

# CHAPITRE 10 LA TERRE DANS L'UNIVERS

## INTRODUCTION : CHOIX PÉDAGOGIQUES

Ce chapitre pour objectif de sensibiliser les élèves à deux modèles différents décrivant les mouvements de la Terre et du Soleil : le modèle géocentrique et le modèle héliocentrique. Dans l'histoire des sciences, ces deux modèles ont coexisté depuis l'Antiquité. Le modèle géocentrique (avec épicycles, **unité 2**) a eu la préférence de la plupart des mathématiciens et astronomes jusqu'à Copernic car il permettait de prévoir, avec une marge d'erreur, la position des planètes. Ce n'est qu'à partir de Copernic que le modèle héliocentrique s'est progressivement imposé par sa simplicité. Il conviendra d'insister sur le fait qu'il s'agit de modèles, fondés sur des référentiels (référentiels Terre ou Soleil) permettant d'expliquer plus ou moins précisément les observations dans un cadre donné.

### POUR COMMENCER

1. → a.                      2. → b.  
3. → c.                      4. → a.

## UNITÉ 1

L'unité 1 propose de revenir aux intuitions géocentriques. Chaque humain, dès sa naissance, peut observer et ressentir certains phénomènes : les premiers savants n'ont pas fait exception. Par l'observation à l'œil nu du ciel et du Soleil, il semble évident que nous ne ressentons pas la Terre bouger sous nos pieds et que c'est bien le Soleil qui se meut dans le ciel jour après jour. Cette intuition, toute naturelle, va favoriser la suprématie du modèle géocentrique pendant près de 1 500 ans.

### Tâche complexe

D'après le doc 1, on constate que la trajectoire du soleil dans le ciel décrit une courbe. Ce qui donne l'impression a priori qu'il tourne autour de la Terre (modèle géocentrique), mais on ne peut exclure que la Terre tourne sur elle-même, alors que le Soleil serait fixe (modèle héliocentrique). Dans ces deux modèles on peut avoir une alternance jour nuit (doc 5). Dans le doc 2, on constate que les étoiles ont une trajectoire circulaire autour d'un point fixe. Ce qui suggère comme dans l'exemple du tourniquet (doc 4) que ce serait plutôt la Terre qui tourne sur elle-même, on peut aussi imaginer que toutes les étoiles sont fixes les unes par rapport aux autres et tournent simultanément autour de la Terre (voir doc 1 unité 2). Le doc 3 décrit des courbes complexes (avec des rétrogradations) qui ne permettent pas d'imaginer une trajectoire simple de Mars autour de la Terre.

## UNITÉ 2

L'unité 2 se focalise sur la controverse entre partisans du géocentrisme et défenseurs de l'héliocentrisme. Dès l'Antiquité, cette question fait débat. C'est initialement un débat entre scientifiques, car l'observation à l'œil nu du ciel ne permet pas de trancher entre les deux possibilités : les deux modèles permettent des prédictions (position des planètes en fonction du temps) suffisamment précises pour qu'aucun ne se trouve mis en défaut.

Quelle différence entre débat et controverse ? Il faut se souvenir qu'à cette époque, même la rotondité de la Terre n'est pas une connaissance prouvée, mais une hypothèse de travail : on cite souvent la démarche d'Eratosthène qui a mesuré la circonférence de la Terre à partir de la différence d'incidence des rayons parallèles du Soleil ; mais s'il avait considéré une Terre plate, il aurait au contraire pu mesurer la distance du Soleil (chapitre 8). Le débat scientifique héliocentrisme/géocentrisme aura perduré pendant plus d'un millénaire. Les Grecs ne sont pas tous de l'avis d'Eudoxe, Aristote ou Ptolémée. Héraclide et Aristarque proposent dès le III<sup>e</sup> s av J.-C. des modèles héliocentriques. Au sein d'une autre civilisation, Aryabhata, en Inde (V<sup>e</sup> s) penche lui aussi pour l'héliocentrisme. Pendant l'âge d'or arabe, le mathématicien perse Al-Biruni (X<sup>e</sup> s) prouve même mathématiquement qu'il est impossible scientifiquement de trancher.

Là où le débat scientifique fait place à la controverse, c'est lorsque des arguments théologiques ou philosophiques viennent s'ajouter subjectivement aux arguments scientifiques. Le point d'orgue de cette controverse est l'exécution de Giordano Bruno par l'Inquisition : se permettre un débat scientifique objectif n'est alors plus toléré par la société européenne.

### Tâche complexe

Personnages institutions	Époque	Modèles proposés	Type d'arguments
Eudoxe de Cnide	IV <sup>e</sup> siècle avant J.-C.	Géocentrisme. Sphères concentriques.	Phénomènes terrestres (chutes de corps) et astronomiques (trajectoire des astres dans le ciel terrestre)
Ptolémée	II <sup>e</sup> siècle ap. J.-C.	Géocentrisme avec épicycles	Mathématiques et astronomiques
Église chrétienne	XVI <sup>e</sup> et XVII <sup>e</sup> siècle	Géocentrisme.	Théologiques (bible : livre de Josué)
Copernic	XVI <sup>e</sup> siècle	Héliocentrisme	Logiques (économie d'hypothèse) mathématiques et astronomiques
Galilée	XVII <sup>e</sup> siècle	Héliocentrisme	Astronomiques
Giordano Bruno	XVI <sup>e</sup> siècle	Héliocentrisme	Ceux de Copernic + théologiques

## UNITÉ 3

L'unité 3 permet de détailler les étapes observationnelles et théoriques qui ont permis de mettre fin à la controverse. Il a en effet fallu des sauts technologiques et conceptuels, et une intrusion moindre des questions religieuses dans les questions scientifiques pour parvenir à la conclusion de ce débat scientifique. Les premières étapes, progressives, sont l'observation de corps qui ne tournent pas autour de la Terre, pour éliminer l'hypothèse

que «la Terre est immobile au centre de l'Univers». Déjà Héraclide du Pont imagine au IV<sup>e</sup> s av J.-C. que Vénus et Mercure tournent autour du Soleil. Tycho Brahé, catholique convaincu, envisage de faire tourner toutes les planètes autour du Soleil, mais garde ce dernier en révolution autour de la Terre. Son élève, Johannes Kepler, étudie le mouvement de Mars pendant 40 ans, et arrive à la conclusion que le modèle héliocentrique, par sa simplicité, explique plus élégamment le mouvement des planètes en général, et leurs rétrogradations en particulier: c'est le principe de parcimonie, ou «rasoir d'Ockham». Kepler affine même le modèle héliocentrique en proposant des orbites planétaires elliptiques et non circulaires, et il dispose d'assez d'observations et d'instruments de mesure pour vérifier que ce modèle semble plus précis que celui de Ptolémée. Grâce à l'invention de la lunette, Galilée observe la Lune et Jupiter. Il observe que la Lune n'est pas une sphère parfaite mais un corps rocheux criblé de cratères (exit donc l'idée d'un monde supralunaire parfait); et il découvre les quatre satellites joviens majeurs: encore d'autres corps qui ne tournent visiblement pas autour de la Terre! Ces arguments observationnels, scientifiques, contrent quelques hypothèses mineures du géocentrisme, mais ce ne sont pas des preuves formelles de l'héliocentrisme. Mathématiquement, Isaac Newton réussit, en un seul modèle (la gravitation universelle), à reproduire le mouvement de la Lune et des planètes sur des trajectoires elliptiques respectivement autour de la Terre et du Soleil. Cela donne un contexte théorique plus cohérent et profond en faveur de l'héliocentrisme, et c'est aussi la porte ouverte aux notions de référentiels qui seront développées par la suite.

Pourtant, l'argument majeur du géocentrisme est l'immobilisme de la Terre. L'humain ne sent toujours pas, même au XVII<sup>e</sup> s, la Terre tourner! Il faut attendre des percées techniques supplémentaires. En 1727, Bradley observe l'aberration de la lumière. À l'image des gouttes de pluie qui semblent venir s'écraser vers notre pare-brise en voiture, alors que le piéton voit bien la pluie tomber verticalement, les rayons lumineux peuvent sembler déviés par le simple mouvement de l'observateur. C'est exactement ce phénomène que Bradley mesure, par la déviation de la position apparente de certaines étoiles en fonction de la date (c'est-à-dire en fonction de la position de la Terre autour du Soleil). C'est la première preuve concrète irréfutable que la Terre n'est pas immobile! C'en est fini de la théorie géocentrique. La seconde preuve expérimentale est détaillée dans le doc 4: le pendule de Foucault, qui prouve que la Terre tourne bien sur elle-même.

Attention, ce n'est en aucun cas «la victoire de l'héliocentrisme sur le géocentrisme»! Dès le XVII<sup>e</sup> s, en héritage de la théorie de la gravitation de Newton, les mathématiciens (comme Laplace en 1785 ou Poincaré en 1889) démontrent que le choix d'un point d'observation peut transformer complètement la formulation mathématique des lois de la physique. Géocentrisme et héliocentrisme sont deux aspects d'une même médaille! Dans le référentiel héliocentrique (où le Soleil est par définition immobile), les lois empiriques de Kepler se démontrent facilement, c'est ce qu'a fait Newton. Par contre, dans le référentiel géocentrique (où la Terre est par définition immobile), il est plus facile de décrire le mouvement de la Lune autour de la Terre. Ces deux modèles ont donc des avantages et des inconvénients: ils ne s'appliquent que dans le cadre où ils ont été choisis et il faut se garder de les sur-interpréter. C'est pour cela qu'il fallait introduire des épicycles pour reproduire les mouvements rétrogrades de Mars en référentiel géocentrique: ce n'était simplement pas le meilleur modèle (le plus parcimonieux).

Mais que se passe-t-il «en vrai»? Le Soleil est bien le corps le plus massif du système solaire. Mais il est gravitationnellement perturbé par Jupiter, par Saturne, et par tous les autres corps du système solaire. Le point d'équilibre du système solaire, appelé «barycentre», se trouve à quelques centaines de milliers de kilomètres du centre du Soleil. C'est principalement l'amplitude de la perturbation gravitationnelle de Jupiter sur le Soleil (à titre de comparaison, la perturbation de la Terre sur le Soleil est de quelques centimètres). Tout le système solaire tourne donc autour de ce barycentre (le modèle héliocentrique en est donc une approximation assez bonne), Soleil inclus! Ce sera l'objet de l'exercice 7, p170.

Mais ce barycentre n'est pas non plus le centre de l'Univers: le système solaire orbite en périphérie de la Voie Lactée, notre galaxie. Notre galaxie tourne elle aussi dans notre Amas Local, lui-même en mouvement dans le Grand Amas, et ainsi de suite. En 1927, Lemaître propose la théorie du Big Bang: l'Univers n'a même plus besoin d'un «centre». Une recherche qui aura donc duré plus de 3 millénaires, pour finalement découvrir qu'il n'existait pas!

### Tâche complexe

- 1600 Kepler: trajectoire héliocentrique elliptique de Mars (DOUTE).
- 1610 Galilée: découverte des satellites joviens (DOUTE).
- 1687 Newton: théorie de la gravitation universelle, démonstration des lois de Kepler (DÉMONSTRATION THÉORIQUE).
- 1727 Bradley: observation du mouvement de la Terre autour du Soleil (PREUVE).
- 1851 Foucault: observation de la rotation de la Terre sur elle-même (PREUVE).

## UNITÉ 4

L'unité 4 s'intéresse aux lunaisons. Les élèves connaissent généralement bien les phases de la Lune, même si peu d'entre eux sauront le lien entre ces phases et l'angle Terre-Lune-Soleil. Par ailleurs, combien sauront que la Lune peut parfois être visible en plein jour? Demandez-leur de faire l'expérience, typiquement pendant les premiers et derniers croissants!

Il n'y a pas eu, étonnamment, de controverse sur le mouvement de la Lune: il était évident pour tous qu'elle tournait autour de la Terre. Dès le III<sup>e</sup> s av J.-C., Aristarque de Samos cherche à mesurer la taille et la distance de la Lune et du Soleil. À partir de la durée d'une éclipse lunaire, il estime que la Lune doit être trois fois plus petite que la Terre, mais à une distance d'environ 19 rayons terrestres (il faut noter qu'il ignore la taille de la Terre, qui sera estimée par Ératosthène au siècle suivant). À partir de la mesure de la position du Soleil pendant un quartier de Lune, Aristarque déduit également que le Soleil est 19 fois plus loin de nous que la Lune, et donc 19 fois plus gros! (En réalité, la Lune est 3,7 fois plus petite que la Terre, la distance Terre-Lune est de 30,1 diamètres terrestres, et le Soleil est 400 fois plus gros que la Lune.) C'est une première mesure qui montre que c'est la Terre, plus grosse que la Lune, qui doit gouverner le mouvement de celle-ci.

Le doc 6 présente quant à lui la face cachée de la Lune, car notre satellite, en « orbite synchrone » autour de notre planète, lui montre toujours la même face. Il a fallu attendre la sonde soviétique Luna 3 (7 octobre 1959) pour en obtenir les premières photographies. Comme indiqué dans notre document, les premiers humains à poser les yeux sur cette face furent les américains d'Apollo 8 le 24 décembre 1968. C'est également de cette mission que datent les fameux clichés de « lever de Terre ». Un exercice difficile, quoi qu'instructif, serait de demander (à des élèves de spécialité voire à des adultes) de décrire le mouvement de la Terre et ses phases, vus de la Lune...

Une dernière note, linguistique. Initialement, les anglais appelaient la face cachée de la lune « the dark side of the Moon », littéralement « le côté obscur de la Lune ». Sémantiquement, « dark » et « obscur » partagent les mêmes polysémies : inconnu ou méconnu au sens figuré, sombre ou sans lumière au sens propre. Devant les confusions avérées (car la face cachée est pleinement éclairée en Nouvelle Lune) les anglais ont fini par choisir en ce millénaire la formulation moins problématique « the far side of the Moon », c'est-à-dire « la face lointaine de la Lune ».

### Activité guidée

1.

Aspect de la lune								
Nom de la phase lunaire	<i>neouvelle lune</i>	<i>Premier croissant</i>	<i>Premier quartier</i>	<i>Gibbeuse croissante</i>	<i>Pleine lune</i>	<i>Gibbeuse décroissante</i>	<i>Dernier quartier</i>	<i>Dernier croissant</i>

2. Pleine Lune, Gibbeuse décroissante, Dernier quartier, Dernier croissant

3.  $2 \times \pi \times 384\,403 \text{ km} = 2\,414\,051 \text{ km}$  de longueur (il s'agit mathématiquement d'une circonférence)

$$4. \frac{2\,414\,051 \text{ km}}{1\,023 \text{ m/s}} = 2\,359\,776 \text{ s} \\ = 39\,329,6' = 655,5 \text{ h} = 27,3 \text{ j}$$

Période de rotation et période de révolution ont la même durée !

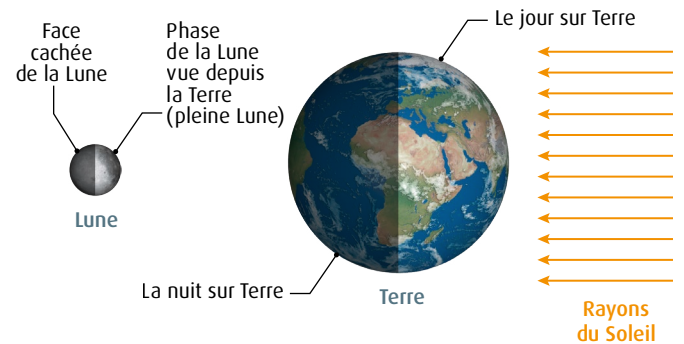
5. La lune est en « orbite synchrone » : elle tourne sur elle-même au même rythme qu'elle tourne autour de la Terre, elle montre donc toujours la même face à la Terre.

### Tester ses savoirs

#### 1 Vrai/faux

- Faux, à l'œil nu l'observation des astres ne suffit pas. Avec des instruments de mesure modernes, Bradley a observé la rotation de la Terre autour du Soleil en 1727.
- Vrai.
- Vrai : Giordano Bruno était un moine dominicain.
- Faux : le Soleil est immobile par construction dans le référentiel héliocentrique, mais il est en mouvement dans le référentiel géocentrique.
- Faux : la Lune a une face cachée car sa durée de rotation est strictement égale à sa durée de révolution.

#### 2 Légender un schéma



#### 3 QCM

- Faux, vues depuis la Terre, les trajectoires des planètes comportent des rétrogradations (retours en arrière).
  - Faux.
  - Vrai.
  - Faux.
- Faux, deux personnes observant un même mouvement depuis deux référentiels différents voient deux mouvements différents.
  - Vrai.
  - Faux, l'énoncé ne donne pas d'informations sur les deux référentiels des observateurs. On ne peut donc pas conclure que les mouvements sont inversés.
- Faux.
  - Vrai.
  - Faux.
- Faux.
  - Faux, la rotation de la Terre sur elle-même a été prouvée grâce au pendule de Foucault.
  - Vrai.
  - Faux.
- Faux, la photo de droite n'est pas un quartier mais une lune gibbeuse.
  - Faux, la photo de gauche est un croissant (la moitié serait à l'obscurité si c'était un quartier). Une nouvelle lune serait entièrement dans l'obscurité.
  - Faux, la lune gibbeuse est majoritairement éclairée, avec un croissant à l'obscurité, ce qui n'est pas le cas sur la photo de gauche. Il n'y aurait pas de zone d'obscurité sur la photo de droite si c'était la pleine lune.
  - Vrai, les deux phases de la Lune sur les photos ci-dessous sont respectivement un (premier) croissant et une lune gibbeuse (décroissante).

#### 4 Question de synthèse

La question de synthèse devra obligatoirement intégrer les éléments des critères de réussite. La loi de la gravitation universelle n'aura pas à être détaillée mais simplement mentionnée. Le principe du pendule de Foucault pourra être précisé. Les élèves pourront consulter cette vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=3rz-Q8-JLNI>

### 5 Interpréter des données et rédiger

- Les deux personnes citées évoquent le modèle héliocentrique proposé par Copernic
- Luther fait appel à la notion de référentiel. Dans son exemple du char ou du navire, il suppose que le mouvement de la Terre de la théorie copernicienne devrait pouvoir être perçu par les terriens. Il est cependant possible dans un moyen de transport quelconque (train, bateau, avion) de percevoir difficilement le mouvement (en particulier s'il n'y a pas d'accélération ou de décélération) si l'on n'a pas de point de référence extérieure.

### 6 Calculer

On pourra préciser aux élèves que la zone d'habitabilité d'une étoile est une zone théorique autour de l'étoile où l'eau peut exister sous forme liquide et la température est compatible avec l'existence de la vie telle que nous la connaissons sur Terre.

#### 1. Calcul des périodes

Planète	Demi-grand axe (km)	Période orbitale (sec)	Période orbitale (jours)	Période orbitale (ans)
Tau Ceti b	$1,58 \cdot 10^{10}$	$1,22 \cdot 10^6$	13,97	0,038
Tau Ceti c	$2,93 \cdot 10^{10}$	$3,08 \cdot 10^6$	35,36	0,097
Tau Ceti d	$5,61 \cdot 10^{10}$	$8,19 \cdot 10^6$	94,11	0,258
Tau Ceti e	$8,28 \cdot 10^{10}$	$1,47 \cdot 10^7$	168,12	0,460
Tau Ceti f	$2,03 \cdot 10^{10}$	$1,78 \cdot 10^6$	642,00	1,758

2. Tau Ceti e a la période la plus proche de celle de la Terre (à 54% près). La zone d'habitabilité de Tau Ceti est plus rapprochée de son étoile que ne l'est celle du Soleil.

### 7 Analyser et raisonner

La masse du Soleil est de  $2,0 \times 10^{30}$  kg, celle de Jupiter  $1,9 \times 10^{27}$  kg, et la distance moyenne Soleil-Jupiter est de  $778,3 \times 10^6$  km. Le barycentre se trouve donc à environ,  $\frac{1,9 \times 10^{27} \times 778,3 \times 10^6}{1,9 \times 10^{27} + 2,0 \times 10^{30}} = 7,4 \times 10^6$  km = 7 millions de km du centre du Soleil.

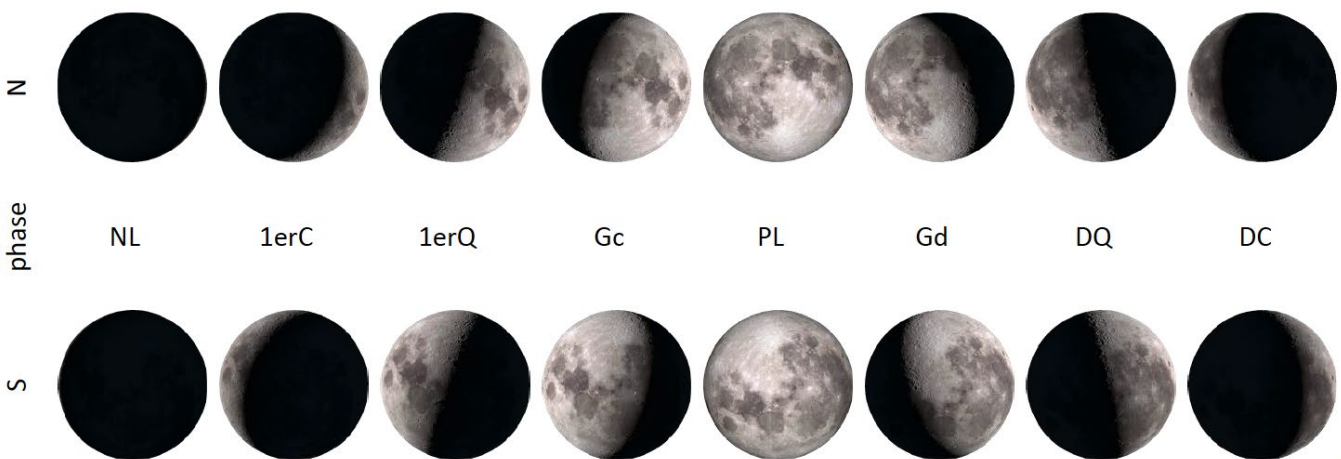
Dans le référentiel barycentrique, le Soleil a une trajectoire elliptique autour du barycentre. Jupiter a une trajectoire elliptique autour du barycentre. Le barycentre Terre-Lune a une trajectoire elliptique autour du barycentre Soleil-Jupiter. La Terre a une trajectoire épicyclique autour du barycentre. La Lune a une trajectoire épicyclique autour du barycentre.

On accepte une réponse plus partielle: «Soleil trajectoire elliptique, Jupiter trajectoire elliptique, Terre trajectoire elliptique, Lune trajectoire épicyclique».

### 8 Mettre en relation des données et raisonner

La phase de la Lune ne dépend que de la position de la Lune par rapport au Soleil, la zone ombragée ne change donc pas en fonction de l'observateur. Dans l'hémisphère Sud, l'observateur voit la Lune «à l'envers» par rapport à un observateur de l'hémisphère Nord. Les motifs visibles sont donc vus «à l'envers» depuis l'hémisphère Sud, et la zone ombragée passe de gauche à droite.

1. Pour illustrer la Lune «à l'envers», l'élève doit impérativement dessiner quelques mers ou repères identifiables!



### ÇA VOUS CONCERNE

#### - Les coefficients de marée.

Le coefficient de marée est défini par :

$$C = \frac{H_h - H_b}{U \times 100}$$

Où  $H_h$  est la hauteur d'eau de la pleine mer;  $H_b$  est la hauteur d'eau de la basse mer suivant la marée haute;  $U$  est la valeur moyenne de  $H_h - H_b$  pour les plus grandes marées propres à la localité (à Brest, 6,10 m).

Il est plus pratique de se baigner à faible coefficient de marée puisqu'on sera moins gêné par la variation du niveau d'eau.

#### - La mesure des marées terrestres.

Les marées terrestres ne sont pas faciles à mesurer. En effet, la variation de hauteur du sol est difficile à repérer, dans la mesure où l'on n'a pas de référence par rapport à laquelle on peut mettre en évidence cette variation de hauteur (tout l'environnement se déplace en même temps et de la même manière). Par contre ce déplacement éloigne le sol du centre de la Terre, et modifie ainsi localement la gravité. On peut ainsi mesurer cette variation de la gravité avec un gravimètre (système oscillant masse-ressort dont la période d'oscillation dépend de la gravité).