La dynamique :
Les lois de Newton et la gravitation

La **dynamique** est la branche de la mécanique qui a pour but d'expliquer le mouvement d'un objet en considérant les forces qui agissent sur lui.

Une **force** est une influence qui agit sur un objet et qui a tendance à modifier son vecteur vitesse. La force est un vecteur : pour la décrire, il faut spécifier son module, mais aussi l'orientation selon laquelle elle agit.

I. Les 3 lois de Newton (rappel – cours « Forces »)

Enoncé de la 1ère loi ou loi d'inertie :

Un point matériel qui n'est soumis à aucune force (ou à une résultante de force nulle) ne modifie pas sa vitesse ; il suit un mouvement rectiligne uniforme (MRU).

Si $\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \vec{v} = \text{constante}$

Cette loi, énoncée préalablement par Galilée s'oppose à la conception aristotélicienne qui affirmait que tout mouvement d'un objet nécessite l'action d'une force (vitesse proportionnelle à la force).
Autrement dit, tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins qu'une force résultante n'agisse sur lui.

Définition : référentiel d'inertie
On appelle référentiel d'inertie (ou galiléen) un référentiel pour lequel la loi d'inertie est vérifiée.

Théorème :
Tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel d'inertie est également un référentiel d'inertie.

Ex : un train se déplaçant à 100 km/h est un référentiel d'inertie, c'est-à-dire que la loi d'inertie ou 1ère loi de Newton est valable. Autrement dit, lorsque nous voyons un objet se déplacer à vitesse constante dans un train, nous pouvons affirmer que la résultante des forces agissant sur cet objet vaut 0.

Développement :

La réciproque est également vraie : tous les référentiels d'inertie sont en translation rectiligne les uns par rapport aux autres.

<u>Théorème</u> :
La force agissant sur un PM est la même dans tous les référentiels d'inertie

Développement :

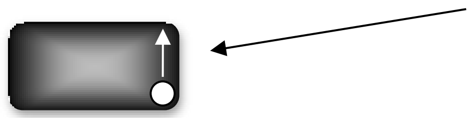
Il existe **des référentiels non inertiels**. En voici une illustration.

<u>Exemple</u> : voiture dans un virage.
Il arrive souvent qu'un conducteur se trouve agacé par le mouvement de va et vient de certains objets dans sa voiture lors d'accélération, de décélération en ligne droite ou surtout dans les virages. Le conducteur remarque que les objets se déplacent à gauche lorsqu'il tourne à droite et réciproquement. Quelles sont les forces qui agissent sur l'objet ? Il y a manifestement son poids et la force de soutien du plancher, ces forces se compensant exactement (le sol étant plat). La somme des forces est donc nulle.
Le conducteur doit bien admettre que la physique de Sir Isaac Newton est violée puisque les objets sont accélérés alors que $\sum \vec{F} = \vec{0}$.

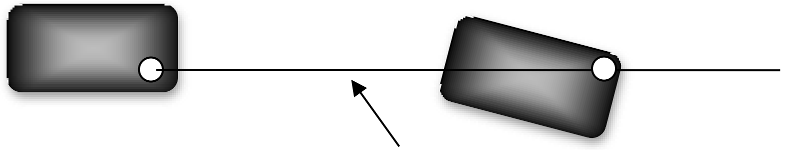
Un observateur placé au bord de la route voit les choses différemment (heureusement !). Pour lui, les objets en question ne subissent aucune force et doivent donc garder une vitesse constante : leur trajectoire est une droite. Il voit par contre la voiture tourner : son accélération est centripète (dirigée vers le centre du cercle) et la force responsable de cette accélération est la force de frottement entre les pneus et la route. Pour cet observateur, une face de la voiture se déplace vers les objets plutôt que le contraire :

Référentiel lié à la voiture (référentiel accéléré)

Trajectoire « accélérée » de l'objet



Référentiel lié au sol (référentiel inertiel)



Trajectoire rectiligne de l'objet (MRU)

On est donc obligé d'admettre que la physique n'est pas la même dans tous les référentiels.
Si l'on revient à l'exemple initial, on remarque par contre que la force observée dans les différents référentiels n'est plus la même : l'observateur placé dans le référentiel non-inertiel (la voiture) postule l'existence de forces responsables de l'accélération de l'objet relativement à ce référentiel. On parle alors de ***forces d'inertie ou pseudo-forces notées*** $\vec{F}_{in}$.
Cette action ne correspond pas à une réaction comme l'exige la 3ème loi de Newton (c.f page suivante).

Enoncé de la 2ème loi de Newton

Une force $\vec{F}$ appliquée à un corps de masse m lui imprime une accélération $\vec{a}$ telle que :

$\vec{F} = m\vec{a}$ où m = masse du corps subissant la force [kg]

L'accélération a la même direction et le même sens que la force (vecteurs colinéaires). Leurs intensités satisfont l'équation F = m· a. Si plusieurs forces agissent sur un corps donné, il faut faire figurer leur résultante dans la seconde loi de Newton :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

La seconde loi de Newton traduit les idées suivantes :
1.- La force est la cause de la variation du mouvement, c'est-à-dire de l'accélération.
2.- Pour provoquer une plus grande accélération sur un corps donné, il faut lui appliquer une force plus intense.
3.- Pour provoquer la même accélération sur deux corps de masses différentes, il faut appliquer une force plus intense sur le corps de plus grande masse. Il est plus difficile de modifier la vitesse d'un camion que celle d'une balle de ping-pong. Ainsi, la relation de cause à effet entre la force et l'accélération doit tenir compte de l'inertie de l'objet sur lequel la force s'applique, c'est-à-dire de sa masse.
4.- La masse d'un corps apparaît comme **la mesure de son inertie**, c'est-à-dire de sa résistance aux variations de vitesse. La masse d'un corps est un scalaire (nombre) qui nous indique dans quelle mesure il est difficile de faire varier la vitesse de ce corps, en module ou en direction.
5.- Un corps en *mouvement circulaire uniforme* est soumis à une force dirigée, comme l'accélération, vers le centre de la trajectoire. La force est centripète. Si le corps de masse m se déplace à la vitesse v sur une circonférence de rayon R, la force qui lui est appliquée a une intensité :

$$F = ma = m\frac{v^2}{R} = m\omega^2 R$$

Enoncé de la 3ème loi de Newton

Si un corps rigide A exerce une force $\vec{F}_{BA}$ sur un corps rigide B, le corps B exerce sur A une force $\vec{F}_{AB}$ opposée à $\vec{F}_{BA}$:

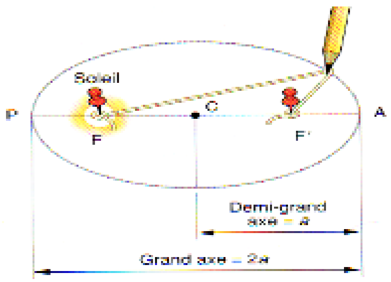
$$\vec{F}_{BA} = -\vec{F}_{AB}$$

La force exercée par le premier corps sur le second est appelée « action » et la force exercée par le second sur le premier est appelée « réaction ». Les deux forces ont la même intensité : $F_{BA} = F_{AB}$

Abordons à présent l'histoire de la gravitation :
L'histoire commence avec les anciens observant les mouvements des planètes parmi les étoiles et déduisant finalement qu'elles se déplaçaient autour du soleil (Aristarque de Samos II s. av. JC) un fait qui fut redécouvert plus tard par Copernic. Mais alors quel était leur mouvement autour du soleil ?
Tycho Brahé (1546 - 1601) eut l'idée de mesurer les positions réelles des planètes dans le ciel. C'est ce qu'il fit sur une petite île proche de Copenhague.
Kepler (1571 - 1630) reprit les calculs et découvrit certaines lois remarquables concernant le mouvement planétaire.

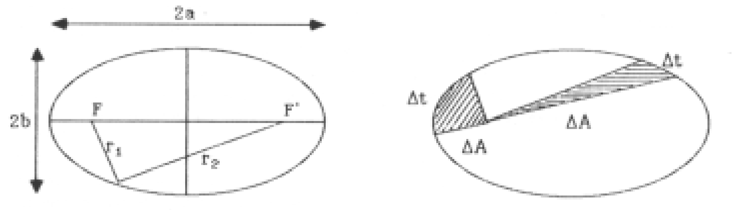
II. Lois de Kepler

1ère loi de Kepler (1604) : **Chaque planète se déplace autour du soleil suivant une trajectoire appelée ellipse avec le soleil à l'un de ses foyers**.



Construction géométrique d'une ellipse : 2 clous placés au foyer, avec une ficelle et un crayon. L'ellipse est le lieu géométrique des points dont la somme des distances à 2 points fixes (les foyers) est une constante. C'est en fait un cercle aplati.

2ème loi de Kepler (*1604*) : **les planètes ne tournent pas autour du soleil à une vitesse uniforme, mais se déplacent plus rapidement lorsqu'elles sont plus proches du soleil**. En fait, c'est la loi des aires. La vitesse orbitale de chaque planète est telle que le rayon balaye des surfaces égales dans des temps égaux.



Ellipse : $r_1 + r_2 = 2a$ — Loi des aires

3ème loi de Kepler (1618) : **Le carré de la période de l'orbite est proportionnel au cube du rayon de l'orbite** (dans le cas d'une ellipse, nous considérons en lieu et place du rayon le demi-grand axe a de l'orbite) :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M_{soleil} + M_{planète})}{4\pi^2}$$

Autrement dit, lorsque la trajectoire se rapproche d'un cercle, le temps qu'une planète prend pour faire le tour du Soleil est proportionnel à la puissance 3/2 de la distance la séparant du Soleil (la fraction 3/2 représentant la quinte juste dans la gamme tempérée – Kepler parlera d'« harmonie des sphères »). Calculons la masse du Soleil.

Développement :

III. Développement historique de la gravitation

Quelle est la cause du mouvement des planètes ?
Du temps de Galilée (1564 - 1642), l'on pensait que derrière les planètes il y avait des anges qui battaient de leurs ailes.

Principe d'inertie de Galilée :
Si quelque chose se déplace à vitesse constante en ligne droite sans être perturbé par quelque chose, alors cet objet continuera sa trajectoire à vitesse constante et en ligne droite.

Newton
Newton disait que la seule manière de modifier le mouvement d'un corps est d'utiliser une force. Si le corps accélère, c'est qu'une force a été appliquée dans la direction du mouvement.
Si la direction du mouvement change, c'est qu'une force a été appliquée latéralement.
En conclusion, Newton ajouta l'idée qu'une force est nécessaire pour changer la vitesse ou la direction du mouvement d'un corps.
Plus un objet est massif, plus grande sera la force nécessaire pour produire une certaine accélération.
Idée brillante : il n'y a pas besoin de force tangentielle à la trajectoire pour maintenir une planète sur son orbite (le souffle des anges n'est pas nécessaire !).
S'il n'y avait rien, la planète s'écarterait en ligne droite.
La déviation est à angle droit du mouvement, non dans la direction du mouvement.

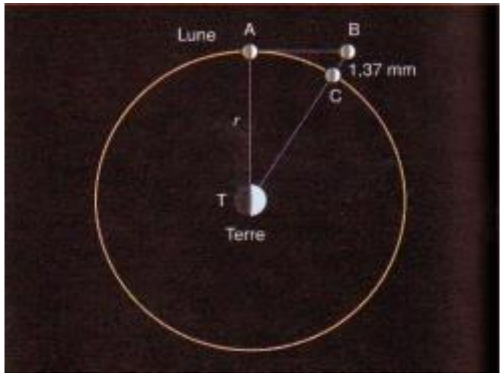
Ainsi, la force nécessaire pour contrôler le mouvement d'une planète autour du soleil n'est pas une force autour du soleil mais une **force vers le soleil**.

- Newton réalisa que le soleil pouvait être le siège ou l'organisation de forces qui gouvernent le mouvement des planètes.
- Il démontra que la loi des aires de Kepler (2ème loi) amenait à l'idée que toutes les forces sont dirigées vers le soleil (forces dites « centrales »). En fait, la loi des aires serait une conséquence de ce principe.
- A partir de la 3ème loi de Kepler, on montre que plus une planète est éloignée, plus faible sont les forces. La force serait inversement proportionnelle au carré de la distance.
- En combinant les 2 lois, Newton trouva qu'il devait y avoir une force inversement proportionnelle au carré de la distance, dirigée selon la droite reliant les 2 objets (par exemple le Soleil et la Terre).
- Newton pensait que chaque planète maintenait ces Lunes de la même façon que développé ci-dessus.

Newton connaissait déjà la force d'attraction nous maintenant sur la Terre, aussi il proposa que cette force soit une loi universelle - que toute chose attire toute autre chose. Essayons de le montrer en se posant tout d'abord la question suivante :

Est-ce que l'attraction par la Terre de ses habitants est égale à l'attraction par la Terre de la Lune (inversement proportionnel au carré de la distance) ?

Si un objet tombe de 5 m à la surface de la Terre durant la première seconde, alors de combien doit tomber la Lune dans le même temps ? Nous pourrions dire que la Lune ne tombe pas du tout. Mais s'il n'y avait pas de force agissant sur la Lune, elle s'écarterait en ligne droite, tandis qu'au lieu de cela elle se déplace sur un cercle, ce qui fait qu'en réalité elle tombe de là où elle aurait été s'il n'y avait pas eu de force du tout. Nous pouvons calculer en 1 seconde de combien se déplace la Lune sur son orbite (R= 384'000 km et période : 27,3 jours) et nous pouvons alors calculer de combien elle tombe en 1 seconde (de combien elle s'écarte de la ligne droite) : 1,3 mm/s. Ceci s'explique très bien par la loi de la gravitation universelle qui fait intervenir au dénominateur le carré de la distance : le rayon de la Terre R_T vaut environ 6'400 km et si l'objet est à la surface de la Terre, il tombe de 5m en 1s. Pour la Lune, située 60 fois plus loin, la chute devrait être de 5m/3600 = 1,3 mm (si la force est inversement proportionnelle au carré de la distance !). Newton fit le calcul et obtint le bon résultat !



En fait la Lune tombe en ce sens qu'elle s'écarte en tombant de la ligne droite qu'elle suivrait s'il n'y avait pas de forces.
Prenons un exemple à la surface de la Terre, un objet lâché près de la surface de la Terre va tomber de 5m pendant la première seconde. Un objet jeté horizontalement tomberait également de 5 mètres, quand bien même il se déplace horizontalement, il tombe toujours des mêmes 5 m dans le même temps. Que se passe-t-il si nous tirons un projectile de plus en plus vite ? N'oublions pas que la surface de la Terre est courbe. Si nous tirons suffisamment vite, alors en tombant de 5m, il peut se trouver exactement à la même hauteur au-dessus du sol que celle à laquelle il était auparavant. Comment cela peut-il se faire ? Il tombe toujours, mais la Terre s'incurve de telle sorte qu'il tombe « autour » de la Terre !

Calculons la vitesse que devrait avoir ce corps pour être en orbite autour de la Terre (vitesse orbitale).

Développement :

Applications : les marées (due à l'influence de la Lune sur la Terre)
Si la Lune tire toute la Terre vers elle, pourquoi la Terre ne tombe-t-elle pas « droit » sur la Lune ? Car la Terre joue le même jeu que la Lune, elle se déplace sur un cercle autour d'un point (le centre de masse du système Terre-Lune) qui est à l'intérieur de la Terre et non en son centre. Donc, la Lune et la Terre tournent autour d'une position centrale.

IV. La loi de la gravitation

Qu'est-ce que la loi de la gravitation ?

Tout objet de masse *m* dans l'univers attire tout autre objet de masse *m'* avec une force qui, pour n'importe lequel des corps, est proportionnelle à la masse de chacun et varie inversement avec le carré de la distance r entre eux :

$F = G\, m\, m' / r^2$ Loi de la gravitation universelle (1687)

G désigne la constante de gravitation universelle = $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ [$N.m^2.kg^{-2}$] (voir F&T p.135 et p.163)
r = la distance entre les 2 masses [m]

La force de gravitation universelle
Newton écrivait : « Je commençai à penser que la pesanteur pouvait bien s'étendre jusqu'à l'orbite de la Lune et je comparai la force nécessaire pour maintenir la Lune sur son orbite avec celle de la pesanteur sur la Terre. » (*Principes mathématiques de la Philosophie Naturelle, 1687*).

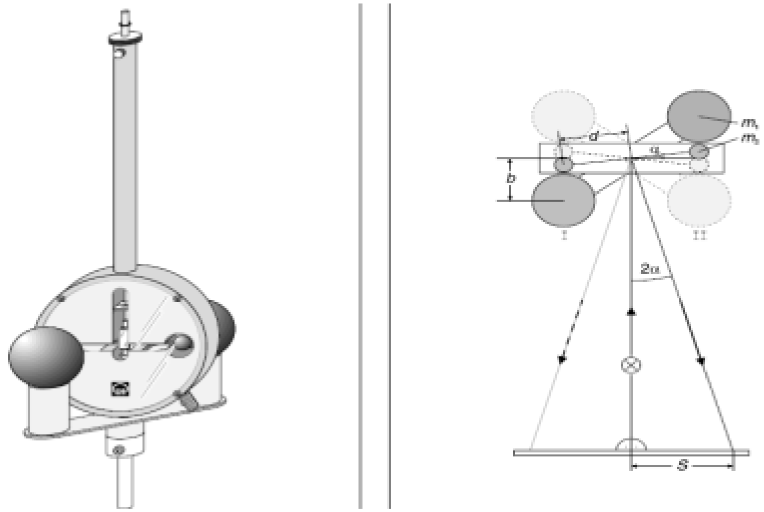
Remarque :
Nous avons défini la masse comme étant une mesure de l'inertie d'un objet (**masse inertielle**), c'est-à-dire de sa tendance à conserver son état de mouvement. D'après la loi de la gravitation universelle, la masse d'un objet est également une mesure de sa capacité à générer et à subir des forces gravitationnelles (**masse gravitationnelle**). De prime abord, il ne semble pas y avoir de raison fondamentale pour que la quantité décrivant l'inertie d'un objet soit la même que celle qui décrit son action gravitationnelle. La théorie de la relativité générale, énoncée par Albert Einstein en 1916, permet de démontrer que la masse inertielle est nécessairement égale à la masse gravitationnelle (**principe d'équivalence**).

V. Forme de la Terre et masse de la Terre

Pourquoi la Terre est-elle ronde ?
On peut comprendre que la Terre est ronde simplement parce que toute chose attire toute autre chose, et de ce fait elle s'est attirée elle-même autant qu'elle a pu.
Si nous allons plus loin, la Terre n'est pas exactement une sphère car elle tourne, et ceci introduit des effets centrifuges qui tendent à s'opposer à la gravitation près de l'équateur. Il s'ensuit que la Terre doit être elliptique proche d'une sphère de même pour le soleil, la Lune.

Comment déterminer la masse de la Terre ?
C'est Henri Cavendish (1731-1810), qui fit la première tentative pour mesurer la gravitation à petite échelle. Il publia en 1798 les résultats de son expérience de « pesée du monde ». Le montage confirmait la validité de la loi d'attraction universelle et livrait la première estimation

expérimentale fine de la constante de gravitation universelle G, c'est-à-dire du coefficient qui intervient dans la loi d'attraction universelle. Cavendish utilisait un pendule de torsion à l'extrémité duquel sont accrochées deux petites sphères pesantes.



Lorsque deux boules massives identiques sont placées à proximité de chacune des deux sphères, celles-ci sont attirées et le pendule tourne. Le système est conçu de telle façon que l'attraction gravitationnelle entre les grandes et les petites sphères s'oppose à la torsion du fil. L'attraction des masses fait tourner le pendule d'un très petit angle, et influe sur sa période d'oscillation ; la mesure de la période conduit notamment à G. Pour comprendre quelle virtuosité expérimentale Cavendish déploya, il faut réaliser que, dans ce montage, la force d'attraction entre les corps est 500 millions de fois plus petite que leur poids !
Ce fut Cavendish également qui, connaissant la constante de gravitation G mesura pour la première fois la masse de la Terre. En effet, en sachant avec quelle force la Terre attire les objets, nous pouvons déterminer la masse de la Terre. Cette expérience fut appelée « **pesée de la Terre** » :

$F = G\,M\,m'/\,r^2$ Loi de la gravitation universelle

où

F = Poids de l'objet de masse m' = force avec laquelle l'objet est attiré par la Terre

$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ $[N{\cdot}m^2{\cdot}kg^{-2}]$

$r = R_T$ = 6'400 km (rayon de la Terre) $= 6{,}4{\cdot}10^6$ [m]

m' = masse d'un objet sur Terre [kg]

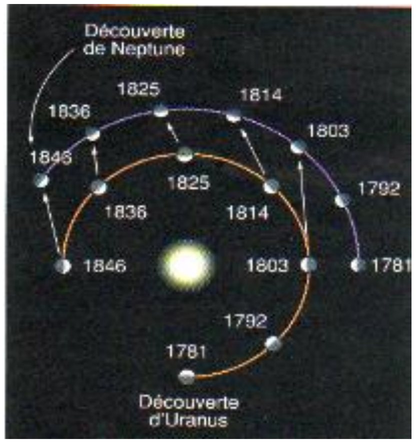
et

M = la masse de Terre (notre inconnue)

Nous pouvons donc en déduire la masse de la Terre !

__Développement :__

VI. Découverte de planètes



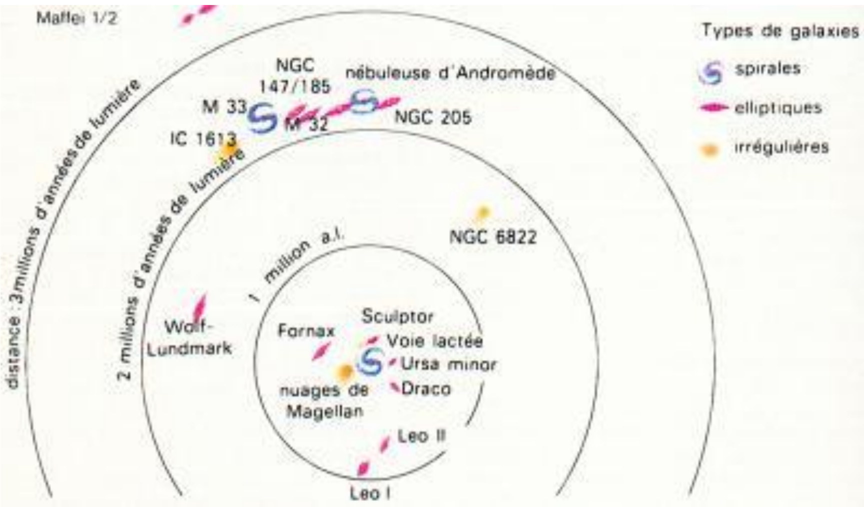
La trajectoire d'Uranus par exemple est dictée par l'attraction du soleil mais également par l'influence des autres planètes du système solaire.
Historiquement, il s'est trouvé que la trajectoire d'Uranus était singulière même en prenant en compte l'effet gravifique des autres planètes. 2 scientifiques, Adams et Le Verrier,

proposèrent l'idée suivante : peut-être existe-il une autre planète, noire et invisible, que les hommes n'ont pas encore vue. Cette planète pourrait attirer Uranus. Ils calculèrent où devrait se trouver cette planète afin de créer les perturbations observées. Les astronomes regardèrent dans la direction proposée et trouvèrent la planète Neptune en 1846.

A plus grande échelle…

Ces exemples montrent que les lois de Newton sont correctes dans le système solaire. Est-ce le cas plus loin ? Est-ce que les étoiles s'attirent de la même façon ? La preuve est catégorique avec les étoiles doubles.

Cette loi est également confirmée dans le cas d'amas globulaires d'étoiles et d'amas de galaxies (Notre galaxie, la Voie Lactée, a 2 satellites, les Grand et Petit Nuage de Magellan. Ce sont 2 galaxies situées à 170'000 et 200'000 AL, reliées à notre Galaxie par des ponts ténus de matière. Le Groupe Local, auquel appartient notre galaxie, regroupe au moins 35 membres dont Andromède située à $2{,}25 \cdot 10^6$ AL observable à l'œil nu dans la constellation d'Andromède à proximité du carré de Pégase). (c.f F&T p.211).



Nous pourrions nous dire : pourquoi l'ensemble n'est pas simplement en forme de boule ? Et notamment pour la Voie Lactée, notre propre galaxie ?

Parce que la galaxie est en rotation et possède un moment cinétique (notion vue au cours d'option), elle doit se contracter nécessairement dans un plan (loi de conservation du moment cinétique).

Problèmes

1.-. Une rondelle de hockey de 160 g qui glisse sur une patinoire à une vitesse initiale de 10 m/s prend 25 m pour s'immobiliser en raison d'une force de frottement constante qui agit dans le sens inverse de son mouvement. Déterminez le module de cette force.

2.- Un avion de 15'000 kg doit décoller sur une piste de porte-avions de 120 m de longueur : pour ce faire, il doit atteindre une vitesse d'au moins 100 m/s. Ses réacteurs seuls étant incapables de fournir la poussée nécessaire, on l'accroche à une catapulte située sous le pont du porte-avions. Calculez le module minimal de la force résultante qui doit être fournie par la catapulte et les réacteurs. (On suppose que cette force est constante.)

3.- Retenus par une ceinture de sécurité, 2 mannequins d'essai de choc de 75 kg foncent à 60 km/h dans un mur. L'avant de la voiture se déforme, ce qui rend l'impact moins brusque : la vitesse de chaque mannequin passe de 60 km/h à 0 sur une distance de 50 cm. Quel est le module de la force exercée par la ceinture de sécurité sur le mannequin pendant l'impact ? (On suppose que l'accélération est constante.)

4.- Un ballon à air chaud de masse M descend avec une accélération de module a (< g). Soit *m* la masse de lest. Combien de lest doit-on lâcher pour que le ballon accélère vers le haut avec la même accélération (en norme) ? On suppose que la force de poussée reste la même. Exprimez *m* en fonction de M, a et g.

5.- Une personne de 75 kg se tient debout sur une balance dans un ascenseur. Que peut-on dire du mouvement si la balance indique (en sachant que la balance indique la norme de la force normale équivalente au « poids apparent ») :

a) 735 N ?

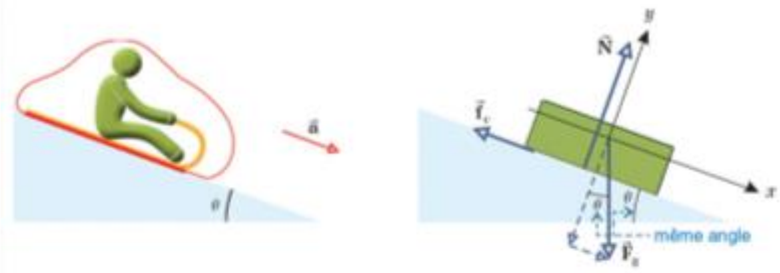
b) 600 N ?

c) 900 N ?

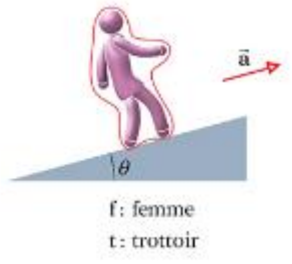
6.- Un enfant de 20 kg est assis sur une luge de 1 kg. Il glisse le long d'une pente inclinée à 15°. La force de frottement cinétique entre la luge et la pente a une valeur de 45 N.

a) Que vaut l'accélération de l'enfant sur la luge ?

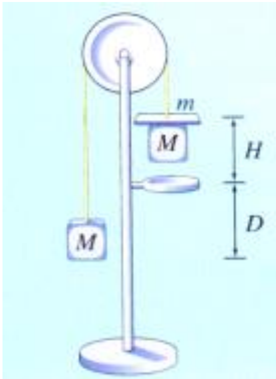
b) Si l'enfant est initialement au repos, quel est le module de sa vitesse après avoir glissé sur une distance de 20 m ?



7.- Une femme marche sur un trottoir glacé incliné selon un angle de 5°. Le coefficient de frottement statique est de 0,1. Calcule l'accélération maximale de la femme.

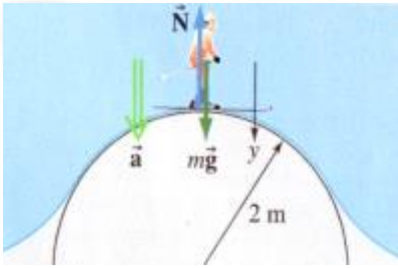


8.- La machine d'Atwood est un dispositif qui permet de vérifier directement la deuxième loi de Newton. On peut aussi l'utiliser pour mesurer g. Deux blocs identiques de masse M sont suspendus de part et d'autre d'une poulie. Une petite lamelle carrée de masse m est placée sur l'un des blocs. Lorsqu'on lâche le bloc, il accélère sur une distance H jusqu'à ce que la lamelle soit arrêtée par un anneau qui laisse passer le bloc.
A partir de là, le système se déplace avec une vitesse constante que l'on mesure en chronométrant la chute (temps t) sur une distance D. Montrer que :



$$g = \frac{(2M + m)D^2}{2mHt^2}$$

9.- Un skieur se déplace sans frottement sur une surface horizontale puis rencontre une bosse hémisphérique d'un rayon de 2 m. Quelle est la vitesse maximale à laquelle il peut passer sur le sommet de la bosse sans que ses skis ne quittent le sol ?

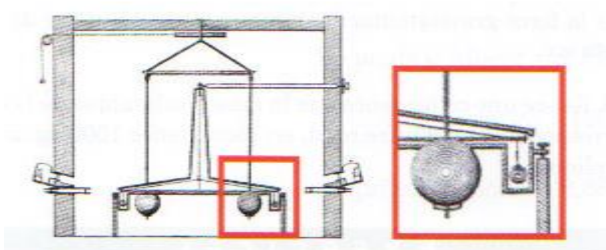


10.- Quelle serait la durée du jour si une personne située à l'équateur avait un poids apparent nul ?

11.- La grande boucle verticale d'un parc d'attractions qui est représentée a un rayon de courbure de 6,5 m à son point le plus élevé.
a) Quel est le module de la vitesse minimale que doit avoir le train pour ne pas quitter les rails à ce point ?
b) Si le module de la vitesse réelle est de 9,5 m/s, quel est le module du poids apparent d'un enfant de 40 kg au point le plus élevé ?

12.- Un pendule suspendu au toit d'un camion fait un angle de 8° avec la verticale. Quel est le module de l'accélération du camion ?

13.- Dans l'expérience de Cavendish de 1798, une sphère de plomb de 0,73 kg était placée à 20 cm (distance « centre à centre ») d'une sphère de plomb de 160 kg. Déterminez le module de la force gravitationnelle que chaque sphère exerçait sur l'autre.



HENRY CAVENDISH, EXPERIMENTS TO DETERMINE THE DENSITY OF THE EARTH.
PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON, 1798

14.- Un astronaute dans l'espace tombe tout droit vers la Terre en chute libre.
Calcule l'accélération au moment où il atteint une altitude de 19'110 km au-dessus de la surface de la Terre.

15.- L'élève qui est à côté de toi en classe a une masse de 60 kg et se trouve à 1m.
Supposons encore que ta masse est de 70 kg.
Quelle force d'attraction gravitationnelle agit sur toi ?

16.-
a.- Calcule l'accélération centripète de la Lune sur son orbite
b.- Calcule la force centripète agissant sur la Lune
c.- Calcule la force gravitationnelle exercée par la Terre sur la Lune
d.- Compare alors ces 2 forces

17.- Une navette spatiale est sur une orbite circulaire à 350 km d'altitude. Détermine sa vitesse orbitale ainsi que sa période. (Station ISS et position)

18.- Détermine l'altitude à laquelle se trouve l'orbite géostationnaire.
A quelle vitesse se déplacent les satellites sur cette orbite ?

19.- L'astronome allemand Karl Schwarzschild (1873-1916) a défini le rayon d'un trou noir de masse M qu'on appelle aujourd'hui le rayon de Schwarzschild R_{schw}.
Sachant que pour un trou noir la vitesse de libération est égale à la vitesse de la lumière, qu'on note c (c= 300'000 km/s), détermine :

1) R_{schw} de la masse de la Terre
2) la masse volumique de ce trou noir

20.-
a) Utiliser la période de la Lune, égale à 27,3 jours et le rayon de son orbite, égal à 384'000 km pour trouver la masse de la Terre.
b) Utiliser la distance Terre-Soleil et la période de la Terre pour trouver la masse du Soleil.

21.- Le Soleil, de masse $2 \cdot 10^{30}$ kg, est en orbite autour du centre de la Voie Lactée à une distance de $2,4 \cdot 10^{20}$ m. Sa période est égale à $2,5 \cdot 10^{8}$ années.
a) Calculez la masse de la galaxie à l'intérieur de l'orbite solaire. Quelle hypothèse devez-vous faire ?
b) Si toutes les étoiles sont comparables à notre Soleil, combien y en a-t-il à l'intérieur de l'orbite ?

22.- Une étoile à neutrons est en rotation avec une période de 1s. Si son rayon est de 20 km, quelle doit être sa masse pour qu'un objet situé à l'équateur reste lié à la surface ?

23.- La lune Io de Jupiter est en orbite circulaire de rayon $4,22 \cdot 10^{5}$ km avec une période de 1,77 jour.
a) La période d'une autre lune de Jupiter, Europe, qui d'ailleurs contiendrait une énorme quantité d'eau salée, est égale à 3,55 jours. Quel est le rayon de son orbite ?
b) Quelle est la masse de Jupiter ?

Illustrations :

- Pulsar
- Trou noir ; sagittarius A
- Exoplanète
- Avion zéro G - apesanteur