

Construction d'une maquette du système solaire

E. Di Folco & N. Robichon (Formation des Maîtres de l'Observatoire de Paris)

Objectif :

Représenter le système solaire avec une maquette et comprendre le lien entre la position apparente des planètes dans notre ciel et leur position réelle.

Niveau :

Ce TP est adapté à tout niveau (du cycle 3 du primaire jusqu'au lycée) à partir du moment où l'on maîtrise un tant soit peu les règles de proportionnalité. Les élèves de lycée pourront aborder des concepts aussi compliqués que les rétrogradations des planètes, les élongations maximales des planètes inférieures¹, le passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne...

Matériel :

Boules de toutes les tailles jusqu'à 30 cm de diamètre. Cartons, colle, ficelle, peinture...

Méthode :

Des documents sont distribués : des images montrant les tailles et orbites des planètes ainsi que leurs aspects. Un tableau donnant les principales caractéristiques de ces planètes (diamètres, demi-grands axes des orbites...) et positions des planètes par rapport aux constellations du Zodiaque à un instant donné. Les élèves sont invités à réfléchir avec ces documents sans qu'on leur impose d'idée préconçue sur la réalisation pratique de la maquette.

La problématique de départ – construire une maquette du système solaire – est volontairement floue. C'est en analysant les documents que les élèves, plus ou moins aiguillés selon le niveau, doivent se rendre compte qu'il est difficile d'utiliser une seule échelle pour les tailles et les distances, qu'une représentation linéaire des planètes ne peut rendre compte de la forme de leurs orbites, qu'il y a d'autres corps dans le système solaire (comètes, satellites...) implicitement oubliés dans les documents.

Discussion :

Tout d'abord, il faut définir un objectif pédagogique. On ne construit pas une maquette sans qu'elle soit utilisée pour illustrer une caractéristique, une propriété des objets du système solaire.

1 - On veut mettre en évidence les tailles relatives des planètes.

Les deux corps extrêmes sont Mercure et le Soleil. Le rapport de leur diamètre est $1\,392\,000\text{ km} / 4\,879\text{ km} = 285$. Donc, si l'on veut que Mercure soit reconnaissable, une boule de 5 mm de diamètre est un minimum, on arrive à un diamètre de $5 \times 285\text{ mm} = 1,46\text{ m}$ pour le Soleil, ce qui est trop grand. On est donc obligé de ne pas représenter le Soleil. Reprenons le calcul avec le deuxième corps le plus gros : Jupiter. Le rapport de leur diamètre est $142\,984\text{ km} / 4\,879\text{ km} = 29$. Cela conduit à un diamètre de Jupiter d'environ 15 cm pour un diamètre de Mercure de 5 mm, ce qui est raisonnable. On peut même prendre une échelle deux fois plus grande et on arrive aux diamètres suivants pour les planètes, arrondis à la taille de boule la plus proche (les erreurs sont inférieures à quelques pourcents).

Nom	Soleil	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Diamètre en cm	300	1	2,5	2,5	1,5	30	25	10	10

¹ Les planètes **inférieures** sont situées à l'intérieur de l'orbite terrestre (Vénus, Mercure) tandis que les planètes **intérieures** circulent à l'intérieur de l'orbite de Jupiter (ce sont les planètes telluriques du système solaire interne par opposition aux géantes gazeuses du système solaire externe).

L'échelle de la maquette est alors $E_T = 1 \text{ cm} / 4879 \text{ km} = 2.10^{-9}$.

Peut-on réintroduire le Soleil ? À cette échelle, il serait représenté par une sphère de 3 mètres de diamètre ce qui est bien sûr exclu. Mais il est toujours possible de représenter à l'endroit où l'on pose les planètes, une portion de cercle de 1,5 mètre de rayon.

Pour ne comparer vraiment que les tailles, il est recommandé de placer les boules les unes par rapport aux autres par ordre de taille ou dans le désordre, mais surtout pas par ordre de distance pour ne pas induire chez les élèves une mauvaise relation entre les tailles et les distances.

2 - On veut mettre en évidence les distances au Soleil des planètes.

La planète la plus lointaine du Soleil est Neptune. Imaginons que l'on veuille construire la maquette aux dimensions de la salle de classe qui fait ici, pour simplifier, 9 m de diagonale.

On a alors les distances au Soleil suivantes :

Nom	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance au Soleil en mètres	0,12	0,22	0,30	0,46	1,56	2,86	5,74	9,00

L'échelle est alors : $E_D = 9 \text{ m} / 4504.10^6 \text{ km} = 2.10^{-12}$

On remarque, comme on le remarquait déjà en regardant les distances au Soleil, que les quatre planètes telluriques sont très proches du Soleil en comparaison avec les planètes externes, même si cela ne pose pas de problème de construction à cette échelle.

La solution classique consiste à aligner les planètes dans la plus grande longueur de la pièce, ici 9 m. Mais, il est très improbable que les planètes soient toutes alignées. On peut alors placer les planètes les unes par rapport aux autres telles qu'elles sont au moment où l'on construit la maquette. Pour connaître ces positions, on peut utiliser un logiciel de planétarium ou chercher sur le WEB.

3 – Peut-on rendre compte à la fois des tailles relatives et des distances ?

On remarque que l'échelle des distances E_D est mille fois plus petite que celle des tailles. Cela rend impossible la construction d'une maquette à une seule échelle dans la classe. En effet, cela reviendrait à avoir une boule de 10 μm de diamètre pour Mercure puisque la taille de la salle ne peut être modifiée.

Pour représenter sur une même maquette les tailles relatives et les distances, on peut soit faire la maquette sur une grande distance (ce qui place Neptune à 9 km du Soleil si l'on choisit l'échelle E_T mais en prenant une échelle plus petite on peut réduire la taille de la maquette à quelques centaines de mètres) soit utiliser deux échelles différentes sur la même maquette, une pour les tailles et une pour les distances. Cette dernière solution n'est pas recommandée car elle induit des mauvaises représentations dans la tête des élèves surtout pour ceux qui ne feraient que l'utiliser sans l'avoir construite.

Un exemple de maquette utilisant la même échelle pour les tailles et les distances est exposée dans le parc de l'Observatoire de Meudon (<http://www.grandpublic.obspm.fr/Parcours-pedagogique-sur-le>). L'échelle est 10^{-10} : 1 mètre pour 10 millions de kilomètres. À cette échelle, Neptune est à 450 mètres du Soleil mais Mercure ne fait qu'un millimètre de diamètre...



Exemple de maquette à deux échelles de tailles et de distances.

4 – Comment représenter l’aspect dynamique du système ?

Les maquettes précédentes rendent compte des tailles et des distances mais ne montrent pas la distribution spatiale des planètes ni le fait qu’elles se déplacent.

Quelle(s) finalité(s) pédagogique(s) ?

Il faut de nouveau se poser la question de l’objectif pédagogique. Outre le fait de montrer les planètes dans une configuration spatiale réaliste, une telle maquette permet par exemple de connaître l’évolution de la position des planètes dans les constellations du Zodiaque, de comprendre pourquoi certaines planètes ne sont visibles que quelques heures avant ou après le coucher du Soleil, pourquoi certaines montrent des phases comme la Lune et d’autres non, etc.

Parmi les contraintes, il est intéressant de réaliser une maquette aisément manipulable. On peut donc limiter sa taille à 1 m de diamètre environ pour pouvoir la poser sur une table et modifier facilement la position de n’importe quelle planète. La planète la plus lointaine est Neptune. Pour laisser un peu de marge et pouvoir dessiner les constellations zodiacales, fixons le rayon de l’orbite de Neptune à 45 cm. L’échelle est alors de $45 \text{ cm} / 4504.10^6 \text{ km} = 10^{-13}$. À cette échelle, les planètes sont aux distances suivantes :

Nom	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance au Soleil en cm	0,6	1,1	1,5	2,2	7,8	14,3	28,7	45

On constate que cette maquette est impossible à construire car les planètes intérieures sont trop proches les unes des autres... En effet, l'espace entre Vénus et la Terre, par exemple, n'est que de 4 mm, ce qui ne permet pas de matérialiser les planètes et de les faire tourner facilement sans qu'elles se touchent.

Que faire alors ? Revenons à notre objectif pédagogique. Et n'oublions pas que l'astronomie est avant tout une science d'observation ! Un des intérêts majeurs de connaître les positions relatives des planètes est de déterminer leur position sur la sphère céleste ou - puisque les planètes sont sensiblement toutes dans le même plan - sur l'écliptique. Les élèves peuvent alors faire le lien entre le déplacement des planètes sur leur orbite et les variations de leur position dans le ciel. Ainsi, nous avons une bonne raison de ne prendre en compte dans notre modélisation que les planètes visibles à l'œil nu, les seules que les élèves pourront observer dans la pratique (c'est-à-dire sans lunette ni télescope).

Recalculons donc l'échelle en s'arrêtant à Saturne : $E = 45 \text{ cm} / 4504.10^6 \text{ km} = 10^{-13}$. À cette échelle, les planètes sont aux distances suivantes :

Nom	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance au Soleil en cm	1,8	3,4	4,7	7,1	24,5	45		

Les planètes intérieures sont encore très proches mais, en choisissant des boules de quelques millimètres, elles peuvent tourner sans se toucher. Pour reproduire les positions relatives des planètes dans le plan de l'écliptique (on est contraint de négliger les différences d'inclinaison -trop faibles- entre les multiples plans orbitaux), on entourera le système planétaire d'un bandeau figurant les étoiles lointaines. Le prolongement du plan de l'écliptique forme dans le ciel la bande zodiacale, qui traverse 13 (et non 12) constellations. Ce faisant, on induit nécessairement une légère erreur de parallaxe puisqu'on ne peut matériellement placer ce bandeau à l'infini ni le centrer sur la planète Terre (mobile).



Exemple de maquette dans laquelle les planètes sont fixées sur des punaises que l'on déplace sur les orbites tracées au préalable.



Exemple de maquette avec les planètes fixées sur des bandes en carton. Les constellations zodiacales sont représentées sur un bandeau qui entoure les planètes.

Pour aller plus loin...

On peut également envisager **la comparaison des vitesses orbitales** des planètes. À partir des périodes sidérales des planètes, on peut calculer la portion d'orbite parcourue en un temps donné. On supposera pour cela que les orbites diffèrent peu d'un cercle, et donc que leur vitesse orbitale est de type circulaire uniforme – ce qui est quasiment vérifié pour la grande majorité. Comparer les vitesses orbitales revient alors simplement à comparer les arcs de cercle parcourus en un temps donné.

Par exemple, lorsque la Terre parcourt un quart de son orbite, de combien se sont déplacées les autres planètes de la maquette ?

Nom	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Nbre de tours	1	0,4	0,25	0,13	0,02	0,01		
Angle parcouru en degré	368	144	89	47	7	3		

Mercure fait un tour complet de son orbite, Vénus à peine la moitié, Mars un huitième et pour Jupiter et Saturne, ce sont 2% et 1% respectivement. Le mouvement de Saturne est à peine perceptible (sa position sur son orbite ne change que de 12 degrés par an). Il faut donc également envisager deux horloges différentes pour mettre les planètes en marche ! On peut matérialiser avec des secteurs en cartons colorés les portions d'orbites parcourues.

On peut inversement calculer le temps que passe une planète donnée dans chacune des constellations de la bande zodiacale. Pour les planètes proches de la Terre, il faut tenir compte du mouvement de la Terre... qui donne naissance au **phénomène de rétrogradation** (la planète vue depuis la Terre semble momentanément rebrousser chemin dans notre ciel). Cet effet résulte de la composition des mouvements de la Terre et des planètes, il affecte donc toutes les planètes, même les plus lointaines, mais à des degrés divers que vous pourrez tenter de mettre en évidence.

On peut aisément reproduire ce phénomène en dessinant l'évolution de la position apparente d'une planète en fonction du temps sur la frise des constellations (en y projetant la direction Terre-planète sur le bandeau). Mars est un cas historiquement intéressant et facilement observable dans la réalité. On aura alors intérêt à construire un système planétaire en s'arrêtant à la planète étudiée (Mars ou Jupiter, et on placera la frise des constellations à une distance aussi grande que possible pour tenter de reproduire fidèlement le mouvement de rétrogradation de l'année en cours – s'aider au préalable d'un logiciel ou d'éphémérides). On fait défiler le temps en adoptant une unité temporelle arbitraire par « top ». Après plusieurs tentatives infructueuses, on veillera à choisir une unité de temps bien adaptée! (de l'ordre de 15j par exemple pour Mars, mais plus longue pour les planètes lointaines)



Montage photographique illustrant le mouvement rétrograde de la planète Mars en 2007 (Crédit T. Tézé). La trajectoire en « boucle » s'explique par la différence d'inclinaison entre les plans orbitaux martien et terrestre (difficile à reproduire avec votre maquette)

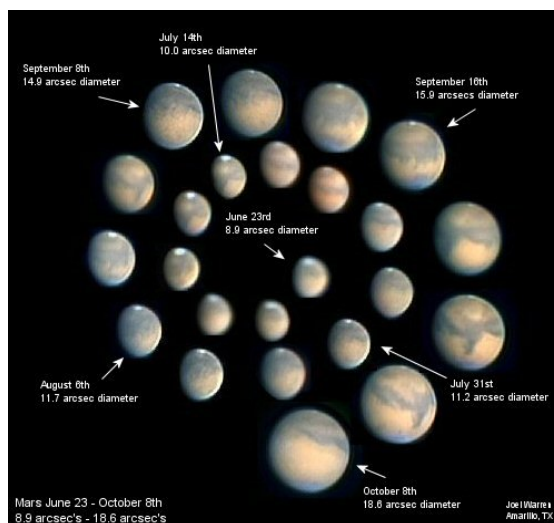
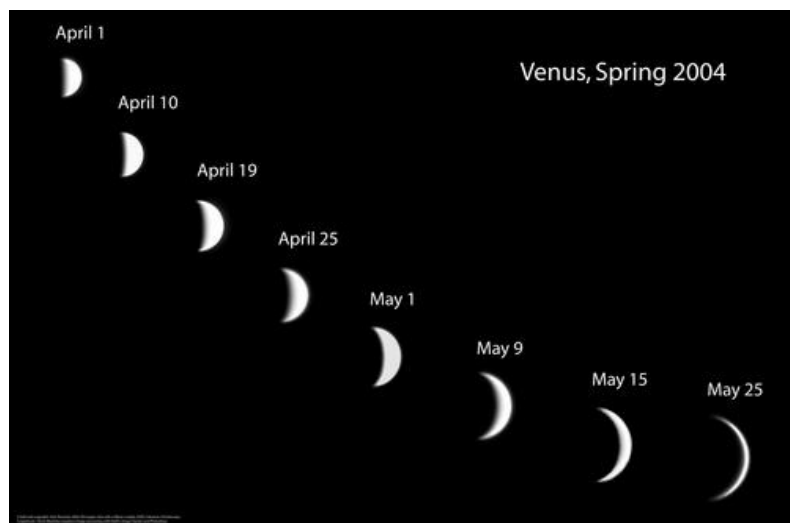
La maquette permet par ailleurs de comprendre certaines caractéristiques remarquables de l'observation des planètes telluriques: d'une part on ne peut observer les planètes inférieures (Mercure et Vénus) que quelques heures juste après le coucher du Soleil (ou juste avant son lever) ; d'autre part, l'utilisation d'une lunette de faible grossissement révèle l'existence d'un **cycle de phases** comparables aux phases de la Lune ainsi que la **variation de leur diamètre angulaire** au cours de ce cycle. Ce dernier phénomène est également observé pour la planète Mars (bien que dans une moindre mesure pour les phases, voir montages photo ci-dessous).

Les orbites de Mercure et Vénus étant contenues à l'intérieur de l'orbite terrestre, celles-ci vues depuis la Terre ne peuvent s'écarter de plus d'un certain angle du Soleil, on parle d'**élongation maximale**. Il existe deux positions particulières où cet écart angulaire est maximum (à l'Est et à l'Ouest du Soleil), la droite imaginaire joignant la Terre à la planète considérée est alors tangente à l'orbite de cette dernière. Dans le

cas de Vénus, l'élongation maximale est à peu près constante (les orbites de la Terre et de Vénus sont quasiment circulaires) et vaut environ 46 degrés. La Terre tournant sur elle-même en environ 15 degrés par heure, Vénus n'est jamais visible plus de quelques heures après le coucher du Soleil (ou avant son lever). C'est tantôt un astre du matin, tantôt un astre du soir. On peut utiliser la maquette pour identifier ces positions extrêmes et prédire combien de temps elle restera visible dans le ciel du matin ou du soir. (Ce phénomène est encore amplifié pour Mercure qui est situé bien plus près du Soleil s'en retrouve par conséquent très difficilement observable, son élongation maximale varie entre 18 et 28 degrés seulement.)

On remarque par ailleurs que la proximité des orbites terrestre et vénusienne est telle que les variations de diamètre apparent de Vénus sont relativement grandes (voir photos ci-dessous) et qu'elles sont corrélées avec la phase de la planète. En effet, si vous réalisez une maquette dont les orbites des planètes intérieures sont assez espacées pour pouvoir placer au centre une ampoule électrique -ou si vous utilisez des boules dont une moitié est peinte en noir pour figurer le côté nuit opposé au Soleil- vous constaterez que Vénus est toujours visible sous forme de croissant lorsqu'elle est au plus près de la Terre. À l'inverse, son disque est plein lorsqu'elle est observable au plus loin de la Terre, son diamètre apparent est alors minimum ainsi que sa distance angulaire au Soleil (élongation minimale). On appelle **conjonction supérieure** cette configuration où Vénus est diamétralement opposée à la Terre par rapport au Soleil (en général inobservable car elle n'est qu'à quelques degrés du Soleil). La conjonction inférieure correspond à l'alignement Soleil-Vénus-Terre dans cet ordre, la planète nous montrant alors sa face nuit. Le cycle des phases a une période qui résulte de la combinaison des périodes orbitales (sidérales) de Vénus et de la Terre, elle vaut environ 584 jours et est nommée **période synodique**.

Mentionnons pour finir que la planète Mars montre également des variations importantes de son diamètre apparent, résultant de son éloignement variable par rapport à la Terre (de plus l'orbite de Mars est notablement elliptique). Un cycle de phases peut également être observé, il résulte des orientations respectives du Soleil, de la Terre et de Mars. Toutefois, on n'observera jamais Mars sous forme de croissant simplement parce que l'orbite de la Terre est comprise à l'intérieur de l'orbite martienne.



Montages photographiques illustrant les phases des planètes Vénus (à gauche) et Mars (à droite) et la variation associée de leur taille angulaire (apparente), que l'on peut comprendre grâce à la maquette. Crédits : John Rummel (Vénus), Joel Warren, Hubble Space Telescope (Mars).

5 – Pourquoi s'arrêter aux planètes ?

Le système solaire ne se limite pas aux corps que nous venons de nommer... Toutes les planètes à partir de la Terre possèdent au moins un satellite naturel. Entre les orbites de Mars et Jupiter s'étend la ceinture principale d'astéroïdes (plus de 20 000 objets, le plus gros connu étant Cères), les planètes géantes sont elles aussi entourées d'une multitude de petits corps dont la disposition rappelle celle d'un système planétaire en miniature. Au-delà de Neptune ont été découverts depuis la fin du XX^{ème} siècle une myriade d'objets (dont Pluton est l'un des plus célèbres représentants). Plus loin encore s'étend aux confins du système solaire un immense réservoir de petits corps froids, certains venant parfois illuminer nos ciels nocturnes sous forme de comètes...

L'argument de ne conserver pour la maquette que les objets les plus gros ne tient pas car Mercure est plus petit que Ganymède (J3) et Titan (S6), satellites de Jupiter et Saturne respectivement. Il est possible de construire d'autres maquettes avec les systèmes de satellites autour des planètes géantes, on s'interrogera alors de nouveau sur la possibilité d'utiliser une seule échelle pour les tailles et les distances des satellites.

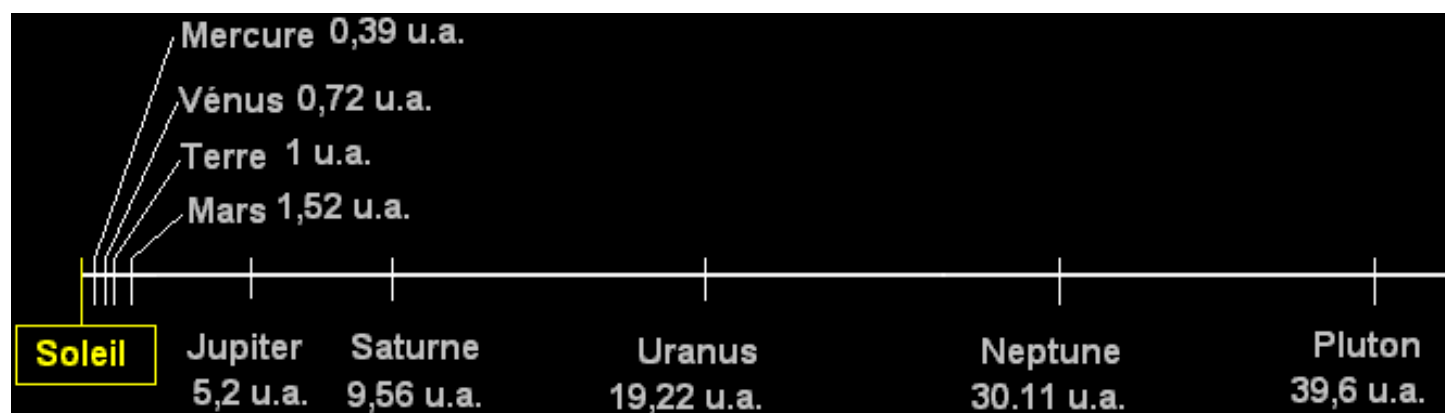
Pour mieux mettre en perspective notre système solaire par rapport aux autres systèmes planétaires existants, on peut encore construire en parallèle de notre propre cortège de planètes un ou deux systèmes de planètes extrasolaires. On a découvert à ce jour plus de 300 planètes (et une trentaine de systèmes multiples) orbitant autour d'autres étoiles que le Soleil, pour lesquelles on a pu déterminer avec quelque précision la taille, l'excentricité et la période orbitale. On a généralement une bonne idée de leur masse et l'on connaît dans quelques cas (plus de 50) leur diamètre. Les possibilités sont donc nombreuses d'illustrer la diversité des systèmes planétaires. On pourra utilement se référer au site Internet suivant qui recense chaque semaine les nouvelles découvertes et présente un catalogue interactif des paramètres orbitaux connus : <http://exoplanet.eu/>

Synthèse :

En conclusion, rappelons que les distances entre les corps du système solaire sont si grandes qu'il est impossible de représenter à la même échelle les tailles et distances interplanétaires dans un petit local. Il est donc impératif de réaliser différents types de maquettes selon l'objectif pédagogique (lequel doit bien sûr être défini en amont de la construction de la maquette). Si l'on privilégie souvent l'aspect artistique de la réalisation dans les petites classes, il faut noter que les classes de collège et lycée peuvent aborder des phénomènes observationnels ou physiques plus complexes (mouvements rétrogrades, phases des planètes intérieures, vitesses orbitales et lois de Képler, etc). Enfin, il ne faut pas hésiter à s'approprier les découvertes scientifiques les plus récentes (souvent relayées dans les médias) en abordant par exemple les objets des confins du système solaire, la controverse sur la nature de Pluton ou les systèmes d'exoplanètes.

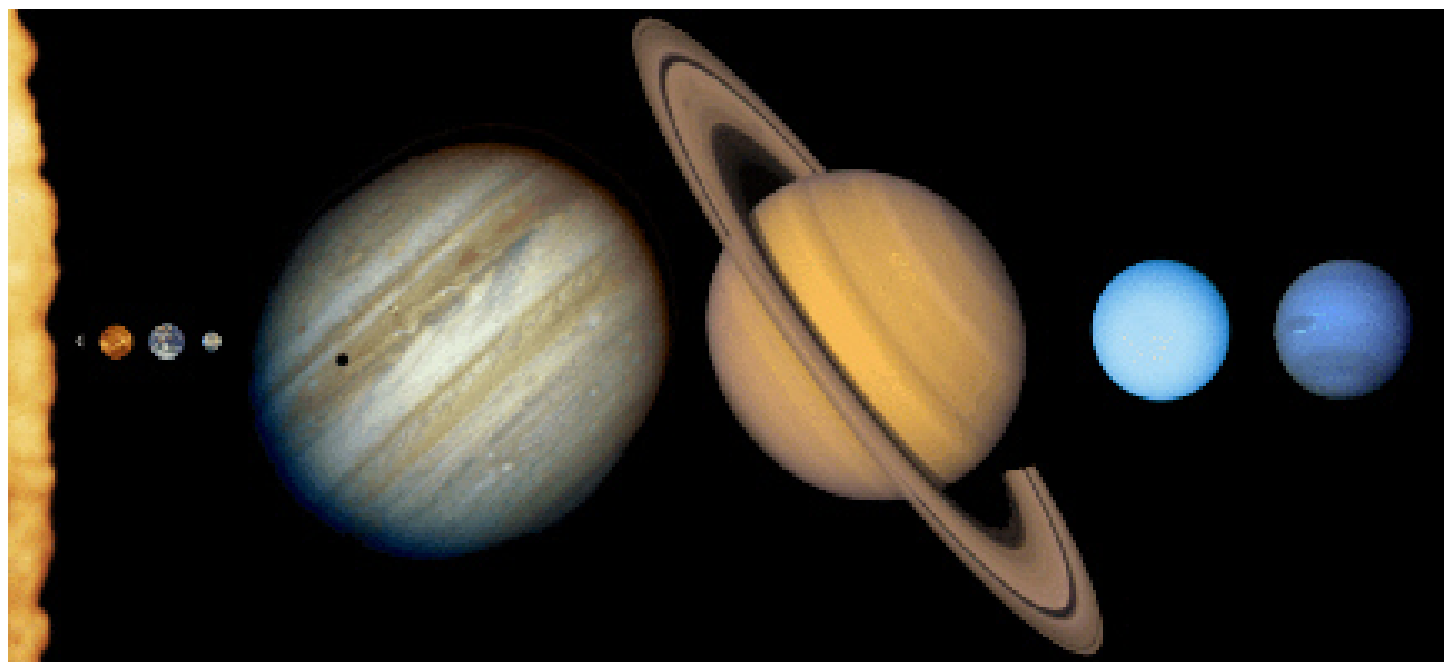
Documents pédagogiques

Distances relatives des corps du système solaire.
u.a. = unité astronomique = 150 millions de Km



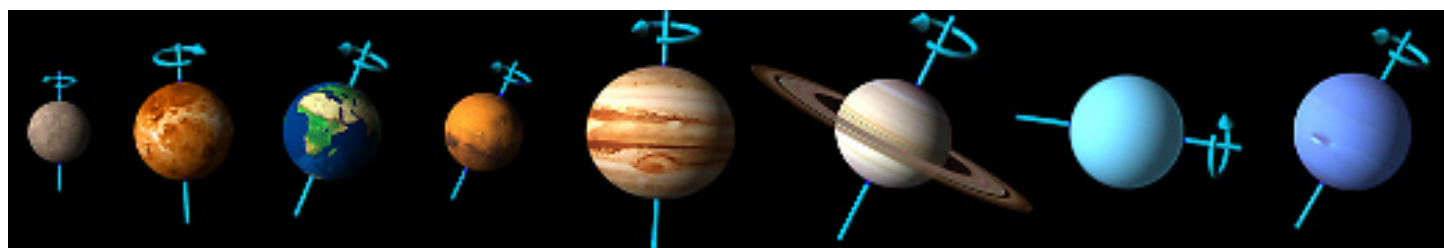
Crédit : Calvin J. Hamilton

Tailles relatives des planètes.



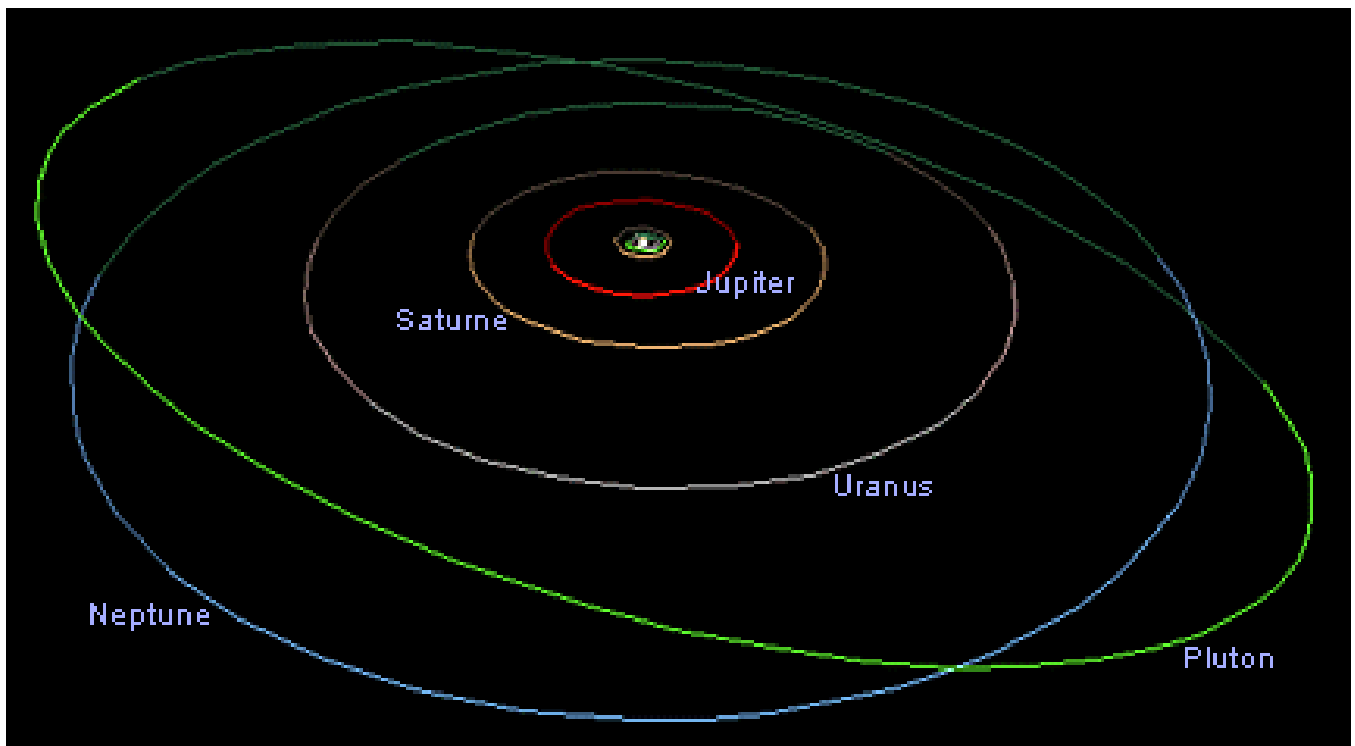
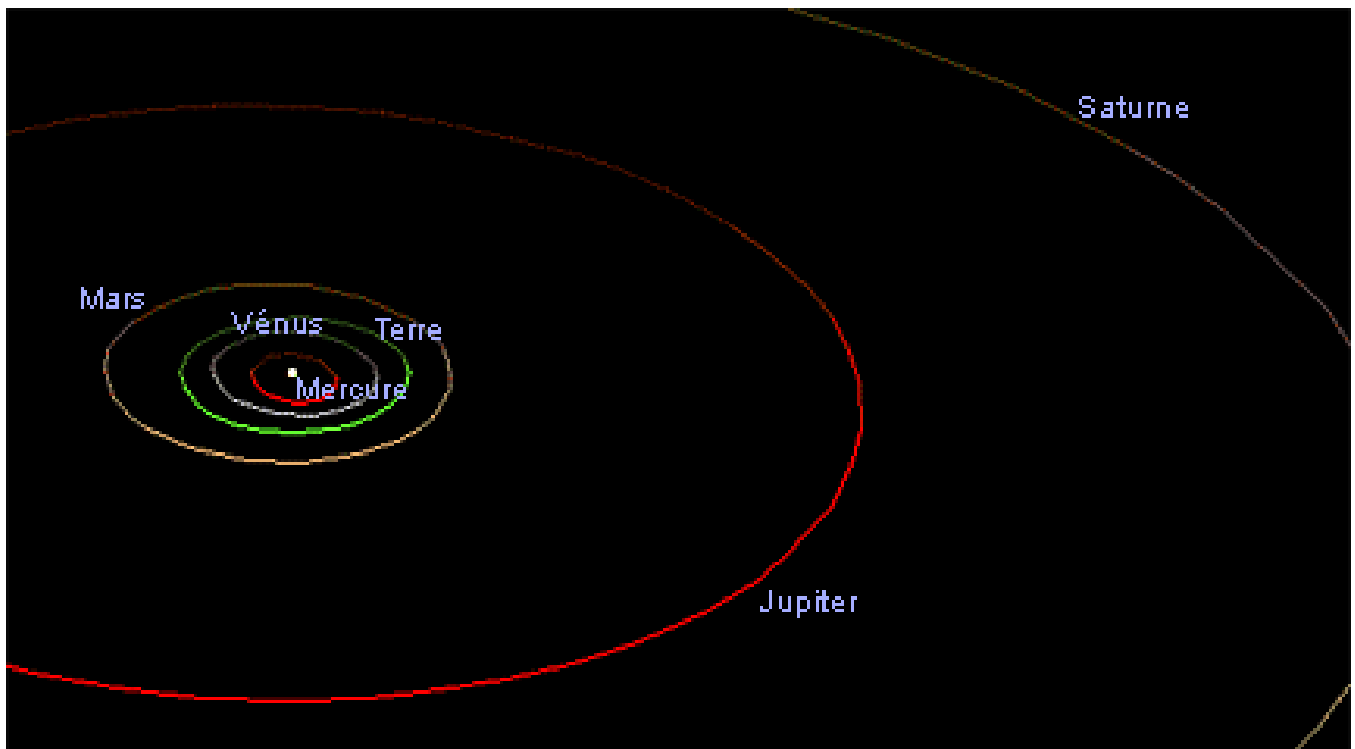
Crédit : Calvin J. Hamilton

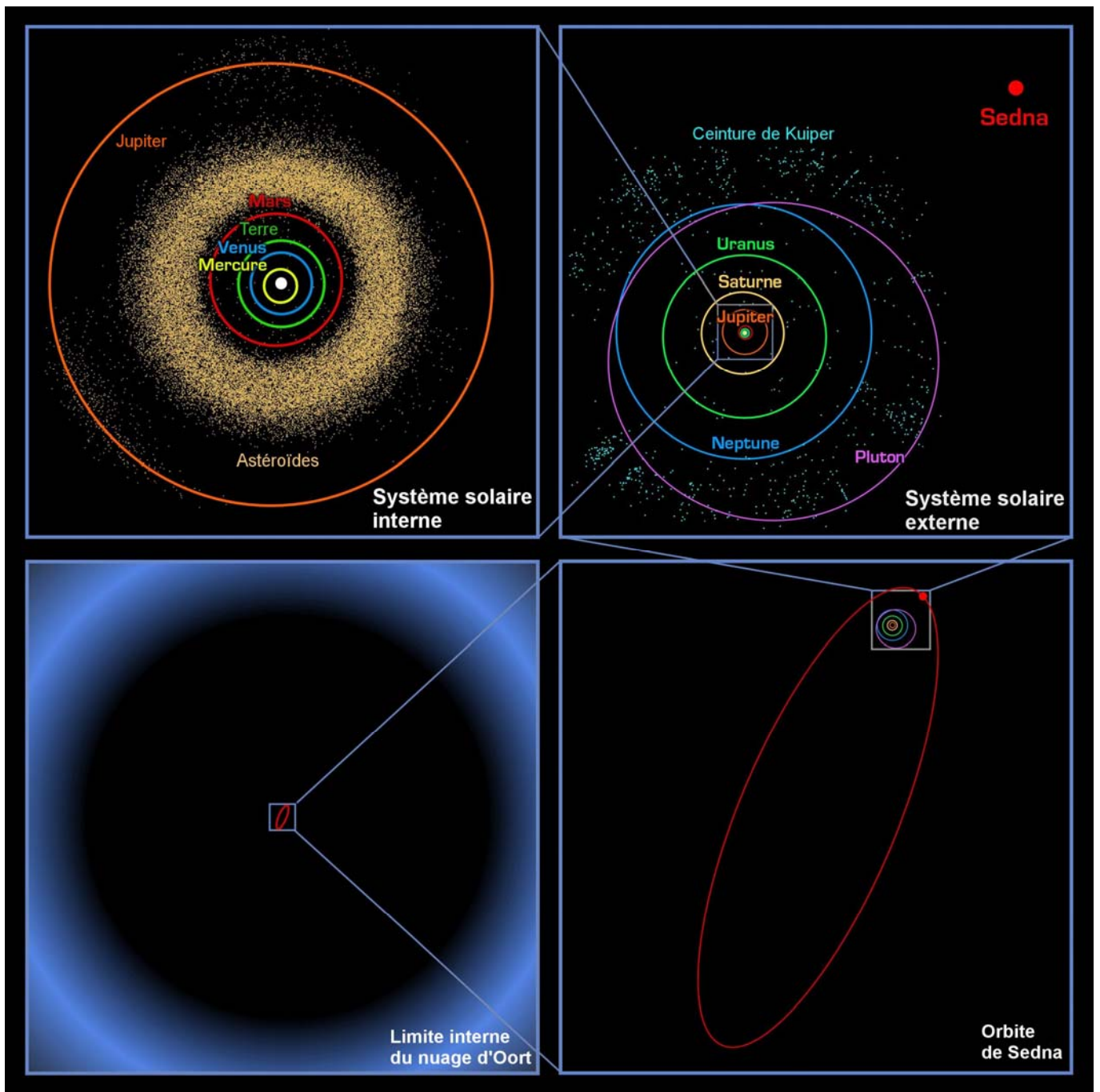
Inclinaison de l'axe de rotation des planètes par rapport au plan de leur orbite.



Crédit : Calvin J. Hamilton

Inclinaison des orbites des planètes.

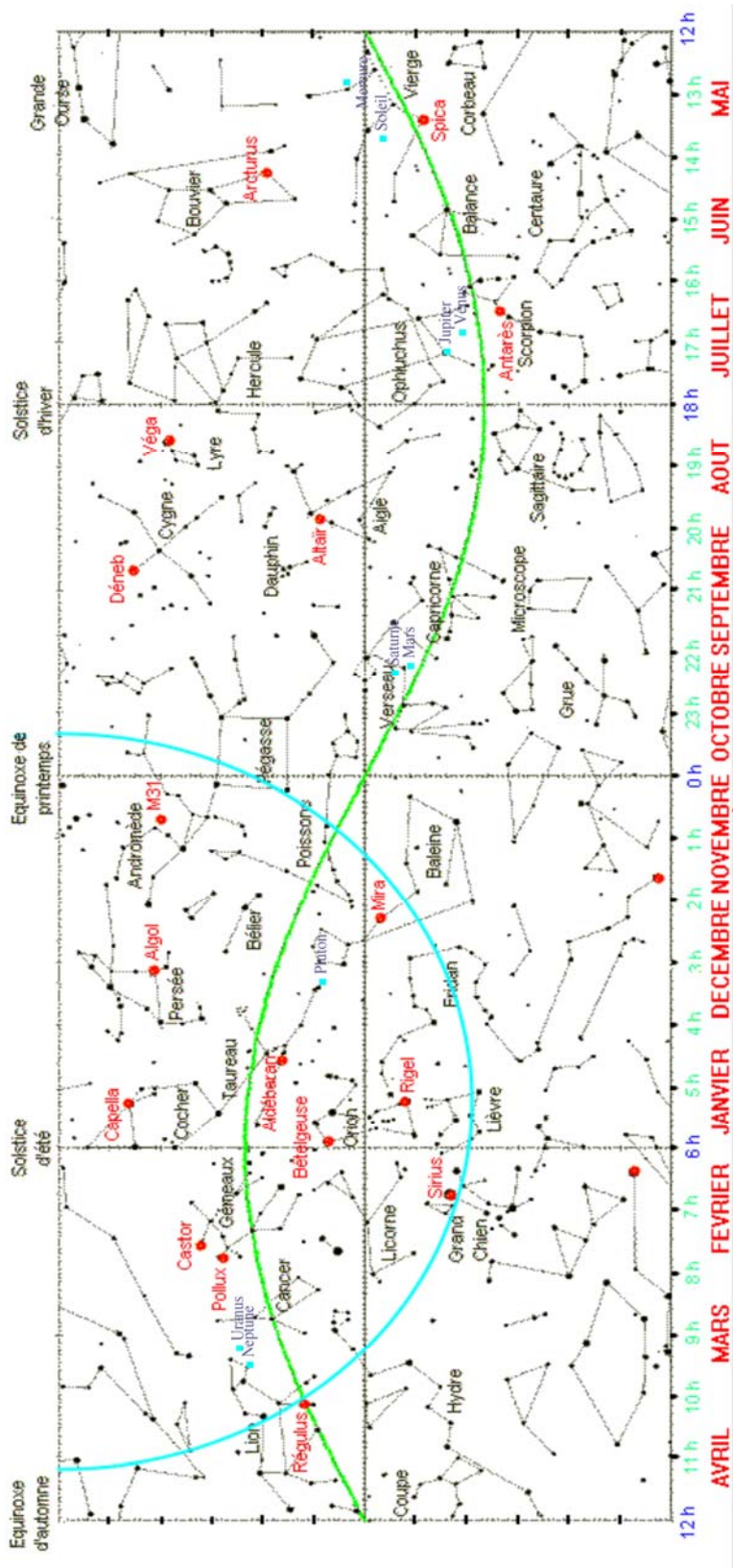




Crédit : NASA

Nom	Soleil	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Nombre de satellites		0	0	1	2	28	30	15	8
Demi-grand axe en UA		0,387	0,723	1,000	1,524	5,203	9,555	19,218	30,110
en millions de km		57,909096	108,2086	149,598	225	778,2920	1429,369	2874,992	4504,329
Excentricité de l'orbite		0,21	0,01	0,02	0,09	0,05	0,06	0,05	0,01
Inclinaison de l'orbite sur l'écliptique		7°	3° 24'	0°	1° 51'	1° 19'	2° 30'	0° 46'	1° 47'
Inclinaison de l'équateur sur l'orbite	7° 15'	2°	177° 18'	23° 27'	25° 11'	3° 4'	26° 44'	97° 52'	29° 36'
Période de révolution sidérale		87,97 j	224,70 j	365,26 j	1,88 ans	11,86 ans	29,46 ans	84,00 ans	164,77 ans
Rotation sidérale	25 j	58,6 j	243,0 j	23,9 h	24,6 h	9,9 h	10,7 h	17,2 h	16 h
Diamètre équatorial (Terre=1)	109,12	0,38	0,95	1	0,53	11,21	9,45	4,01	3,88
Diamètre en km	1 392 000	4879	12104	12756	6794	142 984	120 536	51 118	49 528

Position des planètes dans le ciel un jour donné (ici le 7 octobre 2009, extrait du site : http://jcboulay.free.fr/astro/sommaire/ciel_du_jour/page_cartecel.htm).



Planète	RA	DEC
Soleil:	-11h 36m	-10° 5'
Mercure:	13h 5m	-5° 4'
Vénus:	16h 44m	-25° 32'
Mars:	22h 6m	-15° 25'
Jupiter:	17h 1m	-22° 33'
Saturne:	22h 14m	-12° 26'
Uranus:	9h 5m	17° 22'
Neptune:	9h 22m	15° 29'



Ce document permet de retrouver les configurations réelles des planètes au moment de la simulation (positionnement sur les orbites tracées) et de faire le lien avec leur position dans le ciel. Les axes de coordonnées représentent l'ascension droite et la déclinaison (coordonnées célestes), la ligne centrale étant l'équateur céleste, la courbe verte représente l'écliptique. Pour un schéma des positions relatives des planètes dans le système solaire, voir aussi : <http://www.heavens-above.com/> (puis Solar System Chart)