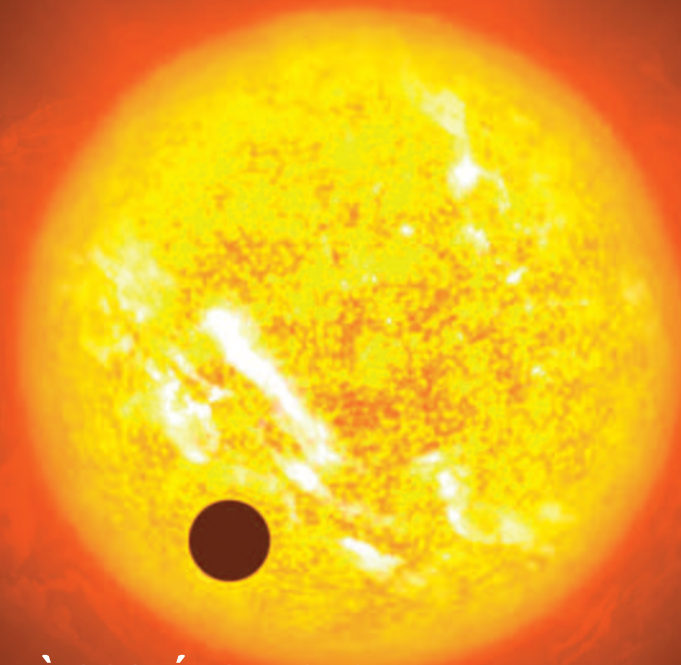




Différentes méthodes de détections des planètes extrasolaires sont à la disposition des astronomes professionnels. En ce qui concerne les amateurs, la petite taille de leurs télescopes limite à 2 les possibilités d'observation.

La première possibilité est la méthode dite « des vitesses radiales ». C'est ainsi que fut découverte, en 1995, la première exoplanète par Michel Mayor et Didier Queloz. L'autre possibilité consiste à mettre en évidence le passage d'une planète devant son étoile (transit). C'est cette seconde méthode que nous nous avons mise en œuvre et que nous présentons ici. Elle concerne actuellement la majorité des exoplanètes découvertes (1226 au 30 octobre 2015).



## SCIENCE PARTICIPATIVE À PORTÉE DE TOUS

# DES ASTRONOMES AMATEURS OBSERVENT DES EXOPLANÈTES

### PRINCIPE ET MÉTHODOLOGIE

Le principe est simple : une planète, en passant devant son étoile, cache une partie de sa surface ce qui se traduit par une diminution de la lumière perçue. Les capteurs CCD permettent de quantifier et de dater cette baisse de luminosité. Une courbe de lumière est donc réalisable ce qui permet une mise en évidence de l'exoplanète. La baisse de luminosité, l'heure du transit

et sa périodicité sont les éléments essentiels de l'information scientifique permettant la confirmation de l'exoplanète observée.

Les différentes étapes de la procédure sont les suivantes : choix de la cible et du champ photographié ; réalisation des acquisitions ; réduction des données ; établissement de la courbe et publication des résultats ; exploitation des données.

## LE CHOIX DE LA CIBLE

### ● Quelle exoplanète est visible ce soir ?

Le site Exoplanet Transit Database (<http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php>) permet en quelques clics de connaître à l'avance les exoplanètes potentiellement visibles depuis l'endroit des observations. Après avoir entré sa position géographique une liste de cible apparaît. - Image 1.

Available predictions: (UT evening date)

2014-03- 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31,  
2014-04. 01, 02, 03, 04,

User defined time span: From: YYYY-MM-DD Till: YYYY-MM-DD Show

Transits predictions for ELONGITUDE: 6° and LATITUDE: 47°

OBJECT	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM, UT/h,A)	END (UT/h,A)	D (min)	V (MAG)	DEPTH (MAG)	Elements Coords
CoRoT-12 b	17:22 Mon 37°,SE	06.03. 18:39 42°,S	19:56 42°,S	154.454	15.515	0.0188	54298.62707+2.828042"E RA: 06 43 03.76 DE: -01 17 47.12

En cliquant sur une étoile les informations la concernant s'affichent en bas. On note les valeurs Bmag et Rmag (on calcul B-V). On repère alors dans le champ les étoiles de même B-R.

### ● Comment décrypter ces informations ?

Dans cet exemple, l'exoplanète Corot-12b devrait débuter son transit vers 17 h 22 (TU) pour une hauteur dans le ciel de 37° et le termine vers 19 h 56 pour une hauteur de 42° Sud. La durée du transit est estimée à 154 minutes ; la magnitude de l'étoile est de 15, donc accessible avec du matériel amateur, et

la profondeur du transit (la baisse de magnitude) est de 1,88 %. Les images doivent permettre d'atteindre un rapport signal sur bruit (en réalité bruit/signal) proche de 2 % si l'on veut espérer avoir un enregistrement fiable de la baisse de magnitude envisagée.

On débutera les prises de vue de 30 minutes à 1 heure AVANT le début théorique du transit et l'on poursuivra d'autant APRES. Un conseil : Il est peu utile d'acquérir des images

[www.david-romeuf.fr/QuoiObserverCeSoir/EphemeridesAstronomiques.html](http://www.david-romeuf.fr/QuoiObserverCeSoir/EphemeridesAstronomiques.html).

### ● Quel champ doit-on photographier ?

Il faut, pour limiter les erreurs, placer bien évidemment l'étoile cible dans le champ à imager mais également placer des étoiles de référence appropriées. En effet, lors de la réduction des données, on va comparer l'évolution de la luminosité de l'étoile cible à la moyenne (ou médiane) des luminosités des étoiles de référence.

À l'aide des catalogues disponibles sur Aladin sky atlas (<http://aladin.u-strasbg.fr/>) choisir le menu: « fichier »; puis "charger un catalogue" puis « les relevés dans wizer »; puis sélectionner le catalogue USNO-B1. En cliquant sur les étoiles on obtient leurs magnitudes dans différentes couleurs (B, R par exemple); on prendra des étoiles de référence les plus proches possibles de l'étoile cible. Ce qui compte surtout c'est la différence de magnitudes dans 2 couleurs (on parle d'indice de couleur) qui doit être voisin entre l'étoile cible et l'étoile de référence. - Image 2.

Un conseil : la base ETD permet de consulter les travaux faits par d'autres amateurs et ainsi de repérer les cartes de champ avec les étoiles cibles choisies ; dans la base ETD, les mesures sont notées de 1 à 5 en fonction de leur qualité (1: the best).

## RÉALISER LES IMAGES

Un astronome amateur qui se lance dans ce genre de mesure sait qu'il faut, en plus des images, acquérir les diverses images de correction (Flat ou PLU ou plats, noir ou dark, bias ou offset ou zéro).

Pour les images proprement dites, choisir un temps de pose entre 60 s et 120 s. Consulter les travaux des autres amateurs sur la base ETD pour se faire une idée du temps de pose requis. Bien penser au préalable à mettre son ordinateur à l'heure (paramétrer Windows pour qu'il le fasse automatiquement ou utiliser un utilitaire dédié). Privilégier le binning 1x1. Utiliser le binning 2x2 si le rapport S/B n'est pas favorable en binning 1x1.

en dessous de 20° en raison de l'absorption atmosphérique.

REMARQUE : un autre site internet très complet et très convivial permet de connaître les exoplanètes visibles en appliquant des filtres (hauteur dans le ciel, magnitude de l'étoile...) ce qui gagne du temps. Il s'agit de site de David Romeuf *Éphémérides astronomiques en ligne* à l'adresse suivante :



## RÉDUCTION DES DONNÉES ET ÉTABLISSEMENT DE LA COURBE DE LUMINOSITÉ

Après avoir prétraité les images (noir, plats, zéro), on utilise Muniwin, un logiciel gratuit particulièrement efficace pour déterminer une courbe de lumière. Muniwin est disponible ici (<http://sourceforge.net/projects/c-munipack/files/>). Ce logiciel est facile d'emploi ; en voici les principales fonctionnalités (image 3).

**Créer un projet.** Ceci permettra de retrouver plus tard les différentes étapes du traitement réalisé. On peut choisir un profil prédéfini (light curve).

**Ouvrir un projet existant.**

**Réglage du projet :** Il est important dans le menu « light curve » de cocher « allow using an artificial comparison star » de façon à pouvoir utiliser plusieurs étoiles de comparaison. Les autres paramètres sont utiles à remplir ( Les informations concer-

nant la camera sont disponibles sur le site du fournisseur, la « source frame » indique la valeur mini (0) et maximum de la camera (65535 pour une caméra 14 bit...etc...).

**Ajouter les images (prétraitées) au projet.**

Celles-ci sont alors **converties** dans un format lisible par Muniwin.

Possibilité de **rectifier** les heures des images si un décalage de l'horloge est constaté.

**Photométrie :** le logiciel repère les étoiles sur les images.

Muniwin demande qu'on lui indique une image de référence pour tout le dossier ; on choisit celle qui est de meilleure qualité.

On indique **l'étoile cible**, les étoiles de référence et une étoile de comparaison (de façon à vérifier que les références ne sont pas des variables). Lors de cette sélection, Muniwin demande avec quel « aperture » il doit travailler : La photomé-

trie d'ouverture consiste à quantifier la lumière dans un cercle incluant l'étoile cible et de comparer à un anneau en périphérie de l'étoile (anneau ne comprenant que le fond de ciel). L'ouverture (aperture) correspond donc au diamètre du cercle d'étude...typiquement on le prend comme étant 1.5 fois la FWHM de l'étoile.... Muniwin permet de faire varier ce diamètre et de voir en direct la marge d'erreur dans les mesures. Bien entendu, au préalable toute image ayant une anomalie à proximité des étoiles de référence est exclue (rayon cosmique, satellite artificiel, netteté dégradée...). (image 4)



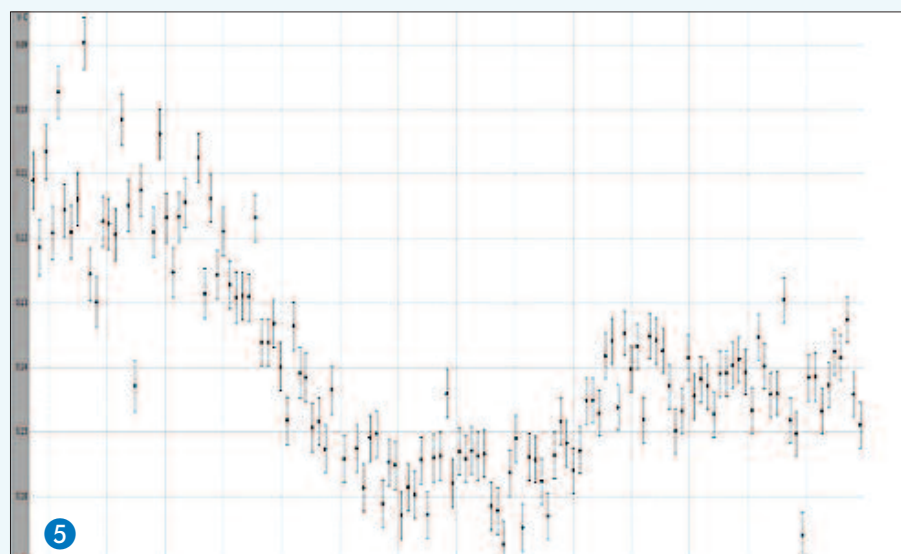
**Finalement, le logiciel permet d'obtenir :**  
**La carte d'étoiles prises comme référence (à sauvegarder en format image)**  
**La courbe photométrique (à sauvegarder en format texte) - Image 5.**

## EN CONCLUSION, L'INTÉRÊT DES MESURES EFFECTUÉES

Après sauvegarde de la courbe obtenue (et de la carte des étoiles de référence), il reste à envoyer ses résultats sur le site ETD dans le menu "model fit your data". On renseigne les différents champs texte demandés puis on soumet nos données ; celles-ci rentreront dans la base quelques minutes plus tard.

L'acquisition des courbes de lumière apporte des renseignements précieux aux astronomes : la durée du transit (et sa période) permet de retrouver la distance de la planète à son étoile ; la baisse de luminosité permet d'estimer la taille de l'étoile.(Lire encart )

Les variations de période orbitale permettent éventuellement de trouver la présence d'autres exo planètes perturbatrices ; on parle de TTV (Transit Time Variation) ; actuellement (30 octobre 2015) 4 exo planètes ont été identifiées ainsi. ■



### SITOGRAFIE :

- <http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php> Prédiction des exo planètes visibles
- <http://www.david-romeuf.fr/QuoiObserverCeSoir/EphemeridesAstronomiques.html> visibilité des exo planètes pour un lieu d'observation avec possibilité d'appliquer divers filtres.
- <http://exoplanet.eu/> Mise à jour de toutes les exo planètes connues à ce jour.
- <http://www.planetastronomy.com/special/2015-special/08oct/Ferlet-SAF.htm> Conférence de Mr Ferlet pour la SAF au sujet des exoplanètes.

# Ce que les courbes de lumière nous révèlent des exoplanètes

Les courbes de lumière de transits exoplanétaires apportent des informations cruciales sur les planètes observées.

Pendant le transit d'une exoplanète devant son étoile hôte – lorsqu'on a la chance d'observer ce système étoile-planète à peu près "par la tranche" depuis la Terre – la baisse de luminosité de l'étoile (ou profondeur du transit) est de l'ordre de  $(R_p/R^*)^2$ , où  $R_p$  est le rayon de la planète et  $R^*$  celui de l'étoile (rapport des surfaces de deux cercles, en supposant que les deux objets sont parfaitement sphériques). Donc si on connaît le rayon de l'étoile, on en déduit immédiatement le **rayon de la planète**, et par conséquent sa taille et son volume. Par ailleurs, la masse de la planète a été déterminée grâce à la méthode spectroscopique de détection par "vitesses radiales", modulo le sinus de l'angle entre la ligne de visée de l'observateur et la perpendiculaire au plan de l'orbite de la planète. Comme il y a transit, cet angle d'inclinaison est de l'ordre de  $90^\circ$  (on observe "par la tranche") et son sinus de l'ordre de 1 ; la masse est donc à peu près exacte. En combinant le volume et la masse, on obtient la **densité moyenne** de la planète, d'où une information précieuse sur sa structure interne : par exemple, planète gazeuse, tellurique (rocheuse) ...

Si on observe plusieurs transits successifs, on peut estimer la **période orbitale** de la planète. Connaissant cette période ainsi que les masses de la planète et de l'étoile, la troisième loi de Kepler permet d'en déduire la **distance de la planète à son étoile** (en supposant une orbite circulaire).

Bien sûr, le transit ne se fait pas forcément le long d'un diamètre de l'étoile. L'écart entre cette ligne de transit et le diamètre – ou paramètre d'impact – est égal au rapport du rayon orbital de la planète (la distance à son étoile) sur le rayon de l'étoile, modulo le cosinus de l'angle d'inclinaison. La durée totale du transit est évidemment reliée à ce paramètre d'impact, et si on la détermine avec précision, on peut remonter à l'angle en question et par suite à la **masse exacte de la planète**. Par ailleurs et indépendamment de l'angle d'inclinaison, ce paramètre d'impact est directement relié au temps entre le premier contact de la planète avec l'étoile et le second contact lorsque l'immersion de la planète est totale. Cette durée d'immersion, entre le tout début d'un transit et le moment où la baisse maximale de luminosité est atteinte, est mesurable sur des courbes de lumière précises.

Cette partie des courbes de lumière est également sensible à un effet propre à l'étoile elle-même et dont il faut bien sûr tenir compte : l'assombrissement centre-bord. C'est un effet de **diminution apparente de**

**l'intensité lumineuse sur les bords d'une étoile**. Cet effet apparent est la conséquence de deux effets physiques réels : la diminution à la fois de la densité et de la température avec l'accroissement de la distance au centre de l'étoile. Cet effet est calculable, et en fonction de la température effective de l'étoile (sa couleur) influe directement sur la forme de la courbe de lumière au moment de l'immersion (et bien sûr de l'émergence).

Lorsque de multiples transits d'une exoplanète sont observés, on peut chercher à vérifier si ces transits se produisent avec une période strictement constante ou s'il y a des variations.



Si oui, alors on a une méthode extrêmement sensible pour détecter la **présence d'autres planètes** dans le système étudié, planètes qui ne transitent pas et peuvent avoir des masses comparables à celle de la Terre. Ces variations temporelles (TTV pour Transit-Time Variations en anglais) proviennent des perturbations orbitales dues aux interactions gravitationnelles entre les planètes. De plus, si dans un système multiple, toutes les planètes transitent, alors il devient possible – à condition d'avoir des données d'une très grande qualité – de modéliser le système et remonter à la masse des planètes sans utiliser la méthode des vitesses radiales, ce qui est particulièrement intéressant quand l'étoile est trop peu brillante pour permettre cette utilisation.

De même, on peut chercher à vérifier si la durée des transits varie dans le temps. Ce type de variations peut être dû à la présence d'une exo-lune ou d'anneaux autour de la planète, à la précession des apsides (rotation d'une orbite à grande excentricité dans un système multiple), ou encore à des effets de relativité générale.

D'autres effets sont potentiellement observables dans les courbes de lumière de transits exoplanétaires.

Par exemple, à l'instar de la Lune ou Mars, des planètes proches de leur étoile montreront **des phases** qui provoqueront des variations de la lumière qu'elles réfléchissent vers la Terre. Comme les télescopes ne résolvent pas planète et étoile, ils ne voient que leur lumière combinée. La luminosité de l'étoile semblera donc être modulée durant chaque orbite, de façon périodique. C'est un effet petit mais qui a déjà été observé dans quelques cas (deux exoplanètes ont même été détectées avec cette méthode). Par ailleurs, il se produit même si la planète ne transite pas ; mais si elle transite, il peut aussi permettre de calculer l'albédo de la planète.

Des planètes massives peuvent induire des effets de marée sur leurs étoiles hôtes, et leur donner ainsi une forme légèrement ellipsoïdale. Dans ce cas, la luminosité apparente de l'étoile va varier en fonction de l'orientation par rapport à l'observateur, mais avec une période deux fois plus rapide.

Évidemment, l'activité stellaire elle-même – par exemple des taches à la surface de l'étoile – peut provoquer des variations de luminosité. C'est là un effet gênant, mais qui a probablement déjà été observé une fois, donnant ainsi naissance pour un système exoplanétaire à ce qu'on appelle dans le Système solaire la météorologie spatiale (la surveillance du Soleil pour tenter de prévoir ses effets sur la Terre).

Nous avons parlé du transit d'une planète lorsqu'elle passe devant son étoile. Mais dans un certain nombre de cas, elle va aussi passer derrière : on appelle cela un transit secondaire, ce qui va permettre de contraindre l'excentricité de l'orbite. De plus, en soustrayant la lumière de l'étoile pendant le transit secondaire de sa lumière avant ou après ce transit, on obtient les photons de la planète elle-même. En réalisant ces mesures dans l'infrarouge, il a été possible dans quelques cas d'estimer la **température de la planète** et même de détecter des signes possibles de formations nuageuses sur ces planètes.

Enfin, si une planète qui transite possède une atmosphère, la lumière de l'étoile va traverser cette atmosphère et éventuellement laisser une signature dans le spectre de l'étoile. Ce n'est plus de la photométrie, mais néanmoins un puissant moyen disponible depuis quelques années pour détecter **les atmosphères de planètes extrasolaires** et caractériser les éléments et molécules qui les composent.

■ Roger Ferlet

Observatoire de Paris