

BELLION Thibaud
CHARANE Mouloud
PERINI Clément



RAPPORT PROJET ASTROPHYSIQUE

Année 2007-2008

Licence 3 Physique
Semestre 6

Université de Nice-Sophia Antipolis

Responsable de projet : **Philippe Bendjoya**

Sommaire :

1) Présentation du sujet

2) Acquisition et réduction des données

- Acquisition des données
- Caméra CCD
- Courbe de lumière

3) Exploitation des données

- Article
- Classification des étoiles
- Calcul des paramètres de X02_b

4) Conclusion

- Comparaison des valeurs expérimentales avec la théorie

5) Bibliographie

1) Présentation du sujet

Notre projet porte sur l'observation d'exoplanètes par une méthode de détection particulière afin d'en tirer ensuite des paramètres physiques propre à la planète.

Les exoplanètes sont des astres similaires aux planètes de notre système solaire mais qui se situent en dehors de notre système solaire. C'est-à-dire qui orbitent autour d'une autre étoile que le Soleil. Depuis 1995 (date de la première détection d'une exoplanète) plusieurs méthodes ont été mises au point pour découvrir les planètes extrasolaires. Elles sont quasiment toutes basées sur une détection indirecte . Parmi les plus utilisées, on peut citer la méthode de vitesse radiale qui se base sur l'étude du spectre lumineux et utilise l'effet Doppler. A ce jour, 287 exoplanètes ont été découvertes, principalement des planètes de type Jupiter.

Toutefois, on ne peut pas observer directement une planète extrasolaire car il y a de grandes différences dans les ordres de grandeurs. (l'éclat de la planète est dix milliards de fois plus faible que celui de son étoile). De plus la plus proche exoplanète orbite autour d'une étoile située à près de 10 années lumière de la Terre ; c'est-à-dire 630 millions de fois la distance Terre-Soleil. Il est presque impossible de l'observer avec un télescope classique (il faudrait un télescope comme le télescope spatial Hubble pour pouvoir l'observer directement).

Le principe de notre technique est d'observer les variations lumineuses de l'étoile pour en déduire la présence d'une planète extrasolaire : c'est la méthode du transit exoplanétaire. Une planète qui passe devant l'étoile provoque forcément une diminution de la quantité de lumière (à l'instar d'une éclipse). C'est cette variation que nous allons observer et étudier.

Il faut préciser que notre projet consiste uniquement à observer une planète déjà connu mais le but principal est de faire cette observation avec un télescope de dimension modeste et des conditions atmosphériques moyennes. Nous ne sommes donc pas à la recherche d'une nouvelle exoplanète !

2) Acquisition et réduction des données

La démarche pour obtenir des résultats sur l'étoile et la planète à partir d'acquisition d'images est la suivante :

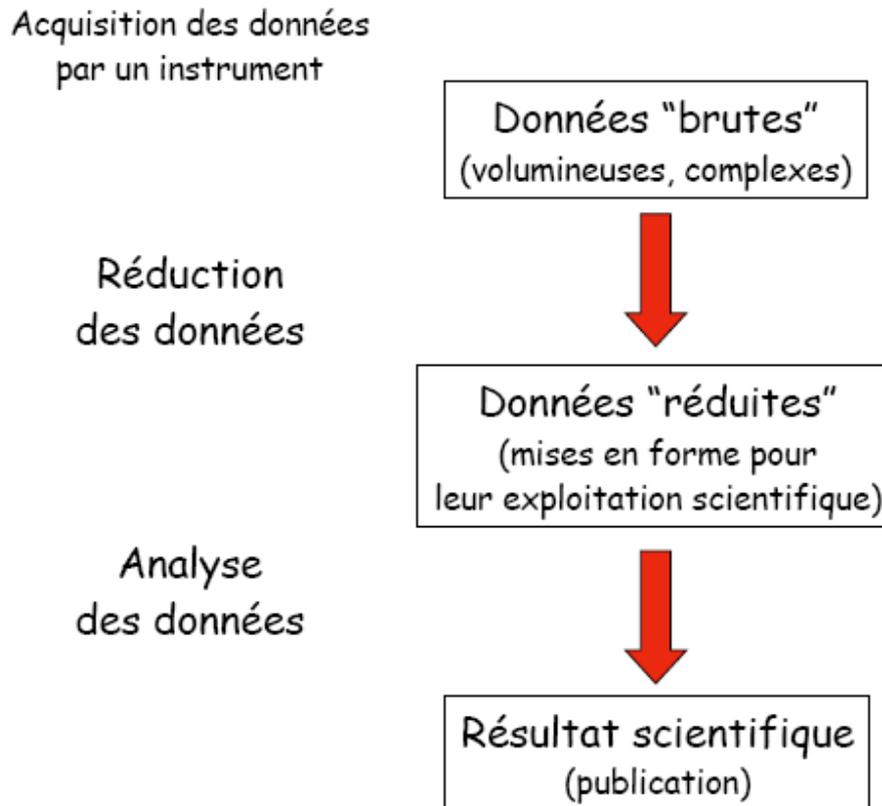


Figure 1 : Schéma de la démarche suivie

Pour l'acquisition des images du transit, nous nous sommes rendus à l'observatoire de Nice au cours de 3 nuits d'observation (typiquement de 21h à 3h du matin). Nous avons fait les acquisitions à partir d'un télescope de type Cassegrain de 6m de focale et de 40 cm de diamètre ce qui représente un instrument très petit pour ce genre de détection.

Grâce à une caméra CCD fixée à l'extrémité du télescope, c'est-à-dire à l'oculaire, nous avons pu enregistrer un grand nombre d'images du transit sur un ordinateur relié à la CCD. Toutefois, l'acquisition des seules images du transit ne suffit pas. Une acquisition toutes les cinq minutes va nous permettre ainsi de déterminer la luminosité de l'étoile en fonction du temps et une diminution de cette intensité pourra être interprétée comme le transit d'une planète devant l'étoile)

Tout d'abord, il faut commencer l'acquisition d'images avant le début du transit. En fait, on observe dans un premier temps l'étoile avant le passage de la planète pour avoir une luminosité normale de l'étoile. Puis, on enregistre des images quand la planète passe devant l'étoile. Il y a donc une diminution de luminosité. Enfin, on continue d'acquérir des images après le transit pour retrouver une valeur initiale de luminosité de l'étoile. On va obtenir une courbe de lumière dont la forme caractéristique est donnée dans la figure ci-dessous :

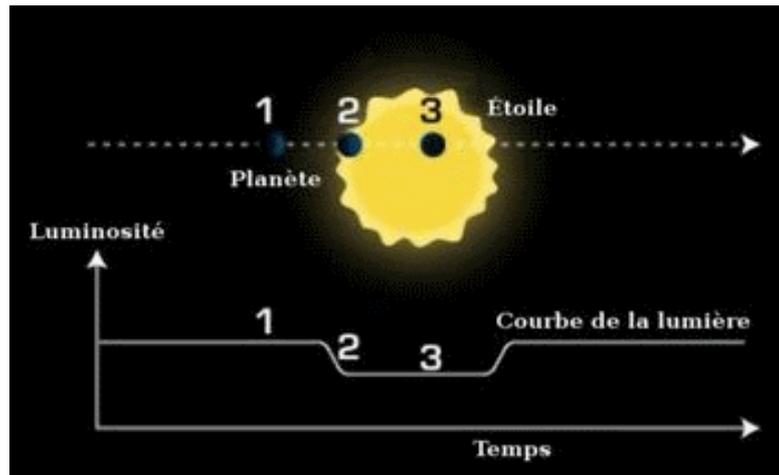


Figure 1 : forme d'une courbe de transit

Mais pour pouvoir tracer la courbe du transit, il faut auparavant corriger les défauts de la caméra CCD.

Une caméra CCD est un système qui transforme les photons lumineux qu'elle reçoit en électrons par effet photoélectrique. Ces électrons sont stockés dans un puits de potentiel présent à chaque pixel. Le nombre d'électrons collectés par le puits de potentiel est proportionnel à la quantité de lumière reçue. Mais ce système très sensible n'est pas parfait.

On observe plusieurs sortes de bruit liés à la nature du capteur qu'il faut corriger :

- Un bruit d'obscurité qui correspond à l'agitation des électrons au repos dû à une fluctuation de la température. Ce bruit provoque la présence de petits points lumineux sur l'image. On corrige ce défaut en soustrayant le « dark » à chaque image. Le « dark » est une image de la CCD prise avec obturateur fermé, dans le noir total. Par ce procédé, on enlève donc tous les points lumineux indésirables sur l'image de l'étoile.

- Un bruit dû à différence de réponse de chaque pixel de la CCD. Pour enlever ce défaut, on réalise un « flat », c'est-à-dire une acquisition avec une lumière uniforme. On divise chaque image par ce « flat » pour avoir la même réponse pour chaque pixel.

Une fois que les images sont traitées, on peut commencer la photométrie. Cela consiste à mesurer la quantité de lumière émise par l'étoile au cours du transit. Nous avons fait cette réduction grâce au logiciel ImageJ.

On mesure le flux lumineux dans un disque autour de l'étoile qui contient le flux de l'étoile et la lumière parasite du ciel. On mesure ensuite le seul flux du ciel autour de l'étoile. En faisant la différence des deux, on obtient le flux de l'étoile. Ce logiciel nous donne par la suite les valeurs du flux lumineux dans un tableau de mesures. On utilise ensuite ce tableau pour tracer la courbe de lumière avec le logiciel Gnuplot. On obtient, pour xo-2 :

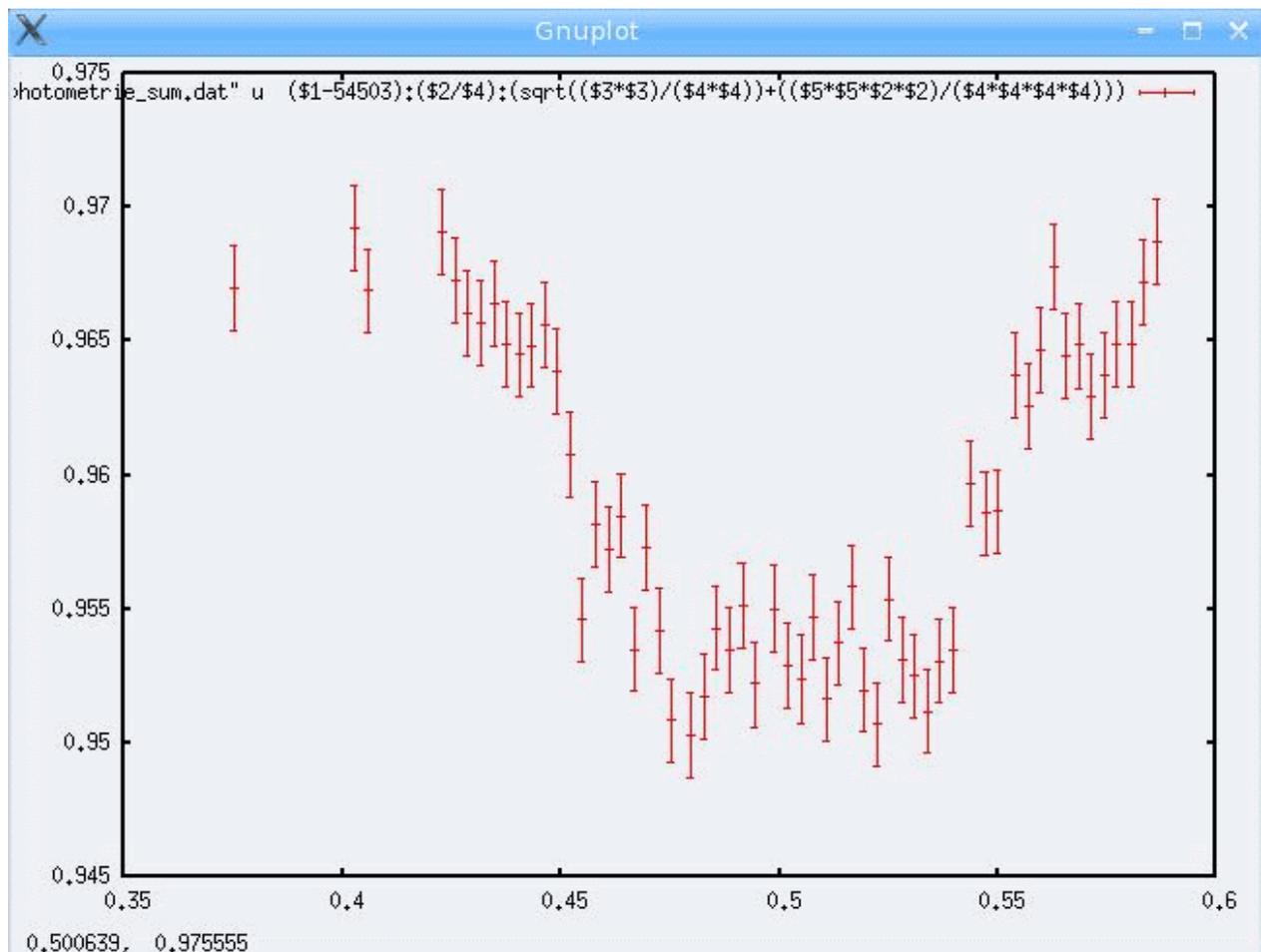


Figure 2 : courbe de lumière de X02

3) Exploitation des données

Pour l'exploitation des données, c'est-à-dire déduire les paramètres physiques de l'étoile et de la planète à partir de la courbe de transit, nous avons utilisé un article écrit en 2002 par S. Seager et G. Mallén-Ornelas et publié en 2003 dans la revue *The Astrophysical Journal* (article téléchargeable sur le site : <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0206228v1>).

Cet article sur le transit exoplanétaire, intitulé "On the Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve", explique en détails les mesures qu'il faut faire sur la courbe de transit. On intègre dans des équations, des quantités telles que :

- les variations de flux ΔF
- le temps total du transit avant et après la variation t_T et t_F

Ainsi, on va pouvoir connaître les caractéristiques de la planète et de l'étoile.

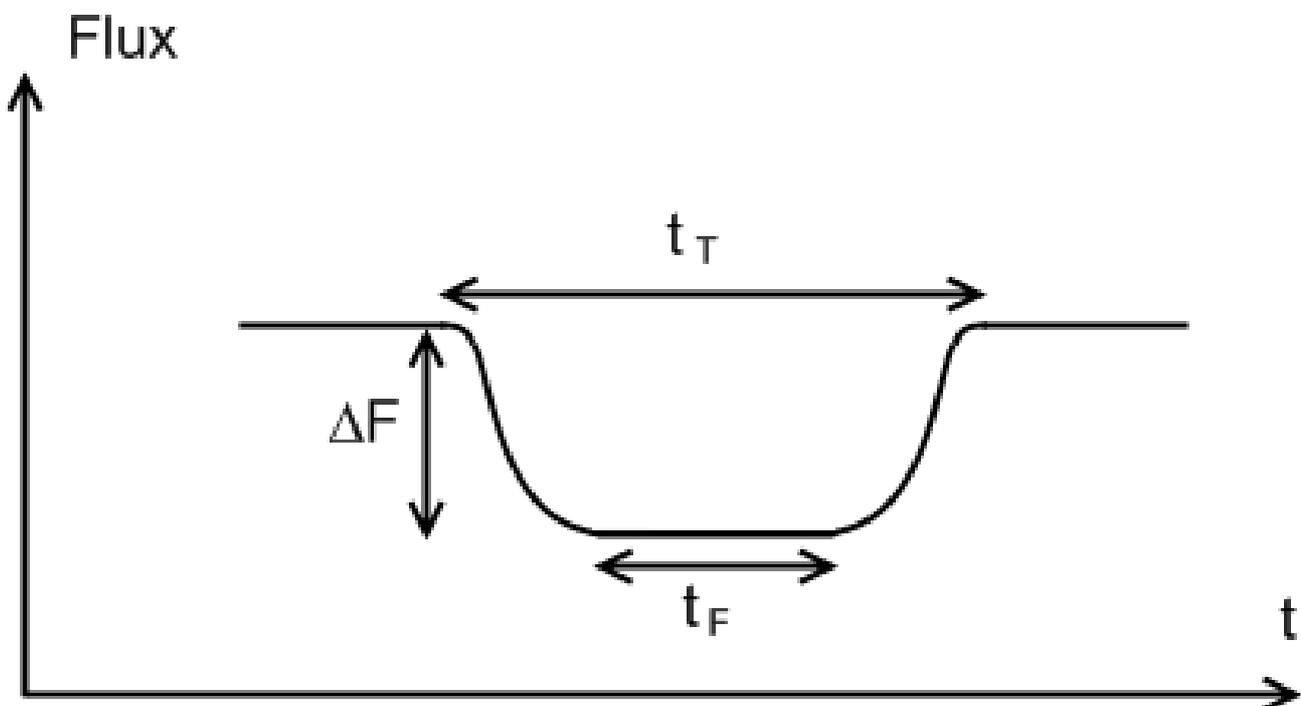


Figure 3 : Schéma d'une courbe de transit

Avant tout, il faut savoir que les étoiles sont classées suivant différentes catégories répertoriées dans le diagramme de *Hertzsprung-Russell* :

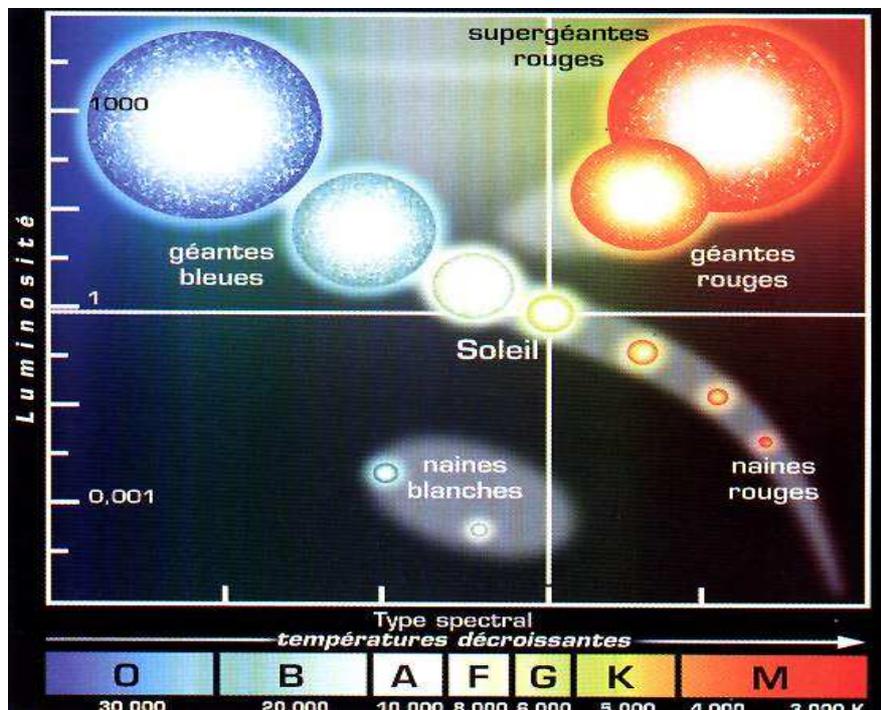


Figure 4 : Diagramme H-R

Ce diagramme représente la luminosité des étoiles en fonction de leur température, et donc de leur couleur. On définit plusieurs séquences d'étoiles. La séquence principale (qui contient le Soleil), les naines blanches et les géantes rouges. Suivant leur température, les étoiles sont ensuite classées par type spectral : c'est la classification de Harvard :

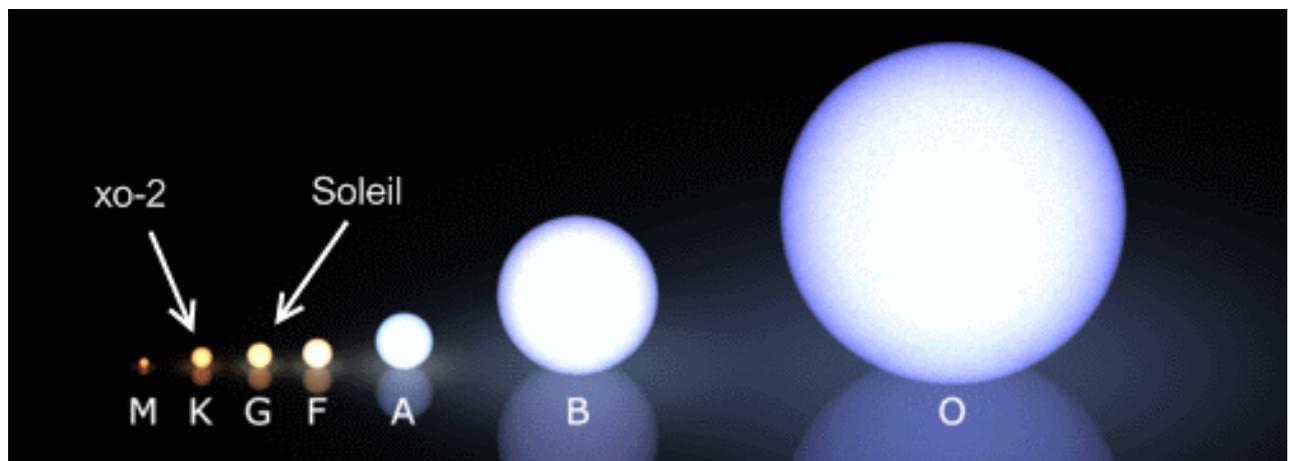


Figure 5 : Classification de Harvard des étoiles

Du type spectral de l'étoile vont dépendre deux valeurs dont nous aurons besoin pour les équations.

Pour nous renseigner, nous allons sur le site :

<http://media4.obspm.fr/exoplanetes/base/etoile.php?nom=XO-2%20>

Il nous est dit que l'étoile xo-2 que l'on étudie est une étoile de type K.

Dans l'article, il est expliqué que pour une étoile de type spectral K, on prend les paramètres suivant :

$$x \approx 0.8$$

$$k = 1$$

Où k est un coefficient constant pour chaque séquence d'étoile et x représente la loi de puissance lumineuse de la séquence.

Tout d'abord, il nous faut calculer la quantité b qui représente la projection de la distance entre la planète et le centre de l'étoile au milieu du transit :

$$b = \left[\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - \frac{\sin^2\left(\frac{t_F \pi}{P}\right)}{\sin^2\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)} (1 + \sqrt{\Delta F})^2}{1 - \frac{\sin^2\left(\frac{t_F \pi}{P}\right)}{\sin^2\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)}} \right]^{1/2}$$

où P est la période du transit.

On aura besoin de b pour calculer par la suite la densité de l'étoile ρ_* , le rayon de l'étoile R_* , le demi grand axe de l'orbite de la planète a, l'inclinaison de l'orbite i et le rayon de la planète $R_{planète}$.

Pour les calculs, l'article nous précise aussi que la quantité $\left[\frac{4\pi^2}{P^2 G} \right]$ peut être

remplacé par : $\frac{4\pi^2}{P^2 G} = \frac{365.25^2}{P^2 215^3}$ avec P en jours.

On obtient également des renseignements sur le transit de xo-2 à l'adresse suivante:

http://207.111.201.70/transitsearch/dynamiccontent/XO-2_____b.orbit.html

Ainsi on sait que la période P du transit de la planète xo-2_b est :

$$P = (2,615838 \pm 0,000008) \text{ jours}$$

Dès lors que l'on connaît ce paramètre, on peut calculer le rapport des densités de l'étoile xo-2 et du soleil :

$$\frac{\rho_*}{\rho_{\text{soleil}}} = \left[\frac{4\pi^2}{P^2 G} \left[\frac{(1 - \sqrt{\Delta F})^2 - b^2 \left(1 - \sin^2\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)\right)}{\sin^2\left(\frac{t_T \pi}{P}\right)} \right] \right]^{3/2}$$

C'est, entre autre, dans cette formule que b calculé précédemment va nous être utile.

On trouve ainsi la densité de l'étoile xo-2 puisque la densité du Soleil est connue.

On calcule également pour chaque paramètre l'erreur sur la valeur trouvée.

Le rapport des densités va nous permettre de déterminer une autre grandeur de l'étoile grâce à la relation suivante :

$$\frac{M_*}{M_{\text{soleil}}} = \left[k^3 \frac{\rho_*}{\rho_{\text{soleil}}} \right]^{\frac{1}{1-3x}}$$

De la masse, on en déduit le rayon de l'étoile :

$$\frac{R_*}{R_{\text{soleil}}} = k \left(\frac{M_*}{M_{\text{soleil}}} \right)^x$$

C'est pour ces deux dernières formules que nous avons eu besoin de k et x. On peut aussi déduire de la masse le demi grand axe a de l'orbite de la planète grâce à la forme newtonienne de la 3^{ème} loi de Kepler (loi de la gravitation appliqué à la loi de Kepler) qui nous donne :

$$a = \left[\frac{P^2 GM_*}{4\pi^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Comme b est la projection de la distance entre la planète et le centre de l'étoile, on peut écrire :

$$b = \frac{a}{R_*} \cos(i)$$

$$\text{d'où} \quad i = \cos^{-1} \left(b \frac{R_*}{a} \right)$$

On connaît la variation de flux ΔF et le rayon de l'étoile. On obtient le rayon de la planète par l'égalité :

$$R_{\text{planète}} = R_* \sqrt{\Delta F}$$

Sur notre courbe de transit (cf figure 2), on mesure les différents paramètres :

$$t_T = (0,110 \pm 0,003) \text{ jours}$$

$$t_F = (0,083 \pm 0,003) \text{ jours}$$

$$\Delta F = (0,011 \pm 0,001)$$

On obtient après calculs, les valeurs :

Densité de l'étoile xo-2 :

$$\Rightarrow \rho_* = (1.5 \pm 0.2) \text{ tonne/m}^3$$

Rayon de l'étoile xo-2 :

$$\Rightarrow R_* = (6.8 \pm 0.6) 10^8 \text{ m}$$

Masse de l'étoile xo-2 :

$$\Rightarrow M_* = (1.9 \pm 0.2) 10^{30} \text{ kg}$$

Demi grand axe de l'orbite de la planète :

$$\Rightarrow a = (9,9 \pm 0,2) 10^{10} \text{ m}$$

Inclinaison de l'orbite

$$\Rightarrow i = (1.5673 \pm 0.0007) \text{ radians}$$

$$\text{soit } i = (89.45 \pm 0.04)^\circ$$

Rayon de la planète xo-2 b :

$$\Rightarrow R_{\text{planète}} = (7.0 \pm 0.4) 10^7 \text{ m}$$

4) Conclusion

Pour conclure, on peut comparer les valeurs obtenues par nos calculs aux valeurs réelles provenant de la revue *The Astrophysical Journal* réalisé par la même méthode de transit et données sur le site : <http://exoplanet.eu> .

Pour ne pas avoir des valeurs trop grandes, on exprime les paramètres de l'étoile en fonction de ceux du Soleil et on exprime le rayon de la planète en fonction du rayon de Jupiter.

Pour l'étoile XO2, les valeurs données sont :

Masse de l'étoile :

$$M_{*}(\text{réelle}) = (0.98 \pm 0.02) \times M_{\text{soleil}}$$

$$M_{*}(\text{exp}) = (0.96 \pm 0.10) \times M_{\text{soleil}}$$

Soit d'une différence de 2,08 %

Rayon de l'étoile :

$$R_{*}(\text{réelle}) = (0.964 \pm 0.02) \times R_{\text{soleil}}$$

$$R_{*}(\text{exp}) = (0.98 \pm 0.09) \times R_{\text{soleil}}$$

Soit une différence de 1,63 %

Rayon de la planète :

$$R_{\text{planète}}(\text{réelle}) = (0.973 \pm 0.03) \times R_{\text{jupiter}}$$

$$R_{\text{planète}}(\text{exp}) = (0.979 \pm 0.06) \times R_{\text{jupiter}}$$

Soit une variation de 0,61 %

Inclinaison de l'orbite :

$$i_{(réelle)} = (88.58 \pm 0.04)^\circ$$

$$i_{(exp)} = (89.45 \pm 0.04)^\circ$$

Soit une différence de 0,97 %

On remarque que nos valeurs sont très proches des valeurs réelles pour la masse et le rayon de l'étoile ainsi que pour le rayon de la planète. Le demi grand axe de l'orbite ne correspond pas à la valeur réelle. De plus, les erreurs sur les valeurs sont moins bonnes avec nos calculs. Cela est dû au fait que notre télescope est beaucoup moins précis que celui utilisé pour mesurer les valeurs officielles.

5) Bibliographie

Sites généraux sur les exoplanètes :

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Exoplanete>
- <http://media4.obspm.fr/exoplanetes/index.html>
- <http://exoplanet.eu/>

Catalogues d'exoplanètes :

- <http://media4.obspm.fr/exoplanetes/base/index.php>
- <http://207.111.201.70/transitsearch/dynamiccontent/candidates.htm>

Transit d'exoplanète :

- http://www.ursa.fi/sirius/HD209458/HD209458_eng.html
- <http://www.transitsearch.org/>

Articles sur les exoplanètes :

- <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0206228v1>