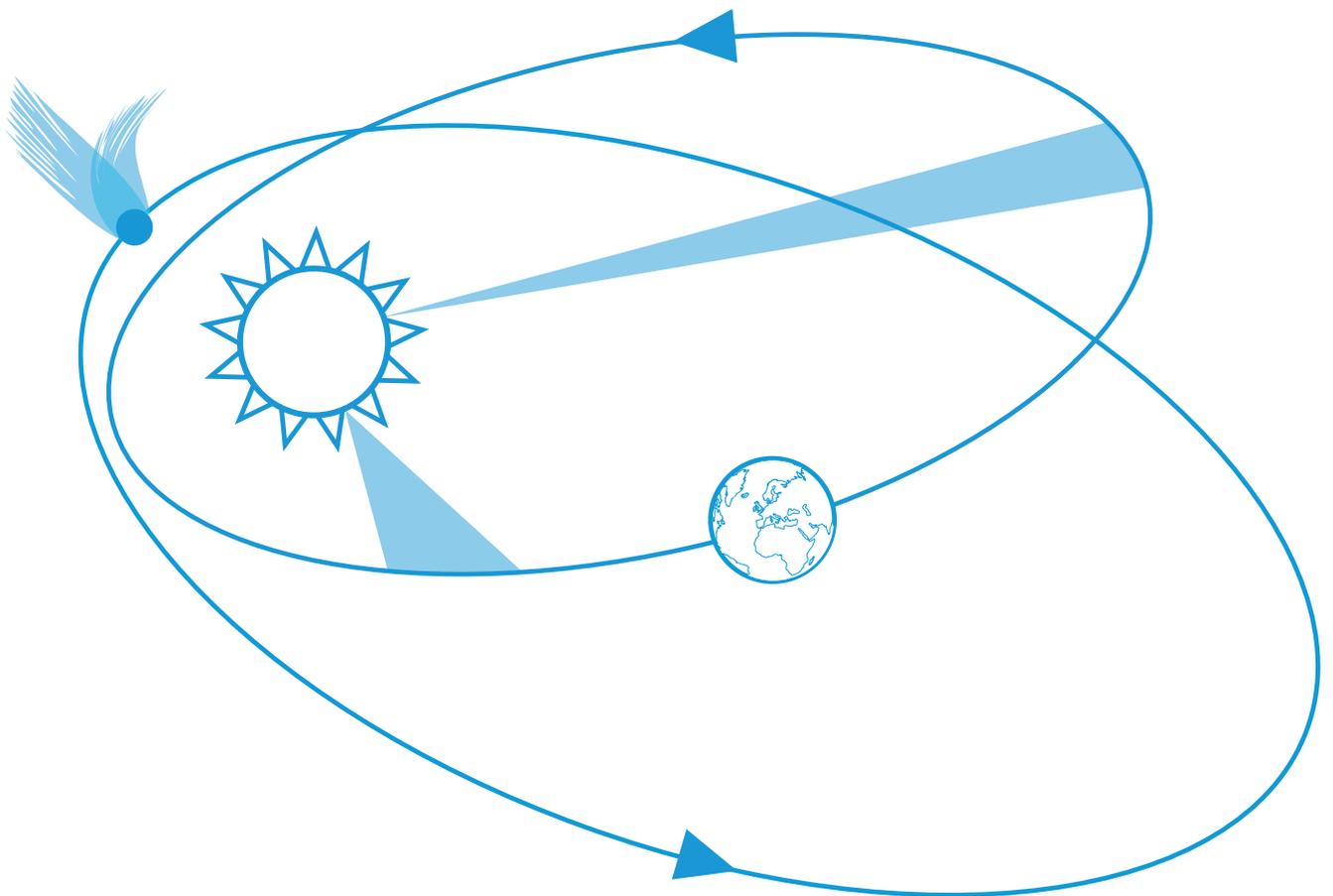


teach with space

→ LES ELLIPSES

Vitesse et période orbitale des corps en orbite



→ INTRODUCTION

Afin de comprendre les orbites des planètes, des comètes et des autres corps célestes, il est nécessaire d'examiner les principes d'interaction entre la gravité et la vitesse d'un objet qui régissent les orbites. Les élèves pensent généralement – à tort – que les orbites planétaires sont circulaires. Cette activité pratique permet de créer des graphiques Vitesse-Temps (période orbitale) dans un contexte spatial. Elle démontre que la vitesse des objets varie lorsqu'ils décrivent une orbite elliptique autour du Soleil. Une activité d'approfondissement, qui aborde la géométrie des ellipses et leur relation avec les paramètres physiques dans le Système solaire, est incluse.

En bref	page 3
Contexte	page 4
Activité - Panneau elliptique	page 12 page 14
Discussion Discussion d'approfondissement	page 16 page 18
Feuille de travail de	page 19
Les missions @ ESA	page 21
Rosetta	page 21
La Station spatiale Internationale	page 23
Annexe	page 26
Instructions relatives au panneau elliptique Réponses relatives à la feuille de travail Glossaire	page 26 page 33 page 35 page 36

→ LES ELLIPSES

Vitesse et période orbitale des corps en orbite

EN BREF

Tranche d'âge : 14-16 ans

Type : activités pour les

élèves **Complexité :**

moyenne

Temps de préparation pour l'enseignant : 1 heure

Durée de la leçon : 15 minutes à 1 heure

Coût : faible (moins de 10 euros)

Lieu : à l'intérieur (salle de classe)

Matériel utilisé : billes, règles, pas de matières dangereuses

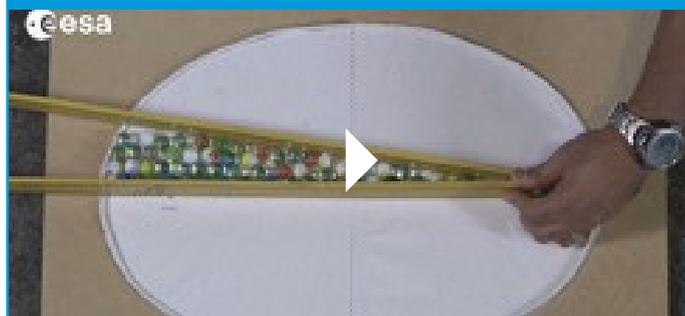
Connaissances prérequis des élèves

1. Concept d'énergie cinétique et d'énergie potentielle gravitationnelle.
2. Concept de vecteur de vitesse.

Acquis d'apprentissage

1. À l'issue de l'activité, les élèves doivent être capables de construire un graphique Vitesse-Temps (période orbitale) et de lui associer les valeurs d'accélération et de distance pour comprendre les principes de la mécanique orbitale.
2. Les élèves doivent comprendre pourquoi la force de la gravité varie selon la distance d'une planète ou d'une étoile.
3. Les élèves doivent savoir associer cela aux raisons pour lesquelles une planète ou un satellite accélère et décélère dans une orbite elliptique.

Autre matériel nécessaire



↑ Vidéos sur les ellipses. Reportez-vous à la section Liens.

Liens connexes

Physique

- Orbites
- Satellites
- Comètes
- Planètes
- Étoiles
- Gravitation (variation de la force gravitationnelle selon la distance)
- Lois de Kepler

Mathématiques

- Graphiques Vitesse-Temps
- Aire sous le graphique égale à la distance
- Gradient à un point égal à l'accélération
- Création de graphiques et leur interprétation
- Géométrie : ellipses, excentricité, axes majeurs et secondaires

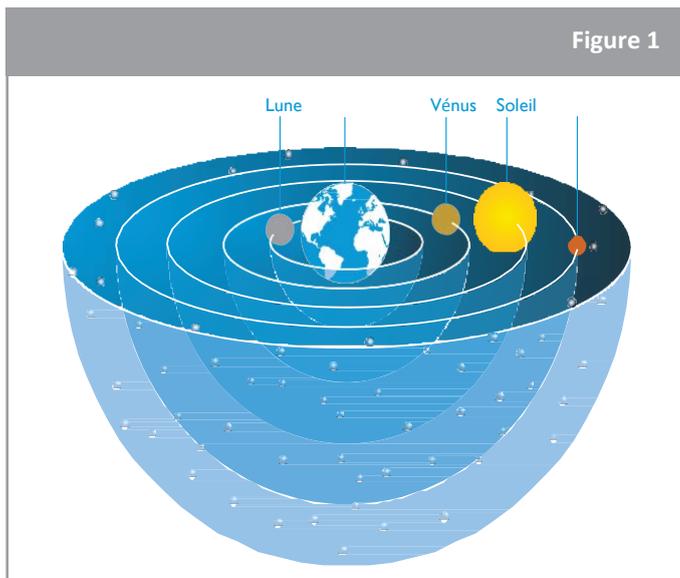
Description

Au cours de cette activité, les élèves utiliseront un panneau elliptique pour mesurer la vitesse et la distance d'un objet qui décrit une orbite elliptique. Les résultats seront ensuite rapportés dans un graphique Vitesse-Temps afin de comprendre comment la gravité affecte (ou modifie) la vitesse d'une planète ou d'un satellite qui décrit une orbite elliptique.

→ CONTEXTE

Une brève histoire de géocentrisme

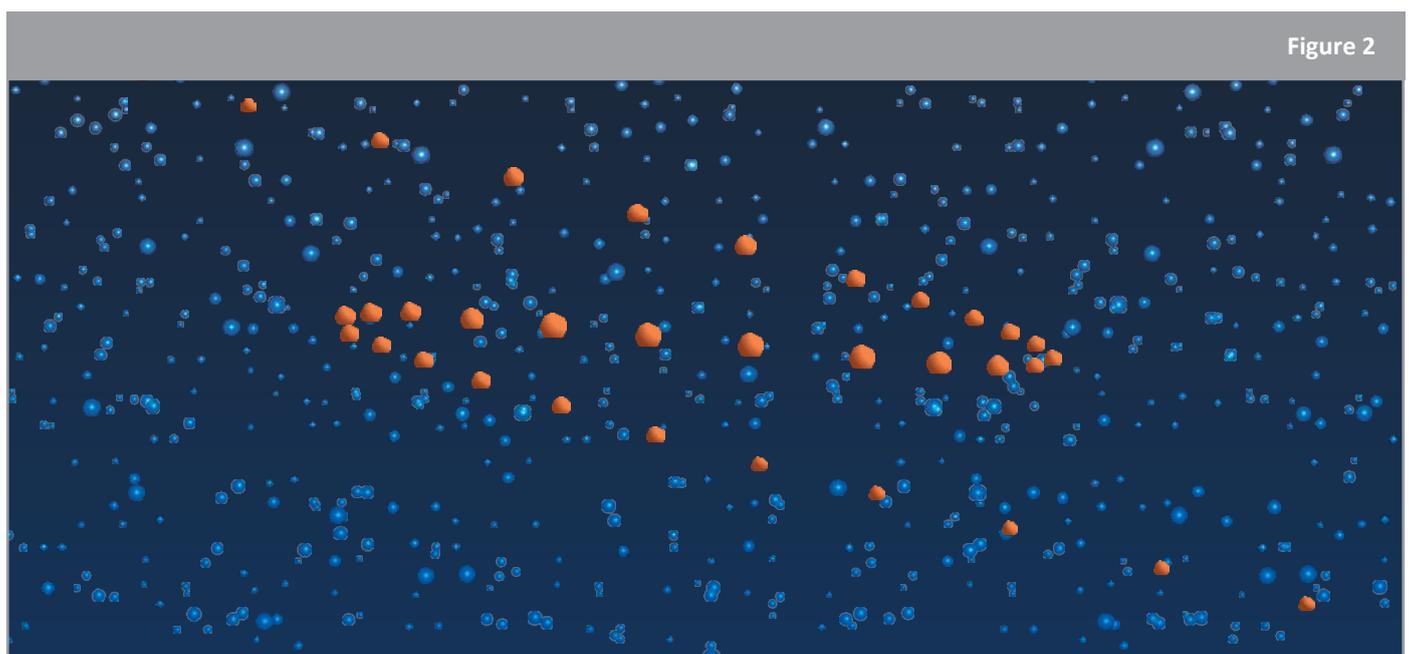
Pendant des milliers d'années, les philosophes et les astronomes se sont interrogés sur la nature de la structure du Système solaire et au-delà. De leurs discussions, deux modèles contradictoires de notre Système solaire ont émergé : géocentrique (ou centré sur la Terre) et héliocentrique (ou centré sur le Soleil).



Vers 200 av. J.-C., l'astronome grec Aristote était partisan du modèle géocentrique (Figure 1). Il a proposé une théorie selon laquelle les planètes (et le Soleil) se déplaçaient à des vitesses uniformes le long de trajectoires circulaires autour de la Terre – qu'il plaçait au centre de l'Univers.

Ce modèle posait cependant des problèmes. En observant Mars à certains moments, la planète semblait se déplacer dans le ciel d'une manière étrange (Figure 2). Au lieu de suivre sa trajectoire, Mars semblait revenir en arrière pendant un court moment avant de continuer sa course dans le ciel. Cet effet ne pouvait pas être expliqué avec un modèle purement géocentrique.

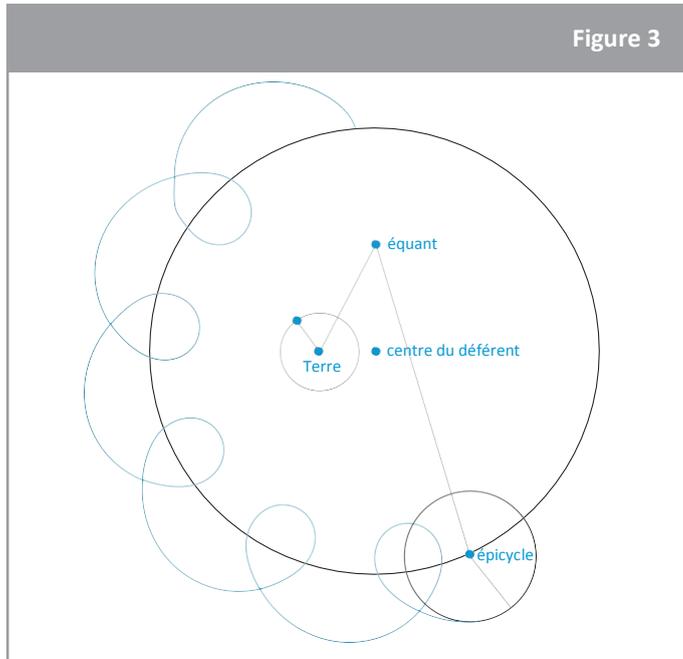
↑ Modèle géocentrique, dans lequel la Terre se trouve au centre de l'Univers.



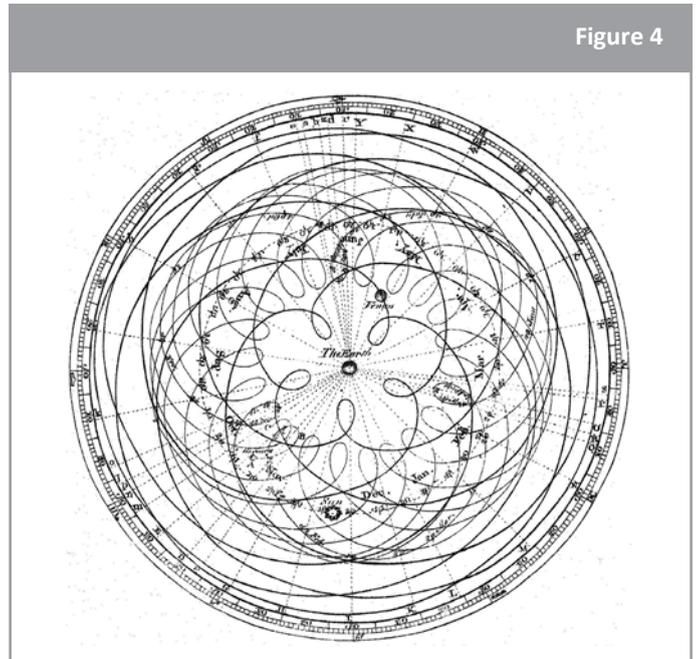
↑ Mouvement apparent de Mars dans le ciel au cours du mouvement rétrograde. Pour visualiser une animation montrant le mouvement de Mars dans le ciel nocturne, reportez-vous à la section Liens.

Près de 400 ans plus tard, Ptolémée proposait une solution à ce problème. Il imaginait toujours la Terre au centre de l'Univers, mais pensait que les planètes se déplaçaient en décrivant des orbites secondaires appelées « épicycles » le long de leur trajectoire orbitale principale (Figure 3). Ceci pouvait expliquer et prédire partiellement le **mouvement rétrograde*** observé.

Pour faire en sorte que ce système fonctionne, Ptolémée était contraint de construire une série d'épicycles compliqués (Figure 4), qui « forçait » les données à correspondre au modèle géocentrique.



↑ Les épicycles peuvent permettre d'expliquer le mouvement rétrograde. Pour visualiser des animations sur les épicycles, reportez-vous à la section Liens.

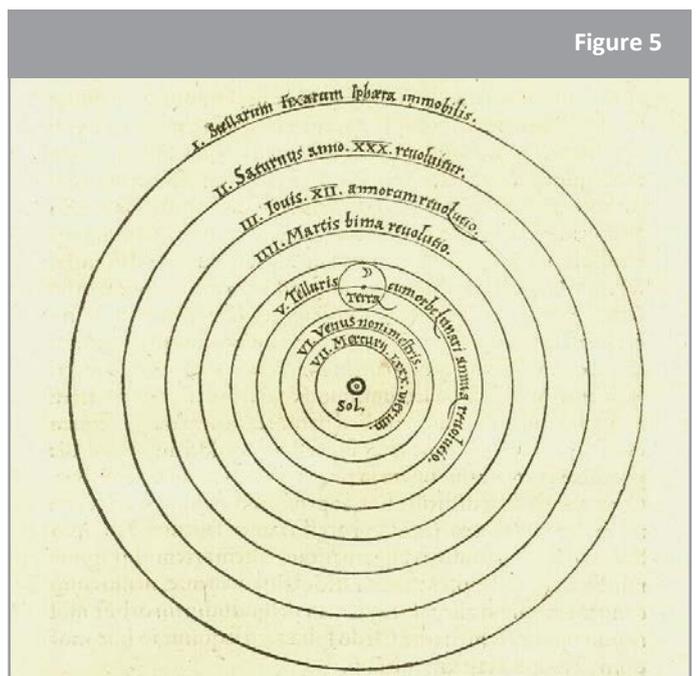


↑ Dans son ensemble, la solution de Ptolémée était incroyablement compliquée.

Une brève histoire de l'héliocentrisme

En 1543, Nicolas Copernic publiait *De revolutionibus orbium coelestium* (Des révolutions des orbites célestes), affirmant que l'Univers suivait en fait un modèle héliocentrique (Figure 5). La révolution copernicienne commençait, et les grands penseurs ont lentement commencé à adopter ce modèle révolutionnaire.

Cependant, un problème subsistait. Selon ce modèle, tous les corps en orbite étaient censés suivre des orbites circulaires, et par conséquent le modèle héliocentrique ne parvenait toujours pas à expliquer toutes les observations des mouvements planétaires. En particulier, l'orbite de Mars ne répondait toujours pas aux contraintes d'une orbite circulaire !



↑ Modèle héliocentrique du Système solaire de Copernic.

* **Mouvement rétrograde d'une planète** : mouvement apparent d'une planète dans le ciel nocturne dans la direction opposée au mouvement qui est normalement observé (mouvement prograde).

La révélation de Kepler sur la nature des orbites

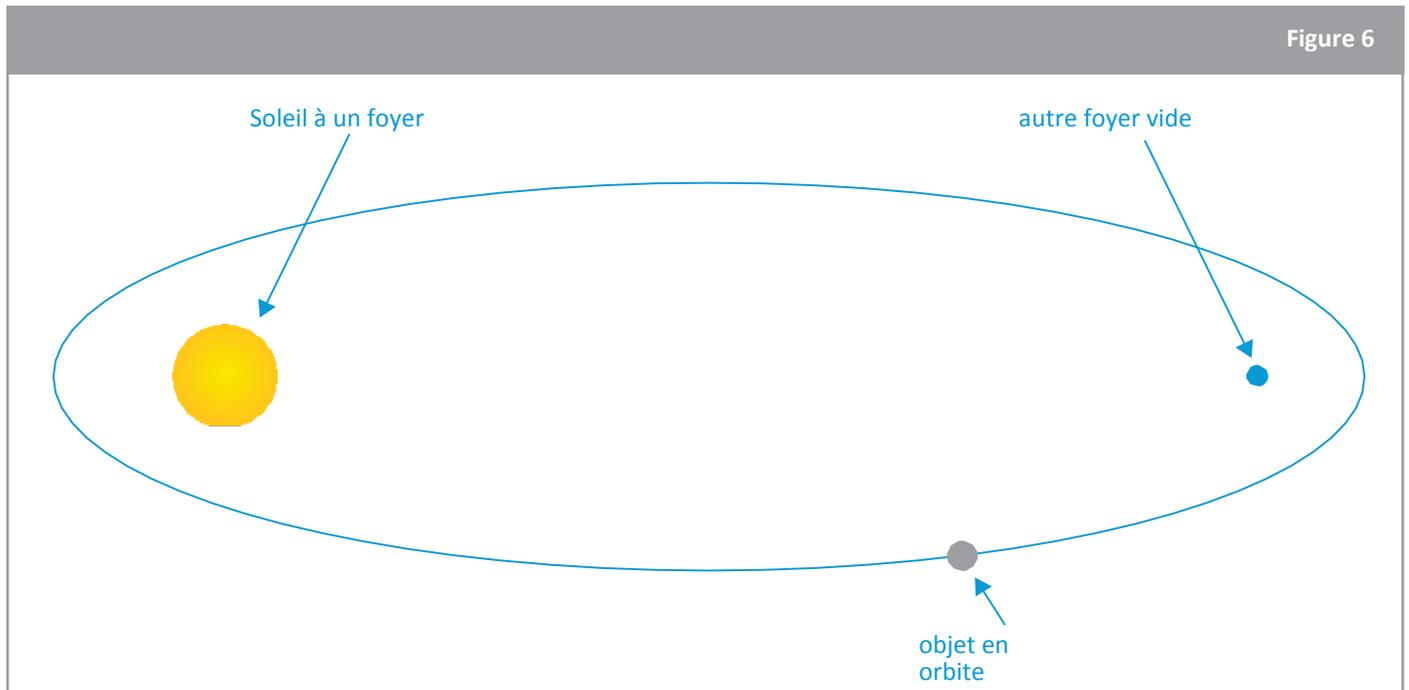
Au début des années 1600, l'astronome Johannes Kepler a révolutionné notre compréhension du Système solaire et de la nature des orbites. Après une analyse méticuleuse des données d'observation du mouvement de la planète Mars dans le ciel nocturne, Kepler a conclu que les orbites des planètes devaient être elliptiques plutôt que circulaires. Au moyen d'une étude et de calculs plus poussés, Kepler a pu formuler trois lois s'appliquant à tous les objets qui décrivent une orbite.

Lois de Kepler relatives au mouvement

Première loi de Kepler : Une planète en orbite autour du Soleil décrit une trajectoire en forme d'ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers (Figure 6).

Deuxième loi de Kepler : Une ligne imaginaire reliant une planète au Soleil « balaie » des zones égales dans des intervalles de temps égaux.

Troisième loi de Kepler : Le carré de la **période orbitale*** d'une planète est directement proportionnel au cube du demi-grand axe de l'orbite.



↑ La découverte révolutionnaire de Kepler : les orbites planétaires sont elliptiques.

Pour plus d'informations, visualisez les animations sur les première, deuxième et troisième lois de Kepler, ainsi que la vidéo éducative « Johannes Kepler » de l'ESA ATV-2 (section Liens).

La signification de ces lois sur les orbites planétaires et l'exploration du Système solaire sont discutées plus loin dans ce manuel.

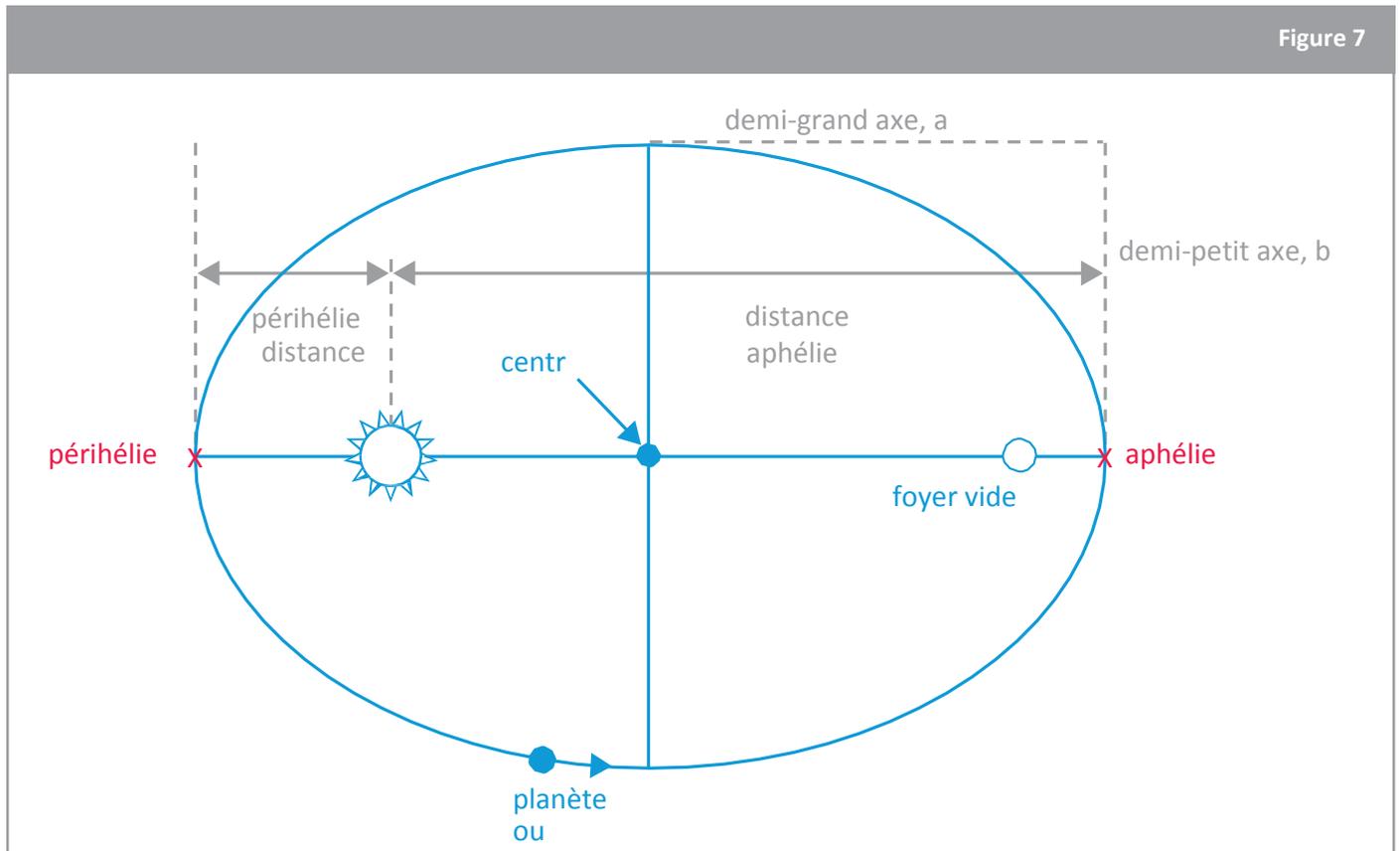
* **Période orbitale** : temps nécessaire pour compléter une orbite.

Propriétés des orbites elliptiques

Afin d'analyser efficacement les propriétés d'un objet en orbite et d'appliquer les lois de Kepler d'une manière appropriée, nous devons définir certains termes clés :

Axes

Une ellipse est une courbe sur un plan qui entoure deux foyers. La somme de la distance de n'importe quel point de l'ellipse par rapport aux deux foyers reste toujours la même. Cela peut être démontré à l'aide d'un morceau de ficelle (reportez-vous à la figure A1 de la section Activité).



↑ Propriétés d'une orbite elliptique qui inclut les axes « demi-grand » et « demi-petit », et les emplacements du périhélie et de l'aphélie.

Pour comprendre les orbites, nous devons définir deux propriétés : l'axe principal et l'axe secondaire (Figure 7). L'axe principal est le plus long diamètre d'une ellipse qui passe par les deux foyers et le centre. L'axe secondaire est la ligne qui coupe l'axe majeur. Ces deux lignes et les emplacements correspondants d'un objet qui décrit une orbite elliptique jouent un rôle important dans l'analyse de la vitesse et de l'énergie de l'objet orbital.

Un autre terme qu'il importe de comprendre pour calculer les propriétés d'une orbite est le demi-grand axe et le demi-petit axe (Figure 7). Le demi-grand axe correspond à la moitié de la longueur du grand axe (ou axe principal) et le demi-petit axe à la moitié de la longueur du petit axe (ou axe secondaire). Pour un cercle, ces deux axes ne sont pas différents, et correspondent au rayon du cercle.

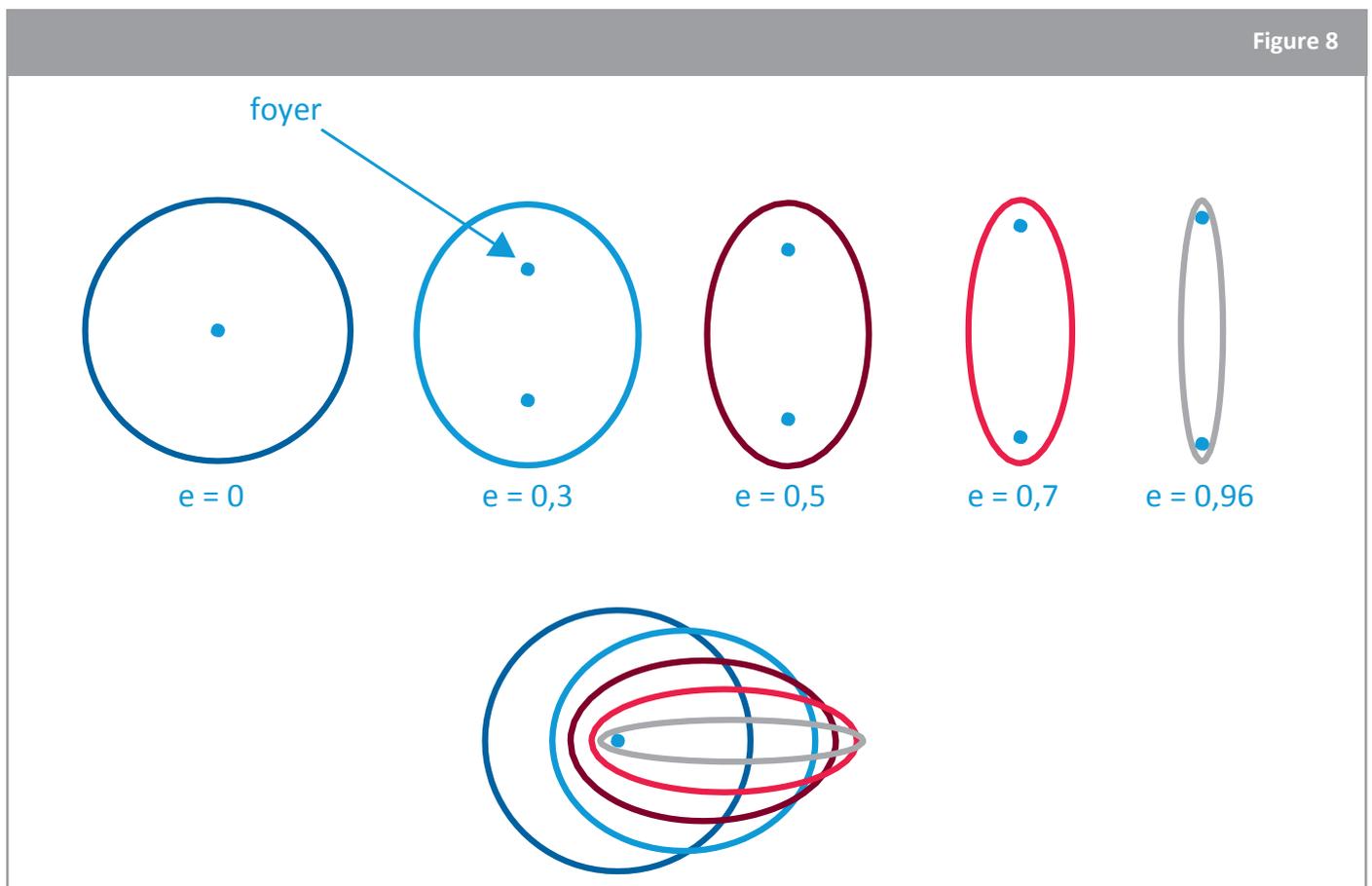
Excentricité

L'excentricité est une mesure de l'écart de forme entre une ellipse et le cercle parfait (Figure 8). Sur la figure 8, l'excentricité est notée « e ».

Un cercle est un type d'ellipse particulier où les deux foyers se chevauchent, créant ainsi un seul foyer. Les cercles parfaits ont une excentricité de valeur 0.

Lorsque l'excentricité de l'ellipse augmente, la valeur de « e » augmente. La plage de valeurs pour l'excentricité elliptique est :

$0 < e < 1$. Une parabole comprend une excentricité de valeur 1. Si $e > 1$, la courbe est appelée une hyperbole.



↑ Excentricité de différentes ellipses. À mesure que l'excentricité augmente, les ellipses semblent plus « écrasées ».

Emplacements orbitaux

En considérant l'énergie et la vitesse d'un objet orbital, nous devons réfléchir à l'endroit où un objet aura une énergie cinétique maximale (et donc une énergie potentielle gravitationnelle minimale), et une énergie cinétique minimale (et donc une énergie potentielle gravitationnelle maximale). Ce point est développé plus loin dans la discussion d'approfondissement et est illustré à la figure A5.

Le point auquel l'axe principal croise la trajectoire orbitale la plus proche du Soleil est appelé le périhélie (Figure 7). Le point auquel l'axe principal croise la trajectoire orbitale la plus éloignée du Soleil est appelé l'aphélie.

Comètes

Un groupe d'objets qui décrivent une orbite hautement elliptiques (fortement excentriques) sont les comètes (Figure 9). Ces petits « mondes glacés » proviennent principalement de deux régions du Système solaire. Les comètes de courte période orbitale (dont la période est inférieure à 200 ans) proviennent de la ceinture de Kuiper, une collection discoïdale de fragments congelés provenant de la formation du Système solaire juste au-delà de l'orbite de Neptune.

On pense que les comètes de longue période orbitale (dont la période atteint des dizaines de milliers d'années) proviennent d'un halo sphérique de matière glacée situé vers le bord de notre Système solaire, connu sous le nom de nuage d'Oort. À une distance de plusieurs milliers d'**unités astronomiques (U.A)***, le nuage d'Oort est trop éloigné pour être photographié directement. Pour déterminer l'origine d'une comète à longue période orbitale, nous devons donc suivre sa trajectoire orbitale complète (Figure 10).



↑ Photo de la comète Hale-Bopp prise en Croatie.

Les comètes, pour la plupart, sont en orbite autour du Soleil en décrivant des orbites stables. Cependant, les objets de la ceinture de Kuiper peuvent être influencés par les champs gravitationnels des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) et par les **perturbations gravitationnelles*** provoquées par les mouvements des autres étoiles. Ces perturbations peuvent occasionnellement modifier les orbites de ces petits mondes froids, les envoyant dans une course vers le Système solaire interne.

À mesure que ces objets s'approchent du Soleil, ils commencent à chauffer, et la glace qu'ils contiennent **se sublime***. À ce stade, la structure d'origine est appelée « noyau ». Au fur et à mesure que le noyau se réchauffe, il dégage du gaz et de la poussière, formant une « atmosphère » mince mais vaste : la coma (Figure 11).

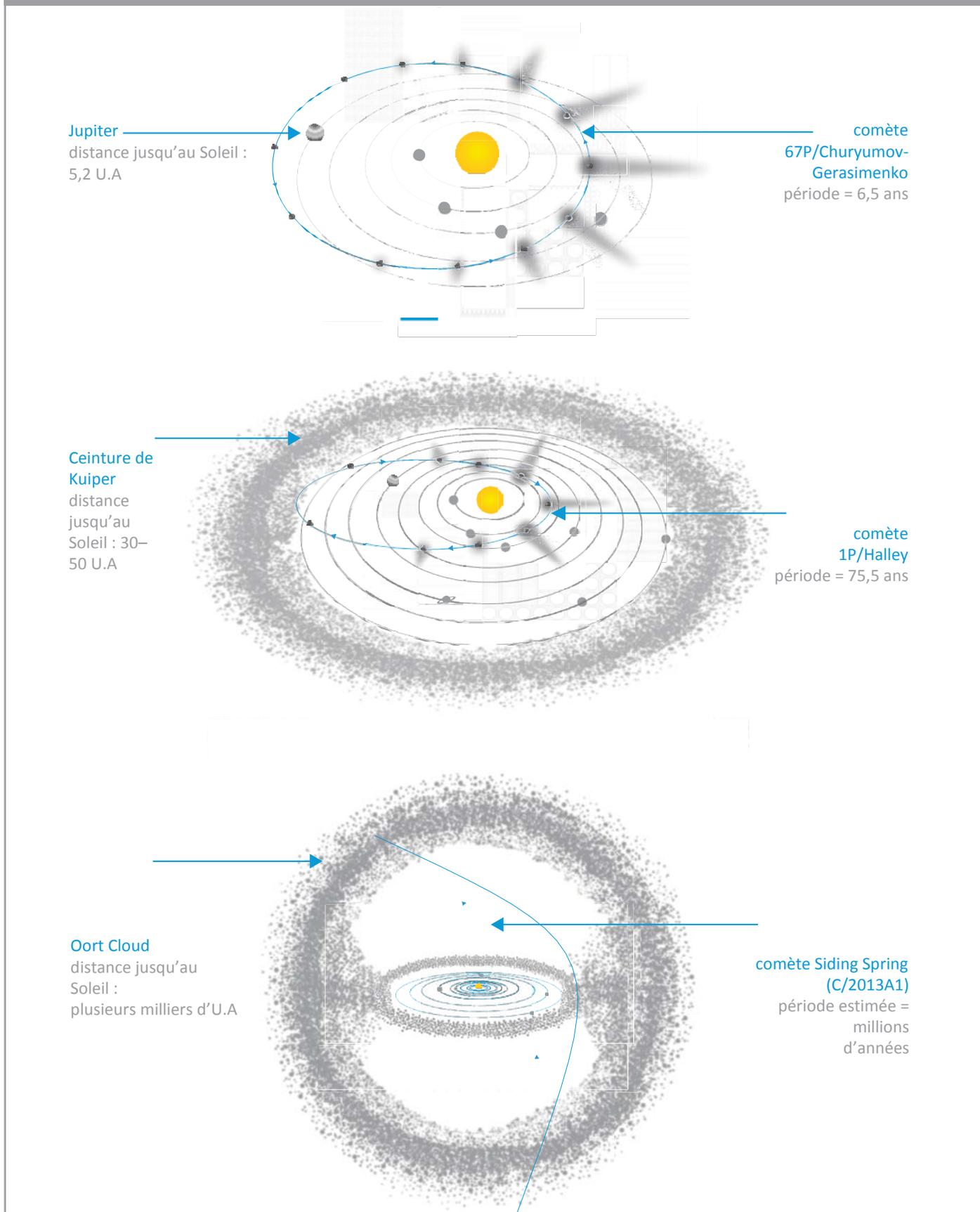
Au fur et à mesure que la comète se rapproche du Soleil, l'interaction de la coma avec le rayonnement solaire qui va en s'intensifiant et le vent solaire produisent les « queues » spectaculaires auxquelles les comètes sont le plus souvent associées. Très occasionnellement, les queues des comètes sont suffisamment brillantes pour être observées en plein jour depuis la Terre.

***Unité astronomique (AU)** : 1 U.A est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, c.-à-d. le rayon orbital de la Terre, qui est d'environ 150 millions de km.

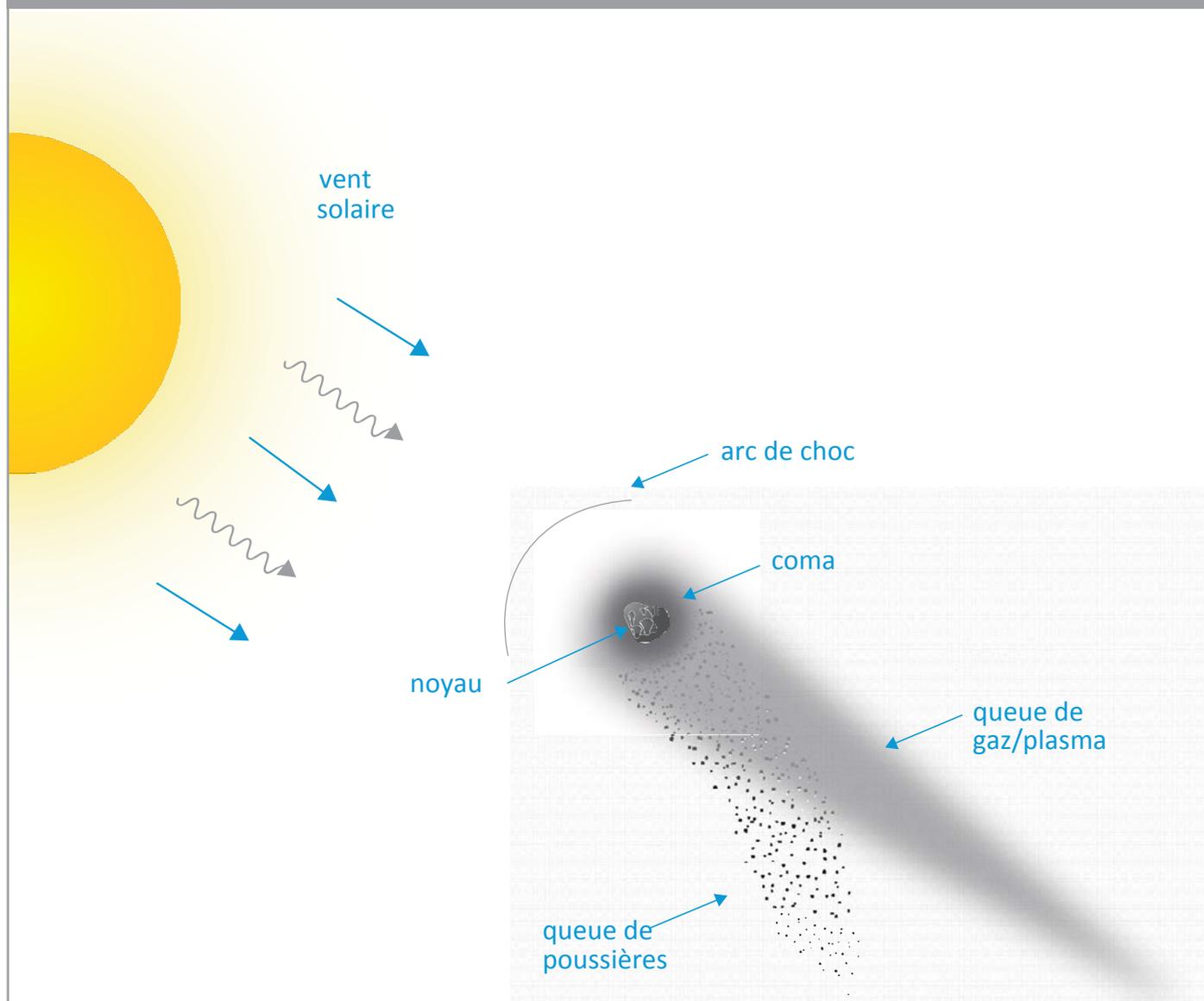
***Perturbations gravitationnelles** : modifications de l'orbite d'un corps céleste (p. ex. : planète, comète) provoquées par des interactions avec les champs gravitationnels d'autres corps célestes (planètes géantes, autres étoiles).

***Vent solaire** : flux de particules de haute énergie (plasma) émis par l'atmosphère supérieure du Soleil dans toutes les directions. Il contient principalement des électrons et des protons.

***Se sublimer (Sublimation)** : en parlant d'une substance, passer directement de la phase solide à la phase gazeuse, sans passer par l'état liquide, sous l'effet de la chaleur. Lorsque le gaz est refroidi, il forme généralement un dépôt solide.



↑ Orbites de comètes dans le Système solaire.



↑ Anatomie d'une comète.

De plus amples détails sur les orbites des comètes sont disponibles dans la section « Discussion ».

Pour plus d'informations sur la structure, la composition et l'importance des comètes, visualisez la ressource « ESA : apprendre avec l'espace – cuisiner une comète | P06 » (reportez-vous à la section Liens).

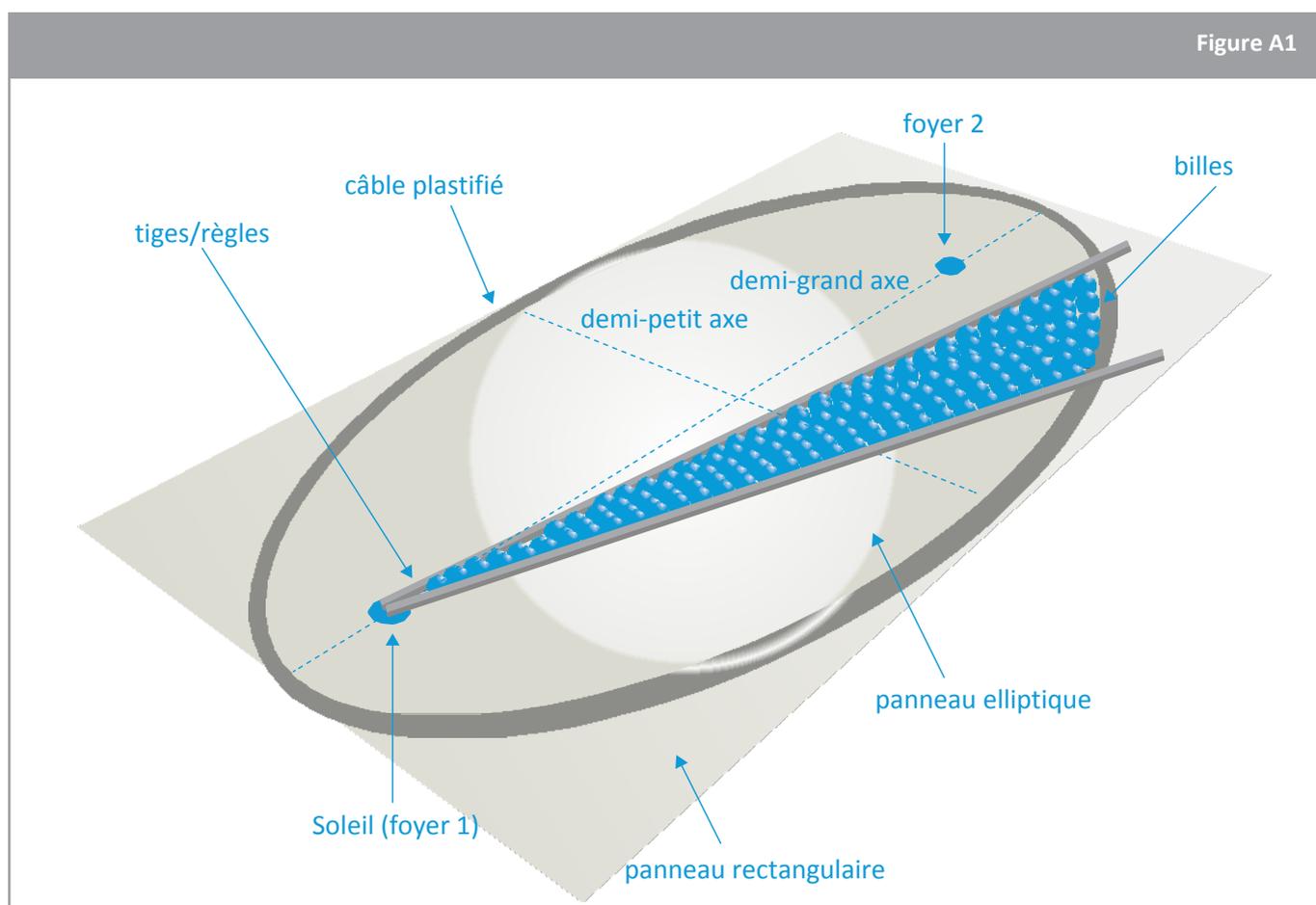
***Arc de choc (comète)** : surface d'interaction entre les ions de la coma de la comète et le vent solaire. L'arc de choc se forme sous l'effet de la vitesse orbitale relative de la comète et du vent solaire supersoniques. L'arc de choc a lieu en amont de la comète, dans la direction d'écoulement du vent solaire. Dans l'arc de choc, de grandes concentrations d'ions cométaires s'accumulent et chargent le champ magnétique solaire avec du plasma. Il en résulte des lignes de champ qui se courbent autour de la comète, emprisonnant les ions cométaires et formant une queue formée de gaz, de plasma et d'ions.

Mesure de Vitesse-Temps (période orbitale) sur un panneau elliptique

Au cours de cette activité, les élèves utiliseront un panneau elliptique pour mesurer la vitesse et la distance d'un objet qui décrit une orbite elliptique. Les résultats seront ensuite reportés sur un graphique Vitesse-Temps afin de comprendre comment la gravité affecte (ou modifie) la vitesse d'un satellite qui décrit une orbite elliptique. Les feuilles de travail et les instructions destinées aux élèves sont fournies plus loin dans le document.

Équipement

- Panneau elliptique (fabriqué à l'avance) ; pour obtenir des instructions, reportez-vous à l'annexe : Instructions relatives au modèle de panneau elliptique
- Environ 75 petites billes (le remplissage de l'extrémité pointue du coin avec quelques billes est utile)
- 2 règles ou tiges
- 50 cm de ficelle
- Marqueur non permanent



↑ Configuration de l'expérience. Pour obtenir des instructions de construction du panneau, reportez-vous à l'annexe : Instructions relatives au modèle de panneau elliptique.

La sécurité avant tout

Il s'agit d'une activité à très faible risque. Aucune précaution particulière n'est à prendre.

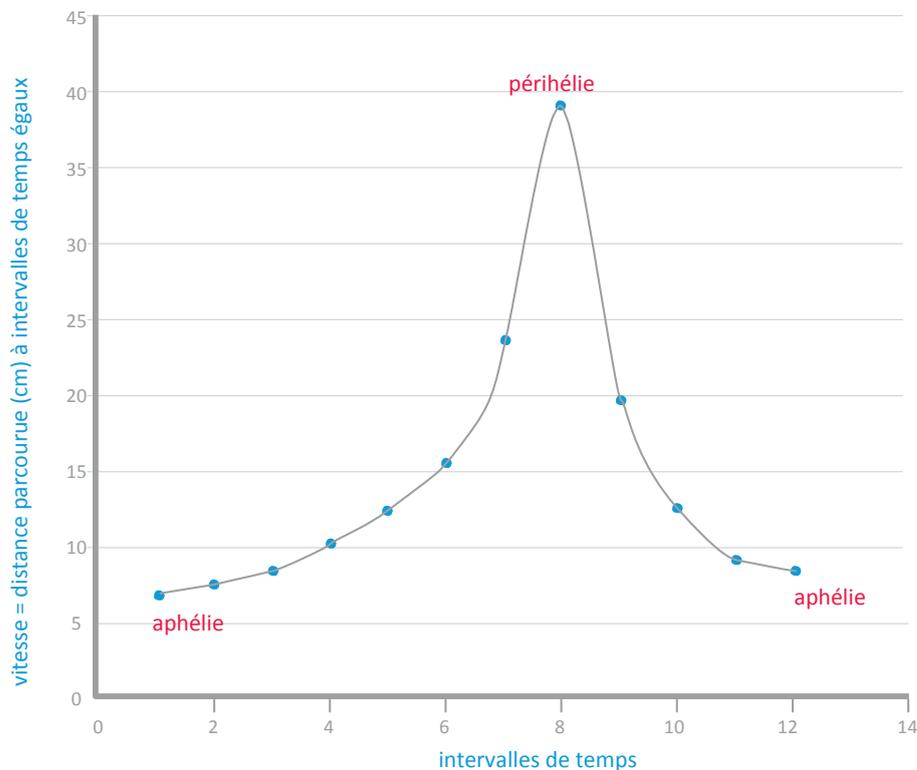
Instructions

Remarque : le panneau elliptique représente la trajectoire d'une comète en orbite autour du Soleil.
 Référez-vous également à la vidéo ci-jointe : ESA : apprendre avec l'espace – les ellipses | VP02

1. À l'aide d'un stylo non permanent, marquez un point de l'ellipse aussi loin que possible du Soleil (foyer) l'aphélie. Placez l'extrémité d'une règle ou d'une tige sur ce point qui représente le Soleil (foyer 1). Cette règle/tige pivotera autour du Soleil (foyer 1) tout au long de l'expérience. Reportez-vous à la figure A1.
2. Placez une deuxième règle/tige sur un côté du modèle, avec une extrémité sur le Soleil (foyer 1). Cette règle/tige pivotera également autour du Soleil (foyer 1) tout au long de l'expérience. Placez les billes dans l'espace créé entre les deux règles/tiges. Déplacez la deuxième règle/tige jusqu'à ce que les billes soient « bloquées » dans l'espace. Faites une deuxième marque à l'intérieur du point d'intersection de la deuxième règle/tige sur l'ellipse. Notez que le nombre de billes utilisées déterminera le nombre de mesures à effectuer – moins de billes obligera à relever plus de points de données.
3. Déplacez les deux règles autour de l'ellipse jusqu'à ce que la première règle soit à l'endroit où la deuxième règle se trouvait à l'origine (la deuxième règle se trouve plus loin le long de l'ellipse). Ensuite, déplacez la deuxième règle jusqu'à ce que les billes soient « bloquées » dans l'espace entre les deux règles, comme à l'étape 2 (Figure A1). Encore une fois, faites une marque à l'intérieur du point d'intersection de la deuxième règle/tige sur l'ellipse.
4. Répétez l'étape 3 jusqu'à ce que l'ellipse entière ait été couverte.
5. Utilisez une ficelle pour mesurer les distances autour du bord extérieur de l'ellipse entre les marques. Consignez ces valeurs dans un tableau avec les intervalles de temps (le nombre de zones mesurées – la première zone étant l'intervalle 1, la deuxième zone l'intervalle 2, etc.). Les distances mesurées fournissent les vitesses, car elles représentent la distance parcourue sur des intervalles de temps égaux.
6. Tracez un graphique Vitesse (distances mesurées)-Temps (nombres d'intervalles) pour chaque section. La figure A2 montre un exemple de tableau et de graphique. Le gradient de la courbe/ligne dans le graphique dépend de l'excentricité de l'ellipse – une ellipse plus excentrique produira un gradient plus raide (plus « pentu »), tandis qu'une ellipse moins excentrique (donc plus circulaire) produira un pic moins défini.
7. Notez que plus le panneau est elliptique, plus le gradient du graphique Vitesse-Temps est raide (plus « pentu »).

Figure A2

numéro de zone	distance
intervalles de temps	Vitesse
1	6,7
2	7,5
3	8,4
4	10,1
5	12,2
6	15,5
7	23,6
8	39,2
9	19,8
10	12,5
11	9,2
12	8,4



↑ Exemple de tableau et de graphique.

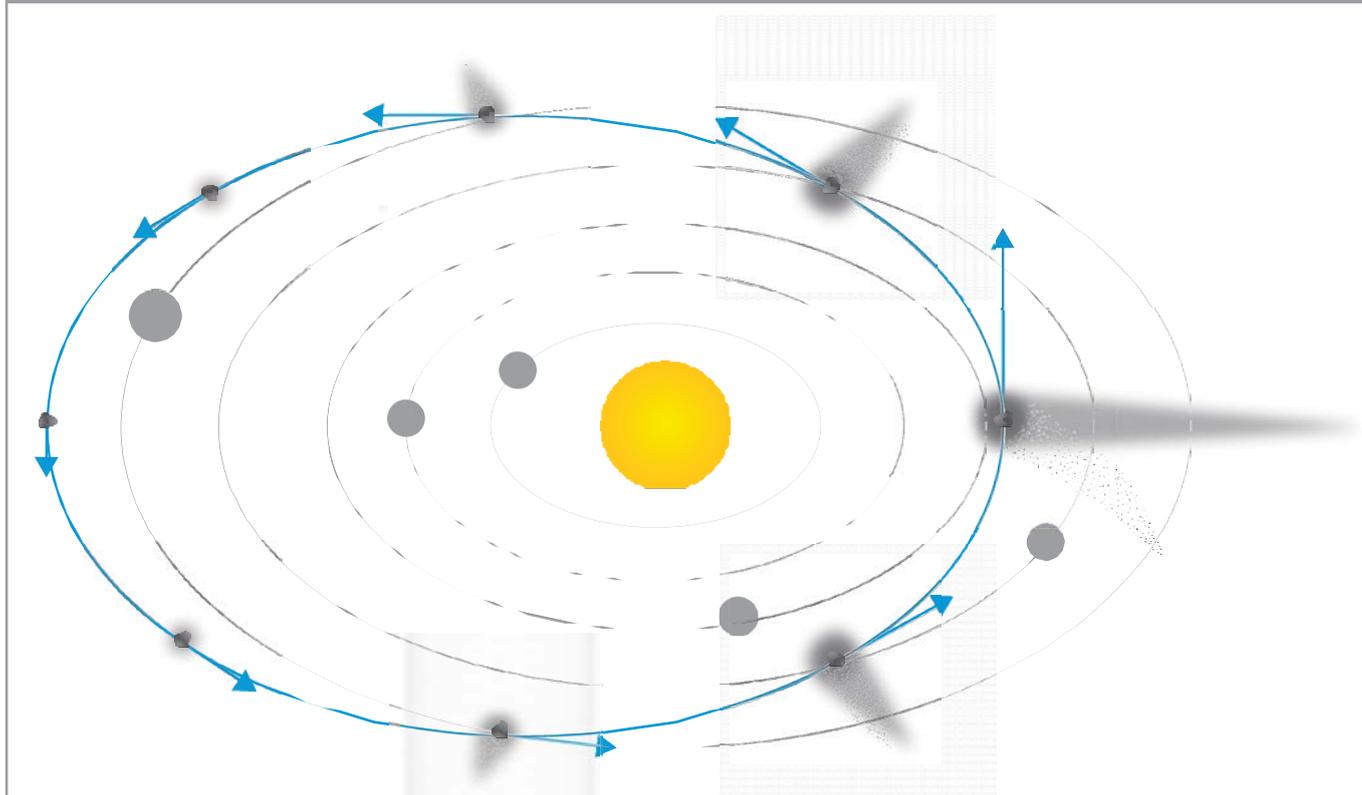
Discussion

Observations de comètes et explications

Une comète subit une force d'attraction due à la gravité qui attire sa masse en direction du Soleil.

La trajectoire suivie par une comète dépend de deux facteurs : sa vitesse et sa direction initiale. Pour qu'un objet décrive une orbite autour d'un autre, une force centripète (c.-à-d. une force agissant en direction du foyer occupé par le Soleil) est nécessaire pour modifier constamment la trajectoire du mouvement orbital, accélérant ou décélérant le corps en orbite dans ce processus (Figure A3).

Dans une orbite stable, l'attraction gravitationnelle du Soleil fait accélérer la comète, augmentant sa vitesse jusqu'à ce qu'elle atteigne le périhélie. Une fois le périhélie dépassé, l'attraction gravitationnelle du Soleil s'oppose alors au mouvement de la comète, la faisant décélérer et perdre de sa vitesse.



↑ Comment le vecteur de vitesse (flèches bleues) d'une comète en orbite autour du Soleil change selon la position orbitale. Cette variation est due à l'accélération centripète fournie par l'attraction gravitationnelle du Soleil. Le changement au niveau de la queue de la comète est également illustré.

Si la comète suivait une orbite circulaire, l'accélération centripète serait en permanence perpendiculaire (à 90°) à la vitesse de la comète. Dans une orbite elliptique, l'angle entre l'accélération centripète et la vitesse varie. C'est cette variation de l'accélération centripète qui conduit aux variations de vitesse d'un corps qui décrit une orbite elliptique.

Que nous apprend le gradient de la ligne (Figure A2) à n'importe point ?

Puisque le gradient d'un graphique Vitesse-Temps fournit le taux de variation de la vitesse, le gradient de la ligne est une mesure de l'accélération de la comète à ce point. L'accélération (gradient) maximale se produit lorsque la comète s'approche du périhélie – le point de l'orbite où elle se déplace à la vitesse la plus élevée. Une fois le périhélie dépassé, la comète connaîtra une décélération maximale, ralentissant jusqu'à atteindre l'aphélie – le point de l'orbite où elle se déplace à la vitesse la plus basse.

Que nous apprend l'aire sous le graphique?

L'aire sous le graphique montre la distance parcourue par la comète. Il est facile de voir qu'à mesure que la comète approche du périhélie, la distance parcourue par la comète par intervalle de temps augmente en raison de sa vitesse croissante. De même, lorsque la comète approche de l'aphélie, elle se déplace à une vitesse inférieure et couvre donc une distance plus courte par intervalle de temps.

Discussion

L'activité peut être approfondie en discutant des paramètres qui affectent l'orbite, tels que la vitesse et la direction d'origine du corps orbite, la masse du corps en orbite et l'étoile centrale.

Pour plus d'informations, visualisez la vidéo éducative « Albert Einstein » de l'ATV-4 (reportez-vous à la Liens).

Les élèves peuvent également utiliser la troisième loi de Kepler pour analyser l'effet du demi-grand axe (r) sur la période orbitale d'une comète.

Troisième loi de Kepler

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM} \right) a^3$$

T = période de temps pour une révolution

a = rayon moyen de l'orbite

G = constante gravitationnelle universelle

M = masse du Soleil

Plus le demi-grand axe est long, plus la période orbitale est longue. Ceci est également observé avec les planètes du Système solaire : plus une planète est éloignée du Soleil, plus sa période est longue.

Considérations sur l'énergie et les objets géocroiseurs

Au fur et à mesure que la comète se déplace le long de sa trajectoire elliptique, elle subit un cycle continu d'énergie potentielle gravitationnelle qui se trouve transférée en énergie cinétique (lorsqu'elle se dirige vers le Soleil), et inversement (en s'éloignant du Soleil). La figure A5 montre comment l'énergie potentielle cinétique et gravitationnelle d'un corps en orbite varie tout au long de sa trajectoire orbitale.

Comme l'énergie totale de la comète doit rester constante, cela signifie que : **Énergie**

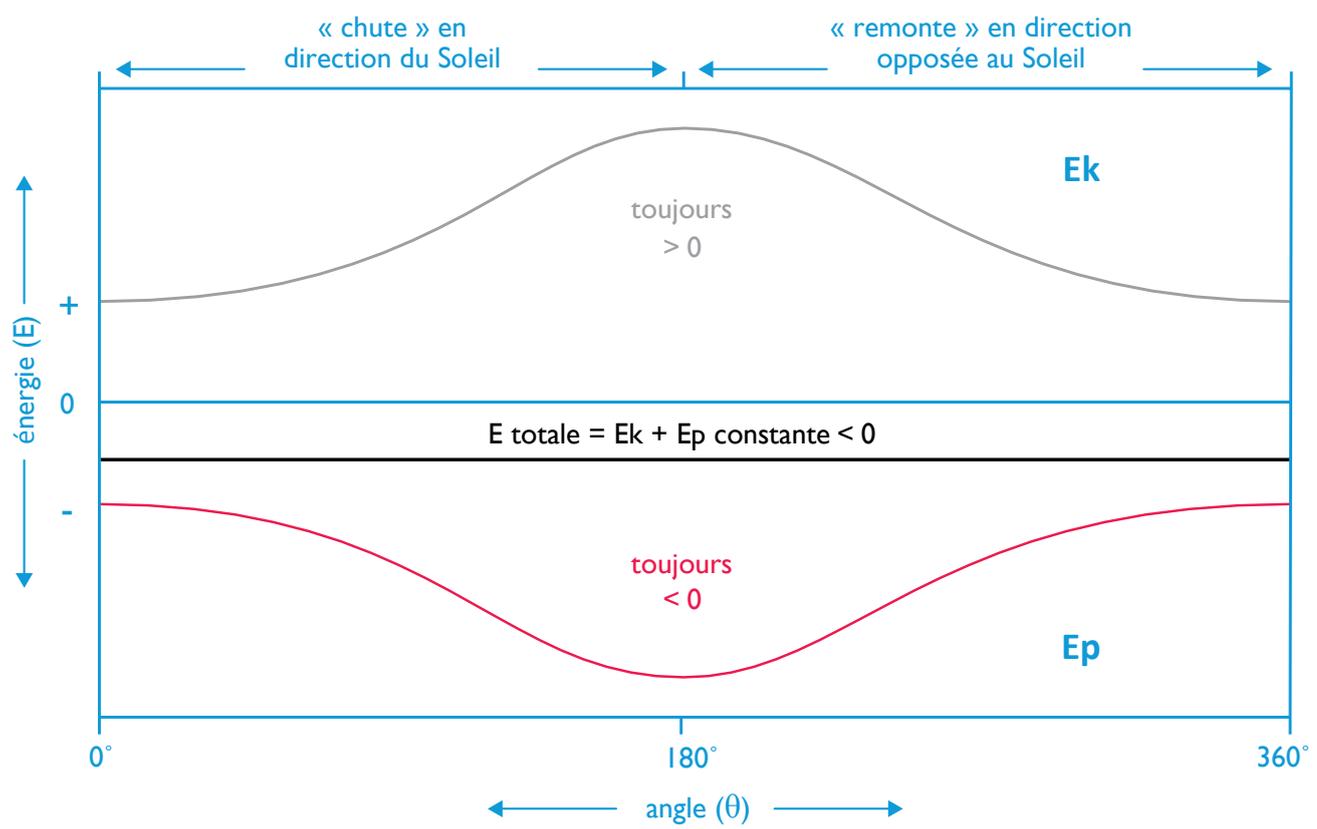
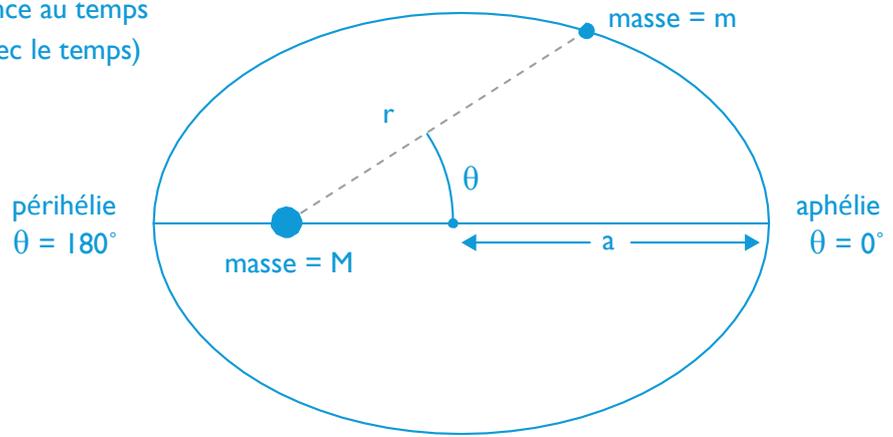
$$\text{cinétique (EK) + Énergie potentielle gravitationnelle (EP) = constante}$$

Grâce à ces informations et à la possibilité de calculer les paramètres d'une orbite à partir des lois de Kepler, les scientifiques du Centre de coordination des objets géocroiseurs de l'ESA (NEOCC) près de Rome (Italie) peuvent calculer l'énergie cinétique d'une comète ou d'un astéroïde à n'importe quel point de son orbite.

Ceci est important, car, occasionnellement, l'orbite elliptique d'une comète ou d'un astéroïde et l'orbite de la Terre peuvent se chevaucher, ce qui peut entraîner une collision. En étendant les lois de Kepler et en utilisant les équations sur l'énergie potentielle gravitationnelle et l'énergie cinétique, il est possible d'évaluer l'impact potentiel d'une collision.

Figure A4

a = demi-grand axe d'orbite
 $r(t)$ = distance au temps
 t (change avec le temps)



↑ Comment l'énergie cinétique et potentielle d'un corps en orbite est modifiée selon la position orbitale. L'énergie totale restera toujours constante.

→ CONCLUSION

Comprendre la nature des orbites est essentiel pour expliquer le mouvement des corps célestes observés. En associant les lois de Kepler aux concepts d'énergie potentielle cinétique et gravitationnelle, nous pouvons non seulement prévoir les orbites des comètes et tous les effets potentiels d'une collision, mais aussi modéliser la danse orbitale complexe qu'un engin spatial tel que Rosetta doit exécuter afin de remplir sa mission : améliorer nos connaissances sur l'espace. Cette activité permet également à un enseignant enthousiaste de discuter et de développer des compétences pratiques chez ses élèves telles que la précision (notamment la précision des mesures), la création de tableaux de planification, de graphiques précis et de lignes bien ajustées permettant d'expliquer la signification des gradients.

Tracez un graphique Vitesse (axe y)-Temps (axe x). Vous pouvez le réaliser sur du papier millimétré ou utiliser une feuille de calcul électronique. Étiquetez l'aphélie et le périhélie.

Assurez-vous que le graphique est suffisamment grand pour remplir le papier.

Dessinez une ligne courbe bien ajustée qui représente le mouvement de la comète.

Lisez les questions suivantes, puis écrivez une conclusion qui explique la forme du graphique ; essayez de répondre à autant de questions que possible.

Questions

1. Le gradient de la ligne est une mesure de l'accélération de la comète. Une pente descendante montre une décélération. Quelles modifications du gradient observons-nous au cours de l'orbite ?
2. L'aire sous le graphique représente la distance parcourue par la comète. Cette distance change-t-elle ? Pourquoi ?
3. À quel endroit de l'orbite la comète se déplace-t-elle le plus vite ? À quel endroit se déplace-t-elle le plus lentement ? Pourquoi ?
4. La gravité est plus forte près du Soleil et plus faible loin du Soleil. Comment la gravité affecte-t-elle la vitesse de la comète ?
5. Quels changements d'énergie ont lieu au cours d'une orbite ?
6. Quelle différence serait observée si la comète suivait une orbite ayant une plus grande excentricité ?
7. Les planètes sont également en orbite autour du Soleil et possèdent leurs propres champs gravitationnels. Comment peuvent-elles affecter la trajectoire d'une comète ?

→ LES MISSIONS @ ESA

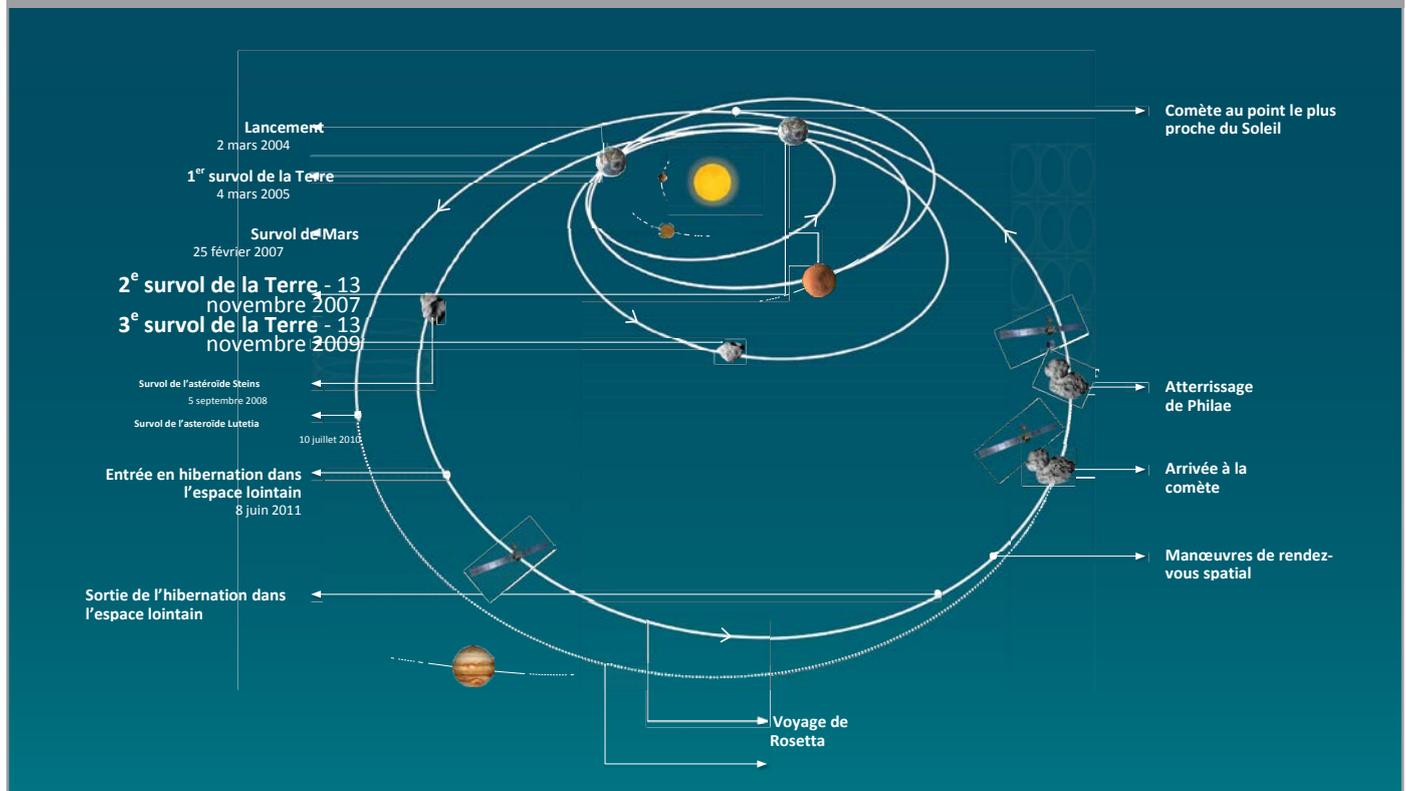
Rosetta

La sonde spatiale de la mission Rosetta de l'ESA a été lancée en 2004 et a parcouru l'espace pendant 10 ans avant de rejoindre la comète 67P/Churyumov-Gerasimeko – et, au final, de se poser sur son noyau.

L'objectif premier de Rosetta est de contribuer à la compréhension de l'origine et de l'évolution du Système solaire. La composition d'une comète reflète celle de la nébuleuse pré-solaire à partir de laquelle le Soleil et les planètes du Système solaire se sont formés il y a plus de 4,6 milliards d'années. Une analyse approfondie de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko par Rosetta et son atterrisseur Philae fournira des informations cruciales sur la formation du Système solaire.

Il existe des éléments probants sur le rôle essentiel que les comètes ont joué dans l'évolution des planètes, car au début du Système solaire, les collisions de comètes avec d'autres corps célestes étaient beaucoup plus fréquentes qu'aujourd'hui. Les comètes, par exemple, ont pu amener l'eau sur la Terre. La chimie de l'eau présente sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko sera analysée pour voir si elle est identique à celle des océans de la Terre. En plus de la glace et des poussières, les comètes contiennent de nombreuses molécules complexes, y compris des matériaux organiques qui peuvent avoir joué un rôle crucial dans l'évolution de la vie sur Terre.

Figure 12



↑ La sonde spatiale Rosetta de l'ESA a effectué une série d'« effets de fronde gravitationnelle » planétaires afin d'atteindre sa destination.

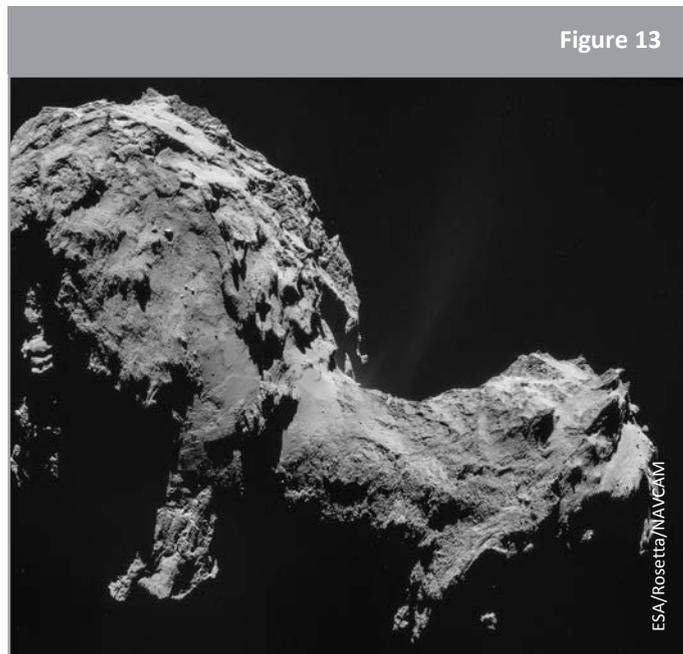
***Survол** : passage d'un engin spatial à proximité immédiate d'une planète ou d'un autre corps céleste. Lorsqu'un engin spatial utilise le champ gravitationnel d'un corps céleste pour augmenter sa vitesse et changer sa trajectoire, il s'agit d'une « manœuvre d'assistance gravitationnelle » appelée également « effet de fronde gravitationnelle ».

Pour arriver jusqu'à la comète, la sonde spatiale Rosetta a dû effectuer une série d'effets de fronde gravitationnelle, utilisation la gravité de divers corps céleste pour accélérer (Figure 12). Pour pouvoir s'enfoncer plus profondément dans l'espace, Rosetta a dû effectuer quatre effets de fronde gravitationnelle, dont trois **survol**s* à proximité de la Terre, et un survol de Mars. Chaque effet de fronde gravitationnelle a modifié l'énergie cinétique de Rosetta, changeant par conséquent sa vitesse et les dimensions de l'orbite elliptique.

En raison de la durée de son voyage, Rosetta a été mise en mode d'hibernation en juin 2011 afin de limiter sa consommation d'énergie et de carburant, et de minimiser les coûts d'exploitation. Presque tous les systèmes électriques de Rosetta ont été éteints, à l'exception de l'ordinateur et de plusieurs appareils de chauffage.

En janvier 2014, par une procédure interne préprogrammée, Rosetta a été délicatement réveillée en vue de sa rencontre avec la comète 67P/Churyumov-Gerasimeko. Après le réveil, les 11 instruments scientifiques de la sonde orbitale et les 10 instruments de son atterrisseur Philae ont été réactivés et préparés pour les observations scientifiques. Ensuite, une série de dix manœuvres critiques de correction orbitale ont été réalisées afin de réduire la vitesse de la sonde spatiale par rapport à la vitesse de la comète, et de faire ainsi coïncider leurs orbites elliptiques.

Arrivée à proximité de la comète 67P/Churyumov-Gerasimeko le 6 août 2014, la sonde Rosetta a commencé à effectuer d'autres manœuvres pour se placer en « orbite » autour du noyau de la comète. Depuis ce point de vue, l'ensemble des instruments de Rosetta ont fourni une étude scientifique détaillée de la comète, examinant et cartographiant la surface avec une richesse de détails inégalée (Figure 13).

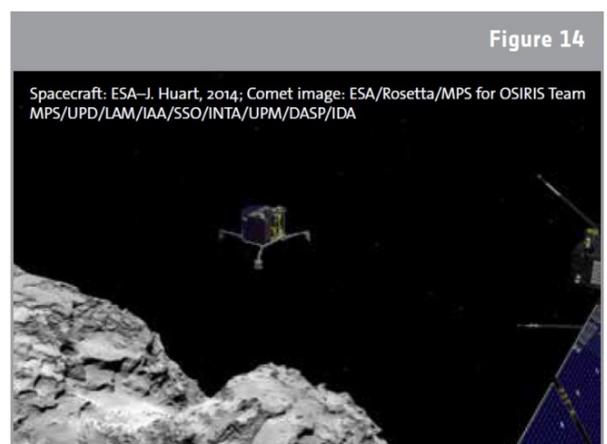


↑ Mosaïque NAVCAM de quatre images de la comète 67P/Churyumov Gerasimenko prises le 19 septembre 2014 lorsque Rosetta était à 28,6 km de la comète.

Après l'atterrissage, Rosetta a continué à accompagner la comète tout au long de son périple elliptique. La sonde spatiale Rosetta a accompagné la comète tandis qu'elle accélérât de nouveau vers le Système solaire interne, et a observé de près le réchauffement du noyau de la comète de glace à mesure qu'elle se rapprochait du Soleil..

En novembre 2014, après avoir cartographié et analysé le noyau de la comète pendant plusieurs mois, Rosetta a déployé son atterrisseur Philae pour tenter le premier atterrissage sur le noyau d'une comète. En raison de la faible gravité de la comète, Philae était muni de harpons et de vis à glace pour s'accrocher à la surface. La Figure 9 montre une reproduction artistique de Rosetta déployant Philae sur la comète.

L'atterrisseur Philae utilise 10 instruments (dont un foret) permettant de collecter des échantillons de surface, et des **spectromètres*** pouvant analyser directement la structure et la composition de la comète.



↑ Le module atterrisseur Philae fournira des informations sans précédent sur la surface et la structure interne d'une comète.

La Station spatiale internationale et le véhicule de transfert automatique

En partenariat avec les États-Unis, la Russie, le Japon et le Canada, l'Europe participe au plus grand projet international de tous les temps : la Station spatiale internationale. La Station spatiale internationale (l'ISS, Figure 15) de 360 tonnes dispose de plus de 820 m³ d'espace pressurisé – ce qui lui permet d'accueillir un équipage de six personnes et une vaste gamme d'expériences scientifiques. La construction de la station a débuté en novembre 1998 avec le lancement du module russe Zarya. Le dernier grand élément de la station spatiale livré par une navette spatiale était le spectromètre magnétique Alpha « AMS-02 » en mai 2011.

Avec la complétion de la Station spatiale qui accueille en permanence six astronautes, jamais autant de moyens n'ont été consacré à des expériences qui ne peuvent pas être réalisées sur Terre.

L'Europe a contribué principalement au module Columbus, la principale ressource de recherche pour les données utiles européennes à bord de l'ISS. Columbus comprend un laboratoire générique ainsi que des installations spécialement conçues pour la biologie, la recherche biomédicale et la physique des fluides.

Les domaines d'études scientifiques sont nombreux et variés – allant de la physique fondamentale à la physiologie humaine, des nouveaux alliages aux racines des plantes. Le programme implique quelque 1500 scientifiques travaillant sur des centaines d'expériences, ainsi qu'un groupe important et diversifié de spécialistes du développement industriel et de la recherche. Ainsi, l'ISS fournit aux chercheurs et à la communauté médicale les moyens de mener des investigations sur plusieurs années, dans un environnement de microgravité uniforme.

Figure 15



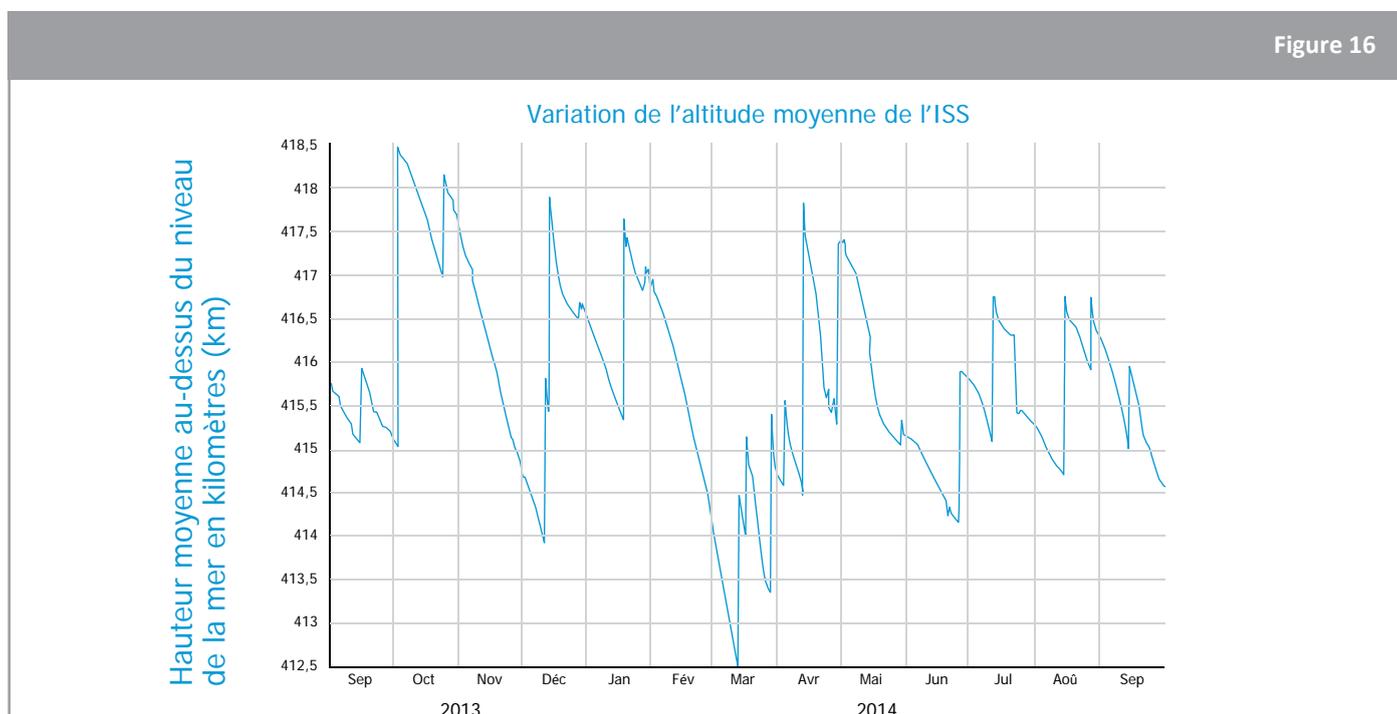
↑ Véhicule de transfert automatique amarré à la Station spatiale internationale.

Grâce à son **inclinaison*** spécifique, l'ISS peut également observer 90 % de la surface de la planète habitée (75 % de la surface de la Terre), ce qui en fait un précieux avant-poste pour la surveillance de la Terre et du climat. L'activité solaire et le rayonnement cosmique sont également des sujets d'investigation de l'ISS, grâce aux capacités d'expérimentation externes.

Bien que chaque partenaire de la Station Spatiale ait des objectifs de recherche distincts, tout le monde partage un objectif : accroître les connaissances scientifiques et techniques afin d'améliorer de la qualité de vie sur la Terre et au-delà.

Le deuxième élément de contribution européenne le plus important en lien avec l'ISS, après le module Columbus, est le véhicule de transfert automatique (ATV), un engin de ravitaillement mis en orbite par un lanceur Ariane-5. L'ATV transporte jusqu'à 7 tonnes de marchandises, y compris des provisions, des éléments utiles aux projets scientifiques, et un agent propulseur. Une fois amarré, l'engin peut utiliser ses moteurs pour entraîner la station vers une orbite d'altitude plus élevée, contrecarrant ainsi la faible force de traînée de l'atmosphère de la Terre. Le premier engin spatial, l'ATV Jules Verne, a été lancé en 2008, suivi de l'ATV Johannes Kepler lancé en 2011. Le troisième engin spatial, l'ATV Edoardo Amaldi, a été lancé en 2012, tandis que le quatrième de la série, l'ATV Albert Einstein, était lancé en 2013. Le cinquième et dernier engin spatial, l'ATV Georges Lemaître, a été lancé en juillet 2014.

La Station spatiale internationale tourne à une **altitude*** bien précise, à une inclinaison particulière par rapport à l'équateur de la Terre, et selon une certaine **attitude***. L'ATV est un précieux auxiliaire pour l'ISS, car il modifie son altitude (le sujet de cette ressource) et son attitude.



↑ La plage d'altitude de l'ISS au cours de cette période était plus élevée que la normale, en raison de la capacité de rehaussement de l'AVT.

***Altitude** : Hauteur de l'ISS par rapport au niveau de la mer.

***Attitude** : orientation de l'ISS par rapport à sa trajectoire orbitale.

***Inclinaison** : angle du plan de l'orbite de l'ISS par rapport à l'équateur terrestre.

L'altitude de l'ISS est déterminée principalement en tenant compte de considérations de sécurité et de logistique. Elle doit être suffisamment basse pour optimiser les vols de transport, tout en étant maintenue au-dessus de 278 km (altitude de récupération minimum) pour éviter le risque de rentrée dans l'atmosphère terrestre. Le profil d'altitude de l'ISS est également géré pour économiser l'agent propulseur et minimiser l'exposition de l'équipage aux rayonnements.

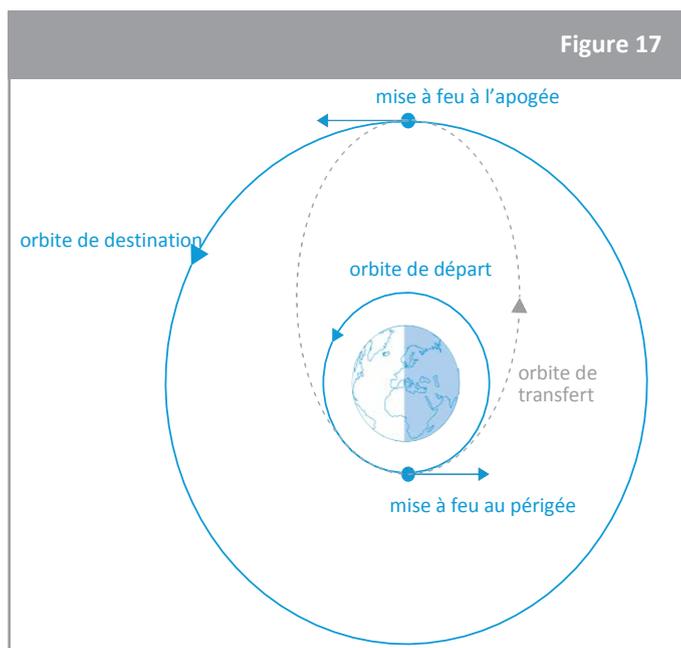
À environ 400 km d'altitude, la traînée atmosphérique de la Terre fait baisser l'ISS d'environ 100 à 200 m par jour. La variation du taux de descente est causée par des changements dans la densité de l'atmosphère extérieure – une conséquence de l'activité solaire.

Les engins spatiaux visiteurs, tels que les ATV, les vaisseaux Progress ou Soyuz, sont utilisés pour rehausser l'altitude dans le but de contrer la dégradation, ou parfois d'éviter les débris spatiaux. Le segment russe de l'ISS dispose également de propulseurs permettant à la station de modifier légèrement son altitude lorsqu'aucun engin visiteur n'est présent. Les rehaussements d'altitude se produisent tous les 10 à 80 jours.

La variation d'altitude de l'ISS entre septembre 2013 et septembre 2014 est illustrée à la figure 16.

Chaque rehaussement orbital est un processus effectué en plusieurs étapes comprenant deux mises à feu successives diamétralement opposées (voir la figure 17).

La première mise à feu augmente l'excentricité de l'orbite, tandis que la seconde la diminue (tout en conservant une altitude plus élevée), pour un résultat d'altitude net accru et une vitesse réduite suivant la troisième loi de Kepler. Des procédures similaires sont utilisées pour les manœuvres d'évitement de collision, de sorte que les rehaussements sont effectués bien à l'avance pour augmenter l'altitude de la station et maximiser ainsi la distance entre l'objet étranger et la station.



↑ Le rehaussement orbital est un processus en plusieurs étapes comprenant 2 mises à feu successives diamétralement opposées. L'orbite de transition est connue sous le nom d'orbite de transfert ou orbite de Hohmann.

→ ANNEXE

Instructions relatives au modèle de panneau elliptique

Cette section fournit des instructions qui permettent de fabriquer le panneau elliptique requis pour l'activité.

Équipement

- Carton rigide ou planche de bois
 - si vous choisissez le modèle elliptique en carton, utilisez un carton d'environ 75 cm sur 60 cm
 - n'importe quelle taille de panneau peut être utilisée si vous dessinez l'ellipse en utilisant la méthode illustrée à la figure X1
- Papier ordinaire ou modèle de trajectoire elliptique imprimé/photocopie
- Colle forte
- Stylo ou crayon
- Ficelle (si vous utilisez la méthode de la figure X1)
- 2 épingles
- Cordon ou câble électrique plastifié (d'une épaisseur d'environ 8 mm)
 - 2 m (si vous utilisez le modèle)

Instructions 1

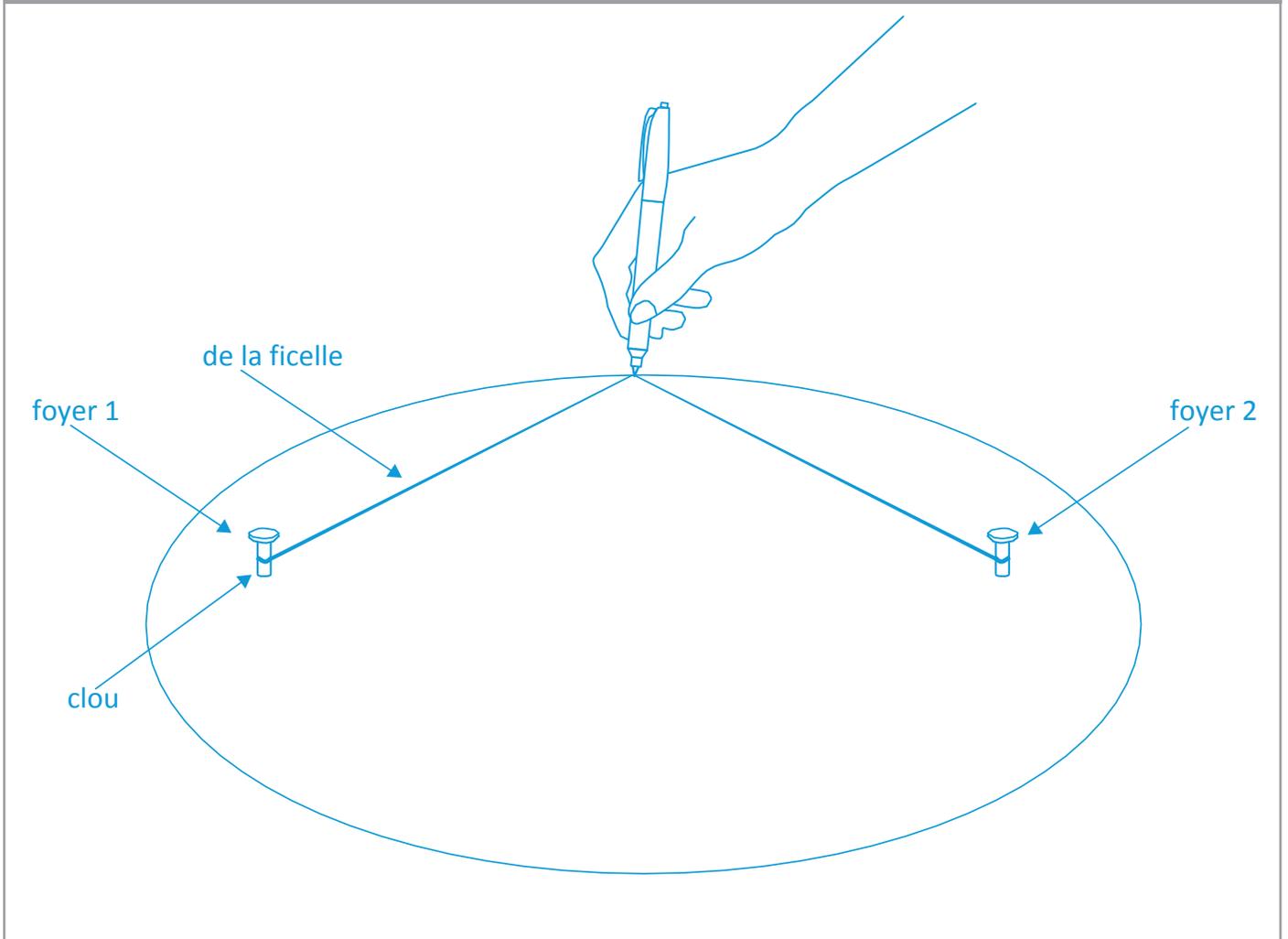
Cette méthode utilise le modèle de panneau elliptique (fourni) en carton.

1. Imprimez (ou copiez et mettez à l'échelle) les pages 29 à 32 au format A3.
2. Collez soigneusement les morceaux de papier ensemble pour former une ellipse.
3. Collez la ficelle ou le câble plastifié sur le carton en suivant le tracé de l'ellipse.

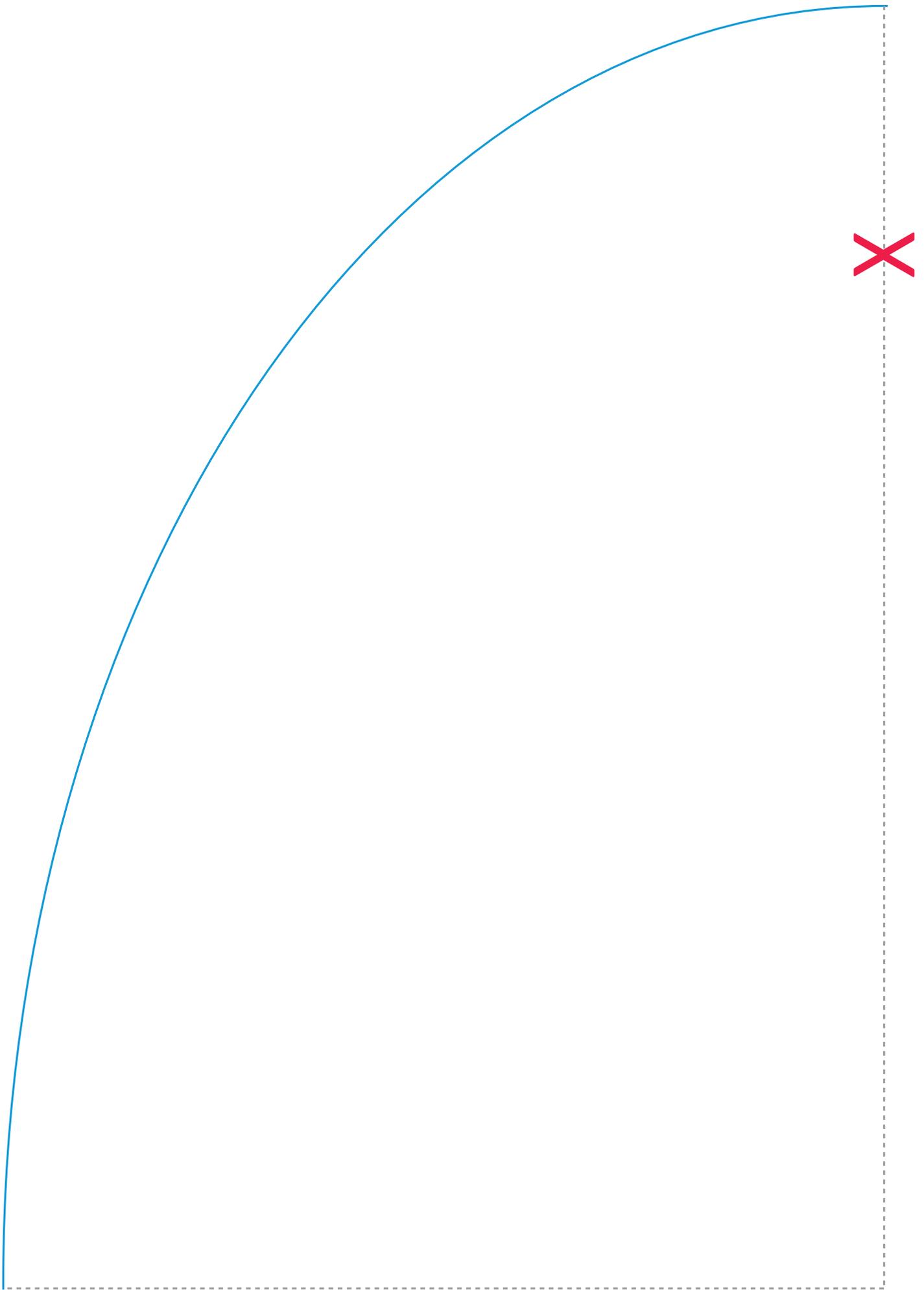
Instructions 2

Cette méthode permet de dessiner l'ellipse à l'aide d'une ficelle.

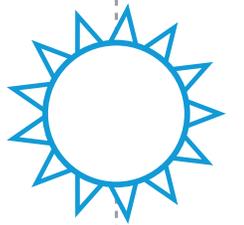
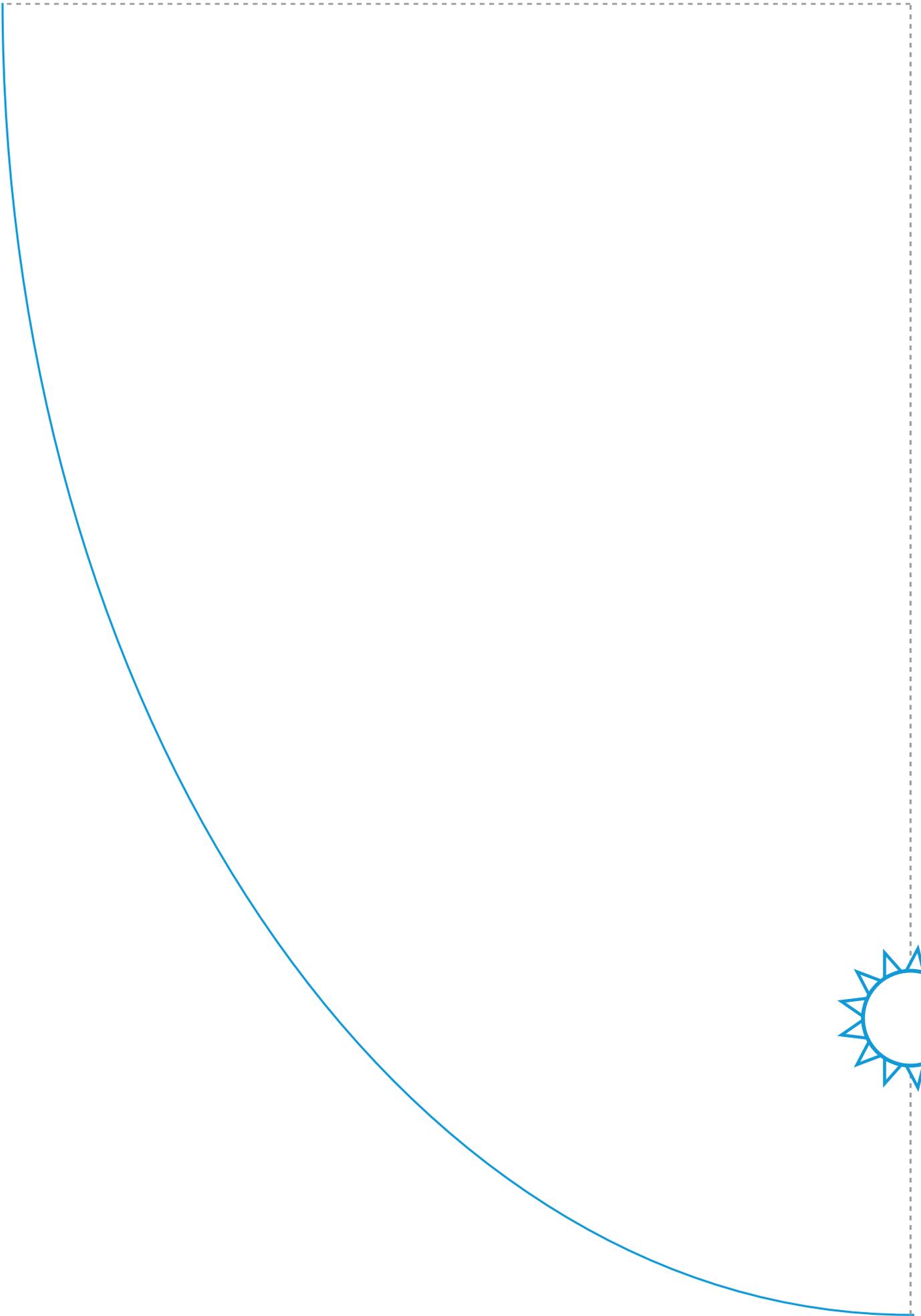
1. Couvrez le carton avec du papier blanc ordinaire.
2. Munissez-vous d'une ficelle. Attachez la ficelle à deux endroits sur la ligne centrale de la planche à l'aide d'épingles (comme illustré à la figure X1).
3. Placez un stylo ou un crayon approximativement à mi-chemin le long de la corde et tirez doucement jusqu'à ce que la corde soit tendue.
4. Déplacez le stylo pour dessiner l'ellipse. La ficelle doit rester tendue.
5. Collez la ficelle ou le câble plastifié sur le carton en suivant le tracé de l'ellipse.

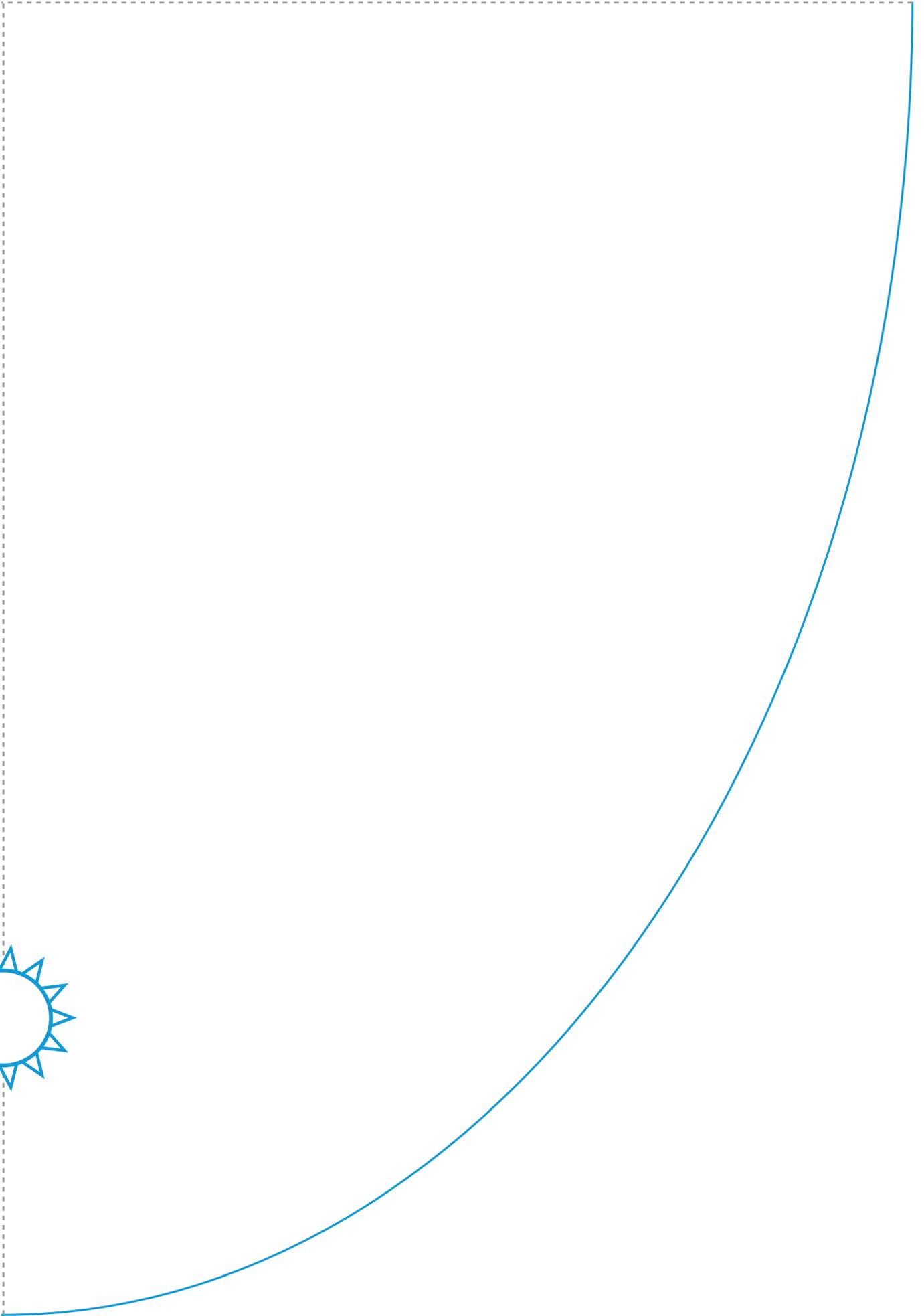
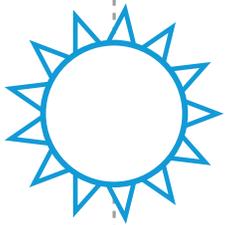


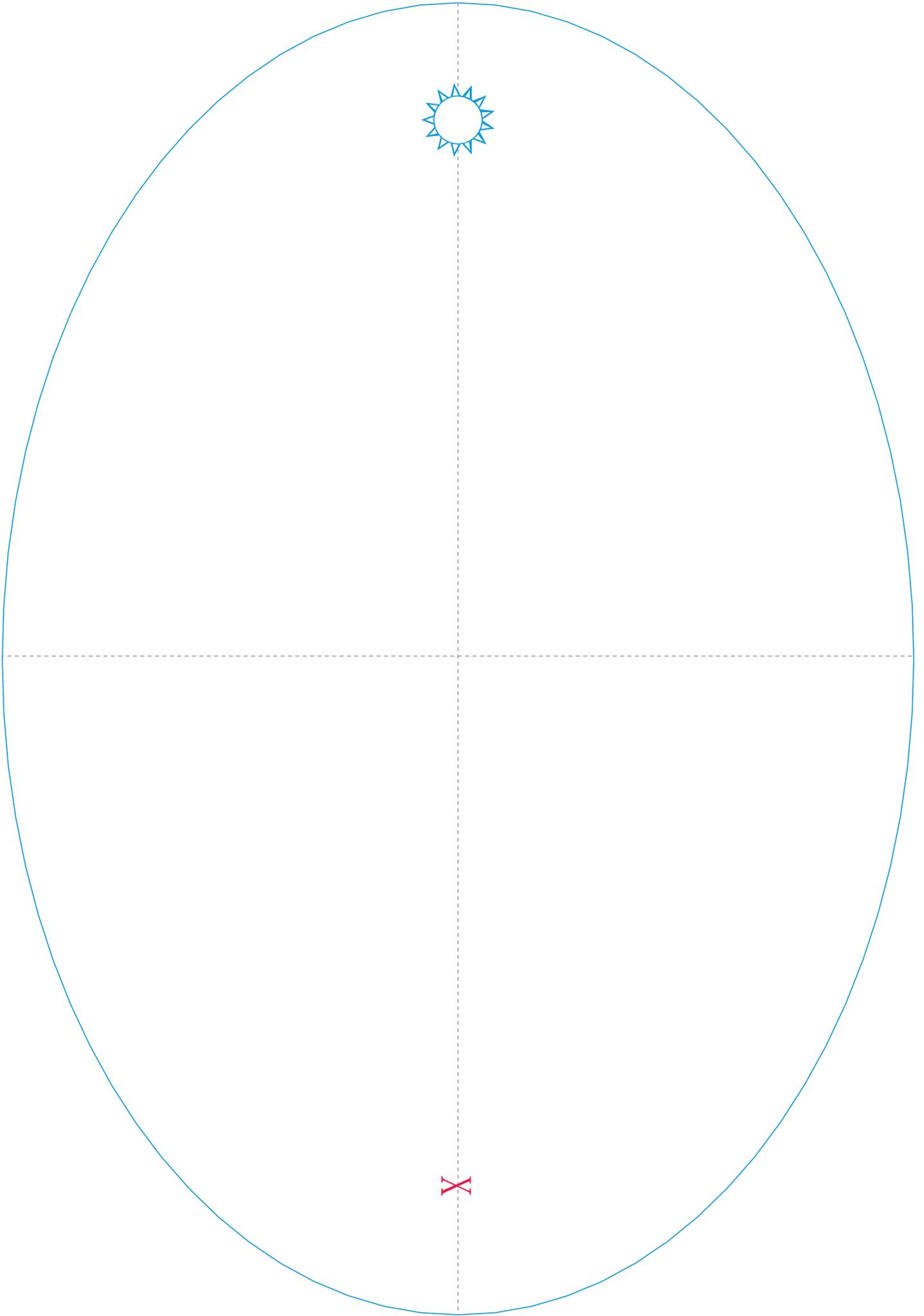
↑ Comment construire une ellipse.











Mesure de Vitesse-Temps (période orbitale) sur un panneau elliptique

Au cours de cette activité, vous utiliserez un panneau elliptique pour mesurer la vitesse et la distance d'une comète qui décrit une orbite elliptique.

Selon la deuxième loi de Kepler sur le mouvement planétaire, une ligne imaginaire reliant une planète et le Soleil « balaie » des zones égales dans des intervalles de temps égaux.

La zone couverte sera représentée à l'aide d'un grand nombre de billes. Vous

devez enregistrer la distance autour de l'orbite pour chaque période de

temps.

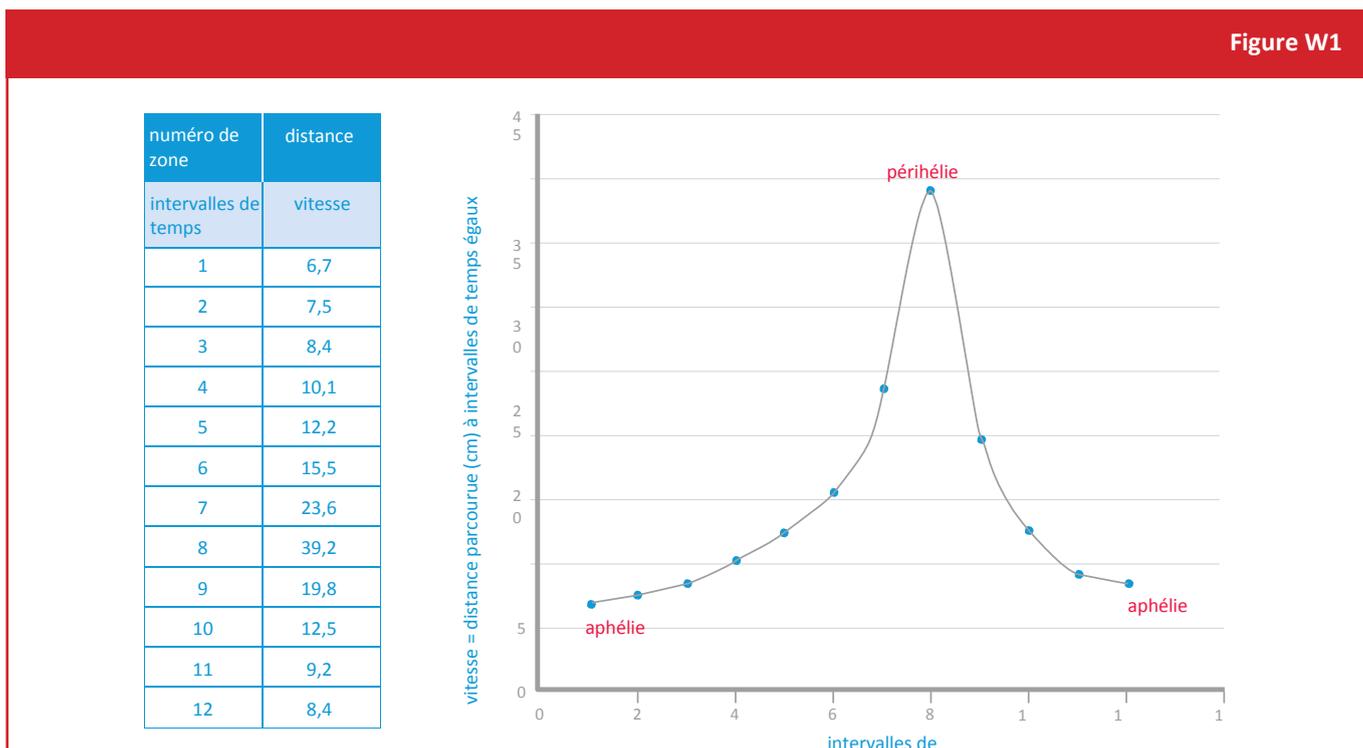
La distance que vous mesurerez représente en fait la vitesse moyenne d'une comète. Tenez compte de ceci : $v=d/t$, où d est la distance en mètres (m), t est le temps en seconde(s) et v est la vitesse en $m\ s^{-1}$.

Consignez vos résultats dans le tableau ci-dessous. Vous devrez choisir vos unités de mesure en fonction de la taille actuelle de votre orbite. Par exemple, dans cette expérience, nous dirons que la période est mesurée en secondes et la vitesse moyenne en cm^{-1} . Le nombre de mesures enregistrées peut varier selon le nombre de billes. Soyez prêts à effectuer une dizaine de mesures.

Tracez un graphique Vitesse (axe y)-Temps (axe x). Vous pouvez le réaliser sur du papier millimétré ou utiliser une feuille de calcul électronique. Étiquetez l'aphélie et le périhélie. Assurez-vous que le graphique est suffisamment grand pour remplir le papier.

Dessinez une ligne courbe bien ajustée qui représente le mouvement de la comète.

Exemples de résultats et conclusion



↑ Exemple de tableau et de graphique.

Lisez les questions suivantes et rédigez une conclusion expliquant la forme du graphique en essayant de répondre à autant de questions que vous le pouvez.

Questions

- Le gradient de la ligne est une mesure de l'accélération de la comète. Une pente descendante montre une décélération. Quelles modifications du gradient observons-nous au cours de l'orbite ?

Figure W1 : Mesures et graphique montrant l'accélération de la comète. Cette figure est identique à celle montrée précédemment dans la ressource (Figure A2). La ligne commence à l'aphélie puis s'élève en un gradient croissant. Cette élévation montre que la comète accélère en raison de l'attraction gravitationnelle du Soleil. Lorsque la comète s'éloigne du Soleil, le gradient diminue et la comète perd de sa vitesse à mesure qu'elle approche du périhélie.
- L'aire sous le graphique représente la distance parcourue par la comète. Cette distance change-t-elle ? Pourquoi ?

L'aire sous le graphique s'agrandit au fur et à mesure que la distance parcourue par la comète par intervalle de temps augmente en raison de sa vitesse croissante. L'énergie potentielle gravitationnelle est transférée à l'énergie cinétique.
- À quel endroit de l'orbite la comète se déplace-t-elle le plus vite ? À quel endroit se déplace-t-elle le plus lentement ? Pourquoi ?

Le graphique (Figure W1) montre un pic d'une vitesse de $39,2 \text{ cm}^{-1}$ à un temps de 8 s au périhélie. Le pic exact du graphique est difficile à déterminer et exigerait plus de points de données dans cette zone, afin d'obtenir un pic plus net. Plus le tableau est elliptique, plus le gradient du graphique Vitesse-Temps est raide (« pentu »). Après le pic, la ligne se dirige vers le bas (le gradient diminue). Cela est dû à la décélération de la comète.
- La gravité est plus forte près du Soleil et plus faible loin du Soleil. Comment la gravité affecte-t-elle la vitesse de la comète ?

Après le pic, la ligne se dirige vers le bas (gradient décroissant). Cela est dû à la décélération de la comète qui ralentit en raison de la plus faible attraction gravitationnelle du Soleil. Une comète se déplace plus vite à mesure qu'elle s'approche du Soleil en raison de la plus forte attraction gravitationnelle du Soleil.
- Quels changements d'énergie ont lieu au cours d'une orbite ?

L'énergie cinétique est transférée à l'énergie potentielle gravitationnelle.
- Quelle différence serait observée si la comète suivait une orbite ayant une plus grande excentricité ?

Si l'excentricité de l'orbite était plus importante, l'orbite serait plus longue et plus étroite. Le pic du graphique serait plus raide (« pointu ») car le changement de vitesse se produirait sur une trajectoire orbitale plus courte.
- Les planètes sont également en orbite autour du Soleil et possèdent leurs propres champs gravitationnels. Comment peuvent-elles affecter la trajectoire d'une comète ?

Si la comète passait près d'une planète, la masse de la planète jouerait également un rôle dans l'intensité de la force gravitationnelle. Par exemple, si la comète passait près de Jupiter, l'effet pourrait être si important que la comète serait attirée par la planète. C'est ce qui est arrivé à la comète Shoemaker Levy 9.

Glossaire

Altitude : Hauteur de l'ISS par rapport au niveau de la mer.

Attitude : orientation de l'ISS par rapport à sa trajectoire orbitale.

Unité astronomique (U.A) : 1 U.A est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, c.-à-d. le rayon orbital de la Terre, qui est d'environ 150 millions de km.

Arc de choc (comète) : surface d'interaction entre les ions de la coma et le vent solaire. L'arc de choc se forme sous l'effet de la vitesse orbitale relative de la comète et du vent solaire supersoniques. L'arc de choc a lieu en amont de la comète, dans la direction d'écoulement du vent solaire. Dans l'arc de choc, de grandes concentrations d'ions cométaires s'accumulent et chargent le champ magnétique solaire avec du plasma. Il en résulte des lignes de champ qui se courbent autour de la comète, emprisonnant les ions cométaires et formant une queue formée de gaz, de plasma et d'ions.

Survол : passage d'un engin spatial autour d'une planète ou d'un autre corps céleste, à proximité. Lorsqu'un engin spatial utilise le champ gravitationnel d'un corps céleste pour augmenter sa vitesse et changer sa trajectoire, il s'agit d'une « manœuvre d'assistance gravitationnelle » appelée également « effet de fronde gravitationnelle ».

Perturbations gravitationnelles : modifications de l'orbite d'un corps céleste (p. ex. : planète, comète) en raison d'interactions avec les champs gravitationnels d'autres corps célestes (planètes géantes, autres étoiles).

Inclinaison : angle du plan de l'orbite de l'ISS par rapport à l'équateur terrestre.

Période orbitale : temps nécessaire pour compléter une orbite.

Mouvement rétrograde d'une planète : mouvement apparent d'une planète dans le ciel nocturne dans la direction opposée au mouvement qui est normalement observé (mouvement prograde).

Vent solaire : flux de particules de haute énergie (plasma) émis par l'atmosphère supérieure du Soleil dans toutes les directions. Il contient principalement des électrons et des protons.

Spectromètre : instrument qui permet de diviser la lumière en ses longueurs d'onde constitutives afin de pouvoir mesurer les propriétés de la source lumineuse.

Se sublimer (Sublimation) : en parlant d'une substance, passer directement de la phase solide à la phase gazeuse, sans passer par l'état liquide, sous l'effet de la chaleur. Lorsque le gaz est refroidi, il forme généralement un dépôt solide.

Liens

Rosetta

Site Web de Rosetta : www.esa.int/rosetta

Blog Rosetta de l'ESA : blogs.esa.int/rosetta/

Vidéos et animations relatives à Rosetta : www.esa.int/spaceinvideos/Missions/Rosetta

Images de Rosetta : [www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/\(class\)/image](http://www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/(class)/image)

Fiche d'informations relatives à Rosetta, incluant le calendrier de la mission :

www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet

L'histoire de Rosetta à ce jour : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_the_story_so_far

À la poursuite des comètes : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing_a_comet

12 ans à travers l'espace : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space

Rosetta en orbite autour d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Procédure de mise sur orbite autour d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet

Comètes

Articles sur les comètes sur le site ESA Kids :

www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF_OurUniverse_0.html

Site Web de Rosetta (technique) : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta

Site Web de Giotto : sci.esa.int/giotto/

Articles sur notre Univers sur le site ESA Kids : www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_0.html

Orbites

Animation sur le mouvement de Mars dans le ciel nocturne : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Animation sur les épicycles : Épicycles Studio ESA : www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Studio_Epicycles

Animation sur les épicycles : Explication du mouvement rétrograde Studio ESA :

www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/ESA_Studio_Retrograde_Motion_Explanation

Rosetta en orbite autour d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Questionnaires ESA Kids sur les comètes : www.esa.int/esaKIDSen/SEMZPCMVGJE_q.html

Première loi de Kepler : Loi 1 Studio ESA : www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_1

Deuxième loi de Kepler : Loi 2 Studio ESA : www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_2

Troisième loi de Kepler : Loi 3 Studio ESA : www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_3

Jeu de simulation du système planétaire : phet.colorado.edu/sims/my-solar-system/my-solar-system_en.htmESA

Jeu de simulation « Super planet crash » : www.stefanom.org/spc/

La Station spatiale internationale et le véhicule de transfert automatique

Vidéo éducative « Johannes Kepler » ATV-2 ESA : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV_Johannes_Kepler_-_Orbits_and_body_motion_in_space

Vidéo éducative « Albert Einstein » ATV-4 ESA : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV_Albert_Einstein_-_Relativity_of_space_and_time

Collection Apprendre avec l'espace

Vidéo ESA – apprendre avec l'espace – les puits de gravité | VP04 :

www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_classroom_demonstration_video_VP04

Manuel de l'enseignant et activités pour les élèves ESA – apprendre avec l'espace – cuisiner une comète | P06 :

Vidéo ESA – apprendre avec l'espace – cuisiner une comète | VP06 :

www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_in_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06

Vidéo ESA : apprendre avec l'espace – les ellipses | VP02 www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VP02

apprendre avec l'espace – les ellipses | P02
www.esa.int/education

Concept développé pour l'ESA par la National Space
Academy, Royaume-Uni Illustrations par Kaleidoscope
Design, NL

Une production ESA Education
Copyright © Agence spatiale européenne 2014