

# AstroEDU-FR 2023 - Atelier

NE PAS REMPLIR EN LIGNE - TÉLÉCHARGEZ LE DOCUMENT ET REMPLISSEZ LE SUR VOTRE ORDINATEUR AVANT DE L'AJOUTER À VOTRE DÉPÔT EN TANT QUE DOCUMENT COMPLÉMENTAIRE. LE DOCUMENT PRINCIPAL DOIT ÊTRE UN COURT RÉSUMÉ. VOUS POUVEZ AJOUTER D'AUTRES FICHIERS DESCRIPTIFS OU MATÉRIEL REQUIS EN DOCUMENT COMPLÉMENTAIRE (pour les fichiers lourds, indiquez un lien dans la liste de matériel, dans le tableau)

INFORMATION Générale	
<b>Auteurs</b>	Emmanuel Rollinde, Siham Kalli
<b>* Résumé (250 mots)</b>	Cette activité permet une approche des trois relations de Kepler et des lois de la gravité de Newton, par l'observation des mouvements d'une étoile autour du trou noir au centre de notre Galaxie. Les positions successives de cette étoile sont obtenues à l'aide d'une série d'images, imprimées ou analysées avec le logiciel ©SalsaJ. La forme elliptique de l'orbite est décrite par la première relation de Kepler et permet de prédire la position du trou noir, en tant que l'un des deux foyers de l'orbite. La vitesse de l'étoile est plus grande lorsqu'elle est proche du trou noir, en accord avec la seconde relation de Kepler et de la force d'attraction gravitationnelle. La troisième relation de Kepler prédit une relation en loi de puissance entre le grand axe et la période des orbites du Système Solaire. Il faut reprendre cette relation avec les lois de Newton pour relier période, demi-grand axe et masse de l'objet central. Cette relation permet alors de déterminer la masse du trou noir !
<b>* Encore plus court... (une ou deux phrases)</b>	Lors de cette activité, vous analyserez une série d'images montrant des étoiles. Le trou noir n'est pas observable sur ces images. Cependant, à l'aide des trois relations de Kepler et des lois de la gravité de Newton, le mouvement d'une étoile permettra de déduire la présence et la masse du trou noir situé au centre de notre Galaxie.
<b>*Affiliation ou organisation / établissement...</b>	LDAR / CY Cergy Paris Université Association F-HOU University of Msila
<b>* Pays</b>	France Algérie
<b>* adresse mail de l'auteur</b>	<a href="mailto:emmanuel.rollinde@cyu.fr">emmanuel.rollinde@cyu.fr</a> <a href="mailto:siham.kalli@univ-msila.dz">siham.kalli@univ-msila.dz</a>
<b>* Titre de l'activité ("accrocheur")</b>	Révélez le trou noir au centre de notre Galaxie !

<b>Crédits à apporter (si l'activité a été conçu par une autre personne / organisme que l'auteur indiqué pour cet atelier)</b>	
<b>Autres crédits (si nécessaire)</b>	
<b>Langue</b>	Français
<b>Images</b> pour illustrer (vous pouvez mettre des liens vers des images)	 <p data-bbox="849 961 1403 999"><a href="#">Credit: R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA</a></p>

<b>INFORMATION SUR L'ACTIVITÉ</b>	
<b>* Objectifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observer et analyser des images de trajectoires d'étoiles, pour déterminer leurs orbites.</li> <li>- Mettre en lien les orbites observées avec la description des orbites gravitationnelles par les lois de Kepler et de Newton pour en déduire la masse du trou noir au centre de la voie lactée.</li> <li>- Utilisation du logiciel SalsaJ pour réaliser des mesures</li> </ul>
<b>* Objectifs d'apprentissage</b>	<p>Réaliser un pointage vidéo avec un logiciel</p> <p>Interpréter des résultats en appliquant les relations de Kepler dans un cas inhabituel (en particulier, reconnaître une ellipse et déterminer ses caractéristiques)</p> <p>Identifier les différentes vitesses dans une chronophotographie avec des intervalles de temps non constant.</p> <p>Exploiter des informations à partir de documents et réaliser des calculs (échelle, conversion d'unités...)</p>

	<p>Pratiquer des étapes de modélisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Décrire un acte de mesurage (incertitudes)</li> <li>- Comparer la prédiction d'une relation mathématique (une loi) avec des résultats de mesures</li> </ul>
<p><b>*Evaluation</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La connaissance des relations de Kepler.</li> <li>- Le protocole de mesure des positions, avec en particulier l'estimation des incertitudes.</li> <li>- L'interprétation de la comparaison entre la prédiction des relations de Kepler et les résultats de mesures</li> </ul>
<p><b>*Liste de matériel</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- le logiciel SalsaJ installé avec les images et le plugin « Black Hole » <a href="https://handsonuniverse.org/france/salsaj/">https://handsonuniverse.org/france/salsaj/</a></li> </ul>
<p><b>* Autres informations préalables, pré-requis</b></p>	<p>Pour l'enseignant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Explication des relations de Kepler sur Wikipedia 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.</li> <li>- La relation donnant la masse de l'objet massif en fonction de la période et du demi-grand axe sera donnée directement</li> </ul> <p>Pour les élèves Avoir étudié les relations de Kepler dans le cas des planètes</p> <p><u>Un peu d'histoire</u> 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. » Cette idée ne fût pas prise au sérieux par les astronomes de l'époque car ils ne disposaient pas de théorie satisfaisante pour décrire ces nouveaux astres. Avec la</p>

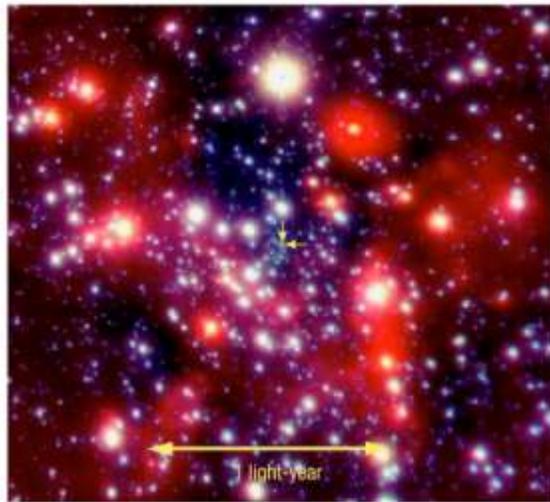
Relativité Générale, théorie inventée par A. Einstein au début du XXe siècle, les astrophysiciens ont pu décrire correctement ce qu'était un trou noir ; mais il a fallu près d'un siècle encore avant que la plupart des spécialistes se mettent d'accord sur leur existence. Aujourd'hui, bien que les trous noirs n'aient jamais été observés directement, de nombreuses observations indirectes corroborent leur existence.

Récemment, les nouvelles techniques d'observation du ciel dans le domaine de l'infrarouge ont permis de voir le centre de notre galaxie, qui est enfoui dans la poussière. Les astrophysiciens ont alors découvert l'existence d'un trou noir « supermassif ». L'étude du mouvement des étoiles au voisinage du centre galactique permet de mesurer la masse ce trou noir

#### *La structure de notre Galaxie*

La Voie Lactée, cette bande blanchâtre que l'on peut voir les nuits de ciel étoilé, est notre galaxie. Elle est constituée d'environ 100 milliards d'étoiles et de nombreux nuages de gaz. Sa forme est un disque d'environ 80000 années-lumière de diamètre comportant un bulbe central, le noyau de la galaxie.

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 compris entre nous et le noyau ont pendant longtemps empêché son observation directe. Récemment, 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-contre.



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

Dans l'espace on ne mesure généralement pas les distances en mètre mais en année-lumière. Une année-lumière 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...

Une autre unité de distance pratique en ce qui nous concerne est le jour-lumière, qui est la distance parcourue par la lumière en une journée, soit  $2,59 \cdot 10^{13}$  mètres. Les étoiles les plus proches du centre galactique sont à moins d'une année-lumière. Ce sont ces étoiles que nous allons observer dans cette activité.

#### \* Description détaillée de l'activité

#### Mesure de la trajectoire d'une étoile

##### 1. Observer les 12 images

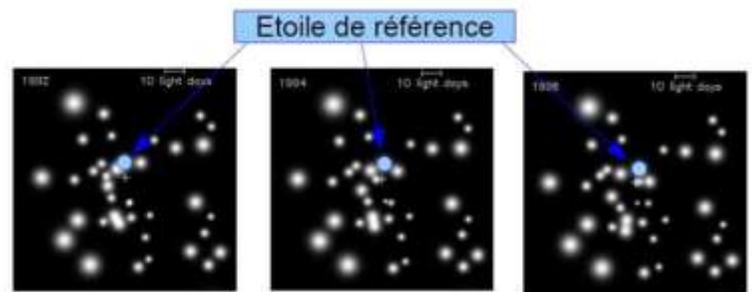
Avec le logiciel SalsaJ, lancez la macro : plugin/macro/Black Hole (animation). Les images sont alors ouvertes et mises dans une « pile » pour obtenir un film. Vous pouvez arrêter le film avec le menu « image/pile/arrêter l'animation »

Vous pouvez alors vous déplacer d'image en image.

Ces images 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».

Repérez l'étoile de référence grâce à l'image ci-dessous (attention elle est un peu confondue avec une autre étoile) :



Suivez sa progression sur les autres images en appuyant sur la flèche de droite en bas de la fenêtre.

Fait-elle un tour complet ? Pendant combien d'année environ suit-on sa progression (la date de la photo est écrite en haut à gauche de l'image).

## 2. Mesure de l'orbite de l'étoile de référence

Pour retrouver les images séparément, choisissez le menu « Image/pile/convertir pile vers images ».

Nous allons maintenant relever précisément les coordonnées de l'étoile de référence afin de déterminer sa trajectoire et les noter dans un tableur pour pouvoir ensuite tracer l'orbite point à point.

Pour chaque date, déplacez la souris au centre de l'étoile de référence sur l'image correspondante, et notez précisément les coordonnées en pixels de celle-ci (les coordonnées apparaissent dans la fenêtre principale de SalsaJ). Répétez l'opération pour chaque image (si vous avez perdu l'étoile de référence, recommencez à partir de la deuxième étape ou bien repérez-vous par rapport aux images ci-dessus).

Remarque : toutes les mesures de positions et de distance sont en pixels si vous utilisez le logiciel SalsaJ, ou en centimètre si vous avez imprimé les images.

## 3. 1<sup>ère</sup> relation de Kepler, la forme de l'orbite

Tracez la courbe  $Y=f(X)$  qui permettra de visualiser l'orbite de l'étoile. Attention à bien vérifier que votre repère est orthonormé. Le grand axe est-il le long de X ou de Y ?

Si vous le pouvez sur le logiciel de tableur que vous utilisez, sélectionnez l'outil «Ellipse» dans la barre d'outil en bas et essayez de superposer une ellipse au graphique obtenu.

Vous pouvez également faire une capture d'écran et utiliser un logiciel de dessin pour placer l'ellipse.

Est-ce que la première relation de Kepler est vérifiée ?

- Mesurez alors la longueur du grand axe, noté

«2\*a».

$$2*a = \dots \text{ pixels}$$

Il faut maintenant convertir les pixels en une distance en utilisant l'échelle qui est indiquée sur toutes les images.

$$10 \text{ jours-lumières} = \dots \text{ pixels}$$

$2*a = \dots$  jours-lumière (*vous devez obtenir environ 8,5 jours-lumière*)

Donnez alors la valeur du demi grand axe «a» :

$$a = \dots \text{ jours-lumière}$$

- Déterminez la période de révolution de l'étoile dans l'unité de votre choix (*vous devez obtenir entre 14 et 16 années*)

4. 2<sup>ème</sup> relation de Kepler, ou accélération gravitationnelle

A l'aide des positions successives, déterminez l'évolution de la vitesse de l'étoile. Dans quelle partie de l'orbite l'étoile est-elle la plus rapide ?

Déterminez alors la position du trou noir... Vous pouvez la comparer à la position de la croix sur les images...

5. Calcul de la masse du trou noir

La forme générale de la troisième loi de Kepler pour un corps massif central de masse M est :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

G est la constante de gravitation:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ . La constante G est donnée en unité S.I. La période « T » doit donc être en seconde, et le demi-grand axe « a » en mètre.

En déduire la masse du trou noir en kilogramme grâce à la troisième loi de Kepler :

$$M_{\text{TN}} = \dots \text{ kg}$$

La masse du Trou Noir est-elle plus grande que la masse de notre Soleil ( $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ) ?

Donner la masse du trou noir en unités de masse solaire  $M_{\odot}$  (c'est-à-dire, calculer combien de masse solaire il faut pour avoir la masse du trou noir):

$$M_{\text{TN}} = \dots M_{\odot}$$

Vous pouvez comparer votre valeur au résultat obtenu en

	<p>1997 par les mêmes observations :  <a href="https://academic.oup.com/mnras/article/284/3/576/984237">https://academic.oup.com/mnras/article/284/3/576/984237</a>          (article en accès libre, en anglais)  <math display="block">M_{TN} = 2,45(\pm 0,4)10^6 M_{\odot}</math></p>
<b>Liens avec le programme</b>	<p>(France)          Lycée (15-18 ans) : relations de Kepler, lois de Newton / estimation d'incertitudes ; modélisation / vitesse</p>
<b>Informations complémentaires</b>	<p>Lorsque vous installez le logiciel SalsaJ® sur un ordinateur, les images sont déjà incluses dans le dossier d'installation. Il est recommandé d'installer le logiciel sur le bureau de l'ordinateur.</p>
<b>Matériel supplémentaire</b>	<p>Le logiciel Salsaj à télécharger :  <a href="https://handsonuniverse.org/france/salsaj/">https://handsonuniverse.org/france/salsaj/</a></p>
<b>Lectures complémentaires</b>	
<b>Références</b>	
<b>MOTS CLÉS POUR DÉCRIRE L'ACTIVITÉ</b>	
<b>Catégorie(s) scientifique(s).</b> (Veuillez en choisir jusqu'à 3 dans la liste)	Galaxie et Voie Lactée Les étoiles
<b>* Lieu de mise en place de l'activité</b>	Intérieur, salle informatique
<b>* Autres mots clés</b>	Modélisation. Ellipse. Kepler.
<b>* Tranche d'âge</b> (Choisissez toutes les catégories d'âge auxquelles cette activité s'applique)	16-19 19+
<b>* Niveau d'éducation</b> (Choisissez un ou plusieurs niveaux d'éducation pour votre activité)	Lycée Université Informel
<b>*Durée</b> (quelle est la durée nécessaire pour mettre en place votre activité ?)	45 mins.
<b>* Activité individuelle ou de groupe</b>	Groupe ou Individuelle
<b>* Supervision de la sécurité</b> (l'activité comporte-t-elle des étapes nécessitant la supervision d'un adulte pour	Non

des raisons de sécurité ?)	
* <b>Coût par participant</b> (coût approximatif du matériel nécessaire à cette activité).	Gratuit
* <b>Compétences fondamentales</b> (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
* <b>Type/s d'activités d'apprentissage</b> (Choisissez un ou plusieurs type dans la liste)	Modélisation

Liste des images à télécharger :

N/A

Liste des fichiers à télécharger :

N/A – logiciel Salsaj <https://handsonuniverse.org/france/salsaj/>