



Lycée(s)	Général	Technologique	Professionnel	
Niveau(x)	CAP	Seconde	Première	Terminale
Enseignement(s)	Commun	De spécialité	Optionnel	
Enseignement scientifique				

Une représentation du monde en évolution

Nature des hypothèses et réfutabilité

Objectifs de la séance

- Comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration.
- Mettre à l'épreuve un modèle.
- Utiliser un modèle pour prévoir.
- Explorer l'organisation du Système solaire.

Mise en situation

La séance fait suite à celle sur la remise en cause du modèle de la Terre plate dans laquelle la notion de réfutabilité est introduite.

La notion de réfutation est approfondie à partir de la controverse autour des modèles géocentrique, héliocentrique, géo-héliocentrique¹. Un pas de plus est donc fait vers l'étude de la réfutabilité en science, permettant aussi d'approfondir les notions d'hypothèse et de modèle.

Consignes

- La classe peut être séparée en deux groupes : groupe 1 et groupe 2.
- Les **supports 1, 2, 3 et 6** sont distribués au groupe 1. Chaque élève répond aux questions :
 1. Montrer en quoi ces **supports** soulignent la nature évolutive de la science.
 2. Présenter la raison pour laquelle le système géocentrique a prévalu pendant des siècles.
 3. Montrer comment le passage du modèle géocentrique au modèle héliocentrique illustre les tensions entre la connaissance scientifique et les croyances religieuses soutenues par l'église catholique de l'époque.
 4. Préciser, en justifiant, si le refus du modèle héliocentrique par Tycho Brahe repose sur des considérations religieuses.

1. Dans le modèle géo-héliocentrique, la Lune et le Soleil tournent autour de la Terre. Les planètes Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne tournent autour du Soleil.

5.
 - a. Indiquer les trois fonctions majeures d'un modèle en science présentées dans le **support 6**.
 - b. Expliquer en quoi les modèles de Ptolémée ou Copernic remplissent au moins deux de ces fonctions.
 6. En science, une hypothèse *ad hoc* est une hypothèse ajoutée à un modèle ou à une théorie, de manière arbitraire, pour éviter que ce modèle ou cette théorie ne soit invalidé. Cette démarche, qui peut être employée de manière légitime ou non, vise à expliquer des anomalies non prévues par le modèle ou la théorie originale. Expliquer en quoi les hypothèses de Ptolémée ou celles du système de Tycho Brahe peuvent être qualifiées de « *ad hoc* ».
- Les **supports 3, 4, 5 et 6** sont distribués au groupe 2. Chaque élève répond aux questions :
 1. À partir du **support 3**, décrire en quoi le modèle de Tycho Brahe diffère de celui de Copernic, dans lequel le Soleil est au centre de l'Univers et la Terre, comme les autres planètes, se déplacent autour sur des orbites circulaires.
 2. À partir du **support 4**, expliquer en quoi l'observation de la parallaxe d'étoiles permettrait de réfuter le modèle de Tycho Brahe.
 3. Expliquer pourquoi la « non-observation » de cette parallaxe permettrait, en principe, de réfuter le modèle héliocentrique (**supports 5 et 6**).
 4. À partir du **support 5**, montrer que Galilée ne se résout pas à réfuter le modèle héliocentrique et expliquer comment il s'y prend.
 5. En science, une hypothèse *ad hoc* est une hypothèse ajoutée à un modèle ou à une théorie, de manière arbitraire, pour éviter que ce modèle ou cette théorie ne soit invalidé. Cette démarche, qui peut être employée de manière légitime ou non, vise à expliquer des anomalies non prévues par le modèle ou la théorie originale. Sachant que d'autres hypothèses *ad hoc* permettent de rendre compte de l'absence de parallaxe, expliquer pourquoi cette « non-observation » de la parallaxe par Tycho Brahe ne peut pas départager les deux modèles.
 6. Expliquer pourquoi une expérience n'est pas toujours décisive pour réfuter un modèle.
 - Les élèves sont regroupés par quatre dont deux sont issus groupe 1 et deux sont issus du groupe 2. Ils répondent aux questions suivantes afin d'élaborer **un bilan** :
 1. À partir de l'exemple de Ptolémée et de Tycho Brahe, présenter aux camarades la manière avec laquelle des modèles de la réalité ont été mis en concurrence².
 2. En science, le « principe de parcimonie » (ou « rasoir d'Ockham ») stipule que parmi plusieurs explications possibles, celle qui requiert le moins d'hypothèses est généralement à privilégier. En d'autres termes, si deux explications peuvent rendre compte d'un phénomène de manière égale, celle qui fait appel au minimum d'hypothèses supplémentaires, est souvent considérée comme préférable. À l'aide de ce principe, comparer les hypothèses *ad hoc* formulées.

2. Voir la rubrique « Pistes pour différencier ».

Supports

Support 1. Une représentation géocentrique du monde

Dans la vision cosmologique d'Aristote (384-322 av. J.-C.) et des astronomes de l'époque, le cosmos ne peut être qu'harmonieux. Dans son organisation divine, les corps célestes des sphères concentriques centrées sur la Terre. La plus extérieure est la « sphère des fixes », où les étoiles sont immobiles. Entre cette sphère et la Terre se trouvent d'autres sphères portant les planètes connues à cette époque, comme la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter et Saturne. Le cosmos se présente comme un système emboîté de sphères ne pouvant décrire que des cercles parfaits. À cette époque, le cosmos est donc géocentrique, de forme sphérique et possède des limites définies.



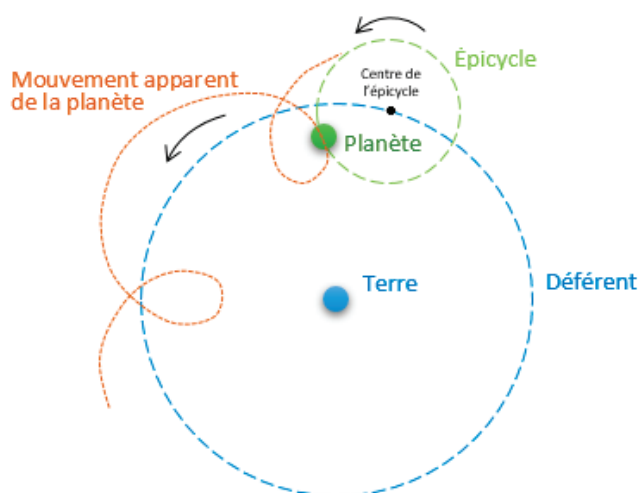
Représentation du système de sphères célestes
(d'après Peter Apiani, *Cosmographia*, Anvers, 1539)

Source : [Wikimedia Commons](#)

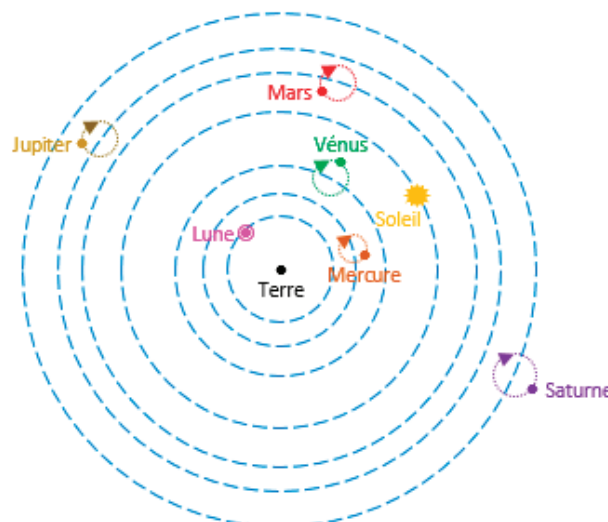
Parallèlement, l'astronome et mathématicien grec Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.) propose une vision radicalement différente de celle de ses contemporains : contrairement à la vision géocentrique dominante de son époque, Aristarque suggère que le Soleil est au centre de l'Univers et que la Terre tourne autour de lui. Cette idée, basée sur des observations qu'il avait faites et sur des raisonnements mathématiques, n'a pas été acceptée à son époque. Accusé de vouloir remettre en cause le caractère divin du monde, cela lui vaut de nombreuses critiques et même des ennuis, certains voulant même lui intenter un procès pour impiété.

Pour expliquer les mouvements des planètes et des étoiles qui ne bougent pas simplement en cercles parfaits comme le décrit le système d'Aristote, l'astronome grec Claude Ptolémée (100-168) utilise des constructions géométriques complexes

qui rendent mieux compte des irrégularités observées (comme le mouvement rétrograde de Mars). Il utilise et perfectionne le système des épicycles. Sans entrer dans la complexité du modèle, la planète tourne sur un petit cercle (l'épicycle) dont le centre circule lui-même sur un grand cercle (le déférent). La planète qui se meut sur un épicycle peut s'approcher et s'éloigner de la Terre comme les observations le montrent. Au cours du temps, plus les mouvements des planètes sont observés avec davantage de précision, plus le modèle des épicycles devient compliqué pour en rendre compte (par exemple, le centre du déférent devient excentré par rapport à la Terre).



Modèle des épicycles



Système ptoléméen

Support 2. Une représentation héliocentrique du monde

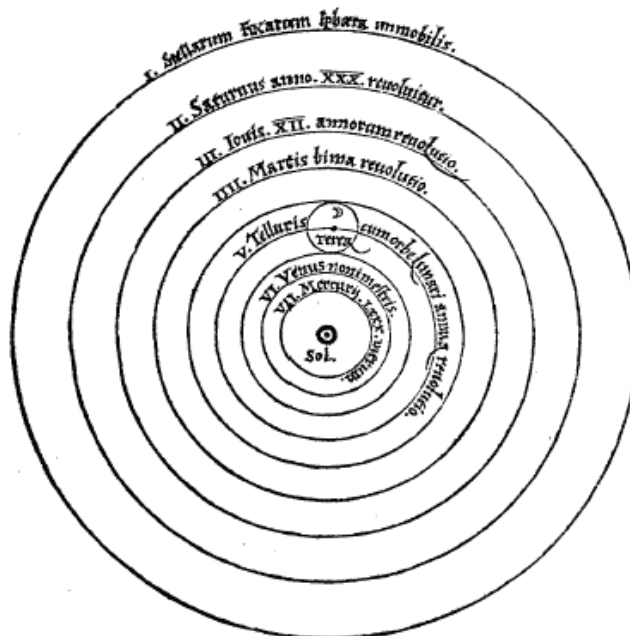
Quinze siècles après Ptolémée, l'astronome Nicolas Copernic (1473-1543) travaille dans le contexte hérité de Ptolémée. Malgré sa vision cosmologique fondamentalement ptoléméenne, comme tous les savants de l'époque, il cherche à résoudre certaines observations non expliquées par Ptolémée. En s'appuyant sur de nouvelles observations astronomiques recueillies sur de longues périodes, il propose une hypothèse plus simple pour expliquer les mouvements célestes : le centre des mouvements astraux est le Soleil et non la Terre. Son hypothèse offre une explication plus simple et élégante des mouvements célestes en utilisant une seule sphère par planète, plutôt que plusieurs³. Les calculs de Copernic donnent des résultats similaires à ceux de Ptolémée, sans améliorer la précision ni introduire de nouvelles découvertes astronomiques.

L'ouvrage « *De revolutionibus orbium coelestium* » (« *Des révolutions des orbites célestes* ») est publié en 1543 à Nuremberg, peu avant le décès de Copernic. Il y présente l'héliocentrisme, modèle plaçant le Soleil au centre de l'Univers. Dans ce système, tous les mouvements sont des cercles parfaits, la Lune tourne autour de la Terre qui tourne sur elle-même. Cet ouvrage inclut une introduction rédigée par le théologien Adrien Osiander⁴. Selon lui, le modèle héliocentrique de Copernic est simplement une proposition astronomique ou géométrique, artificielle, utilisée

3. Note pour le professeur : on retrouve ici le principe de parcimonie qui stipule que parmi plusieurs explications possibles d'un phénomène, la plus simple est généralement la meilleure. Voir également la rubrique « Supports pour le professeur » (Ressource 1 - Le principe de parcimonie appliqué à l'héliocentrisme).

4. Voir la rubrique « Supports pour le professeur » (Ressource 2 - L'avant-propos d'Osiander).

uniquement pour expliquer les mouvements des corps célestes, sans prétendre à une vérité absolue (l'objectif de cette introduction était probablement de défendre le modèle de Copernic des critiques des théologiens conservateurs, qui soutenaient l'astronomie ptoléméenne en se basant sur la Bible et la conception populaire de l'époque).



Le système héliocentrique de Copernic (*De Revolutionibus orbium coelestium*).

Source : [site Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_héliocentrique)

Support 3. Une représentation géo-héliocentrique du monde

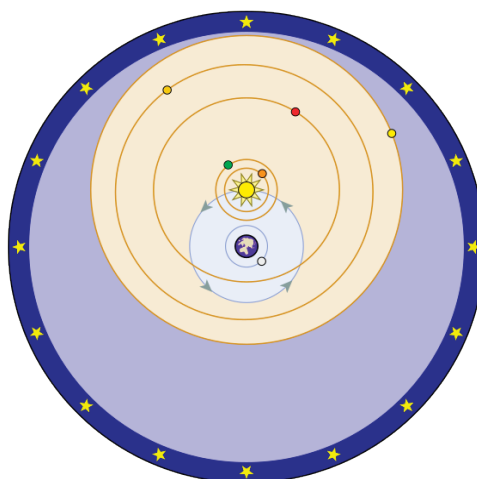
Tycho Brahe (1546 – 1601) est un astronome danois bénéficiant du soutien du roi Frédéric II du Danemark, ce qui lui a permis de faire bâtir Uraniborg, le plus grand observatoire astronomique de l'époque, sur l'île de Ven (Suède).

À une époque où prévaut le respect de la tradition et des anciens, il donne la priorité à l'observation, avec le souci constant de valider ses hypothèses au regard de celles-ci. Il prend grand soin de la fabrication et de la mise au point de ses instruments de mesure qui lui permettent de recueillir un nombre considérable de données. Bien qu'effectuées à l'œil nu, ces mesures sont, à leur meilleur, au moins dix fois plus précises que celles de ses prédécesseurs en Europe.

Ses observations très précises des positions de la planète Mars jouent un rôle décisif dans la découverte par Johannes Kepler de la trajectoire des planètes et plus généralement des trois lois qui régissent le mouvement de celles-ci. À partir de ses observations, Tycho Brahe propose un système géo-héliocentrique, à mi-chemin entre le système géocentrique et le système héliocentrique. Dans ce système, la Terre est toujours au centre de l'Univers ; la Lune et le Soleil tournent autour de la Terre ; en revanche Mars, Jupiter, Mercure, Vénus et Saturne tournent désormais autour du Soleil.

Le système de Tycho Brahe est adopté par les jésuites.

Source : [d'après la fiche Wikipédia « Tycho Brahe »](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tycho_Brahe)



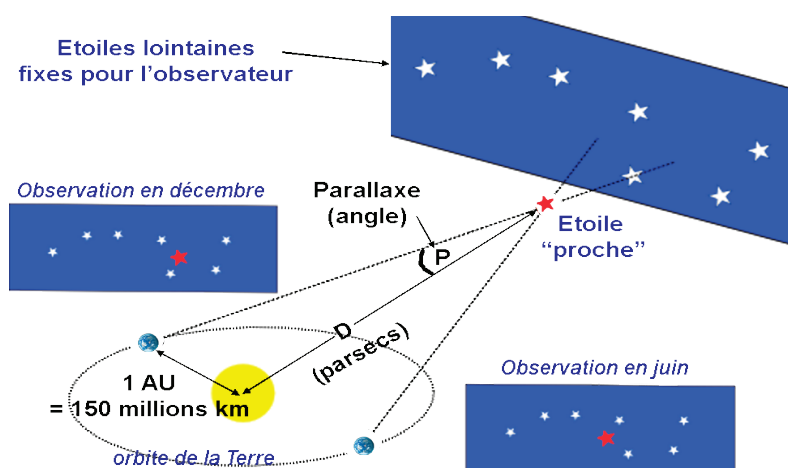
Le système géo-héliocentrique de Tycho Brahe

Source : [site Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_géo-héliocentrique_de_Tycho_Brahe)

Support 4. Parallaxe d'une étoile

Le phénomène de parallaxe correspond au déplacement apparent d'un objet observé de deux endroits différents. Il est possible de le mettre facilement en évidence en regardant un objet éloigné en fermant alternativement un œil puis l'autre. L'objet semble alors changer de position. Appliqué à l'astronomie, l'objet observé est une étoile dite proche observée de la Terre à six mois d'intervalle.

À l'époque de Tycho Brahe (1546 – 1601), astronome danois, aucune mesure n'a permis de mettre en évidence une parallaxe. En effet, la parallaxe d'une étoile est si faible qu'il faudra encore attendre près de deux siècles (1858 exactement) pour que Friedrich Bessel (1784 – 1846) parvienne à déterminer la première parallaxe d'une étoile, l'étoile 61 Cyg. Des mesures beaucoup plus précises ont été réalisées récemment à l'aide d'instruments embarqués par le satellite Hipparcos.

Source : extrait de « [À la recherche de la parallaxe des étoiles](#) »

Représentation de parallaxe

Source : [site Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Parallaxe_stellaire)

Support 5. Extrait du dialogue entre Salviati et Simplicio à propos de la parallaxe des étoiles

« Le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil doit impliquer que les observateurs d'une étoile proche constatent que sa position par rapport aux étoiles « fixes » varie au cours du temps.

À l'époque de la parution du Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, aucun astronome n'a encore été capable de détecter ces variations. Par l'entremise de ses personnages Simplicio et notamment Salviati, Galilée nous propose deux explications :

SIMPLICIO : Franchement, j'éprouve une grande répugnance à admettre que la distance des [étoiles] fixes soit si grande que les variations dont vous parlez puissent ne pas être perçues du tout. [...]

SALVIATI : [...] En bref, ce qui vous satisferait, serait-ce d'observer réellement dans les étoiles les changements qu'on devrait, vous semble-t-il, y observer si la Terre possédait le mouvement annuel ?

SIMPLICIO : Je serais satisfait sur ce point du moins.

SALVIATI : Je voudrais que vous disiez : si on observait cette variation, plus rien ne permettrait de douter de la mobilité de la Terre, puisque cette apparence ne laisserait aucune position de repli. [...], il se peut (comme l'affirme Copernic) que l'immense distance de la sphère étoilée rende inobservables de si minuscules phénomènes ; et ceux-ci, comme je l'ai dit, il se peut que jusqu'à présent on ne les ait même pas cherchés, ou bien pas comme il fallait, avec l'exactitude nécessaire pour une telle précision. Cette exactitude est difficile à obtenir : les instruments astronomiques sont défectueux, car sujets à trop d'altérations, et ceux qui les manient n'y mettent pas tout le soin qu'il faudrait. »

Source : Galileo Galilei, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, 1632.

Support 6. Science et modèles prédictifs

En science, les modèles sont des constructions intellectuelles qui servent à décrire le réel (modèle descriptif), comprendre le réel (modèle explicatif) et réaliser des prévisions (modèle prédictif). Représentant souvent une réalité simplifiée, les modèles peuvent être complexes.

Mais un modèle n'est pas la réalité, il en est une représentation pratique, plus moins proche. Il permet de faire des prédictions testables, comme par exemple les modèles du système solaire. Le modèle de Ptolémée permet ainsi non seulement d'expliquer les observations faites au cours des siècles passés, mais également de prédire d'autres phénomènes comme les éclipses solaires et lunaires, corroborant la théorie aristotélicienne de l'univers sous-tendant ce modèle.

Lorsque Tycho Brahe proposa un nouveau modèle du système solaire, géo-héliocentrique, celui-ci s'opposait au modèle héliocentrique de Copernic. Chaque modèle prédisait une observation différente concernant la parallaxe des étoiles proches : si la Terre est immobile, comme prévu dans le modèle géo-héliocentrique, alors la parallaxe ne devrait pas être visible. Mais si la Terre se déplace autour du Soleil, alors les observations devraient la mettre en évidence. Pour tester ces deux modèles, Tycho Brahe entreprit alors de relever très précisément les positions de plusieurs étoiles à deux moments de l'année propice à l'observation de ce phénomène.

Tycho Brahe n'ayant pu mesurer de parallaxe, cet argument lui permit de réfuter le modèle héliocentrique, notamment lors du procès de Galilée.

Pistes pour différencier

Les questions du groupe 1 sont plus accessibles que celles du groupe 2.

À propos de la question 1. du bilan lorsque les élèves des groupes 1 et 2 sont rassemblés, le professeur peut demander aux élèves de quel type de « concurrence » il s'agit et les faire réfléchir en posant une question un peu familière du type « qui gagne ? ». En effet, la « concurrence » entre modèles, tels que ceux proposés par Ptolémée et Tycho Brahe, peut être comprise de plusieurs manières.

Concurrence épistémologique : Cette forme de concurrence se concentre sur la validité et la justesse des modèles proposés pour décrire et expliquer les phénomènes observés. Dans le cas de Ptolémée et Tycho Brahe, ils ont tous deux présenté des modèles géocentriques, mais avec des différences fondamentales dans leur structure et leurs prédictions. Ptolémée a proposé un modèle fondé sur des épicycles pour expliquer les mouvements célestes, tandis que Tycho Brahe a soutenu un modèle où la Terre est immobile et les autres planètes orbitent autour du Soleil. Le modèle des épicycles a dû évoluer au cours du temps pour rendre compte des mouvements des planètes lorsque les instruments d'observation sont devenus plus précis. En effet on observe, par exemple, que le centre du déférent devient excentré par rapport à la Terre. La concurrence ici se situe dans la capacité des modèles à expliquer les observations astronomiques avec précision.

Concurrence méthodologique : Cette forme de concurrence se concentre sur les approches et les méthodes utilisées pour développer et valider les modèles. Ptolémée s'est appuyé sur les travaux d'observation antérieurs et sur des principes géométriques complexes pour élaborer son modèle, tandis que Tycho Brahe a adopté une approche plus empirique en réalisant des mesures astronomiques précises. La concurrence se trouve ici dans les méthodes employées pour parvenir à une compréhension de la réalité.

Concurrence institutionnelle et sociale : Cette forme de concurrence met en lumière les influences sociales, politiques et institutionnelles sur la préférence et l'acceptation des modèles. Dans le cas de Ptolémée et Tycho Brahe, des facteurs tels que les affiliations religieuses, les pressions politiques et les conventions scientifiques de l'époque ont pu influencer la manière dont leurs modèles ont été reçus et adoptés par la communauté scientifique et la société en général.

Dans une perspective de « qui gagne ? », cela dépend du critère de jugement. Historiquement, le modèle de Ptolémée a été dominant pendant des siècles en raison de sa compatibilité avec les croyances religieuses et les observations apparentes. Cependant c'est finalement le modèle de Tycho Brahe et plus tard celui de Copernic, Kepler et Galilée qui a prévalu en raison de sa meilleure capacité à expliquer les observations astronomiques avec précision. Ainsi, dans le contexte de la recherche de la « vérité » et de la compréhension scientifique, on pourrait dire que le modèle de Tycho Brahe « a gagné ». Cependant, il est également important de reconnaître que le chemin vers cette acceptation a été complexe et influencé par une variété de facteurs.

Évaluation

Communication des idées

Évaluer la capacité des élèves à communiquer clairement leurs idées. Demander par exemple de rédiger un court paragraphe ou de présenter oralement leurs conclusions, en mettant l'accent sur la structure logique de leur argumentation.

Réflexion critique sur la méthode scientifique :

En s'appuyant sur l'exemple de Tycho Brahe, inviter les élèves à réfléchir à la nature de la démarche scientifique, en se demandant si elle peut toujours être concluante. Les encourager à discuter des limites de la recherche scientifique et de la nécessité de continuer à remettre en question les modèles établis.

Apport pour le professeur

Le principe de parcimonie appliqué à l'héliocentrisme

Le principe de parcimonie suggère de choisir la théorie qui nécessite le moins d'hypothèses supplémentaires pour expliquer un ensemble donné de faits observés.

Le principe de parcimonie s'applique bien au choix de l'hypothèse selon laquelle le centre des mouvements astraux est le Soleil plutôt que la Terre. En attribuant une seule sphère à chaque planète, au lieu de plusieurs sphères, cette hypothèse simplifie grandement le modèle explicatif des mouvements célestes. Elle réduit la complexité du système en éliminant le besoin d'introduire plusieurs mécanismes complexes pour expliquer les mouvements des planètes.

L'avant-propos d'Osiander

Andreas Osiander (1498-1552), théologien et mathématicien allemand de la Renaissance, a rédigé une préface controversée dans l'édition de 1543 du livre *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*Des révolutions des sphères célestes*) de Nicolas Copernic. Cette préface a suscité beaucoup de débats et de critiques.

Certains pensent qu'Osiander a pu écrire cette préface dans le but de protéger Copernic, peut-être pour éviter les critiques et les controverses. Dans cette préface, Osiander affirme que le modèle décrit dans le livre devrait être considéré comme une simple hypothèse mathématique utile pour calculer les positions des planètes, plutôt que comme une description exacte de la réalité physique. Il suggère que le modèle géocentrique, où la Terre est au centre de l'Univers, peut toujours être considéré comme une description valable de la réalité. Andreas Osiander explique ainsi que le travail d'un astronome consiste principalement à formuler des hypothèses afin de réaliser des calculs en harmonie avec les observations. Il avance donc que la théorie héliocentrique devrait être considérée dans un contexte strictement instrumentaliste.

Pour mémoire, l'instrumentalisme est une perspective philosophique dans le domaine de la philosophie des sciences qui considère que les théories scientifiques ne reflètent pas forcément la réalité, mais sont plutôt des constructions conceptuelles, des outils ou des instruments utiles pour réaliser des prédictions et expliquer les phénomènes observés.

Des articles complémentaires

- LERNER Michel-Pierre, « [Aux origines de la polémique anticopernicienne \(I\). L'Opusculum quantum de Giovanmaria Tolosani \[1547-1548\]](#) », *Revue des sciences philosophiques et théologiques*, 2002/4 (Tome 86), p. 681-722
- LERNER Michel-Pierre, « [Aux origines de la polémique anticopernicienne \(II\). Martin Luther, Andreas Osiander et Philipp Melanchthon](#) », *Revue des sciences philosophiques et théologiques*, 2006/3 (Tome 90), p. 409-452.
- VERDET Jean Pierre, « [La diffusion de l'héliocentrisme](#) », *Revue d'histoire des sciences*, tome 42, n° 3, 1989. pp. 241-253.