



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

La découverte de Neptune et la non-découverte de Vulcain

Réfutabilité, hypothèses et changement de paradigme

Objectifs de la séance

- Comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration.
- Explorer l'organisation du Système solaire.

Mise en situation

Organiser la séance autour d'une classe « puzzle ». Pour cela :

Prévoir de regrouper les élèves en groupes de 4, en veillant à ce que les groupes soient diversifiés.

- **Phase individuelle :**
attribuer, à chaque élève d'un groupe, l'étude d'un corpus de documents. Dans cette ressource, les corpus sont repérés par « corpus bleu », « corpus vert », « corpus rose » et « corpus orange ». S'assurer que les élèves n'ont accès qu'à leur propre corpus. Leur donner le temps de lire la documentation au moins deux fois.
- **Phase experte :**
former des groupes temporaires d'experts en demandant à un élève de chaque groupe de se joindre aux autres élèves affectés au même corpus documentaire. Leur demander de répondre, en groupe, aux questions posées.
- **Phase puzzle :**
reconstituer les groupes originaux.

Demander à chaque élève de présenter à son groupe le contenu de son corpus documentaire et les réponses aux questions posées.

Encourager les questions pour obtenir des clarifications.

Après les échanges, demander au groupe de synthétiser ce qu'ils ont appris sur un tableau ou une grande feuille et de répondre à la question commune présentée ci-après.

Consignes pour chaque corpus documentaire

- « **Corpus bleu** » Supports 1, 2 et 9

1. a. Indiquer au moins une raison pour laquelle les observations anciennes auraient pu être erronées.
b. Critiquer la méthodologie de Bouvard dans la gestion des observations anciennes du point de vue scientifique.
c. Montrer qu'il aurait été plus judicieux pour Bouvard de ne pas écarter les observations anciennes dans la construction des tables.
d. Le biais de confirmation représente la tendance à favoriser, interpréter ou chercher des informations qui confirment nos convictions existantes, tout en évitant ou en minimisant celles qui les contredisent.
Indiquer en quoi l'attitude de Bouvard peut s'expliquer à l'aide du biais de confirmation.
e. Proposer un conseil pour permettre aux chercheurs d'améliorer leurs pratiques lors du processus de collecte et d'interprétation des données.
2. Les tables astronomiques sont des tableaux de données sur les mouvements des astres. Elles sont basées sur des observations et élaborées à partir de modèles mathématiques. Elles permettent de prédire la position des astres dans le ciel. Indiquer les deux raisons qui pourraient expliquer les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus.
3. Dans le cas où les modèles mathématiques seraient erronés, citer les deux hypothèses formulées par Le Verrier permettant d'expliquer ces anomalies.
4. Expliquer si les anomalies observées ont entraîné la réfutation de la théorie de la gravitation.

Expliquer comment l'hypothèse de l'existence de la planète perturbatrice a été validée.

- « **Corpus vert** » Supports 1, 3 et 9

1. Expliquer pourquoi l'observation des perturbations observées dans le mouvement d'Uranus entre en conflit avec la théorie de Newton sur la gravitation.
2. Expliquer pourquoi Le Verrier ne tient pas compte de certaines hypothèses émises.
3. Donner la limite évoquée par certains astronomes à la théorie de Newton sur la gravitation.
4. Citer les hypothèses émises par certains chercheurs et proposer une argumentation pouvant justifier leur formulation.
5. Indiquer pourquoi Le Verrier considère que les hypothèses formulées par d'autres astronomes étaient en réalité des opinions.
6. Indiquer laquelle de ces hypothèses a la préférence de Le Verrier.
7. Expliquer à quelle condition l'hypothèse d'une perturbation due à une planète pourra être confirmée.
8. Citer la phrase du texte qui montre que Le Verrier ne se résout pas à réfuter la loi de Newton.
9. À quelle condition la loi de Newton pourrait-elle réfutée ?
10. Montrer que Le Verrier ne rejette pas les autres hypothèses (éther, satellite, comète) de manière dogmatique.

Expliquer comment l'hypothèse de l'existence de la planète perturbatrice a été validée.

- « **Corpus rose** » Supports 4, 5, 6, 7 et 8

1. Expliquer pourquoi l'observation des perturbations observées dans le mouvement d'Uranus pourrait s'expliquer par l'existence d'une planète perturbatrice.
2. Expliquer comment Le Verrier conclut que la planète perturbatrice :
 - « ne saurait se placer au-dessous de Saturne » ;
 - ne peut pas se situer « entre Saturne et Uranus ».
3. Expliquer pourquoi elle ne peut pas non plus être « voisine » d'Uranus même si elle est placée au-delà.
4. Sachant qu'elle doit être loin d'Uranus, expliquer pourquoi Le Verrier en conclut que sa « masse sera assez considérable ».
5. Indiquer comment Le Verrier a établi la position de la planète perturbatrice.
6. Citer un extrait du texte soulignant la nature dynamique de la connaissance scientifique et la nécessité, en sciences, de rester ouvert à de nouvelles découvertes.
7. Expliquer à quelle condition l'hypothèse d'une perturbation due à une planète peut être validée.
8. Comparer les résultats des calculs effectués par Le Verrier aux caractéristiques actuelles de Neptune. Commenter en remplaçant les données calculées dans le contexte de l'époque.
9. Citer la condition nécessaire proposée par Le Verrier pour qu'une théorie soit scientifiquement établie.

Expliquer comment l'hypothèse de l'existence de la planète perturbatrice a été validée.

- « **Corpus orange** » Supports 1, 9, 10, 11, 12

1. Expliquer pourquoi l'observation des perturbations observées dans le mouvement de Mercure entre en conflit avec la théorie de Newton sur la gravitation et pourrait la remettre en question.
2. Expliquer la différence qu'opère Le Verrier entre les écarts irréguliers et les erreurs systématiques.
3. Citer un extrait du texte soulignant la nature dynamique de la connaissance scientifique et la nécessité, en sciences, de rester ouvert à de nouvelles découvertes.
4. Citer la phrase du texte qui montre que Le Verrier ne se résout pas à réfuter la loi de Newton.
5. Montrer que Le Verrier était convaincu de l'existence d'une planète perturbatrice.
6. Le biais de confirmation représente la tendance à favoriser, interpréter ou chercher des informations qui confirment nos convictions existantes, tout en évitant ou en minimisant celles qui les contredisent.
7. À partir de l'exemple de Vulcain, montrer que les attentes préalables des chercheurs peuvent influencer les observations dans le cadre des sciences expérimentales.
8. Expliquer comment les protocoles expérimentaux peuvent être conçus pour minimiser ces influences et assurer une objectivité maximale.
9. Citer une raison qui pourrait expliquer la difficulté d'observer la planète Vulcain.
10. Indiquer si l'hypothèse de l'existence de la planète perturbatrice a été validée.
11. Montrer que l'invalidation de l'hypothèse de l'existence de la planète Vulcain n'a pourtant pas remis en cause la théorie de Newton sur la gravitation.

Consignes communes pour la phase puzzle

À partir de l'étude des théories sur l'existence des planètes perturbatrices, expliquer :

- comment un chercheur réagit aux observations qui semblent contredire les prédictions issues des modèles théoriques ;
- dans quelle mesure une théorie (ou modèle) résiste aux observations qui pourraient la réfuter (remettre en question).

Illustrer par des exemples issus des supports.

Supports

Support 1. La théorie de Newton sur l'attraction des corps

Depuis les travaux du scientifique anglais Isaac Newton (1642 – 1727), on appelle gravitation le phénomène responsable de l'attraction mutuelle des corps massifs entre eux. Une force attractive existe ainsi entre le Soleil et les planètes, entre la Terre et la Lune et entre la Terre et n'importe quel objet à sa surface. Elle permet d'expliquer la chute des corps sur Terre et le mouvement des corps célestes, comme par exemple les planètes.

Support 2. L'étude des irrégularités du mouvement d'Uranus (Partie 1)

En 1845, le responsable de l'Observatoire de Paris demande à un astronome, Urbain J.J. Le Verrier (1811-1877), de se pencher sur le problème des irrégularités dans le mouvement d'Uranus. En 1846, Le Verrier publie un article dont un extrait est retranscrit ci-après.

« On possédait, en 1820, quarante années d'observations méridiennes régulières d'Uranus. La planète avait, en outre, été observée dix-sept fois, depuis 1690 jusqu'en 1771, par Flamsteed, Bradley, Mayer et Lemonnier.

(...)

Il était permis d'espérer qu'en s'aidant de toutes ces données, on parviendrait à construire des tables exactes du mouvement de la planète : c'est ce qu'entreprit M. Bouvard, membre de l'Académie des Sciences. Mais il rencontra des difficultés imprévues.

(...)

Il y eut impossibilité de représenter à la fois les dix-sept observations anciennes et les nombreuses observations modernes. Dans cette situation embarrassante, le savant académicien jeta des doutes sur l'exactitude des observations anciennes ; il les écarta complètement et n'eut égard qu'aux seules observations modernes.

Vingt-cinq années, écoulées depuis cette époque, nous ont appris que les tables actuelles, qui ne représentent pas les lieux anciens, ne s'accordent pas mieux avec les positions observées en 1845. Doit-on attribuer ce désaccord à ce que la théorie

[de Newton sur l'attraction des corps] n'est pas suffisamment précise ? Ou bien cette théorie n'a-t-elle pas été comparée aux observations avec assez d'exactitude, dans le travail qui a servi de base aux tables actuelles ? Enfin, se pourrait-il qu'Uranus fût soumis à d'autres influences que celles qui résultent des actions du Soleil, de Jupiter et de Saturne ? Et, dans ce cas, parviendrait-on, par une étude attentive du mouvement troublé de la planète, à déterminer la cause de ces inégalités imprévues ? Pourrait-on en venir à fixer le point du ciel où les investigations des astronomes observateurs devraient faire reconnaître le corps étranger, source de tant de difficultés ?

Telles sont les questions que soulève aujourd'hui l'histoire d'Uranus. On doit dire qu'il n'avait été fait de réponse satisfaisante à aucune d'elles, lorsque j'entrepris, l'an dernier, de sonder scrupuleusement tous les points de cette théorie ; d'en éclaircir les détails aussi loin que le comportent les principes de l'attraction de la matière.

(...) ».

Source : Le Verrier, U., *Recherches sur les mouvements d'Uranus*

Support.3. L'étude des irrégularités du mouvement d'Uranus (Partie 2)

En 1845, le responsable de l'Observatoire de Paris demande à un astronome, Urbain J.J. Le Verrier (1811-1877), de se pencher sur le problème des irrégularités dans le mouvement de la planète Uranus. En 1846, Le Verrier publie un article dont un extrait est retranscrit ci-après.

« L'importance du sujet me faisait une loi de tout revoir, de tout vérifier moi-même. À l'égard des anciennes observations, j'ai réduit de nouveau celles de Flamsteed, Bradley, Mayer et Lemonnier ; et, parmi les nouvelles, j'en ai choisi deux-cent-soixante-deux (...). Pour les vingt premières années, depuis 1781 jusqu'en 1800, j'ai eu recours aux publications de l'Observatoire de Greenwich. Les observations publiées par l'Observatoire de Paris, dans la *Connaissance des Temps* et dans deux volumes in-folio, m'ont servi depuis 1801 jusqu'en 1828. En 1829 et 1830, j'ai repris les observations anglaises. Enfin, depuis 1835 jusqu'en 1845, j'ai pu profiter de la nouvelle série, encore inédite, des excellentes observations faites à Paris, et que M. Arago m'a fait l'amitié de me confier.

(...)

J'ai démontré, si je ne me trompe, qu'il y a incompatibilité formelle entre les observations d'Uranus et l'hypothèse que cette planète ne serait soumise qu'aux actions du Soleil et des autres planètes, agissant conformément aux principes de la gravitation universelle. On ne parviendra jamais, dans cette hypothèse, à représenter les mouvements observés.

À peine avait-on commencé, il y a quelques années, à soupçonner que le mouvement d'Uranus était modifié par quelque cause inconnue, que déjà toutes les hypothèses possibles étaient hasardées sur la nature de cette cause. Chacun, il est vrai, suivit simplement le penchant de son imagination, sans apporter aucune considération à l'appui de son assertion. On songea à la résistance de l'éther ; on parla d'un gros satellite qui accompagnerait Uranus, ou bien d'une planète encore inconnue, dont la force perturbatrice devrait être prise en considération ; on alla même jusqu'à supposer qu'à cette énorme distance du Soleil, la loi de la gravitation pourrait perdre quelque chose de sa rigueur. Enfin, une comète n'aurait-elle pas pu troubler brusquement Uranus dans sa marche ?

Je le répète, toutes ces opinions ont été émises sous la forme d'hypothèses, et sans qu'on ait cherché à étayer aucune d'elles par des considérations positives.

(...)

Aujourd'hui, c'en est tout autrement. On ne saurait plus douter de ces irrégularités, et le moment est venu de chercher à démêler la direction et la grandeur de la force qui les produit.

(...)

On pourra alors compter que les veilles des observateurs ne feront pas défaut ; qu'avant peu, l'astronomie physique se sera enrichie de l'astre dont l'astronomie théorique aura à l'avance dévoilé l'existence et fixé la position.

Je ne m'arrêterai pas à cette idée que les lois de la gravitation pourraient cesser d'être rigoureuses, à la grande distance à laquelle Uranus est situé du Soleil. Ce n'est pas la première fois que, pour expliquer des mégalithes dont on n'avait pu se rendre compte, on s'en est pris au principe de la gravitation universelle. Mais on sait aussi que ces hypothèses ont toujours été anéanties par un examen plus approfondi des faits. L'altération des lois de la gravitation serait une dernière ressource à laquelle il ne pourrait être permis d'avoir recours qu'après avoir épuisé l'examen des autres causes, qu'après les avoir reconnues impuissantes à produire les effets observés.

Je ne saurais croire davantage à la résistance de l'éther ; résistance dont on a à peine entrevu des traces dans le mouvement des corps de la densité la plus faible ; c'est-à-dire dans les circonstances qui seraient les plus propres à manifester l'action de ce fluide.

Les inégalités particulières d'Uranus seraient-elles dues à un gros satellite qui accompagnerait la planète ? Les oscillations qui se manifesteraient dans la marche d'Uranus affecteraient alors une très-courte période ; et c'est précisément le contraire qui résulte des observations. Les inégalités qui nous occupent se développent avec une très grande lenteur. Il est donc impossible de recourir à l'hypothèse actuelle, d'autant plus que le satellite devrait être effectivement très gros, et n'aurait pu échapper aux observateurs.

Serait-ce donc une comète qui, tombant sur Uranus, aurait, à une certaine époque, changé brusquement la grandeur et la direction de son mouvement ? J'ai déjà dit qu'on satisfaisait assez bien au mouvement de la planète entre 1781 et 1820, sans le secours d'aucune force extraordinaire. Cette remarque, qui semble prouver que la force perturbatrice n'a point exercé d'influence sensible durant cette période, serait assez conforme à l'hypothèse actuelle d'une altération brusque du mouvement de la planète. Mais alors, la période de 1781 à 1820 pourrait se lier naturellement, soit à la série des observations antérieures, soit à la série des observations postérieures, et ne serait incompatible qu'avec l'une d'elles. Or c'est ce qui n'a pas lieu. On peut prouver que la série intermédiaire ne peut s'accorder, d'une part, avec les anciennes observations, et, de l'autre, avec les nouvelles.

Il ne nous reste ainsi d'autre hypothèse à essayer que celle d'un corps agissant d'une manière continue sur Uranus, changeant son mouvement d'une manière très-lente. Ce corps, d'après ce que nous connaissons de la constitution de notre système solaire, ne saurait être qu'une planète, encore inconnue. Mais cette hypothèse est-elle plus plausible que les précédentes ? N'a-t-elle rien d'incompatible avec les inégalités observées ? Est-il possible d'assigner la place que cette planète devrait occuper dans le ciel ? ».

Source : Le Verrier, U., *Recherches sur les mouvements d'Uranus*

Support 4. Orbite d'une planète

Dans le système solaire, les planètes décrivent une orbite elliptique autour du Soleil. L'aphélie est la position de l'orbite pour laquelle la distance entre le Soleil et la planète est maximale ; le périhélie est la position de l'orbite pour laquelle cette distance est minimale.

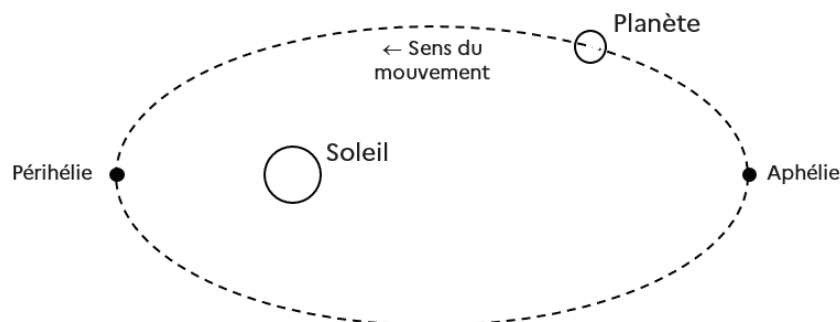


Schéma de l'orbite d'une planète

Support 5. Loi de Newton de l'attraction gravitationnelle

La force responsable du mouvement des planètes, et plus généralement de l'attraction à distance entre deux corps A et B qui ont une masse, s'exprime par la relation :

$$F_{A/B} = G \times \frac{m_A \times m_B}{d^2}, \text{ avec :}$$

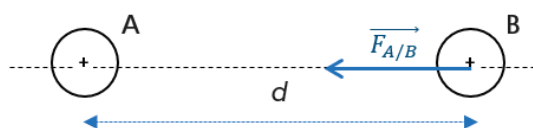
$F_{A/B}$: force d'attraction gravitationnelle exercée par le corps A sur le corps B

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

m_A : masse du corps A

m_B : masse du corps B

d : distance entre les centres de masse des corps A et B



Support 6. Planète perturbatrice

Vers 1821, l'astronome français Alexis Bouvard calcule les tables prédisant les mouvements des planètes Jupiter, Saturne et Uranus. Si les tables pour Jupiter et Saturne ont été établies sans difficulté majeure, des obstacles significatifs ont émergé avec Uranus. Malgré les ajustements tenant compte des perturbations causées par les autres planètes, Bouvard ne réussit pas à établir une description du mouvement d'Uranus sur toute la période d'observation et on ne peut attribuer ces anomalies à des erreurs d'observation. Alexis Bouvard envisage que les anomalies dans le mouvement d'Uranus puissent être le résultat de l'influence gravitationnelle d'une nouvelle planète perturbatrice (Fig.1).

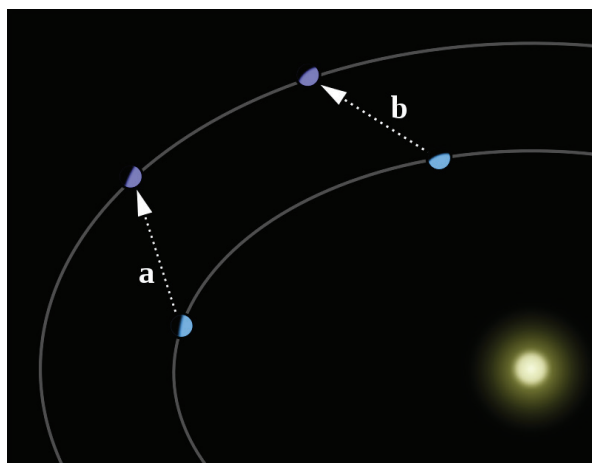


Fig.1 - Perturbation gravitationnelle (Schéma réalisé par RJHall).

En position (a), Neptune située sur l'orbite extérieure se trouve « en avant » par rapport à Uranus, située sur l'orbite intérieure. Neptune tire en avant Uranus qui accélère et se trouve donc en avance par rapport au mouvement qu'elle aurait en l'absence de Neptune.

Inversement, en position (b), Neptune tire en arrière Uranus qui ralentit et se trouve donc en retard par rapport au mouvement qu'elle aurait en l'absence de Neptune.

Les observations de l'avance et du retard d'Uranus ont permis de supposer l'existence d'une planète perturbatrice baptisée Neptune.

Source : [Site Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Neptune)

Support 7. Caractéristiques actuelles de Neptune

Périhélie de Neptune : 4 459 800 000 km (29,811 6 ua¹)

Aphélie de Neptune : 4 537 000 000 km (30 328 ua)

Période de révolution de Neptune : 164,86 ans

Masse de Neptune : $1,024\,3 \times 10^{26}$ kg

Masse du Soleil : $1,988\,5 \times 10^{30}$ kg

Support 8. L'étude des irrégularités du mouvement d'Uranus (Partie 3)

En 1845, le responsable de l'Observatoire de Paris demande à un astronome, Urbain J.J. Le Verrier (1811-1877), de se pencher sur le problème des irrégularités dans le mouvement de la planète Uranus. En 1846, Le Verrier publie un article dont un extrait est retranscrit ci-après.

« Et d'abord, on ne saurait la placer au-dessous de Saturne, qu'elle dérangerait plus qu'elle ne trouble Uranus ; et l'on sait que son influence sur Saturne est insensible.

Peut-on la supposer située entre Saturne et Uranus ? Il faudrait la placer beaucoup plus près de l'orbite d'Uranus que de celle de Saturne ; et dès lors sa masse devrait être assez petite pour ne produire sur Uranus que des perturbations qui sont, en définitive, peu considérables.

(...)

La planète perturbatrice sera donc située au-delà d'Uranus.

1. L'unité astronomique (ua) est une unité de longueur ; elle correspond approximativement à la distance entre la Terre et le Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

Nous ne devons pas supposer qu'elle en soit voisine, car alors sa masse serait très petite, et nous retomberions ainsi dans les mêmes impossibilités que précédemment. Ce sera bien loin au-delà d'Uranus que nous pourrons espérer de découvrir ce nouveau corps dont la masse sera assez considérable.

(...)

Or, il n'est pas plus possible de la placer à une très grande distance, à une distance triple de celle d'Uranus au Soleil par exemple.

Il faudrait, en effet, dans cette hypothèse, attribuer à cette planète une masse très considérable ; la grande distance à laquelle elle se trouverait à la fois de Saturne et d'Uranus rendrait ses actions, sur ces deux planètes, comparables entre elles, et il ne serait point possible d'expliquer les inégalités d'Uranus sans développer dans Saturne des perturbations très sensibles, et dont il n'existe point de traces.

(...)

L'existence d'une planète encore inconnue se trouvant ainsi mise hors de doute, j'ai renversé le problème qu'on s'est, jusqu'ici, proposé dans le calcul des perturbations. Au lieu d'avoir à mesurer l'action d'une planète déterminée, j'ai dû partir des inégalités reconnues dans Uranus, pour en déduire les éléments de l'orbite de la planète perturbatrice ; pour donner la position de cette planète dans le ciel, et montrer que son action rendait parfaitement compte des inégalités apparentes d'Uranus.

Il ne viendra sans doute à personne l'idée de vouloir réduire notre système solaire à des limites étroites et d'en tirer une conclusion contre l'existence d'un nouvel astre. Dans ce cas, cependant, je répondrais qu'on aurait eu les mêmes raisons d'affirmer, le 12 mars 1781, que Saturne était la dernière des planètes, sauf à être contredit le lendemain par la découverte d'Uranus.

(...)

J'ai eu l'honneur, dans la séance du 1er juin dernier, de communiquer à l'Académie les principaux résultats du travail que j'ai entrepris sur la théorie d'Uranus. J'ai prouvé qu'il n'était pas possible de représenter les observations de cet astre dans le système de la gravitation universelle, en supposant qu'il ne fût soumis qu'aux actions réunies du Soleil et des planètes connues. Toutes les anomalies observées s'expliquent, au contraire, dans leurs moindres détails, par l'influence d'une nouvelle planète qui serait située au-delà d'Uranus et qui parcourrait une orbite déterminée. »

(...)

Mais j'ai rencontré de grandes difficultés, et le temps qu'il m'a fallu pour les surmonter m'a entraîné jusqu'au moment de l'opposition de la planète, qui a lieu actuellement. Heureusement, les recherches que les astronomes tenteront pour découvrir le nouvel astre dans les lunettes puissantes seront encore possibles cette année pendant trois mois ; et j'ai reçu l'assurance que ce temps sera employé utilement.

(...)

Enfin, les observations faites depuis 1781 jusqu'en 1845, étant groupées convenablement, m'ont fourni vingt-six équations, qui, réunies aux précédentes, ont porté le nombre des équations définitives à trente-trois.

(...)

Voici les éléments auxquels je suis parvenu : (...) les distances sont rapportées à la moyenne distance de la Terre au Soleil ; enfin, la masse du Soleil a été prise pour unité.

(...)

Durée de la révolution sidérale : 217 ans, 387

Masse :

Distance au Soleil : 33,06

(...)

Ces conditions physiques me semblent promettre que non seulement on pourra apercevoir la nouvelle planète dans les bonnes lunettes, mais encore qu'on la distinguera par l'amplitude de son disque ; que son apparence ne sera pas réduite à celle d'une étoile. C'est un point fort important.

(...)

Je terminerai cette analyse par une remarque qui me paraît très propre à porter dans les esprits la conviction que la théorie que je viens d'exposer est l'expression de la vérité. Le caractère essentiel de l'exactitude de toute théorie, c'est qu'elle puisse satisfaire non seulement à l'ensemble, mais encore aux moindres détails des observations. (...) C'est ce qui a précisément lieu. »

Source : Le Verrier, U., *Recherches sur les mouvements d'Uranus*

Support 9. Observation de la planète Neptune

Le 25 septembre 1846, Johann-Gottfried Galle (1812-1910), de l'Observatoire de Berlin écrit en français à Le Verrier :

« Monsieur,

La planète, dont vous nous avez signalé la position, réellement existe. Le même jour où j'ai reçu votre lettre, je trouvais une étoile de 8^{me} grandeur, qui n'était [a] it pas inscrite dans l'excellente carte Hora XXI (dessinée par M. le Dr Bremiker) de la collection des cartes célestes publiée par l'Académie de Berlin. L'observation du jour suivant décida que c'était la planète cherchée. Nous l'avons comparée, Mr. Encke et moi, par la grande lunette de Fraunhofer [objectif de 23 cm de diamètre] avec une étoile de 9^{me} grandeur [...]. »

Source : Le Verrier, U., *Recherches sur les mouvements d'Uranus*

Support 10. L'hypothèse d'une neuvième planète dans le système solaire

Vulcain est une planète hypothétique située entre le Soleil et Mercure (**Fig.1**). L'hypothèse de son existence est attribuée à l'astronome Urbain Le Verrier (1811 – 1877) qui voulait rendre compte des perturbations du mouvement de Mercure par rapport aux prédictions établies par la mécanique newtonienne. En effet, dès le début du XIX^e siècle, les astronomes ont observé un décalage notable pouvant atteindre une heure par rapport aux dates anticipées des transits de Mercure. Ces transits surviennent lorsque Mercure se positionne entre un observateur et le Soleil, apparaissant alors comme un minuscule point sombre traversant le disque solaire (**Fig.2**).

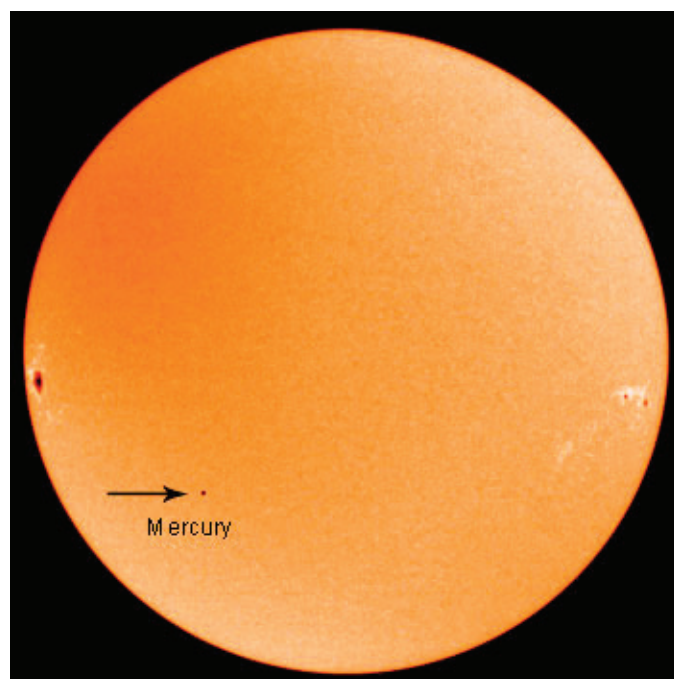
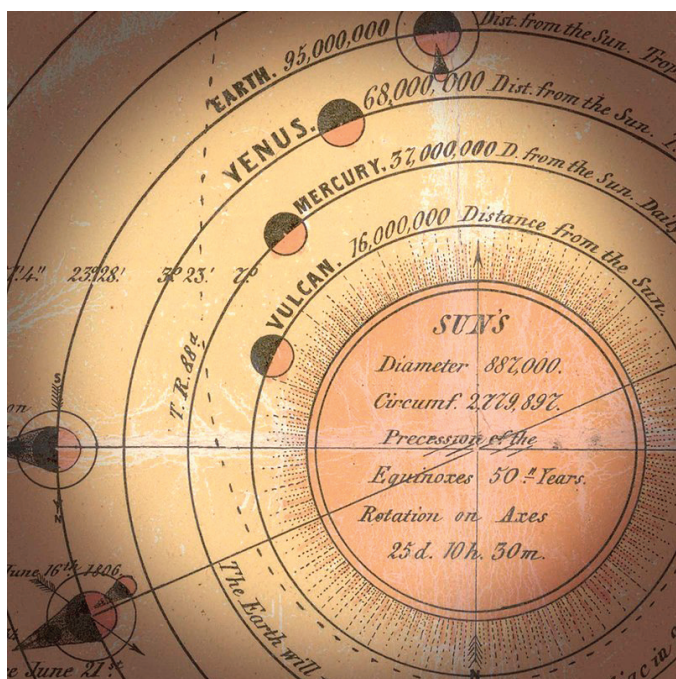


Fig.1 - Lithographie de 1846 sur le système solaire.
Détail : La planète hypothétique Vulcain orbitant près du Soleil.

Fig.2 - Transit de Mercure (Mercury) du 8 novembre 2006.

Source : [site Gallica](http://site.Gallica)

Dans une communication à l'Académie de Sciences en 1874, Le Verrier expose sa théorie :

« Aucune des tables, disions-nous, destinées à représenter les mouvements des planètes ne s'accorde rigoureusement avec les observations. Les plus précises, celles de la Terre et de Mercure, laissent encore à désirer. Je ne parle point ici de ces écarts irréguliers que l'incertitude, inséparable de toute mesure physique, amène nécessairement entre l'observation et le calcul, mais bien de ces erreurs systématiques, dont la variation suit une loi déterminée, dont l'existence réelle et la régularité ressortent de l'ensemble des travaux des différents observatoires, et dont ne peut accuser que la théorie.

Ces incertitudes méritent de fixer toute notre attention ; sans doute elles sont peu considérables, mais en revanche elles existent partout, et leur petitesse n'autorise pas à les négliger.

Il serait assurément peu grave en soi que nos tables astronomiques fissent une erreur d'une demi-seconde sur le temps du passage d'un astre au méridien, si l'importance de cette erreur ne résidait pas dans son degré de certitude plutôt que dans sa grandeur. Tout écart décèle une cause inconnue et peut devenir la source d'une découverte. (...) ; mais, d'abord, nous laisserions ainsi à la postérité le soin de perfectionner la science et l'avantage de connaître de nouvelles vérités.

(...)

La théorie du mouvement d'une planète repose sur ces hypothèses, que chacune d'elles n'est soumise qu'aux actions du Soleil et des autres planètes, et, en outre, que ces actions s'exercent conformément aux principes de la gravitation universelle.

Mais les conséquences du principe newtonien n'avaient pas été, sur beaucoup de points, déduites avec une rigueur suffisante ; et, par ce motif, on ne se trouvait point en état de décider si les désaccords, signalés entre l'observation et le calcul, tenaient uniquement à des erreurs analytiques, ou bien s'ils étaient dus en partie à l'imperfection de nos connaissances dans la physique céleste.

Il fallait donc reprendre les théories mécaniques des mouvements des planètes et les scruter jusque dans leurs dernières conséquences, avant de pouvoir réaliser une comparaison décisive avec les observations. C'est ce qui a été fait.

(...)

La conséquence est très claire. Il existe dans les environs de Mercure, entre la planète et le Soleil sans doute, une matière jusqu'ici inconnue. Consiste-t-elle en une ou plusieurs petites planètes ou bien en des astéroïdes ou même en des poussières cosmiques ? La théorie ne se peut prononcer à cet égard. À de nombreuses reprises, des observateurs dignes de foi ont déclaré avoir été témoins du passage d'une petite planète sur le Soleil ; mais, on n'est parvenu à rien coordonner à ce sujet.

Nous ne saurions cependant douter de l'exactitude de la conclusion. »

Source : Le Verrier, U., *Théorie nouvelle du mouvement de la planète Neptune : remarques sur l'ensemble des théories des huit planètes principales : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune*

Support 11. L'observation supposée de Vulcain

En 1859, une lettre parvint à Urbain Le Verrier, provenant d'Edmond Modeste Lescarbault, un astronome amateur. Lescarbault prétendit avoir repéré une énigmatique tache noire en transit devant le Soleil, suggérant la possibilité d'une planète située entre Mercure et le Soleil. Le Verrier, convaincu de l'importance de cette découverte potentielle, présenta le 2 janvier 1860 à l'Académie des Sciences son annonce de la nouvelle planète, baptisée plus tard du nom de « Vulcain » en référence au dieu romain du feu et des volcans. Il émit l'hypothèse que Vulcain pourrait expliquer les anomalies dans le mouvement de Mercure, et se lança dans la quête de sa découverte.

« Le nouvel astre, en raison du faible rayon de son orbite, ne s'éloignerait jamais à une distance de plus de 8 degrés du Soleil. Et la lumière totale qu'il nous renvoie étant plus faible que celle de Mercure, on peut comprendre qu'on ne l'ait point aperçu jusqu'ici. ».

Pendant quelques décennies, de nombreuses observations furent organisées pour trouver la planète recherchée mais aucune n'a mis à jour une trace de Vulcain.

Source : Lescarbault, E-M., *Passage d'une planète sur le disque du Soleil, observé à Orgères (Eure-et-Loir), Lettre à M. Le Verrier, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences.*

Support 12. La résolution du problème par Albert Einstein

Les anomalies sur l'orbite de Mercure furent expliquées par Albert Einstein en 1916 avec sa théorie de la relativité générale.

« En fait, les astronomes ont trouvé que la théorie de Newton ne suffit pas pour expliquer par le calcul le mouvement de Mercure observé avec l'exactitude actuellement accessible par l'expérience. Après avoir tenu compte de toutes les influences perturbatrices que les autres planètes exercent sur Mercure, on reconnut (Leverrier en 1859 et Newcomb en 1895) qu'il restait encore à expliquer un mouvement du périhélie de Mercure qui diffère à peine de + 43 secondes par siècle dont nous avons parlé précédemment. L'écart entre ce résultat empirique et la conclusion de la théorie de la relativité générale s'élève au maximum à quelques secondes. ».

Source : Einstein, A., *La théorie de la relativité restreinte et généralisée*, Gauthier-Villars

Pistes pour différencier

Les supports 4, 5, 6, 7, 8 et 9 pourront être proposées à des élèves suivant la spécialité physique-chimie.

Évaluation

L'évaluation dans les classes puzzles vise à prendre en compte à la fois les compétences individuelles et les compétences collectives, mettant l'accent sur la compréhension approfondie du contenu et le développement des compétences sociales et collaboratives. Voici quelques éléments d'évaluation.

Compétences collectives

Coopération dans le groupe expert : observer la manière avec laquelle les élèves interagissent lorsqu'ils forment des groupes d'experts temporaires pour discuter des points clés. L'entraide et le partage d'informations sont des aspects importants.

Collaboration et communication dans le groupe puzzle : évaluer la manière avec laquelle les élèves interagissent au sein de leur groupe puzzle. Cela inclut la communication efficace, l'écoute active et la contribution équitable de tous les membres.

Présentation : évaluer la capacité des élèves à présenter leur corpus documentaire au reste du groupe. Cela peut inclure la clarté, la pertinence, l'exactitude et la complétude des informations choisies et la capacité à répondre aux questions.

Compétences individuelles

Compréhension du contenu : évaluer la compréhension individuelle du sujet étudié. Chaque élève doit démontrer une connaissance adéquate du corpus qui lui a été assigné.

Participation active : évaluer la participation active de chaque élève tout au long du processus, y compris pendant les discussions en groupe et les phases de présentation.