'elle soit plus éloignée du Soleil.

Exemple KELT-3b :

Prenons l'exemple de KELT-3b. Il est peu probable que KELT-3b abrite de la vie car elle est trop proche de son étoile hôte, ce qui rend sa température de surface très élevée, supérieure au point de fusion du fer. La plupart des acides aminés, les éléments constitutifs de la vie, ne survivraient pas à des températures aussi extrêmes. La planète est également bombardée par des niveaux élevés de radiations en raison de sa très grande proximité avec son étoile hôte.

De quoi sont faites les exoplanètes ?

Dans notre système solaire, les planètes sont généralement divisées en deux catégories : les planètes rocheuses et les planètes gazeuses. Cependant, les exoplanètes peuvent être très différentes des planètes voisines auxquelles nous sommes habitués.



↑ Exemples d'impressions d'artistes de véritables exoplanètes déjà découvertes en orbite autour d'étoiles proches.

En calculant la **densité** moyenne **d'**une exoplanète, **ρ** il est possible d'avoir une idée de la composition de l'exoplanète.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Où **M** est la masse de l'exoplanète et **V** le volume de l'exoplanète.

La masse et le volume de l'exoplanète sont normalement déterminés avec une grande erreur associée aux valeurs. Ces erreurs se propagent ensuite au calcul de la densité de l'exoplanète, créant une incertitude dans la valeur de la densité de l'ordre de 10 à 30 %.

Une autre technique utilisée pour étudier les exoplanètes est la spectroscopie. Avec cette technique, la lumière reçue de l'étoile ou de l'exoplanète est divisée en différentes longueurs d'onde, ce qui permet de déterminer la **composition atmosphérique** ou la couverture nuageuse de l'exoplanète.

Exemple KELT-3b :

Analysons maintenant les données de KELT-3b à titre d'exemple. La masse de KELT-3b est de $617 M_{\text{Earth}}$. Cette valeur ne peut être déterminée à partir de la photométrie de transit. Elle a été déterminée à partir d'observations antérieures utilisant une technique différente appelée vitesse radiale.

Dans le premier exercice, nous avons déjà déterminé le rayon de KELT-3b. En connaissant le rayon, nous pouvons calculer le volume de l'exoplanète, en supposant qu'il s'agit d'une sphère parfaite : $V = \frac{4}{3} \pi R^3$.

$$M_p = 617 M_{\text{Earth}} = 3,685 \times 10^{30} \text{ g}$$

$$R_p^* = 17,5 R_{\text{Earth}} = 1,116 \times 10^{10} \text{ cm}$$

* Cette valeur de rayon a été estimée à partir du calcul de la profondeur de transit. Les étudiants peuvent également utiliser la valeur du modèle d'ajustement optimal d'*allesfitter*.

$$\rho = \frac{M}{V} = 0,63 \text{ g cm}^{-3}$$

Cette valeur est beaucoup plus faible que la densité moyenne de Jupiter, et plus proche de la densité de WASP-189b (une exoplanète chaude connue de Jupiter). La faible distance qui la sépare de son étoile hôte et sa température élevée rendent l'exoplanète "gonflée".

Résumé de KELT-3b

KELT-3b est un Jupiter chaud en orbite autour d'une étoile semblable au Soleil, KELT-3, à environ 690 années-lumière de la Terre.

KELT-3b orbite très près de son étoile hôte, plus de 10 fois plus près que la Terre autour du Soleil. L'exoplanète n'a besoin que de 2,7 jours pour effectuer une orbite complète autour de KELT-3.

En raison de sa proximité avec son étoile hôte, la température moyenne de l'exoplanète est très élevée, supérieure à la température de fusion du fer, ce qui la rend tout à fait habitable.

KELT-3b est composée principalement d'hydrogène et d'hélium, comme Jupiter. En raison de la température élevée de l'exoplanète et de sa proximité avec l'étoile, son atmosphère est très étendue (bouffie) et sa densité moyenne est très faible.

Exoplanète	KELT-3b
Type de planète	Jupiter chaud
Rayon (R_{Earth})	16,81 (de <i>allesfitter</i>)
	17,5 (à partir de la profondeur de transit)
Masse (M_{Earth})	617 ± 105
Période orbitale (jours)	2,70339
Distance orbitale moyenne (au)	~0,048
Densité (g/cm^3)	~0,63
Température moyenne ($^{\circ}\text{C}$)	~1 543

↑ Résumé d'une estimation des propriétés de KELT-3b

Soumettez votre projet

Les équipes peuvent soumettre leur projet Hack an Exoplanet sur la plateforme Hack an Exoplanet pour recevoir un certificat de participation. Pour soumettre votre projet, rendez-vous sur hackanexoplanet.esa.int/submit-your-project.

→ Défi 2 - Analyse des données TOI-560c

Après avoir terminé l'analyse de KELT-3b, les équipes devraient être en mesure de suivre le même processus d'analyse pour les données de TOI-560c.

Toutes les informations nécessaires sont disponibles dans le dossier, dans la feuille de travail de l'élève et sur le site hackanexoplanet.esa.int/challenges.

Les équipes peuvent soumettre leur projet Hack an Exoplanet sur la plateforme Hack an Exoplanet pour recevoir un certificat de participation. Pour soumettre le projet de votre équipe, rendez-vous sur hackanexoplanet.esa.int/submit-your-project.

Prix du meilleur projet :

Pour avoir une chance de remporter le prix du meilleur projet, les équipes doivent soumettre leur journal d'investigation sur TOI-560c.

La soumission de votre équipe doit inclure votre analyse des données Cheops pour TOI-560c, et doit suivre le format d'un article scientifique comprenant un résumé, une analyse et des résultats, ainsi que des conclusions.

Les équipes gagnantes recevront des cadeaux de l'ESA, ainsi que la possibilité de participer à un webinar avec le lauréat du prix Nobel de physique Didier Queloz, le 17 juillet 2023. La date limite de soumission est fixée au 14 juin 2023.

Pour soumettre votre projet, visitez le site hackanexoplanet.esa.int/submit-your-project.

→ LIENS

Ressources d'appui

Pirater une exoplanète :
hackanexoplanet.esa.int

Guide de l'activité pour les éducateurs "Hack an exoplanet"
hackanexoplanet.esa.int/fr/educators-guide

AllesFitter version éducative du logiciel :
hackanexoplanet.esa.int/allesfitter

Introduction à Hack an Exoplanet - devenez un détective de l'exoplanète
hackanexoplanet.esa.int/fr/challenges

Mini-tutoriel *Allesfitter* - guide étape par étape sur la manière d'ajuster le meilleur modèle aux données
hackanexoplanet.esa.int/fr/allesfitter-guide

Comment déterminer la taille d'une exoplanète ?
hackanexoplanet.esa.int/fr/challenges-size

La période orbitale et la distance d'une exoplanète, en utilisant la troisième loi de Kepler
hackanexoplanet.esa.int/fr/challenges-orbital-period-and-distance

Les exoplanètes peuvent-elles être habitables ?
hackanexoplanet.esa.int/fr/challenges-temperature-and-habitability

De quoi sont faites les exoplanètes ?
hackanexoplanet.esa.int/fr/challenges-composition

Références scientifiques pour KELT-3b
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/KELT-3

Ressources de l'ASE

Ressources pédagogiques de l'ASE
esa.int/Education/Classroom_Resources

Enseigner avec les exoplanètes
esa.int/Education/Teach_with_Exoplanets

Meet Cheops : the Characterising Exoplanet Satellite
esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/12/Meet_Cheops_the_Characterising_Exoplanet_Satellite

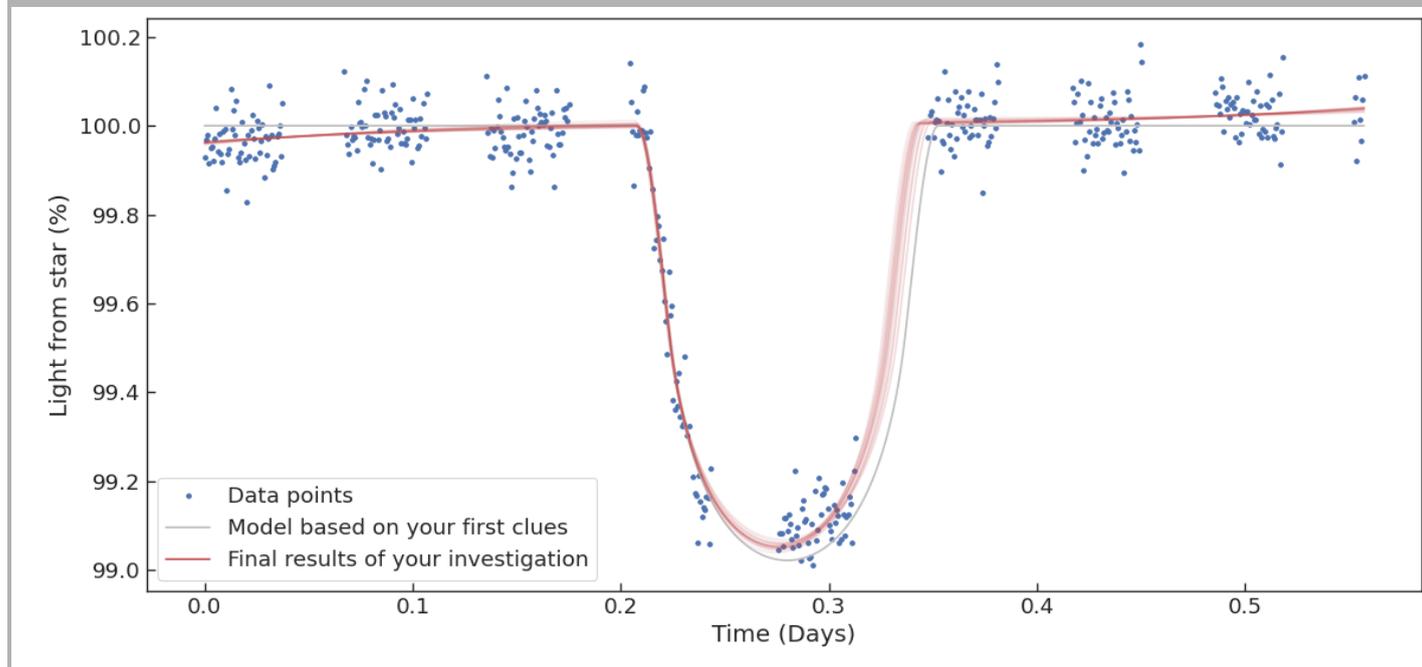
Projets spatiaux de l'ESA

Cheops - CHaracterising ExOPlanet Satellite (Satellite de caractérisation des exoplanètes)
esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cheops

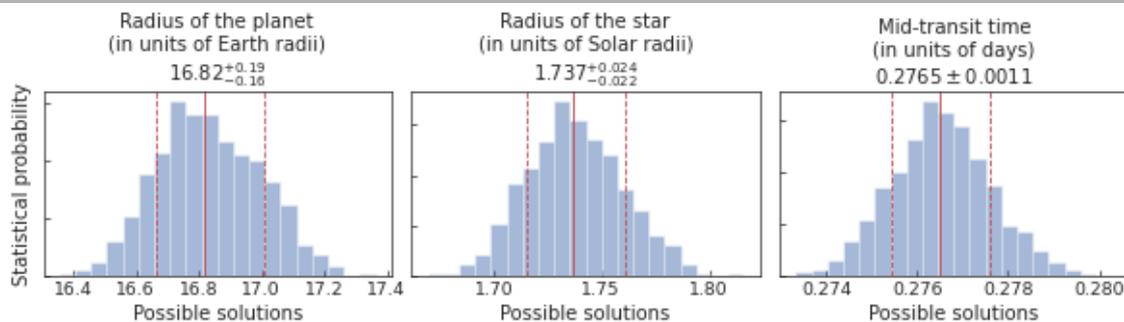
→ Annexe 1

Courbe de lumière de transit de l'exoplanète KELT-3b

Résultats de l'ajustement du meilleur modèle de KELT-3b par *allesfitter*



↑ [Modèle d'ajustement de la courbe de lumière de transit.](#)



- Les histogrammes montrent la probabilité que chaque paramètre ait une certaine valeur.
- La ligne centrale pleine indique la valeur médiane de chaque paramètre.
- Les lignes en pointillé à gauche et à droite indiquent respectivement les limites inférieure et supérieure.
- C'est ce qu'on appelle les incertitudes à 1 sigma. Cela signifie que, statistiquement, nous pouvons être sûrs à 68 % que la valeur réelle se situe à l'intérieur de ces limites.
- Notez que cela signifie qu'il est possible que la valeur réelle d'un paramètre se situe en dehors de ces limites ; il ne s'agit que d'incertitudes statistiques, et non de limites définitives.

↑ [Histogramme de la probabilité statistique de toutes les valeurs des paramètres de KELT-3b](#)

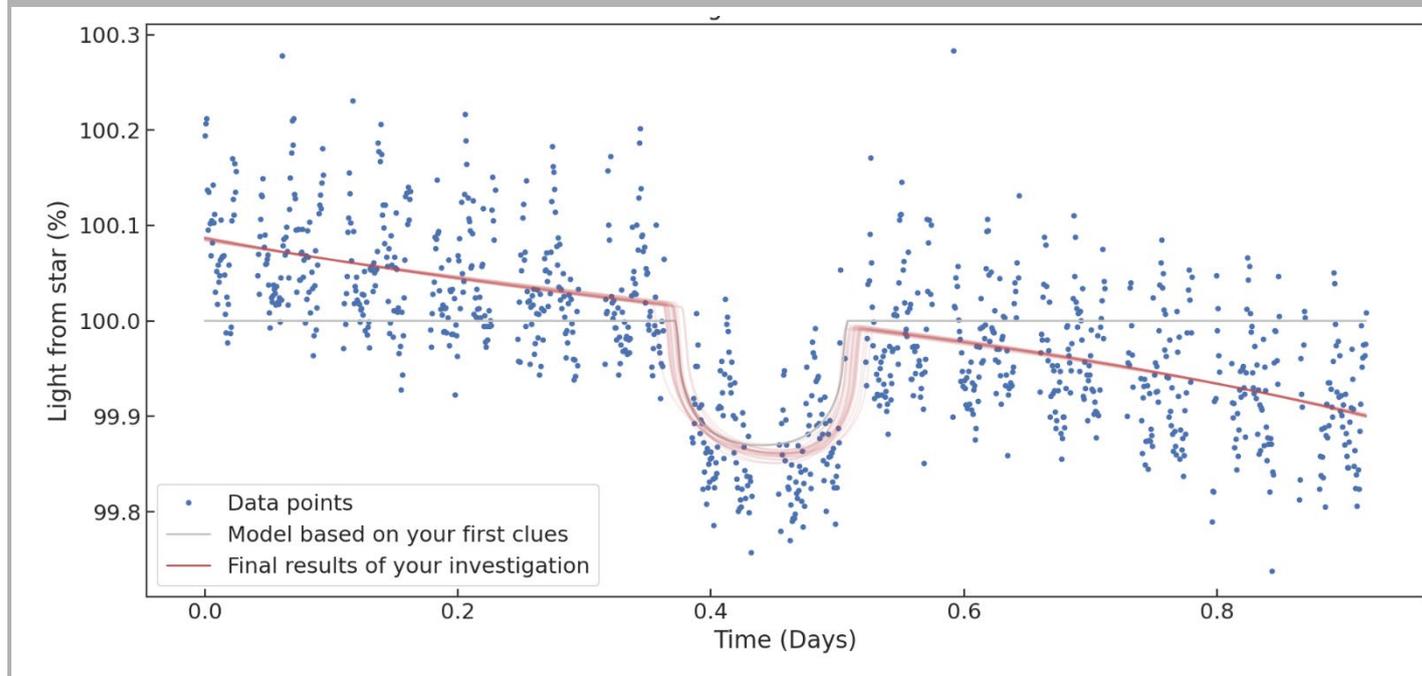
Nom	Valeur médiane	Erreur inférieure	Erreur supérieure	Note de cas
Rayon de la planète (en unités de rayons terrestres)	16,82	0,16	0,19	Observations de Khéops
Rayon de l'étoile (en unités de rayons solaires)	1,737	0,022	0,024	Observations de Khéops
Durée du transit à mi-parcours (en jours)	0,2765	0,0011	0,0011	Observations de Khéops
Période orbitale (en jours)	2,70339			Autres observations tirées des archives

↑ [Tableau avec les paramètres du modèle les mieux ajustés.](#)

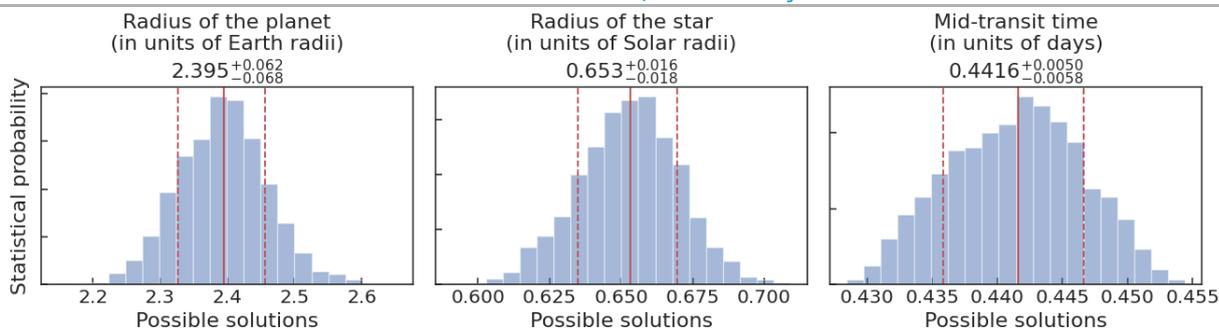
→ Annexe 2

Courbe de lumière de transit de l'exoplanète TOI-560c

TOI-560c : résultats de l'ajustement du meilleur modèle par *allesfitter*



↑ [Modèle d'ajustement de la courbe de lumière de transit.](#)



- Les histogrammes montrent la probabilité que chaque paramètre ait une certaine valeur.
- La ligne centrale pleine indique la valeur médiane de chaque paramètre.
- Les lignes en pointillé à gauche et à droite indiquent respectivement les limites inférieure et supérieure.
- C'est ce qu'on appelle les incertitudes à 1 sigma. Cela signifie que, statistiquement, nous pouvons être sûrs à 68 % que la valeur réelle se situe à l'intérieur de ces limites.
- Notez que cela signifie qu'il est possible que la valeur réelle d'un paramètre se situe en dehors de ces limites ; il ne s'agit que d'incertitudes statistiques, et non de limites définitives.

↑ [Histogramme de la probabilité statistique de toutes les valeurs des paramètres de TOI-560c](#)

Nom	Valeur médiane	Erreur inférieure	Erreur supérieure	Note de cas
Rayon de la planète (en unités de rayons terrestres)	2,395	0,068	0,062	Observations de Khéops
Rayon de l'étoile (en unités de rayons solaires)	0,653	0,018	0,016	Observations de Khéops
Durée du transit à mi-parcours (en jours)	0,4416	0,0058	0,0050	Observations de Khéops
Période orbitale (en jours)	18,8797			Autres observations tirées des archives

↑ [Tableau avec les paramètres du modèle les mieux ajustés.](#)