


AstroEDU-FR 2023 - Atelier

INFORMATION Générale	
Auteurs	Emmanuel Rollinde
* Résumé (250 mots)	<p>Cette activité permet une double approche des relations de Kepler, par la perception du mouvement et par la mesure. La ressource principale est un « planétaire », chronophotographie des objets du Système Solaire. Les élèves se déplacent avec leur corps (planétaire humain) ou déplacent des jetons (planétaire imprimé) le long de l'orbite d'une planète ou d'une comète. Par leur propre perception ainsi que l'observation des mouvements de leur camarade ou des jetons, ils vont faire des hypothèses sur la forme des orbites et les variations de vitesse des corps célestes le long de leur trajectoire. Ces perceptions seront ensuite mises en lien avec des grandeurs mathématiques, dont les résultats de mesure pourront servir pour valider ou invalider les prédictions des relations de Kepler. La première relation de Kepler prédit que toutes les orbites ont une forme elliptique dont le Soleil est un foyer. Les élèves compareront la forme des orbites à des cercles, puis chercheront le second foyer. La seconde relation de Kepler prédit des aires balayées constantes. Les élèves devront alors chercher un moyen pour mesurer et comparer des surfaces « quelconque ». Enfin, la troisième relation de Kepler prédit une relation en loi de puissance entre le grand axe et la période des orbites du Système Solaire. Les élèves découvriront ainsi une relation mathématique qui n'est pas proportionnelle.</p>
* Encore plus court... (une ou deux phrases)	<p>Cette activité permet une double approche des relations de Kepler, par la perception du mouvement et par la mesure. La ressource principale est un « planétaire », chronophotographie des objets du Système Solaire.</p>
*Affiliation ou organisation / établissement...	LDAR / CY Cergy Paris Université Association F-HOU
* Pays	France
* adresse mail de l'auteur	emmanuel.rollinde@cyu.fr
* Titre de l'activité ("accrocheur")	Vivre les relations de Kepler !
Crédits à apporter (si l'activité a été conçu par une autre personne / organisme que l'auteur indiqué pour	Groupe de recherche LDAR/ESMEA (ldar.website/esmea)

cet atelier	
Autres crédits (si nécessaire)	
Langue	Français
Images pour illustrer (vous pouvez mettre des liens vers des images)	
INFORMATION SUR L'ACTIVITÉ	
* Objectifs	<p>A l'aide d'une chorégraphie, faire le lien entre des grandeurs et des perceptions ou des mouvements.</p> <p>Mettre en place un protocole de mesure adapté aux grandeurs recherchées, chercher des relations mathématiques entre plusieurs grandeurs et comparer les résultats à des lois connues.</p>
* Objectifs d'apprentissage	<p>Incarner des notions mathématiques de géométrie (cercle et ellipse), et la notion de vitesse.</p> <p>Apprendre les relations de Kepler.</p> <p>Réinvestir la relation de proportionnalité, les propriétés du cercle, la mesure d'une surface (utilisation d'un quadrillage).</p> <p>Pratiquer des étapes de modélisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Décrire un acte de mesurage (grandeurs et unités, incertitudes) - Comparer la prédiction d'une relation mathématique (une loi) avec des résultats de mesures
*Evaluation	<p>- La proposition de grandeurs pertinentes pour chercher des relations ou des propriétés prédites par les relations de Kepler.</p>

	<ul style="list-style-type: none"> - Le protocole de mesure, avec en particulier l'estimation des incertitudes. - L'interprétation de la comparaison entre la prédiction des relations de Kepler et les résultats de mesures
<p>*Liste de matériel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Un planétaire imprimé au format A3, et idéalement un planétaire « humain » (une échelle de 1 mètre pour 1 Unité Astronomique) – avec les orbites des planètes internes et d'une comète (au moins). - Une série de quadrillages avec des carreaux plus ou moins large - une corde de 5m (planétaire humain), ou d'au moins 5 fois la longueur d'une unité astronomique - des instruments de mesure de longueur - un chronomètre (non nécessaire)
<p>* Autres informations préalables, pré-requis</p>	<p>Pour l'enseignant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mode d'emploi du planétaire humain - Explication des relations de Kepler sur Wikipedia - Un court aperçu historique sur la description des orbites du Système Solaire (document complémentaire) <p>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.</p> <p>Pour les élèves :</p> <p>Avoir fait l'atelier de découverte du planétaire humain Savoir faire des mesures de distance et de durée. Connaître les propriétés du cercle Savoir utiliser une table reliant deux grandeurs dans le cas de la relation de proportionnalité</p>
<p>* Description détaillée de l'activité</p>	<p>En amont de cet atelier, la découverte du planétaire</p> <p>Lors de cette séance, les élèves vont découvrir la carte du planétaire. Ils vont décrire tous les « signes » présents sur cette carte. Ils vont ensuite apprendre comment se déplacer (voir les informations préalables).</p> <p>L'atelier se déroule en deux phases selon deux déroulés possible. 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</p>

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.

- Dans la première phase, la classe est divisé en petit groupe (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. Si vous n'avez pas de planétaire humain, tous les groupes travailleront sur le planétaire 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. En raison de cette caractéristique fondamentale de l'acte de mesurage, aucune mesure ne peut permettre de confirmer une hypothèse (sous la forme d'une relation mathématique d'égalité). Par contre, la relation peut être en désaccord avec les mesures, en prenant en compte les incertitudes. L'hypothèse est alors réfutée.

Voici un exemple de relation entre mesure et hypothèse dans le cas d'une forme géométrique linéaire. Nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un cercle et la prédiction est alors : le périmètre est égal à Pi fois le diamètre. Le diamètre est défini comme la plus grande corde. Le périmètre est défini en plaçant une corde tout le long de la forme ; la longueur de la corde est égale au périmètre. La mesure du diamètre et du périmètre a une incertitude d'un millimètre (typiquement) et la valeur de Pi est choisie entre 3,14 et 3,15. Ainsi, si la forme est un triangle équilatéral de côté égal à 1 cm. Le « diamètre » sera de $1,12 \pm 0,1 \text{ cm}$ ($\sqrt{1 + 0,5^2}$), tandis que le périmètre sera de $3 \pm 0,1 \text{ cm}$. Donc $\text{Pi} * \text{D} = 3,51 - 3,52 \text{ cm}$ (selon la valeur choisie pour Pi). $\text{Pi} * \text{D}$ ne peut donc pas être égale au périmètre. Il ne peut pas s'agir d'un cercle.

L'hypothèse est réfutée. Si la mesure de $\text{Pi} * \text{D} = 4,31 - 4,33 \text{ cm}$ tandis que celle de $\text{P} = 4,3 \pm 0,1 \text{ cm}$. Nous ne

savons pas si $Pi \cdot D$ est égal à P – au sens mathématique de l'égalité, mais les mesures ne contredisent pas cette égalité. Donc la forme *peut être* un cercle

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

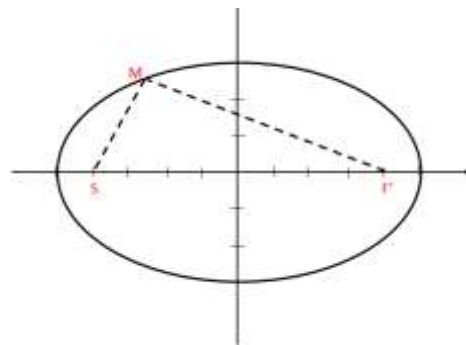
*** Relation 1 : « Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques, dont le Soleil occupe l'un des foyers. »**

- Phase 1 : Un groupe va étudier cette relation sur l'orbite de Encke sur le planétaire humain. L'autre groupe va utiliser le planétaire A3 et s'intéressera aux orbites des planètes.

Le groupe sur le planétaire A3 se concentre sur l'hypothèse d'orbite circulaire pour les planètes (voir les « lectures complémentaires »). 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 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^{ère} relation n'est pas réfutée... Mais est-ce bien une ellipse, et le Soleil est-il un foyer ?

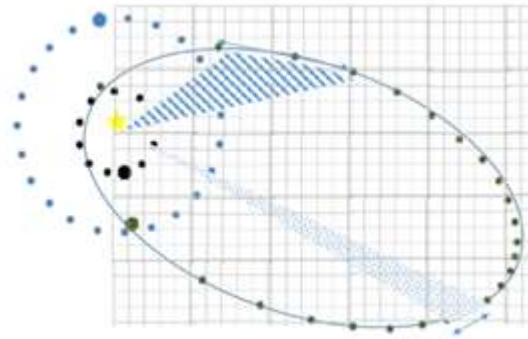
Les élèves qui ont travaillé sur l'orbite de Encke vont montrer qu'une ellipse dont le Soleil est un foyer peut en effet traverser tous les disques décrivant l'orbite. La taille des disques étant trop grande, nous ne savons pas si cette orbite passe par les positions exactes de la comète, mais la relation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

Remarque : 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.

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' .

Mais quel carreau 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. Nous conseillons ici de proposer 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). Dans le cas d'un quadrillage très gros, la valeur minimale sera souvent de 0... 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 une l'aire d'une surface est entre [1,3] et l'autre entre [4,7], la relation n'est pas vérifiée ; si l'une est entre [1,4] et l'autre entre [2 – 3], la relation n'est *pas* contredite). Vous ne pourrez jamais dire que la relation est vérifiée...

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.

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 entier 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 que T et a sont « presque » proportionnel lorsque nous ne regardons que les planètes jusqu'à Mars. Cependant, des mesures précises montre que le rapport T/a augmente de façon constante lorsque la distance au Soleil augmente. Ainsi, une relation existe, mais ce n'est pas proportionnelle. 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 prolonger en utilisant la tangente à la courbe proche de Mars. L'utilisation des valeurs pour Neptune permet de confirmer la relation $T^2 \propto a^3$.

Liens avec le programme	(France) Cycle 3 (9-12 ans) : grandeur et mesure / propriétés du cercle / relation de proportionnalité / notion d'échelle Cycle 4 (12-15 ans) : modélisation / vitesse Lycée (15-18 ans) : relations de Kepler, lois de Newton / estimation d'incertitudes
Informations complémentaires	
Matériel supplémentaire	le quadrillage et le fichier du planétaire à imprimer
Lectures complémentaires	Un article sur une séance spécifique reliée à la première loi de Kepler, mais uniquement centrée sur la recherche d'une forme circulaire : https://hal.science/hal-04227613 Un article centré sur la troisième relation de Kepler : https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-01662026
Références	
MOTS CLÉS POUR DÉCRIRE L'ACTIVITÉ	
Catégorie(s) scientifique(s). (Veuillez en choisir jusqu'à 3 dans la liste)	Le système solaire Physique Mathématiques Mesures scientifiques
* Lieu de mise en place de l'activité	Petit espace intérieur (par exemple, une salle de classe) Grand espace intérieur (par exemple, un hall d'école) Extérieur
* Autres mots clés	Apprentissage incarné. Kepler.
* Tranche d'âge (Choisissez toutes les catégories d'âge auxquelles cette activité s'applique)	8-10 10-12 12-14 14-16 16-19 19+
* Niveau d'éducation (Choisissez un ou plusieurs niveaux d'éducation pour votre activité)	Elémentaire Collège Lycée Université Informel
*Durée (quelle est la durée nécessaire pour mettre en place votre activité ?)	3 fois 45mins.

* Activité individuelle ou de groupe	Groupe
* Supervision de la sécurité (l'activité comporte-t-elle des étapes nécessitant la supervision d'un adulte pour des raisons de sécurité ?)	Non
* Coût par participant (coût approximatif du matériel nécessaire à cette activité).	Gratuit (pour planétaire imprimé - si le planétaire humain est emprunté à une autre structure ou s'il est déjà présent dans l'établissement) Faible (si le planétaire humain doit être construit en amont de l'activité) Elevé (si le planétaire humain est acheté, mais ce coût n'est pas répété)
* Compétences fondamentales (pratiques fondamentales de la science et de la pensée scientifique que l'élève apprendra grâce à l'activité. Choisissez-en autant que vous le souhaitez)	Autre : Obtenir des données par l'acte de mesurage D Analyser et interpréter des données G Argumenter à partir de preuves H Communiquer des informations
* Type/s d'activités d'apprentissage (Choisissez un ou plusieurs type dans la liste)	Apprentissage par enquête structurée Jeu de rôle/drame/performance Modélisation

Liste des images à télécharger :

Liste des fichiers à télécharger :