Cercles ou Ellipses ? Réflexions sur la trajectoire des planètes

par Jean-Michel ROLANDO
École Normale, 74130 Bonneville

AVERTISSEMENT : le texte présenté ci-dessous a été rédigé dans la perspective d'une diffusion auprès d'instituteurs dont la plupart ne sont familiarisés ni avec l'astronomie ni avec la géométrie des ellipses. Le lecteur physicien voudra bien de ce fait excuser certaines précisions qu'il pourrait juger inutiles, mais qui ne lui sont nullement destinées.

INTRODUCTION

Parmi les phénomènes astronomiques les mieux connus du public fréquentant les Écoles Normales, tant en formation initiale qu'en formation continue, figure en bonne position le fait que les planètes se déplacent autour du soleil sur des trajectoires elliptiques. Je me propose pourtant de montrer qu'il s'agit là d'une connaissance livresque susceptible de conduire à d'énormes confusions si, comme c'est souvent le cas, elle est mal assimilée. Je pense nettement préférable de considérer ces trajectoires comme circulaires, tant à l'école élémentaire qu'au collège. Les raisons de ce parti pris seront développées en envisageant tout d'abord l'aspect historique qui nous montrera comment on est passé du modèle de Copernic (trajectoires circulaires) au modèle de Képler (trajectoires elliptiques). Nous verrons dans un second paragraphe que les ellipses en question sont très proches de cercles. Nous discuterons ensuite (troisième paragraphe) du point de vue pédagogique et nous montrerons que la pratique d'une démarche scientifique ne permet pas d'accéder au modèle de Képler avec de jeunes enfants. Nous terminerons en analysant rapidement deux confusions inquiétantes et malheureusement fréquentes.

1. DU MODÈLE DE COPERNIC A CELUI DE KÉPLER

On connaît depuis l'antiquité les mouvements apparents de Mars, Jupiter et Saturne. Ces planètes se déplacent sur le ciel étoilé en décrivant une boucle par an (figure 1). Cette particularité vaut d'ailleurs leur nom aux planètes (étymologiquement : astres promeneurs). L'expliation de cette boucle constitue le point faible de tous les modèles antérieurs à celui de Copernic, y compris celui de Ptolémée qui fit pourtant autorité pendant 15 siècles. En 1543 paraît l'ouvrage de Nicolas Copernic (1473-1543) intitulé «De Revolutionibus Orbium Coelestium» qui propose une vision héliocentrique de l'Univers :

– le soleil en occupe le centre, les étoiles la périphérie ;

– les planètes effectuent une révolution autour du soleil en parcourant des orbites circulaires.

Le système de Copernic connaît un accueil peu chaleureux dans les milieux ecclésiastiques bien qu'il donne une interprétation simple et élégante à la boucle des planètes (figure 2). Mais simplicité et élégance ne sont pas des valeurs de l'époque. La longévité d'une théorie telle que celle de Ptolémée est au contraire considérée comme la meilleure référence qui soit.

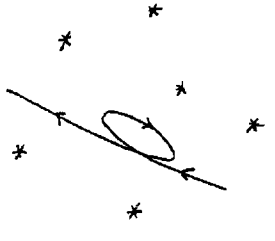

Figure 1

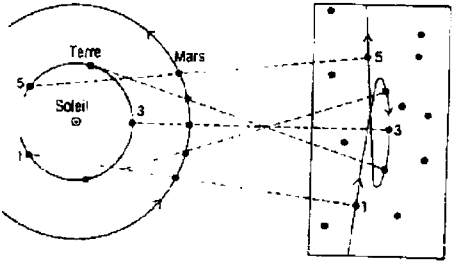

Figure 2

Condamnées par l'église catholique jusqu'en 1835, les œuvres de Copernic retiennent toutefois l'attention de Johannès Képler (1571-1630) et de Galiléo Galilée (1564-1642) qui correspondent fréquemment pour échanger sur celles-ci. Alors que Galilée enseigne le modèle de Copernic à l'Université de Padoue, Képler entreprend de le

confronter aux très précises observations de Thycho Brahé (1546-1601). Il peut alors constater des divergences d'environ 8 minutes d'angle. Il convient de noter ici qu'avec les moyens de l'époque (lunettes et télescopes n'existent pas), obtenir une précision de cet ordre est une véritable prouesse. Mais Képler a une telle confiance dans les qualités de Thycho Brahé qu'il refuse de croire en des erreurs de mesure et cherche comment modifier le modèle de Copernic pour le rendre conforme aux observations. Après de nombreux mois de tentatives infructueuses, il a finalement l'idée d'affecter aux planètes des trajectoires elliptiques dont le soleil occupe l'un des foyers (voir le paragraphe suivant pour la définition d'une ellipse et celle de ses foyers).

Plusieurs enseignements essentiels doivent être tirés de ce rapide tour d'horizon historique.

1 – Le remplacement d'un modèle par un autre n'est jamais un acte gratuit, mais répond à une nécessité. Le système de Copernic a été remplacé par celui de Képler parce qu'il ne donnait pas entière satisfaction face aux données de l'observation.

2 – Le passage du modèle de Ptolémée à celui de Copernic marque une rupture caractérisée par un changement radical de l'hypothèse de base : le géocentrisme cède la place à l'héliocentrisme. Au contraire, le passage au modèle de Képler ne constitue en fin de compte qu'une amélioration se situant dans la continuité de l'hypothèse de base : on reste dans une description héliocentrique.

3 – Le modèle de Képler est-il la «vérité» ? On l'a cru un temps, d'autant que Newton en a donné quelques années plus tard, une remarquable justification théorique. On sait maintenant qu'il n'en est rien. On a pu en effet observer que la trajectoire de la planète Mercure présente une particularité inexplicable par la théorie de Newton. (Pour plus de détails, on peut se reporter à l'appendice I, bien que cela ne soit pas indispensable pour la compréhension de la suite).

4 – Cela nous amène à poser le problème de l'existence d'une vérité dans le domaine des sciences. L'histoire ne cesse de nous montrer que ce qui est considéré comme «vrai» à une époque, ne l'est souvent plus à une autre. La science actuelle procède différemment. Elle ne se préoccupe plus de chercher une hypothétique vérité, mais élabore des modèles dont elle sait qu'ils ne sont que des approximations d'une

réalité inaccessible. Ces modèles sont satisfaisants à l'intérieur d'un champ expérimental parfaitement connu, et ne le sont plus dès qu'on en sort. Ainsi, il n'est pas pertinent de se demander si une théorie est «vraie» ou «fausse». Il convient plutôt de savoir si elle constitue une «bonne» ou une «mauvaise» approximation. Cela dépend bien sûr du domaine expérimental à l'intérieur duquel on se situe. Le modèle de Copernic est satisfaisant pour expliquer l'alternance des jours et des nuits, pour rendre compte des saisons et pour interpréter qualitativement la «boucle» des planètes. Il est insuffisant pour en rendre compte quantitativement. Le modèle de Képler est satisfaisant pour cette description quantitative, mais insuffisant pour expliquer la particularité du mouvement de Mercure.

Pour résumer

1 – La science élabore des modèles dont elle ne se préoccupe pas de savoir s'ils sont «vrais» mais s'ils sont satisfaisants à l'intétrieur d'un champ expérimental donné.

2 – Les modèles n'ont pas une durée de vie infinie. Ils se complètent et s'enrichissent progressivement (phase de continuité) ou se détruisent pour être remplacés par d'autres édifiés sur des fondements différents (phase de rupture).

2. DES ELLIPSES... QUI SONT PRESQUE DES CERCLES

La figure 3 représente une ellipse. Les points F et F' s'appellent les foyers. Prenons un point M n'importe où sur l'ellipse, mesurons les distances FM et MF' puis calculons la somme FM + MF'. Le résultat sera identique quelle que soit la position du point M sur l'ellipse.

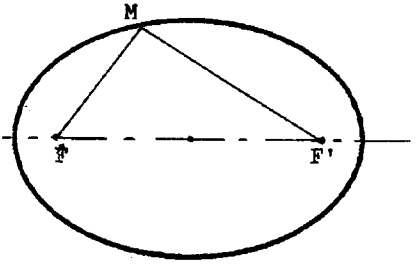

Figure 3

Les ellipses sont en quelque sorte des «cercles aplatis». pour avoir une idée de cet «aplatissement», nous pouvons évaluer le rapport du petit axe de l'ellipse sur son grand axe (figure 4).

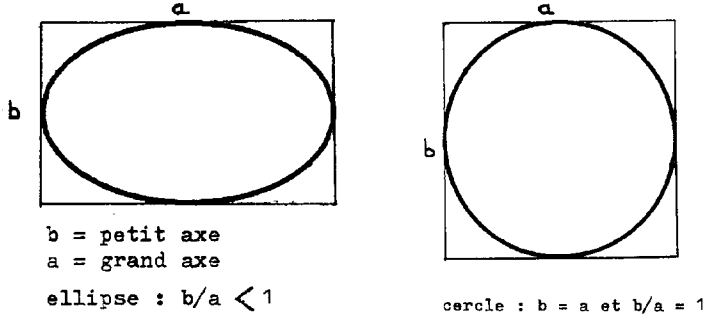

Figure 4

Plus l'ellipse est «aplatie», plus ce rapport est petit. Pour un cercle, il est égal à 1.

Les trajectoires des planètes sont maintenant fort bien connues des astronomes. Le tableau présenté ci-dessous indique, pour les neuf planètes du système solaire ainsi que pour la lune, la valeur au $1/10000^{ème}$ du rapport b/a défini précédemment.

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter
b/a	0,9785	1,0000	0,9998	0,9957	0,9988

Planète	Saturne	Uranus	Neptune	Pluton	Lune
b/a	0,9984	0,9989	1,0000	0,9682	0,9985

Il apparait immédiatement que toutes ces trajectoires sont presque circulaires. L'orbite de Pluton, la plus «aplatie», est représentée à l'échelle sur la figure 5. On peut effectivement constater que ce n'est pas un cercle, mais reconnaissons que la différence est tout juste perceptible sans mesure. Par contre, on voit parfaitement que le soleil ne se trouve pas au centre de symétrie de l'ellipse, mais à l'un de ses foyers, ainsi que l'a établi Képler.

La figure 6 représente, toujours à l'échelle, l'orbite de la terre et la position du soleil. Un examen attentif, double décimètre à la main, nous montre qu'il n'est pas possible de différencier cette orbite d'un cercle.

A cette échelle, l'épaisseur du trait rend imperceptible cet écart. On peut par contre constater que le soleil n'occupe pas rigoureusement le centre du cercle.

Pour résumer.

1 – Les orbites planétaires sont certes des ellipses, mais leur «aplatissement» est tellement faible qu'il n'est perceptible, lors d'une reproduction à l'échelle, que pour quelques-unes d'entre elles (Mercure et Pluton).

2 – «L'aplatissement» de l'orbite terrestre n'est donc pas perceptible, mais la position très légèrement excentrée du soleil est accessible à un exament attentif.

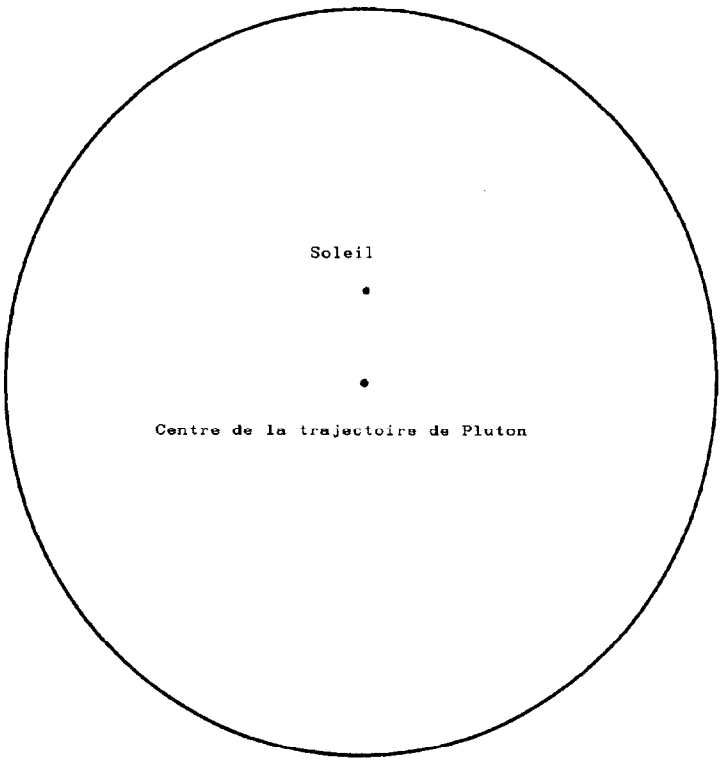

Figure 5 : Trajectoire de la planète Pluton.

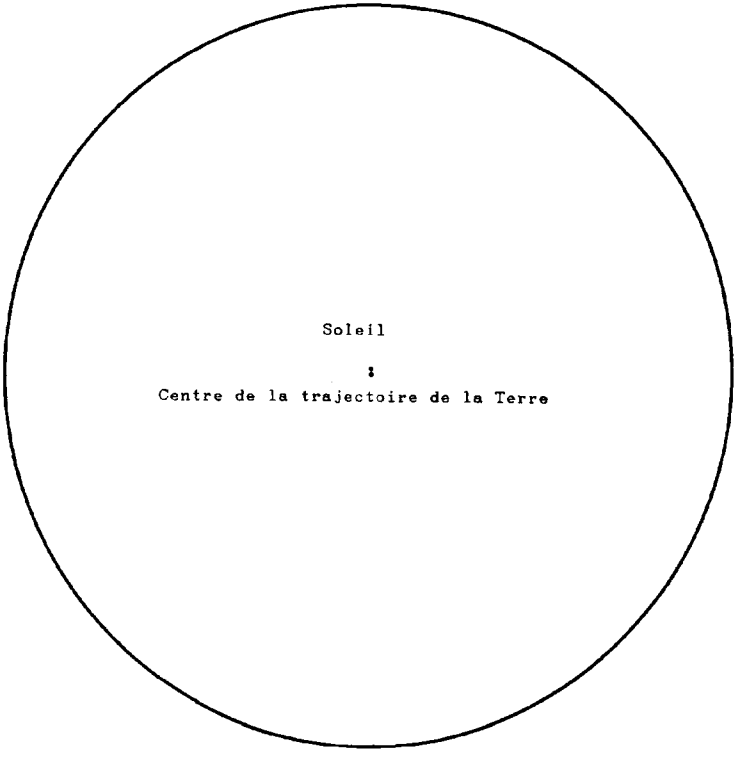

Figure 6 : Trajectoire de la planète Terre.

3. QUELS MODÈLES ? ... POUR QUELS ÉLÈVES ?

Faire accéder les élèves de tous âges à une meilleure compréhension du monde en leur faisant pratiquer une *démarche scientifique*, est une idée fort généreuse, largement affirmée par les Instructions Officielles successives, tant dans le primaire que dans le secondaire, mais dont la mise en œuvre s'avère parfois délicate. Dans le domaine de l'astronomie, il semble que toute démarche scientifique procède :

- d'une étude précise de quelques phénomènes visant à en avoir une vision objective (observation, description, schémas, ...) ;
- de la recherche, dans un second temps seulement, de l'explication la plus satisfaisante.

Il faut entendre que l'explication retenue doit être conforme aux phénomènes observés et, de plus, la plus simple possible. Il convient toutefois de rester dans un modèle héliocentrique, pour rester en cohérence avec la rupture épistémologique historique marquant l'abandon du géocentrisme.

Ainsi, l'alternance des jours et des nuits s'explique par la rotation de la terre sur elle-même autour d'un axe qui, à ce stade, n'a nullement besoin d'être incliné (figure 7).

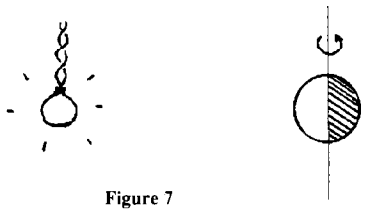

Figure 7

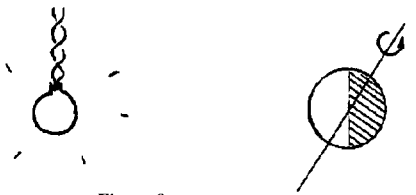

Figure 8

L'inégalité entre la durée des jours et celle des nuits nécessite d'incliner l'axe de rotation, mais nullement d'envisager la révolution de la terre autour du soleil (figure 8). Ouvrons une petite parenthèse pour signaler que l'usage prématuré du globe terrestre risque de présenter cette inclinaison comme un *a priori, un dogme*, alors qu'elle n'est qu'une *nécessité* visant à donner l'explication la plus simple à un phénomène donné.

La variation de la durée des jours au fil des saisons s'explique par la révolution de la terre autour du soleil sur une trajectoire qu'il suffit de considérer comme circulaire. Cela nécessite en outre de maintenir constante la direction de l'axe de rotation (figure 9).

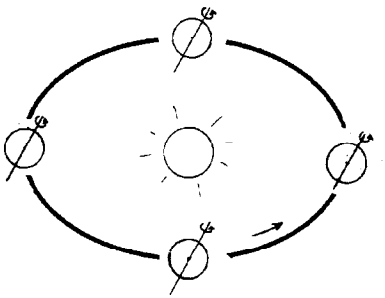

Figure 9

Dans le cadre d'une démarche scientifique (ce point est fondamental), nous n'avons pas d'argument pour montrer à de jeunes élèves (école, collège) les limites du modèle auquel nous venons de parvenir, qui n'est guère différent de celui de Copernic. Nous devons en outre reconnaître qu'il présente toutes les quaités d'un «bon» modèle : il donne une interprétation simple et satisfaisante aux phénomènes rappelés plus haut. Expliquer aux élèves qu'en «réalité» les trajectoires sont elliptiques relève du pur dogmatisme, voire du «mensonge» dans la mesure où il laisse croire en une sacro-sainte vérité qui n'existe pas.

Les insuffisances du modèle de Copernic seraient propablement accessibles à des élèves du Lycée (bien qu'actuellement l'Astronomie ne soit pas un sujet enseigné en sciences physiques). Mais il faudrait étudier préalablement avec eux le mouvement apparent de Mars et expliquer comment les observations de Tycho Brahé ont amené Képler à modifier ce modèle. Il conviendrait aussi de montrer avec un soin tout particulier que cette modification est infime et, comme nous l'avons rappelé dans le paragraphe précédent, que les ellipses représentant la trajectoire des différentes planètes sont presque des cercles.

En résumé

1 – Les phénomènes accessibles à des enfants de l'école ou du collège ne peuvent conduire qu'au modèle de Copernic.

2 – Le passage au modèle de Képler nécessite de montrer l'insuffisance de celui de Copernic. Les phénomènes que cela amène à envisager requièrent une maturité les réservant aux élèves du Lycée.

4. LES DANGERS D'UNE CONNAISSANCE MAL ASSIMILÉE

Ainsi que nous l'avons précisé en introduction, les instituteurs (qu'ils soient titulaires ou en formation initiale) « savent» que la trajectoire des planètes est elliptique. Un questionnement plus précis montre toutefois que cette connaissance est mal assimilée. Deux représentations aux conséquences étonnantes sont fréquemment rencontrées.

– Soleil au centre d'une ellipse très excentrée.

Il s'agit très probablement d'une mauvaise interprétation du

schéma classique de la figure 9, que l'on trouve par ailleurs sur la plupart des manuels. Il y a confusion entre la trajectoire effective de la terre, présentée à juste titre comme circulaire, et son apparence en projection : n'oublions pas qu'un cercle vu en perspective se présente sous la forme d'une ellipse...

– **Soleil au foyer d'une ellipse très excentrée** (figure 10 ci-dessous).

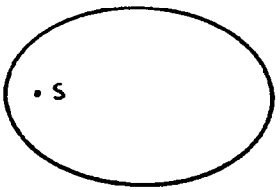

Figure 10

Selon ces deux représentations, l'existence des saisons est directement liée à la distance Terre-Soleil, plus faible en hiver qu'en été.

Les conséquences sont étonnantes.

– Dans le premier cas, il y aurait deux hivers et deux étés par an !

– Dans la logique du second cas, les saisons ne seraient pas inversées dans l'hémisphère Sud.

Les personnes concernées reconnaissent aisément ces incohérences dès qu'on les incite à envisager les conséquences de leur représentation. Il est toutefois inquiétant de se dire que de telles idées ont peut-être été enseignées à de jeunes enfants.

CONCLUSION

Loin de jeter la pierre aux instituteurs dont les aptitudes intellectuelles et l'ouverture d'esprit ne sont nullement en cause (le recrutement se fait actuellement à BAC +2 et de nombreux élèves-maîtres possèdent davantage), il convient de s'interroger sur l'efficacité de l'enseignement scientifique qui a laissé s'installer (et peut-être induit) de telles confusions, et qui n'a pas donné, à certaines personnes au moins, l'esprit critique leur permettant de percevoir les incohérences de leurs représentations.

Au delà du problème de la trajectoire des planètes, se pose celui de la pratique d'une démarche scientifique. Je voudrais faire référence ici à une conférence donnée voilà plus de 20 ans par Richard Feynman qui, rappelons-le, fût prix Nobel de physique en 1965. Au cours de celle-ci, il invite les enseignants scientifiques réunis autour de lui, à bannir de leurs propos des expressions telles que *«la science nous apprend que...»* et de les remplacer par *«telle expérience nous apprend que...»*. Les élèves de tous niveaux sont en droit de connaître le plus précisément possible les conditions de l'expérience qui a été réalisée, afin d'apprécier eux-mêmes si la conclusion qui a été tirée est raisonnable ou non. Exercer le sens critique des élèves, Lycéens et étudiants est la meilleure garantie pour qu'une génération donnée ne transmette ses erreurs à la génération suivante.

Mars 1989

APPENDICE 1
L'AVANCE DU PÉRIHÉLIE DE MERCURE

Selon le modèle de Képler, chaque planète décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers. Le périhélie est le point de la trajectoire le plus proche du soleil, l'aphélie est le point le plus éloigné.

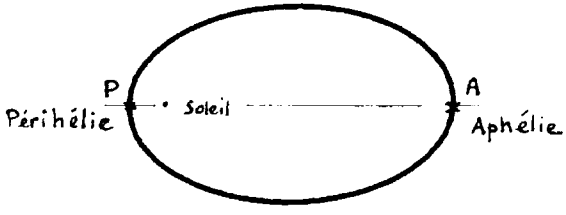

Figure 11

On a pu observer que l'ellipse représentant la trajectoire de la planète Mercure tournait autour du soleil d'un mouvement très lent : environ 40 secondes d'angle par siècle. Dans leur langage, les astronomes parlent de «l'avance du périphélie de Mercure». Le schéma ci-dessous donne une idée de la trajectoire résultante, étant entendu que la vitesse à laquelle le périphélie «avance» a été considérablement exagérée.

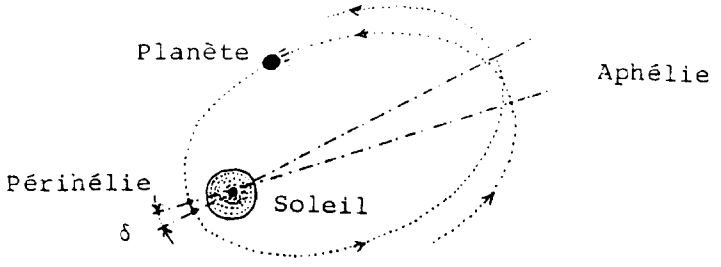

Figure 12

Ainsi que cela a été précisé, la théorie newtonienne ne permet pas d'expliquer ce phénomène. Il faut avoir recours à la théorie de la relativité générale pour en avoir une interprétation satisfaisante.

BIBLIOGRAPHIE

FEYNMAN (R). – Qu'est-ce-que la science ? in *«la nature des lois physiques»*. – Le Seuil. – Coll Points sciences. – 1980.