

SYSTÈME SOLAIRE ET RÉVOLUTION COPERNICIENNE

I. LES LOIS DE NEWTON

II. LE SYSTÈME SOLAIRE

III. LA RÉVOLUTION COPERNICIENNE

IV. RELATIONS ENTRE GRANDEURS

- 1. Force de gravitation**
- 2. Action réciproque**
- 3. Accélération gravitationnelle**
- 4. Force centrifuge**

V. BIBLIOGRAPHIE

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. LES LOIS DE NEWTON

Les lois générales du mouvement ont été découvertes et formulées par le mathématicien et physicien anglais Isaac Newton (1642 – 1727).

Ces lois sont universelles et permettent de décrire n'importe quelle forme de mouvement, elles s'énoncent ainsi :

Principe d'inertie

« Une masse immobile sur laquelle n'agit aucune force, reste parfaitement immobile. »

« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, conserve intégralement sa vitesse. »

« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. »

Le concept de force découle de ce principe.

Concept de force

« Une force désigne toute cause capable d'agir sur la vitesse ou sur la trajectoire d'une masse. »

Principe de réciprocité

« Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé. »

Comment ces lois s'appliquent-elles pour décrire le monde qui nous entoure ?

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

II. LE SYSTÈME SOLAIRE

Le Système solaire désigne l'ensemble formé par le Soleil et les neuf planètes qui gravitent autour de lui. Par ordre d'éloignement du Soleil, ce sont Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune et Pluton.

Le Soleil au centre d'un système

Pendant des millénaires, les mouvements apparents du Soleil et des planètes ont semblé incompréhensibles aux observateurs car ils supposaient que la Terre était immobile et placée au centre de l'Univers.

Nicolas Copernic (astronome polonais, 1473-1543) eut le premier l'intuition que cet ensemble devait être étudié, non pas par rapport à la Terre, mais rapport au Soleil. Restait à en expliquer la cohésion, ce que fit Isaac Newton (physicien anglais, 1642-1727) avec la loi de l'attraction universelle.

Selon cette loi, les planètes s'attirent entre elles en raison de leur masse et en raison inverse du carré de la distance qui les sépare.

Le Soleil concentrant à lui seul plus de 99 % de la masse totale du Système solaire (environ 2×10^{30} kg), il dicte sa loi aux autres planètes en leur imposant des orbites circulaires. D'où la notion de système pour désigner cet ensemble.

Les caractéristiques du Système solaire

Les principales caractéristiques du Système solaire et des planètes qui le composent sont résumées dans le tableau suivant :

	MASSE (M = 6×10^{24} kg)	VITESSE ORBITALE (km.s ⁻¹)	RAYON ORBITAL (R = 150×10^9 m)	DURÉE DE RÉVOLUTION (années)
MERCURE	0,06 M	48	0,4 R	0,24
VÉNUS	0,8 M	35	0,7 R	0,70
TERRE	6×10^{24} kg	30	150×10^9 m	1
MARS	0,1 M	24	1,5 R	2
JUPITER	318 M	13	5,2 R	12
SATURNE	95 M	9,6	9,5 R	29
URANUS	14,5 M	6,8	19,3 R	84
NEPTUNE	17 M	5,4	30 R	165
PLUTON	0,1 M	4,7	40 R	248

© association adilca reproduction interdite

Le mouvement de la Terre

Intéressons-nous à la Terre. Celle-ci est animée d'un double mouvement de rotation : elle tourne sur elle-même au rythme d'une rotation par 24 heures, tout en tournant autour du Soleil à la vitesse de 30 km.s^{-1} sur une orbite circulaire d'environ 150 millions de kilomètres de rayon qu'elle parcourt en une année⁽¹⁾.

Depuis Newton, on sait que cette trajectoire est due à la force de gravitation qui provient de la masse du Soleil (333 330 fois celle de la Terre). Cette force agit à distance, elle est de même nature que celle qui, sur Terre, fait tomber les objets au sol.

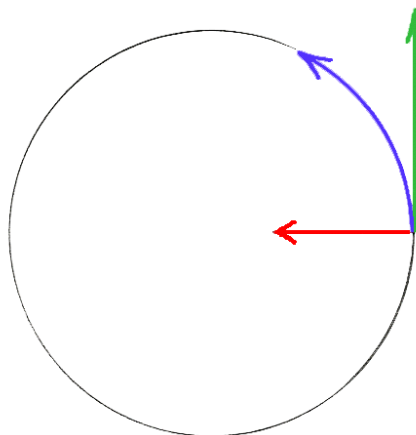
La cohésion du Système solaire

Imaginons que les lois de l'Univers soient complètement modifiées. Que se passerait-il si la Terre avait une vitesse nulle ou cessait brusquement d'obéir à l'attraction du Soleil ?

- avec une vitesse nulle mais soumise à la force de gravitation, la Terre prendrait immédiatement la direction du Soleil pour venir s'y fondre⁽²⁾.

- insensible à la gravitation mais conservant sa vitesse, la Terre adopterait immédiatement une trajectoire rectiligne et s'éloignerait du Soleil⁽³⁾.

Ces deux hypothèses catastrophe nous rappellent que la trajectoire de la Terre relève d'un subtil équilibre entre sa masse, sa vitesse et la distance qui la sépare du Soleil, la force de gravitation étant l'unique facteur de cohésion de ce système.



© association adilca reproduction interdite

Représentation schématique du mouvement de la Terre

La Terre décrit une trajectoire circulaire (flèche bleue) à cause de la force de gravitation (flèche rouge) qui l'attire vers le Soleil. Si cette force n'existait pas, la Terre adopterait une trajectoire rectiligne (flèche verte). Attention à ne pas mélanger force, vitesse et trajectoire !

III. LA RÉVOLUTION COPERNICIENNE

L'observation du Système solaire a joué un rôle capital dans l'histoire de la physique, c'est d'ailleurs ce qui a permis à l'humanité de passer de la logique des apparences à celle du raisonnement, bref, de l'obscurantisme à la science.

Un changement aussi important, aussi profond, aussi lourd de conséquences, c'est ce qu'on appelle une *révolution copernicienne*, la première de l'Histoire.

En réalité, cette révolution ne s'est pas faite en un jour. Pour qu'une idée nouvelle soit *validée* par la communauté scientifique, puis *assimilée* (ou pas) par le *vulgum pecus*, il faut du temps, de la patience et une sacrée dose de pédagogie... Ce cheminement n'est pas un long fleuve tranquille !

Plus d'un siècle sépare en effet l'intuition géniale de Nicolas Copernic (astronome polonais, 1473-1543) des équations d'Isaac Newton (mathématicien anglais, 1642-1727). Entre-temps, Galileo Galilei (dit "Galilée", physicien italien, 1564-1642) et Johannes Kepler (physicien allemand, 1571-1630) ont apporté une indispensable contribution à l'élaboration de la théorie définitive.

Plus de trois-cents ans se sont écoulés depuis, mais il est possible qu'il y ait encore, de par le monde, quelques individus qui ne font confiance qu'à leurs sens et persistent à croire que c'est le Soleil qui tourne autour de la Terre...

Les deux référentiels

Cette révolution copernicienne, en quoi a-t-elle consisté ? Que nous a-t-elle apporté ? Pourquoi a-t-elle changé notre façon de raisonner ?

Avant Copernic, faute de moyens d'observations et de calculs appropriés, la Terre était considérée comme le centre de l'Univers. C'était même le postulat dont dépendaient toutes les autres formes de raisonnements, scientifiques, philosophiques ou religieux.

Depuis Copernic, l'homme a appris à se méfier de ses sensations, de ses croyances, de ses déductions hâtives...

Cette révolution a laissé des traces en physique, avec la théorie des référentiels :

- dans le système pré-copernicien, la Terre est au centre de l'univers, c'est l'unique repère à partir duquel on décrit le mouvement du Soleil et des planètes tel qu'il apparaît vu de la surface du globe.

Mais cette description suppose que la Terre cesse tout à la fois de tourner sur elle-même et autour du Soleil, ce double mouvement étant inconnu à l'époque. Bref, la Terre est alors considérée comme parfaitement immobile !

En physique, c'est ce qu'on appelle une description du mouvement à partir d'un référentiel relatif ⁽⁴⁾. En terme savant, on dit qu'il s'agit, dans ce cas, d'un référentiel *non inertiel* ou *non galiléen*.

- dans le système copernicien, le Soleil devient l'unique repère à partir duquel on décrit à la fois le mouvement de la Terre et celui des autres planètes.

En physique, c'est ce qu'on appelle une description du mouvement à partir d'un référentiel absolu. En terme savant, on dit qu'il s'agit, dans ce cas, d'un référentiel *inertiel* ou *galiléen* ⁽⁵⁾, le seul qui autorise une description complète, logique et cohérente de l'ensemble des mouvements de la Terre et des planètes du Système solaire ⁽⁶⁾.

Doit-on rappeler une fois de plus qu'il est strictement interdit de fusionner, de permuter ou de mélanger les deux descriptions ?

Le rapport avec l'automobile...

Cette nécessaire distinction entre deux époques, deux référentiels et deux modes de raisonnements, s'applique tout aussi parfaitement à la description du mouvement d'une automobile, elle évite pas mal d'ambiguïtés, de confusions, et même d'erreurs, y compris de la part de professeurs émérites !

Pour bien saisir la nuance fondamentale qui sépare ces deux descriptions appliquées à l'automobile, il faut :

1. Garder d'abord à l'esprit que les automobiles sont des véhicules terrestres qui, comme leur nom l'indique, ne servent qu'à satisfaire des besoins de déplacements par rapport à la Terre. Étudier leur mouvement par rapport au Soleil n'aurait aucun sens.
2. Transposer ensuite le raisonnement ci-dessus en adoptant le globe terrestre comme référentiel absolu, et l'habitacle de la voiture comme référentiel relatif. Mais attention : en adoptant la voiture comme référentiel relatif, celle-ci doit être considérée comme parfaitement immobile. Dès lors, il devient impossible de décrire son mouvement par rapport à la Terre !

Un choix lourd de conséquences qu'il faut assumer jusqu'au bout !

Enfin, si tout n'est pas parfaitement clair, vérifiez la validité de votre raisonnement en consultant le dossier ADILCA "référentiels".

Conclusion

La véritable révolution copernicienne, celle des esprits, n'est-elle pas à venir ?

NOTES ET REMARQUES

(1) Ce double mouvement de rotation rythme les conditions de vie sur Terre avec l'alternance du jour et de la nuit, ainsi que celle des saisons.

(2) Dans cette hypothèse, le "voyage" durerait environ deux mois. Dans un premier temps, les habitants de la Terre n'auraient aucune perception directe de ce mouvement, sauf en observant la taille apparente du Soleil. Le rayonnement solaire atteindrait vite un niveau insupportable, comparable à celui qui a condamné les victimes d'une explosion nucléaire. L'accélération, d'une intensité très faible au départ (environ $0,006 \text{ m.s}^{-2}$), augmenterait sans cesse jusqu'à atteindre la valeur de 275 m.s^{-2} à proximité du Soleil. De ce fait, la vitesse du globe terrestre, par définition nulle au départ, atteindrait environ 600 km.s^{-1} au moment de plonger dans les entrailles du Soleil.

(3) Dans cette hypothèse, les Terriens verraient le Soleil s'éloigner lentement pour ne plus former qu'un point à l'horizon. Progressivement privé de rayonnement solaire, le globe terrestre serait plongé dans l'obscurité et se refroidirait jusqu'à rendre toute vie impossible. En conservant sa vitesse sur une trajectoire rectiligne, la Terre croiserait l'orbite de Pluton au bout de six ans et finirait ensuite par quitter définitivement le Système solaire.

(4) Un référentiel est qualifié de "relatif", "non inertiel" ou "non galiléen" quand on fait abstraction de son mouvement propre, autrement dit quand on raisonne comme s'il était parfaitement immobile. Il en découle que le mouvement observé à l'intérieur d'un référentiel relatif est un mouvement apparent qui, en réalité, n'existe pas. C'est pour pallier cette incohérence qu'ont été inventées les forces imaginaires, dites aussi "forces d'inertie", "forces apparentes", "forces fictives" ou "pseudo-forces" (en automobile il n'y en a que trois : la force d'inertie, la force centrifuge et la force de Coriolis, voir les dossiers ADILCA "force d'inertie", "force centrifuge" et "force de Coriolis").

(5) En hommage aux travaux de Galilée sur les référentiels ("Dialogue sur les deux grands systèmes du monde", paru en 1632 et condamné par la censure un an plus tard). Attention : le statut d'un référentiel n'a rien de définitif, un même référentiel pouvant être tantôt galiléen, tantôt non galiléen, selon l'objet de l'étude : la Terre, par exemple, est un référentiel parfaitement galiléen pour décrire le mouvement des véhicules terrestres (à l'effet Coriolis près !), mais non galiléen pour décrire le mouvement des planètes du Système solaire. Pour faire le bon choix, pas besoin de lourde théorie, il suffit d'un peu de bon sens :

- les voitures se déplacent par rapport à la Terre, non par rapport au Soleil ;
- les planètes du Système solaire se déplacent par rapport au Soleil, non par rapport à la Terre ;
- le Système solaire se déplace par rapport à la Voie lactée, non par rapport au Soleil, etc.

Puisque tout est mouvement dans l'Univers, on en déduit que tout référentiel galiléen est non galiléen par rapport à un espace plus grand que lui, le seul véritablement galiléen étant celui du Big-bang.

(6) Le référentiel copernicien n'est galiléen que dans les limites du Système solaire. L'étude du mouvement dans notre galaxie (la Voie lactée) impose de changer de référentiel, et ainsi de suite car il y a des milliards de galaxies qui s'éloignent les unes des autres... Par suite, les distances et les vitesses sont à reconsidérer à chaque changement de référentiel. Exemples :

- la vitesse du Système solaire, évidemment nulle dans le référentiel copernicien, est d'environ 250 kilomètres par seconde dans le référentiel de la Voie lactée ;
- le Système solaire ressemble à un disque plat d'environ 12 milliards de kilomètres de diamètre (12×10^9 kilomètres, soit 0,0013 année-lumière), une taille minuscule comparée à celle de la Voie lactée qui a la forme d'une toupie d'environ 950×10^{15} kilomètres de diamètre (100 000 années-lumière) et d'environ $47,5 \times 10^{15}$ kilomètres d'épaisseur (5 000 années-lumière) ;
- la lumière traverse le Système solaire en une douzaine d'heures, il lui faut environ 100 000 ans pour traverser la Voie lactée, etc.

IV. RELATIONS ENTRE GRANDEURS

1. Calcul de la force de gravitation

$$F = M \cdot V^2 / R$$

F : force de gravitation, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

V : vitesse orbitale, exprimée en **m.s⁻¹**

R : rayon orbital, exprimé en **m**

cohérence des unités : $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}) = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons la force de gravitation qui maintient la Terre en orbite autour du Soleil. Caractéristiques de la Terre et de son mouvement : masse 6×10^{24} kg ; vitesse orbitale $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ($30 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ; rayon orbital $150 \times 10^6 \text{ km}$ ($150 \times 10^9 \text{ m}$).

$$F = 6^{+1} \times 10^{+24} \times (30^{+1} \times 10^{+3})^{+2} / (150^{+1} \times 10^{+9})$$

$$F = 6^{+1} \times 10^{+24} \times 900^{+1} \times 10^{+6} \times 150^{-1} \times 10^{-9}$$

$$F = 6 \times 900 \times 150^{-1} \times 10^{(+24+6-9)}$$

$$F = 36 \times 10^{21} \text{ N} = 36 \text{ ZN}$$

Remarque : une seule force suffit pour expliquer la rotation de la Terre autour du Soleil, c'est la force de gravitation. Cette force agit seule, elle s'exerce sur le centre de masse du globe terrestre, elle est orientée vers le centre du Soleil, il n'y a pas d'autre force mise en jeu dans ce système-ci, pas plus que dans n'importe quel autre.

2. Calcul de l'action réciproque

Conformément au principe de réciprocité d'Isaac Newton, la Terre exerce une action réciproque sur le centre de masse du Soleil, de même intensité que la force de gravitation qui la maintient en orbite, mais de sens opposé, selon la relation :

$$A = - F$$

A : action réciproque, exprimée en **N**

F : force de gravitation, exprimée en **N**

Exemple : calculons l'action réciproque que la Terre exerce sur le Soleil, la force de gravitation qui maintient le globe terrestre en orbite étant de 36 ZN :

$$A = - 36 \text{ ZN}$$

Le Soleil n'est pas affecté par cette attraction en raison de sa masse.

3. Calcul de l'accélération gravitationnelle :

$$Y = F / M$$

Y : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s⁻²**

F : force de gravitation, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

cohérence des unités : $Y = \text{kg.m.s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m.s}^{-2}$

Exemple 1 : calculons l'accélération que le Soleil exerce sur la Terre pour lui imposer une trajectoire circulaire. Caractéristiques de la Terre : masse 6×10^{24} kg ; force de gravitation exercée par le Soleil 36×10^{21} N.

$$Y = 36^{+1} \times 10^{+21} / (6^{+1} \times 10^{+24})$$

$$Y = 36^{+1} \times 6^{-1} \times 10^{+21} \times 10^{-24}$$

$$Y = 6 \times 10^{-3} = 0,006 \text{ m.s}^{-2}$$

Exemple 2 : conformément au principe de réciprocité, calculons l'accélération que la Terre exerce sur le Soleil. Caractéristiques du Soleil : masse 2×10^{30} kg ; action réciproque exercée par la Terre – 36×10^{21} N.

$$Y = - 36^{+1} \times 10^{+21} / (2^{+1} \times 10^{+30})$$

$$Y = - 36^{+1} \times 10^{+21} \times 2^{-1} \times 10^{-30}$$

$$Y = - 18 \times 10^{(+21-30)}$$

$$Y = - 18 \times 10^{-9} = - 0,000\ 000\ 018 \text{ m.s}^{-2}$$

Remarque : cette accélération est environ 333 000 fois plus faible que celle qui s'exerce sur la Terre, ce qui, en accord avec le deuxième principe d'Isaac Newton, correspond bien au rapport des deux masses en interaction.

4. Calcul de la force centrifuge :

$$F' = - M \cdot Y$$

F' : force centrifuge, exprimée en **N**

M : masse, exprimée en **kg**

Y : accélération, exprimée en **m.s⁻²**

cohérence des unités : $F' = \text{kg} \cdot \text{m.s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons la force qu'il faudrait exercer sur le centre de masse de la Terre, si celle-ci était immobile (vitesse orbitale nulle), pour compenser l'attraction du Soleil et la maintenir en équilibre dans l'espace :

$$F' = - 6^{+1} \times 10^{+24} \times 6^{+1} \times 10^{-3}$$

$$F' = - 6^{+1} \times 6^{+1} \times 10^{+24} \times 10^{-3}$$

$$F' = - 36 \times 10^{21} \text{ N} = - 36 \text{ ZN}$$

Remarque 1 : cette force est couramment appelée “*force centrifuge*” ce qui est un qualificatif incorrect puisqu’il n’y a ni vitesse, ni rayon orbital, ni centre (la Terre est immobile et reste en équilibre dans l’espace). Le vrai nom de cette force est : force imaginaire, force fictive, ou pseudo-force.

Remarque 2 : le signe [-] est obligatoire, il précise l’orientation spatiale de cette force, supposée équilibrer l’attraction solaire.

Remarque 3 : attention aux interprétations erronées, l’égalité numérique des résultats n’autorisant pas le mélange des descriptions, des concepts ou des raisonnements. L’erreur la plus courante est de confondre la *force centrifuge* avec l’*action réciproque* que la Terre exerce sur le Soleil. En effet, ces deux forces ont la même intensité (- 36 ZN), mais elles n’ont rien en commun :

- la *force centrifuge* s’exerce sur le centre de masse de la Terre, c’est une force imaginaire, la description est *statique*.
- L’*action réciproque* s’exerce sur le centre de masse du Soleil, c’est une force réelle, la description est *dynamique*.

Remarque 4 : la traçabilité du raisonnement impose d’effectuer les différents calculs dans l’ordre indiqué. Il est en effet impossible de calculer directement la force centrifuge sans passer par les étapes intermédiaires détaillées ci-dessus, sauf à se tromper de description et de concept.

Remarque 5 : une démarche scientifique doit passer par quatre étapes :

- *observation* d’un phénomène ;
- *mesures* de grandeurs ;
- *calculs* ;
- et, en dernier lieu, *raisonnement* (ici : le concept de force centrifuge). Ce passage du concret à l’abstrait, du réel à l’imaginaire a souvent été court-circuité, d’où les nombreuses confusions et méprises au sujet de la force centrifuge.

V. BIBLIOGRAPHIE

- COPERNIC (Nicolas) : *De Revolutionibus Orbium Cœlestium*, Nuremberg 1543.

- GALILEI (Galiléo) : *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Florence 1632.

- LE TONNELIER DE BRETEUIL, marquise du Chastellet (Gabrielle Émilie) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction française de l'œuvre d'Isaac Newton), Paris 1759.

- MITTON (Simon) et AUDOUZE (Jean) : *Encyclopédie d'Astronomie de Cambridge* (traduction française du texte original), Éditions du Fanal, Paris 1980.

- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

- VIGOUREUX (Jean-Marie) : *Les Pommes de Newton*, Éditions Diderot, Paris 1997.

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *