METHODES ET PRATIQUES SCIENTIFIQUES : DES SITUATIONS DE RECHERCHE EN ASTRONOMIE POUR LA CLASSE DE SECONDE

Dominique Spehner, Michèle Gandit, Christine Kazantsev, Hubert Proal,
IREM de Grenoble

Résumé – Nous présentons deux exemples d'activités liées à l'astronomie et destinées aux élèves de classe de seconde dans le cadre de l'option « Méthodes et pratiques scientifiques ». Il s'agit d'engager une réflexion sur la modélisation, mais aussi sur les acquisitions des élèves amenés à effectuer une démarche scientifique en mathématiques et en physique.

L'option « Méthodes et pratiques scientifiques » (MPS) existe depuis 2010 en classe de seconde. Son but est d'initier les élèves à la démarche scientifique. Elle s'articule autour de cours ou d'activités proposés en commun par des professeurs de mathématiques, de physique-chimie, de sciences de la vie et de la terre (SVT) et/ou de sciences de l'ingénieur (SI).

Elle vise à développer chez les élèves les compétences suivantes :

- utiliser et compléter ses connaissances ;
- rechercher de l'information et l'organiser ;
- pratiquer une démarche scientifique, raisonner, démontrer ;
- communiquer ses connaissances (par exemple à l'aide de comptes-rendus ou d'affiches).

L'atelier que nous avons proposé au colloque de la CORFEM à Grenoble du 13 et 14 juin 2013 a consisté à présenter deux exemples de sujets de recherche en classe en rapport avec l'astronomie, susceptibles d'être utilisés dans l'option MPS. Nous nous sommes concentrés sur le point 3 de la liste de compétences ci-dessus, qui nous semble le plus difficile et le plus ambitieux. La démarche générale consiste à imaginer des méthodes indirectes pour déterminer des grandeurs astronomiques à partir d'observations depuis la Terre, sans utiliser les moyens techniques actuels (mesures effectuées par des satellites, etc...). Le seul outil moderne mis à disposition est le logiciel *Stellarium* de simulation des trajectoires des objets célestes. Ce logiciel libre est facilement accessible (il existe même une version fonctionnant sur les téléphones portables de type « smartphone » !). Il permet de s'affranchir de devoir effectuer des observations nocturnes directes du ciel. Ceci mis à part, il s'agit de se mettre à la place d'un astronome du XVII$^{\text{ième}}$ siècle, par exemple Galilée. Depuis l'antiquité jusqu'au XX$^{\text{ième}}$ siècle, les astronomes ont en effet dû imaginer des manières indirectes pour déterminer certaines grandeurs astronomiques telles la distance entre la Terre et le Soleil, les rayons et périodes de rotation des planètes et de leurs satellites, etc..., à partir de l'observation du ciel à l'œil nu ou avec des lunettes astronomiques.

Nous décrivons ci-dessous deux activités de recherche en classe. La première traite du phénomène de rétrogradation de Mars et de son explication dans les modèles héliocentriques et géocentriques. La seconde traite de l'observation des quatre satellites de Jupiter et de la troisième loi de Kepler.

Nous insisterons plus particulièrement sur les aspects suivants :

- la démarche scientifique effectuée par les élèves. Par exemple. la seconde activité consiste en une expérimentation assistée par ordinateur. Elle rentre bien dans les recommandations du programme de Physique-Chimie (B.O., 2010), à savoir, « Elaborer et mettre en œuvre un protocole comportant des expériences, [...] faire des schématisations et les observations correspondantes » ;
- apporter aux élèves une mise en perspective historique. En effet, « La science n'est pas faite de vérités révélées intangibles, mais de questionnements, de recherches et de réponses qui évoluent et s'enrichissent avec le temps. » (Extrait du Programme de Physique-Chimie, B.O., 2010) ;
- s'interroger sur ce qu'est un modèle mathématique.

Confrontation des modèles héliocentriques et géocentriques

Notre vision actuelle du mouvement de la Terre et des astres date du XVII$^{\text{ième}}$ siècle. Pourtant, l'humanité s'est intéressée à l'astronomie depuis la haute antiquité. Les grecs avaient une description du mouvement des planètes qui marchait plutôt bien, partant de l'hypothèse que celles-ci et le soleil tournaient autour de la Terre (hypothèse géocentrique). L'hypothèse héliocentrique (la Terre et toutes les planètes tournent autour du Soleil) de Copernic a été défendue par Kepler et Galilée au XVII$^{\text{ième}}$ siècle. Galileo Galilei a développé la lunette astronomique, qu'il a utilisée pour observer la lune, les satellites de Jupiter et les phases de Vénus. Sa condamnation par l'église romaine a suscité de nombreux débats sur la méthode scientifique et le rôle de la science dans la société.

Nous allons nous intéresser au phénomène de rétrogradation de la planète Mars, qui peut être décrit de la manière suivante : à certaines époques de l'année, la trajectoire de Mars par rapport aux étoiles lointaines revient en arrière. Pour expliquer cette rétrogradation dans le modèle héliocentrique, on fait appel au mouvement relatif de Mars par rapport à la Terre.

Nous utiliserons ici un modèle simplifié, dans lequel on suppose que :

- la Terre et Mars décrivent des cercles de centre le Soleil, situés dans un même plan ;
- la distance Mars-Soleil est 1,5 fois plus grande que la distance Terre-Soleil ;
- l'année martienne est deux fois plus grande que l'année terrestre.

Soient (x_T, y_T) et (x_M, y_M) les coordonnées de la Terre et de Mars dans un repère du plan Terre-Mars-Soleil d´origine le Soleil. La position relative de Mars par rapport à la Terre est obtenue en retranchant ces coordonnées (voir figure 1).

$$\left\{\begin{array}{lcl} x_M(t) & = & 3\cos(\pi t) \\ y_M(t) & = & 3\sin(\pi t) \end{array}\right. , \left\{\begin{array}{lcl} x_T(t) & = & 2\cos(2\pi t \\ y_T(t) & = & 2\sin(2\pi t \end{array}\right.$$

$$\Rightarrow \left\{\begin{array}{lcl} x_M(t) - x_T(t) & = & 3\cos(\pi t) - 2\cos(2\pi t) \\ y_M(t) - y_T(t) & = & 3\sin(\pi t) - 2\sin(2\pi t) \end{array}\right.$$

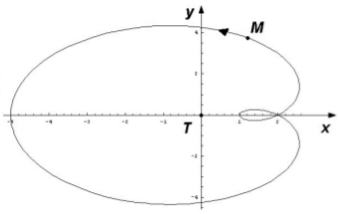

Figure 1

Examinons à présent ce qui se passe dans le modèle géocentrique. Pour comprendre les mouvements des planètes, du Soleil et de la Lune, les grecs Hipparque et Ptolémée introduisent les *épicycles* (figure 2) :

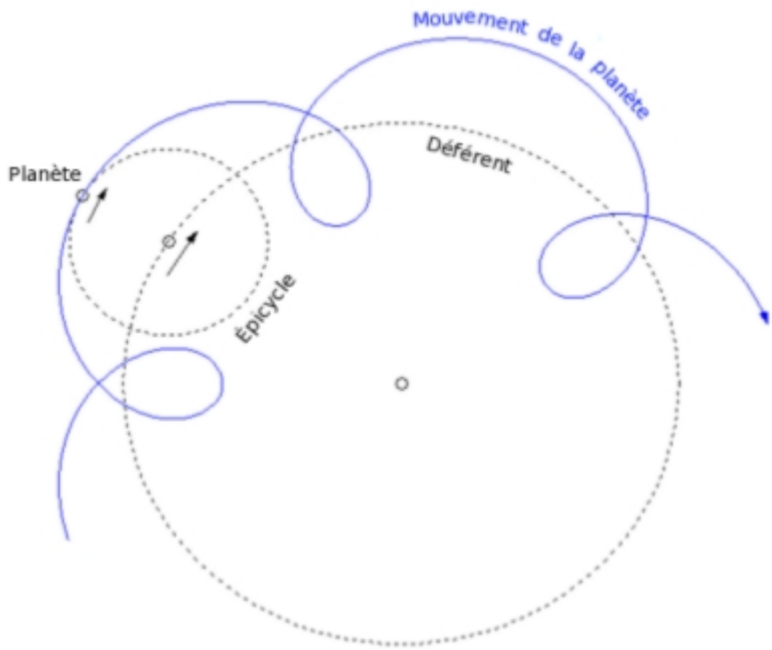

Figure 2

Selon Ptolémée, Mars se déplace à vitesse constante sur un cercle de rayon r dont le centre C tourne lui-même autour de la Terre immobile. Le point C se déplace donc à vitesse constante sur un cercle de rayon r' et de centre la Terre.

On note τ la période de rotation de C autour de la Terre et τ' la période de rotation de Mars autour de C. On choisit un système de coordonnées (x T y) d'origine la Terre et d'axe (T x) tel que Mars et le point C soient situés sur (T x) quand Mars est le plus proche de la terre. On suppose que cela arrive à $t = 0$. Les coordonnées de Mars à l'instant $t > 0$ sont (voir figure 3) :

$$\begin{cases} \widetilde{x}_M(t) & = & r' \cos(\frac{2\pi t}{\tau'}) - r\cos(\frac{2\pi t}{\tau}) \\ \widetilde{y}_M(t) & = & r' \sin(\frac{2\pi t}{\tau'}) - r\sin(\frac{2\pi t}{\tau}) \end{cases}$$

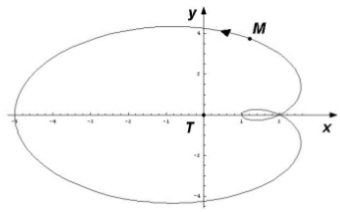

Figure 3

Pour $r' = 3$, $r = 2$, et $\tau' = 2$ et $\tau = 1$, nous retrouvons exactement les mêmes équations que dans le modèle héliocentrique !

La question est donc la suivante : comment peut-on se convaincre que la Terre et les planètes tournent autour du Soleil, et donc invalider le modèle géocentrique de Ptolémée ?

Nous avons vu ci-dessus que le mouvement de Mars peut être expliqué aussi bien dans les deux modèles héliocentrique et géocentrique. Dans ces conditions, quel modèle doit-on choisir ? Il est à noter que du point de vue historique, l'invalidation du modèle de Ptolémée ne viendra finalement qu'en 1725-1729, grâce aux mesures de la parallaxe de l'étoile gamma Draconis par l'astronome anglais James Bradley.

Nous avons engagé un débat avec les autres participants du colloque sur ces questions. Pour l'alimenter, nous avons commenté des extraits du livre *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Dialogue sur les deux grands systèmes du monde) de Galilée (1632).

Nous nous sommes ensuite interrogés sur le bilan pédagogique de l'activité.

Nous pensons qu'il devrait être possible d'utiliser cet exemple de coexistence de deux modèles décrivant aussi bien l'un que l'autre les phénomènes observés à un moment donné de l'histoire pour engager une réflexion avec les élèves sur :

- la notion de modèle mathématique (sa validation expérimentale, le fait qu'il soit presque toujours une simplification de la réalité, le désir qu'il soit le plus universel possible) ;
- la pratique et la rigueur scientifique ;
- le rôle de la science dans la société.

Observation des satellites de Jupiter et troisième loi de Kepler

Il s'agit ici de modéliser les mouvements des satellites de Jupiter observés sur *Stellarium* et d'établir un lien empirique entre les périodes et les rayons de ces satellites.

Cette activité a pour but d'apprendre à acquérir des données avec le logiciel *Stellarium*, de se familiariser avec la notion de période, de visualiser la projection dans un plan perpendiculaire d'un mouvement de rotation circulaire dans l'espace, de rechercher une relation algébrique entre deux séries de nombres, et de découvrir la troisième loi de Kepler.

Nous avons fourni à chaque participant à l'atelier un ordinateur portable sur lequel le logiciel *Stellarium* était installé. Ceux-ci ont dû d'abord se familiariser avec le logiciel et apprendre à changer l'heure et le lieu (barre d'icônes verticale), à changer d'angle de vue (souris), à afficher le nom des planètes (barre horizontale), à supprimer le sol (barre horizontale), à centrer sur un objet céleste sélectionné avec la souris (barre horizontale), à agrandir ou rapetisser un objet sélectionné (touches ‘\textbackslash’ et ‘/’). Il a fallu ensuite trouver la planète Jupiter et utiliser la fonction d'agrandissement (qui joue le rôle de la lunette de Galilée) pour observer ses satellites.

Les questions posées aux participants étaient les suivantes :

- Décrire le mouvement des quatre satellites de Jupiter (Io, Europe, Ganymède, Callisto) par rapport à Jupiter, vu depuis la terre (trajectoire vue depuis la terre, périodicité).
- Reconstituer les trajectoires circulaires à partir des mouvements rectilignes (segments de droite) observés depuis la Terre. On peut aussi représenter la position de chaque satellite en fonction du temps (courbe sinusoïdale), comme le faisait l’astronome Peiresc du temps de Galilée.
- Déterminer les périodes de rotation T des quatre satellites, puis les rayons R des trajectoires circulaires à un multiple près (qui dépend de la taille de l'écran et de l'agrandissement utilisé).
- Trouver une relation entre les deux séries de quatre nombres T et R mesurés.

Le but recherché est d'établir empiriquement la troisième loi de Kepler, $\frac{R^3}{T^2}$ = constante, à partir des données déterminées sur *Stellarium*, en faisant des hypothèses (par exemple, R et T sont-ils proportionnels ?) que l’on cherchera ensuite à valider ou à invalider.

Autres activités de classe autour de l’astronomie

Nous décrivons brièvement ici deux autres activités qui n’ont pas pu être abordées lors du colloque par manque de temps.

Dans la première, il s’agit d’élaborer des protocoles expérimentaux (en faisant des « observations » grâce à *Stellarium*) pour estimer la période de rotation de la Lune autour de la Terre, et de confronter les résultats obtenus par deux méthodes : (1) les phases de la Lune (qui donnent la période de lunaison et non la période de rotation) et (2) le mouvement de la Lune par rapport à des étoiles fixes (qui donne la vraie période de rotation).

La seconde activité consiste à déterminer le rayon de la Lune grâce à une éclipse lunaire. Pour cela, on mesure les temps d'entrée et de sortie de la Lune dans l'ombre de la Terre, ainsi que le temps mis par la Lune pour entrer complètement dans l’ombre. On peut ensuite utiliser des arguments géométriques pour trouver une relation entre les rayons r de la Lune et R de la Terre, en supposant dans un premier temps que le Soleil est à l'infini (dans ce cas on obtient le résultat d’Aristarque $r = R/3$), puis dans un second temps que la distance Terre-Soleil est finie mais beaucoup plus grande que la distance Terre-Lune (dans ce cas on obtient $r = R/4$). Cette activité serait plus adaptée à des élèves de classe de première ou de terminale.

BIBLIOGRAPHIE & SITOGRAPHIE

Brémond, A. (2010) Les planètes médicéennes de Jupiter : de la « découverte » aux calculs astronomiques de Galilée, *Cahiers Clairaut*, 130, 11-18.

Galileo Galilei (1632) *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*.

Ripert, J. (2003) Peiresc, *Cahiers Clairaut*, 101, 25-27.

Ripert, J. (2003) Peiresc, *Cahiers Clairaut*, 102, 18-26.

B.O. spécial n° 4 du 29 avril 2010, programme de l'option Méthodes et Pratiques scientifiques.

Stellarium, logiciel de planétarium, open source et gratuit, http://www.stellarium.org/fr/, consulté le 14 juin 2015.