



RAPPORT DE STAGE - MASTER 1 DE PHYSIQUE



**Jessica Pericaud**  
Maître de stage : Franck Selsis, LAB



---

# Caractérisation/Modélisation d'exoplanètes de type terrestre

---

*Mai 2012*

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Etude de courbes de phase de planètes extrasolaires</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Modélisation de courbes de phase de planètes sans atmosphère</b>	<b>3</b>
1.1	Cas d'une étoile ponctuelle . . . . .	3
1.2	Influence d'un disque stellaire . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Application : confrontation avec les données obtenues par la mission Kepler</b>	<b>6</b>
2.1	La mission Kepler . . . . .	6
2.2	Détermination de l'albédo de la planète Kepler 10-b . . . . .	6
<b>II</b>	<b>Modélisation de la température de surface de planètes habitables excentriques</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Atmosphère isotherme avec un seul composé gazeux</b>	<b>8</b>
3.1	Position du problème . . . . .	8
3.2	Températures d'une planète excentrique . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Modélisation d'une atmosphère non isotherme</b>	<b>11</b>
4.1	Composition de l'atmosphère . . . . .	11
4.2	Influence de l'excentricité de la planète . . . . .	12
4.3	Influence de l'étoile centrale . . . . .	12

# Introduction

Avec plus de 700 découvertes, les planètes extrasolaires représentent un champ d'étude majeur de l'astronomie actuelle. Les premières observations ont révélé les planètes géantes gazeuses, dont la diversité a intrigué la communauté astronomique en comparaison à ce qui était connu du système solaire. Plus les techniques d'observation se sont améliorées, plus les objets de petite taille devenaient détectables, avec l'espoir de découvrir des planètes comparables à la Terre et susceptibles d'abriter la vie. Depuis 2011, des planètes de la taille de la Terre, et même plus petites ont été découvertes. La diversité de ces exoplanètes est telle que leur étude s'inscrit dans de nombreux domaines de la physique et de la chimie.

Durant ce stage je me suis plus particulièrement intéressée aux exoplanètes rocheuses, avec deux angles d'approche différents ; j'ai dans un premier temps étudié les courbes de lumière émises par des planètes sans atmosphère afin de caractériser le flux que l'on peut en capter. Je me suis ensuite intéressée à l'influence de différents paramètres sur la température de surface des planètes de type terrestre avec atmosphère, dans le but de tester leur habitabilité, et en particulier leur réponse à une orbite excentrique.

## Première partie

# Etude de courbes de phase de planètes extrasolaires

Au cours de l'orbite d'une planète autour de son étoile, le flux réfléchi que l'on reçoit de cette planète varie en fonction de sa phase. Il en est de même pour le flux émis si la planète est en résonance spin orbite 1 : 1, puisque que la planète est alors éclairée de la même façon au cours de sa révolution. Le flux total reçu (émis + réfléchi) est maximum lorsqu'on voit la totalité de la face éclairée de la planète (position 1 sur la figure 0.1), et minimum lorsqu'on se trouve du côté de nuit de la planète (position 2). A l'heure actuelle, les instruments commencent à être capables de mesurer le flux direct de ces planètes, il est donc utile d'en connaître les propriétés.

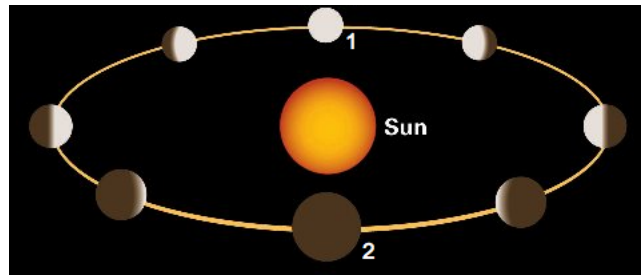


FIGURE 0.1 – Illustration montrant les phases d'une planète vues par un observateur distant

## 1 Modélisation de courbes de phase de planètes sans atmosphère

### 1.1 Cas d'une étoile ponctuelle

Le cas le plus simple à considérer est celui d'une planète synchrone (ce qui est d'ailleurs le cas pour la majorité des exoplanètes telluriques détectées aujourd'hui) sans atmosphère, en rotation autour d'une étoile ponctuelle.

Pour étudier ce problème, ce sont les propriétés du corps noir que l'on fait intervenir ; le flux émis par l'étoile est donnée par la loi de Planck :

$$F_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1)} W.m^{-2}.\lambda^{-1}$$

avec  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide,  $h$  la constante de Planck,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $k_B$  la constante de Boltzmann. La surface d'une planète synchrone est à l'équilibre radiatif, donc sa température ne dépend que de l'angle d'incidence du rayonnement qu'elle reçoit et de l'albédo de la surface, donc la température d'équilibre sera sensiblement différente selon la position sur la planète. Dans le modèle, la planète est donc divisée en secteurs, qui reçoivent des flux stellaires différents. D'après la loi de Stefan-Boltzmann, le flux total rayonné (ou puissance totale rayonnée par unité de surface) par un corps noir s'écrit  $F = \sigma T^4 W.m^{-2}$ ,  $\sigma$  étant la constante de Stefan-Boltzmann. Ainsi le flux stellaire arrivant au niveau de la planète s'écrit

$$F_{\text{étoile}} = \sigma T_{\text{étoile}}^4 \left( \frac{R_{\text{étoile}}}{a} \right)^2$$

avec respectivement  $T_{\text{étoile}}$ ,  $R_{\text{étoile}}$  et  $a$  la température de l'étoile, son rayon et la distance planète-étoile. La température d'équilibre d'un secteur  $i$  de la planète peut alors être déterminée grâce à la formule 1.1.

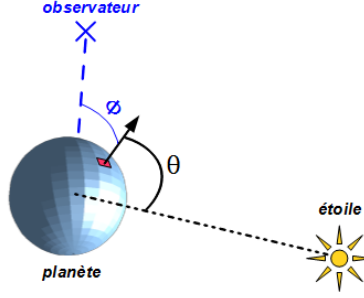


FIGURE 1.1 – Représentation des angles utilisés dans le problème :  $\theta$  est l'angle entre la normale à un secteur de la planète et la direction reliant la planète à l'étoile, et  $\Phi$  est l'angle entre la normale d'un secteur et la direction reliant planète et observateur.

$$T_{eq_i} = \left( \frac{F_{etoile} \cos(\theta_i) (1 - A)}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.1)$$

d'où

$$F_{emis_i} = \sum_i [F_{\lambda}(T_{eq_i}) \alpha_i \cos(\Phi_i) \left( \frac{R_{planete}}{D} \right)^2] \quad (1.2)$$

avec  $\theta$  et  $\Phi$  les angles définis sur la figure 1.1,  $\alpha_i$  l'aire d'un secteur angulaire,  $D$  la distance entre le système planétaire et la Terre,  $R_{planete}$  le rayon de la planète étudiée et  $A$  son albédo.

De la même façon que  $F_{emis}$  est le flux émis par la planète que l'on reçoit sur Terre, le flux réfléchi par la planète que l'on détecte s'écrit :

$$F_{reflechi_i} = \sum_i [A \alpha_i \cos(\Phi_i) F_{\lambda} \left( \frac{R_{planete}}{D} \right)^2] \quad (1.3)$$

Grâce à cela il est possible de calculer la courbe de phase théorique émise par une planète dont on connaît les caractéristiques, en calculant le flux reçu (flux émis + flux réfléchi) en fonction de la longitude de l'observateur : on assimile ici la rotation de la planète autour de son étoile à un observateur en rotation autour de la planète fixe par rapport à son étoile par souci de commodité. La longitude de l'observateur  $180^\circ$  correspond à la position où l'on observe totalement la partie éclairée de la planète (position 1 sur la figure 0.1). La courbe de phase a été tracée pour une planète particulière, Kepler 10-b dont les propriétés sont données dans le tableau 1 (fig 1.2 à droite, courbe noire).

## 1.2 Influence d'un disque stellaire

En réalité, les étoiles vues par des planètes de faible distance orbitale ont une extension spatiale non négligeable. Il faut donc tester l'influence de ce paramètre sur la courbe de phase émise par les planètes afin de savoir s'il est nécessaire de considérer un disque stellaire, ce qui alourdit les calculs, ou bien si l'on peut se contenter de l'approximation d'une étoile ponctuelle.

Pour faire cela, j'ai dans un premier temps assimilé l'étoile à un disque uniforme. En réalité, les disques stellaires présentent un assombrissement centre-bord, mais ce phénomène ne devra être considéré que si l'effet d'un disque uniforme par rapport à une étoile ponctuelle est fort, puisque l'assombrissement centre-bord tend à ponctualiser l'étoile.

J'ai donc divisé le disque stellaire en différents secteurs d'aire constante : ainsi, chaque secteur a la même luminosité  $L_s$ , égale à la luminosité totale de l'étoile  $L$  divisée par le nombre de secteurs que l'on considère. Chaque secteur de l'étoile est ensuite représenté par une étoile ponctuelle de luminosité  $L_s$ , placée au barycentre du secteur. En faisant cela, le flux stellaire reçu par chaque secteur de la planète est la somme

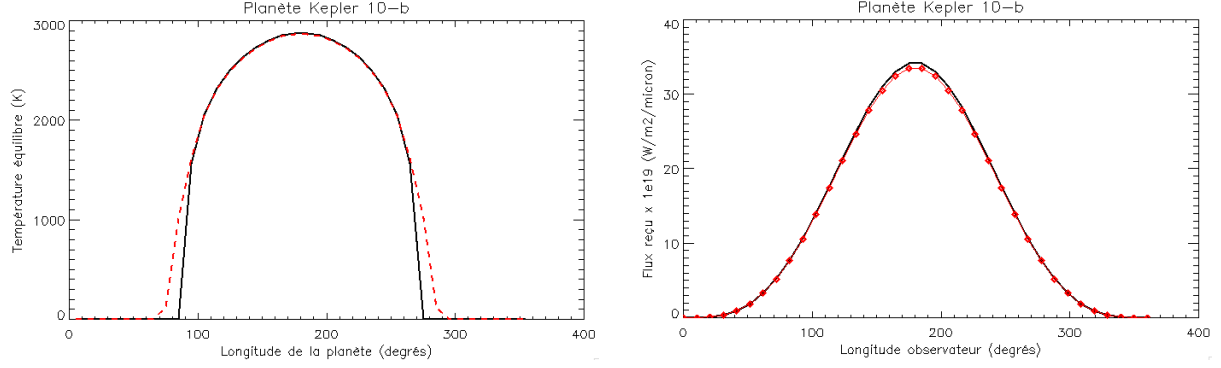


FIGURE 1.2 – À gauche : Températures d'équilibre le long de la latitude  $0^\circ$  de la planète Kepler 10-b en fonction de la longitude sur la planète,  $180^\circ$  étant le point substellaire. En trait plein est tracée la température d'équilibre pour une étoile ponctuelle, en tirets la température lorsqu'on considère un disque stellaire. À droite : Comparaison des courbes de phase théoriques de la planète Kepler 10-b d'une étoile ponctuelle (trait plein) et d'un disque stellaire (losanges) en fonction de la longitude de l'observateur. Les courbes de phase sont tracées pour la longueur d'onde  $1\mu\text{m}$

des contributions de chaque étoile. Ainsi la température d'équilibre pour chaque endroit de la planète est calculée à partir de l'équation 1.1, en remplaçant  $F_{\text{étoile}}$  par le flux provenant des différentes étoiles :

$$F_{N\text{étoiles}} = \sum_j \frac{F_{\text{étoile}} \cos(\theta_j)}{N} \quad (1.4)$$

$N$  est le nombre de secteurs de l'étoile (c'est à dire le nombre d'étoiles ponctuelles artificielles), et  $\theta_j$  est l'angle entre le vecteur normal à un secteur de la planète et la direction de l'étoile ponctuelle  $j$ .

La majeure différence entre un modèle avec une étoile ponctuelle et celui d'un disque stellaire est l'existence d'une zone de pénombre lorsque l'étoile n'est pas ponctuelle ; une portion plus importante de la planète est éclairée. Cette propriété est particulièrement visible en comparant les températures d'équilibre à la surface de la planète à une latitude donnée (figure 1.2). Il apparaît nettement qu'au-delà de  $90^\circ$  en longitude en partant du point substellaire, plus de la moitié de la planète est soumise au rayonnement de son étoile si celle-ci n'est pas ponctuelle, alors que strictement la moitié de la planète reçoit un rayonnement lorsque l'étoile est ponctuelle. De ce fait, la courbe de phase de la planète s'en trouve modifiée. La question reste à savoir à quel point. Prenons l'exemple extrême de la planète Kepler 10-b : elle est très proche de son étoile ( $0,0168 \text{ UA}$ ), et le diamètre apparent de son étoile vue de sa surface est de  $33^\circ$  (pour comparaison le diamètre apparent du Soleil depuis la Terre est de  $0,5^\circ$ ). En traçant les courbes de phase de cette planète avec les deux modèles pour différentes longueurs d'onde, il apparaît que la différence est très faible, d'environ 1%, comme on peut l'observer sur la figure 1.2 à droite.

On voit donc que même lorsque le diamètre apparent de l'étoile est grand, on peut se contenter de considérer l'étoile ponctuelle afin de modéliser les courbes de phase des planètes. Sur l'exemple du système Kepler 10, pour avoir une courbe de phase modifiée d'environ 10%, il faudrait que la planète se trouve à  $0,005 \text{ UA}$  du centre de son étoile, soit à  $14\,000 \text{ km}$  de la surface de l'étoile...

Dans la suite de cette étude, et pour les applications de ce genre développées au LAB, les étoiles seront considérées comme ponctuelles.

<b>Rayon (<math>R_{Terre}</math>)</b>	<b>Demi grand axe (U.A)</b>	<b>Période orbitale (jours)</b>
1,416	0,01684	0,837495
<b><math>T_{eq}</math> (K)</b>	<b>Rayon étoile (<math>R_{Soleil}</math>)</b>	<b>Température étoile (K)</b>
1833	1,056	5627

TABLE 1 – Propriétés de la planète Kepler 10-b et de son étoile.

## 2 Application : confrontation avec les données obtenues par la mission Kepler

### 2.1 La mission Kepler

Lancé en 2009 par la NASA, le télescope Kepler a pour mission de détecter de nouvelles planètes extrasolaires en utilisant la méthode des transits : lorsqu'une planète passe devant son étoile, elle en fait baisser la luminosité apparente, ce qui permet alors de la détecter. En ce qui nous concerne, la mission Kepler est particulièrement intéressante dans le fait que pour la première fois elle a fourni des renseignements sur la lumière émise et réfléchi par une planète elle-même : en effet, lors du transit secondaire, c'est à dire quand la planète passe derrière l'étoile, l'occultation de la planète contribue à diminuer la luminosité totale reçue par l'observateur, l'amplitude de cette diminution correspond alors à la luminosité de la planète elle-même. Cette amplitude étant tellement faible, la qualité du signal doit être excellente, c'est pourquoi il est encore difficile d'observer ces transits secondaires.

À ce jour, deux observations de ce type ont abouti pour des planètes telluriques, pour la planète Kepler 10-b [1](mission Kepler), et la planète 55 Cnc e [2] (mission Spitzer). Batalha et al. [1] sont parvenus à déterminer que l'amplitude de la courbe de luminosité de la planète est de  $7,6 \pm 2ppm$ . En tenant compte de la résolution du télescope, des propriétés de la planète (tableau 1) et en intégrant sur les longueurs d'onde auxquelles il observe ( $0,3\mu m - 0,945\mu m$ ), je peux prévoir la courbe de phase que l'on s'attend à avoir et ainsi la comparer à ce qui a été détecté.

### 2.2 Détermination de l'albédo de la planète Kepler 10-b

Certaines des propriétés de la planète Kepler 10-b sont connues (masse, rayon, période), mais son albédo, qui joue un rôle important dans la lumière qu'elle émet, n'est pas défini. J'ai par exemple tracé sur la figure 2.1 la courbe de phase de la planète pour différentes valeurs d'albédo de Bond. Il apparaît en comparant le modèle aux observations que l'albédo de la planète doit être supérieur à 0,6. L'albédo reflète les propriétés de la surface, et si l'on cherche une comparaison avec les albédos des planètes du système solaire, il n'y a pas d'équivalent, puisque les planètes et satellites non glacés ont des albédos faibles, souvent inférieurs à 0,2. Compte tenu de la proximité entre la planète Kepler 10-b et son étoile, il a été supposé qu'un océan de roches fondues pourrait exister au point substellaire, milieu que l'on ne sait pas bien caractériser et qui pourrait par conséquent expliquer l'albédo très élevé.

Récemment une autre planète a permis l'observation d'un transit secondaire et la mesure de l'amplitude de la courbe de phase de la planète 55 Cnc-e. Cette observation est reportée dans l'article de Demory et al. [2]. Les résultats obtenus dans cet article sont de nouveau cohérents avec notre modèle, puisque l'amplitude mesurée de la courbe de phase de cette planète est de  $131 \pm 28ppm$ , ce qui correspond (aux barres d'erreur près et pour certaines valeurs d'albédo) à l'amplitude calculée par notre modèle. J'ai testé comme précédemment les amplitudes obtenues avec différents albédos (figure 2.2), ce qui nous amène à corroborer la faible valeur d'albédo estimée dans l'article inférieure à 0,5.

L'étude des courbes de phase d'une planète est donc importante afin d'en déterminer les propriétés, l'intérêt étant grandissant avec les observations qui se multiplient. L'augmentation de la qualité des instruments permettra par la suite de détecter plus sensiblement les transits secondaires, ce qui permettra de mieux

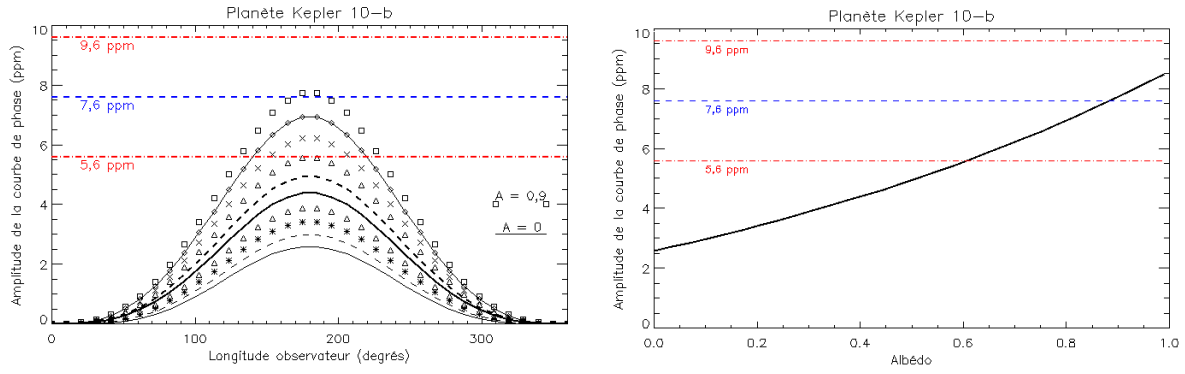


FIGURE 2.1 – À gauche : Courbes de phase théoriques de la planète Kepler 10-b pour différentes valeurs d'albédo. L'amplitude de l'occultation détectée est reportée à 7,6 ppm, ainsi que la limite inférieure de la barre d'erreur de cette valeur. À droite : L'amplitude de la courbe de phase théorique est représentée en fonction de l'albédo. Là encore les valeurs observées sont reportées à  $7,6 \pm 2ppm$ .

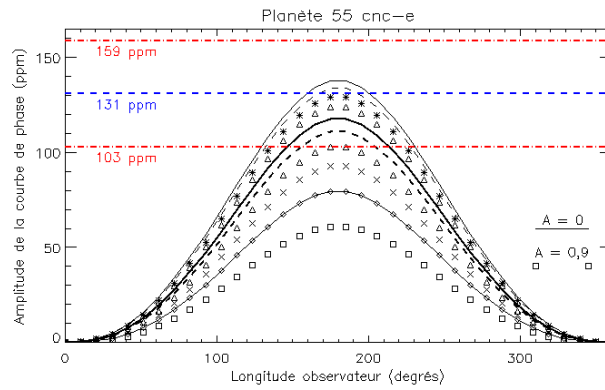


FIGURE 2.2 – Courbes de phase théoriques de la planète 55 Cnc-e pour différentes valeurs d'albédo. L'amplitude de l'occultation détectée est reportée à 131 ppm, ainsi que les barres d'erreur de cette valeur à  $\pm 28ppm$ .

contraindre les propriétés des planètes.



## Deuxième partie

# Modélisation de la température de surface de planètes habitables excentriques

La première partie était consacrée à l'étude de planètes sans atmosphère, afin d'avoir un modèle simple. Cependant, il est fortement exclu que ce soit le cas pour toutes les exoplanètes, ce qui rend l'étude des atmosphères importante. Un autre paramètre influençant la température des planètes est leur excentricité, que nous avons considérée nulle dans la partie précédente. Pourtant plus de la moitié des exoplanètes découvertes ont une excentricité supérieure à 0,1. Il est particulièrement intéressant de regarder l'effet de l'excentricité car elle peut faire sortir une planète de sa zone habitable. En effet, la zone habitable est définie comme une zone de l'espace autour de l'étoile où la présence d'eau liquide est possible. Si l'orbite de la planète est très excentrique, il se peut donc qu'au cours de sa révolution la planète sorte de la zone d'habitabilité, ce qui pourrait nuire à la présence d'eau liquide à la surface.

Nous allons donc étudier une planète habitable lorsque son excentricité est nulle, et regarder l'influence d'une excentricité supérieure sur les variations de sa température de surface.

Nous étudierons également l'influence d'autres paramètres, le tout ayant pour but de caractériser la température à la surface des planètes extrasolaires.

## 3 Atmosphère isotherme avec un seul composé gazeux

### 3.1 Position du problème

La présence d'une atmosphère sur une planète change considérablement sa température, notamment dans le fait qu'elle a tendance à réduire les écarts de température entre le côté jour et le côté nuit de la planète.

Dans une première approche considérons le système Terre-Soleil, où la planète Terre posséderait une atmosphère isotherme, composée par exemple de  $CO_2$ . La température de la planète peut alors être assimilée à la température de l'atmosphère. Si la planète a une orbite parfaitement circulaire, sa température est alors égale à sa température d'équilibre donnée par la formule 3.1

$$T_{eq}(K) = \left( \frac{F_{etoile}(1-A)}{4\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.1)$$

avec  $F_{etoile}$  défini dans la partie 1 comme étant le flux de puissance reçu au niveau de la planète, à une distance orbitale  $a$ .

Pour la Terre sans excentricité, en prenant un albédo de 0,3 et  $F_{etoile} = F_{soleil} = 1358W.m^{-2}$ , la température d'une atmosphère isotherme serait de 254,5K.

Si la planète possède maintenant une orbite excentrique, elle est soumise à un flux stellaire différent selon sa position sur l'orbite : lorsqu'elle passe du périhélie à l'apogée, la température de l'atmosphère va alors être modifiée, le tout est de savoir dans quelle mesure.

### 3.2 Températures d'une planète excentrique

Pour une planète excentrique, la température d'équilibre se calcule différemment : on ne peut plus considérer le même flux de l'étoile que pour une excentricité nulle. Il faut utiliser dans la formule 3.1 le flux moyen reçu au cours d'une orbite :

$$F_{exc} = \frac{F_{etoile}}{\sqrt{1-e^2}}$$

(on peut également définir le flux instantané  $F_{inst}$  reçu par la planète), avec le flux  $F_{etoile}$  calculé à la distance orbitale  $a$ ,  $a$  étant le demi-grand axe de l'orbite. Cependant cette température n'est plus équivalente

à la température de l'atmosphère, que l'on notera par la suite  $T_{atm}$ . En effet, si l'orbite est excentrique il n'y a plus d'équilibre entre le flux absorbé par l'atmosphère et celui réémis : sur un pas de temps  $\Delta t$  de l'orbite, l'énergie ( $J.m^{-2}$ ) gagnée par l'atmosphère est :

$$\Delta E = (-\sigma T_{atm}^4 + \frac{F_{inst}(1-A)}{4})\Delta t$$

Ainsi, à une position  $i$  donnée de l'orbite, l'énergie présente dans l'atmosphère est donnée par

$$E_i = E_{i-1} + \Delta E$$

La température et cette quantité d'énergie sont reliées par la formule

$$E = \frac{P}{g}c_p T_{atm}$$

à l'aide de la pesanteur  $g$ , de la pression de l'atmosphère  $P$  et de la capacité calorifique spécifique  $c_p$ . Il est alors possible de calculer la valeur de la température de l'atmosphère sur toute l'orbite. On voit par exemple sur la figure 3.1 que les variations de température au cours d'une orbite ne sont pas négligeables dans certains cas (environ 20K pour 1 bar de pression et une excentricité de 0,1), les facteurs jouant sur ces variations étant nombreux. L'influence de la pression (c'est à dire de la masse de l'atmosphère, car la gravité est prise constante) est d'ailleurs visible sur cette figure : plus la pression est élevée, plus les écarts de température seront amortis. Il est également à noter que les courbes de température de l'atmosphère et celle de la température d'équilibre instantanée sont déphasées, d'autant plus que la pression est importante : l'atmosphère possède une inertie à répondre à l'insolation qu'elle reçoit, proportionnelle à la masse de son atmosphère.

On va s'intéresser plus particulièrement dans la suite aux variations de température de l'atmosphère sur une orbite de la planète, que l'on notera  $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ .

**Influence de l'excentricité** En considérant toujours une planète terrestre orbitant autour du Soleil, et en fixant la pression à 10 bars par exemple, on s'aperçoit que l'augmentation de l'excentricité de l'orbite de la planète entraîne une augmentation des variations de température  $\Delta T$  (figure 3.2). En effet, l'excentricité importante amène la planète plus proche de son étoile lors du périhélie et plus loin lors de l'aphélie, en comparaison avec une orbite circulaire, d'où les variations importantes de température au cours d'une orbite. On peut également s'apercevoir que la température de l'atmosphère moyenne se comporte différemment lorsqu'on est à haute pression ou à basse pression. À haute pression, l'atmosphère possède une inertie suffisante pour conserver la chaleur accumulée lorsque la planète passe proche de son étoile, c'est pourquoi la courbe de température moyenne possède le même comportement que la courbe de  $\Delta T$ . En revanche à basse pression, l'atmosphère n'est pas assez efficace, la planète se refroidit très vite, ce qui explique le fait que lorsque l'excentricité augmente, et donc que la planète explore des zones plus lointaines de l'étoile, la température moyenne diminue, la chaleur acquise au périhélie étant très vite perdue.

Les planètes excentriques sont donc soumises à des conditions de température extrêmes lorsqu'elles ne possèdent pas assez de pression, qui est nécessaire à l'amortissement des différences d'énergie reçue dues à l'excentricité de l'orbite.

**Influence de l'étoile** Il est également intéressant d'étudier l'influence d'étoiles différentes sur la température des planètes. Pour faire cela, je fixe le flux reçu par la planète à celui reçu par la Terre actuellement,  $F_{soleil} = 1358W.m^{-2}$ , ce qui contraint la distance orbitale à être plus faible pour des étoiles de masse inférieure au Soleil, et plus grande pour des étoiles de masse supérieure. D'après les lois de Kepler, les distance orbitale et période sont reliées par la formule suivante :

$$Période^2 = \frac{4\pi^2}{GM}a^3$$

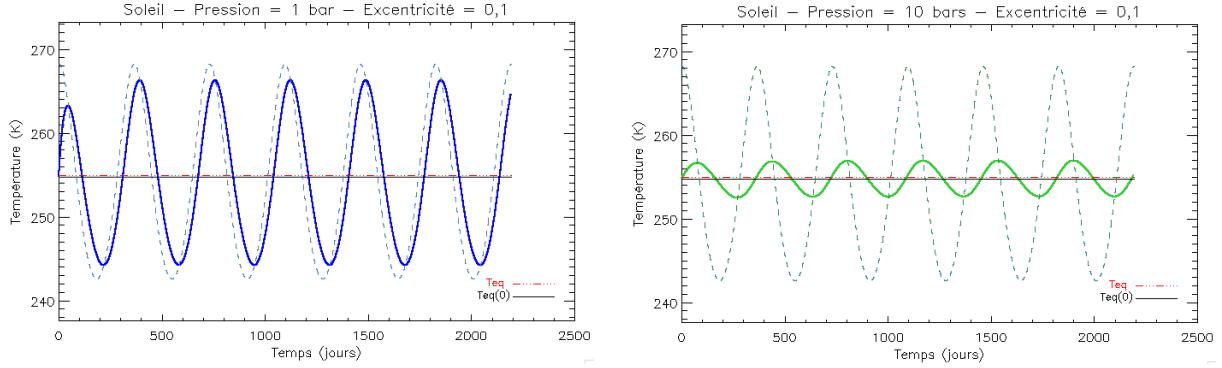


FIGURE 3.1 – À gauche : Evolution sur 6 orbites des températures caractéristiques d’une planète terrestre avec une excentricité de 0,1. La courbe en trait plein repère l’évolution de la température  $T_{atm}$  d’une atmosphère isotherme de 1 bar, celle en tirets représente les variations de la température d’équilibre calculée à partir de la formule 3.1 avec  $F_{inst}$ .  $Teq$  représente la température d’équilibre calculée avec  $F_{exc}$  et  $Teq(0)$  la valeur pour la Terre de 254, 5K. À droite : Même chose pour une pression de 10 bars.

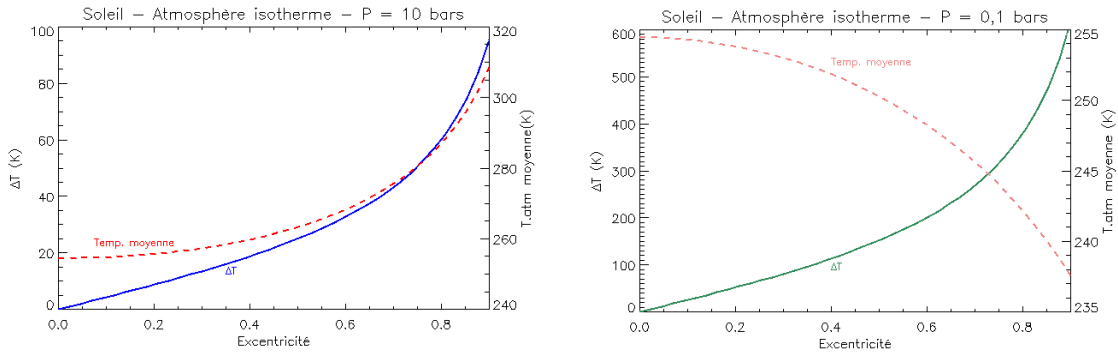


FIGURE 3.2 – À gauche : Dépendance de la différence de température sur une orbite et de la température moyennée (elle aussi sur une orbite) en fonction de l’excentricité pour une pression de 10 bars. Le trait plein représente  $\Delta T$  et les tirets la température moyenne. À droite : Même chose pour une pression de 0,1 bar.

où  $a$  est la distance orbitale (demi grand axe pour une orbite excentrique),  $G$  la constante gravitationnelle et  $M$  la masse du système {étoile + planète}, c’est à dire la masse de l’étoile pour des planètes de masse négligeable.

Ainsi, plus l’étoile a une masse élevée, plus la période de la planète va augmenter afin de conserver ce flux  $F_{soleil}$ . En représentant les variations de température au cours d’une orbite  $\Delta T$ , en fonction de la masse des étoiles (ce qui revient à tracer en fonction de la période), on s’aperçoit sur la figure 3.3 que la période a une influence importante; lorsque la période est courte, l’atmosphère n’a pas le temps de répondre aux changements d’insolation qu’elle a subis au cours de l’orbite. Si la période augmente, la planète a plus de temps pour réagir ce qui entraîne une augmentation des différences de température sur une orbite. Au bout d’une certaine période, qui peut être interprétée comme un temps de latence de l’atmosphère, les variations de température restent constantes, l’atmosphère a donc le temps de réagir entièrement lors de son orbite.

Pour avoir des conditions vivables dans le sens qui ne présente pas de variations extrêmes, une planète excentrique ne doit donc pas avoir le temps de réagir aux importantes différences d’énergie qu’elle reçoit lors de son orbite. Les étoiles de faible masse ( $< 0,5M_{soleil}$ ) sont donc des étoiles à priori plus propices à des conditions favorables sur des planètes excentriques.

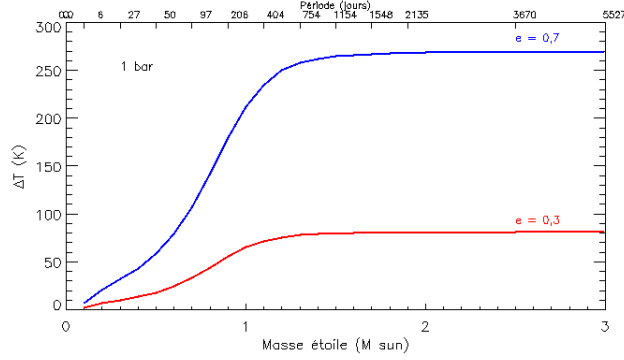


FIGURE 3.3 – Evolution de la différence de température de l’atmosphère sur une orbite, en fonction de la masse des étoiles, pour deux excentricités et une pression de 1 bar.

## 4 Modélisation d’une atmosphère non isotherme

Une atmosphère isotherme comme nous venons de l’étudier n’est pas très réaliste. Il est donc nécessaire de développer le modèle. En se basant sur ce que l’on connaît de l’atmosphère terrestre, l’essentiel de la masse de l’atmosphère se trouve dans la partie convective, ainsi que la photosphère. Le modèle que nous allons développer s’appuie sur le comportement de la température dans la zone convective de l’atmosphère terrestre, c’est à dire sur un gradient de température influencé principalement par la température de surface, et reliant les variations de pression dues à l’altitude aux variations de température dans l’atmosphère. Pour des planètes habitables, l’eau doit être présente sur la planète, donc nous incluons également la contribution de la vapeur d’eau au modèle d’atmosphère, ce qui nous permettra d’étudier plus précisément les effets mis en évidence précédemment.

### 4.1 Composition de l’atmosphère

Nous considérons ici une atmosphère composée d’un gaz non condensable, le diazote, ainsi qu’éventuellement de vapeur d’eau si la température à la surface est suffisante à l’évaporation. Ainsi la pression de l’atmosphère est dépendante de la température de surface puisqu’elle est la somme de la pression de  $N_2$  et de vapeur d’eau. Dans la suite, ce que nous appelons pression  $P$  est la pression du gaz sec, c’est à dire le diazote.

La température et la pression d’un mélange de gaz tels que  $H_2O$  et  $N_2$  sont reliées par la formule 4.1, tirée du livre de R. T. Pierrehumbert [3]. On appelle  $r_{sat}$  le rapport de mélange défini par

$$r_{sat} = \frac{M_{H_2O}}{M_{N_2}} \frac{P_{H_2O}}{P}$$

$$\frac{\ln T}{\ln P} = \frac{R_{N_2}}{c_{pN_2}} \frac{1 + \frac{L r_{sat}}{R_{N_2} T}}{1 + \left( \frac{c_{pH_2O}}{c_{pN_2}} + \left( \frac{L}{R_{H_2O} T} - 1 \right) \frac{L}{c_{pN_2} T} \right) r_{sat}} \quad (4.1)$$

avec  $L$  l’enthalpie de vaporisation de l’eau,  $R_{N_2}$  le rapport de la constante des gaz parfaits par la masse molaire de l’azote  $M_{N_2}$  (même définition pour  $R_{H_2O}$ ) et  $c_{pN_2}$  la capacité thermique spécifique de l’azote (idem pour  $c_{pH_2O}$ ).

Ainsi, à partir d’une température de surface et d’une pression d’azote fixées, on peut déterminer la pression de vapeur d’eau  $P_{H_2O}$  puis la valeur de la température pour différentes pressions, et par suite construire le profil de l’atmosphère. Il est également possible de calculer une température d’émission de l’atmosphère, propre à chaque température de surface. Comme il est facile de calculer la température d’équilibre d’une

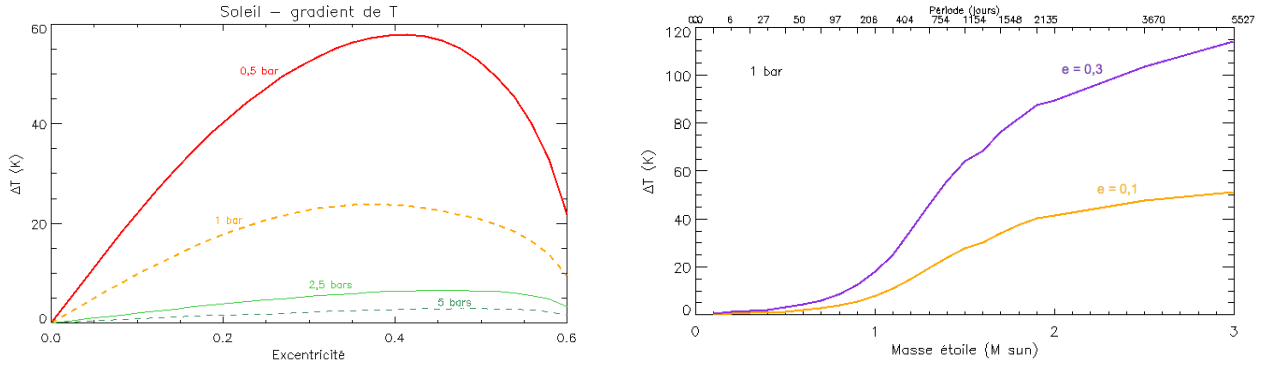


FIGURE 4.1 – À gauche : Pour une atmosphère présentant un gradient de température, évolution de la différence de température de surface de la planète sur une orbite pour différentes pressions de  $N_2$ . À droite : Variations de la différence de température de surface avec la masse des étoiles, c'est à dire la période de l'orbite, pour deux excentricités.

planète (formule 3.1), on peut l'identifier à la température d'émission de l'atmosphère, et ainsi avoir accès à la température de la surface de la planète.

Les températures que nous considérerons désormais seront les températures à la surface de la planète.

## 4.2 Influence de l'excentricité de la planète

Comme nous l'avons vu pour une atmosphère isotherme, l'excentricité peut avoir des effets importants sur la température de l'atmosphère. C'est pourquoi avec un modèle plus complexe d'atmosphère, il est également nécessaire de s'intéresser à l'influence de ce facteur. En considérant donc une planète terrestre, orbitant autour d'un Soleil, et dont l'atmosphère est composée de  $N_2$  et  $H_2O$ , l'évolution de la différence de température de surface sur une orbite est différente de celle d'une atmosphère isotherme lorsque l'excentricité varie. On peut effectivement observer sur la figure 4.1 (gauche) qu'à partir d'une certaine excentricité, les variations de température diminuent. Cela s'explique par le fait qu'à la différence du modèle isotherme, la pression totale de l'atmosphère n'est pas fixe : les valeurs de pression indiquées sur le graphe sont celles de l'azote. Or lorsque la température augmente, ce qui est le cas lorsque l'excentricité augmente, la pression de vapeur d'eau augmente elle aussi, jusqu'à être tellement importante additionnée à celle de  $N_2$  qu'elle va réussir à amortir les variations de température dues à l'excentricité.

Ainsi une planète dont l'atmosphère présente un composé condensable, tel que l'eau, est capable de s'auto-réguler pour des excentricités importantes. Cependant, ici nous n'avons pas tenu compte de la quantité d'eau disponible à la surface de la planète, si les réserves ne sont pas assez importantes, la pression de vapeur d'eau maximale sera limitée, ce qui limitera également la régulation des variations de température.

Il est également à noter que le graphe 4.1 (à gauche) n'a été tracé que pour des excentricités inférieures à 0,6. Ceci est dû au fait que pour des excentricités supérieures, la température d'équilibre de la planète dépasse  $270K$ , limite maximale de la température d'émission de l'atmosphère. À partir de cette température d'émission, il se produit le phénomène d'emballement de l'effet de serre, qui conduit à l'évaporation totale des océans, ce qui ne constitue bien évidemment pas des conditions favorables à l'habitabilité de la planète.

## 4.3 Influence de l'étoile centrale

Dans la même idée que pour une atmosphère isotherme, l'étude de l'influence de l'étoile centrale est intéressante si l'on fixe le flux stellaire à  $1358W.m^{-2}$ . La période de la planète se trouve donc modifiée pour les différentes étoiles utilisées. En traçant les variations de température de surface sur une orbite en fonction de la masse des étoiles (figure 4.1 à droite), et ce pour une pression d'azote identique à la pression de l'atmosphère isotherme utilisée sur la figure 3.3, on s'aperçoit que  $\Delta T$  augmente continûment, on ne retrouve

pas le palier du cas isotherme. Ceci tient uniquement du fait que la pression de l'atmosphère est supérieure à celle de  $N_2$  à cause de l'évaporation de l'eau. Ainsi pour des pressions supérieures le temps de latence de l'atmosphère est plus élevé, à tel point que même pour des orbites très longues (pour une étoile de 3 masses solaires l'orbite dure environ 15 ans), l'atmosphère n'est pas encore capable de réagir complètement aux différences d'énergie qu'elle reçoit lors du parcours de la planète.

La différence introduite par l'excentricité ne devient importante que pour des périodes qui provoquent des variations de température trop importantes pour représenter des conditions favorables, donc même pour des excentricités élevées, si la masse stellaire est inférieure ou proche de 1 masse solaire, les températures de surface ne varient pas fortement et peuvent être intéressantes pour l'habitabilité de la planète.

# Conclusion

L'étude des exoplanètes peut donc se faire sous de nombreux aspects. Durant ce stage l'étude des courbes de phase de planètes sans atmosphère m'a permis de montrer qu'un modèle simple pouvait donner des résultats cohérents avec les observations, notamment dans le fait que la non-punctualité des étoiles a très peu d'influence sur les courbes de phase que l'on peut détecter. La simplicité de ce modèle permet néanmoins à la fois de correspondre aux observations effectuées, mais aussi de pouvoir donner une idée de la valeur de l'albédo de Bond de a planète.

L'autre vision de mon stage sur les planètes de type terrestre avec une atmosphère a permis de mettre en évidence l'influence de l'excentricité et de la période de l'orbite sur la température de surface, mais surtout le rôle que joue l'atmosphère sur la régulation de la température. Avec une atmosphère telle qu'on l'a conçue, composée d'azote et d'eau, et pour des étoiles plus petites ou de même taille que le Soleil, une planète de type terrestre est capable de rester habitable malgré de fortes excentricités.

Cependant le terme d'habitable ne s'applique qu'à la conception de la vie que nous connaissons. La découverte ces dernières années d'êtres vivants extrémophiles, pouvant vivre dans des milieux improbables, montre que la définition de ce qu'est une planète habitable n'est qu'arbitraire, et qu'il existe certainement des planètes que l'on considérerait aujourd'hui comme hostiles, qui pourtant renfermeraient une biodiversité insoupçonnée.

## Références

- [1] Batalha et al. Kepler's first rocky planet : Kepler-10b. *The Astrophysical Journal*, March 2011.
- [2] Demory et al. Detection of thermal emission from a super-earth. *Accepted to APJL on April 2012*.
- [3] R T Pierrehumbert. *Principles of planetary climate*. 2009.

[www.kepler.nasa.gov](http://www.kepler.nasa.gov)

[exoplanets.org](http://exoplanets.org)

Image de la page de garde : [www.astrosurf.com/luxorion/bioastro-recherche-planetes-habitables.htm](http://www.astrosurf.com/luxorion/bioastro-recherche-planetes-habitables.htm)