

ASTRONOMIE POUR L'ÉDUCATION
DANS L'ESPACE FRANCOPHONE

Astronomie pour l'Education dans l'Espace Francophone | 2023



Credit: Lucy Wang HuaiJi OAE



Lycée Pierre Mendès France
Tunis | Tunisie
9 - 11 Novembre 2023



Organisateurs: SAT et OAEF-CY



ISBN 9782488613033

© Février 2025

OUVRAGE COLLECTIF SOUS LA DIRECTION
DE EMMANUEL ROLLINDE

Astronomie
pour l'éducation
dans l'espace
Francophone

Édition 2023

Éditions Le Manuscrit
Paris

Comité scientifique pour les actes du colloque

E. Rollinde (LDAR, CY Cergy Paris Université/F-HOU)
R. Khanfour-Armalé (LDAR, CY Cergy Paris Université)
G. Remy (CY Cergy Paris Université)
R. Ferlet (Institut d'Astrophysique de Paris/F-HOU)

Comité scientifique du colloque

Membres du nœud francophone OAENF-CY

E. Rollinde (LDAR, CY Cergy Paris Université/F-HOU)
F. Dulieu (LERMA, CY Cergy Paris Université)
G. Remy (CY Cergy Paris Université)

Coordinateurs Nationaux de l'Astronomie pour l'Éducation (NAEC)

Belgique : R. Alvarez (Planétarium de l'Observatoire Royal de Belgique)

France : N. Brouillet (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux) & F. Pitout (Observatoire Midi-Pyrénées/Clea)

Guinée : J. Tolno (Association guinéenne de l'astronomie)

Ile Maurice : N. Oozeer (South African Radio Astronomy Observatory, South Africa)

Maroc : Z. Belha & H. Darhmaoui (Maroc-HOU)

Tchad : Djabbi Mamadou Mahamat

Tunisie (Société Astronomique de Tunisie) : A. Teyahi & K. Sofien

Les institutions dans le Comité scientifique



A. Doressoundiram (Observatoire de Paris)

M. Faye (F-HOU)

N. Robichon (Observatoire de Paris)

J. Strajnic (Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche – Rectorat d'Aix-Marseille)

Comité d'organisation du colloque Astronomie pour l'Éducation dans l'Espace Francophone 2023

P. Bousquet, proviseur du lycée Pierre Mendès France

S. Keskes, Institut Régional de Formation (IRF) zone Maghreb-Est

Société astronomique de Tunisie : S. Kamoun, H. Ben Yahia,

A. Teyahi, S. Ksouri



Institutions ayant soutenu financièrement le colloque Astronomie pour l'Éducation dans l'Espace Francophone 2023



La publication de cet ouvrage a été financée par les associations F-HOU et le Clea, les laboratoires LDAR et LERMA-CY

Table des matières

Introduction	9
Maquettes	15
Transit d'une exoplanète	17
Les relations de Kepler et le planétaire humain	31
Maquettes du Système solaire	45
Observations	59
Reproduire des mesures historiques de l'astronomie avec le logiciel Stellarium (I) * Le rayon de la Terre par la méthode d'Ératosthène	61
Mesure de la masse du trou noir au centre de notre Galaxie	71
Simulations et modèles	81
Évaluer les lois de Kepler avec les données de l'IMCCE et le langage de programmation Python.....	83
Planétaire et proportionnalité – Application à la définition de l'année.....	91
Reproduire des mesures historiques de l'Astronomie avec le logiciel Stellarium (II)*La distance Terre-Lune	107
Sciences participatives	119
Compréhension de l'impact des satellites sur le ciel sombre	121
Astronomie et esprit critique par la cartographie des controverses	127
Art et littérature.....	135
La combinaison spatiale : un objet technique pour questionner le monde du vivant et de la matière.....	137
Les exoplanètes à travers des œuvres littéraires-scientifiques	149
Astronomie pour l'éducation en Tunisie	167
Index des mots-clés	171

Introduction

En janvier 2021, la première édition du colloque *AstroEdu-Fr* a eu lieu en distanciel. Son objectif était de partager des expériences de recherche, enseignement, formation et médiation pour promouvoir l'utilisation de l'astronomie pour l'éducation dans l'espace francophone. Il a regroupé 260 participants, majoritairement des enseignants et des chercheurs en astronomie, venant de 17 pays francophones, majoritairement de France.

La seconde édition du colloque *AstroEdu-Fr* a eu lieu du jeudi 9 novembre 2023 au samedi 11 novembre 2023, au lycée Pierre Mendès France de Tunis et à l'Institut Régional de Formation (IRF) zone Maghreb-Est. Son ambition était de poursuivre la constitution d'une communauté francophone dans le domaine de l'astronomie pour l'éducation, en s'appuyant sur le bureau international de l'astronomie pour l'éducation (OAE) fondé par l'Union astronomique internationale (UAI), et en particulier le nœud francophone (OAENF-CY) hébergé par CY Cergy Paris Université.

Le programme du colloque a été constitué de conférences sur des thèmes liés à l'enseignement et la médiation de l'astronomie et sur des sujets d'actualités en astronomie, ainsi que d'ateliers en groupe restreint pour permettre la mise en œuvre et l'analyse de séances avec une participation active

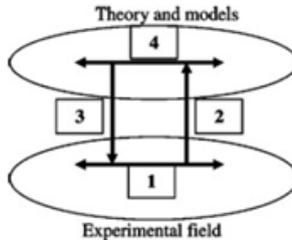
de chacun. Ce colloque s'adressait donc aux enseignants et enseignantes, formateurs et formatrices, médiateurs et médiatrices, chercheurs et chercheuses, intéressés par l'utilisation de l'astronomie pour l'éducation formelle et informelle.

Quarante-cinq représentants de onze pays francophones se sont retrouvés à Tunis : Albanie, Algérie, Cameroun, France, Guinée, Ile Maurice, Maroc, Mauritanie, Roumanie, Tchad et Tunisie. Vingt-deux ateliers ont été proposés autour de cinq thèmes : Maquette, Observation, Simulation, Art et littérature, Sciences participatives.

L'ensemble des ateliers est, décrit par des fiches complètes, disponible sur le site du nœud francophone de l'astronomie pour l'éducation¹. Cet ouvrage collectif reprend un ou deux ateliers par thème en suivant une présentation commune, basée sur l'approche de modélisation.

Approche de la modélisation

Le diagramme ci-dessous décrit le « modèle des deux mondes » de Sensevy et al. (2008)². Ce modèle comprend le monde « perceptible » (expérimental) et le monde des théories et des modèles.



1 <https://oanf.cyu.fr/version-francaise/actualites-colloques/colloques/fiches-du-colloque-astroedu-fr-2023>

2 Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S., & Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Science education*, 92(3), 424-446.

Le monde perceptible : Ce monde représente les objets et phénomènes que l'on peut percevoir, sur lesquels il est possible d'agir et de faire des mesures.

Le monde des théories et des modèles : Ce monde englobe les idées, les concepts, les modèles, les théories et les cadres conceptuels qui sont utilisés pour interpréter et comprendre les phénomènes observables dans le monde perceptible.

Les relations entre les mondes : L'acte de modélisation consiste en des activités au sein d'un des mondes ou permettant le passage d'un monde à l'autre.

- Observer/mesurer dans le monde expérimental (flèche 1).
- Décrire/interpréter ce qui est observé dans le monde perceptible par les théories et les modèles (flèche 2).
- Construire des concepts, des relations à l'intérieur des modèles (flèche 4).
- Proposer des prédictions basées sur les modèles développés (flèche 3).

Ainsi, les observations et les mesures (1) peuvent apporter de nouvelles contraintes aux modèles (2) qui pourront ainsi être évalués et révisés si nécessaire. L'usage des modèles (4) permet de proposer de nouvelles prédictions (3) qui pourront être comparées à des mesures (1).

En résumé, le modèle des deux mondes de Sensevy et al. (2008) met en évidence l'importance des interactions entre le monde perceptible et le monde des théories et des modèles dans le processus d'enseignement et d'apprentissage. Il souligne également le rôle crucial des enseignants dans la facilitation de ces interactions pour promouvoir une compréhension approfondie et significative du monde chez les apprenants.

Le tableau ci-dessous (Nielsen & Nielsen 2021³, Table 1) décrit différentes pratiques liées à l'usage de modèles.

Pratiques	Description
Utilisation descriptive des modèles	Moyen de décrire, expliquer ou communiquer une idée ou un phénomène.
Utilisation prédictive des modèles	Outils de recherche pour la résolution de problèmes, la création de sens et/ou en tant qu'entités hypothétiques représentant différentes idées du référent.
Concevoir ses propres modèles dans un but spécifique	Conception sur la base de leurs propres idées, de preuves antérieures et/ou de théories antérieures. Objectif de description, communication, explication ou prédiction
Évaluer les modèles	Selon leur capacité à représenter, expliquer, prédire. Évaluation par des tests empiriques, intégration dans d'autres modèles ou connaissances.
Réviser ses propres modèles	Modifier le pouvoir communicatif, représentatif, descriptif, explicatif et/ou prédictif du modèle. La révision se fonde sur des preuves supplémentaires, sur de nouvelles découvertes, ou de nouveaux aspects théoriques.
Comparer les modèles	Comparer et évaluer des modèles représentant le même référent. En fonction de leur capacité à représenter, décrire, communiquer, expliquer et/ou prédire.
Sélectionner les modèles	Un modèle approprié pour résoudre une tâche ou un problème spécifique sur la base de la capacité et de la pertinence par rapport à un objectif donné, en lien avec la représentativité, la description, l'explication et/ou la prédictivité.

³ Nielsen, S. S., & Nielsen, J. A. (2021). A competence-oriented approach to models and modelling in lower secondary science education: practices and rationales among Danish teachers. *Research in Science Education*, 51(Suppl 2), 565-593.

Plan des contributions

Toutes les contributions proposées dans cet ouvrage reprennent le plan suivant.

Le **résumé** précise le niveau scolaire visé (primaire, secondaire, etc.), la question développée en astronomie, le contenu disciplinaire et transversal, ainsi que la modalité de l'activité (expérience, numérique, etc.).

Les **mots-clés** sont repris dans l'index en fin d'ouvrage.

Le **contexte** permet de situer l'atelier dans une problématique astronomique plus large.

Le **contenu didactique/pédagogique** décrit les savoirs et les compétences travaillées, avec une approche pluridisciplinaire pour la plupart, et en soulignant également leur importance dans le contexte de l'enseignement de l'astronomie.

La **place de l'activité dans la modélisation** donne une cohérence à l'ensemble des ateliers dans le cadre particulier de la modélisation. Il s'agit concrètement d'expliquer de quelle manière les activités menées font travailler sur des mesures, des objets réels, des modèles, en se référant aux différents actes de modélisation.

Le **déroulement de l'activité** fournit les détails sur la réalisation de l'atelier, y compris les prérequis éventuels pour sa mise en œuvre.

Lorsque cela est possible, des **retours d'expérience** sont partagés pour mettre en lumière les aspects positifs et les défis rencontrés.

Enfin, des pistes de **prolongement** sont proposées, par exemple par des liens avec d'autres ateliers ou des perspectives d'approfondissement.

MAQUETTES

Transit d'une exoplanète

BESSONIES Marjorie
Collège Victor Hugo, Sarcelles

HAUSS RIZZETTO Florian
Collège Sabine Weiss, Toulouse

Résumé

L'activité, destinée à des élèves de cycle 4, permet de présenter et de modéliser une méthode de détection des exoplanètes : la méthode des transits. Cette activité peut s'inscrire dans un projet interdisciplinaire avec le professeur de mathématiques (lecture de graphiques, tracé de graphiques, calculs de surface, etc.). L'outil numérique avec l'application Fizziq est mobilisé, d'abord pour modéliser un transit puis pour déterminer les paramètres qui peuvent influencer le modèle (démarche scientifique).

Mots-clés

Transit; exoplanète; graphique; démarche scientifique; Fizziq; interdisciplinarité; protocole; manipulation; modélisation; collège; lycée.

Contexte

Cette activité permet aux élèves d'étudier une des méthodes les plus importantes de détection des exoplanètes : la méthode du transit qui a permis la détection de plus de 4 000 exoplanètes à ce jour.

Deux types de problématiques peuvent être travaillées, en fonction des objectifs de l'enseignant et du degré d'assimilation de la démarche de modélisation chez les élèves. Une première problématique conduit les élèves à répondre à la question : *comment détecter une exoplanète par la méthode des transits et quels sont les paramètres qui influencent ce transit ?* Les élèves doivent faire le lien entre l'observation d'une baisse de luminosité de l'étoile, le transit et le rapport entre la surface de l'exoplanète et celle de l'étoile. Après avoir modélisé ce transit avec du matériel simple et l'application Fizziq, les élèves doivent réfléchir à tous les paramètres influençant l'allure de la courbe de transit : l'intensité lumineuse de l'étoile, le rayon de l'exoplanète, la vitesse de rotation de l'exoplanète autour de l'étoile, la distance exoplanète-étoile...

Dans un second temps, et pour les élèves plus familiers avec la démarche de modélisation et les outils mathématiques, la formulation de la deuxième problématique est la suivante : *« comment différencier une planète gazeuse d'une planète rocheuse ? »*. Un calcul de masse volumique est nécessaire pour répondre à cette question. Ce calcul est permis grâce à l'exploitation de véritables courbes de transit permettant d'aboutir, à partir de la baisse de luminosité, au rayon de l'exoplanète (puis son volume).

Contenu didactique/pédagogique

Les compétences travaillées :

Disciplines	Compétences	Domaines du Socle	Point en lien avec la séance
Maths	<p><i>Chercher</i> : prélever et organiser les informations nécessaires à la résolution de problèmes à partir de supports variés : textes, tableaux, diagrammes, graphiques, dessins, schémas, etc.</p>	1,5	<p>Production d'un graphique par le logiciel à savoir lire et analyser.</p>
Sciences et technologie	<p><i>Pratiquer des démarches scientifiques et technologiques</i> : proposer, avec l'aide du professeur, une démarche pour résoudre un problème ou répondre à une question de nature scientifique ou technologique; proposer des expériences simples pour tester une hypothèse; interpréter un résultat, en tirer une conclusion.</p>	4	<p>Faire varier différents paramètres (distance de la balle, taille de la balle...) Analyse du graphique obtenu par l'application Critiquer le modèle réalisé et chercher des paramètres influençant le modèle.</p>

Sciences et technologie	<p><i>S'approprier des outils et des méthodes</i> : choisir ou utiliser le matériel adapté pour mener une observation, effectuer une mesure, réaliser une expérience ou une production ; faire le lien entre la mesure réalisée, les unités et l'outil utilisés ; garder une trace écrite ou numérique des recherches, des observations et des expériences réalisées ; organiser seul ou en groupe un espace de réalisation expérimentale.</p>	2	<p>Effectuer des mesures en groupe en modélisant le passage d'une exoplanète devant une étoile. Choisir du matériel adapté pour reproduire la situation d'un transit. Suivre l'évolution de l'éclairement (lux) en fonction du temps (secondes). Analyser un graphique obtenu par l'application.</p>
	<p><i>Pratiquer des langages</i> : rendre compte des observations, expériences, hypothèses, conclusions en utilisant un vocabulaire précis ; exploiter un document constitué de divers supports (texte, schéma, graphique, tableau, algorithme simple).</p>	1	<p>Analyse du graphique obtenu par l'application.</p>

Sciences et technologie	<i>Mobiliser des outils numériques</i> : utiliser le numérique pour communiquer des résultats et simuler des phénomènes.	2	L'application « FIZZIQ »
--	--	---	--------------------------

Cette séance permet un travail entre le professeur de mathématiques et de physique chimie et/ou de sciences et technologie.

La lecture du graphique pouvant poser problème en fin de cycle 3, il peut par exemple être demandé au professeur de mathématiques de travailler sur ce point du programme avant la séance Exoplanète.

L'interdisciplinarité de cette séance est présente :

- Lire et interpréter un graphique en mathématiques
- Réaliser une démarche scientifique en sciences
- Pratiquer des langages
- Reasonner

Place de l'activité dans la modélisation

La modélisation tient une place importante dans cette activité.

Tout d'abord la description de la méthode du transit pour détecter une exoplanète permet de rendre compte à l'élève qu'au vu des distances dans l'Univers, et notamment des distances entre un observateur terrestre et une exoplanète, la seule grandeur physique qui nous est possible de mesurer est l'intensité lumineuse de la source de lumière. Le monde perceptible est ici l'étoile autour de laquelle tourne l'exoplanète, plus précisément la quantité de lumière qui nous parvient sur Terre. À partir des variations de cette intensité lumineuse, le modèle élaboré par les physiciens permet de revenir à certaines caractéristiques des exoplanètes qui

gravitent autour de l'étoile. C'est en essayant d'interpréter cette variation de luminosité et les modifications des spectres lumineux que la première exoplanète, 51 Pegasi b, a d'ailleurs été découverte (la technique de détection utilisée était celle des vitesses radiales).

Afin de pouvoir décrire et interpréter ce monde perceptible, il est demandé aux élèves de suivre une démarche de modélisation. Ils doivent proposer un modèle dans lequel chaque objet astronomique sera remplacé par un objet qu'ils peuvent manipuler afin de reproduire un transit. À l'issue de cette première phase de construction d'un modèle, il est intéressant de discuter avec les élèves des limites du modèle :

- Les limites de l'échelle : échelle exoplanète/étoile, échelle distance exoplanète/étoile et échelle étoile/observateur terrestre.
- Les limites liées à l'intensité lumineuse de la source de lumière.
- Les limites liées à la vitesse de rotation des astres.

En utilisant une application (Fizziq) permettant de mesurer l'éclairement d'une source de lumière, l'élève découvre un nouveau monde perceptible, à sa portée, dans lequel il va pouvoir effectuer des mesures, pour en extraire le plus d'informations possible.

Dans un second temps, l'élève doit chercher le ou les paramètres qui permettent d'influencer le modèle proposé. Voici ci-dessous plusieurs paramètres possibles et plusieurs limites associées au modèle :

Paramètres pouvant influencer le modèle	Prévision de l'expérience (utilisation prédictive du modèle)	Limites et lien avec la réalité des observations des exoplanètes
<p>La taille de l'exoplanète (et donc son rayon)</p>	<p>Si on fait passer devant la source de lumière des sphères de plus en plus petites alors la baisse de flux lumineux sera de moins en moins importante.</p>	<p>La baisse du flux lumineux reçu sur Terre sera proportionnelle à la surface de l'exoplanète, donc au carré du rayon.</p>
<p>La distance étoile exoplanète</p>	<p>Si on augmente la distance entre la source de lumière et l'exoplanète alors la durée du transit est plus petite.</p>	<p>Plus la distance étoile exoplanète est grande, plus la probabilité (la chance) d'observer une exoplanète entre l'étoile et l'observateur est faible. Si le demi-grand axe croît, la période de l'exoplanète augmente et le temps nécessaire à sa détection aussi...</p>
<p>La distance observateur-exoplanète</p>	<p>Si on augmente la distance entre l'exoplanète et l'observateur, alors la durée du transit est plus petite.</p>	<p>Dans la réalité la distance observateur-exoplanète est extrêmement grande, et une faible variation de la localisation de l'observateur (sur Terre où dans son environnement proche) ne modifie en rien l'allure de la course de transit. Il faut fixer ce paramètre qui ne doit pas varier.</p>
<p>La vitesse de révolution de l'exoplanète autour de l'étoile</p>	<p>Si on augmente la vitesse de transit devant la source de lumière, la durée d'occultation sera de plus en plus petite.</p>	<p>Dans la réalité on mesure la durée du transit puis la période de répétition qu'il faut attendre pour voir de nouveau le transit. Grâce à la période, on peut estimer la distance exoplanète – étoile grâce à la 3^e loi de Kepler.</p>

Paramètres pouvant influencer le modèle	Prévision de l'expérience (utilisation prédictive du modèle)	Limites et lien avec la réalité des observations des exoplanètes
L'intensité lumineuse de l'étoile	Si on augmente la puissance lumineuse de la source de lumière, alors la baisse de luminosité sera de plus en plus petite.	Une augmentation de luminosité améliorera le rapport signal/bruit et donc les conditions de détection
L'inclinaison du plan orbital de l'exoplanète autour de l'étoile	Si l'exoplanète orbite dans un plan trop incliné par rapport à la direction exoplanète/observateur, alors l'exoplanète ne peut pas être détectée.	Faire comprendre à l'élève que de nombreuses exoplanètes ne peuvent pas être observées par la méthode du transit, car la nécessité d'avoir l'étoile, l'exoplanète et l'observateur à peu près alignés est indispensable

Déroulement de l'activité

Prérequis

- Situer la Terre dans le Système solaire. Caractériser les conditions de vie sur Terre (atmosphère, température, présence d'eau liquide).
- Le Soleil, les planètes.
- Position de la Terre dans le Système solaire.
- Décrire les mouvements de la Terre (rotation sur elle-même et alternance jour-nuit, autour du Soleil et cycle des saisons).
- Les mouvements de la Terre sur elle-même et autour du Soleil.
- Mouvement circulaire.
- Représentations géométriques de l'espace et des astres (cercle, sphère).
- Lecture et tracé de graphique.

Déroulé pendant la séance

Étape 1 : qu'est qu'une exoplanète ?

Rappeler la différence entre une planète et une étoile.

Rappeler ce qu'est une exoplanète, le nombre d'exoplanètes découvert à ce jour.

Montrer des représentations d'exoplanètes à l'aide du site de la NASA. Immersion des élèves dans différents décors pour susciter de la motivation. Possibilité de demander aux élèves de choisir une exoplanète et de présenter oralement une description succincte de cette exoplanète (distance de son étoile, autres exoplanètes autour de l'étoile, rocheuse ou gazeuse, etc.).

Étape 2 : comment détecter une exoplanète ?

Demander aux élèves comment les scientifiques découvrent des exoplanètes ?

Faire émerger l'idée que la lumière est une information essentielle pour identifier une exoplanète.

Demander aux élèves d'imaginer une méthode pour les détecter : recueil des conceptions

Faire prendre conscience aux élèves des distances (impossible d'envoyer une sonde spatiale sur une exoplanète par exemple).

Introduire la notion de transit : passage d'une exoplanète devant une étoile.

Étape 3 : comment analyser une courbe de transit ?

Montrer l'animation *5 Ways to Find a Planet | Explore – Exoplanet Exploration : Planets Beyond our Solar System* (nasa.gov).

Identifier la grandeur (et son unité) en abscisse (le temps) et la grandeur (et son unité) en ordonnée (la luminosité).

Échanger avec les élèves sur les paramètres qui ont une influence sur l'allure de la courbe de transit.

Formulation d'hypothèses.

Étape 4 : Modéliser le transit d'une exoplanète



Présenter le matériel disponible pour l'expérience : balles ou billes de différents diamètres, lampe de bureau, œil de l'observateur sur Terre.

Associer le matériel présenté à l'astre que l'on souhaite modéliser.

Répartir les élèves par groupes de travail (3 ou 4 élèves)

Prendre une photo du montage réalisé.

Discussion et échange autour des photos envoyées au professeur sur la cohérence de l'expérimentation : distance observateur exoplanète est-elle bien beaucoup plus grande que la distance exoplanète/étoile? L'étoile, l'exoplanète et l'observateur sont-ils bien dans le même plan?

Discussion et échange autour des photos envoyées au professeur sur les limites du modèle : distances entre les objets célestes, source de lumière (émission de lumière dans toutes les directions).

Étape 5 : tracé d'une courbe de transit

Suivi du protocole pour mesurer l'éclairement de la source de lumière au cours du temps.

Positionnement du smartphone dans le même plan que la balle et la source de lumière (alignement correct).

Coordination efficace entre les élèves au sein d'un groupe.

Analyse des axes : grandeurs et unités.

Repérage des valeurs sur les axes.

Allure correctement tracée.

Étape 6 : paramètres influençant l'allure de la courbe de transit.

Formulation d'hypothèses par les élèves.

Paramètres possibles : taille de l'exoplanète (taille de la balle), vitesse de rotation de l'exoplanète, distance exoplanète-étoile.

Proposition de protocole pour vérifier l'hypothèse : le protocole doit bien indiquer que seul le paramètre étudié varie, les autres restants constant (test d'un paramètre).

Voir tableau ci-dessus pour les protocoles possibles.

Discuter des limites des protocoles proposés.

Conclusion sur l'intérêt de ces courbes de transit pour remonter au rayon puis au volume des exoplanètes.

Retour d'expériences

Cette activité suscite de nombreux questionnements chez les élèves. Découvrir un nouveau monde en dehors du Système solaire les enthousiasme en premier lieu. Percevoir toute une cartographie de planètes différentes de celles connues dans le Système solaire motive et interroge les élèves. De nombreuses questions émergent ensuite : peut-on aller sur ces exoplanètes ? Peut-on les observer avec un télescope ? Peut-on les prendre en photo ? C'est en répondant à ses premières questions que l'élève se rend compte des distances infiniment grandes dans l'Univers. C'est en montrant la nécessité d'un modèle et la description des méthodes de détection que l'élève se rend compte que la plupart des images d'exoplanètes rencontrées sur Internet sont des vues d'artiste.

La question « comment peut-on connaître la masse/le rayon d'une exoplanète ? » permet d'aller plus loin dans la réflexion et le questionnement. Mais certains élèves peuvent être en difficulté face aux outils mathématiques nécessaires pour répondre à cette question (surface, puissances de 10, etc.).

L'utilisation de l'application Fizziq avec du matériel simple de laboratoire permet une expérimentation simple et motivante. Les élèves choisissent facilement le matériel nécessaire pour représenter l'étoile (une source lumineuse), l'exoplanète (une sphère de polystyrène) et l'observateur (le smartphone).

Certaines difficultés peuvent apparaître lors de l'utilisation de l'application : si l'intensité lumineuse est trop faible, il faut utiliser l'outil zoom de l'application pour observer une baisse d'intensité lumineuse. Si le mouvement de la sphère en polystyrène autour de la source lumineuse ne se fait pas dans le même plan que celui de l'observateur-source lumineuse, le transit n'est pas détecté. Si le mouvement de la sphère de polystyrène est trop rapide, le transit n'est pas non plus détecté. Ces difficultés permettent aux élèves de s'interroger et de modifier pas-à-pas leur montage pour obtenir une courbe caractéristique d'un transit. La démarche scientifique prend tout son sens ici.

Il est possible également d'échanger avec les élèves sur la grandeur mesurée par le capteur du smartphone : luminance ? Intensité lumineuse ? Éclairement ? Autant de nouvelles grandeurs, et de nouvelles unités, qui peuvent éveiller la curiosité de certains élèves.

Une des difficultés les plus importantes dans cette activité réside dans la recherche de paramètres influençant la courbe de l'éclairement en fonction du temps et d'échanges autour des limites du modèle. L'élève doit réussir à ne faire varier qu'un paramètre à la fois, ce qui implique par exemple de maintenir une vitesse de rotation de la sphère en polystyrène constante autour de la source lumineuse. Avec le matériel disponible dans la plupart des laboratoires cela reste difficile. Certains enseignants ont suggéré de créer un dispositif avec un moteur dans lequel la sphère de polystyrène serait suspendue et pourrait tourner à vitesse constante. Une autre

solution envisagée est de demander à l'élève de maintenir une durée de rotation de 1 ou 2 secondes autour de la source lumineuse.

En supposant cette vitesse de rotation constante, les autres paramètres (distance étoile-exoplanète, rayon exoplanète et puissance lumineuse de la source) sont plus facilement identifiables par les élèves.

L'utilisation de l'outil mathématique peut également être une difficulté dans cette activité, notamment lors de la recherche de l'expression du rapport des surfaces $S_{\text{exop}}/S_{\text{étoile}} = (R_{\text{exop}}/R_{\text{étoile}})^2$ (donc au rapport des rayons au carré) lié à la baisse de luminosité, mais aussi lors du calcul de masse volumique avec les puissances de 10.

La succession d'activités permet de donner du sens à la démarche de modélisation. Elle permet aux élèves de conclure en utilisant de véritables données scientifiques obtenues à l'aide de courbes de transit sur la nature gazeuse ou rocheuse d'une exoplanète détectée par la méthode des transits. L'élève est alors en mesure de se mettre dans le rôle d'un astronome étudiant les exoplanètes et recherchant une information sur de nouveaux mondes.

Cette séance a été initialement travaillée avec Lambert Bachelet (professeur de physique chimie) et Raphaël Galicher (Docteur Université Paris Cité, Lesia, Obs. de Paris).

Prolongement

Cette activité peut se conclure par un calcul de masse volumique et d'identification de la nature gazeuse ou rocheuse de l'exoplanète. Elle peut également amener les élèves à travailler la notion d'habitabilité. Est-ce que la planète identifiée pourrait abriter de la vie? Quels sont les critères d'habitabilité? Un travail interdisciplinaire avec le professeur de SVT peut être engagé.

Les sciences et technologies permettent particulièrement de travailler sur cet aspect d'enseignement pluridisciplinaire.

Un travail avec le professeur d'arts plastiques peut également être réalisé, à partir d'images d'exoplanètes (des vues d'artiste) qu'ils apprendront à analyser (description puis interprétation). Une réflexion puis une réalisation graphique d'une exoplanète peuvent ensuite être proposées aux élèves. (Lien avec l'atelier des étoiles à la toile.)

Liens utiles :

Fiche d'exercice sur la détection par la méthode du transit en anglais :

<https://astroedu.iau.org/en/activities/can-you-find-the-exoplanet/> - elle sera ajoutée dans la version finale

Lien vers les représentations et vidéos :

<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/exoplanet-travel-bureau/>

<https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/#/2>

https://www.esa.int/kids/fr/Apprendre/La_Vie_dans_l_Espace/Sommes-nous_les_seuls/Exoplanetes

Lien vers un exemple de support élève :

https://drive.google.com/file/d/1F_tssTODVy-LdKDvJSZd27G746IcO2Uc/view?usp=sharing

Les relations de Kepler et le planétaire humain

ROLLINDE Emmanuel
CY Cergy Paris Université
Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR – UR 4434)

Résumé

Cette activité permet de mener une démarche de validation d'un modèle, les relations de Kepler, par la mesure et par une approche kinesthésique. Elle est adaptée pour des classes du collège au lycée. Par l'utilisation d'un planétaire, les élèves se déplacent avec leur corps ou déplacent des jetons le long de l'orbite d'une planète ou d'une comète. Ils vont faire des hypothèses qui seront ensuite mises en lien avec des grandeurs mathématiques, dont les résultats de mesure serviront pour valider ou invalider les prédictions des relations de Kepler.

Mots-clés

Kepler; Système solaire; planétaire; kinesthésie; mesure; planète; comète; collège; lycée.



Contexte

Depuis 400 av. J.-C. jusqu'à la théorie d'Einstein utilisée aujourd'hui, l'étude des mouvements des astres (Soleil, planètes, Lunes) dans le ciel nocturne s'est toujours basée sur l'utilisation des mathématiques (Linton, 2004). La géométrie est restée le domaine privilégié des astronomes jusqu'à l'arrivée du calcul différentiel qui a conduit à la formalisation des lois de Newton. Selon la terminologie proposée par Earle (2014), la géométrie « pratique » a permis l'amélioration des techniques d'observation et de détermination des positions des astres, tandis que l'aspect formel de la géométrie « pure » a permis d'enrichir les modèles qui rendent compte des mouvements observés. En restant dans le contexte de l'astronomie grecque, de 400 av. J.-C. (Platon) à 1500 apr. J.-C. (Copernic), les mouvements des planètes ont été interprétés alternativement dans deux modèles :

1) L'observation « naturelle » du monde depuis la Terre incite à placer la Terre au centre (système géocentrique, proposé par Héraclite en 300 av. J.-C. puis Ptolémée en 200 apr. J.-C.) – ce système conduit cependant à des formes complexes avec des cercles superposés à d'autres cercles (les épicycles) qui ne sont pas satisfaisants du point de vue de la géométrie pure ;

2) En plaçant le Soleil au centre (système héliocentrique), les astronomes (Aristarque en 200 av. J.-C. puis Copernic en 1500 apr. J.-C.) ont pu proposer une vision plus « abstraite » (Earle, 2014) qui décrit les mêmes phénomènes avec des formes géométriques simples, toujours circulaires.

Il faut attendre l'amélioration des méthodes d'observation, avec Galilée en particulier, et le travail de relevé effectué par Tycho Brahé, pour que les observations imposent la distinction entre cercle et ellipse.

Kepler conclut que l'orbite de Mars est une ellipse parfaite, ou tout du moins ne diffère pas sensiblement d'une telle ellipse, après avoir essayé d'autres formes telles que les cercles ou les ovales (...) L'ellipse rend compte élégamment de la description empirique et de l'explication physique en les combinant dans une sorte d'harmonie. (Earle, 2014, p. 40, traduction des auteurs.)

Nous préférons parler de « relations de Kepler » plutôt que de « lois », car Kepler a mis en relation différentes grandeurs dans le cas des orbites du Système solaire sans établir de « lois ». Au contraire, Newton a établi des « lois » qui ont pour particularité de s'appliquer dans des contextes très variés et non pas seulement pour les orbites des objets du Système solaire.

Contenu didactique/pédagogique

L'étude de la trajectoire des planètes du Système solaire permet de proposer des regards croisés de différentes disciplines scolaires. La place de la Terre dans le Système solaire, la possibilité de vie (la zone habitable) et les différentes unités de temps (jour, mois, saisons, années) peuvent être étudiées en cours de Sciences de la vie et de la Terre (SVT). La construction de maquettes ou de codes informatiques (tels que le logiciel Scratch) reproduisant le mouvement des planètes peut être travaillée en technologie. Les notions de trajectoire et de vitesse, et leurs grandeurs

associées sont pertinentes à la fois en sciences physiques et en mathématiques, car elles allient la géométrie, le thème des « grandeurs et mesures », présent dans le programme de l'école élémentaire, et les relations entre les grandeurs.

La première relation de Kepler met en jeu une figure géométrique inhabituelle (l'ellipse) que nous comparerons au cercle. La seconde relation de Kepler permet de travailler des mesures de surface par quadrillage, donnant sens à la notion d'unité de surface. Enfin, la troisième relation permet de découvrir une relation en loi de puissance et permet également de mettre en pratique des changements d'unités inhabituels.

Place de l'activité dans la modélisation

Le planétaire est considéré comme représentant le monde expérimental sur lequel des mesures peuvent être effectuées. Les trois parties de l'activité, sur chaque relation, vont suivre le même déroulé. Les apprenants commencent par observer le modèle du planétaire ou par percevoir leur mouvement sur ce modèle. Ils sont alors dans le champ de l'expérience (forme visuelle ou perceptive des orbites, vision de différentes surfaces, perception de durées). Pour la première relation, les élèves doivent tout d'abord proposer un modèle géométrique connu (le cercle) comme possible description des orbites, puis choisir une prédiction de ce modèle en utilisant ses paramètres (rayon, centre, diamètre, cordes...). Après avoir fait ce choix, ils effectuent des mesures de ce(s) paramètre(s) sur le planétaire. Pour la seconde et troisième relation, les grandeurs qui doivent être mesurées sont imposées (surface d'une part, durée et distance d'autre part). Dans les trois cas, les mesures sont comparées aux prédictions d'un modèle (égalité, rapport en loi de puissance constant). Il s'agit donc d'un travail de validation/invalidation des prédictions d'un modèle. Pour la première relation seulement, l'activité va

nécessiter de réviser le modèle proposé (recherche d'un autre centre, d'une autre forme géométrique). Enfin, la troisième relation peut conduire à une prédiction sur la masse du Soleil qui ne sera pas comparée à une mesure sur le planétaire, mais peut être comparée à la mesure indiquée sur des sites d'astronomie (ou sur Wikipédia, qui est assez fiable pour ce type d'information).

Déroulement de l'activité

L'atelier se déroule en deux phases selon deux déroulés possibles. Le premier consiste à faire travailler toute la classe sur une seule relation de Kepler, et en suivant les deux phases trois fois (une fois pour chaque relation). Le second consiste à faire travailler les trois relations de Kepler lors de la même séance (la classe est divisée en six groupes, deux groupes par relation), la seconde phase fait l'objet d'une seconde séance. Nous décrivons tout d'abord l'objectif des deux phases avant de revenir sur les spécificités de chaque relation.

- Dans la première phase, la classe est divisée en petits groupes (de 3 ou 4 élèves). Chaque groupe doit proposer et mettre en place un protocole pour vérifier la validité d'une relation de Kepler. Les groupes travaillent soit sur un planétaire « humain » (1 mètre entre le Soleil et la Terre) soit sur un planétaire imprimé au format A3.
- Dans la deuxième phase, une discussion collective permet de comparer les résultats et les protocoles des différents groupes, puis de comparer les résultats de mesure et les prédictions des relations de Kepler. Chaque groupe va présenter son protocole et ses résultats de mesure à la classe. L'enseignant devra porter l'attention sur les incertitudes.

Nous discutons maintenant des deux phases pour chaque relation de Kepler.

* *Relation 1* : « Les planètes du Système solaire décrivent des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers. »

Phase 1 : L'orbite de Encke amènera un travail de construction géométrique d'une ellipse par la méthode du jardinier, tandis que l'activité basée sur les orbites des planètes sera centrée sur la figure du cercle uniquement (le cercle étant une ellipse particulière).

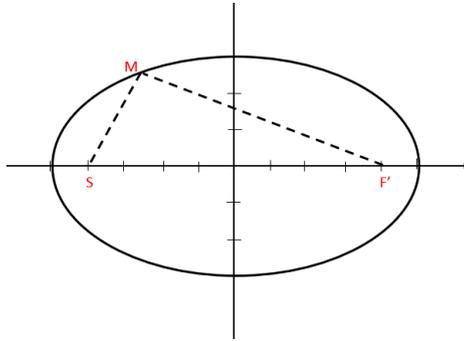


Le groupe sur le planétaire A3 se concentre sur l'hypothèse d'orbite circulaire pour les planètes (Rollinde & Maisch, 2023). Il démontre tout d'abord que les orbites ne sont pas compatibles avec un cercle centré sur le Soleil (sauf dans le cas de l'orbite de Vénus). Puis, il se demande si les orbites peuvent être circulaires, mais avec un centre qui n'est pas le Soleil. Avec la précision des mesures sur le planétaire A3, cette hypothèse ne peut pas (ou très difficilement pour certaine) être réfutée pour les orbites planétaires. Le diamètre ne peut pas être défini par une corde qui passe par le centre, puisque celui-ci n'est pas connu; ni par la plus grande corde, car nous n'avons pas une figure continue. La seule méthode effective pour déterminer un centre potentiel nécessite de définir l'intersection de médiatrices de différentes cordes. Ces médiatrices doivent se couper en un point « unique » (la construction des médiatrices est entachée d'imprécision, nous

chercherons donc plutôt une région qui semble être traversée par deux ou trois médiatrices puis, par « essai-erreur » un centre qui serait à une distance constante de tous les disques le long de l'orbite considérée).

Le groupe sur le planétaire humain se concentre sur l'orbite de Encke pour vérifier qu'elle peut être décrite par une ellipse. Ils doivent avoir une aide (ou un travail pour la classe entière en amont de cet atelier) :

- Un dessin d'une ellipse indiquant les deux foyers (ici le Soleil et un second foyer F').



- Explication de la construction d'une ellipse par « la méthode du jardinier » : placer une corde de longueur fixe dont les bouts sont placés sur les deux foyers S, F' et dont la disposition correspond à de deux segments SM et MF' avec M un point de l'orbite. Les points sur l'orbite correspondent à toutes les possibilités de triangle SMF' avec un périmètre constant.
- Cette aide doit également montrer la symétrie de l'ellipse.

Les élèves ont à leur disposition un foyer S (le Soleil) et doivent donc chercher le deuxième foyer F' . La symétrie de l'ellipse conduit à placer F' sur le « grand axe » qui relie le Soleil au point le plus éloigné. Plus les foyers sont proches, plus l'ellipse est « circulaire » (ceci peut être montré sur

Géogébra ou en travaillant avec une petite corde). Par essai/erreur, les élèves vont placer F' et permettre à la corde de passer par tous les points de l'orbite!

Phase 2 : Les élèves qui ont travaillé sur les orbites planétaires ont pu réfuter le modèle d'un cercle centré sur le Soleil. Ils devront montrer que les mesures des distances Soleil-point de l'orbite ne sont pas compatibles avec une valeur constante. Par contre, le modèle d'un cercle ayant un autre centre que le Soleil n'a (a priori) pas pu être réfuté.

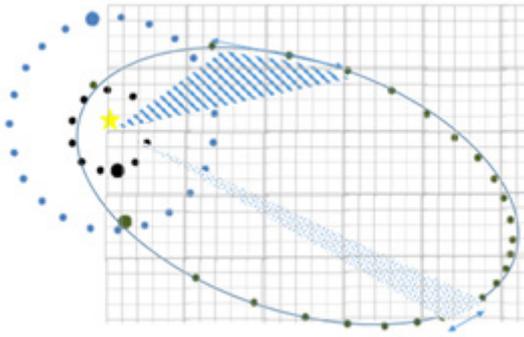
Un cercle est une ellipse particulière, la 1^{re} relation n'est pas réfutée... Mais est-ce bien une ellipse, et le Soleil est-il un foyer?

Les élèves qui ont travaillé sur l'orbite de Encke vont montrer qu'une ellipse dont le Soleil est un foyer peut en effet traverser tous les disques décrivant l'orbite. La taille des disques étant trop grande, nous ne savons pas si cette orbite passe par les positions exactes de la comète, mais la relation de Kepler n'est pas réfutée et semble confirmée.

Il est possible alors de laisser les élèves chercher le second foyer pour toutes les orbites planétaires.

* *Relation 2* : « Des aires égales sont balayées dans des temps égaux. » Les 2 groupes travaillent sur un planétaire A3. Ils ont à disposition des feuilles calques avec des quadrillages plus ou moins dense (la surface des carreaux est plus ou moins grande).

Il s'agit de mesurer la surface « balayée » par le segment Soleil-objet entre les temps t et $t + dt$. L'objet est sur un point quelconque (M) de l'orbite au temps t , et se déplace jusqu'à un autre point (M') à l'instant $t+dt$. La surface est définie par les rayons SM , SM' et l'arc MM' le long de l'orbite. Ce n'est donc pas un triangle, car MM' n'est pas un segment.



Sur le dessin ci-dessus, nous voyons deux aires hachurées que nous noterons S_1 et S_2 . L'intervalle de temps dt est ici égale à deux unités de temps du planétaire. L'unité d'aire est égale à un petit carreau du quadrillage. Les élèves vont donc mesurer chaque aire balayée en comptant le nombre de carreaux inclus dans l'aire balayée. Plus le quadrillage est dense, plus l'unité d'aire est petite, et ainsi la précision de la mesure sera plus grande.

Plusieurs remarques : (i) il est important que tous les groupes choisissent la même valeur pour dt et les mêmes quadrillages afin de permettre des comparaisons dans la phase suivante. (ii) Si les élèves connaissent la formule mathématique de l'aire d'un triangle, ils peuvent l'utiliser et adopter l'unité du carreau uniquement pour la surface définie par les points M , M' et l'arc MM' . (iii) il peut être intéressant d'ajouter une troisième aire, mais sur un temps plus grand ($3*dt$) afin de vérifier que cette troisième aire n'est pas égale aux deux autres. Cette surface sera notée S_3 .

Mais quels carreaux faut-il compter? Certains sont à l'intérieur de l'aire et ne posent pas de problème, il faut les compter. D'autres sont à l'extérieur et ne doivent pas être comptés. Mais que faire des carreaux qui sont coupés par les bords de l'aire? Une estimation de la fraction de carreau

est périlleuse. Quelle que soit la méthode choisie, le nombre de carreaux pour les deux surfaces ne sera jamais égal. L'incertitude sur la valeur obtenue n'étant pas connue, il est impossible de décider si l'égalité est contredite ou non. Une mesure doit toujours correspondre à un intervalle de confiance. Il s'agit ici d'encadrer la valeur de l'aire : trouver une valeur minimum (je ne compte pas les carreaux qui ne sont pas entièrement inclus dans la surface), et une valeur maximum (je compte tous les carreaux qui touchent la surface). Ainsi, les élèves vont comparer des intervalles de valeur. La relation de Kepler ne sera pas contredite si les différents intervalles ont une intersection non nulle (par exemple, si l'aire d'une surface est entre [1,3] et l'autre entre [4,7], l'égalité n'est pas vérifiée; si l'une est entre [1,4] et l'autre entre [2, 3], l'égalité n'est pas contredite). Dans le cas d'un quadrillage très grossier, la valeur minimale sera souvent de 0 et les mesures pour les trois surfaces seront compatibles entre elles. Avec un quadrillage plus fin, la mesure de la troisième surface S_3 ne sera plus compatible avec les mesures des deux surfaces balayées sur un intervalle de temps identique S_1 et S_2 .

Cette discussion sur les méthodes de calcul, le choix des carreaux à compter, la comparaison des intervalles sera l'objet de la seconde phase de discussion entre les élèves.

* *Relation 3* : « Le carré de la période orbitale (notée T) est directement proportionnel au cube du demi-grand axe (noté a) pour toutes les trajectoires des objets du Système solaire ». Un groupe travaille sur le planétaire humain et un sur le planétaire A3.

Il s'agit ici d'estimer les périodes de toutes les planètes et de la comète, ainsi que le demi-grand axe. Pour la période, il suffit de compter le nombre de pas et de multiplier par l'unité de temps. Pour le grand axe, il faut utiliser la même aide que pour la relation 1. Il n'est pas utile de trouver le second foyer, car il suffit de repérer l'axe de symétrie à l'aide du point le

plus éloigné du Soleil, ce qui est immédiat pour les orbites planétaires.

Les élèves construisent alors un tableau ou un graphe avec la période et le demi-grand axe. Selon le niveau de classe, ils peuvent se demander si les deux grandeurs sont reliées (par exemple, « plus T est grand, plus a est grand »), si elles sont proportionnelles, ou s'il existe deux entiers n et p pour lesquels T^n et a^p sont proportionnels. La relation correcte est : $T^2 \propto a^3$.

Lors de la seconde phase, il pourra être observé qu'une relation entre « T » et « a » existe, mais ce n'est pas une relation de proportionnalité. Pour aller plus loin, il est possible de donner la distance au Soleil de Neptune, et de demander d'utiliser le graphe pour en déduire sa période. En prolongeant le graphe « raisonnablement », les élèves vont aboutir à une période beaucoup plus petite que la période de Neptune, car ils vont en général prolonger en utilisant la tangente à la courbe proche de Mars. L'utilisation des valeurs pour Neptune permet de confirmer la relation $T^2 \propto a^3$. Il est possible d'utiliser alors la relation de Newton qui exprime la constante T^2/a^3 en fonction de la masse du Soleil (voir les propositions d'activité sur les exoplanètes et sur la masse du trou noir qui utilisent également les relations entre période et demi-grand axe).

Retour d'expérience

Cette activité a été menée en France avec une classe de terminale (élèves de 18 ans environ) sur un TP de 2 h pour les trois relations. La première relation a été travaillée par plusieurs classes de sixièmes (élèves de 12 ans environ) sur un TP d'une heure dans le cadre d'une recherche menée par Rollinde & Maisch (2023).

Les élèves de sixième ont montré une grande surprise, voir une déception ou même une colère en découvrant que le Soleil n'était pas le centre des orbites. Cette découverte contredit en effet ce qu'ils ont appris et ce que disent la plupart des manuels en primaire et au collège. Il faut donc bien préciser que ce sont leurs mesures beaucoup plus précises sur une représentation très précise des orbites qui ont permis de découvrir cela. Une analyse peut être proposée sur la relation entre les progrès des technologies et l'avancée des modèles scientifiques.

Les élèves de terminale connaissent déjà les relations de Kepler et ne sont donc pas surpris par les résultats des mesures. L'enseignant a donc décidé pour la première relation de Kepler de faire travailler tous les groupes sur la comète Encke afin de leur faire visualiser une ellipse par la méthode du jardinier. Ils ont apprécié la possibilité de faire des mesures directes en astronomie sans utilisation de logiciels, et le fait de pouvoir vérifier par ses propres mesures une relation connue et d'en déduire la masse du Soleil par leurs propres calculs. La discussion proposée ici sur le lien entre acte de mesurage et validation des modèles n'a pas pu avoir lieu pour en raison du temps limité pour cette activité.

Prolongement

Les relations de Kepler, et les lois de Newton dont elles sont une prédiction, peuvent s'appliquer dans d'autres contextes. L'observation des satellites de Jupiter (par Stellarium, ou des images historiques) permet de déduire la masse de Jupiter de la même manière que nous avons déduit la masse du Soleil. L'observation de l'orbite d'une étoile autour du centre de notre Galaxie permet de retrouver les trois relations de Kepler et d'en déduire également la masse du trou noir central.

Les activités autour des exoplanètes sont un moyen de passer du Système solaire au trou noir, de Kepler à Newton,

car elles peuvent montrer que la constante T^2/a^3 dépend de la masse de l'objet central (en utilisant par exemple les graphes disponibles sur le site exoplanet.eu).

L'usage du planétaire humain permet donc des mesures « directes » et une approche incarnée des relations de Kepler. Sa transposition dans d'autres contextes en astronomie montre comment un modèle permet de décrire de nombreux phénomènes, mais également comment un modèle doit parfois être enrichi ou complété pour prendre en compte de nouveaux phénomènes.

Bibliographie

ROLLINDE, E., & MAISCH, C. (2023). Les orbites planétaires sont-elles circulaires? *Grand N*, (111), 5-39.

EARLE, C. (2014). The Use of Practical and Theoretical Geometry in Early Modern Astronomy. *Tooth & Claw*, 11, 38-45.

Sur l'usage du planétaire : handsonuniverse.org/france/planetaire

Maquettes du Système solaire

ROBICHON Noël
Observatoire de Paris-PSL

Résumé

Cette activité, déclinable à tous les niveaux scolaires, se propose de balayer les différentes possibilités de modélisation du Système solaire à l'aide de maquettes. Partant d'un objectif pédagogique donné (illustrer la variété des tailles des planètes du Système solaire, la répartition de leurs distances au Soleil, expliquer la position des planètes sur le ciel, etc.) différentes solutions seront détaillées, en précisant les avantages et inconvénients de chacune.

Mots-clés

Maquette; modélisation; Système solaire; planétaire; maternelle; élémentaire; collège; lycée.

Contexte

Le plafond d'une salle de classe de primaire est souvent traversé d'un alignement planétaire représentant le Système solaire. Or, même si une telle maquette apporte des connaissances sur les planètes, elle induit également de

mauvaises représentations, comme l'exagération de la taille des planètes par rapport à leur distance, qu'il est ensuite très difficile de corriger.



Figure 1 : exemple de maquette à deux échelles, une pour les tailles et une pour les distances, certes esthétique, mais qui peut induire de mauvaises représentations dans l'esprit des élèves.

Cette activité se propose de réfléchir à différents modèles de maquette réalisables en fonction d'objectifs pédagogiques fixés. Partant de quelques documents sur les corps du Système solaire (photographies, tables de paramètres orbitaux, etc.) l'objectif est de construire des maquettes illustrant certaines propriétés du Système solaire, à les comparer et à en discuter les avantages et les limites. Les propriétés mises en évidence pourront être, par exemple, la taille des planètes, les distances dans le Système solaire, le lien entre la position apparente des planètes dans notre ciel et leur position réelle, etc. Le nombre de maquettes possibles est quasiment infini, et il n'est pas question ici de faire le tour de toutes les possibilités, mais plus modestement de détailler les phases d'élaboration, de conception, de réalisation et d'exploitation de quelques maquettes.

Contenu didactique/pédagogique

Il est possible d'imaginer des maquettes adaptées à tous les niveaux, du cycle 3 du primaire jusqu'au lycée, à partir

du moment où l'on maîtrise un tant soit peu les règles de proportionnalité.

Les élèves de primaire ou de collège étudieront la diversité des corps du Système solaire, depuis notre étoile jusqu'aux petits comètes et astéroïdes en passant par les planètes et les satellites. Outre les notions d'astronomie du programme de physique ou de SVT (connaissance du Système solaire, *phases de la lune, éclipses*), ils travailleront particulièrement la notion d'échelle d'une maquette, et donc toutes les notions mathématiques liées à la proportionnalité. En géométrie, la forme de l'orbite des planètes sera, par exemple, l'occasion d'introduire l'ellipse.

Les élèves de lycée pourront aborder des concepts aussi compliqués que la seconde loi de Kepler, la rétrogradation des planètes, l'élongation maximale des planètes inférieures, le passage de la Terre dans le plan des anneaux de Saturne... En fait, chaque propriété du Système solaire peut être l'occasion de construire une nouvelle maquette. Les compétences travaillées seront donc multiples : en mathématique, la proportionnalité (qu'il est toujours utile d'approfondir, même au lycée, car elle n'est pas encore réellement maîtrisée par nombre d'élèves), les puissances, la trigonométrie... ; en physique, l'optique (couleurs, réflexion), la mécanique (vitesses, accélérations –, etc.).

Place de l'activité dans la modélisation

Cette activité est par définition une activité de modélisation, et toutes les phases du processus sont abordées : choix du phénomène à modéliser, analyse des caractéristiques physiques de ce phénomène, conception du modèle (choix des matériaux de la maquette, des échelles, etc.), utilisation descriptive de la maquette pour reproduire le phénomène, utilisation prédictive de la maquette pour prédire d'autres

phénomènes associés à une évaluation pour en analyser les limites.

Déroulement de l'activité

Matériel :

Boules (en polystyrène, en bois, en plastique...) de toutes les tailles. Cartons, tiges en bois, tiges en métal filetées, clous, vis, trombones, punaises, colle, ficelle, peinture. Liste non exhaustive!

Méthode :

Divers documents relatifs aux propriétés du Système solaire que l'on veut illustrer avec une maquette sont distribués : des images montrant les tailles et orbites des planètes ainsi que leurs aspects, un tableau donnant les principales caractéristiques de ces planètes (diamètres, demi-grands axes des orbites...), la position des planètes par rapport aux constellations du zodiaque à un instant donné, etc.

Ensuite, plusieurs façons de mener la séance sont possibles selon la pédagogie de l'enseignant et le niveau des élèves. La problématique de départ peut être volontairement floue, comme par exemple « construire une maquette du Système solaire ». Les élèves sont invités à réfléchir avec ces documents sans qu'on leur impose d'idée préconçue sur la réalisation pratique de la maquette. Le but est alors que les élèves analysent les documents et se rendent compte qu'il est difficile d'utiliser une seule échelle pour les tailles et les distances, qu'une représentation linéaire des planètes ne peut rendre compte de la forme de leurs orbites, qu'il y a d'autres corps dans le Système solaire (comètes, satellites...) implicitement oubliés dans les documents, etc. Mais les consignes peuvent également être plus directives, comme, comment « concevoir une maquette qui permette de prévoir la position de telle ou telle planète dans le ciel? ».

Exemples de discussion :

Une fois l'objectif pédagogique fixé, soit qu'il ait été imposé – soit qu'il soit le résultat de discussions avec les élèves – vient la phase de réalisation. Dans la suite, on se concentrera sur trois maquettes archétypales : une maquette comparant la taille des planètes, une autre illustrant les distances et un planétaire. Ces trois exemples vont permettre de mettre en évidence les différentes phases de réflexion avant construction, en particulier la problématique de l'échelle de la maquette.

1 – Maquette des tailles relatives des planètes.

Les deux corps extrêmes sont Mercure et le Soleil. Le rapport de leur diamètre est $1\,392\,000\text{ km}/4879\text{ km} = 285$. Donc, si l'on veut que Mercure soit reconnaissable, une boule de 5 mm de diamètre est un minimum, on arrive à un diamètre de $5 \times 285\text{ mm} = 1,46\text{ m}$ pour le Soleil! Pour des raisons pratiques, on peut renoncer, dans un premier temps, à de représenter le Soleil. Reprenons le calcul avec le deuxième corps le plus gros : Jupiter. Le rapport de leur diamètre est $142\,984\text{ km}/4879\text{ km} = 29$. Cela conduit à un diamètre de Jupiter d'environ 15 cm pour un diamètre de Mercure de 5 mm, ce qui est raisonnable. On peut même prendre une échelle deux fois plus grande et on arrive aux diamètres suivants pour les planètes, arrondis à la taille de boule la plus proche (les erreurs sont inférieures à quelques pour cent).

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

L'échelle de la maquette est alors :

$$E_r = 1\text{ cm}/4879\text{ km} = 2.10^{-9}.$$

Peut-on réintroduire le Soleil? À cette échelle, il serait représenté par une sphère de 3 mètres de diamètre, ce qui est la plupart du temps impossible à réaliser. Une solution

peut être de poser les planètes sur une portion de cercle de 1,5 mètre de rayon.

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

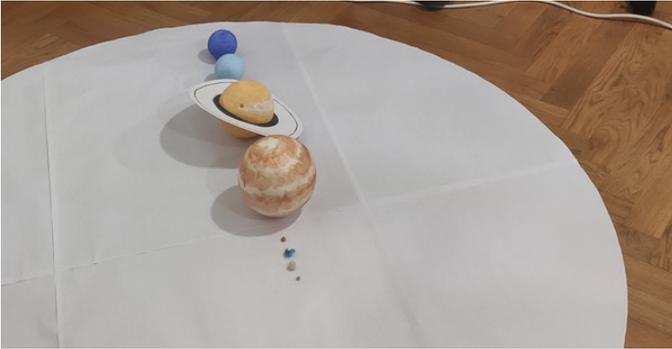


Figure 2 : Exemple des tailles respectives des planètes et du Soleil. Le Soleil est représenté par un disque de papier de 150 cm de diamètre, Jupiter par une boule de polystyrène de 15 cm, et ainsi de suite jusqu'à une perle de 5 mm pour Mercure.

Cette maquette, conçue pour comparer les tailles relatives des planètes entre elles, est aussi l'occasion de travailler les notions de surfaces et de volumes. Le Soleil est approximativement dix fois plus grand que Jupiter, lui-même approximativement dix fois plus grand que la Terre. On peut donc mettre mille Terre dans le volume de Jupiter, mille Jupiter dans celui du Soleil et un million de Terre dans le Soleil. Ceci permet de bien comprendre que le Soleil représente à lui seul plus de 99,98 % de la masse du Système solaire, le reste étant essentiellement constitué des planètes géantes.

2 – Maquette des distances au Soleil des planètes.

La planète la plus lointaine du Soleil est Neptune. Imaginons que l'on veuille construire la maquette aux

dimensions de la salle de classe qui fait ici, pour simplifier la valeur de l'échelle, 9 m de diagonale.

On a alors les distances au Soleil suivantes :

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

On remarque – et cela ne dépend bien sûr pas de l'échelle choisie – que les quatre planètes telluriques sont très proches du Soleil en comparaison avec les planètes externes, même si cela ne pose pas de problème de construction à cette échelle.

La solution classique consiste à aligner les planètes dans la plus grande longueur de la pièce, ici 9 m, sur une ficelle, le long d'un mur, etc. Mais attention aux mauvaises représentations que cela peut engendrer. Les planètes ne sont jamais toutes alignées et il est important que les élèves le remarquent.

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

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

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

ou qui passeraient leur année à admirer cette maquette problématique.

Un exemple de maquette utilisant la même échelle pour les tailles et les distances est exposé dans le parc de l'Observatoire de Paris à Meudon (<https://www.observatoiredeparis.psl.eu/le-systeme-solaire.html>). L'échelle est 10^{-10} : un mètre pour dix millions de kilomètres. À cette échelle, Neptune est à 450 mètres du Soleil, mais Mercure ne fait qu'un millimètre de diamètre...

4 – Comment représenter l'aspect tridimensionnel du système?

Les maquettes précédentes rendent compte des tailles et des distances, mais ne montrent pas la distribution spatiale des planètes ni le fait qu'elles se déplacent. Pour cela, on doit construire un planétaire, maquette dans laquelle les planètes peuvent être placées sur leur orbite autour du Soleil.

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

Parmi les contraintes, il est intéressant de réaliser une maquette aisément manipulable. Par exemple, une maquette d'un mètre de diamètre environ permet de modifier facilement la position de n'importe quelle planète. La planète la plus lointaine est Neptune. Pour laisser un peu de marge et pouvoir dessiner les constellations zodiacales, fixons le rayon de l'orbite de Neptune à 45 cm. L'échelle est alors de $45 \text{ cm} / 4504.10^6 \text{ km} = 10^{-13}$. À cette échelle, les planètes sont aux distances suivantes :

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

Malheureusement, on constate que cette maquette est impossible à manipuler, car les planètes intérieures sont trop proches les unes des autres... L'espace entre Vénus et la Terre n'est que de quatre millimètres, ce qui ne permet pas de matérialiser les planètes et de les faire tourner sans qu'elles se touchent.

Que faire alors? Revenons à notre objectif pédagogique, et n'oublions pas que l'astronomie est avant tout une science d'observation! Connaître la position des planètes par rapport au Soleil permet de déterminer leur position sur la sphère céleste et de faire le lien entre le déplacement des planètes sur leur orbite et les variations de leur position dans le ciel. Ainsi, a-t-on une bonne raison de ne prendre en compte dans notre modélisation que les planètes visibles à l'œil nu, les seules que les élèves pourront observer sans lunettes ni télescopes.

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

Nom	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
Distance au Soleil en cm	1,8	3,4	4,7	7,1	24,5	4545		

Les planètes intérieures sont encore très proches, mais, en choisissant des boules de quelques millimètres, elles peuvent tourner sans se toucher. Pour reproduire les positions relatives des planètes dans le plan de l'écliptique (on est contraint de négliger les différences d'inclinaison entre les multiples plans orbitaux), on entourera le système planétaire d'un bandeau figurant les étoiles lointaines de la bande zodiacale composée

des 13 constellations. Ce faisant, on induit nécessairement une légère erreur de parallaxe puisqu'on ne peut matériellement placer ce bandeau à l'infini ni le centrer sur la planète Terre (mobile).

Cette proposition d'échelle n'est évidemment qu'une des nombreuses possibilités. On peut imaginer de tracer les orbites des planètes sur le sol, dans la classe ou dans la cour (et elles peuvent alors être elliptiques) et matérialiser les planètes par des pions ou des boules que l'on déplace. Les planètes peuvent également être jouées par des élèves comme dans le planétaire humain (voir les contributions d'Emmanuel Rollinde et de Vincent Heussaff dans ce volume).



Figure 3 : exemples de planétaires. À gauche, les planètes sont fixées sur des bandes en carton qui pivotent autour du Soleil. Les constellations zodiacales sont représentées sur un bandeau qui entoure les planètes. À droite, planétaire ne reproduisant que le mouvement apparent du Soleil et de la Lune sur le ciel.

Un planétaire permet également d'aborder les vitesses orbitales des planètes. À partir des périodes sidérales des planètes, on peut calculer la portion d'orbite parcourue en un temps donné. On supposera pour cela que les orbites diffèrent peu d'un cercle, et donc que leur vitesse orbitale est de type circulaire uniforme à quelques pour cent près. Comparer les vitesses orbitales revient alors simplement à comparer les arcs de cercle parcourus en un temps donné.

Par exemple, lorsque la Terre parcourt un quart de son orbite, Mercure fait un tour complet autour du Soleil, Vénus à peine la moitié, Mars un huitième et pour Jupiter et Saturne, ce sont 2 % et 1 % respectivement.

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

On peut aisément reproduire ce phénomène en dessinant l'évolution de la position apparente d'une planète en fonction du temps sur la frise des constellations, en y projetant la direction Terre-planète sur le bandeau). Les positions successives des planètes sont faciles à obtenir avec un logiciel comme Stellarium ou en utilisant des d'éphémérides comme celles de l'IMCCE.

La maquette permet par ailleurs de comprendre de nombreuses autres caractéristiques remarquables de l'observation des planètes comme les *phases* (en particulier pour Vénus et Mercure), la variation de leur diamètre angulaire au cours de ce cycle ou, pour les planètes intérieures, *l'élongation maximale au Soleil*, etc.

Retours d'expérience

Chacune des maquettes décrites précédemment est construite dans un but pédagogique précis. Son utilisation pour un autre objectif doit donc être examinée de manière très circonspecte. Avant toute utilisation il faut mener une réflexion sur les limites de ce qui peut être expliqué avec la

maquette. Quelles propriétés sont explicables de manière qualitative, quantitative et quelles autres ne peuvent être expliquées et quelles mauvaises représentations la maquette risque-t-elle d'induire si elle est utilisée pour un usage différent de celui pour lequel elle a été conçue? Par exemple, un planétaire dans lequel les planètes tournent selon des cercles permet d'illustrer certaines propriétés du mouvement orbital des planètes autour du Soleil comme l'élongation maximale des planètes inférieures ou la rétrogradation des planètes supérieures, mais pas les lois de Kepler. Autre exemple, les boules qui représentent les planètes ne peuvent pas rendre compte de la nature gazeuse des planètes géantes, etc.

Prolongement

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

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

d'utiliser une seule échelle pour les tailles et les distances des satellites.

Pour mieux mettre en perspective notre Système solaire par rapport aux autres systèmes planétaires existants, on peut encore construire en parallèle de notre propre cortège de planètes un ou deux systèmes de planètes extrasolaires. On a découvert à ce jour plusieurs milliers de planètes orbitant autour d'autres étoiles que le Soleil, certaines dans des systèmes comptant jusqu'à neuf planètes. Les possibilités sont donc nombreuses d'illustrer la diversité des systèmes planétaires. On pourra utilement se référer au site Internet suivant qui recense chaque semaine les nouvelles découvertes et présente un catalogue interactif des paramètres orbitaux connus : <http://exoplanet.eu/>.

Bibliographie

Lien vers la page décrivant la maquette utilisant la même échelle pour les tailles et les distances est exposée dans le parc de l'Observatoire de Meudon (<https://www.observatoiredeparis.psl.eu/le-systeme-solaire.html>).

Logiciel Stellarium permettant de positionner les planètes sur le ciel à n'importe quelle date et en n'importe quel lieu d'observation : <https://stellarium.org/fr/>.

Site de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) donnant également la position des planètes : <https://www.imcce.fr/services/ephemerides/>.

Site Web du catalogue des exoplanètes hébergé à l'Observatoire de Paris : <http://exoplanet.eu/>

Site mis à jour quotidiennement.

OBSERVATIONS

Reproduire des mesures historiques de l'astronomie avec le logiciel Stellarium (I)

*

Le rayon de la Terre par la méthode d'Ératosthène

KHANFOUR-ARMALÉ Rita
CY Cergy Paris Université
Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR – UR 4434
INSPE de l'Académie de Versailles

REMY Gilles
Département de physique
CY Cergy Paris Université

Résumé

L'objectif de cet atelier est de montrer comment reproduire avec des élèves de primaire, en utilisant le logiciel de simulation Stellarium, certaines expériences qui ont marqué l'histoire de l'astronomie. Nous nous intéresserons ici particulièrement à la mesure du rayon de la Terre par Ératosthène. L'atelier permettra de travailler avec les élèves les compétences disciplinaires autour de l'astronomie, mais aussi des compétences transversales autour de l'autonomie, l'interdisciplinarité à travers les calculs mathématiques.

Mots-clés

Stellarium; histoire; Ératosthène; mesure; rayon de la Terre; élémentaire; collège; lycée.

Contexte

L'étude des mesures historiques en astronomie est un domaine riche qui remonte à l'Antiquité. Ératosthène, érudit grec du III^e siècle av. J.-C., est célèbre pour sa méthode de calcul de la circonférence de la Terre, à partir de la hauteur du Soleil à midi le jour du solstice d'été mesurée depuis deux endroits différents. Ses travaux sont souvent cités comme l'une des premières mesures astronomiques précises de l'histoire.

De nombreux historiens se sont penchés sur les travaux des anciens astronomes comme Ptolémée, Hipparque et Copernic pour comprendre leurs méthodes de mesure et leurs contributions à l'astronomie. Les progrès de l'astronomie au cours des siècles ont été documentés par des historiens comme Thomas Kuhn, qui a étudié l'évolution des paradigmes scientifiques, y compris dans le domaine de l'astronomie.

En résumé, l'étude des mesures historiques en astronomie est un domaine interdisciplinaire qui combine l'histoire, les sciences, les mathématiques et la méthodologie de la recherche. Les travaux de pionniers comme Ératosthène continuent à inspirer de nos jours chercheurs et formateurs.

Dans cet atelier, nous reproduirons certaines de ces mesures en utilisant le logiciel Stellarium. Nous commençons d'abord par évoquer les savoirs disciplinaires en lien avec le rayon de la Terre, nous revenons ensuite sur quelques travaux récents et nous terminerons par la séance qui peut être menée avec les élèves ainsi qu'un retour rapide sur l'atelier présenté lors du colloque.

Contenu didactique et pédagogique

La méthode d'Ératosthène est un exemple classique de raisonnement scientifique et de déduction mathématique dans l'Antiquité.

Ératosthène (Cyrène ~276 av. J.-C. – Alexandrie, ~194 av. J.-C.), géographe et mathématicien était directeur de la bibliothèque d'Alexandrie. Il avait entendu dire par des voyageurs qu'à Syène, l'actuelle Assouan, située sur le tropique du Cancer, au solstice d'été, à midi heure solaire, on pouvait voir l'image du Soleil se refléter au fond d'un puits. Il eut l'idée de faire, au même moment, à Alexandrie, la mesure de la longueur d'une ombre portée pour en déduire l'angle ($\sim 7,2^\circ$) entre la verticale et les rayons solaires. De plus il estima la distance qui sépare Syène d'Alexandrie : un chameau met environ 50 jours pour aller d'Alexandrie à Syène, et en un jour il parcourt une distance de 100 stades. Il en conclut que la distance entre les deux villes était d'environ 5000 stades de 157,5 m. D'où $R_{\text{Terre}} = SA/\alpha = 5 \cdot 157.5 / (7.2\pi/180) = 6266$ km.

La méthode d'Ératosthène est, non seulement remarquable quant à son originalité, mais également pour la précision de son calcul. Comparée à la valeur moderne moyenne du rayon terrestre (6380 km), c'est une mesure exceptionnelle compte tenu des outils limités disponibles à l'époque. Elle illustre sa capacité à combiner observation, déduction et calcul mathématique pour parvenir à une conclusion précise sur une question aussi vaste que la taille de la Terre. Ses travaux ont été fondamentaux dans le développement de l'astronomie et de la géographie à l'époque antique.

Revue de littérature

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les mesures du rayon de la Terre. Des études se sont intéressées aux mesures

réalisées par les Grecs dans l'antiquité (Girard et Scribe; 1997). D'autres ont cherché à comprendre les éléments historiques et didactiques de l'expérience d'Ératosthène (Décamp et de Hosson, 2011; Simaan, 2002). Décamp et de Hosson (2011) donnent des informations sur la manière dont cette expérience est enseignée et comprise dans les contextes éducatifs modernes, ainsi que sur son importance dans l'histoire des sciences. Simaan (2002) explicite une autre perspective sur l'expérience d'Ératosthène, en mettant l'accent sur ses implications historiques et scientifiques.

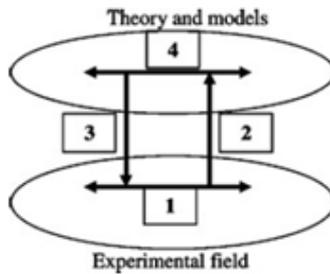
Notre objectif dans cet atelier est d'implémenter la méthode d'Ératosthène, grâce à un logiciel de simulation qui nous permet d'observer le ciel depuis n'importe quel lieu et à n'importe quelle date, indépendamment des conditions atmosphériques ou de l'alternance jour-nuit et sans aucune contrainte de temporalité.

Place de l'activité dans la modélisation

À travers l'activité qui va être détaillée ci-dessous, nous nous situons dans le monde des théories et modèles de l'astronomie pour interpréter et comprendre les phénomènes célestes du monde perceptible.

1. Les observations/mesures (flèche 1) : Ératosthène a observé une différence d'ombre à midi entre deux endroits géographiquement distants (Syène et Alexandrie), ce qui l'a incité à entreprendre des mesures pour estimer la taille de la Terre.
2. Décrire/interpréter ce qui est observé dans le monde perceptible par les théories et les modèles (flèche 2) : en utilisant les données observées (différence d'ombre), Ératosthène a développé un modèle théorique de la Terre comme une sphère et a interprété les résultats pour estimer la taille de la Terre.

- Proposer des prédictions basées sur les modèles développés (flèche 3) : en se basant sur son modèle de la Terre et les mesures réalisées, Ératosthène a pu proposer une prédiction de la circonférence terrestre.
- Construire des concepts, des relations à l'intérieur des modèles (flèche 4) : Ératosthène a utilisé les concepts de trigonométrie et de géométrie pour calculer la taille de la Terre à partir des mesures réalisées et de son modèle de la Terre comme une sphère.



En résumé, la méthode d'Ératosthène illustre parfaitement la façon dont les observations (1) peuvent informer et contraindre les modèles théoriques (2), permettant ainsi la construction de concepts et de relations à l'intérieur de ces modèles (4). Ces modèles peuvent ensuite être utilisés pour proposer des prédictions (3) qui peuvent être testées et comparées à de nouvelles observations ou mesures (1), ce qui boucle le processus scientifique.

Déroulement de l'activité

Objectif de l'activité : Comprendre et mettre en œuvre la méthode d'Ératosthène pour estimer la circonférence de la Terre en utilisant le logiciel Stellarium.

Matériel nécessaire : un ordinateur avec le logiciel Stellarium installé, des feuilles de papier et des crayons et un projecteur ou un écran pour afficher Stellarium.

Synopsis de l'atelier

Introduction (10 minutes) : présentez brièvement qui était Ératosthène et son expérience pour estimer la forme et dimension de la Terre.

Préparation (10 minutes) : montrez aux élèves comment utiliser les fonctionnalités de base, telles que la recherche de lieux et la manipulation de la date et de l'heure. Peut être fait lors d'une première séance de prise en main du logiciel.

Mesure de la hauteur du Soleil (10 minutes) : demandez à chaque élève de se placer à Assouan à midi au solstice d'été et de mesurer la hauteur du Soleil. Puis de refaire la même mesure depuis Alexandrie.

Mesure de la distance Assouan-Alexandrie (5 minutes) : demandez aux élèves de chercher sur Internet la distance entre les deux villes (947 km).

Estimation de la taille de la Terre (10 minutes) : guidez les élèves dans le calcul de la taille de la Terre en suivant la méthode d'Ératosthène.

Conclusion (10 minutes) : discuter avec les élèves des résultats obtenus et des implications de l'expérience. Soulignez l'importance de la méthode d'Ératosthène dans l'histoire de l'astronomie et de la géographie. Encouragez les élèves à partager leurs réflexions sur l'atelier et sur ce qu'ils ont appris.

Ce scénario utilise Stellarium comme outil central pour recréer l'expérience d'Ératosthène de manière interactive et éducative, offrant ainsi aux élèves une expérience pratique et immersive pour explorer la taille de la Terre.

Le pas-à-pas Stellarium

Essayons d'imiter Ératosthène, mais n'ayant pas de chameau à notre disposition nous allons utiliser le site <http://fr.distance.to/> pour calculer la distance entre les 2 villes, soit

947 km. Étant également peu coutumier du planter de bâton et fortement casanier, nous allons utiliser Stellarium pour mesurer la hauteur du Soleil au solstice d'été à midi heure solaire à Alexandrie :

- Pour afficher la hauteur des objets, allez dans la configuration générale [F2] puis dans l'onglet information, dans Information sur l'objet sélectionné cochez la case brève et dans champs affichés cochez la case Azimut/hauteur.
- Se placer à Alexandrie à l'aide de l'outil Situation [F6]
- « Stoppez le temps » [k] puis ouvrir l'outil Date et Heure [F5] pour se placer le 21 juin et trouver l'heure à laquelle le Soleil est le plus haut dans le ciel (hauteur maximale) : $h_{\text{Max}} = 82^{\circ}13'22,2''$. En déduire $\alpha = 90^{\circ} - h = 7,78^{\circ}$ puis $R_{\text{Terre}} = 6977 \text{ km}$.

Ératosthène avait sous-évalué la distance entre Alexandrie et Assouan, ce qui explique qu'il n'ait trouvé qu'un rayon de 6266 km. Quant à notre mesure, elle est surestimée puisqu'Alexandrie ne se trouve pas à la même longitude qu'Assouan.

À noter que cette mesure peut être faite, avec Stellarium ou in situ depuis n'importe quelle ville située sur le même méridien. Seule la précision du logiciel ($\sim 1''$ d'arc sur la hauteur du Soleil) ou de la mesure de l'ombre ($\sim 1 \text{ cm}$ soit $\sim 1^{\circ}$ sur l'angle θ pour une longueur de bâton d'1 m) impose une distance minimale entre les villes :

$R_T = AB/(\alpha_a - \alpha_b)$, soit $(\Delta R_T/R_T)^2 = (\Delta AB/AB)^2 + (\Delta(\alpha_a - \alpha_b)/(\alpha_a - \alpha_b))^2$. En négligeant le 1^{er} terme devant le second, on obtient $\Delta R_T/R_T \sim 2\Delta\alpha/(\alpha_a - \alpha_b) < 0,1$ si on souhaite une mesure à 10 %. D'où $AB > 20R_T\Delta\alpha$

En appliquant ce résultat aux 2 cas qui nous concernent, nous avons $AB > 1280 \text{ km}$ si on veut reproduire l'expérience à l'aide d'un bâton de 1 m et avec Stellarium où $\Delta\alpha$ n'est que

de $1''$ soit 5.10^{-6} rad, la distance AB devra alors être supérieure à 640 m.

Retours d'expérience

Les participants à l'atelier ont apprécié l'utilisation d'un logiciel de simulation astronomique très populaire comme Stellarium qui offre une plateforme idéale pour implémenter la méthode d'Ératosthène. Stellarium leur a permis d'observer le ciel depuis n'importe quel lieu sur Terre et à n'importe quelle date. Ils ont pu simuler la vue du ciel depuis Alexandrie et Syène à l'heure précise du solstice d'été, comme l'a fait Ératosthène.

En utilisant Stellarium, les participants ont localisé précisément la position du Soleil dans le ciel à midi le jour du solstice d'été. Cela leur a permis d'en déduire la hauteur du Soleil en deux lieux distincts. En combinant ces mesures avec les données de la distance entre Assouan et Alexandrie, et en appliquant la méthode d'Ératosthène, ils ont pu alors estimer la taille de la Terre.

L'avantage de Stellarium est qu'il élimine les contraintes liées aux conditions atmosphériques et à la temporalité. Les participants ont pu effectuer leurs observations et leurs calculs dans un environnement virtuel stable et contrôlé, sur une séance.

En résumé, Stellarium offre un outil puissant pour mettre en œuvre la méthode d'Ératosthène lors d'un atelier. Il a permis aux participants de simuler avec précision les conditions astronomiques de l'expérience d'Ératosthène, facilitant ainsi la compréhension et l'apprentissage des principes sous-jacents de cette méthode historique pour estimer la taille de la Terre. C'est donc un outil des plus utiles pour reproduire et étudier en classe des mouvements qui sont par essence lents

(la Terre tourne sur elle-même en 24 h et autour du Soleil en 1 an!).

Prolongement

À travers cet atelier, l'idée est d'outiller les enseignants de certaines expériences qui ont marqué l'histoire de l'astronomie afin de leur permettre de les reproduire en classe avec les élèves jusqu'à 16 ans. Pour les plus grands, on peut, plutôt que d'utiliser les données du logiciel sur la hauteur des astres, faire faire la mesure directement par l'élève (contribution de Khanfour-Armalé et Remy sur la mesure de la distance Terre-Lune qui illustre les méthodes d'Aristarque de Samos et de Lalande & Lacaille, dans cet ouvrage). L'utilisation du logiciel de simulation des phénomènes célestes va permettre en plus d'observer le ciel, de travailler aussi le lien avec les autres disciplines et renforcer ainsi un travail interdisciplinarité au sein de la classe.

Bibliographie

DÉCAMP N. et DE HOSSON C. (2011). Quelques éléments historiques et didactiques sur l'expérience d'Ératosthène. Bull. Un. Prof. Phys. Chim., vol. 105, n° 937, p. 1065-1082.

SIMAAN A. (2002). Sur l'expérience d'Ératosthène. Bull. Un. Prof. Phys. Chim., vol. 96, n° 846, p. 1193-1196.

GIRARD J. et SCRIBE J. (1997). Quelques belles mesures d'astronomie réalisées par les Grecs dans l'antiquité. Bull. Un. Prof. Phys. Chim., vol. 91, n° 794, p. 1013-1018.

Mesure de la masse du trou noir au centre de notre Galaxie

ROLLINDE Emmanuel
CY Cergy Paris Université
Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR – UR 4434)

KALLI Siham (NAEC Algérie)
M'Sila University

Résumé

Cette activité permet une approche des trois lois de Kepler et des lois de la gravité de Newton dans le contexte d'un trou noir! Les élèves analysent une série d'images montrant le mouvement des étoiles gravitant autour d'un trou noir, mais le trou noir central n'est pas visible... Cependant, à l'aide des trois lois de Kepler et des lois de la gravité de Newton, le mouvement d'une de ces étoiles permettra de déduire la présence et de mesurer la masse du trou noir situé au centre de notre Galaxie! Cette activité constitue également une confirmation de la puissance du modèle établi par Newton.

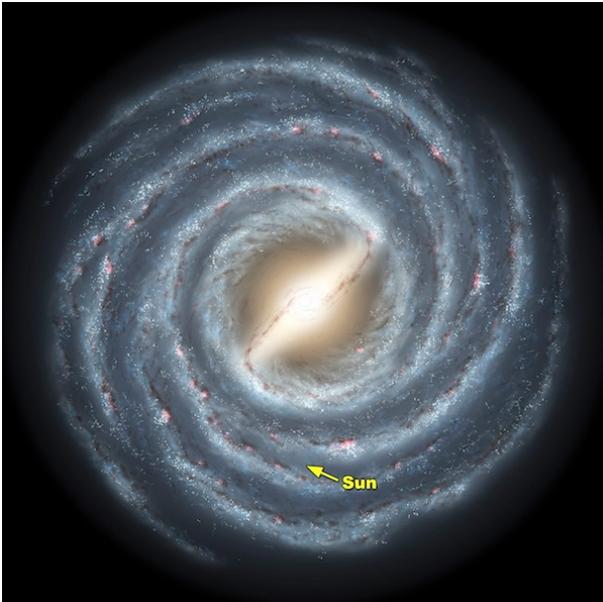
Mots-clés

Trou noir; orbite; étoile; Kepler; Newton; SalsaJ; lycée

Contexte

Dès 1796, l'idée de « trou noir » a été avancée par John Michell et Pierre-Simon de Laplace. Ce dernier écrit dans son *Exposition du système du monde* :

« Un astre lumineux, de la même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le Soleil, ne permettrait, en vertu de son attraction, à aucun de ses rayons de parvenir jusqu'à nous. Il est dès lors possible que les plus grands corps lumineux de l'Univers puissent, par cette cause, être invisibles. »



Crédit : R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA.

Cette idée ne fût pas prise au sérieux par les astronomes de l'époque, car ils ne disposaient pas d'une théorie satisfaisante pour décrire ces nouveaux astres. Avec la Relativité générale, théorie formulée par A. Einstein au début du xx^e siècle, les astrophysiciens ont pu décrire correctement ce qu'était un

trou noir; mais il a fallu près d'un siècle encore avant que la plupart des spécialistes se mettent d'accord sur leur existence.

Le Système solaire, où se trouve la Terre, gravite en périphérie de la galaxie autour du noyau. De nombreux nuages de gaz et de poussières situés entre nous et le noyau de notre Galaxie (la Voie lactée) ont pendant longtemps empêché son observation directe. En 2023, grâce à des caméras infrarouges de très haute résolution, on a pu observer directement le mouvement des étoiles proches du centre galactique, comme on peut le voir sur la photo ci-dessous.



The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory



Photo du centre galactique prise par le VLT.

Contenu didactique/pédagogique

Cette activité est basée sur l'observation et l'analyse d'images représentant un champ d'étoiles à différentes dates. Les images sont visualisées à l'aide du logiciel d'analyse d'image SalsaJ qui permet de transformer une pile d'images

en un film, et de pointer des positions sur les images. L'activité peut cependant être réalisée sans l'utilisation du logiciel.

Il s'agit ainsi d'exploiter des informations à partir de documents, de réaliser des mesures de longueurs et de durée qui devront être converties (échelle, conversion d'unités) avant d'utiliser le modèle de Kepler/Newton pour les interpréter.

L'unité de distance utilisée, le jour-lumière, n'est pas habituelle. Une année-lumière – unité un peu plus connue – est la distance que parcourt la lumière en une année, soit $9,45 \cdot 10^{15}$ mètres ! On comprend alors pourquoi on ne mesure pas la Galaxie en mètres... Les étoiles les plus proches du centre galactique sont à moins d'une année-lumière. Pour décrire le déplacement des étoiles, nous utiliserons donc le jour-lumière, qui est la distance parcourue par la lumière en une journée, soit $2,59 \cdot 10^{13}$ mètres.

À partir de positions observées à différents instants, l'orbite d'une étoile est reconstruite sous la forme d'une chronophotographie, mais avec des intervalles de temps non constant. Il s'agit alors de retrouver à partir de ces positions discrètes une figure géométrique continue, l'ellipse, et de calculer/comparer des vitesses à différents instants.

Place de l'activité dans la modélisation

L'activité commence par des mesures de distance et de durée sur des images, donc dans le monde expérimental sous la forme d'un acte de mesurage.

Le résultat obtenu est ensuite comparé aux prédictions du modèle de Kepler. Les lois de Kepler pour des objets en orbite gravitationnelle autour du Soleil sont transposées au cas d'une étoile en orbite gravitationnelle autour d'un trou noir. La différence (importante) est que l'objet massif ne peut pas être détecté (sur l'image). Il s'agit donc de se demander

si la forme de l'orbite est bien compatible avec une ellipse, puis si l'évolution de la vitesse est cohérente avec la loi des aires (2^e loi de Kepler; une vitesse minimum et maximum aux deux extrémités du grand axe de l'ellipse).

Le phénomène est alors mieux compris et en particulier, il est possible de déduire le lieu où doit se situer un objet massif : au foyer de l'ellipse le plus proche des positions où la vitesse est la plus grande. En enrichissant les lois de Kepler par le modèle de Newton, la connaissance de la période de révolution et du demi-grand axe permet de calculer la masse de l'objet central. Sa valeur ainsi calculée dans ce modèle correspond à la masse d'un trou noir (dans le modèle actuel de la physique stellaire).

Il n'est pas possible de revenir dans le monde expérimental pour comparer cette prédiction de la masse du trou noir à une mesure. Cependant, il est possible d'utiliser des articles de recherche récents pour comparer aux mesures des astronomes professionnels. Vous serez surpris de la qualité de votre calcul!

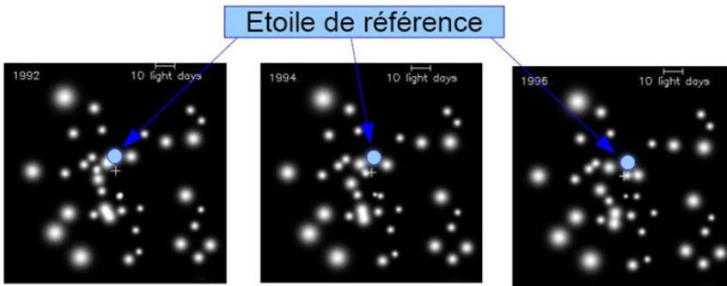
Déroulement de l'activité

1. Observer douze images

Les images utilisées sont le résultat de l'analyse de photos infrarouges des étoiles tournant autour du centre de notre Galaxie, où se trouve le trou noir « supermassif ». Celui-ci est représenté par une croix au centre des images (cette croix a été ajoutée et n'existe pas dans l'image obtenue par les scientifiques). Une seule des étoiles de l'image fait une rotation presque complète autour du trou noir. On appellera par la suite cette étoile « l'étoile de référence ».

Les images successives peuvent être fournies sur papier ou visualisées sur un ordinateur avec le logiciel SalsaJ – ce

qui permettra alors de transformer la série d'images en une courte vidéo.



Dans un premier temps, il s'agit de repérer l'étoile de référence et de suivre sa progression sur les autres images en se posant par exemple les questions suivantes : est-ce qu'elle fait un tour complet (pour initier l'observation de l'orbite)? Pendant combien d'années environ suit-on sa progression (pour porter l'attention sur la durée et non pas seulement les positions successives)?

2. Reconstitution de l'orbite de l'étoile de référence

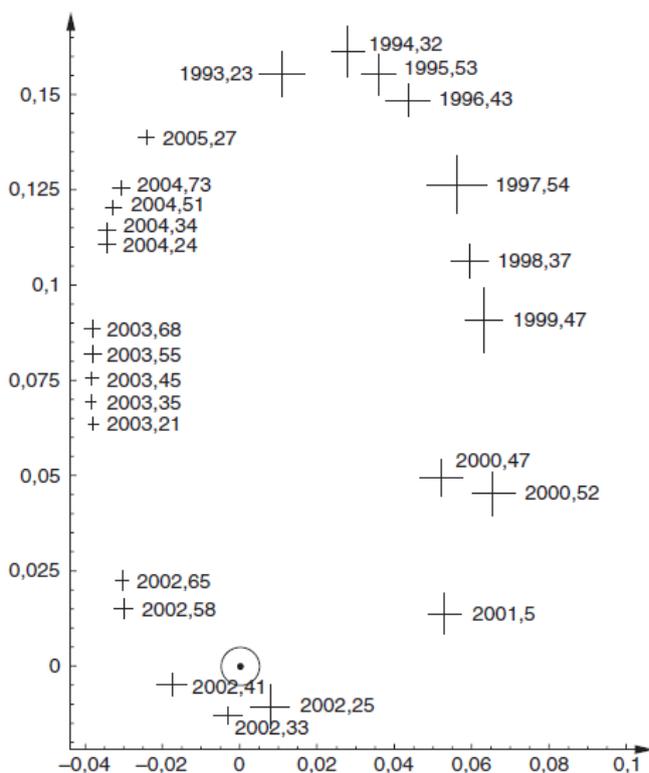
Les coordonnées de l'étoile de référence sont mesurées puis reportées sur un tableur ou dans un graphe « à la main ». L'orbite, ou plus précisément sa projection sur le ciel, est ainsi reconstruite point à point. Il s'agit d'une chronophotographie.

Dans le logiciel SalsaJ, les positions sont données en pixels par rapport à un coin de l'image ; sur les images imprimées, elles seront mesurées en centimètre par rapport à une origine choisie à l'avance. Il faudra donc les convertir en jour-lumière par la suite en utilisant l'échelle de distance indiquée sur chaque image.

3. Première loi de Kepler, la forme de l'orbite

La forme de l'orbite prédite par la première loi de Kepler est une ellipse. Une ellipse est définie de manière unique

à partir de ses deux foyers et d'un point. Dans le cas de l'utilisation d'un logiciel de géométrie dynamique (ou avec un « bon » logiciel de traitement de texte), il s'agit de créer une ellipse à partir d'un point de la chronophotographie (fixe) et de deux points (libres) qui sont les deux foyers. En déplaçant les positions des deux foyers, l'objectif est de faire passer l'ellipse par « tous » les points. S'agissant d'un ajustement, l'ellipse est « autorisée » à ne pas passer par tous les points (vous verrez que cela n'est pas possible). Si des incertitudes sur les positions ont été estimées sous la forme d'un rectangle (les croix sur la figure suivante), alors l'ellipse doit « croiser » tous les rectangles associés à chaque position.



Dans le cas d'une chronophotographie imprimée sur une feuille, on peut utiliser la « méthode du jardinier ». Il est alors possible de mesurer les valeurs du demi-grand axe (en jours-lumière) et de la période de révolution (en jours) associés à l'orbite de l'étoile.

4. Deuxième loi de Kepler, ou accélération gravitationnelle

Il semble difficile et peu utile de comparer ici des surfaces balayées pendant des intervalles de temps constant. Par contre, l'interprétation en termes de vitesse de la 2^e loi de Kepler conduit à prédire que l'étoile doit avoir une vitesse maximale et minimale aux deux extrémités du grand axe.

En mesurant les différentes vitesses sur des positions suffisamment proches, cette prédiction est en effet vérifiée. De plus, la position où la vitesse est la plus grande peut alors être identifiée comme l'équivalent du périhélie dans le cas des orbites du Système solaire. Ainsi, l'objet massif responsable du mouvement elliptique de l'étoile se situe sur le foyer de l'ellipse le plus proche de cette position !

5. Troisième loi de Kepler et calcul de la masse du trou noir

La forme générale, newtonienne, de la troisième loi de Kepler pour un corps Massif central de masse M (on a négligé la masse de l'étoile, très petite comparée à celle du trou noir) est :

$$T^2/a^3 \approx 4\pi^2/GM$$

G est la constante de gravitation : $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$, en unité S.I. La période T doit donc être convertie en seconde, et le demi-grand axe a de la trajectoire elliptique en mètre. La masse de l'objet central est alors obtenue en kilogramme puis convertie en masse solaire ($M_{\odot} \approx 1,2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$). Le résultat obtenu doit être de l'ordre de 10^6 masses solaires. Un objet ayant une telle masse est nécessairement un trou noir ! La

valeur obtenue peut alors être comparée au résultat publié par les astronomes professionnels en 1997 en se basant sur les mêmes observations :

$$M = 2,45 \pm 0,4 * 10^6 M_{\odot}$$

Retour d'expérience



Cette activité a été menée dans plusieurs établissements. Une application dans un lycée allemand a conduit à la publication d'un article (non disponible en ligne, il peut être demandé en contactant les auteurs de cet article) qui confirme que « les données présentées [les élèves ont récupéré les données et ne les ont pas mesurées sur les images] permettent de concevoir des exercices intéressants qui s'inscrivent parfaitement dans le programme de physique du lycée. Les élèves apprennent à connaître les caractéristiques d'un objet astronomique qui, selon les connaissances actuelles, est très probablement un trou noir. Les tâches présentées ici peuvent être raccourcies ou simplifiées en fonction des connaissances préalables du cours, en reprenant les résultats des tâches partielles précédentes ».

Dans les établissements qui l'ont mise en place, la prise de mesures sur les images ne pose pas de difficultés pour les élèves. Au contraire, elle permet de manipuler un logiciel et de travailler sur des images numériques, une compétence inscrite au programme du lycée également.

Prolongement

Cette activité peut être introduite après avoir découvert et vérifié les lois de Kepler dans le contexte du Système solaire. Elle peut être prolongée avec la découverte de la rotation des galaxies qui ne suit pas les prédictions des lois de Newton, ou avec les exercices associés aux méthodes de découvertes des exoplanètes dont l'analyse suppose et utilise les lois de Kepler et le modèle gravitationnel de Newton.

Bibliographie

PITOUT, F. & WEBB, N. (2020), Déterminer la masse du trou Noir supermassif sgr a* avec la 3^e loi de Kepler, Les Cahiers Clairaut, 177.

http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_177_07.pdf

<https://blogs.futura-sciences.com/luminet/2020/10/07/le-prix-nobel-de-physique-2020-pour-les-trous-noirs-2-2-genzel-et-ghez/>

Lien vers la page de F-HOU associée à cette activité, et qui redirige vers un dossier contenant les images à imprimer : <https://handsonuniverse.org/france/2024/04/17/detection-du-trou-noir-au-centre-de-la-galaxie/>

SIMULATIONS ET MODÈLES

Évaluer les lois de Kepler avec les données de l'IMCCE et le langage de programmation Python

APPÉRÉ Thomas (NAEC France)
Lycée St-Paul (Vannes)

Résumé

Cette activité numérique est destinée à des élèves de terminale spécialité physique-chimie (Éducation nationale, France). Elle consiste à exploiter, à l'aide du langage de programmation Python, des données astronomiques de l'institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) pour afficher les orbites des quatre planètes telluriques et d'une comète, calculer l'aire parcourue par le rayon vecteur au voisinage du périhélie et de l'aphélie et le rapport T^2/a^3 pour ces astres. Les élèves conçoivent et évaluent ainsi les trois lois de Kepler.

Mots-clés

Kepler; orbite; planète; Système solaire; Python; lycée; université.

Contexte

Les lois de Kepler sont fondamentales et centrales en astronomie. Leur champ d'application est extrêmement vaste, du mouvement des planètes du Système solaire à celui des exoplanètes, mais aussi des étoiles autour d'un trou noir. Elles permettent ainsi (en tenant compte des lois de Newton qui relient la constante T^2/a^3 à la masse de l'objet attracteur) de déterminer la distance séparant une exoplanète de son étoile-hôte à partir de la mesure de la période de révolution de l'exoplanète, par la méthode des transits par exemple. C'est également grâce aux lois de Kepler que l'on peut estimer la masse d'un trou noir en mesurant la période de révolution et le demi-grand axe de l'orbite d'une étoile en révolution autour de cet astre massif. Les lois de Kepler s'appliquent aussi aux satellites artificiels et se prêtent à de très nombreuses situations d'étude en physique et en astronomie.

Contenu didactique/pédagogique

La compétence travaillée dans cette activité correspond à celle du programme de physique de l'Éducation nationale s'intitulant « exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler ». Nous sommes clairement dans une approche pluridisciplinaire, grâce à l'utilisation de l'outil informatique et du langage de programmation Python, préconisée dans le Bulletin officiel, pour s'approprier des savoirs de physique.

On peut lister les différents objectifs d'apprentissage ainsi :

- Évaluer les trois lois de Kepler;
- Manipuler des fichiers de données astronomiques;
- S'approprier un programme Python;
- Effectuer un calcul sur Python;

- Compléter une liste de valeurs sur Python ;
- Afficher un graphique sur Python.

Par ailleurs, cette activité permet de traiter les compétences fondamentales suivantes :

- Analyser et interpréter des données ;
- Construire des explications ;
- Développer et utiliser des modèles ;
- Argumenter à partir de preuves ;
- Utiliser les mathématiques et la pensée computationnelle ;
- Poser des questions ;
- Communiquer des informations.

Place de l'activité dans la modélisation

Cette activité s'appuie sur des calculs d'éphémérides de l'IMCCE issues d'un modèle lui-même validé par les mesures de la position des astres au cours du temps. Ces éphémérides permettent aux élèves de concevoir le modèle des lois de Kepler sur quelques cas, puis de l'évaluer sur l'ensemble des orbites à leur disposition. Ils pourront plus tard évaluer le modèle des lois de Kepler sur des orbites de satellites ou d'étoiles. Enfin, les lois de Kepler seront enrichies par l'apport des lois de la gravitation et de la dynamique de Newton afin de relier la troisième loi de Kepler à la masse de l'objet attracteur. Ce modèle enrichi permet alors de calculer la masse du Soleil.

Déroulement de l'activité

Cette activité est généralement menée à son terme par les élèves en une séance de 2 heures. Elle nécessite que chaque élève ou groupe d'élèves ait accès à un poste informatique sur lequel est installé un environnement de développement (IDE) Python, tel que EduPython ou Pyzo (logiciels gratuits), disposant des bibliothèques numpy, matplotlib et

csv, ainsi que le logiciel Excel ou Bloc-notes (pour ouvrir des fichiers CSV). L'idéal est que chaque élève fasse l'activité individuellement, mais elle peut être réalisée à plusieurs ; il est alors conseillé que les élèves se relaient pour que chacun se confronte à l'écriture dans un langage de programmation.

Certains prérequis sont nécessaires pour la mise en œuvre de cette activité. Concernant la physique, ce sont les notions de mécanique abordées en classe de première et dans les classes antérieures : vecteur position, vecteur vitesse, trajectoire d'un objet dans un référentiel donné, référentiel héliocentrique. Il est par ailleurs conseillé que les élèves aient déjà manipulé des programmes Python au préalable pour se familiariser avec ce langage informatique.

J'ai choisi de faire travailler les élèves sur les orbites des quatre planètes telluriques et de la comète Encke. L'aphélie de la comète Encke, point de sa trajectoire le plus éloigné du Soleil, est à seulement 4 unités astronomiques. Ainsi, il est possible de représenter sur un même graphique, de façon lisible, la totalité de l'orbite de la comète Encke et des quatre planètes telluriques. Les données astronomiques (éphémérides) ont été téléchargées sur le site de l'IMCCE.

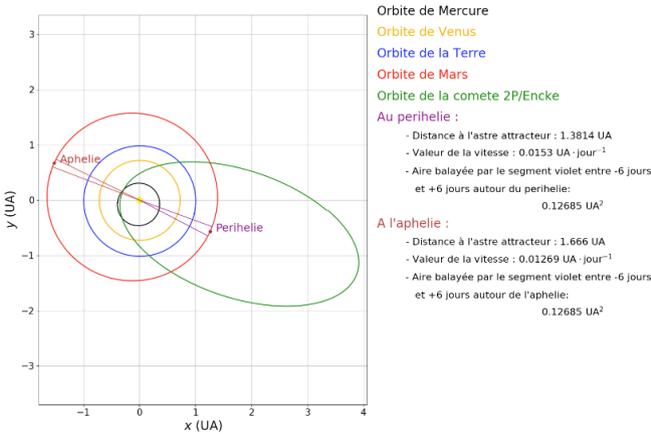
Première loi de Kepler

Dans un premier temps, les élèves s'approprient les fichiers de données astronomiques (au format CSV), en déterminant le contenu de chaque colonne. Puis ils exécutent le programme Python qui leur a été fourni : les orbites de Mercure, Vénus et la Terre s'affichent. On invite les élèves à comparer les orbites de Mercure et de Vénus. On s'attend à ce qu'ils remarquent que leurs orbites semblent circulaires, celle de Mercure étant décentrée par rapport au Soleil. La notion d'ellipse a été vue en mathématiques, mais ils ne font pas directement le lien ici.

On demande ensuite aux élèves de compléter le programme pour afficher les orbites de Mars et de la comète Encke. Il s'agit de copier-coller les lignes relatives aux autres planètes et de les adapter à la situation demandée. L'orbite fortement elliptique de la comète Encke permet de réinvestir la notion d'ellipse, de préciser ce que sont ses foyers et de construire avec les élèves la définition de la première loi de Kepler.

Deuxième loi de Kepler

L'objectif est ici de comparer l'aire balayée par le segment reliant les centres de masse du Soleil et d'un astre (planète ou comète) pendant des durées égales. J'ai choisi deux points particuliers d'une orbite, le périhélie et l'aphélie. Une fonction du programme Python calcule l'aire parcourue par le rayon vecteur pendant une durée déterminée au voisinage du périhélie et de l'aphélie. Cette fonction prend en paramètres d'entrée la distance séparant le Soleil et l'astre ainsi que sa vitesse orbitale. C'est aux élèves de compléter les lignes de code pour calculer ces deux grandeurs au cours du temps et les stocker dans les listes appropriées. La position des lignes de code à compléter est indiquée. La difficulté réside ici surtout dans la manière de faire référence aux coordonnées spatiales de la position et de la vitesse de l'astre, stockées sous forme de listes. Par ailleurs, les calculs de la distance au Soleil de l'astre et de sa vitesse se font dans une boucle « For ». Il convient d'expliquer aux élèves le fonctionnement de cette structure itérative.



L'exécution du code correctement complété permet de voir s'afficher la position du périhélie et de l'aphélie de Mars ainsi que la valeur de l'aire balayée en des durées égales au voisinage de ces deux positions. De cette information, les élèves en déduisent que la vitesse au périhélie est maximale et qu'elle est minimale à l'aphélie. Ils modifient ensuite le code pour vérifier l'égalité des aires balayées dans le cas de la comète Encke. Enfin, on co-construit avec les élèves la définition de la deuxième loi de Kepler. Il est alors possible d'évaluer sa pertinence sur d'autres points de l'orbite.

Troisième loi de Kepler

Dans cette dernière partie de l'activité, trois lignes du code sont à compléter pour :

1. Convertir la valeur du demi-grand axe a de l'orbite, fournie par le code, d'unités astronomiques à mètres.
2. Convertir la valeur de la période de révolution T de l'astre de jours à secondes.
3. Calculer la valeur du rapport $\frac{T^2}{a^3}$ et l'afficher.

Après exécution du programme appliqué à la planète Mars et à la comète Encke, les élèves constatent que le rapport $\frac{T^2}{a^3}$ est constant. L'enseignant enrichit le modèle en indiquant que

cette constante est reliée à la masse du Soleil. En terminale, les élèves peuvent résoudre les relations de Newton dans un cas circulaire pour retrouver l'expression de cette constante et ainsi calculer la masse du Soleil. L'activité se termine en donnant la définition de la troisième loi de Kepler.

Retours d'expérience

De manière générale, cette activité n'a pas posé trop de difficultés aux élèves les quatre années où je l'ai réalisée. Ayant été menée au mois de novembre, j'ai pu traiter au préalable trois activités numériques sur trois autres chapitres permettant aux élèves de se familiariser avec le langage Python. La connaissance du langage Python étant relativement hétérogène chez les élèves, il ne faut pas hésiter à s'appuyer sur les élèves ayant suivi la spécialité Numérique et sciences informatiques (NSI) en classe de première et qui éventuellement la continuent en classe de terminale.

Prolongement

On peut envisager d'améliorer le programme Python en ajoutant un aspect dynamique, sous la forme de disques représentant les planètes et la comète et qui se déplaceraient sur leur orbite respective. Cela permettrait de mettre en évidence de manière très visuelle que la période de révolution d'un astre augmente lorsque le demi-grand axe de son orbite augmente. Une telle animation montrerait également que la vitesse orbitale d'un astre diminue lorsque le demi-grand axe de son orbite augmente, dressant un lien direct avec le planétaire humain (voir contributions de Emmanuel Rollinde et Vincent Heussaff).

Ce programme Python pourrait également être utilisé pour déterminer la masse du trou noir Sagittarius A* à partir de la trajectoire d'une étoile en orbite autour de cet astre (voir

la contribution de Emmanuel Rollinde et Siham Kalli, sur la détection du trou noir Sagittarius A*).

Enfin, les lois de Kepler pourraient être mises en application dans de nombreuses situations en classe, sous la forme d'exercices : détermination de la période de révolution d'un satellite artificiel, de la distance entre Jupiter et l'un de ses satellites...

Planétaire et proportionnalité

Application à la définition de l'année

HEUSSAFF Vincent

École élémentaire Arthur Rimbaud, Chanteloup-les-Vignes

Résumé

Le planétaire est un outil permettant de faire vivre aux enfants le mouvement des planètes autour du Soleil avec leur corps. Cet outil permet notamment de faire comprendre aux élèves ce qu'est une année, notion abstraite et difficile à appréhender pour des élèves de cycle 2 (entre 6 et 8 ans). Il est également possible de mettre en œuvre à partir de cet outil des séquences d'apprentissage travaillant d'autres notions en mathématiques. En fonction des notions travaillées, cet outil peut s'adapter à des niveaux de classe allant de l'élémentaire au secondaire.

Mots-clés

Soleil; Système solaire; Mathématiques; Grandeurs et mesures; unités; année; élémentaire.

Contexte

Depuis 2020, le planétaire est utilisé au sein de l'école afin de faire découvrir aux élèves les unités de mesure du temps que sont la journée et l'année. Ces deux unités sont définies par le mouvement de la Terre sur elle-même et autour du Soleil ce qui les lie à l'astronomie et rend leur appréhension particulièrement abstraite. Le fait d'utiliser le planétaire permet de vivre le mouvement de la Terre autour du Soleil et donc de concrétiser ce mouvement dans l'esprit de l'élève. Ceci permet de clarifier pour eux la nature de cette unité de mesure.

Dans le cadre d'un projet réalisé en 2021 avec des élèves du CP au CE2 ayant pour but la réalisation d'un film d'animation sur le mouvement des planètes autour du Soleil, il a fallu réaliser un modèle réduit du planétaire pour les prises de vues. Ce travail a permis d'aborder les notions de mesure, d'unités de mesure, de cercle, de point et de proportionnalité et ainsi d'élargir l'utilisation de cet outil à d'autres notions mathématiques.

Contenu didactique/pédagogique

Le contenu proposé dans cet atelier a pour objectif de faire le lien entre des notions mathématiques et l'astronomie. Cela permet notamment de comprendre comment certaines unités de mesure du temps sont issues de l'astronomie. Il est ensuite proposé d'utiliser l'outil planétaire pour réinvestir des notions mathématiques dans les domaines de la proportionnalité et de la mesure. Cette démarche vise à utiliser des outils issus de

l'astronomie dans la construction des savoirs fondamentaux à l'école élémentaire.

Ainsi, les objectifs généraux que cette activité permet de traiter sont les suivants :

- Mathématiques : la proportionnalité, les mesures de temps et de longueurs, les unités de mesure, les définitions de cercle, point, les conversions de mesures.
- Questionner le monde/sciences : mesure de temps (année).

Plus précisément, les compétences qui sont travaillées par les élèves au cours de cette activité sont les suivantes :

- Comprendre le mouvement des planètes autour du Soleil.
- Identifier les unités de mesure du temps (année notamment) qui découlent de ce mouvement.
- Reproduire un objet et les informations y figurant en réduction (utilisation de la proportionnalité).
- Comprendre le processus de prise de mesures (unités de mesure, outils de mesure, erreurs de mesures, conversions de mesures).

Place de l'activité dans la modélisation

Dans le cadre de cette activité, il s'agit de travailler sur le planétaire qui est un modèle du Système solaire avec la réduction à la fois des échelles spatiale et temporelle. Dans un premier temps, les élèves considèrent la bêche sur laquelle est imprimée le planétaire comme un objet réel. Ils sont alors amenés à décrire cet objet pour qu'il devienne un modèle du Système solaire. Ainsi, les différents éléments représentés sur le planétaire deviennent des représentations d'objets astronomiques réels.

Les élèves vont ensuite observer et mesurer sur la bêche (objet empirique) pour concevoir des relations

mathématiques permettant d'enrichir le modèle du planétaire centré initialement sur les déplacements uniquement, ou de créer un nouveau modèle avec des échelles différentes.

Puis, ils doivent se déplacer sur ce dernier pour retrouver les caractéristiques du déplacement des planètes, notamment la définition d'une année et son lien avec le mouvement des planètes qui se trouve modélisé sur le planétaire. Pour cela, ils doivent concevoir les règles d'utilisation qui ont permis la construction de ce modèle : réduction de l'échelle temporelle avec un pas de temps de 15 ou 16 jours en fonction des modèles et réduction de l'échelle spatiale pour avoir une vue d'ensemble de la partie interne du Système solaire.

Dans un second temps, une fois que la compréhension de la définition d'une année, et notamment son caractère relatif à la planète considérée, est bien comprise par les élèves, une utilisation prédictive du modèle qu'est le planétaire peut être proposée. Par exemple, il est possible de demander aux élèves de prédire le nombre d'années écoulées sur Mercure pour deux années écoulées sur Terre. Les élèves devront alors utiliser les données empiriques récoltées lors de leur utilisation du planétaire pour concevoir une relation mathématique (qui enrichit alors le modèle du planétaire) avant de pouvoir la vérifier (ou l'évaluer) dans le cadre d'une validation empirique également. Cela permet de valider une loi de proportion entre la mesure des années sur chaque planète qui peut ensuite être utilisée pour faire des prédictions sur un plus long terme. On peut, par exemple, poser la question de savoir à combien d'années vénusiennes correspondent 10 années terrestres.

Lors du travail sur la proportionnalité (voir temps 3 décrit ci-après), les élèves disposent d'une vision généralement faussée du modèle mathématique à utiliser. En effet, lors du processus de réduction matérialisé par le pliage de la bache, le facteur de réduction pour trois pliages successifs est généralement proposé à 6 soit un modèle additif du facteur

de réduction $2 + 2 + 2 = 6$. Il est alors possible de vérifier le résultat prédit en comptant tout simplement les plis de la bâche. Cela demande alors de réviser ses propres modèles en abandonnant le modèle additif pour adopter un modèle multiplicatif soit un facteur de réduction de $2 \times 2 \times 2 = 8$. Ce nouveau modèle permet ensuite de faire une prédiction pour le facteur de réduction du pliage suivant ce qui permet de le tester. On peut alors vérifier que 4 pliages successifs correspondent bien à $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ plis sur la bâche du planétaire.

La dernière étape de l'activité consiste à réaliser des mesures sur un modèle afin de le reproduire en réduction. Cette étape permet de comprendre les choix effectués pour la réalisation du modèle de construction du planétaire puis de réaliser ses propres choix pour la réalisation d'un modèle réduit. Cela questionne notamment la précision des mesures, le protocole de mesure sur des positions qui sont représentées par des disques, mais aussi la forme des orbites. Les orbites sont-elles des cercles centrés sur le Soleil? L'approximation d'orbites circulaires est-elle satisfaisante pour le modèle réduit à construire? Pour plus de détails sur ces questions, il est possible de se référer à Heussaff V., Nechache A. & Rollinde, E. (2023) ainsi qu'à Rollinde et Maisch (2023).

Déroulement de l'activité

Le projet proposé aux élèves comprenait plusieurs temps d'apprentissage. Un premier sur la découverte du planétaire avec pour objectif d'en comprendre le fonctionnement et l'intérêt : vivre avec son corps le mouvement des planètes autour du Soleil. Cette séance de découverte a fait l'objet d'un article en cours de publication (Rollinde et al., 2024). Elle est décrite sur la plateforme du projet européen ARISTARCHUS (<https://aristarchusproject.eu/e-learning/>). Nous n'y revenons pas dans cet article. Un second sur la notion

d'année et le caractère relatif et arbitraire de sa définition. Un troisième sur la préparation du plan de prises de vues. La problématique était alors de trouver une solution pour que le planétaire (bâche de 4 m par 3 m) et les informations y figurant puissent être reproduites sur une feuille A3 (plan de prises de vues). Cette séquence de trois séances permet alors de réinvestir des notions mathématiques sur la proportionnalité. Chaque séance a duré 45 minutes avec des groupes d'une quinzaine d'enfants au maximum.

Temps 2 : définition d'une année

Prérequis : maîtriser la chorégraphie des planètes sur le planétaire.

Objectifs : comprendre le lien entre le mouvement des planètes autour du Soleil et la définition d'une année; comprendre qu'une année terrestre diffère d'une année mesurée sur une autre planète.

Phase 1 : redécouverte du planétaire et chorégraphie

Collectif puis demi-groupe 15 min

1. Rappel des différents éléments figurant sur le planétaire.
2. Reproduire la chorégraphie des planètes.
3. Retrouver les conclusions : plus on est proche du Soleil, plus le déplacement est rapide.

Phase 2 : année sur Terre

Collectif puis demi-groupe 15 min

Faire placer un enfant sur la position de départ de la Terre. Les autres enfants ont le rôle d'observateurs.

1. Poser un gâteau d'anniversaire sur Terre au point de départ de la chorégraphie.
2. Reproduire la chorégraphie des planètes. S'arrêter lorsque c'est son anniversaire. Que s'est-il passé? Quel âge ai-je?
3. Refaire un autre tour. Quel est mon âge maintenant?

4. Expliciter la définition d'une année : durée nécessaire à la Terre pour revenir à la même position par rapport au Soleil.

Phase 3 : comparaison de la durée d'une année

Demi-groupe puis collectif 15 min

1. Poser un gâteau d'anniversaire sur Mars et réaliser le même travail que sur Terre.
2. Même chose pour Vénus et Mercure.
3. Faire tourner un élève sur Terre, Mercure, Vénus et Mars en même temps. Dès qu'un a une année de plus, on regarde quel est l'âge sur les trois autres planètes.
4. Tirer une conclusion : l'âge dépend de la définition d'une année et donc de la planète sur laquelle on se trouve. Faire le lien avec la séance précédente.

La définition d'une année dépend de la planète sur laquelle on se trouve, sa durée correspond à la durée d'une **révolution** de la planète autour du Soleil.

Attention : l'important est de comprendre que ce n'est pas la durée mesurée qui change, mais l'unité de mesure dans laquelle elle est exprimée. L'année mercurienne dure moins longtemps que l'année vénusienne qui dure moins longtemps que l'année terrestre qui dure moins longtemps que l'année martienne. Tous les élèves se sont déplacés sur une même durée, mais cette durée unique correspond à un nombre d'unités différent. Si l'élève sur Terre a fait 3 révolutions autour du Soleil, alors la durée T du déplacement de tous les élèves peut s'exprimer selon 4 unités différentes (avec des nombres entiers ou demi-entiers) : $T = 3$ années terrestres = 12 années mercuriennes = 4 (presque 5) années vénusiennes = 1,5 année martienne.

Temps 3 : changement d'échelle

Exemple présenté pour le passage du planétaire à une feuille A3, mais cette méthode peut s'utiliser pour appréhender n'importe quel

changement d'échelle avec transformation d'une figure que ce soit dans le cadre d'une réduction ou d'un agrandissement.

Prérequis : les moitiés, utilisation d'un mètre, définition de milieu.

Objectif de la séquence : passer du plan correspondant au planétaire (3 m par 4 m) au plan de prises de vues (feuille A3) en utilisant les moitiés.

Notions fondamentales : valeur d'une mesure; résoudre un problème matériel difficile ou impossible à solutionner en pratique; servir de mémoire.

Compétences travaillées : mesure des longueurs en m et cm (cycle 2); conversion de longueurs m et m + cm → cm (CE2); identification du milieu d'un segment par pliage (cycle 2); calcul de moitiés (cycle 2)

Séance 1 : mise en évidence de la méthode

Objectif de la séance : identifier la méthode permettant de réaliser un changement d'échelle (réduction).

Phase 1 : identification de l'objectif.

Individuel puis mise en commun 5-10 min

Présentation du planétaire et du plan de prises de vues. Quelles sont les différences?

Figures → une est blanche, l'autre représente la trajectoire des planètes autour du Soleil.

Taille → elles sont différentes. Le planétaire est bien plus grand que la feuille A3.

Notre objectif : reproduire les figures présentes sur le planétaire sur le plan de prises de vues.

Phase 2 : recherche d'une solution pratique.

Binômes puis mise en commun 15-20 min

Comment pourrait-on faire pour atteindre notre objectif ?

Consigne : par deux, réfléchir à un moyen de réaliser l'objectif.

Mise en commun des solutions proposées par les binômes.

Aide ou étapes de la mise en commun avec appui sur les résultats des binômes : Il faut réussir à rendre les figures plus petites. Comment rendre une feuille plus petite? → On peut la plier en deux.

Apport institutionnel : quand je plie en deux, je divise la longueur en deux parties égales → je trouve ce qu'on appelle le milieu.

Plier la longueur du planétaire en deux. Est-ce que cela suffit? Non → il va falloir plier encore en deux.

Plier la longueur du planétaire une nouvelle fois en deux. Est-ce que cela suffit? Non → il va falloir plier encore en deux.

Attention : le problème initial de réduction de surface et réduit à un problème de réduction de longueur plus facile à appréhender pour des élèves de cycle 2 (6 à 8 ans). Il est possible de réaliser le travail sur la longueur du planétaire puis sa largeur pour retrouver un facteur de réduction suffisant. Pour des élèves plus âgés, il est souhaitable de faire le lien avec la mesure d'une surface et de retrouver son facteur de réduction. Ainsi, des longueurs réduites d'un facteur 2 conduiront à une surface réduite d'un facteur $2 \times 2 = 4$.

Apparaît vite le problème que les pliages ne suffiront pas. Cela est compliqué par la nature même de la bêche. Il va falloir passer par les nombres.

Apport institutionnel : les nombres permettent de réaliser des opérations que nous ne pouvons que difficilement réaliser dans la réalité (problèmes techniques, travail à

distance). Expliciter ces notions par des exemples. Problèmes techniques : matériau difficile ou impossible à plier comme c'est le cas pour nous. Travail à distance : je résous un problème, mais je n'ai pas sous les yeux le sujet, l'objet de mon problème.

Phase 3 : les nombres à manipuler.

Individuel puis mise en commun 5-10 min

Nous avons besoin de nombres à manipuler, car le pliage est trop difficile. Question : quels sont les nombres que nous allons utiliser ?

Aide : quand nous plions la bâche, quel nombre change ?
→ il s'agit du nombre qui représente la mesure de la longueur des côtés.

Nous allons devoir mesurer les longueurs des côtés de la bâche, mais cela suffit-il ? Quelles sont les autres longueurs à mesurer ? → il faut reproduire les figures donc les positions de chaque point (faire le lien avec les reproductions de figures sur quadrillage ou la symétrie en fonction du niveau des élèves).

Apport institutionnel : la mesure d'une longueur est un nombre qui correspond au report d'une unité de référence. Nous utilisons comme référence de longueur le mètre et des sous-unités comme le centimètre. Rappel de la relation : $1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$.

Phase 4 : prise des mesures du planétaire.

Binômes puis mise en commun 5-10 min

Chaque binôme vient prendre une mesure sur le planétaire : longueur, largeur, position du Soleil... (on peut alors faire le rapprochement entre égalité des côtés deux à deux pour les CE2 → le planétaire est un rectangle).

L'enseignant réalise un schéma pour rappel des mesures en explicitant le rôle de ce schéma (rôle de l'écrit → garder une trace de ce qu'on fait pour plus tard ou quelque'un d'autre).

Séance 2 : application de la méthode

Objectif de la séance : mettre en œuvre la méthode de changement d'échelle (réduction) et reproduire la figure de départ.

Phase 1 : rappel de la séance passée.

Collectif 5-10 min

Retour sur le schéma. Pourquoi avons-nous pris ces mesures? → avoir les valeurs (nombres) des mesures qui doivent être modifiées afin de réaliser le changement d'échelle. On va travailler sur ces nombres pour résoudre notre problème.

Phase 2 : conversion des mesures.

Individuel puis mise en commun 10-15 min

On va devoir faire comme si on pliait plusieurs fois l'objet de départ (ici la bache du planétaire). Pour cela, que doit-on faire? → calculer les moitiés. Calculer la moitié = plier une fois. Pour le faire facilement, on doit prendre des nombres de départ qui sont faciles à utiliser.

Les mesures en mètres sont-elles utilisables? → non, car les nombres sont trop petits → on va convertir dans une autre unité : les centimètres.

Mettre en commun les conversions obtenues.

Phase 3 : calcul du facteur d'échelle.

Binômes puis mise en commun 15-20 min

Objectif : passer de la taille du planétaire à celle de la feuille A3. Quelle est la taille de la feuille A3 : mesure de la longueur et la largeur de la feuille.

Reformulation de notre problème : ce qui rentre dans 4 m soit 400 cm doit rentrer dans 29 cm.

→ il faut faire des moitiés jusqu'à arriver à un nombre plus petit que 29. Faire la même chose pour la largeur pour trouver un nombre qui convient pour la longueur et la largeur.

Après une phase de réflexion en binômes, mise en commun en mettant en avant la correspondance moitié et pliage. Faire attention de bien compter le nombre de moitiés (pliages) afin d'évaluer le facteur de réduction d'échelle. Ce terme peut être développé à partir du CE2 et calculé avec la table de 2 en rappelant la multiplication. (Possible extension vers la division et expression de l'échelle en termes de fraction en cycle 3 et lien avec la géographie avec l'échelle d'une carte.)

Cas du planétaire :

$400/2/2/2/2 = 25 \rightarrow$ facteur $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$. Si on plie 4 fois, on va loger sur la feuille A3.

Pour expliciter le facteur 16, plier une bande de papier 4 fois en moitié pour voir apparaître les divisions successives et au final les 16 parties soit le facteur d'échelle.

Séance 3 : construction des figures sur le plan de prises de vues

Objectif de la séance : construction de la figure sur le plan de prises de vues à l'aide du facteur d'échelle.

Phase 1 : rappel de la séance passée.

Collectif 5-10 min

Retour sur la signification du facteur d'échelle. On doit prendre 4 fois la moitié soit réduire d'un facteur 16 la taille de toutes les figures.

Phase 2 : construction de la figure miniature (ici planétaire).

Collectif 25-30 min

Dessiner le cadre à partir des mesures du planétaire divisé par 16.

Placer le Soleil.

À partir du Soleil, retrouver chaque position de la figure en utilisant le facteur d'échelle et en suivant les étapes suivantes :
a) Mesure sur le planétaire (ou utilisation du schéma mémoire de la séance 1). b) Utilisation du facteur d'échelle pour la réduction. c) Report sur le plan de prises de vues.

Retours d'expérience

Les séquences mises en œuvre en classe ont permis de mettre en évidence plusieurs points d'importance lors d'une utilisation du planétaire.

Ainsi, le nombre d'élèves utilisant conjointement cet outil doit se limiter idéalement à une quinzaine d'élèves (soit une demi-classe) bien qu'il soit toutefois possible de monter jusqu'à 25 en plaçant plusieurs élèves sur la Terre et sur Mars. C'est ainsi une des premières limites de son utilisation, car, bien souvent, les effectifs des classes demandent de trouver une organisation pour travailler en demi-groupe ou une vraie habitude des élèves d'entrer dans le rôle d'observateur.

Toutefois le rôle d'observateur tient dans les activités autour du planétaire un rôle primordial. En effet, il est essentiel pour la compréhension des phénomènes que les élèves puissent se trouver à la fois dans la position d'acteur (marcher sur le planétaire) et d'observateur (observer de manière active les mouvements des camarades). En effet, les deux points de vue co-construisent les notions enseignées avec cet outil. Ceci est d'autant plus vrai que l'astronomie ne permet qu'à travers les modèles d'avoir une vision du mouvement des astres non géo-centrée.

L'utilisation du planétaire permet en outre une mémorisation accrue des notions mises en évidence en cours de séances, certainement du fait de sa dimension kinesthésique et de la nouveauté que constitue son utilisation

par les élèves. Ainsi, lors des séances successives, les élèves sont capables de retrouver ensemble les éléments clés des séances précédentes, ce qui n'est pas forcément le cas lors d'un apprentissage plus classique.

Un autre avantage de cet outil réside dans la liberté des élèves à participer. Ces derniers ne se sentent pas enfermés dans la vision qu'ils peuvent avoir de leur niveau scolaire. L'absence de prérequis visibles pour eux lors de la découverte du planétaire leur permet généralement de parler plus librement. Ainsi, la plupart des élèves, même ceux pas forcément habitués à prendre la parole en classe, participent lors de cette activité.

Il est également à noter que les dynamiques de classe et le niveau général des élèves peuvent impacter le déroulé de certaines séances, notamment dans le cadre du traitement de la proportionnalité. Si pour certaines classes avec des éléments moteurs, il est possible de construire avec eux la démarche de réduction à adopter, cela peut demander avec d'autres un guidage plus actif de l'enseignant.

Prolongement

Ces premières séances de découverte du planétaire puis de réinvestissement de notions mathématiques en lien avec cet outil se situent idéalement en cours de cycle 2 (CP au CE2). Elles peuvent être suivies durant les années suivantes, en fin d'école élémentaire (CM, CM2) ou au collège, d'une utilisation plus poussée du planétaire.

Il peut ainsi être question de travailler plus en détail sur la forme des orbites et sur la définition d'un cercle (voir l'atelier sur les lois de Kepler travaillées avec le planétaire, et en particulier la première loi sur la forme des orbites qui peut être mise en place dès le CM1).

Un travail plus poussé sur la mesure des distances sur le planétaire peut être envisagé en se posant la question du meilleur moment pour envoyer une sonde sur Mars par exemple. Il s'agit alors de déterminer le moment où la distance entre les deux planètes est minimale. Cela demande au préalable de repartir de la chorégraphie des planètes pour apprendre à se repérer à la fois dans le temps et l'espace sur le planétaire. Puis, de collecter et organiser les mesures dans un graphique pour observer la cyclicité de la variation de distance afin de déterminer le minimum de la courbe construite. Cette activité est décrite par Heussaff et al. (2025).

En termes de pluridisciplinarité, l'art peut être mis à contribution autour de la notion de continu/discontinu en traçant les lignes des orbites des planètes à partir des positions représentées sur le planétaire à l'aide de différentes techniques : gouttes d'encre, tas de poussière de couleur, crayons ou tout simplement mouvement du doigt (voir les images de la journée de l'astronomie 2024 à Neuville-Université sur le site de l'OAENF-CY).

À partir du collège ou du lycée, il est également possible de travailler sur la question des vitesses ou de retrouver les lois de Kepler (voir atelier lois de Kepler d'Emmanuel Rollinde).

À noter également qu'un travail en complémentarité sur l'origine des unités de mesure du temps est proposé dans l'atelier sur la semaine de Michel Faye. De plus, la modélisation du Système solaire est aussi abordée dans le cadre de l'atelier maquette du Système solaire de Noël Robichon.

Bibliographie

HEUSSAFF V., NECHACHE A. & ROLLINDE, E. (à paraître, 2024). Découvrir et approfondir des notions mathématiques à l'aide du planétaire humain. *Actes du colloque COPIRELEM 2023*.

HEUSSAFF V., NECHACHE A., ROLLINDE, E., DOUGLAS, M., JANUARIO, C. & MALINGREZ, C. (à paraître, 2025). Utiliser le planétaire pour mesurer et représenter l'évolution au cours du temps de la distance entre deux planètes. *Actes du colloque COPIRELEM 2024*.

ROLLINDE, E., MAISCH. M. (2023). LES ORBITES PLANÉTAIRES SONT-ELLES CIRCULAIRES? : Une ingénierie didactique associant mathématiques et sciences en cycle 3. *Grand N*, 111, pp. 5-39. (hal- 04227613)

Reproduire des mesures historiques de l’Astronomie avec le logiciel Stellarium (II)

*

La distance Terre-Lune

KHANFOUR-ARMALÉ Rita
CY Cergy Paris Université
Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR – UR 4434)
INSPE de l’Académie de Versailles

REMY Gilles
Département de physique
CY Cergy Paris Université

Résumé

L’objectif de cet atelier est d’initier les collégiens à l’histoire de l’astronomie en utilisant le logiciel de simulation Stellarium. Nous nous concentrerons sur le phénomène des éclipses de Lune, et explorerons deux méthodes historiques pour estimer la distance Terre-Lune. Inspirés par les travaux d’Aristarque de Samos et de Lalande & Lacaille, nous allons mesurer la durée de la totalité d’une éclipse lunaire et/ou la parallaxe lunaire à l’aide de Stellarium. Ces expériences permettront aux élèves de comprendre comment les observations astronomiques peuvent être utilisées pour affiner notre compréhension de l’Univers et de l’histoire de l’astronomie.

Mots-clés

Stellarium; histoire de l'astronomie; éclipse de Lune; éclipse de Soleil; distance Terre-Lune; collège.

Contexte : un peu d'histoire

Les éclipses de Lune ont fasciné les êtres humains depuis des millénaires et ont joué un rôle important dans le développement de l'astronomie ancienne. Dans les temps anciens, les éclipses de Lune étaient souvent perçues comme des événements mystérieux ou même des présages divins. Les civilisations anciennes, telles que les Sumériens, les Babyloniens, les Égyptiens et les Grecs, ont enregistré et étudié les éclipses de Lune dans le cadre de leur compréhension. Les Grecs savaient déjà il y a 20 siècles qu'une éclipse de Lune dans sa phase de totalité ne pouvait excéder deux heures. Aristarque a utilisé les éclipses de Lune comme base pour sa méthode de la distance relative. Lalande et Lacaille ont utilisé les éclipses de Lune pour étudier la parallaxe lunaire.

Au fil du temps, les éclipses de Lune ont continué à être étudiées et utilisées comme outils pour affiner nos connaissances sur le Système solaire et l'Univers. Les méthodes développées par des astronomes comme Aristarque de Samos, Lalande et Lacaille ont jeté les bases de l'astronomie moderne et ont contribué à notre compréhension actuelle de la taille et de la structure de l'Univers. Aujourd'hui, les éclipses de Lune restent un sujet d'étude et d'observation fascinant pour les astronomes amateurs et professionnels, ainsi qu'un événement spectaculaire pour le grand public.

Ce qui suit permettra d'expliquer plus finement les travaux d'Aristarque et de Lalande et Lacaille. Nous proposons ensuite un énoncé qui peut être mis en place en classe de 5^e en parallèle d'une séance dans un planétarium mobile.

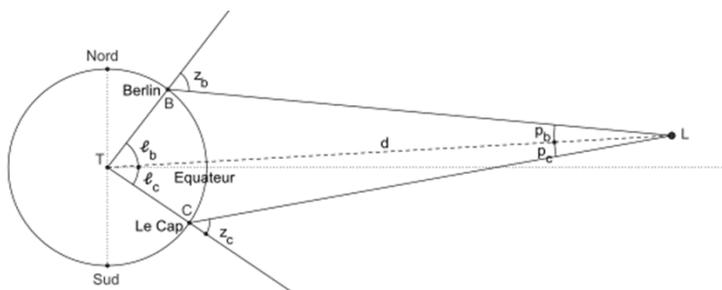
Contenu didactique et pédagogique

Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.) était un astronome et mathématicien grec célèbre pour ses contributions à la cosmologie et à l'astronomie. Il est notamment connu pour sa méthode de la distance relative pour estimer les tailles et les distances des objets célestes, y compris la Terre, le Soleil et la Lune. Il a utilisé les éclipses de Lune comme base pour sa méthode. Il observe que la Lune met à peu près une heure à parcourir une distance égale à son diamètre et que les éclipses totales de Lune durent deux heures au maximum. Il en déduit que le diamètre du cylindre d'ombre de la Terre est égal à trois diamètres de Lune. Les travaux d'Aristarque ont été étudiés et discutés par de nombreux historiens de l'astronomie et des sciences anciennes (Brière, 2008; Sivardière, 1995).

Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732-1807) était un astronome et mathématicien français célèbre pour son catalogue d'étoiles et son « Histoire céleste française ». Il a travaillé sur la triangulation astronomique pour mesurer la distance entre la Terre et la Lune. L'abbé Nicolas-Louis de Lacaille (1713-1762) était un astronome français connu pour ses observations précises des étoiles et pour avoir mesuré l'arc du méridien terrestre en Afrique du Sud. Il a également contribué à la méthode de triangulation pour mesurer la distance Terre-Lune. En observant la position apparente de la Lune par rapport aux étoiles lointaines à partir de deux endroits géographiquement éloignés, Lalande et Lacaille ont pu mesurer la parallaxe de la Lune et ainsi estimer la distance Terre-Lune. Cette méthode a contribué à une meilleure compréhension de la taille de la Terre et de la distance entre la Terre et la Lune. Les travaux de Lalande et Lacaille ont été étudiés et documentés par des historiens de l'astronomie et des sciences (de Lalande, 2022; Perdijon, 2023).

Une excellente approximation de la distance Terre-Lune fut établie le 13 mars 1751 par Lalande et Lacaille grâce à une méthode de triangulation aboutissant à une mesure de la parallaxe de la Lune (notée p).

Lalande se rendit à Berlin (B) et Lacaille au Cap (C), deux lieux pratiquement situés à la même longitude, mais avec un grand écart de latitude (environ 86°). L'objectif était de mesurer la distance zénithale de la Lune depuis ces lieux au moment de son passage dans le plan méridien (z_B et z_C). Nos deux astronomes en déduisent $p = 57' 11''$ (p. 400 du livre de Lalande).



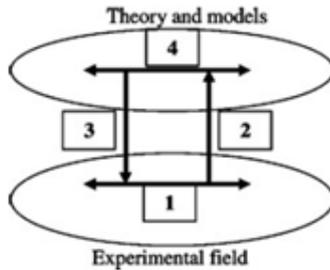
<https://archive.org/stream/astronomie02lala#page/n7/mode/2up>.

Cette méthode illustre comment les astronomes de différentes époques ont utilisé des observations astrométriques et des calculs trigonométriques pour estimer la taille de la Terre et d'autres objets célestes dans le Système solaire. Bien que les méthodes d'Aristarque aient été plus rudimentaires et moins précises en raison des connaissances et des technologies limitées de l'époque, elles ont posé les bases de l'astronomie moderne et ont ouvert la voie à des méthodes plus sophistiquées telles que celles développées par Lalande et Lacaille.

Place de l'activité dans la modélisation

Les deux méthodes d'Aristarque de Samos et de Lalande & Lacaille commencent par des observations astronomiques (1), telles que la mesure de la durée d'une éclipse lunaire ou la parallaxe lunaire à partir de différentes positions géographiques. Les observations sont ensuite interprétées à la lumière des théories et des modèles astronomiques existants (2). Par exemple, Aristarque a interprété l'éclipse lunaire en supposant que la Lune traverse l'ombre de la Terre.

Les observations apportent souvent de nouvelles contraintes aux modèles existants (2+4). Par exemple, les résultats des mesures de la parallaxe lunaire par Lalande & Lacaille (2) ont permis de mieux comprendre la distance entre la Terre et la Lune, ce qui a nécessité une réévaluation des modèles cosmologiques en vigueur à l'époque (4).



Une fois que les modèles ont été évalués et révisés, ils peuvent être utilisés pour faire des prédictions sur d'autres phénomènes astronomiques (3). Par exemple, les calculs basés sur les mesures d'Aristarque ont permis de prédire la taille du Soleil et de la Terre, tandis que les données de Lalande & Lacaille ont pu être utilisées pour prédire les positions et les mouvements futurs de la Lune.

En résumé, les méthodes d'Aristarque de Samos et de Lalande & Lacaille ainsi que la modélisation astronomique illustrent parfaitement la manière dont les observations et les

mesures dans le monde expérimental peuvent alimenter et informer les modèles théoriques, permettant ainsi de proposer de nouvelles prédictions et d'affiner notre compréhension de l'univers.

Déroulement de l'activité en classe de 5^e

Objectif de l'activité : mettre en pratique la mesure de la distance Terre-Lune par la méthode grecque en utilisant le logiciel Stellarium.

Matériel nécessaire : un ordinateur avec le logiciel Stellarium installé, des feuilles de papier et des crayons et un projecteur ou un écran pour afficher Stellarium.

Synopsis de l'atelier

Introduction (10 minutes) : expliquer aux élèves l'objectif de l'activité : mesurer la distance Terre-Lune à partir de l'observation d'une éclipse de Lune grâce au logiciel Stellarium. Présenter brièvement les étapes à suivre pour réaliser la mesure.

Guidage pas-à-pas (20 minutes) : diviser les élèves en groupes de travail. Guider les élèves à travers les étapes décrites dans le pas-à-pas fourni. Assurez-vous que chaque étape est bien comprise avant de passer à la suivante. Circuler parmi les groupes pour aider les élèves en cas de besoin et répondre à leurs questions.

Exploitation des résultats (10 minutes) : une fois que tous les groupes ont terminé les mesures, rassembler la classe pour discuter des résultats. Demander aux élèves de partager leurs observations sur la mesure du diamètre angulaire de la Lune, de son déplacement angulaire en 1 heure et de la durée de la totalité de l'éclipse. Guider les élèves dans le calcul et dans l'exploitation des résultats obtenus.

Synthèse et conclusion (10 minutes) : revenir sur les objectifs de l'activité et souligner l'importance de la mesure du diamètre angulaire de la Lune dans le cadre de l'étude des éclipses. Encourager les élèves à réfléchir sur ce qu'ils ont appris et sur l'utilité de Stellarium dans l'apprentissage de l'astronomie. Inviter les élèves à poser des questions supplémentaires ou à exprimer leurs observations finales.

En suivant ce scénario, les élèves de 5^e auront une expérience pratique et interactive pour comprendre une des premières méthodes de mesure de la distance Terre-Lune, tout en développant leurs compétences en utilisation de logiciels astronomiques. Cette séance peut être prolongée par l'illustration de la méthode de la parallaxe.

Le pas-à-pas Stellarium

Mesure du diamètre angulaire de la Lune

1. Glisser votre souris vers le bas de l'écran pour faire apparaître un menu déroulant.
2. Cliquer sous la date sur le symbole « play », le symbole « pause » (traits verticaux) doit apparaître. Le temps ne défile plus.
3. Placer alors votre souris sur la gauche de l'écran pour faire apparaître un autre menu déroulant.
4. Cliquer sur l'icône « horloge » et placer le 28 septembre 2015 à 2 h du matin. Déplacer la fenêtre Date en haut à droite de votre écran en maintenant le clic pendant le déplacement.
5. La Lune doit apparaître au haut de votre écran. Cliquer dessus pour la sélectionner, puis appuyer simultanément sur les touches shift et/ pour zoomer et centrer.
6. Dans le menu déroulant du bas de page, repérer l'icône « angle » (goniomètre). Si celui-ci n'est pas présent, aller dans le menu déroulant de gauche, onglet « configuration

générale », puis onglet « plugin », puis mesure d'angle et cliquer sur charger au démarrage. Sortir et re-renter dans le logiciel.

7. Cliquer sur l'icône « angle ». Faire la mesure du diamètre angulaire de la Lune (noté α) en glissant un clic gauche de part et d'autre de la Lune. Noter la valeur donnée en $^{\circ}$ (degré) ' (minute) et '' (seconde d'angle), puis la convertir en radian, sachant que $1''=1/3600^{\circ}$, $1'=1/60^{\circ}$ et $1^{\circ} = \pi/180$ radian.

Mesure du déplacement angulaire de la Lune en une heure

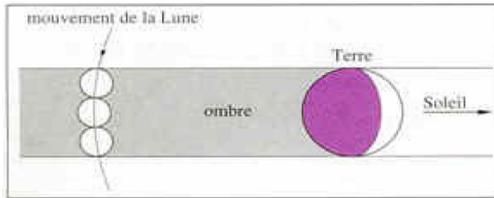
1. Cliquer sur l'icône « angle » pour désélectionner le goniomètre, puis sur une étoile du champ pour désélectionner la Lune, puis réactiver le goniomètre.
2. Glisser un clic gauche depuis le centre de la Lune vers n'importe quel autre point.
3. Dans la fenêtre Date, augmenter le temps de 1 h.
4. Faire un clic droit sur le centre de la Lune. Vous venez de mesurer le déplacement angulaire de la Lune dans le ciel en 1 h. Notez sa valeur. Que remarquez-vous? La Lune se déplace d'un diamètre en 1 h.
5. Désactiver le goniomètre, puis cliquer sur la Lune puis sur la barre d'espace pour la centrer.

Mesure de la durée de la totalité de l'éclipse

1. Dans la fenêtre Date, on est toujours le 28 septembre 2015, à 3 h du matin. Augmenter progressivement les minutes. Que remarquez-vous vers 3 h 20?
2. Noter l'heure du début de la totalité (les étoiles deviennent plus brillantes; pourquoi?) et l'heure de fin. En déduire la durée de la phase de totalité, $t =$.

Exploitation des résultats

Si la Lune se déplace d'un diamètre par heure, combien de diamètres lunaires faut-il mettre dans l'ombre de la Terre pendant la durée t ? Sur le schéma ci-dessous, trois diamètres lunaires sont représentés dans l'ombre de la Terre. À quelle durée de la phase de totalité cela correspond-il? Représenter sur le schéma le nombre de diamètre lunaire correspondant à votre mesure t .



- Le diamètre de la Terre (12 800 km) est égal à n diamètres de la Lune.
- Le diamètre de la Lune est $d = \frac{D}{n}$
- La distance Terre-Lune est $TL = d/\alpha = \frac{D}{n\alpha}$

Pour aller plus loin...

En fait la distance Terre-Lune varie plutôt autour de 380 000 km. Pourquoi varie-t-elle? Qu'est-ce qui peut, à votre avis, expliquer la différence entre votre mesure et la valeur réelle? Connaissez-vous d'autres moyens pour mesurer la distance Terre-Lune?

On pourrait également utiliser une éclipse partielle, l'entrée ou la sortie dans le cône d'ombre pour tracer avec un logiciel de dessin un cercle matérialisant l'ombre de la Terre et en déduire le rapport des rayons entre Terre et Lune. À noter que la forme de l'ombre projetée sur la Lune a été un des premiers arguments en faveur d'une Terre sphérique, à l'instar du mâât des bateaux ou des nouvelles étoiles apparaissant aux voyageurs.

La mesure de la parallaxe lunaire est plus rapide à mettre en œuvre dans Stellarium, mais plus difficile à comprendre pour les élèves. Dans Stellarium, se placer à Berlin puis au Cap [F6] pour obtenir les latitudes, $\lambda_c \sim -33^\circ 55'$ et $\lambda_b \sim 52^\circ 31'$ et les distances zénitales de la Lune $z_b = 63^\circ 19'$ et $z_c = 24^\circ 42'$. D'où $TL \sim BC/p$ avec $p = p_b + p_c = (z_b - \lambda_b) + (z_c - \lambda_c) = 1^\circ 40' = 0,029$ rad, soit $TL = 9673/0,029 = 333\,000$ km

Une autre méthode plus rapide consiste à utiliser le goniomètre. Cliquer sur le centre de la Lune vue depuis Berlin. Se déplacer au Cap et faire un clic gauche. La parallaxe est automatiquement mesurée ($1^\circ 10''$).

Retours d'expérience

Les participants à l'atelier d'AstroEdu étaient d'accord sur le fait que Stellarium est un logiciel gratuit et open source, largement disponible sur différentes plateformes, ce qui le rend facilement accessible aux étudiants et aux enseignants. Stellarium offre une représentation visuelle précise du ciel, avec des étoiles, des planètes, des constellations et d'autres objets célestes réalistement rendus, ce qui permet aux utilisateurs de visualiser les configurations astronomiques pertinentes pour chaque méthode.

Les fonctionnalités interactives de Stellarium ont permis aux participants de modifier la date, l'heure, la position géographique et d'autres paramètres pour simuler différentes conditions astronomiques, ce qui est essentiel pour mettre en œuvre les méthodes d'Aristarque et de Lalande & Lacaille. Stellarium utilise des données astronomiques précises et à jour, ce qui garantit que les simulations réalisées avec le logiciel reflètent fidèlement les phénomènes célestes réels. Bien que Stellarium soit convivial, il peut être complexe pour les débutants, en particulier pour les jeunes élèves du primaire, ce qui pourrait nécessiter une supervision et une orientation supplémentaires de la part de l'enseignant. Il peut

présenter certaines simplifications ou limitations techniques dans la modélisation de certains phénomènes astronomiques complexes, ce qui peut restreindre sa précision dans certaines situations. L'utilisation de Stellarium nécessite un accès à un ordinateur et à Internet, ce qui peut poser des problèmes d'accessibilité dans certaines situations où ces ressources ne sont pas facilement disponibles. Pour utiliser efficacement Stellarium dans le contexte des méthodes d'Aristarque et de Lalande & Lacaille, les élèves doivent avoir une compréhension de base des concepts astronomiques tels que la parallaxe, la triangulation et la mesure des angles, ce qui peut nécessiter une préparation préalable de la part de l'enseignant. En conclusion, bien que Stellarium soit un outil puissant et polyvalent pour illustrer les méthodes astronomiques, son utilisation efficace nécessite une combinaison de compétences techniques, de compréhension des concepts astronomiques et de guidage pédagogique pour garantir une expérience d'apprentissage optimale.

L'activité en elle-même est trop longue pour une séance d'une heure. Il faut prévoir une séance préalable de prise en main du logiciel Stellarium et une explication détaillée de la (des) méthode(s), notamment au niveau des mesures des angles et des conversions entre degré, minute, seconde et radian

Un travail plus simple, sans calcul, consisterait à observer le phénomène des éclipses solaire et lunaire, après une recherche préalable de dates, avec la rédaction d'un compte-rendu du déroulé de l'éclipse et des positions relatives des trois astres, Terre-Lune-Soleil...

Bibliographies

BRIÈRE, T. (2008). Aristarque de Samos et la mesure de l'univers. *Travaux & documents*, (35), 11-23.

SIVARDIÈRE, J. (1995). Histoire de la découverte du Système solaire : I. Géométrie et cinématique. *Bull. Un. Phys*, 89 (773), 645-661.

DE LALANDE, J. (2022). *Astronomie des dames. Présentation par Jean-René Roy*. Presses de l'Université Laval.

PERDIJON, J. (2023). Commentaire sur la mesure des distances célestes. *Essais*, 55-68.

SCIENCES PARTICIPATIVES

Compréhension de l'impact des satellites sur le ciel sombre

OOZEER Nadeem (NAEC, Ile Maurice)

South African Radio Astronomy Observatory, Liesbeek House
Building, River Park, River Lane, Gloucester Road, Mowbray,
7700, Cape Town, South Africa.

Department of Physics and Electronics, Rhodes University, PO
Box 94, Grahamstown, 6140, South Africa

Résumé

Le but de cette séance était de comprendre le concept d'interférence radiofréquence qui impacte le ciel sombre (à fréquence radio). Nous avons réalisé une session pratique utilisant Python pour détecter des satellites à partir des images TART dans le but d'utiliser des outils de programmation comme Python pour analyser les images radio, extraire la position des satellites et vérifier la présence de satellites non répertoriés. Cette session sera très utile aux étudiants du BAC et aux enseignants ayant des compétences en programmation (Python) et en mathématiques.

Mots-clés

Radiotélescope; satellites; interférences; Python; mathématiques; université.

Contexte

Quand on parle de l'astronomie, la plupart des gens imaginent des télescopes optiques, qui utilisent la lumière visible pour observer les étoiles et les planètes. Mais les objets dans l'univers dégagent différents types d'énergie, pas seulement la lumière que nous pouvons voir. La radioastronomie est un type d'astronomie qui utilise les ondes radio pour étudier ces objets. En détectant les ondes radio depuis l'espace, les scientifiques peuvent en apprendre encore plus sur les étoiles, les galaxies et d'autres astres, en ajoutant à ce que nous savons déjà grâce à la lumière visible. Cependant, tout comme les lumières vives peuvent interférer avec les télescopes optiques, la radioastronomie peut être affectée par les interférences radiofréquences (RFI) provenant de sources comme les téléphones portables et les satellites.

Beaucoup de gens sont conscients de l'impact des satellites sur les images optiques et on en sait moins sur les interférences radiofréquences. Afin de sensibiliser les participants à l'importance des ciels sombres et silencieux dans le spectre non visible, et de promouvoir la préservation des ciels calmes et sombres dans le cadre des efforts collaboratifs de sensibilisation au ciel obscur de l'IAU-UNESCO, cette contribution est utilisée pour enseigner aux participants à extraire la position des sources d'interférences (les satellites) et de mieux les comprendre.

Contenu didactique/pédagogique

La capacité d'identifier et de réduire les interférences radio est une compétence essentielle en radioastronomie, un défi courant. Les enseignants apprennent à produire des images radio et à extraire les positions des sources d'interférences (satellites), en les corrélant avec les ensembles de données à deux lignes (TLE). Ce processus améliore leur compétence technique dans la manipulation de données réelles et

l'application de techniques analytiques pour résoudre des problèmes pratiques.

Dans le contexte de l'enseignement de l'astronomie, ces compétences sont inestimables. Les enseignants peuvent introduire les étudiants aux techniques scientifiques de pointe et favoriser une approche multidisciplinaire de l'apprentissage. Cela inclut l'intégration des principes de la physique, de l'ingénierie et des sciences de l'environnement, en promouvant ainsi une compréhension holistique de la manière dont différentes disciplines scientifiques convergent dans l'étude de l'univers. De plus, l'atelier inculque une prise de conscience des impacts environnementaux et sociétaux plus larges des avancées technologiques, encourageant une approche responsable et informée de la recherche scientifique et de ses implications, tout en permettant aux enseignants, en combinant physique, ingénierie et sciences de l'environnement, de présenter une vue d'ensemble intégrée des sciences astronomiques.

Place de l'activité dans la modélisation

Mesures

1. Collecte de données réelles : Les participants utilisent les images qui sont produites par les récepteurs GNSS du TART qui captent des signaux radio dans la bande L1 (1,575 GHz). Ils mesurent les positionnements des satellites pour identifier les événements transitoires.
2. Analyse des interférences radiofréquences (RFI) : En mesurant les nombres de satellites dans le champ de vision, les enseignants apprennent à quantifier l'impact de ces sources et aussi à les localiser dans divers systèmes de coordonnées.

Objets réels

1. Observation des phénomènes transitoires : Les participants observent directement les données capturées par les récepteurs, analysant le passage de satellites proches de la Terre.

Modélisation

1. Intégration des principes théoriques et pratiques :
 - a) Les activités de mesure et de modélisation permettent aux enseignants de comprendre comment les concepts théoriques se traduisent en observations pratiques.
 - b) Ces données collectées sont utilisées pour créer des modèles numériques d'images radio, modélisant visuellement les positions et les intensités des sources de RFI.
2. Développement de compétences analytiques :
 - a) La collecte et l'analyse de données réelles renforcent la pensée critique et les capacités de résolution de problèmes.
 - b) Les enseignants apprennent à modéliser la trajectoire des satellites en utilisant les deux lignes d'éléments (TLE), intégrant ces modèles avec les observations RFI pour valider les résultats.
3. Simulation d'interférences :
 - a) Les participants utilisent des modèles de simulation pour comprendre comment différentes sources de RFI affectent les observations astronomiques.

Déroulement de l'activité

Les participants doivent avoir de bonnes compétences en mathématiques et en programmation Python pour pouvoir profiter de l'atelier. Idéalement, une journée sera la meilleure

pour organiser cette session qui peut inclure une séance matinale sur la compréhension des radiotélescopes et de la radioastronomie.

Retours d'expérience

C'est la première fois que cet atelier est présenté à un tout nouveau public sans expérience préalable en radioastronomie. Nous avons constaté que l'environnement informatique requis n'était pas configuré comme demandé. Cela a ajouté une pression supplémentaire à l'atelier. Cependant, l'atelier a commencé à l'heure. Une introduction à la radioastronomie a été donnée lors de la séance du matin. Cela incite davantage de participants à assister à l'atelier. Le niveau des participants était assez bas, seuls quelques participants ayant une expérience en programmation en Python.

Prolongement

Avec les interfaces de programmation d'application (API) disponible telles que Sathub TLE API et SCORE, les candidats peuvent commencer des travaux de recherche en science des données pour trouver des satellites anormaux (non catégorisés) dans les données gratuites disponibles (en développement).

Bibliographies

- TART – Transient Array Radio Telescope – Wikipédia
- RFI – Interférence électromagnétique – Wikipédia
- SathubTLE - SatChecker Ephemeris API Documentation.
- SCORE – Satellite Constellation Observation Repository

Astronomie et esprit critique par la cartographie des controverses

BICHET-RAMON Karine

Collège Jean-Pierre-Vernant Toulouse

Ires, Université de Toulouse 3

PIROT Frédéric (NAEC France)

Irap, Cnes/CNRS/Université Toulouse 3

Ires, Université de Toulouse 3

Résumé

Une manière d'aborder l'astronomie et de la comprendre comme une science est d'étudier les grandes controverses scientifiques qu'elle a vécues, et donc de se pencher sur la construction du savoir scientifique. Les contenus disciplinaires liés à l'astronomie sont donc mobilisés dans le cadre d'une progression du travail de l'esprit critique en classe. Ce travail peut être abordé du cycle 2 à l'université ou lors d'une formation d'enseignants.

Mots-clés

Esprit critique; construction du savoir scientifique; controverses; révolution scientifique; épistémologie; élémentaire; collège; lycée; université.

Contexte

L'objectif de cet atelier n'est pas seulement d'apporter du contenu scientifique, historique ou épistémologique liés à l'astronomie. Il s'agit également de mettre en place une progression du travail de l'esprit critique de manière à ce qu'il soit efficace et opérationnel.

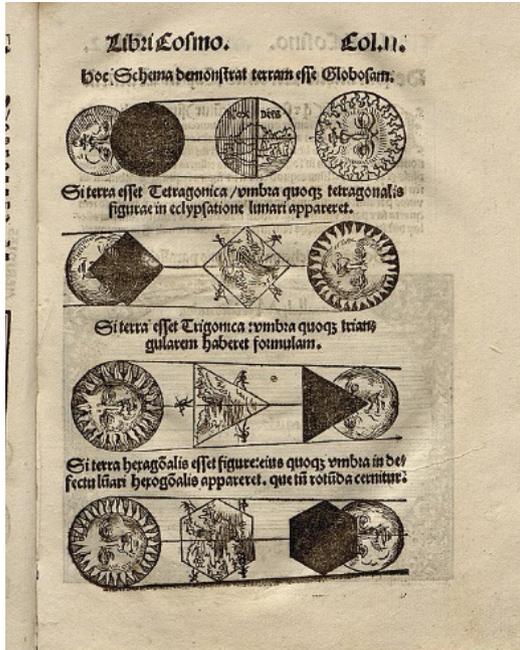
Il sera donc question de permettre aux enseignants d'adopter des postures d'esprit critique et de les faire adopter à leurs élèves en leur apportant des ressources et des outils méthodologiques tout en travaillant les contenus disciplinaires.

Contenu didactique/pédagogique

À partir d'images de corps célestes, d'articles, de coupures de presse et d'apports épistémologiques relatifs à la forme de la Terre, à la révolution copernicienne, ou à l'avènement de la relativité générale et ses conséquences, il s'agit de découvrir et d'éprouver des postures d'esprit critique et de développer des pratiques sur sa construction à travers notamment la mise en évidence de biais cognitifs dans le contexte des apprentissages.

Afin d'évaluer la robustesse des arguments scientifiques, mais aussi la fiabilité des sources d'information glanées, les stagiaires apprendront à élaborer une cartographie des controverses. La cartographie des controverses est une technique initiée par le sociologue des sciences Bruno Latour. Elle consiste à disposer graphiquement les différentes théories, les différentes sources d'informations,

et les différents auteurs et à créer des liens entre tous ces éléments. La cartographie des controverses permet ainsi de visualiser les grands courants de pensée, les communautés et les obstacles épistémologiques qui se sont dressés sur le chemin des scientifiques.



Légende : Différentes ombres portées de la Terre sur la Lune lors des éclipses de Lune, selon la forme envisagée de la Terre. Extrait de *Cosmographicus Liber* (1524) de Petrus Apianus. (Libre de droits)

Place de la modélisation dans l'activité

La modélisation s'avère un complément très intéressant dans le cadre de cet atelier. Par exemple, pour aborder les modèles géocentriques et héliocentriques, on pourra inviter les élèves à modéliser les phases de Vénus dans les deux cadres théoriques et à discuter les implications de leur modélisation mises en parallèle avec les observations. De

même, on pourra discuter le contre-argument « platiste » qui veut que les éclipses de Lune ne constituent pas un argument recevable pour abonder en faveur d'une terre sphérique. On s'aidera pour cela de différentes formes à section circulaire (cylindre, cône) qui peuvent avoir une ombre portée similaire à une boule.

Déroulement de l'activité

Prérequis : connaissances en astronomie sur la position de la Terre dans le Système solaire et la forme de la Terre.

Au cours d'activités en histoire des sciences, les élèves découvrent l'évolution des connaissances et des savoirs en astronomie et notamment en lien avec la Terre.

Activités de mise en évidence des biais cognitifs, notamment des biais en lien avec l'observation et la distinction entre les faits et les interprétations.

Présentation et travail de postures d'esprit critique qui peuvent être travaillées avec des élèves.

- Ne s'intéresser qu'à des faits vérifiables
- Ne considérer que les faits et leur traitement raisonné
- Adopter le doute cartésien
- Savoir et pouvoir faire confiance
- Pratiquer, à priori, la suspension de jugement
- **Se donner le temps et les moyens**

Après avoir choisi ou attribué une controverse scientifique à la classe ou à des groupes d'élèves, l'établissement d'une cartographie de controverse passe par plusieurs phases qui mobilisent chacune des compétences :

- Chercher des documents sur le Web ou les mettre à disposition si préalablement sélectionnés ;
- Ordonner chronologiquement les étapes ou éléments de débats historiques ;

Aristote : Traité du ciel (Livre II, 14) :

« Lors des éclipses, la Lune a toujours pour limite une ligne courbe : par conséquent, comme l'éclipse est due à l'interposition de la Terre, c'est la forme de la surface de la Terre qui est cause de la forme de cette ligne. »

- Pour chaque document, repérer l'auteur, son affiliation ; évaluer son expertise et, si applicable, le mouvement de pensée auquel il appartient ou se revendique ;
- Caractériser les arguments de chaque interlocuteur : croyance, opinion, connaissance, fait, témoignage ; discuter l'objectivité ou subjectivité de l'information ; évaluer l'intention de publication : convertir, influencer l'opinion, faire consommer, vendre, mettre à disposition du savoir, exprimer une opinion, enrichir intellectuellement, faire cliquer.
- Repérer les différents arguments et les biais associés.
- Réalisation d'un document bilan qui résumera les acteurs, les courants de pensée, les arguments, etc. :

Formulation de la controverse :

.....
.....

Mots-clés :

.....

Analyse et catégorisation de l'information

- **Sources/Acteurs :** Chercher sur des supports variés, numériques et papiers, ce qui est dit sur le sujet en prenant soin d'identifier les sources. Copier-coller l'information pertinente sur un document de traitement de texte avec l'URL (page Web) et la source du document papier.
- **Résumer** ce que disent les différents acteurs en quelques mots et leur point de vue par rapport à la controverse (pour, contre, nuancé).

- **Arguments** : Croyance, opinion, connaissance, fait, témoignage, objectivité, subjectivité de l'information.
- **Biais** : Les biais correspondent à des situations dans lesquelles un traitement rapide des informations trompe nos sens et conduit à l'erreur de jugement.
- **Évaluer l'intention de publication** : convertir, influencer l'opinion, vendre, mettre à disposition, diffuser une connaissance, exprimer une opinion, enrichir intellectuellement, faire cliquer...
- Réalisation de la cartographie après avoir choisi des regroupements et une sémiologie graphique.
- Possibilité d'utiliser une cartographie pour débattre après avoir établi des règles de prise de parole.

Retours d'expérience

Lors de la mise en place de l'activité, la prise de conscience des biais cognitifs peut surprendre, voire même déstabiliser. Il s'agit alors de revenir sur les objectifs de l'apprentissage. D'autre part, ce travail nécessite d'avoir accès à une banque d'informations pour les apprenants les plus avancés ou bien de fournir cette banque aux autres élèves.

Cependant, les acquis à l'issue de ce travail, sont transposables à d'autres disciplines ou dans la vie courante et permettent aux élèves d'adopter des postures citoyennes.

Prolongement

Il est prévu de développer le travail d'évaluation des postures et du travail de l'esprit critique.

Bibliographies

DELSART, C. & RUMEAU, C. (2019). Cartographie des controverses, *Cahiers pédagogiques*, 550, pp. 37-38.

Clea (2020). Croyances et idées fausses en astronomie, *bors-série 13 des Cahiers Clairaut*, édité par le Comité de liaison enseignants et astronomes (Clea), 280 pp.

Ires Toulouse (2020). Cartographie des controverses médiatiques en relation avec les sciences, https://ires.univ-tlse3.fr/esprit-critique-science-et-medias/?page_id=892

ART ET LITTÉRATURE

La combinaison spatiale : un objet technique pour questionner le monde du vivant et de la matière

CHARLES Frédéric
CY Cergy Paris Université
Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR – UR 4434
INSPÉ de l'Académie de Versailles

Résumé

Cette contribution prend place à l'école primaire; elle présente comment un album de littérature de jeunesse met en avant un objet technique complexe, une combinaison spatiale et permet de questionner au plan scientifique et technologique sa structure et son fonctionnement. L'activité présentée prend place en classe de CP-CE1 et est fondée essentiellement sur une phase de problématisation suivie d'investigations documentaires et expérimentales.

Mots-clés

Questionner le monde; exploration spatiale; technologie et robotique; combinaison spatiale; élémentaire.

Contexte

Le monde de l'espace est une thématique motivante pour les élèves. Si l'astronomie est beaucoup étudiée pour éduquer les enfants âgés de 3 à 11 ans (par exemple dans la littérature anglophone : Lelliot & Rollnick, 2009), la question de l'exploration spatiale et de l'exobiologie est peu utilisée en classe primaire : cette étude propose de combler un manque à ce sujet et de montrer en quoi la combinaison d'un astronaute permet de questionner conjointement le monde des objets, du vivant et de la matière, notamment les conditions biologiques et physiques nécessaires à la vie sur la Lune (et donc sur la Terre). En effet, sur la Lune, les conditions physico-chimiques sont hostiles au développement de la vie : radiations solaires, pression, absence de dioxygène, absence d'eau liquide, températures extrêmes, micrométéorites. Pour qu'un Homme puisse aller sur la Lune, il est nécessaire qu'il soit équipé d'une combinaison spéciale pour que son intégrité physique soit préservée.



Contenu didactique/pédagogique

Cette proposition restituée prend place au cycle 2 de l'école primaire, le « cycle des apprentissages fondamentaux » (MEN¹, 2020) qui regroupe les classes de CP, CE1 et CE2. « Au cycle 2, l'acquisition des savoirs fondamentaux (lire, écrire, compter, respecter autrui) est la priorité » (MEN, 2020, p. 2). La priorité donnée par le MEN est donc à l'enseignement du français et des mathématiques et dans une moindre mesure à l'éducation morale et civique. Ainsi, les sciences et la technologie sont reléguées en arrière-plan. Pourtant, il est indispensable que les professeurs des écoles fassent vivre à leurs élèves âgés de 5 à 8 ans des expériences (au sens psychologique), organisent des apprentissages solides, et construisent un référent empirique (Coquidé & Lebeaume, 2003) nécessaire aux fondements solides du *curriculum* de sciences et technologie (Charles, 2020, p. 23).

Les contenus relatifs aux sciences et à la technologie se situent dans les programmes de cycle 2 dans une matière (Lebeaume, 2011, p. 88) étiquetée « questionner le monde du vivant, des objets et de la matière ». Cette matière ne constitue donc pas une discipline et les professeurs des écoles sont incités par les programmes (MEN, 2020, p. 15) à lier fortement les enseignements de cette matière à ceux du français, notamment à des activités de lecture et d'écriture. L'approche pluridisciplinaire est en quelque sorte prescrite.

Le cadre théorique s'inscrit tout d'abord dans la lignée des travaux liés à l'enseignement des sciences en contexte² (King & Ritchie, 2012; Kuhn & Müller 2014; Sadler & Zeidler, 2009) qui montrent l'intérêt de cette modalité d'enseignement (pluridisciplinaire) pour la motivation et les apprentissages des élèves, ainsi que l'importance pour les enfants des

1 MEN : ministère de l'Éducation nationale.

2 « Science in context approach » en anglais.

classes primaires (et secondaires) de ne pas être placés dans les frontières classiques des disciplines scolaires. Dans cette perspective, des travaux ont montré la pertinence d'utiliser les récits d'albums de fiction réaliste (Bruguière and Triquet, 2012). Ces récits développent une intrigue contrainte par les lois de la nature qui vont impliquer que la compréhension de cette intrigue passe par un travail des contenus scientifiques sous-jacents. Sous certaines conditions, ces histoires constituent un levier pour problématiser, questionner ou modéliser le monde réel en confrontant le récit avec les connaissances des élèves (Bruguière & Triquet, *Ibid.*; Soudani & al., 2015).

Place de l'activité dans la modélisation

Il n'existe pas de réelle modélisation ni dans cette activité ni dans la séquence à laquelle elle appartient. Précisons seulement ici les objectifs généraux :

1. Connaître les différences entre la Terre et la Lune (gravité, température, radiations solaires, oxygène/air) et en quoi ces différences permettent le développement et le maintien de la vie sur Terre (et pas sur la Lune).
2. Découvrir les particularités de la combinaison des astronautes qui lui permettent d'assurer son maintien en vie.

Les compétences liées à la démarche d'investigation ne relèvent pas de la modélisation, mais se formulent ainsi :

1. Être capable de se poser des questions et de comprendre un problème scientifique et/ou technique.
2. Savoir comment vérifier une hypothèse (expériences, recherches, etc.).
3. Savoir faire des hypothèses, essayer d'y répondre et conclure.
4. Savoir dessiner des croquis d'observations et les légender.

Déroulement de l'activité

Il est nécessaire avant de parler de l'activité d'évoquer l'album de fiction réaliste *Classe de Lune* (Hare, 2019) qui a été choisi pour ses potentialités didactiques. Cet album sans texte raconte par ses illustrations l'histoire d'une classe partie travailler sur la Lune : des enfants explorent en combinaison le satellite de la Terre puis en repartent à bord d'un vaisseau spatial après des activités d'observations et d'échantillonnage mais une élève est malheureusement oubliée sur la Lune par la classe et son enseignant très vite, cette élève rencontre des habitants de la Lune avant d'être récupérée par le reste de sa classe. L'analyse du contenu de l'album met au jour ses potentialités didactiques : tout d'abord, différentes illustrations permettent de comparer la vie dans la station spatiale d'où partent les élèves et sur la Lune. Ensuite, l'événement de l'abandon imprévu fait basculer le récit et permet de questionner les conditions de la survie sur la Lune grâce à un objet technique, sa combinaison, et la possibilité – ou l'impossibilité – de la vie sur la Lune et des facteurs liés au monde du vivant (fonction de nutrition) et de la matière (pression et température notamment). La nécessité de respirer pour vivre est ainsi posée de manière implicite dans l'histoire de l'album. Questionner cette nécessité permet de supposer un début de problématisation dans le cadre de la lecture de cet album en classe. Les questions de la température, de la pression et de la gravité sont également posées par les représentations réalistes de la Lune et les sauts effectués par les enfants.

La recherche restituée a été menée au sein du groupe LÉA SPEEST³ qui peut être considéré comme un groupe de recherche collaborative orientée vers la conception (Sanchez et Monod-Ansaldi, 2015). Une séquence liée à l'album et

3 LÉA SPEEST : Lieu d'éducation Associé « Spécialité des Professeurs des Écoles et Éducation Scientifique et Technologique ».

priviliégiant une approche en contexte a été conçue, mise en œuvre puis analysée par l'ensemble des membres du LÉA. Les données empiriques analysées ensuite sont issues de la mise en œuvre d'une séquence de cycle 2 par une enseignante du LÉA (en CP-CE1 ; 13 élèves) en présence du chercheur en septembre 2023. Cette séquence visait un travail sur le monde de la matière et du vivant à partir d'un questionnement initial sur l'objet « combinaison spatiale ». Ces données sont constituées par :

Des dessins individuels récoltés en première séance. Ils constituent un relevé des connaissances préalables. Il leur a



été demandé : « Dessine de quoi a besoin un être humain pour vivre sur la Lune » ; ces dessins ont ensuite été annotés avec les commentaires faits par chaque élève.

La transcription des discussions collectives lors des deux premières séances sur le rôle des différentes parties de la combinaison spatiale en lien avec les conditions physico-chimiques dans l'espace. Ces deux séances constituent la phase de questionnement qui vise à problématiser l'objet « combinaison » dont les parties permettront de légitimer des investigations expérimentales et d'observation durant les cinq séances suivantes. La structuration de la séance six permettra de mettre en relation organisation de l'objet technique, propriétés de la matière et caractéristiques de la Vie et de son maintien (dans l'espace et ailleurs...).

Retours d'expérience

La séquence a été mise en œuvre et les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse didactique en physique et en biologie :

- À propos de la respiration, l'article de Paccaud (1991) propose une analyse des origines des représentations : par exemple, le langage commun qui évoque la fonction biologique (« bon air et mauvais air » en relation avec l'environnement) ou les manifestations extérieures du fonctionnement interne (l'air entre et sort rapidement et semble être le même, inchangé).
- À propos de l'air, l'article de Plé (1997) propose une analyse dans un cadre bachelardien des obstacles rencontrés par les élèves en élémentaire : un obstacle cognitif (lié à la perception première qui domine dans ce cas : l'air n'est pas de la matière ni un mélange de gaz) et un obstacle langagier (il y a de l'air s'il y a du mouvement, du vent « courant d'air »; « va prendre l'air! »).
- À propos du début de cette séquence mise en œuvre, les analyses des dessins montrent que les enfants de cycle 2 pensent majoritairement (12 sur 13) qu'une combinaison spatiale est nécessaire pour vivre sur la Lune dont ils distinguent différentes parties (notamment le casque et le sac à dos).

Le tableau ci-dessous propose l'analyse des données des premières séances. Il permet de mettre en évidence dans la première colonne que les élèves ont questionné l'objet « combinaison spatiale » en menant un début d'analyse fonctionnelle. Les colonnes « exemple » et « interprétation » permettent de mettre au jour les savoirs des élèves et les obstacles relatifs au monde du vivant et de la matière.

Partie de la combinaison	Exemple	Interprétation
<p>Fonction du casque (respirer)</p>	<p>« Le casque permet de voir, c'est un peu comme une vitre » (Loukas) « Le casque permet au mauvais air de ne pas rentrer dans la combinaison » (Clara) « S'ils retirent leur casque, ils vont respirer le mauvais air pour leur corps » (Lucas) « Non, il n'y a pas d'air dans l'espace, tu ne peux plus respirer » (Baptiste)</p>	<p>La question de la transparence et de l'étanchéité est posée, mais il n'existe pas de consensus entre les élèves. Cela pose un problème qui sera traité par la suite : sur la Lune (ou dans l'espace) : pas d'air ou du mauvais air?</p>
<p>Fonction du casque (protéger du Soleil)</p>	<p>« Tu peux te brûler les yeux avec le Soleil, tu dois porter un casque » (Enzo) « C'est pour ça que le casque il est noir » (Preston) « Oui, parce que le Soleil est plus proche » (Clara)</p>	<p>Pour les élèves, le casque a une fonction de protection (mais un peu comme un casque de cavalier). Le problème du rayonnement solaire sera traité par la suite.</p>
<p>Fonctions du sac à dos</p>	<p>« Le sac à dos c'est pour respirer » (Ethan) « Le sac à dos c'est pour enlever le mauvais air » (Preston) « Le sac à dos apporte l'oxygène, le bon air » (Timmy)</p>	<p>Le sac à dos est associé à la fonction de respiration pour les élèves, mais pas de consensus (dans la réalité, le sac à dos permet à l'astronaute de respirer et de boire).</p>

Prolongement

La suite de la séquence a été mise en œuvre et a focalisé plusieurs directions :

Un travail de démarche expérimentale pour connaître les conditions nécessaires au développement et au maintien de la vie ; ce travail a été mené en utilisant un espace scientifique dédié à ces expérimentations de facteurs (nutriments ; eau ; température)

Un travail de démarche d'investigation documentaire pour explorer les parties et leurs fonctions de la combinaison spatiale. Des vidéos ont été diffusées ainsi que des recherches documentaires dans différents albums.

En termes de résultats présentés, l'interprétation de cet album de fiction réaliste offre des activités pleines de sens et motivantes pour développer une argumentation basée sur les potentialités du récit. L'analyse présentée des données montre l'intérêt de *Classe de Lune* pour questionner les nécessités relatives au maintien et au développement de la vie. Ces données permettent de retrouver sans surprise certains résultats de la didactique de la physique et de la biologie à propos des conceptions et obstacles sur l'air et la respiration humaine (Paccaud, 1991 ; Plé, 1997), mais elles permettent de montrer la fertilité de cet objet technique complexe, la combinaison spatiale pour un questionnement non disciplinaire du monde du vivant, des objets et de la matière.

En termes de progressivité, le groupe LÉA a mis au jour l'importance de l'astre « Lune » et a conçu, mis en œuvre et analysé deux autres séquences, l'une en cycle 1, centrée sur une première approche des attributs de la Lune ; l'autre en cycle 3, mêlant très fortement mathématiques et sciences et explorant les éclipses.

Bibliographies

BRUGUIÈRE, C., & TRIQUET, E. (2012). Des albums de fiction réaliste pour problématiser le monde vivant. *Repères*, 45, 181–200.

CHARLES, F. (2020). Pratiques enseignantes en éducation scientifique et technologique à l'école maternelle : perspectives curriculaires. *R DST*, 21, 21-44.

COQUIDÉ, M & LEBEAUME, J. (2003). La découverte de la nature et des objets à l'école, hier et aujourd'hui. *Grand N*, 72, 105-114.

KING, D. T., RITCHIE, S.M. (2012). Learning Science Through Real-World Contexts. *The International handbook of Science Education*. Dordrecht: Springer Press.

KUHN, J. & MÜLLER, A. (2014). Context-based science education by newspaper story problems: A study on motivation and learning effects. *Perspectives in Science*, Vol. 2, 1-4, 5-21.

LEBEAUME, J. (2011). Les choses et les mots à l'école. Exploration de la connexité des enseignements de français et de sciences (1880-2000). *Carrefours de l'Éducation, Hors-Série 1*, 87-100.

LELLIOTT, A. & ROLLNICK, M. (2009). Big Ideas: A review of astronomy education research 1974-2008. *International Journal of Science Education*, Vol. 32, 13, 1771-1799.

PACCAUD, M. (1991). Les conceptions comme levier d'apprentissage du concept de respiration. *Aster*, 13, 35-58.

PLÉ, É. (1997). Transformation de la matière à l'école élémentaire. Des dispositifs flexibles pour franchir les obstacles. *Aster*, 24, 203-209.

SADLER, T. D. & ZEIDLER, D.L. (2009). Scientific literacy, PISA, and socioscientific discourse: Assessment for progressive aims of science education. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 46, 8, 909-921.

SANCHEZ, É. et MONOD-ANSALDI, R. (2015). Recherche collaborative orientée par la conception. Un paradigme méthodologique pour prendre en compte la complexité des situations d'enseignement-apprentissage. *Éducation et Didactique, Vol. 9, 2*, 73-94.

SOUDANI, M., HÉRAUD, J. L., SOUDANI-BANI, O. & BRUGUIÈRE, C. (2015). Mondes possibles et fiction réaliste. Des albums de jeunesse pour modéliser en science à l'école primaire. *Recherches en didactique des sciences et des technologies, 11*, 135-160.

Textes officiels et album de littérature de jeunesse

HARE, J. (2019). *Classe de Lune*. Paris : L'École des Loisirs.
ministère de l'Éducation nationale (2020). *B.O. de l'Éducation nationale n° 31*. Programme d'enseignement du cycle 2.

Les exoplanètes à travers des œuvres littéraires-scientifiques

HAFIZI Mimoza
Université de Tirana, Albanie

Résumé

Au cours de cet atelier, les participants développent des connaissances sur les exoplanètes en se basant sur divers ouvrages de vulgarisation dédiés à ce sujet. Une telle séance, destinée aux élèves des écoles primaires (à partir de 12 ans) et secondaires, vise à promouvoir la lecture de ce type de littérature tout en les guidant dans l'exploration de leurs différences et similitudes, leurs particularités et leur style.

Mots-clés

Exoplanètes; astrobiologie; exploration spatiale; littérature; vulgarisation scientifique; collège; lycée.

Contexte

La découverte des exoplanètes constitue actuellement un thème majeur de l'astronomie et l'une des réussites les plus marquantes de la science du XXI^e siècle. Depuis la première planète située en dehors du système solaire découverte en 1995,

la liste s'est aujourd'hui étendue à plus de 7 000 exoplanètes (fin 2023, selon le site exoplanet.eu), chaque jour apportant son lot de trouvailles présentant des caractéristiques de plus en plus diversifiées et captivantes. De nombreux télescopes terrestres ainsi que des missions spatiales ont consacré leurs efforts à la recherche de ces mondes susceptibles d'abriter la vie au-delà du Système solaire. Dans ce contexte astronomique foisonnant, l'intérêt suscité par le public est extrêmement prononcé. En complément des articles scientifiques, divers ouvrages de vulgarisation s'efforcent d'expliquer aux non-spécialistes intéressés les avancées résultant de notre quête spatiale concernant la vie potentielle dans l'Univers.

Contenu didactique/pédagogique

Au cours de cette activité, nous avons exploré diverses données attrayantes sur les exoplanètes, en débutant par la question suivante : quelle est la définition d'une exoplanète ? Ensuite, nous avons abordé l'histoire de leur découverte et les méthodes de détection qui y sont associées : la méthode de vitesse radiale, le transit, la détection directe, les microlentilles gravitationnelles, entre autres. Ces approches reposent sur des connaissances pluridisciplinaires en physique et en biologie, centrées sur la question fondamentale : pourquoi recherchons-nous les exoplanètes ? Pourquoi la quête de vie dans l'Univers revêt-elle une telle importance pour notre humanité ? De plus, nous avons examiné des aspects tels que la zone habitable autour d'une planète, la rotation synchrone, les Jupiters chauds, les planètes orphelines, etc., sujets très contemporains dans le domaine de l'enseignement de l'astronomie. Au cours de cette séance, nous avons cherché à recommander une sélection d'œuvres de vulgarisation consacrées aux exoplanètes tout en discutant de leurs similarités et différences afin d'encourager la lecture d'ouvrages de vulgarisation et également pour

mettre en lumière les caractéristiques des exoplanètes les plus remarquables.

Place de l'activité dans la modélisation

Étant donné que durant notre activité, nous avons élaboré plusieurs modèles pour l'étude des exoplanètes, nous sommes actuellement limités à une utilisation descriptive de ces modèles, à l'exception de la discussion sur la zone habitable. Dans ce deuxième contexte, nous avons réussi à appliquer le modèle de la zone habitable autour d'une étoile de manière prédictive, et avons effectué des calculs concernant cette zone pour quelques étoiles parmi les plus intéressantes sélectionnées par l'auditoire.

Déroulement de l'activité

Au cours de ladite activité, j'ai eu recours à une sélection de livres qui ont servi de références pour ma présentation :

« Terres d'ailleurs – À la recherche de la vie dans l'Univers »
– André Brahic et Brandford Smith, publié aux éditions Odile Jacob ;

« La fascination des ailleurs : chasseurs de planètes »
– François Rothen, édité par les Presses Polytechniques et Universitaires Romandes ;

« La révolution des exoplanètes », coécrit par James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli, publié chez EDP Sciences ;

« Exoplanètes » de David Fossé, édité par Belin ;

« Les exoplanètes, à la recherche des nouveaux mondes »
– Flavien Kiefer, édité chez De Boeck ;

« Point Rose » – Mimoza Hafizi, publié par Anovi ;

« Les exoplanètes et la vie dans l'Univers » – Stéphane Mazevet, éditions Odile Jacob.

Dans la suite, je vais décrire les étapes de cette activité.

a. Quelle est la définition formelle d'une exoplanète ?

b. Quelles sont les motivations sous-jacentes à notre quête des exoplanètes ?

Pour étayer ma réponse de ces deux questions, je me suis référée aux propos énoncés par André Brahic et Brandford Smith dans « Terres d'ailleurs, À la recherche de la vie dans l'Univers » : « Aujourd'hui, nous avons fait le tour de la Terre, et même s'il nous reste encore beaucoup à apprendre de notre planète, nos regards se tournent vers l'espace. Nous ne pensons pas y découvrir le paradis, mais nous savons que nous écrivons les premières pages de notre futur. Apprendrons-nous que nous sommes seuls dans l'univers, comprendrons-nous au contraire que la vie pullule dans la Galaxie, découvrirons-nous d'autres terres accueillantes, rencontrerons-nous d'autres êtres vivants ? Nous le saurons très prochainement ».

c. Quelles raisons nous ont incités à rechercher des exoplanètes ?

Les raisons qui nous ont incités à rechercher des exoplanètes sont multiples et fondamentales. La première réside dans la connaissance que notre galaxie, la Voie lactée, abrite plus de 200 milliards d'étoiles. De surcroît, l'observation de nos huit planètes gravitant autour du Soleil depuis longtemps soulève légitimement la question suivante : existe-t-il d'autres planètes en orbite autour d'étoiles différentes, et si oui, combien d'exoplanètes pourraient peupler notre Galaxie ? Cette interrogation s'étend également à la diversité potentielle des systèmes planétaires ainsi qu'à leur capacité à offrir les conditions physiques requises pour favoriser l'émergence de la vie.

Depuis 1995, la découverte de planètes orbitant autour d'autres étoiles a considérablement enrichi nos connaissances en ce domaine. Aujourd'hui, le recensement des planètes identifiées dépasse le seuil des 7000, selon les données consultables sur le site www.exoplanets.eu.

d. Le contexte historique

L'idée des « autres mondes » au-delà du nôtre a été évoquée il y a 2300 ans par le philosophe grec Épicure. À la fin du XVI^e siècle, le philosophe Giordano Bruno a défendu l'idée que les étoiles sont des Soleils semblables au nôtre. Pour cette conviction considérée comme hérétique par l'Inquisition romaine, il fut condamné au bûcher et brûlé vif à Rome en 1600. Aux XVII^e et XVIII^e siècles, les physiciens, mathématiciens et philosophes Charles Huygens et Emmanuel Kant ont été reconnus pour avoir développé le concept des autres mondes. Ainsi, à travers les siècles, différentes récompenses ont pu être attribuées pour une idée similaire!

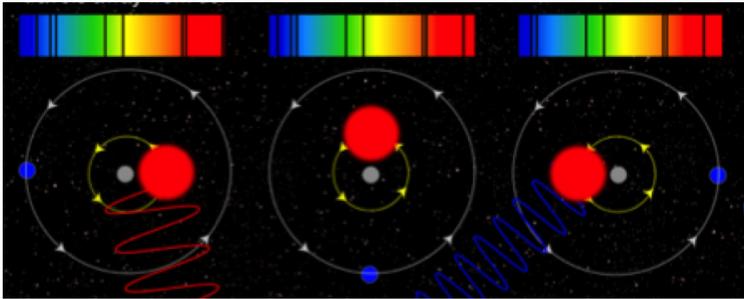
Ce n'est qu'à la fin des années 1930 que les astronomes ont commencé à entreprendre la détection d'exoplanètes à l'aide de télescopes, une tâche ardue en raison de la difficulté à repérer ces mondes de petite taille et obscurs orbitant autour d'étoiles extrêmement lumineuses situées à des distances allant jusqu'à des dizaines voire des milliers d'années-lumière. Jusqu'en 1989, seules de fausses alertes avaient été signalées et tous les résultats s'étaient avérés erronés. En 1989, HD114762b devait être la première exoplanète découverte, une planète gazeuse massive située à 126 années-lumière. Cependant, sa confirmation n'intervint qu'en 2012. En 1992, trois planètes sont identifiées autour d'un pulsar.

En 1995, la première exoplanète en orbite autour d'une étoile de séquence principale fut détectée et confirmée. Elle porte le nom de 51 Peg b avec une masse équivalente à la moitié de celle de Jupiter et est située à 50 années-lumière.

Pour cette découverte remarquable, les astronomes Michel Mayor et Didier Queloz furent honorés en 2019 du prix Nobel de physique « pour la découverte d'une exoplanète en orbite autour d'une étoile similaire au Soleil ».

e. Méthode de la vitesse radiale

Dans cette partie de l'exposé, j'ai abordé la méthode de la vitesse radiale, qui est l'un des outils les plus importants pour la détection des exoplanètes.



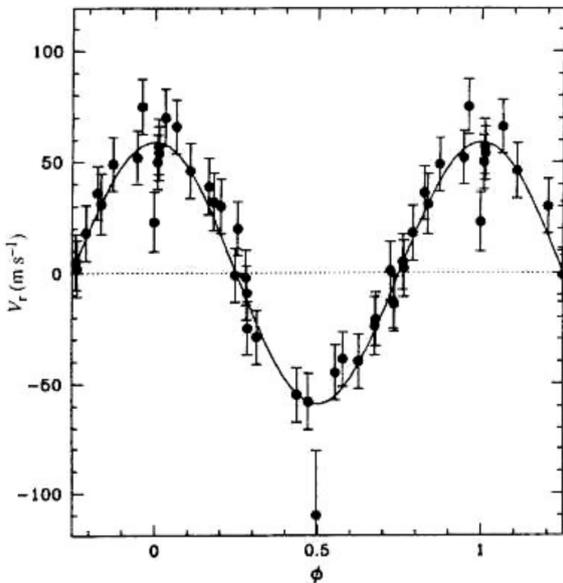
J'ai présenté un schéma illustrant une planète et une étoile en rotation autour de leur centre de masse. Ce schéma était associé au monde des modèles selon la théorie des deux mondes, développée par Sensevy. Par exemple, la Terre tourne autour du Soleil, mais il est important de souligner que le Soleil ne reste pas immobile. En effet, il effectue également sa propre rotation et les deux corps célestes tournent autour de leur centre de masse respectif. Au cours de cette révolution, l'étoile s'éloigne de nous pendant la moitié du temps et se rapproche pendant l'autre moitié. C'est pourquoi les astronomes ont envisagé d'utiliser l'effet Doppler : lorsque la source lumineuse s'éloigne de nous, sa lumière devient plus rouge (la fréquence lumineuse diminue), tandis que lorsqu'elle se rapproche, sa lumière devient plus bleue (la fréquence lumineuse augmente).

D'un point de vue technique, le mouvement de l'étoile autour du centre de masse est détecté grâce au déplacement

des raies spectrales, éléments constitutifs du monde empirique selon la théorie des deux mondes. Nous mesurons ce déplacement et en concluons que l'étoile oscille en raison de la présence d'une planète qui orbite autour d'elle. Cette oscillation entraîne donc le déplacement des raies spectrales.

Cependant, pour mener à bien cette observation, un instrument extrêmement précis est nécessaire : un spectromètre capable de discerner des vitesses atteignant voire même inférieures à 1 m/s.

Il s'agit donc de la méthode de la vitesse radiale, ainsi nommée, car elle correspond à la vitesse de l'étoile projetée sur notre ligne d'observation. J'ai également présenté la courbe de vitesse de 51 Peg b, à partir de laquelle les deux astronomes ont pu déterminer la masse minimale de cette planète, sa période de révolution (4,2 jours), ainsi que sa distance orbitale (0,052 UA), soit une proximité 100 fois plus grande avec son étoile par rapport à notre Jupiter.



Étant donné que son étoile est similaire au Soleil et que 51 Peg b se trouve très près de celle-ci, il s'agit d'une « Jupiter chaud ».

La planète Proxima b a également été découverte grâce à la méthode de la vitesse radiale. Il s'agit de l'exoplanète qui nous est la plus proche, située à une distance de 4,2 années-lumière. Elle orbite autour de Proxima du Centaure, d'où son nom. Sa masse minimale est estimée à 1,07 fois celle de la Terre et sa période orbitale autour de Proxima est d'environ 11,2 jours. Sa distance orbitale est quant à elle équivalente à 0,05 UA ou environ 7,5 millions de kilomètres. C'est grâce au télescope de 3,6 mètres situé à La Silla au Chili et au spectrographe-HARPS qui y est connecté qu'il a été possible d'établir sa courbe de vitesse radiale en étudiant l'étoile Proxima du Centaure. En utilisant ces données, les astronomes ont pu déduire toutes ces informations sur Proxima b en 2016.

Dans le roman « Point Rose » de Mimoza Hafizi, Proxima b est appelée Point Rose, un nom choisi par Sara, le personnage principal du livre. Sara fait partie de l'équipe scientifique chargée de découvrir une planète autour de Proxima du Centaure. Elle est une physicienne rêveuse! Elle regarde souvent la photo de la Terre prise par la sonde Voyager 1 en 1990, lorsque celle-ci se trouvait à la périphérie du Système solaire, à une distance de 6 milliards de kilomètres. Notre planète y apparaît comme un point bleu pâle et c'est pour cette raison qu'elle est souvent métaphoriquement appelée le « Pale Blue Dot ».



C'est ainsi que Sara trouve appropriée l'analogie d'appeler la nouvelle planète « Pale Red Dot », car elle orbite autour de Proxima du Centaure, une étoile naine rouge. Un point rouge pâle ! Ou peut-être même une rose, couleur ou fleur. Point Rose !

De plus, il convient de noter que cette exoplanète se situe dans la zone habitable.

f. La zone habitable

J'ai cité David Fossé dans son ouvrage intitulé « Exoplanètes » :

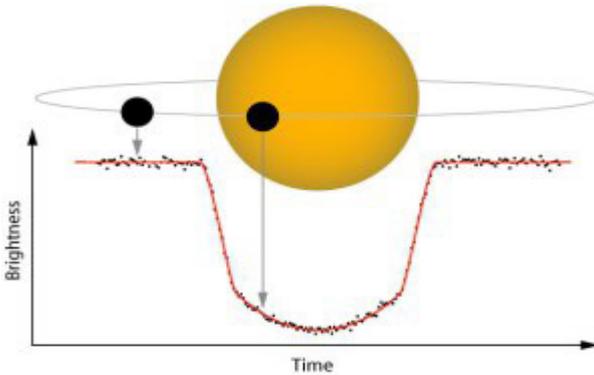
« La zone habitable peut être définie comme la gamme de distances autour d'une étoile, où une planète peut espérer avoir de l'eau dans sa surface, étant suffisamment proche du feu stellaire pour ne pas être entièrement congelée et suffisamment éloignée pour que ces océans ne s'évaporent pas.

Sur les (environ) 7000 planètes découvertes, une soixantaine se trouvent dans la zone habitable autour de leur propre étoile. Cependant, il est bien connu que la température en surface d'une planète dépend non seulement de sa proximité avec son étoile, mais également des gaz à effet de serre présents dans

l'atmosphère, de sa réflectivité à la lumière stellaire, de ses circulations internes (atmosphériques ou océaniques), ainsi que de sa capacité à générer une source d'énergie interne telle que la désintégration radioactive, le chauffage par les marées, etc. Malgré cela, le terme "zone habitable" persiste. »

g. Méthode de transit

Lorsqu'une planète passe devant une étoile, elle engendre une éclipse mineure, provoquant ainsi un léger affaiblissement de l'étoile et créant un léger creux dans sa courbe lumineuse, détectable par nos instruments. Ce schéma était lié au monde empirique.



Actuellement, cette méthode est réputée pour être la plus sensible et efficace. Dans cette partie de l'exposé, je me suis référé à François Rothen dans son ouvrage intitulé « La fascination des ailleurs : chasseurs de planètes ».

Grâce à la méthode des transits, il est possible d'estimer la taille d'une planète en se basant sur la profondeur de la courbe lumineuse lors de l'éclipse et de calculer sa période orbitale en mesurant le temps entre deux éclipses successives.

Une véritable courbe de transit a été présentée. Ne trouvez-vous pas qu'elle ressemble à un visage souriant? – ai-je demandé. Du moins, c'est ainsi que les personnages du

roman « Point Rose » l’imaginent. « Les étoiles qui abritent des planètes nous adressent des sourires », affirment ces personnages.

Il s’agissait là d’une des courbes observées par le télescope Kepler, un élément constitutif du monde empirique. Dans cette section de l’exposé, j’ai également mentionné l’exemple du système planétaire Trappist-1, dont les courbes représentent certains des plus beaux sourires envoyés par l’univers.

b. La mission Kepler

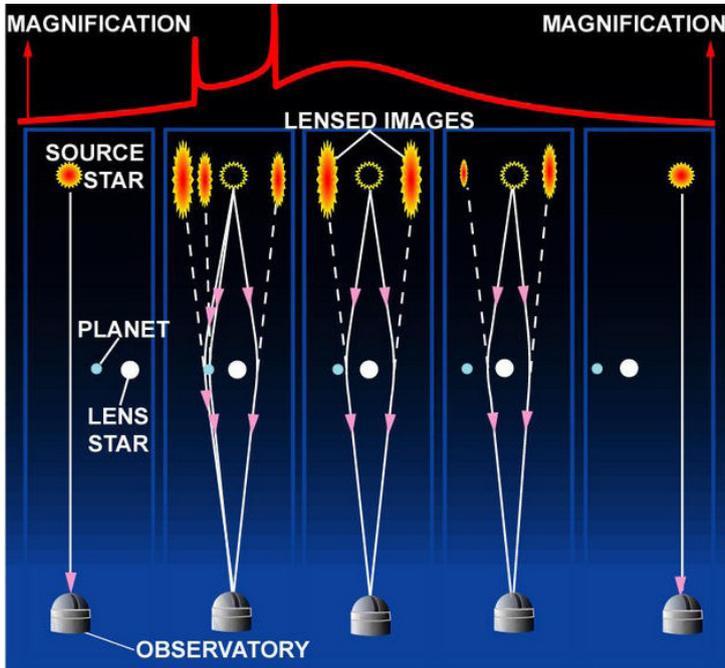
La mission Kepler représente un jalon majeur, ayant scruté 530 000 étoiles pendant une période de 9 ans, de 2009 à 2018. À ce jour, elle a révélé plus de 3 300 exoplanètes grâce à la méthode du transit. Un total dépassant les 2 700 autres candidates reste en attente d’analyse.

i. La rotation synchrone

En raison des forces de marée, la révolution de plusieurs planètes est synchronisée avec leur propre rotation, telle que l’illustration de notre Lune qui orbite autour de la Terre en harmonie avec sa propre rotation. De même, l’orbite de Proxima b est en synchronisation avec sa propre rotation. La Lune dévoile invariablement le même panorama céleste. Ainsi, depuis n’importe quel point lunaire, la Terre conserve une position immuable dans le firmament. En élargissant cette réflexion au système Trappist-1, il devient concevable qu’un être résidant sur l’une de ses planètes expérimenterait une existence dépourvue de nuits, d’évolutions saisonnières, de cycles et d’échéancier temporel. Son astre solaire demeure indéfectiblement fixé à un unique emplacement du ciel pour l’éternité.

j. Les microlentilles gravitationnelles

Un corps massif qui se positionne entre un observateur et une source lumineuse agit tel une lentille optique, provoquant la déviation des rayons lumineux émis par la source, ce phénomène étant désigné sous le terme de lentille gravitationnelle.



L'impact des microlentilles gravitationnelles a également permis la découverte d'une catégorie particulière de planètes, qualifiées de libres, vagabondes, orphelines ou nomades, à l'instar de WISE 0855-0714. Ces astres n'orbitent autour d'aucune étoile, mais errent simplement dans l'espace interstellaire, plongés dans une nuit perpétuelle sans chaleur stellaire pour les réchauffer. Leur détection s'avère extrêmement complexe malgré leur prolifération.

La planète WISE, repérée en 2014, se situe à seulement 7,5 années-lumière de notre Terre.

k. Observation directe

Afin d'illustrer cette méthode, j'ai fait référence à Lequeux, Encrenaz et Casoli dans leur ouvrage intitulé « La révolution des exoplanètes ».

Pour voir une planète qui gravite autour d'une étoile, il faut surmonter deux obstacles majeurs. Le premier est que l'étoile est énormément plus brillante que la planète, par un facteur de l'ordre du milliard en lumière visible ; le second est que, sauf pour de rares exceptions, vue de la Terre la planète est très proche de l'étoile, si bien que l'étalement des images par la turbulence de l'atmosphère terrestre ne permet pas de la séparer de son étoile hôte, si cette turbulence n'est pas corrigée ou supprimée.

La première détection d'une exoplanète par imagerie directe dans l'infrarouge a été réalisée avec succès grâce à un instrument du VLT de l'ESO au Chili, exploitant des techniques sophistiquées. L'étoile 2M1207-39 est une naine brune de 0,025 masse solaire, affichant une luminosité extrêmement faible, favorisant ainsi la détection de l'exoplanète en orbite autour d'elle. Celle-ci possède une masse quatre fois supérieure à Jupiter et se situe à 0,78 seconde d'arc de l'étoile, équivalant à 55 unités astronomiques.

Cette méthode permet même d'observer la rotation de l'exoplanète sur son axe. Il a été également convenable de mentionner le système de Beta Pictoris dans la constellation du Peintre, localisé dans le firmament de l'hémisphère sud. Ce système est considéré comme jeune, n'ayant que 20 millions d'années et étant situé à une distance de 60 années-lumière.

l. Contribution des différentes méthodes

À la clôture de l'exposé sur les principales méthodes de découverte des exoplanètes, j'ai fourni quelques données chiffrées : sur un total de 7 000 exoplanètes découvertes à ce jour, à peu près 20 % ont été identifiées par la méthode de la vitesse radiale, 75 % par celle du transit, 1 % par imagerie et 3,5 % grâce aux lentilles gravitationnelles (hors planètes libres).

m. La dénomination des exoplanètes

La désignation des exoplanètes est souvent attribuée en fonction de leur étoile, suivie d'une lettre : b, c, etc. Le nom de l'étoile varie selon le catalogue utilisé. Parmi ces catalogues figure Flamsteed, qui les numérote en fonction de leur luminosité. Par exemple, 51 Peg désigne la 51e étoile dans la constellation de Pégase, tandis que 51 Peg b est la première planète découverte autour de cette étoile.

En 2015, à l'issue d'un processus engagé par l'UAI (Union astronomique internationale) et intitulé NameExoworlds, impliquant la participation du public dans la nomination des exoplanètes, 51 Peg b a été baptisée Dimidium en raison de sa masse équivalente à la moitié de celle de Jupiter.

Outre les dénominations des exoplanètes basées sur les catalogues d'étoiles, il arrive parfois que des noms soient proposés par le grand public. Tel est le cas pour l'année 2019 où l'UAI a offert à chaque pays une étoile et sa planète à nommer, selon une procédure incluant une large participation du public.

À la clôture de mon activité, j'ai donné quelques exemples des noms choisis par la France, l'Albanie et la Tunisie.

Pour la France : l'étoile Belenos et sa planète Belisama. Belenos était le dieu gaulois associé à la lumière solaire et à la santé. Belisama était quant à elle la déesse gauloise du feu,

notamment liée à la santé, à la métallurgie et au travail du verre. Cette planète a une masse minimale de 1,96 fois celle de Jupiter, une période orbitale de 225 jours et une distance orbitale de 0,48 à 0,76 UA.

Pour l'Albanie : l'étoile Illyrian et la planète Arber. Illyrian fait référence à la population dont les Albanais sont issus. Arber désigne quant à lui les habitants de l'Albanie au Moyen Âge. La planète Arber a une masse minimale équivalente à 2,3 fois celle de Jupiter, une période révolutionnaire de 705 jours et une distance orbitale de 1,58 UA.

Les Tunisiens ont nommé l'étoile jaune située à 214 années-lumière de nous Cherchia. Cherchia est un chapeau traditionnel en Tunisie. Ils ont également donné le nom Khomsa à sa planète, qui a une masse minimale équivalente à 2,09 fois celle de Jupiter. Celle-ci effectue une révolution en 340 jours et se trouve à une distance orbitale de 1,063 UA. La Khomsa est un symbole en forme de main droite très populaire en Tunisie.

En conclusion, j'ai clôturé cette présentation par un exercice visant à calculer la zone habitable autour de ces trois étoiles ainsi qu'une discussion sur la position relative des planètes par rapport à cette zone habitable.

Retours d'expérience

Bien que le public présent lors de cette séance diffère de celui habituellement ciblé pour ce type d'événement, je constate avec satisfaction que durant la mise en place de cette activité :

- Le sujet suscite un vif intérêt chez les participants.
- Il convient de l'adapter au niveau des élèves ; l'information partagée lors de ma séance, telle que décrite, est plus appropriée pour des lycéens.

- Le calcul de la zone habitable constitue une partie particulièrement attrayante, car il combine une facilité de calcul avec un sujet à la fois intrigant et subtil à comprendre.
- Il est recommandé d'utiliser systématiquement des exemples concrets de planètes, idéalement dotées d'appellations captivantes.
- Les nominations des années 2015 et 2019 s'avèrent utiles, puisque chaque pays possède ses propres planètes. Les élèves seraient alors intéressés à découvrir quelles planètes appartiennent aux nations différentes.
- Un défi supplémentaire consisterait à familiariser les élèves avec diverses méthodes de découverte telles que l'observation directe, la méthode de la vitesse radiale et le microlensing. En revanche, la méthode du transit se révèle aisée et productive.

Prolongement

Il existe de nombreuses pistes d'extension envisageables en explorant divers sujets souvent abordés par les vulgarisateurs dans leurs œuvres, tels que les trous noirs et les objets compacts, l'univers et l'infini, notre galaxie, etc.

ASTRONOMIE POUR L'ÉDUCATION EN TUNISIE



KAMOUN Sofien
Président de la Société astronomique de Tunisie

L'astronomie est une discipline qui a été introduite en Tunisie durant les années 60 du siècle dernier. Elle a été diffusée grâce aux activités associatives et des scouts.

Deux associations ont particulièrement marqué l'activité astronomique en Tunisie : l'Association jeunes-science de Tunisie (AJST) et la Société astronomique de Tunisie (SAT).

Grâce aux efforts déployés par le comité fondateur de la SAT avec le soutien du ministre de l'Éducation nationale et de l'enseignement supérieur, le professeur Mohamed Charfi, un module d'astronomie composé de trois cours a été introduit en 1991 dans le programme des sciences physiques de la 5^e année secondaire puis de la 4^e année secondaire (ancien régime), avec un cours de géographie traitant la place de l'Homme dans l'Univers. Des concepts en physique liés à l'astronomie, comme l'effet Doppler-Fizeau, étaient au programme du baccalauréat scientifique.

Ces cours se concluaient par la répartition des élèves en groupes traitant chacun un thème en relation avec l'astronomie, évalué par l'enseignant et comptabilisé dans la note des travaux pratiques.

À partir des années 2000, avec un programme plus concentré et chargé, nous avons noté un désintérêt progressif envers le module d'astronomie au point que les cours n'étaient plus actualisés. Ce désintérêt a été en partie compensé par l'inauguration du pavillon des sciences de l'Univers à la Cité des sciences à Tunis, ouvert pour les différentes tranches d'âge et particulièrement adapté aux élèves et lycéens. Le support de ces cours non actualisés figure toujours dans le programme des sciences physiques de la 1^{re} année secondaire (nouveau régime).

La SAT a essayé dès lors de sensibiliser les responsables du ministère de l'Éducation à rénover les cours d'astronomie et à organiser des sessions de formation aux enseignants

dans une démarche décentralisée visant à cibler tous les enseignants intéressés par l'astronomie même dans les zones les plus reculées du pays.

La SAT a organisé durant les années 2003, 2009, 2018, 2019, 2020, et 2023 dix sessions de formation en astronomie pour les enseignants de sciences physiques dans différentes régions de la Tunisie en introduisant de nouveaux concepts comme la spectroscopie et la photométrie.

L'enseignement primaire permet aussi d'intégrer des concepts astronomiques simples pour les élèves comme les éclipses, les saisons, le mouvement diurne et les mouvements orbitaux de la Terre et de la Lune. Ainsi dans cette perspective, deux sessions de formation en astronomie fondamentale ont été organisées en 2023 pour les enseignants du primaire, l'une au Grand-Tunis et la seconde dans la ville de Tozeur. Ces enseignants ont pu créer des clubs d'astronomie au sein de leurs structures éducatives.

Grâce à ses activités pour grand public visant en particulier les enfants et les adolescents, et aussi au sein des écoles et lycées, la SAT permet la diffusion et la vulgarisation par des ateliers pratiques des concepts physiques liés au temps, les référentiels, les mouvements orbitaux et l'optique. Elle permet aussi l'initiation des jeunes à l'observation astronomique.

Dans le cadre du nouveau projet du ministère de l'Éducation visant à rénover les programmes d'enseignement, nous espérons pouvoir convaincre l'autorité compétente de l'apport de l'astronomie dans différentes disciplines outre que les sciences physiques comme les mathématiques, la géographie, l'informatique et la philosophie.

Index des mots-clés

A

année 92
astrobiologie 149

C

collège 17, 31, 45, 62, 108, 128,
149
combinaison spatiale 137
comète 31
construction du savoir scienti-
fique 128
controverses 128

D

démarche scientifique 17
distance Terre-Lune 108

E

éclipse de Lune 108
éclipse de Soleil 108
élémentaire 45, 62, 92, 128, 137
épistémologie 128
Ératosthène 62
esprit critique 128
étoile 71
exoplanète 17
exoplanètes 149
exploration spatiale 137, 149

F

Fizziq 17

G

grandeurs et mesures 92
graphique 17

H

histoire 62
histoire de l'astronomie 108

I

interdisciplinarité 17
interférences 121

K

Kepler 31, 71, 83
kinesthésie 31

L

littérature 149
lycée 17, 31, 45, 62, 71, 83, 128,
149

M

manipulation 17
maquette 45
maternelle 45
mathématiques 92, 121
mesure 31, 62
modélisation 17, 45

N

Newton 71

O

orbite 71, 83

P

planétaire 31, 45

planète 31, 83

protocole 17

Python 83, 121

Q

questionner le monde 137

R

radiotélescope 121

rayon de la Terre 62

révolution scientifique 128

S

SalsaJ 71

satellites 121

soleil 92

stellarium 62, 108

Système solaire 31, 45, 83, 92

T

technologie et robotique 137

transit 17

trou noir 71

U

unités 92

université 83, 121, 128

V

vulgarisation scientifique 149

Table des matières

Introduction.....	9
Maquettes	15
Transit d'une exoplanète <i>Bessonies Marjorie et Hauss Rizetto Florian.....</i>	17
Les relations de Kepler et le planétaire humain <i>Rollinde Emmanuel.....</i>	31
Maquettes du Système solaire <i>Robichon Noël.....</i>	45
Observations	59
Reproduire des mesures historiques de l'astronomie avec le logiciel Stellarium (I) * Le rayon de la Terre par la méthode d'Ératosthène <i>Khanfour-Armalé Rita et Remy Gilles</i>	61
Mesure de la masse du trou noir au centre de notre Galaxie <i>Rollinde Emmanuel et Kalli Sibam</i>	71
Simulations et modèles.....	81
Évaluer les lois de Kepler avec les données de l'IMCCE et le langage de programmation Python <i>Appéré Thomas.....</i>	83
Planétaire et proportionnalité – Application à la définition de l'année <i>Heussaff Vincent.....</i>	91
Reproduire des mesures historiques de l'Astronomie avec le logiciel Stellarium (II)*La distance Terre-Lune <i>Khanfour-Armalé Rita et Remy Gilles</i>	107

Sciences participatives.....	119
Compréhension de l'impact des satellites sur le ciel sombre <i>Oozeer Nadeem</i>	121
Astronomie et esprit critique par la cartographie des controverses <i>Bichet-Ramon Karine et Pitout Frédéric</i>	127
Art et littérature.....	135
La combinaison spatiale : un objet technique pour questionner le monde du vivant et de la matière <i>Charles Frédéric</i>	137
Les exoplanètes à travers des œuvres littéraires-scientifiques <i>Hafizi Mimoza</i>	149
Astronomie pour l'éducation en Tunisie Kamoun Sofien	167
Index des mots-clés	171





Imprimé en France pour les Éditions Le Manuscrit

Dépôt légal : février 2025

