

# Planètes et exoplanètes

**Rosa M. Ros, Hans Deeg**

Union Astronomique Internationale, Université Polytechnique de Catalogne (Barcelone, Espagne), Institut d'Astrophysique des Canaries et Université de La Laguna (Canaries, Espagne)

## Résumé

Cet atelier fournit une série d'activités pour comparer les nombreuses propriétés observées sur les planètes dans notre Système Solaire (taille, distances, vitesses orbitales et vitesses de libération). Chaque section fournit diverses données planétaires en utilisant des démonstrations ou des calculs qui permettent de comparer les propriétés des planètes et d'expliquer aux étudiants la signification de chaque donnée.

Une activité de synthèse permet d'explorer et de comparer quelques propriétés de systèmes planétaires extrasolaires (extérieur à notre Système Solaire). Actuellement, plusieurs méthodes directes et indirectes sont utilisées pour trouver des exoplanètes. Il a été détecté presque 2000 planètes et environ 500 systèmes avec des planètes multiples. On montre un exemple d'une planète directement observée, dans la figure 1.

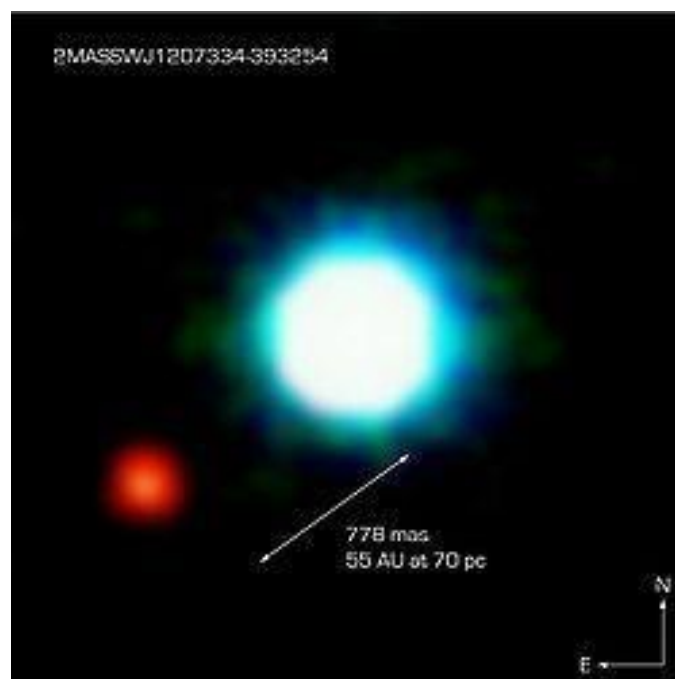


Fig. 1: la première planète observée par la méthode directe, 2M1207b, en 16 mars 2003. Sa masse est de 4 fois celle de Jupiter et elle est distante de son étoile naine brune de 46 ua. En 2006, un disque de poussière a été trouvé autour de l'étoile, et cela prouve que le processus de formation de cette planète est le même que celui observé autour des étoiles plus massive. (Photo : ESO).

## Objetifs

- Comprendre la signification de chaque donnée du système solaire observable sur le tableau
- Déduire les rayons orbitaux et les périodes orbitales des satellites galiléens de la planète Jupiter en utilisant une série de photos d'observations.
- Calculer la masse de Jupiter à partir de la troisième loi de Kepler.
- Comprendre les principales caractéristiques des systèmes planétaires extrasolaires en les comparant avec celles du système orbital de Jupiter et de ses satellites galiléens.

## Le système solaire

En créant les modèles réduits du Système Solaire, les étudiants peuvent comparer les différents paramètres planétaires. Pour cela, nous utiliserons les données du tableau 1.

Planètes	Diamètre (km)	Distance au soleil (km)
Soleil	1 392 000	
Mercure	4 878	57.9 10 <sup>6</sup>
Venus	12 180	108.3 10 <sup>6</sup>
Terre	12 756	149.7 10 <sup>6</sup>
Mars	6 760	228.1 10 <sup>6</sup>
Jupiter	142 800	778.7 10 <sup>6</sup>
Saturne	120 000	1 430.1 10 <sup>6</sup>
Uranus	50 000	2 876.5 10 <sup>6</sup>
Neptune	49 000	4 506.6 10 <sup>6</sup>

Tableau 1: Les données des corps du système solaire

Le but principal du modèle est d'en faire des données compréhensibles. Les distances exprimées en millions de kilomètres ne sont pas facilement appréhendables. Cependant, en les transformant en distances et tailles mesurables, les étudiants peuvent les comprendre plus facilement.

## Modèle du système solaire

### Modèle des diamètres

Utiliser un grand papier et couper un cercle de diamètre 139 cm qui représente le soleil, en prenant comme échelle 1cm représente 10000 km. Faire des planètes avec du papier dessin, sur lesquelles on dessine leurs caractéristiques morphologiques. En plaçant les planètes près du disque solaire, les étudiants peuvent saisir les différentes mesures planétaires.

Avec la même échelle (1 cm --- 10000km), utilisez les diamètres planétaires suivants :

Soleil 139 cm, Mercure 0.5 cm, Vénus 1.2 cm, Terre 1.3 cm, mars 0.7 cm, Jupiter 14.3 cm, Saturne 12.0 cm, Uranus 5.0 cm et Neptune 4.9 cm.

Suggestion : Il est aussi possible de faire le modèle précédent en dessinant les planètes sur un pull, en gardant la même échelle, et une fraction du Soleil.



Fig. 2a et 2b: exemples de pull dessiné avec les différentes planètes

### Modèle des distances

En comparant les distances entre les planètes et le Soleil nous pouvons produire un autre modèle qu'il est facile d'installer dans n'importe quel lieu scolaire. D'abord, couper des bandes de carton de 10cm de large, et les relier pour obtenir une longue bande de plusieurs mètres (figure 3).

Ensuite, placer les modèles de planètes sur cette bande en respectant l'échelle 1cm pour 10000000 km (qui est différente de celle choisie pour les diamètres). A rappeler aux étudiants qu'il ne faut pas utiliser la même échelle pour les deux mesures car avec l'échelle 1cm pour 10000000 km les planètes seraient mille fois plus petites. Les distances mesurées sont : Mercure 6cm, Vénus 11cm, la Terre 15cm, mars 23cm, Jupiter 78cm, Saturne 143cm, Uranus 288cm et Neptune 450cm.



Fig. 3: Maqueta de distancias.

Suggestion: une variation amusante de ce modèle est d'utiliser un rouleau de papier toilette.

Par exemple, vous pouvez prendre comme échelle une partie de papier pour tous les 20 millions de km.

### Modèle des diamètres et des distances

Le défi suivant est de combiner les deux activités et de faire un modèle tout en tenant compte des deux mesures : les distances et les diamètres. En fait, il n'est pas facile de définir une échelle qui nous permet de représenter les planètes avec des objets qui ne sont pas trop petits à des distances qui ne sont pas trop grandes, auquel cas les tailles et les distances ne sont pas facilement assimilées et le modèle n'est pas très utile pour des étudiants.

Suggestion : cela peut être une bonne idée d'utiliser la cour d'école pour faire le modèle et on représente les planètes par des boules de différents diamètres.



Fig. 4: le soleil et les planètes du modèle de diamètres et de distances

Un autre exemple de modèle : on représente le Soleil par un ballon de basket-ball de diamètre de 25 cm. Mercure est représenté par une tête d'épingle de diamètre 1 mm et est placé à une distance de 10 m. la planète Vénus est placée à une distance de 19 m et est représentée par une tête d'épingle de 2 mm, tandis que la Terre qui est représentée par la même taille que Vénus, est située à une distance de 27 m du Soleil. La planète Mars est représentée par une tête d'épingle de 1 mm et est placée à une distance de 41 m, à l'extrémité de la cour. Les autres planètes sont représentées à l'extérieur de l'école mais pas assez loin afin que les étudiants se familiarisent à ces distances.

La planète Jupiter est représentée par une balle de ping-pong de diamètre de 2.5 cm et est placée à une distance de 140 m. une autre balle de ping-pong de diamètre de 2 cm représentant Saturne est placée à une distance de 250 m. Finalement Uranus et Neptune sont représentées par des boules de 1 cm et sont situées respectivement à 300 m et 400 m du Soleil.

Il est à noter que ce modèle de système solaire ne peut pas être représenté dans n'importe



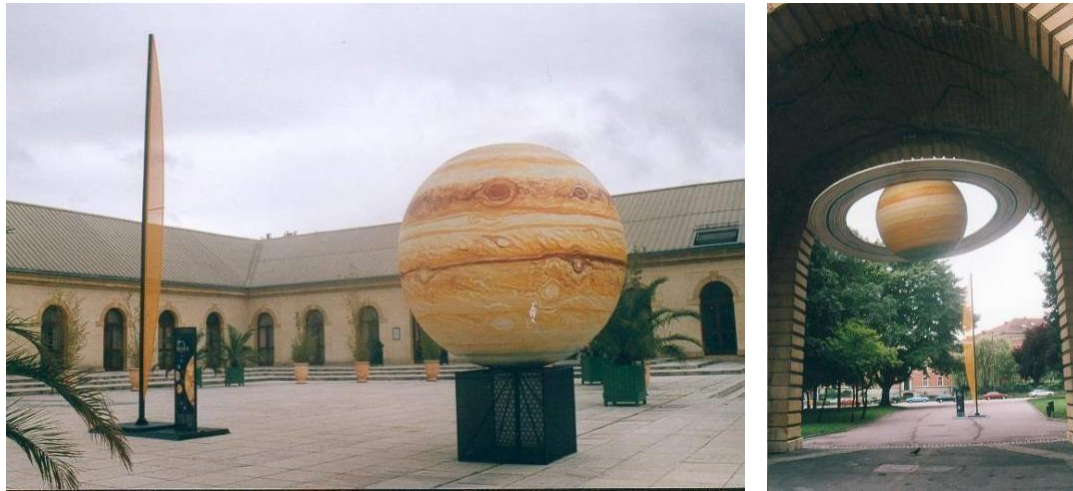


Fig. 6a et 6b: photos de la ville de Metz

Dans la ville de Metz (France), il y a un système solaire implanté dans ses rues et squares (carrés) et chaque planète est accompagnée d'un panneau de renseignements.

### Modèle d'année-lumière

En astronomie, on utilise l'année lumière comme une unité de mesure de distance, qui peut souvent être confondue à une mesure de temps. Ce concept peut être illustré en utilisant un modèle du Système Solaire. La vitesse de la lumière est  $c = 300\,000\text{ km/s}$ , la distance parcourue par la lumière pendant une seconde est de 300 000 km. Par exemple, un voyage de la Lune à la Terre, qui sont séparées d'une distance de 384 000 km, avec la vitesse de la lumière, ( $384\,000\text{ km}/300\,000\text{ km/s} = 1.3\text{ secondes}$ ), dure 1.3 secondes

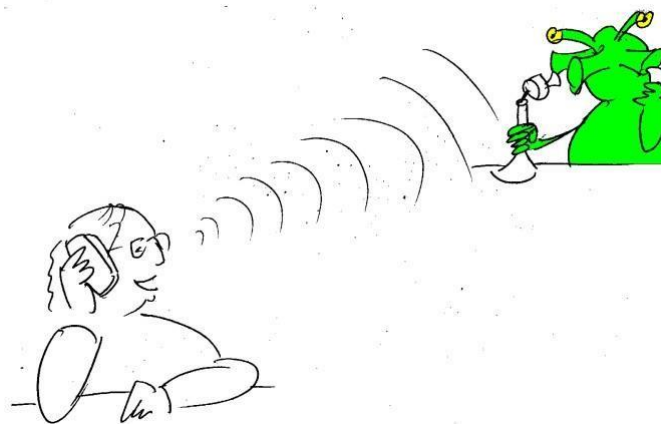


Fig. 7: autre exemple

En utilisant ces unités, nous chargerons les étudiants de calculer le temps nécessaire pour que la lumière du soleil parvienne à chacune des planètes du Système Solaire. (Pour l'instructeur, voici les temps nécessaires : le temps nécessaire pour que la lumière du soleil atteigne

Mercure est de 3.3 minutes, Vénus est de 6.0 minutes, la Terre est de 8.3 minutes, Mars est de 12.7 minutes, Jupiter est de 43.2 minutes, Saturne est de 1.32 heures, Uranus est de 2.66 heures et Neptune est de 4.16 heures. Vous pouvez demander aux étudiants d'imaginer à quoi une conférence vidéo entre le Soleil et n'importe quelle planète ressemblerait.

On introduit ici aussi la distance de la plus proche étoile parce qu'il est très important de visualiser les grandes distances avec d'autres étoiles, qui constituent la raison pour laquelle il est si difficile de détecter des planètes extrasolaires. La plus proche étoile est Alpha Centaure qui est à une distance de 4.37 année lumière ou  $4.13 \cdot 10^{13}$  km. Vous pouvez demander aux étudiants de calculer la distance à cette étoile dans n'importe quel modèle du système planétaire qui a été précédemment mentionnée. Dans "le modèle de la cour scolaire", avec une échelle 1 cm pour 56000 km, l'étoile serait à une distance de 7375 km!

### Modelo de tamaños aparentes del disco solar desde cada planeta

À partir de la Terre, le Soleil sous-tend un angle  $\alpha$  (figure 8). Pour une valeur très petite de  $\alpha$ , on a  $\tan \alpha \approx \alpha$  avec  $\alpha$  en radians.

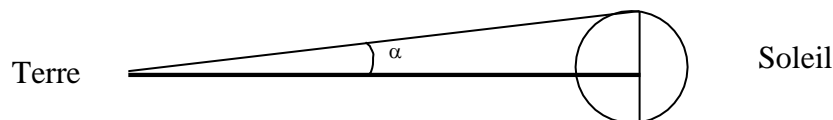


Fig. 8: vue de la Terre, le Soleil sous-tend un angle  $\alpha$

Connaissant le diamètre du Soleil ( $1.4 \cdot 10^6$  km) et la distance séparant le Soleil et la Terre, on en déduit  $\alpha$  en radians:

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{0,7 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6} = 0,0045 \text{ radians}$$

En degrés:

$$\frac{0,0045 \cdot 180}{\pi} = 0,255^\circ$$

Vu de la terre, le soleil a un diamètre de demi-degré ( $2 \times 0.255 \approx 0.51^\circ$ ), c'est le diamètre apparent du Soleil. En répétant le même calcul pour les autres planètes, on obtient les diamètres apparents du Soleil vus de chaque planète et qui sont représentés dans le figure 9

Planètes	$\tan \alpha$	$\alpha$ (°)	$\alpha$ (°) aprox.
Mercure	0,024	1,383	1,4
Venus	0,0129	0,743	0,7
Mars	0,006	0,352	0,4
Júpiter	0,0018	0,1031	0,1
Saturne	0,000979	0,057	0,06
Uranus	0,00048	0,02786	0,03
Neptune	0,0003	0,0178	0,02

Tableau 2: la taille apparente du disque solaire à partir de chaque planète



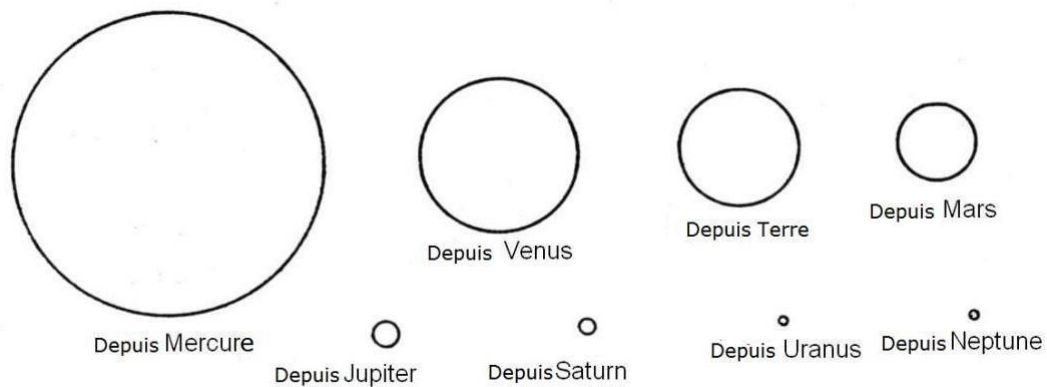


Fig. 9: le Soleil vu à partir des planètes suivantes: Mercure, Venus, Terre, Mars, Jupiter Saturne, Uranus et Neptune

### Modèle de densité

L'objectif de ce modèle est de trouver des échantillons de matière qui ont une densité semblable à celle de chacun des corps du système solaire, pour pouvoir "le sentir dans nos mains."

	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
Soleil	1.41
Mercure	5.41
Venus	5.25
Terre	5.52
Lune	3.33
Mars	3.9
Jupiter	1.33
Saturne	0.71
Uranus	1.3
Neptune	1.7

Tableau 3: densité des corps du système solaire



Fig. 10: Modèle de densité



Minéraux	Densité	Autres matières	Densité
Plâtre	2.3	Glycérine	1.3
Feldspath	2.6	Liège	0.24
Sulfure	1.1-2.2	Aluminium	2.7
Sel	2	Fer	7.86
Quartz	2.65	Ciment	2.7 – 3.1
Borax	1.7	Verre	2.4 – 2.8
Blende	4	Étain	7.3
Pyrite	5.2	Argile	1.8 – 2.5
Erythrocytes	5.4	Bakélite	1.25
Calcite	2.7	Chêne	0.90
Galène	7.5	Pin	0.55

Tableau 4: Exemples des densités de quelques matières

Avec les tableaux 3 et 4, on peut comparer les densités planétaires avec celles des divers minéraux ou avec celles des échantillons d'autres matières qui sont faciles à trouver tels : le verre, la céramique, le bois, des plastiques, etc.

Il est très facile de calculer la densité d'un objet ne figurant pas dans le tableau 4. Prenez simplement une partie de cet objet, pesez-la pour trouver sa masse  $m$  et la mettre dans un verre d'eau pour mesurer son volume,  $V$ . La densité  $d$  sera :

$$d = \frac{m}{V}$$

Les étudiants devraient remarquer que Saturne "flotterait" sur l'eau, parce que sa densité est inférieure à celle de l'eau qui est égale à 1.

### Modèle d'aplatissement des planètes

Pour visualiser l'aplatissement des planètes gazeuses qui est dû à la force centrifuge produite par leur rotation, nous construirons un modèle simple.



Fig. 11: Modèle de simulation de l'aplatissement des planètes

Comme indiqué sur la figure 11, avec un bâton et quelques bandes cartonnées, nous pouvons construire ce modèle simple qui reproduit l'aplatissement des planètes du Système Solaires en le faisant tourner.

- 1- Coupez des bandelettes en carton de longueur 35 cm et de largeur 1 cm.
- 2- Attachez ces bandelettes à un bâton cylindrique de longueur 50 cm. Attachez bien les parties supérieures au bâton pour qu'elles ne puissent pas se déplacer, mais laissez les parties inférieures se déplacer librement le long du bâton.
- 3- Faire tourner rapidement le bâton avec les deux mains, dans une direction et ensuite dans l'autre. Vous verrez comment la force centrifuge déforme les bandes cartonnées (figure 11) de la même façon qu'elle agit sur les planètes.

### Modèle de périodes orbitales planétaires

Les planètes orbitent autour du Soleil avec des vitesses et des périodes orbitales différentes (tableau 5). Connaissant la période et la distance moyenne de la planète au Soleil, on peut déterminer sa vitesse orbitale moyenne. Voir exemple de la Terre, mais vous pouvez répéter le même raisonnement pour une autre planète.

La Terre parcourt autour du Soleil une orbite de longueur  $L = 2 \pi R$ , comme  $v = L / T = 2 \pi R / T$  et connaissant la période de sa révolution 365 jours donc  $v = 20582.750 \text{ km/j}$  ou  $v = 107.740 \text{ km/h}$  ou  $v = 29.9 \text{ km/s}$ . La distance Terre Soleil est de  $R = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ . Nous soulignons que le Soleil tourne aussi autour du centre galactique avec une vitesse de  $220 \text{ km/s}$ , ou  $800,000(800\,000) \text{ km/h}$ .

Planètes	Période orbitale (jours)	Distance au Soleil (km)	Vitesse orbitale (km/s)	Vitesse orbitale (km/h)
Mercure	87.97	57.9 $10^6$	47.90	172440
Venus	224.70	108.3 $10^6$	35.02	126072
Terre	365.26	149.7 $10^6$	29.78	107208
Mars	686.97	228.1 $10^6$	24.08	86688
Jupiter	4331.57	778.7 $10^6$	13.07	47052
Saturne	10759.22	1 430.1 $10^6$	9.69	34884
Uranus	30.799.10	2 876.5 $10^6$	6.81	24876
Neptune	60190.00	4 506.6 $10^6$	5.43	19558

Tableau 5: les mesures orbitales des planètes du système solaire

La planète la plus rapide et la plus proche du Soleil est Mercure, et la planète la plus lente et la plus éloignée du Soleil est Neptune. Les Romains avaient déjà remarqué que Mercure était la plus rapide de toutes et donc elle a été identifiée comme la messagère des dieux et a été représentée par des pieds ailés.

Une période orbitale ou une année sur Mercure dure seulement 88 jours. Même à l'œil nu, vous pouvez observer que Jupiter et Saturne se déplacent beaucoup plus lentement, à travers les constellations du zodiaque, que Vénus et Mars.

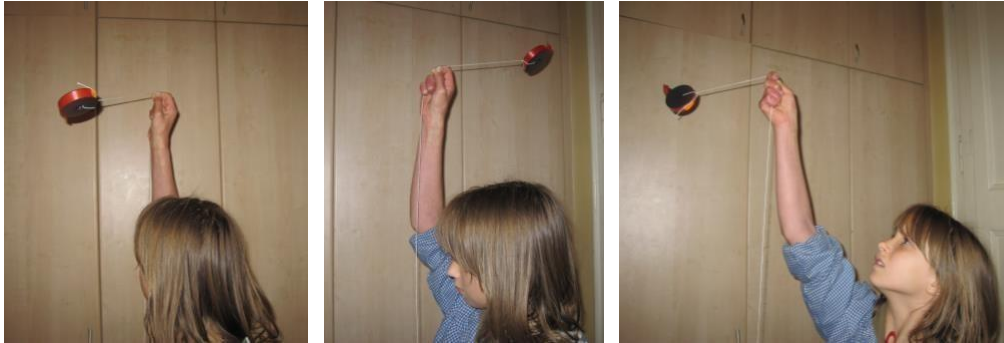


Fig. 12a, 12b et 12c: la simulation du mouvement circulaire des planètes

Il y a aussi une autre façon simple pour éprouver la relation entre la distance et la période orbitale.

Nous commençons en liant un lourd objet, comme une noix, à une corde. En tenant le bout de la corde et on tourne en mouvement circulaire au-dessus de nos têtes. Nous pouvons alors voir que si la corde était longue, l'objet prend plus de temps pour faire une orbite complète. Au contraire, si nous prenons une corde plus courte, il prend moins de temps.

Nous pouvons alors développer un modèle de système solaire avec des noix et des cordes dont les longueurs sont proportionnelles aux rayons des orbites planétaires (supposées circulaires). Cependant, au lieu de couper des morceaux séparés pour chaque planète, prenez une corde d'une longueur d'environ 20 cm. Ensuite, mesurez la distance correcte du lourd objet et faites un nœud à ce point. Alors, la corde peut être tenue à l'emplacement du nœud en faisant tourner le lourd objet.

Application : tenez une des cordes à l'emplacement du nœud et la faites tourner au-dessus de vos têtes avec une vitesse minimale de façon à la garder en orbite. Vous verrez que l'objet a besoin de moins de temps pour faire une révolution complète quand le rayon est plus petit.

### Modèle de la gravité superficielle

La formule de la force de gravitation  $F = G \frac{Mm}{d^2}$ , nous permet de calculer la gravité

superficielle  $g$  qui agit sur la surface d'une planète de masse  $M$ . Considérant une masse  $m = 1\text{ kg}$  sur la surface de la planète et  $d = R$ , avec  $R$  le rayon de la planète, nous obtenons la

gravité superficielle  $g = \frac{GM}{R^2}$ , où  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  est la constante universel de

gravitation. Si on remplace la masse de planète par  $M = 4/3 \pi R^3 \rho$ , où  $\rho$  est la densité de la planète et  $R$  son rayon, nous trouvons :

$$g = 4/3 \pi G \rho R$$

En remplaçant ces deux dernières variables  $\rho$  et  $R$  par les valeurs inscrites dans le tableau 6 (en convertissant le rayon en mètre et la densité en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , avec  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3 = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ),

nous pouvons calculer la valeur de la gravité superficielle  $g$  pour toutes les planètes.

Planète	R équatorial (km)	$\rho$ densité (g/cm <sup>3</sup> )	$g$ gravité superficielle (m·s <sup>-2</sup> )
Lune	1738	3.3	1.62
Mercure	2439	5.4	3.70
Venus	6052	5.3	8.87
Terre	6378	5.5	9.81
Mars	3397	3.9	3.71
Jupiter	71492	1.3	24.8
Saturne	60268	0.7	8.96
Uranus	25559	1.2	8.69
Neptune	25269	1.7	11.00

Tableau 6: rayon, densité et la gravité de chaque planète du système solaire

Un exemple:

$$g_{\text{mercure}} = 4/3 \pi G \cdot 2439 \times 10^3 = 5400 \text{ kg/m}^3 = 3.7 \text{ m/s}^2,$$

$$g_{\text{venus}} = 4/3 \pi G \cdot 6052 \times 10^3 = 5300 \text{ kg/m}^3 = 8.9 \text{ m/s}^2.$$

De même nous pouvons calculer  $g$  pour le reste des planètes. Dans le tableau 7, la gravité de chaque planète est calculée par rapport à celle de la Terre et indiquée par la lettre  $g$ .

### Modèle de pèse-personne

Le but de ce modèle est de développer un ensemble de 9 pèse-personnes (8 planètes et la Lune) qui permettent aux étudiants de se peser sur chacune des planètes et sur la Lune.

Puisque le processus est le même pour chaque planète, nous décrivons seulement un d'entre eux. L'idée, essentiellement, est d'ouvrir un pèse-personne et remplacer le disque de poids avec un autre calibré pour une planète particulière.

1. D'abord, nous ouvrons le pèse-personne. Dans la plupart des balances, il y a deux ressorts qui sécurisent la base. Rappelez-vous que nous devons le remettre quand nous refermerons le pèse-personne (figures 13a et 13b).
2. Une fois ouvert, le disque de poids devrait être enlevé et remplacé, ou dessiné avec les poids planétaires appropriés.
3. Dans le tableau suivant, nous avons la gravité superficielle de la Lune et des planètes du Système Solaire et leur gravité relative à la Terre. Ces valeurs sont celles que nous utiliserons pour convertir les unités de poids "terrestre" aux unités proportionnelles de poids sur d'autres planètes.
4. Finalement, nous refermons le pèse-personne et nous pouvons maintenant nous peser sur une des planètes.

	$g$ gravités superficielles ( $m \cdot s^{-2}$ )	$g$ gravités superficielles (relative à la Terre)
Lune	1,62	0,16
Mercure	3,70	0,37
Venus	8,87	0,86
Terre	9,80	1,00
Mars	3,71	0,38
Jupiter	23,12	2,36
Saturne	8,96	0,91
Urane	8,69	0,88
Neptune	11,00	1,12

Tableau 7: la gravité absolue et relative des planètes du système solaire

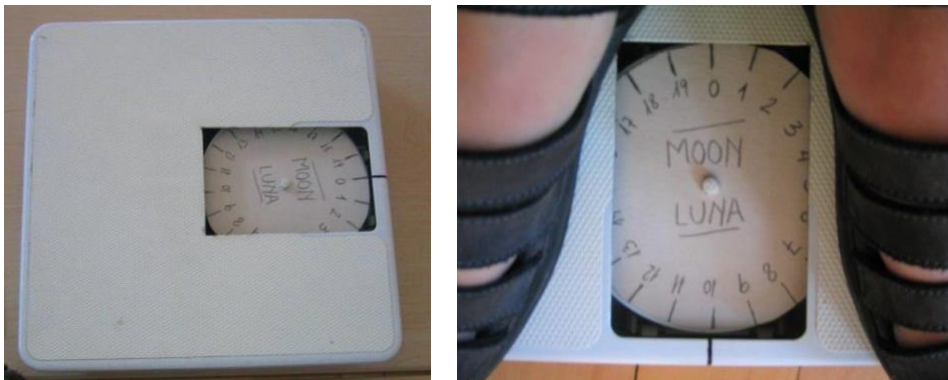


Fig. 13a et 14b: pèse-personne avec disque remplacé



Fig. 14: modèle de pèse-personne dans le système solaire

### Modèle de cratères

La plupart des cratères dans le système solaire ne sont pas volcaniques, mais sont le résultat de bombardement des météorites sur les surfaces de planètes et des satellites.

1. D'abord, couvrez le sol par des journaux, pour qu'il ne se salisse pas.

2. Mettre une couche de 2 à 3 cm de farine dans un plateau à l'aide d'un tamis pour que la surface soit très lisse.
3. Mettre une couche de quelques millimètres de cacao en poudre au-dessus de la farine à l'aide d'une passoire ou tamis (figure 15a).
4. D'une hauteur d'environ 2 mètres, laissez tomber un projectile : une cuillère de service de cacao en poudre. La chute laisse des marques semblables à celles des cratères d'impact (figure 15b).
5. Vous pouvez refaire l'expérience en variant la hauteur, le type, la forme, la masse des projectiles. Dans certains cas, vous pouvez même obtenir un cratère avec un sommet central.



Fig. 15 a: simulation des cratères



Fig. 15 b: les cratères

### Modèle de la vitesse de libération

Si la vitesse de lancement d'une fusée n'est pas assez grande, la force de gravitation de la planète l'oblige à retomber sur la surface. Si la vitesse de lancement est assez grande, la fusée s'échappe du champ de gravitation de la planète. Calculons la vitesse à laquelle une fusée peut s'échapper, c'est-à-dire la vitesse minimale de lancement ou la vitesse de libération.

Pour un mouvement uniformément accéléré :

$$e = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t$$

$$v = at + v_0$$

Avec **a** l'accélération et **e** la distance parcourue.

Si nous remplaçons l'accélération par **g** et nous considérons que la vitesse initiale  $v_0$  est nulle, nous constatons que sur la surface de la planète,  $R = \frac{1}{2} g t^2$  et  $v = gt$ .

Après élimination de la variable de temps, nous trouvons :

$$v = \sqrt{2gR},$$

Nous remplaçons les valeurs **g** et **R** par les valeurs indiquées dans le tableau 6 et ce pour calculer la vitesse de libération de chaque planète. À titre d'exemple, nous calculons les vitesses de libération de quelques planètes.



Pour la Terre :

$$v_{\text{terre}} = (2 \cdot 9.81 \text{ m s}^{-2} \cdot 6378 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 11186 \text{ m/s} \sim 11.2 \text{ km/s.}$$

De même, pour la plus petite planète, Mercure :

$$v_{\text{mercure}} = (2 \cdot 3.78 \text{ m s}^{-2} \cdot 2439 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 4294 \text{ m/s} \sim 4.3 \text{ km/s.}$$

Et pour la plus grande planète, Jupiter :

$$v_{\text{jupiter}} = (2 \cdot 23.1 \text{ m s}^{-2} \cdot 71492 \times 10^3 \text{ m})^{1/2} = 57471 \text{ m/s} \sim 57 \text{ km/s.}$$

Il est clair qu'il est plus facile de lancer une fusée de Mercure que de la Terre, mais il est le plus difficile de lancer une fusée sur Jupiter, où la vitesse de libération est environ 60 km/s.

Les vitesses de libération des différentes planètes du Système solaire sont les suivantes: Mercure 4.3 km/s, Vénus 10.3 km/s, Terre 11.2 km/s, Mars 5.0 km/s, Jupiter 59.5 km/s, Saturne 35.6 km/s, Uranus 21.2 km/s, Neptune 23.6 km/s.

### Modèle d'une fusée avec un comprimé effervescent

On construit une fusée qui peut être lancée sans risque dans la salle de classe. Pour cela on propose une fusée qui utilise une aspirine ou un comprimé effervescent comme propulseur. Nous commençons par découper le modèle de fusée selon les lignes continues ensuite nous collons les lignes pointillées comme dans la photo.

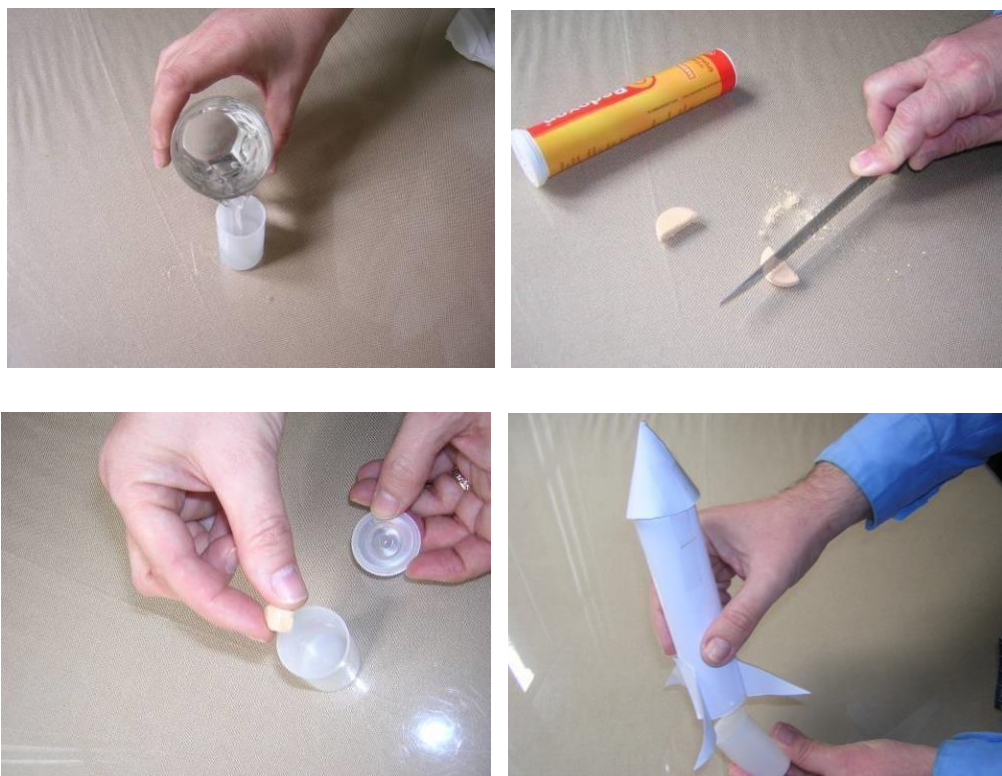


Fig. 16a, 16b, 16c et 16d: le processus en 4 photos



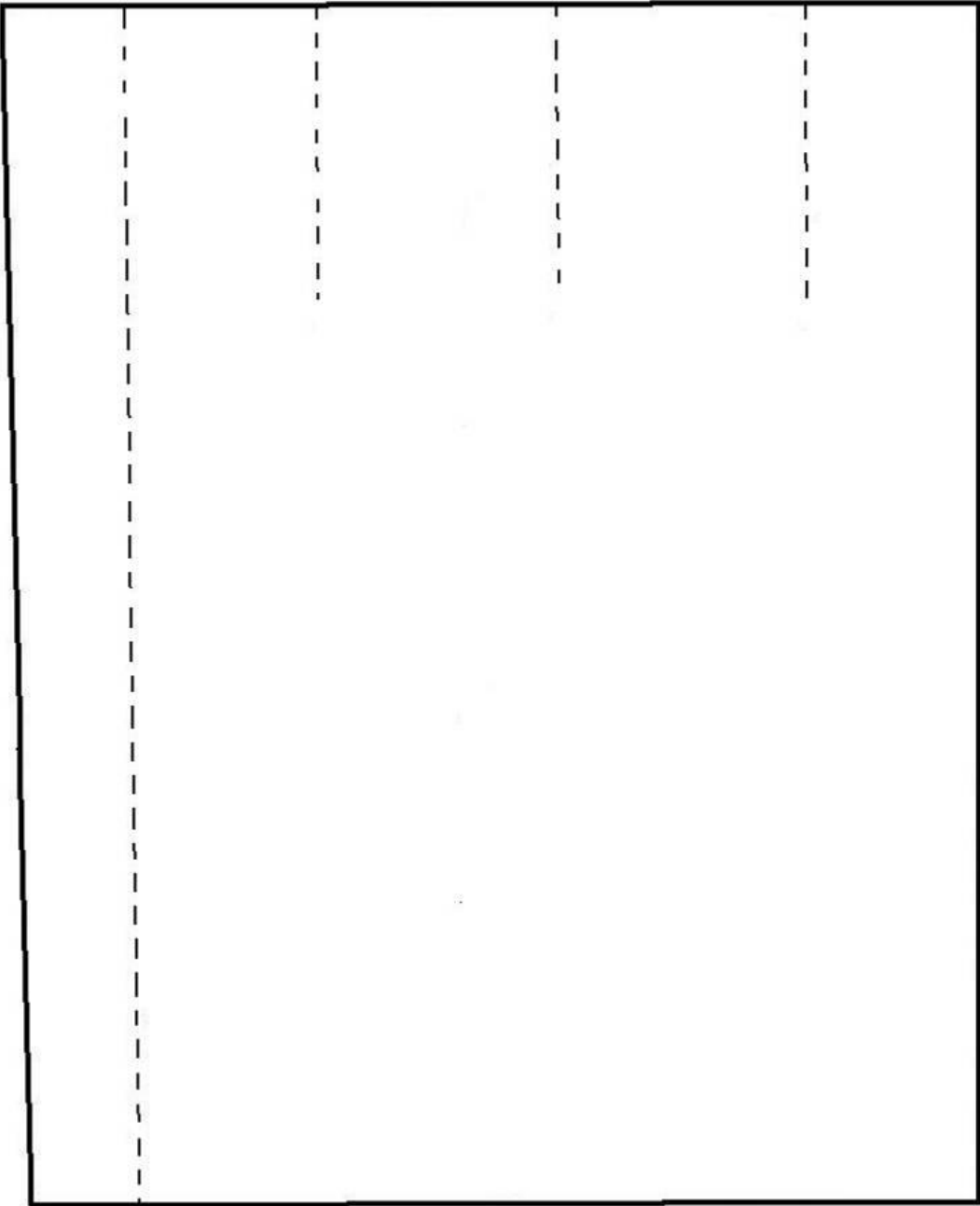


Fig. 19a: Cuerpo del cohete. Hay que pegar las aletas en la zona punteada.



Fig. 17: Varios cohetes.

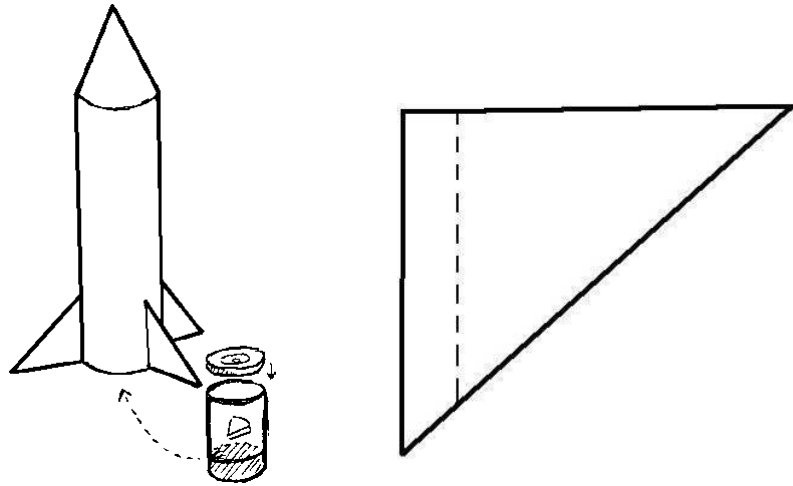


Fig. 18: Esquema simplificado Fig. 19b: Modelo para las tres aletas

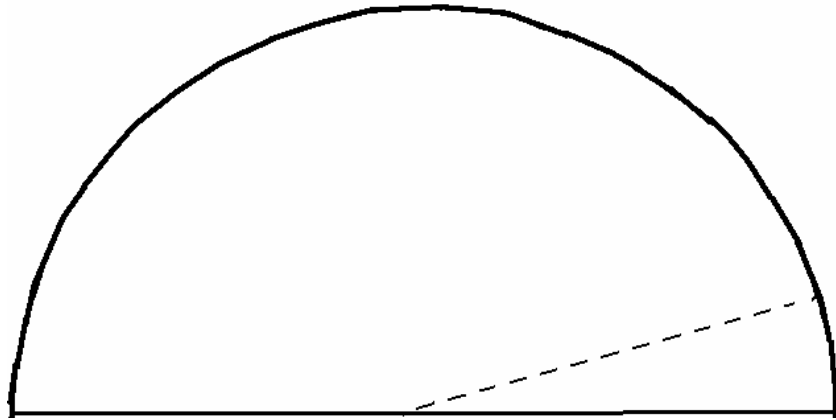


Fig.19c: Parte conoidal en la zona superior del cohete

Nous utiliserons une capsule en plastique, comme celle utilisée pour stocker des pilules ou la nourriture des poissons, en s'assurant que la capsule peut aller à l'intérieur du cylindre de la fusée. Ensuite, nous mettons les trois triangles comme des supports pour la fusée. Et finalement, nous ajoutons le cône sur le sommet du cylindre (figures 16a, 16b, 16c, 16d, 17, 18, 19a, 19b, 19c).

Après la construction de la fusée, nous devons effectuer le lancement. Pour ceci, nous mettrons de l'eau dans la capsule en plastique, jusqu'à 1/3 de sa hauteur (environ 1 cm). Ajoutez 1/4 d'un comprimé d'aspirine effervescent (ou d'autres comprimés effervescents). Mettez la fusée au-dessus de la capsule. Après environ 1 minute, la fusée décolle.

Évidemment nous pouvons répéter plusieurs fois l'expérience (il reste 3/4 de comprimé d'aspirine, amusez-vous en lançant des fusées!). C'est aussi possible d'utiliser du bicarbonate et du vinaigre

## Les modèles des systèmes des exoplanètes

La distance à Alpha Centaure, l'étoile la plus proche, est énorme comparée à la distance des planètes dans notre Système Solaire. En fait, Alpha Centaure est environ 10000 fois plus loin que Neptune, notre planète la plus éloignée. Ces grandes distances rendaient impossible la détection des exoplanètes jusqu'à ce que des techniques d'observation sophistiquées aient été développées, vers la fin du dernier siècle.

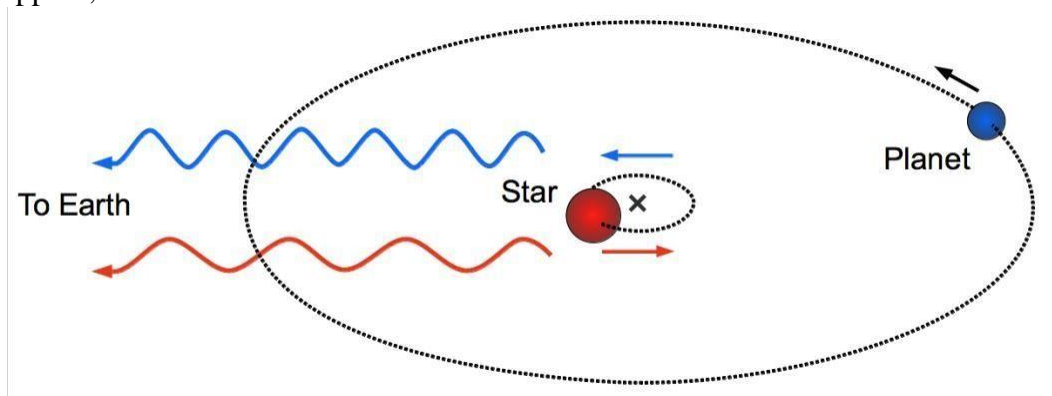


Fig. 20a: la méthode de la vitesse radiale

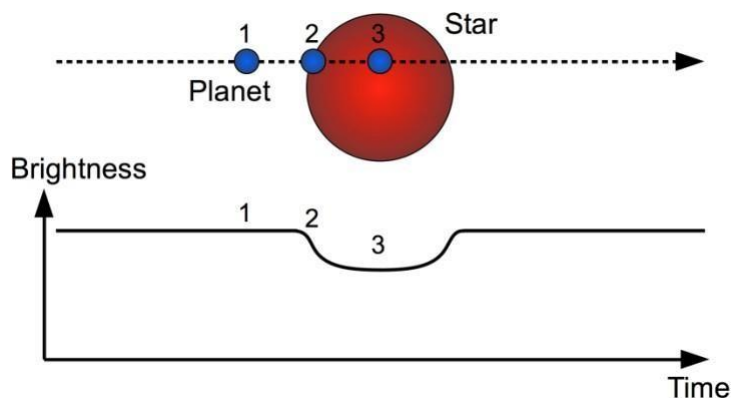


Fig. 20b: la méthode de transit

Actuellement, deux méthodes sont dominantes dans la découverte d'exoplanètes. Toutes les deux sont des méthodes indirectes car la détection du système planétaire est déduite de l'observation de l'étoile centrale du système.

La méthode de la Vitesse Radiale (RV) a été la première méthode qui a permis de découvrir une exoplanète autour d'une étoile normale, avec la découverte de 51 Pégase b en 1995. Avec cette méthode, l'oscillation de l'étoile centrale en raison de son mouvement autour du barycentre de planète d'étoile est mesurée. Ce mouvement de l'étoile centrale induit à des changements de la lumière de l'étoile soit un déplacement vers le rouge ou soit vers le bleu

(l'image 20a), en raison de l'effet doppler. Avec cette méthode, nous pouvons déterminer la masse de la planète relativement à celle de l'étoile centrale.

Cependant, en pratique, nous ne connaissons pas l'orientation de la plupart des systèmes planétaires détectés avec la méthode RV et les masses des planètes calculées pourraient être plus petites que les masses réelles. L'autre méthode importante, appelée ' la méthode de Transit ' est basée sur l'observation de la variation de la luminosité de l'étoile quand une de ses planètes passe devant elle, ainsi occultant une petite partie de son disque stellaire (l'image 20b). Avec la méthode de transit, la taille d'une planète  $R_p$ , relativement à la taille de son étoile centrale  $R_*$ , peut être mesurée approximativement à partir de :

$$R_p / R_* = \sqrt{dF / F},$$

Avec  $dF/F$  la variation du flux de la lumière durant le transit de la planète ( $dF/F = 0.01$  si la lumière de l'étoile diminue de 1%)

La NASA ([http:// exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)) a réalisé un catalogue d'objets planétaires découverts à l'extérieur de notre propre Système Solaire. En 2016, il y avait plus que 3000 planètes confirmées. Ces planètes sont appelées des exoplanètes (abrégé des planètes extrasolaires). La nomenclature d'exoplanètes est simple. Une lettre est placée après le nom de l'étoile, on commence par la lettre "b" pour la nomenclature de la première planète trouvée dans le système (par exemple 51 Pegasi b). On marque les planètes suivantes détectées dans le système par les lettres suivantes de l'alphabet comme, c, d, e, f, etc (51 Pegasi c, d 51 Pegasi 51, Pegasi 51, Pegasi e ou f).

La plupart des planètes connues ont des masses comparables avec celle de Jupiter, qui est la plus grande planète dans notre Système Solaire. C'est pourquoi nous indiquons souvent les masses et les tailles des planètes extrasolaires par les unités de Masses de Jupiter  $M_{Jup}$  ( $1,90 \times 10^{27}$  kg) et des Rayons de Jupiter  $R_{Jup}$  (71492 km). Il y a peu de planètes (environ 20) qui ont des masses comparables à celle de la Terre. Il y a cependant plusieurs planètes (environ 600, ou 20 % de toutes celles connues) qui ont des tailles comparables à celle de la Terre, jusqu'à un rayon supérieur à 1.5  $R_T$  (Rayon de La Terre). On envisage que ces planètes soient les plus nombreuses, mais les techniques actuelles de détection permettent principalement la détection d'objets plus massifs ou plus grands

Dans cette section, nous considérons quelques exemples de systèmes planétaires extrasolaires qui ont plus de trois planètes connues. Tableau 8 donne les planètes qui tournent autour des étoiles: Ups Andromeda, Gliese 581 et Kepler-62. On a découvert le système de planète d'Ups Andromeda et Gliese 581 avec la méthode de vitesse radiale et à partir des masses des planètes nous pouvons connaître les masses minimales des planètes, mais pas leurs tailles. Pour Gliese 581, la planète 'd' a été supprimée car sa découverte a été rétractée, cette erreur a été probablement causée par un faux signal parasitant les données.

On a découvert les planètes du système Kepler-62 par la méthode de transits. De ce fait, on connaît leurs tailles. En ce qui concerne les masses, nous connaissons que seulement la masse maximale de l'étoile hôte. Ces planètes sont trop petites pour être détectables avec la méthode

de la vitesse radiale. Il y a cependant beaucoup de planètes qui ont été détectées par les deux méthodes et nous connaissons leurs masses ainsi que leurs tailles.

Nom de la planète	Distance orbitale en UA	Période orbitale en jours	*La masse en masse Jupiter	L'année de la découverte	Rayon
Ups And b	0,059	4,617	0,69	1996	0.9 R <sub>Jup</sub> , 62 000km*
Ups And c	0,83	241,52	1,98	1999	1.2 R <sub>Jup</sub> , 88 000km*
UpsAnd d	2,51	1274,6	3,95	1999	1.5 R <sub>Jup</sub> , 110 000 km*
Gl 581 e	0,03	3,149	0,006	2009	1,2 R <sub>E</sub> , 8 000 km*
Gl 581 b	0,04	5,368	0,049	2005	2,5 R <sub>E</sub> , 16 000 km*
Gl 581 c	0,07	12,929	0,016	2007	1,7 R <sub>E</sub> , 11 000 km*
Kepler-62 b	0,0553	5,714932	<0,03	2013	1,3 R <sub>E</sub> , 8400km
Kepler-62 c	0,0929	12,4417	<0,013	2013	0,5 R <sub>E</sub> , 3400 km
Kepler-62 d	0,12	18,16406	<0,044	2013	1,9 R <sub>E</sub> , 12000 km
Kepler-62 e	0,427	122,3874	<0,113	2013	1,6 R <sub>E</sub> , 10000 km
Kepler-62 f	0,718	267,291	<0,11	2013	1,4 R <sub>E</sub> , 9000 km

Tableau 8 : planètes des trois systèmes extrasolaires. Données des Planètes Extrasolaires du Catalog2 (sauf la dernière colonne). \* Ces planètes supposées gazeuses ne transitent pas et leur diamètre a été calculé en supposant que la densité de la planète est égale à celle de Jupiter (1330 kg / m<sup>3</sup>). Pour les planètes considérées comme terrestres, le diamètre a été calculé en utilisant la densité de la Terre (5520 kg / m<sup>3</sup>).

Beaucoup d'exoplanètes sont très proches de l'étoile centrale, comme indiqué dans le tableau, avec des orbites beaucoup plus proches que celle de Mercure. D'autres ont des planètes plus éloignées (HD 8799 a un système de trois planètes qui sont aussi éloignées que la distance Neptune et le Soleil). Une méthode pour assimiler ces données est de construire les modèles réduits du système planétaire choisi. Ceci nous permet de facilement les comparer l'un par rapport à l'autre et avec notre Système Solaire.

Nom de la planète	Distance orbitale en UA	Période orbitale en jours	La masse en masse Jupiter	Rayon, km
Mercury	0.3871	0.2409	0.0002	2439
Venus	0.7233	0.6152	0.0026	6052
Earth	1.0000	1.0000	0.0032	6378
Mars	1.5237	1.8809	0.0003	3397
Jupiter	5.2026	11.8631	1	71492
Saturn	9.5549	29.4714	0.2994	60268
Uranus	19.2185	84.04	0.0456	25559
Neptune	30.1104	164.80	0.0541	25269

Tableau 9: planètes du système solaire

Aujourd'hui, nous savons qu'il y a des exoplanètes autour des différents types d'étoiles. En 1992, les radioastronomes ont annoncé la découverte des planètes autour du pulsar PSR 1257 +12. La première détection d'une exoplanète autour d'une étoile de type solaire 'normale', 51 Pegasi, a été annoncée en 1995 et depuis d'autres exoplanètes ont été détectées en orbite autour de : l'étoile naine rouge (Gliese 876 en 1998), l'étoile géante (Iota Draconis en 2001),

l'étoile naine brune (2M1207 en 2004), l'étoile de type «A » (Fomalhaut en 2008). Une planète parmi d'autres se désintègre autour d'une étoile naine blanche (WD1145-1017).

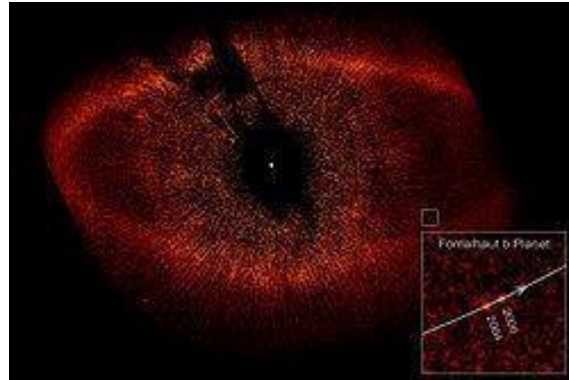


Fig. 21: Planète Fomalhaut b située dans un disque de débris, dans une image de Fomalhaut prise par le Télescope de Hubble (Photo: NASA).

## La détermination du diamètre des exoplanètes

Il y a des planètes qui ont été détectées autour d'Ups And par la méthode de vitesses radiales, et dont on ne savait pas la taille. Ici nous allons estimer les diamètres d'un couple d'exoplanètes du tableau 8.

En connaissant la densité des exoplanètes, on peut déterminer leur diamètre. Pour nos calculs, nous considérons que les planètes gazeuses ont la densité de Jupiter et que les exoplanètes terrestres ont la même densité que la planète Terre. Par définition, on donne la densité d'un objet de masse  $m$  :  $\rho = m/V$ . La masse  $m$  de l'exoplanète apparaît dans le tableau 8 et le volume  $V$  peut être obtenu en considérant que la planète est une sphère donc  $V = 4 \pi R^3/3$  si nous remplaçons cette formule dans la précédente, nous obtenons le rayon de l'exoplanète :

$$R = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}$$

Nous suggérons de calculer le diamètre de Gliese 581c (l'exoplanète terrestre) sa densité est  $\rho = 5520 \text{ kg/m}^3$  celle de la Terre. Répétez alors le calcul pour une exoplanète non-terrestre comme le premier système planétaire multiple que l'on a découvert autour d'une étoile de la séquence principale, Upsilon Andromède. Ce système est composé de trois planètes semblables au Jupiter : Upsilon planètes b, c et d. Calculez leurs diamètres en prenant  $\rho = 1330 \text{ kg/m}^3$  (la densité de Jupiter) et comparer les résultats avec ceux du tableau 8.

En utilisant ces résultats et la distance orbitale prise du tableau 8, nous pouvons produire un modèle dans la section suivante.

## Détermination de la masse de l'étoile centrale

En utilisant les valeurs du tableau 8 et la troisième loi de Kepler, nous pouvons déterminer la masse de l'étoile centrale  $M$ . La troisième loi de Kepler nous dit que pour une planète ayant

une période  $P$  et une orbite de rayon  $a$ , on a le rapport  $a^3/P^2$  égale à une constante. Nous pouvons montrer que cette constante est égale à la masse de l'étoile centrale, exprimée en masse solaire. Si nous considérons que le mouvement d'exoplanètes autour de l'étoile est circulaire et décrit un cercle de rayon  $a$ , nous pouvons écrire

$$m \cdot \frac{v^2}{a} = \frac{G \cdot M \cdot m}{a^2}$$

Pour un mouvement circulaire, la vitesse  $v$  est  $v = 2\pi a/P$ . La période,  $P$ , d'un mouvement circulaire, est  $P = 2\pi a/v$ . Alors, quand nous remplaçons par l'expression de  $v$  nous aurons:

$$P^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot a^3}{G \cdot M}$$

Et, pour chaque exoplanète, en utilisant la troisième loi de Kepler,

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G \cdot M}{4 \cdot \pi^2}$$

Écrivant la relation précédente pour le mouvement de la Terre autour du Soleil, en prenant  $P=1$  année et  $a=1$  AU, nous déduisons l'équation suivante

$$1 = \frac{G \cdot M_s}{4 \cdot \pi^2}$$

En divisant les deux dernières égalités et prenant la masse du soleil comme unité, nous obtenons

$$\frac{a^3}{P^2} = M$$

$a$  est le rayon de l'orbite (en UA),  $P$  est la période de révolution (en années) et  $M$  est la masse de l'étoile centrale (en Masse Solaire). Cette relation nous permet de déterminer la masse de l'étoile centrale en unité de masse solaire. Par exemple, calculez la masse des étoiles Ups And et Gl 581 en masse solaire (le résultat devrait être égal respectivement à 1.03 et 0.03 masses solaires).

### Modèle réduit d'un système exoplanétaire

D'abord, nous choisissons l'échelle du modèle. Pour les distances, l'échelle appropriée est : 1 UA correspond à 1 m. Dans ce cas, toutes les exoplanètes peuvent se contenir à l'intérieur d'une salle de classe typique, aussi bien que les cinq premières planètes de notre Système Solaire.

Si l'activité est portée à l'extérieur (par exemple dans la cour d'école), nous pouvons construire un modèle complet. Une échelle différente doit être utilisée pour les tailles des planètes, par exemple : 10,000 km correspond à 0.5 cm. Dans ce cas, la plus grande planète Jupiter sera 7 cm de diamètre et la taille de la plus petite planète Mercure sera 0.2 cm. Maintenant nous pouvons construire le Système Solaire, ou n'importe lequel des systèmes en utilisant les valeurs de la distance orbitale des Tableaux 8 et 9 et les diamètres précédemment calculés. Pour les étoiles centrales, nous pouvons calculer leurs tailles à partir de la relation masse-rayon stellaire, avec  $R$  et le  $M$  en unités solaires,

$$R \sim 1.06 M^{0.945}$$



Et en utilisant ainsi la masse calculée dans l'exercice précédent.

Depuis des années, nous avons appris que la configuration d'un système planétaire varie d'un système à un autre. La partie intérieure du Système Solaire est peuplée par les planètes petites et rocheuses. La première planète gazeuse et géante, Jupiter, se situe à une distance de 5.2UA du Soleil. Cependant, plusieurs exoplanètes orbitent autour de leur étoile à des distances beaucoup plus petites que le rayon de l'orbite de la plus proche planète de notre propre Système Solaire. Cela signifie qu'elles sont très chaudes. Une autre différence est que la plupart de ces exoplanètes sont des géantes planètes gazeuses.

Ces différences sont supposées résulter principalement d'un biais d'observation. La méthode de la vitesse radiale favorise la détection des planètes massives et relativement proches de leur étoile.

Alors que la méthode de transit est plus susceptible de détecter les planètes les plus proches de leur étoile centrale. Mais, nous pouvons supposer que la plupart des exoplanètes ont de grandes orbites. Il semble plausible que dans la plupart des systèmes exoplanétaires, il y a une ou deux planètes géantes avec des orbites semblables à celles de Jupiter et Saturne. Nous nous attendons, ainsi, qu'une grande fraction d'étoiles ait des planètes semblables à la Terre et sur des orbites semblables à celle de la Terre. Leur détection est cependant très difficile et pour cela, on en connaît très peu.

## Habitabilité des exoplanètes

La zone habitable est la région autour d'une étoile où une planète a une pression atmosphérique suffisante pour maintenir l'eau liquide sur sa surface. Ceci est une définition conservatrice et restreinte à la vie terrestre. Quelques scientifiques ont suggéré d'inclure des zones équivalentes autour des étoiles où d'autres solvants composés, comme l'ammoniac et le méthane pourraient exister en forme liquide stable.

Les calculs rapides indiquent que la zone habitable du système solaire, où l'eau liquide peut exister (c'est-à-dire où la température s'étend de 0 ° À 100 ° C), s'étend de 0.7 à ~2 UA. Le bord intérieur de cette zone est près de l'orbite de Vénus et le bord extérieur est près de l'orbite de Mars (la zone verte dans la figure 22). Cependant, il existe plusieurs autres estimations pour la zone habitable du Système Solaire (voir Wikipédia sur la Zone Habitable). Une récente estimation, donnée par Kopparapu en 2013, place le bord intérieur de cette zone à une distance de 0.99 UA, juste à l'intérieur de l'orbite de la Terre. Alors que dans cette zone, seulement la Terre est habitée, Vénus est trop chaude en raison de l'effet de serre, tandis que Mars n'a pas d'eau sur sa surface et Il pourrait avoir une certaine vie microbienne très basique. Connaissant l'énergie dégagée d'une étoile et la zone habitable de notre Système Solaire, nous pouvons facilement déterminer la zone habitable d'autres systèmes de planète. On donne une liste de planètes potentiellement habitables dans <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>.

On donne aussi un tableau des planètes qui sont ordonnées par un indice de ressemblance à la terre 'Earth similarity index =ESI'

L'exemple le plus intéressant d'un système de planètes potentiellement habitables est celui de Kepler-62, qui a été découvert par la mission spatiale Kepler par la méthode de transit en 2013. Ce système contient au moins 5 planètes, toutes ont des rayons entre 0.54 et 1.95 rayons de la Terre.

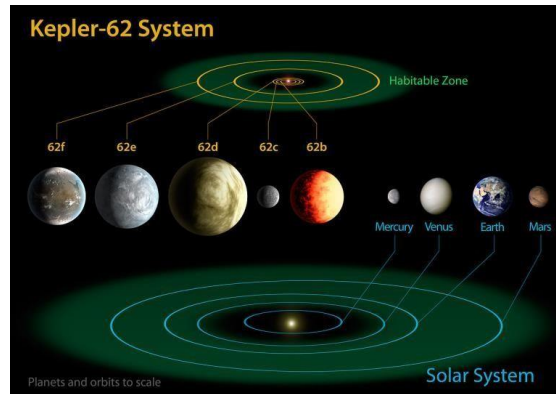


Fig.22: Comparaison entre le système Kepler-62 et le système solaire. La région verte indique la zone habitable  
Source NASA Ames/JPL-Caltech

De meilleurs exemples d'exoplanètes de types telluriques et se situant dans la zone habitable de leur étoile, sont les planètes Kepler 62 e et Kepler 62 f. Leurs rayons qui sont respectivement 1.61 et 1.41 rayon de la Terre, les classent dans la même catégorie que celle des planètes telluriques. D'autre part, leurs positions dans le système Kepler-62, dans la zone habitable, leur permet d'avoir de l'eau liquide sur leurs surfaces qui peut même les recouvrir complètement. Sur Kepler-62e, la planète qui se trouve à l'intérieur de la zone habitable, possède une couche de nuages réfléchissante ce qui réduit la radiation qui chauffe la surface. D'autre part, sur Kepler-62f, qui se situe à l'extérieur de la zone habitable, comme la planète Mars dans notre Système Solaire, des quantités significatives de dioxyde de carbone seraient nécessaires pour réchauffer suffisamment sa surface et pour y avoir de l'eau liquide. Considérant les tailles de Mars et Kepler-62f, on peut se demander laquelle de ces planètes va, le plus probablement, héberger la vie et pourquoi ?

Il y a toujours beaucoup de questions sans réponses sur les propriétés et les caractéristiques des exoplanètes. Plusieurs missions spatiales actuelles et futures, comme Kepler de la NASA, les missions européennes TESS et CHEOPS et les missions PLATON dont le lancement est envisagé pour 2024, sont prévues pour répondre à ces questions.

## Bibliographie

- Berthomieu, F., Ros, R.M., Viñuales, E., “*Satellites of Jupiter observed by Galileo and Roemer in the 17th century*”, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona, 2006.
- Gaitsch, R., “*Searching for Extrasolar Planets*”, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.
- Ros, R.M., “*A simple rocket model*”, Proceedings of 8th EAAE International Summer School, 249, 250, Barcelona, 2004.
- Ros, R.M., “*Measuring the Moon's Mountains*”, Proceedings of 7th EAAE International Summer School, 137, 156, Barcelona, 2003.
- Vilks I., “*Models of extra-solar planetary systems*”, Proceedings of 10th EAAE International Summer School, Barcelona 2006.

Traduction, Cité des Sciences à Tunis:

Najoua Bey, Sarra Snoussi, Naoufel Ben Maaouia, Riadh Ben Nessib, Hichem Ben Yahia  
Révision : Eric Merssier Université de Nantes