

La gravitation universelle

1 Introduction: une longue histoire en quatre étapes

1.1 Les modèles géocentriques

Dès l'Antiquité, les savants ont observé les étoiles et ont essayé de comprendre leur mouvement.



Figure 1: QR-code de l'application

Les premiers modèles qui ont tenté de rendre compte du mouvement des astres étaient géocentriques : le mouvement des astres se fait par rotation autour de la Terre, qui est le centre de l'univers.

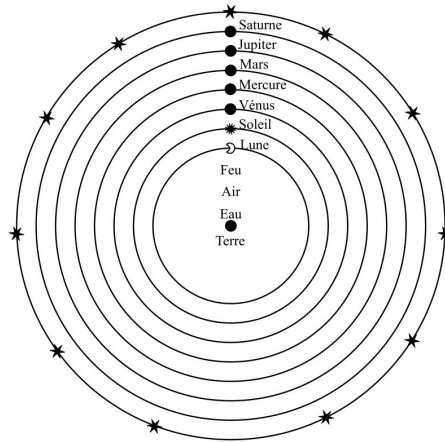


Figure 2: Le modèle géocentrique

Cependant, ce modèle est très vite confronté à certaines difficultés. L'une d'elles concerne le mouvement de Mars autour de la Terre.



Figure 3: QR-code: Orbite de Mars autour de la Terre

Tu peux observer sur l'animation ci-dessus que Mars a un mouvement rétrograde autour de la Terre. Cette observation était déjà réalisée plus de deux siècles avant Jésus-Christ, et deux savants de l'époque, Apollonius et Hipparque, ont tenté d'expliquer pourquoi Mars a un tel mouvement : ils ont mis au point les premiers modèles par épicycles. Ces modèles décrivent le mouvement de Mars (mais aussi d'autres astres) de la manière suivante : Mars se déplace le long d'un cercle, à vitesse constante, et le centre de ce cercle se déplace lui-même sur un grand cercle dont le centre est la Terre.

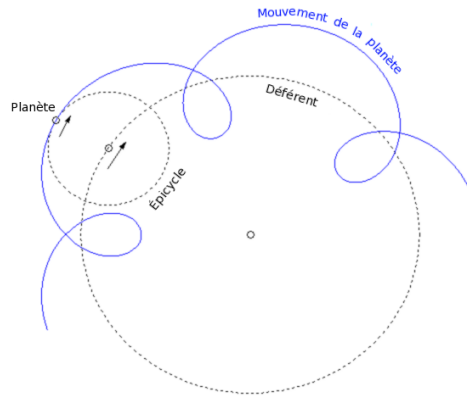


Figure 4: Modèle géocentrique avec épicycle

Ces modèles par épicycles ont été étudiés et raffinés pendant longtemps, pour aboutir au modèle de Ptolémée, qui proposa un modèle avec plusieurs épicycles pour expliquer les défauts de mesure des modèles d'Apollonius et Hipparque. Les travaux de Ptolémée furent la référence en astronomie jusqu'au XVI^e siècle, avec l'arrivée du modèle héliocentrique de Copernic.

1.2 Les modèles héliocentriques

Malgré la précision importante des modèles géocentriques, les astronomes du XVI^e siècle n'arrivent pas à prévoir parfaitement le mouvement des astres. Copernic émit l'hypothèse que le Soleil était au centre de l'Univers et que la Terre effectue un mouvement circulaire autour de lui : c'est la naissance des modèles héliocentriques. Bien que le modèle héliocentrique de Copernic représente une révolution en astronomie, il ne permet pas une plus grande précision dans les prédictions que dans le modèle de Ptolémée. La raison est que Copernic suppose que les astres décrivent des cercles autour du Soleil.

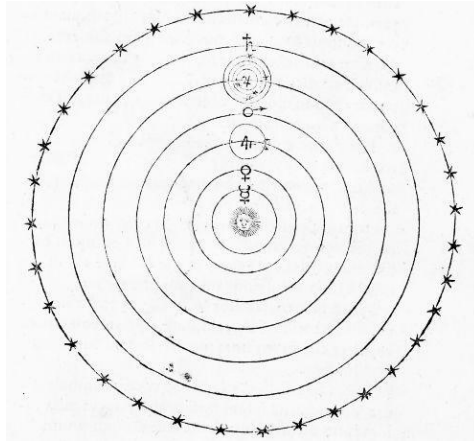


Figure 5: Le modèle de Copernic

Cependant, un atout du modèle de Copernic est sa simplicité par rapport au modèle avec épicycles. De plus, le mouvement rétrograde de Mars s'explique facilement comme un effet de perspective d'un observateur sur Terre.

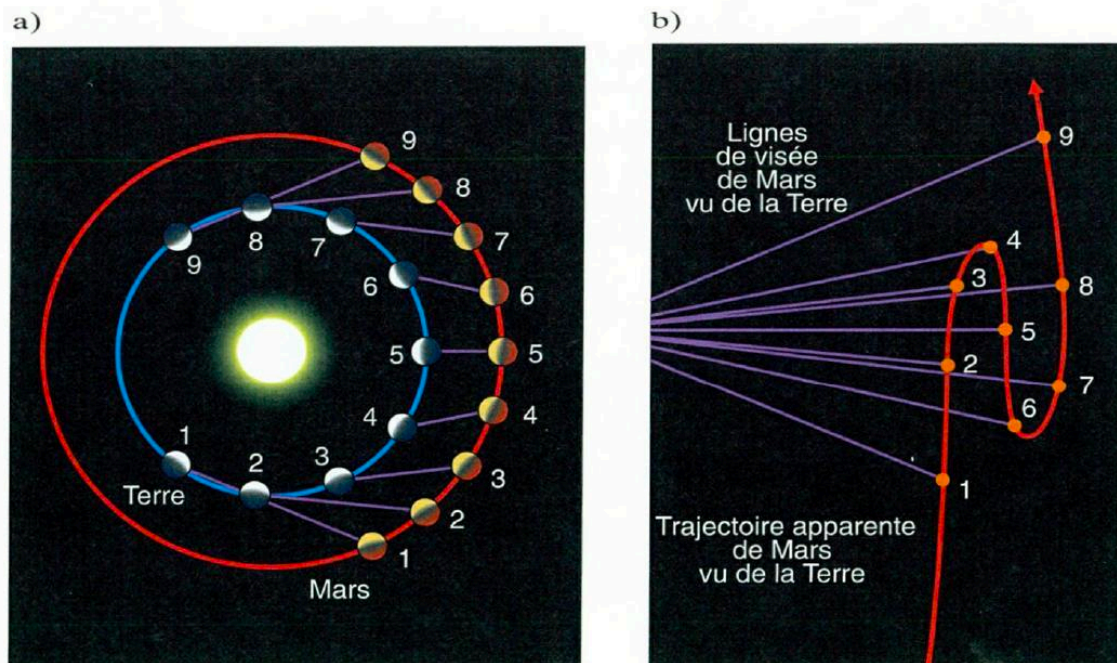


Figure 6: Orbite de Mars dans le modèle héliocentrique

Le modèle de Copernic ne rencontrera pas un franc succès auprès de ses contemporains : ceux-ci

étaient, entre autres, influencés par le sens commun de l'époque et les dogmes religieux. Au XVII^e siècle, Galilée se positionne en défenseur du modèle de Copernic : il apporta des arguments importants en faveur de ce modèle, grâce à des observations des satellites de Jupiter faites avec une lunette astronomique. Il observe que Jupiter et ses satellites forment un système planétaire miniature autour d'un centre qui n'est pas la Terre.

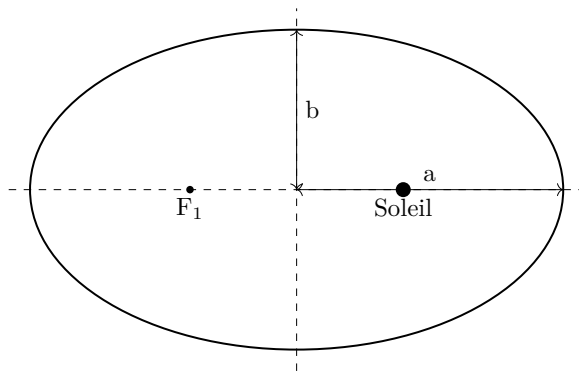
1.3 Les lois de Kepler

Le modèle de Copernic place le Soleil au centre de l'Univers et suppose que les astres décrivent un mouvement circulaire dont le centre est le Soleil. Cependant, les mesures des mouvements des astres ne collent pas parfaitement aux trajectoires du modèle et Copernic fait vite appel aux épicycles pour améliorer son modèle. Malgré ces améliorations, le modèle héliocentrique reste imparfait.

C'est à la fin du XVI^e siècle qu'une avancée majeure est réalisée pour expliquer le mouvement des astres : Johannes Kepler, sur base de mesures méticuleuses réalisées par l'astronome danois Tycho Brahe, se rend compte que les planètes ne décrivent pas des mouvements circulaires mais elliptiques, dont un des foyers est occupé par le Soleil. Il s'agit de sa première loi, parmi trois qui tentent de décrire le mouvement des planètes autour du Soleil.

i Première loi: la loi des orbites.

La trajectoire de chaque planète est une ellipse dont un foyer est occupé par le Soleil.



Éléments de l'ellipse :

F_1 , Soleil : Foyers

a : Demi-grand axe

b : Demi-petit axe

Figure 7: Trajectoire elliptique

i Deuxième loi: loi des aires.

Le segment qui joint le Soleil à une planète balaie des secteurs d'aires égales en des durées égales, quelles que soient ces durées.

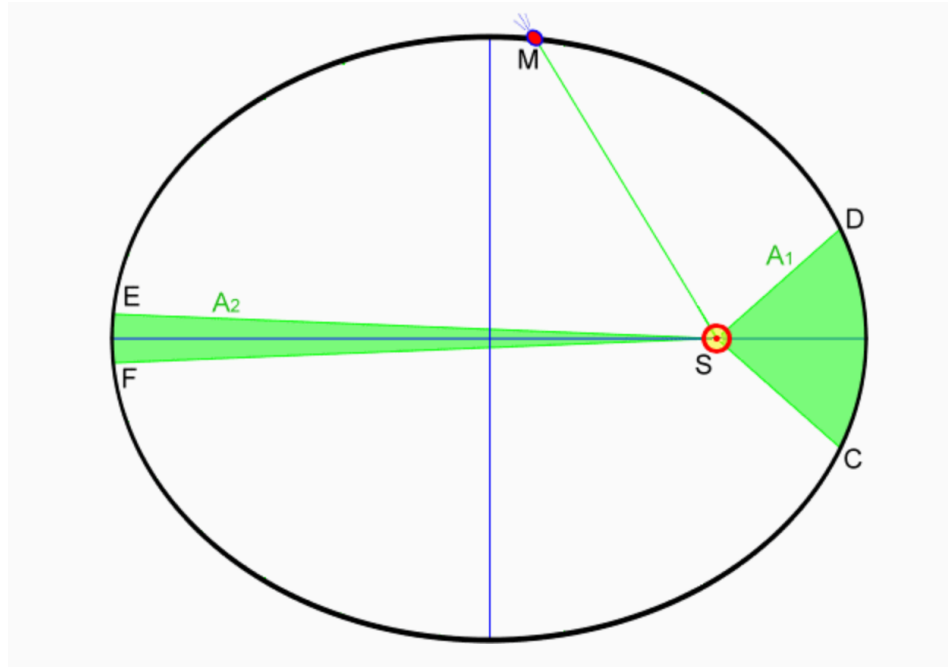


Figure 8: Loi des aires

i Troisième loi: loi des périodes.

Le quotient du cube du demi-grand axe par le carré de la période de révolution est le même pour toutes les planètes :

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = \dots$$

Exercice 1.1. Complète le tableau suivant à l'aide de la 3e loi de Kepler.

Planète	$a(10^9\text{m})$	$T(10^6\text{s})$	$a^3/T^3(10^{15}\text{m}^3/\text{s}^2)$
Mercure	57,9		3356
Vénus	108,1	19,41	
Terre	149,6		
Mars		59,36	3364

Planète	$a(10^9\text{m})$	$T(10^6\text{s})$	$a^3/T^3(10^{15}\text{m}^3/\text{s}^2)$
Jupiter	778,4	374,3	
Saturne	1424	928,4	

1.4 La loi de la gravitation universelle

Kepler a décrit avec précision le mouvement des planètes, mais il ne l'a pas expliqué. Il faut attendre le XVII^e siècle et Isaac Newton pour comprendre pourquoi les planètes suivent ces trajectoires elliptiques.

Newton propose que toutes les masses s'attirent mutuellement avec une force qui dépend de certaines de leurs caractéristiques. Il va montrer ainsi que l'interaction qui fait tomber un objet sur Terre est aussi responsable du mouvement des planètes autour du Soleil. Cette idée révolutionnaire unifie les phénomènes terrestres et célestes sous une même loi.

Cette loi permet non seulement d'expliquer les trajectoires des planètes décrites par Kepler, mais aussi d'autres phénomènes tels que la chute des objets sur Terre, les marées ou encore le mouvement des satellites artificiels.

Newton montre que les lois de Kepler sont une conséquence directe de la gravitation universelle : en appliquant ses lois du mouvement et la force gravitationnelle, il retrouve les trajectoires elliptiques des planètes. C'est ainsi que la physique moderne voit le jour : un même principe explique à la fois le mouvement des planètes et celui des objets terrestres.

2 La loi de la gravitation universelle

2.1 La démarche de Newton

Nous allons énoncer la loi de la gravitation universelle en suivant la démarche de Newton.

La première idée de Newton est d'interpréter le mouvement de la Lune autour de la Terre comme une chute libre. Voici une animation qui illustre cette interprétation :

ILLUSTRATION

Tout objet proche de la surface de la Terre est soumis à une force gravitationnelle. Par exemple, une pomme que vous tenez dans la main subit une accélération dirigée vers le centre de la Terre, d'intensité $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Si vous lâchez cette pomme, elle tombe. Si vous la lancez verticalement, elle suit une trajectoire parabolique avant de retomber.

En s'appuyant sur cette idée, Newton a imaginé un tir oblique où la vitesse initiale est si grande que l'objet ne retombe jamais au sol. La Lune, selon cette vision, est en perpétuelle chute libre autour de la Terre, mais sa vitesse lui permet de « manquer » la Terre en permanence.

Les observations montrent que la trajectoire de la Lune est approximativement circulaire. Nous allons donc supposer dans la suite qu'elle décrit un mouvement circulaire uniforme (MCU) autour de la Terre, avec une vitesse d'intensité constante. Ce modèle implique que la Lune possède une accélération centripète a_L , que nous allons comparer à l'accélération d'un objet en chute libre sur Terre.

ILLUSTRATION

Pour rappel :

1. $a_L = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$
2. Le rayon Terre-Lune est $R = 385000$ km
3. Le rayon de la Terre est $R_0 = 6370$ km

Exercice 2.1.

1. Calculer $\frac{g}{a_L}$.
2. Calculer $\frac{R}{R_0}$.
3. Dédurre que $\frac{g}{a_L} \simeq \left(\frac{R}{R_0}\right)^2$.

Newton en déduit que la force exercée par la Terre sur la pomme, $\vec{F}_{T/P}$, est de même nature que celle exercée sur la Lune, $\vec{F}_{T/L}$. Les résultats de l'exercice précédent montrent que cette force est proportionnelle à $\frac{1}{R^2}$.

Autrement dit, l'intensité de la force d'attraction terrestre diminue avec le carré de la distance au centre de la Terre.

Exercice 2.2. Exercice 1. À partir du graphique, comment évolue la force gravitationnelle lorsque la distance double ?

2. Déterminer la valeur de la force lorsque $d = 2$ m et $d = 10$ m.

Nous observons que plus la distance entre les objets est grande, plus la force gravitationnelle diminue. Cette observation nous amène à identifier les paramètres influençant cette force.

2.2 Quels sont les paramètres qui influencent cette force ?

D'après la deuxième loi de Newton, la force gravitationnelle $\vec{F}_{T/L}$ est reliée à l'accélération de la Lune par :

$$\vec{F}_{T/L} = m_L \vec{a}_L.$$

On en déduit que cette force dépend de la masse de la Lune, m_L .

Un autre paramètre intervient : la masse de la Terre, m_T . En effet, selon la loi des actions réciproques, la Lune exerce également une force sur la Terre, $\vec{F}_{L/T}$. Ces deux forces sont opposées mais de même intensité :

$$\vec{F}_{T/L} = -\vec{F}_{L/T}.$$

D'après la deuxième loi de Newton, $\vec{F}_{T/L}$ dépend donc aussi de la masse de la Terre.

ILLUSTRATION

2.3 La loi de la gravitation universelle

En résumé, la force $\vec{F}_{T/L}$ est :

1. proportionnelle aux masses m_L et m_T ,
2. inversement proportionnelle au carré de la distance R entre les deux corps.

Le génie de Newton a été d'étendre ce raisonnement à tous les astres du système solaire, puis à tous les corps matériels. Il en a déduit une loi fondamentale de la nature :

i Loi de la gravitation universelle

Deux corps ponctuels s'attirent avec une force dirigée selon la droite qui les joint. L'intensité de cette force est proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare :

$$F = k_g \frac{m_1 m_2}{d^2}.$$

La constante k_g est universelle. Elle a été estimée par Newton et mesurée avec précision par Cavendish en 1798 :

$$k_g = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}.$$

Cette valeur montre que la force gravitationnelle est généralement faible. Elle diminue rapidement lorsque la distance entre les objets augmente. Pour mieux comprendre cette relation, représentons graphiquement la variation de la force gravitationnelle entre deux objets en fonction de leur distance. On choisit deux masses $m_1 = m_2 = m$ de sorte à ce que $k_g m^2 = 1$. Ceci permet d'écrire que $F_{m_1/m_2} = \frac{1}{d^2}$. Voici une représentation graphique de F_{m_1/m_2} en fonction de la distance entre les objets.

Exercice 2.3.

1. Si la distance entre deux objets double, comment est modifiée la force gravitationnelle entre eux ?
2. Un astronaute lâche un objet en chute libre sur une planète inconnue. Son accélération augmente-t-elle au cours de la chute ?
3. Le poids d'un kilogramme de plumes est-il le même sur la Terre et sur la Lune ? Justifier.

Exercice 2.4. Calcule la force d'attraction que tu exerces sur ton voisin le plus proche. Explique ensuite pourquoi tu n'es pas collé à ton voisin.

2.4 Applications

Pour les exercices qui suivent, les constantes suivantes seront utilisées.

Constante	Valeur
Constante gravitationnelle G	$6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$
Accélération terrestre g	$9,81 \text{ m/s}^2$
Masse de la Terre m_T	$5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$
Masse du Soleil m_S	$1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$

2.5 Mouvement des astres dans le système solaire

La première loi de Kepler dit que la trajectoire des planètes autour du soleil est elliptique. Voici une représentation de quelques unes de ces trajectoires:

Tu peux constater que les trajectoires ont l'air d'être des cercles: il se fait que les ellipses ont des foyers très proches. Nous supposons donc, afin de faciliter les calculs, que les trajectoires des astres dans le système solaire sont circulaires. Ceci nous permettra de faire appel à la théorie des MCU pour résoudre les exercices.

Voyons un exemple d'application pour trouver la vitesse ou la période de révolution d'un astre.

Exemple 2.1. Dans cet exemple, nous allons estimer la vitesse orbitale de Neptune, en sachant que le rayon de l'orbite de Neptune autour du soleil est 30 fois plus grande que le rayon de l'orbite de la Terre autour du soleil.

Explicitons ce que dit l'énoncé de l'exemple:

1. $F_{S/N} = k_g \frac{m_S m_N}{R_N^2}$
2. $R_N = 30 R_T$

D'après la deuxième loi de Newton, on a que $F_{S/N} = m_N a_N$, où $a_N = \frac{v^2}{R_N}$ est l'accélération centripète.

On a donc $v^2 = k_g \frac{m_S}{R_N}$. Comme $R_N = 30 R_T = 30 \cdot 6,37 \cdot 10^6 \text{m}$, on a que

$$v^2 = k_g \frac{m_S}{R_N} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{1,99 \cdot 10^{30}}{6,37 \cdot 10^6} = \frac{6,67 \cdot 1,99}{6,37} \cdot 10^{13} = 2,0810^{13} \text{m}^2/\text{s}^2$$

Donc $v \simeq 4,5 \cdot 10^6 \text{m/s} = 4,5 \text{km/s}$.

Exercice 2.5. Un satellite artificiel tourne autour de la Terre à une altitude de 500 km.

1. Exprime le rayon de son orbite en fonction du rayon terrestre.
2. Calcule sa vitesse orbitale en supposant que $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$.
3. Donne la période de révolution du satellite.

3 Détermination de la masse des corps célestes

La loi de la gravitation est une des seules manières dont nous pouvons mesurer la masse des astres.

Prenons l'exemple de la Terre. Comment peut-on déterminer sa masse sans avoir à la "peser" directement ?

L'idée repose sur la relation entre la force gravitationnelle et l'accélération gravitationnelle g .

Nous savons que tout objet de masse m situé près de la surface terrestre subit une accélération $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Cette accélération est due à la force gravitationnelle exercée par la Terre.

En appliquant la deuxième loi de Newton :

$$mg = F_{\text{grav}} = k_g \frac{mm_T}{R_T^2}$$

On peut simplifier :

$$g = k_g \frac{m_T}{R_T^2}$$

D'où :

$$m_T = k_g \frac{g R_T^2}{G}$$

Ce raisonnement nous permet de déterminer la masse de n'importe quel astre en connaissant son rayon et son influence sur un objet en orbite autour de lui ou à sa surface.

Exercice 3.1. En utilisant $g_M = 3,71 \text{ m/s}^2$ et $R_M = 3,39 \times 10^6 \text{ m}$, calcule la masse de Mars.

Exercice 3.2. Le but de cet exercice est de calculer la masse du Soleil, sur base du mouvement de la Terre. 1. Calcule la vitesse de la terre autour du soleil, sachant que la distance Terre-Soleil vaut 150 millions de km. 2. Déduis-en la masse du Soleil.

4 La gravité autour de la Terre

L'accélération gravitationnelle varie avec l'altitude. Considérons bille de plomb de 1kg. Calcule la force de gravitation exercée par la Terre sur cette masse si:

1. elle est à 10m au dessus de la surface de la Terre.
2. elle est à 10km au dessus de la surface de la Terre.
3. elle est dans la Station Spaciale Internationale (400km d'altitude).

ILLUSTRATION

Pour un objet à la surface de la Terre, nous avons $g = \frac{G m_T}{R_T^2} = 9,81 \text{ m/s}^2$. Mais si l'objet est à une altitude h , la distance qui le sépare du centre de la Terre devient $R_T + h$.

La nouvelle accélération gravitationnelle est donc :

$$g_h = \frac{G m_T}{(R_T + h)^2}$$

Ainsi, plus on s'éloigne de la Terre, plus la gravité diminue.

Exercice 4.1.

1. Calcule la gravité ressentie par un astronaute à bord de l'ISS, située à 400 km d'altitude.
2. Compare cette valeur avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

5 Le champ gravitationnel

Nous avons vu que l'intensité de l'accélération de pesanteur d'un objet proche de la Terre dépend de son altitude. En effet, pour une altitude donnée, nous avons vu que

$$g_h = \frac{G m_T}{(R_T + h)^2}$$

Voici un schéma qui représente divers accélérations pour différentes masses, autour de la Terre.

ILLUSTRATION

Ce mode de représentation porte le nom de *champ gravitationnel*: on place en chaque point autour de la terre un vecteur dont l'intensité vaut g_h et dont le sens est vers le centre de la Terre. Ce mode de représentation permet d'observer visuellement l'influence que la terre exerce sur les objets proches d'elle.

Formellement, on définit le **champ gravitationnel** \mathbf{g} en tout point de l'espace comme, autour de l'objet de masse M :

$$\vec{g} = \frac{GM}{r^2} \vec{u},$$

où \vec{u} représente un vecteur de longueur 1 pointant vers le centre de l'objet.

Cela signifie que tout objet de masse m subira une force gravitationnelle :

$$\mathbf{F}_{M/m} = m\mathbf{g}$$

On retrouve bien la loi de la gravitation universelle !

6 Orbite géostationnaire et satellites

Un satellite géostationnaire est un satellite qui reste immobile par rapport à la Terre. Cela signifie qu'il doit tourner en **exactement 24h**.

ILLUSTRATION

Exercice 6.1.

2. Ecris une formule qui lie la période d'un satellite et la force de gravitation que celui-ci subit par la Terre.
3. Déduis-en l'altitude de ce satellite si celui-ci est en orbite géostationnaire.