

UNE HISTOIRE DE POMME

1. L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE.

La gravitation ? L'homme l'expérimente au quotidien depuis que les pommes tombent des arbres.... Mais pour y comprendre quelque chose, il a fallu que trois génies s'y collent: Galilée, Newton et Einstein.

1.1. L'IDEE DE GALILEE.

Mieux vaut ne pas trop s'approcher de la tour de Pise au début du XVII^e siècle, à moins de porter un casque ... Car Galilée, a la fâcheuse habitude de laisser tomber des boulets de canon et de billes de bois depuis le sommet de la tour.... Ce n'est sans doute qu'une légende. En fait, Galilée travaillait plus simplement dans son laboratoire où il faisait rouler des billes le long des plans plus ou moins inclinés.

Depuis Aristote, il est admis, sans preuve, que plus un corps est lourd et plus il tombe vite. Un résultat que Galilée est bien décidé à vérifier. En mesurant le temps que mettent des boules à tomber, ou bien à glisser le long de plans inclinés, Galilée découvre que 100 kg ou 10 kg, quelle que soit la matière (plomb, bois, plumes), arrivent en même temps au sol (à condition de négliger les frottements de l'air).

Conclusion: l'accélération d'un objet en chute libre ne dépend pas de sa masse. Les conceptions d'Aristote sont balayées....

Mais qu'est-ce qui fait chuter l'objet ??? Galilée ne parle pas de "force de gravité", notamment parce que le concept de force n'existe pas. Il faut attendre Newton.



1.2. NEWTON.

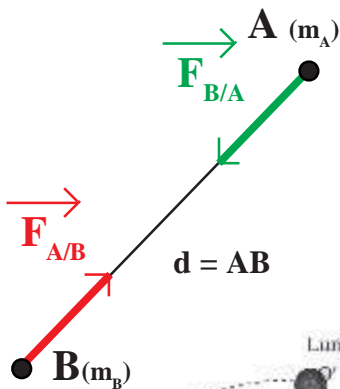
Non, Newton n'a pas découvert la gravitation universelle en regardant tomber des pommes... L'idée lui est venue, de son propre aveu, "en y pensant tout le temps". Il lui faudra plus de vingt ans de cogitations olitaires avant de publier, en 1687, la fameuse "loi de la gravitation universelle".

"Deux corps ponctuels A et B, de masse m_A et m_B , séparés par une distance d , exercent l'un sur l'autre des forces attractives, de même valeur:

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{m_A m_B}{d^2} \quad \text{avec } F \text{ en newton}$$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

m_A et m_B en kilogrammes
 d en mètre



Les forces attractives $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ sont appelées **forces d'interaction gravitationnelle**.

Une pomme exerce donc sur la Terre une force de valeur égale à celle que la Terre exerce sur elle !!!!

L'idée de génie consiste à lier pour la première fois dans l'histoire des sciences, les phénomènes se déroulant sur Terre (la chute du boulet de Galilée) et dans l'Univers (rotation des corps autour du Soleil). Une même force attire le boulet et la Lune, l'attraction de la Terre

Cette loi de gravitation s'écrit donc de la même façon pour des corps volumineux présentant une répartition sphérique de masse. Un **corps à répartition sphérique de masse** est un corps homogène ou formé de couches concentriques homogènes de matière.

C'est le cas des planètes et des étoiles.



Exemple: Attractions la Lune sur la Terre et inversement.

Soit $\vec{F}_{T/L}$ la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre de masse M_T sur la Lune de masse M_L , avec

$$F_{T/L} = G \frac{M_T M_L}{TL^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24} \times 7,34 \times 10^{22}}{(3,84 \times 10^8)^2} = 1,99 \times 10^{20} \text{ N.}$$

De même $\vec{F}_{L/T}$ est la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Lune sur la Terre, ayant même direction, même valeur, mais de sens opposé.

Imaginons un instant que cette force gravitationnelle disparaisse. La Lune partirait comme la pierre d'une fronde après que le lanceur l'ait libérée. Cette force est considérable. Pour retenir notre satellite, il serait alors nécessaire de l'attacher à la Terre par un câble. Même avec le plus résistant des aciers, le diamètre d'un tel câble devrait dépasser 500 km !!



C'est la force gravitationnelle exercée par la Terre qui attire la Lune et la maintient en orbite autour de la Terre. A l'inverse, la Lune exerce donc sur la Terre une force de valeur égale à celle que la Terre exerce sur elle !!!!

Nous ne pouvons pas percevoir directement l'effet de l'attraction lunaire sur notre corps mais une de ses manifestations spectaculaires est le phénomène des marées.

De manière très générale, on désigne par effet de marée la réponse d'un corps placé dans un champ gravitationnel inhomogène (variant d'un point à l'autre). Les diverses parties du corps subissent alors des attractions différentes dont résultent des tensions internes qui les déforment. Les marées terrestres sont provoquées par les variations du champ gravitationnel lunaire d'un bout à l'autre de la Terre.

Le Soleil, plus lointain, mais beaucoup plus massif, contribue aussi aux marées. La force \vec{F}_{ST} d'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil de masse M_S sur la Terre de masse M_T a pour expression et valeur:

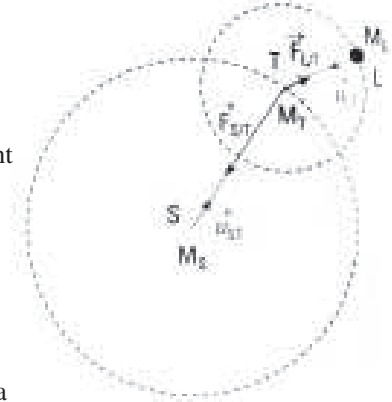
$$F_{ST} = G \frac{M_S M_T}{TL^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{1,98 \times 10^{30} \times 5,98 \times 10^{24}}{(1,50 \times 10^{11})^2} = 1,99 \times 10^{20} \text{ N.}$$

et produit un effet qui équivaut à 40% de celui de la Lune. Les régions tournées vers la Lune subissent une attraction plus forte que celles situées dans la direction opposée. Il en résulte une tension longitudinale à laquelle l'ensemble de la Terre répond, mais l'effet est particulièrement sensible sur les masses fluides océaniques.

Dans certaines conditions, les effets de la marée prennent des proportions cataclysmiques. Ainsi, un passage à faible distance d'un corps très massif peut briser un astre plus petit.

Les astronomes ont été les témoins privilégiés d'un tel événement lors du passage de la comète Shoemaker-Levy au voisinage de Jupiter, en 1992. Un premier passage, le 7 juillet, à 71 400 km de la surface de Jupiter, conduisit à une rupture du noyau de la comète en 21 morceaux dont les tailles s'échelonnaient entre 1 et 5 km. Ces fragments entrèrent directement en collision avec la planète lors de leur second passage, du 16 au 22 juillet 1994. Les impacts successifs provoquèrent de violentes perturbations dans l'atmosphère de Jupiter dont les effets furent observés de la Terre.

La gigantesque planète Jupiter impose aussi une force de marée considérable à son satellite Io. Celui-ci, qui orbite à 422 000 km, est littéralement mâché par la gravitation de Jupiter: son noyau est maintenu liquide et sa surface est couverte des plus grands volcans actifs du système solaire.



Newton tient encore la distance.

La loi de la gravitation universelle, découverte par Isaac Newton, qui fait tourner la Lune et les planètes, est valable pour des distances allant de l'infini jusqu'à 100 micromètres. Certaines théories prédisent qu'aux très courtes distances, de nouvelles forces apparaissent, modifiant la relation selon laquelle deux corps s'attirent en raison de l'inverse du carré de leur distance.

2. L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE ET LES PLANETES EXTRASOLAIRES.

Réfléchissant trop peu de lumière pour être "vues", les planètes extrasolaires (tournant autour d'autres étoiles que le Soleil) ne peuvent être découvertes qu'en analysant la vitesse d'éloignement des étoiles par rapport à la Terre. Un système planétaire tourne autour d'un centre de gravité décalé par rapport à l'axe de l'étoile en son centre. Cela induit des variations infimes de la vitesse radiale des étoiles qui suffisent à signaler la présence d'étoiles ! Depuis 1995, et la première découverte à l'observatoire de Haute-Provence, près de 110 exoplanètes ont ainsi été débusquées. Mais pour repérer des planètes peu massives, telles que la Terre, il faudra persévérer sur d'autres voies prometteuses, comme la photométrie, qui mesure la baisse d'intensité lumineuse résultant du passage d'une planète devant son étoile.

Cinq techniques de détection

3. COMMENT DECRIRE LE MOUVEMENT DE LA LUNE ?

3.1. LE MOUVEMENT DE LA LUNE OBSERVE SUR LA TERRE.

Pour un observateur terrestre, chaque jour, la Lune se lève vers l'Est et se couche vers l'Ouest. Sa trajectoire dans le ciel n'est pas la même s'un jour sur l'autre: dans le référentiel terrestre, la trajectoire de la Lune est complexe. La rotation de la Terre sur elle-même et sa révolution autour du Soleil en sont la cause.

Le référentiel terrestre n'est pas adapté pour l'étude du mouvement de la Lune.

3.2. CHOIX DU REFERENTIEL GEOCENTRIQUE.

Si l'on veut s'affranchir de ces difficultés, on étudie le mouvement de la Lune dans le *référentiel* dit *géocentrique*.

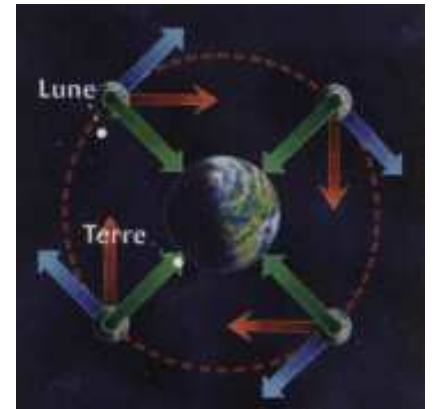
Le référentiel géocentrique n'est pas entraîné par la rotation propre de la Terre autour de l'axe des pôles. Les positions des étoiles par rapport auxquelles les directions des trois axes sont définies, n'ont pas varié depuis des siècles sur la voûte céleste.

Dans ce référentiel, le centre de la Lune décrit une trajectoire quasi circulaire de rayon 384 000 km. La durée d'un tour (ou période sidérale) est de 27 jours 7 heures 43 min 11 secondes 1/2.

3.3. POURQUOI LA LUNE NE NOUS TOMBE PAS SUR LA TÊTE ?

Nous admettons que le principe d'inertie s'applique dans le référentiel géocentrique; cette hypothèse est vérifiée par l'expérience.

En fait la Lune tombe bel et bien. Si la Terre n'était pas là, la Lune voyagerait bien en ligne droite. Mais l'attraction terrestre la dévie de sa trajectoire pour la faire tomber sur nous. Une déviation trop faible pour que la Lune chute réellement, mais suffisante pour donner à sa trajectoire la forme d'un cercle centré sur la Terre.



La Lune a brassé la soupe primitive.

Il y a trois milliards d'années, la rotation accélérée de la Lune autour de la Terre multipliait les marées. L'intense brassage aurait favorisé l'émergence de la vie.

Sans Lune, nulle vie sur Terre n'aurait été possible. Quatre milliards d'années plus tôt, alors que la vie peine à émerger, un coup de pouce salvateur est venu de notre satellite. Des marées, beaucoup plus violentes et fréquentes qu'aujourd'hui, ont bouleversé la salinité des côtes, favorisant l'apparition des premières biomolécules (ADN ou ARN).

A cette époque, la Lune est encore toute jeune. Selon l'hypothèse la plus répandue, cela ne fait qu'un milliard d'années qu'elle

est née des débris engendrés par la collision de la Terre avec un énorme astéroïde. Elle n'a pas encore pris ses distances avec la planète bleue et ne se trouve qu'à 200 000 km d'elle, moitié moins loin qu'aujourd'hui. La Terre tourne également beaucoup plus vite et accomplit sa révolution en moins de cinq heures.

Le cycle des marées, dans ces conditions, ne devait pas excéder une poignée d'heures, entre deux et six, fournissant les conditions idéales pour brasser la soupe primitive qui se

mijote alors. L'alternance rapide des marées a agi à la manière d'une PCR géante, la machine de labo utilisée pour amplifier à vitesse grand V l'ADN: au fil des cycles, les molécules précurseurs sont arrangées en double brin, trouvant par là un moyen parfait de se multiplier.

Faute d'un système de marées aussi performant, Europe et Mars n'auraient pu fournir de berceau assez confortable pour voir émerger la vie.

Pourquoi les planètes sont-elles des boules et pas des cubes ?

La force de gravitation tasse les planètes vers leur centre comme une boule de neige entre vos mains, d'où leur forme ronde. En théorie, tous les astres devraient donc finir par devenir ronds. Dans les faits, c'est surtout le cas des grosses planètes: elles se forment par l'agglutination de myriades de petits cailloux dont les chocs libèrent de la chaleur qu'elles fondent. Ces objets mous et lourds où la gravitation est puissante, adoptent très vite une forme de boule. En revanche, les petits objets comme les comètes ou les astéroïdes peuvent avoir des formes bien plus biscornues: la gravitation y est très faible et leur formation n'a pas dégagé assez de chaleur pour les ramollir.

4. POIDS ET FORCE GRAVITATIONNELLE.

4.1. POIDS ET FORCE GRAVITATIONNELLE.

Une sphère homogène de masse m , située à la surface de la Terre, est soumise à la force gravitationnelle exercée par la Terre. Cette force a pour valeur:

$$F_{T/\text{corps}} = G \cdot \frac{m_T \cdot m}{d^2} \quad \text{avec} \quad d = R, \text{ rayon terrestre égal à } 6\,380 \text{ km}, \\ m_T = 5,98.10^{24} \text{ kg.}$$

Calculons le coefficient $\frac{G \cdot m_T}{R^2}$ nous trouvons $9,8 \text{ N.kg}^{-1}$, valeur de l'intensité g .

$$\text{Ainsi } F_{T/\text{corps}} = m_{\text{corps}} \cdot g.$$

Expression que nous pouvons comparer à l'expression du poids $p = m_{\text{corps}} \cdot g$.

La direction verticale du poids est pratiquement dirigée vers le centre de la Terre.

Ainsi, la force gravitationnelle F et le poids p ont pratiquement la même direction. De plus, elles ont également le même sens, vers le bas. Ces deux forces ont même direction, sens et valeur. On peut donc identifier le poids d'un corps à la force gravitationnelle exercée par la Terre sur ce corps.

4.2. POUR QUELLE RAISON EST-ON PLUS LEGER A L'EQUATEUR QU'AUX POLES ??

Cela tient à deux raisons: on est plus loin à l'Equateur du centre de la Terre, et on y subit une force centrifuge plus importante.

Tout d'abord notre planète n'est pas aussi sphérique qu'elle en a l'air: son diamètre est de 12 714 km aux Pôles, contre 12 756 km à l'équateur. Résultat: un observateur situé à l'équateur se trouve plus loin du centre de la Terre de 21 km qu'une personne qui se tient aux pôles. Il subit donc une gravité moindre. Une force générée par les 6 000 milliards de milliards de tonnes de matière qui composent notre planète, mais qui perd de son intensité à mesure que l'on s'éloigne du centre de gravité.

Si la gravité est le principal facteur, la force centrifuge, ou plus exactement "axifuge" dans le cas de la Terre, joue aussi un rôle, mais inverse. De fait, la rotation de la Terre autour de l'axe qui passe par les pôles géographiques a le même effet que sur un manège: plus on s'éloigne de l'axe de rotation, plus on ressent la force centrifuge. Concrètement, au niveau de l'équateur, nous tournons sans nous en rendre compte à 1 670 km/h. Mais la force centrifuge n'intervient sur le poids que de manière infime: elle est 300 fois plus faible que la gravité à l'équateur ! Au final, la somme de la gravité et de la force centrifuge donne la pesanteur. Elle est ainsi $g = 9,83 \text{ m/s}^2$ aux pôles et seulement de $9,78 \text{ m/s}^2$ à l'équateur. Cette différence fait qu'une balance de pesée indiquerait une réduction de 400 g pour une personne de 80 kg entre les pôles et l'équateur. et bien sûr on perd encore quelques grammes en prenant un peu d'altitude: environ 1 g tous les 45 m.

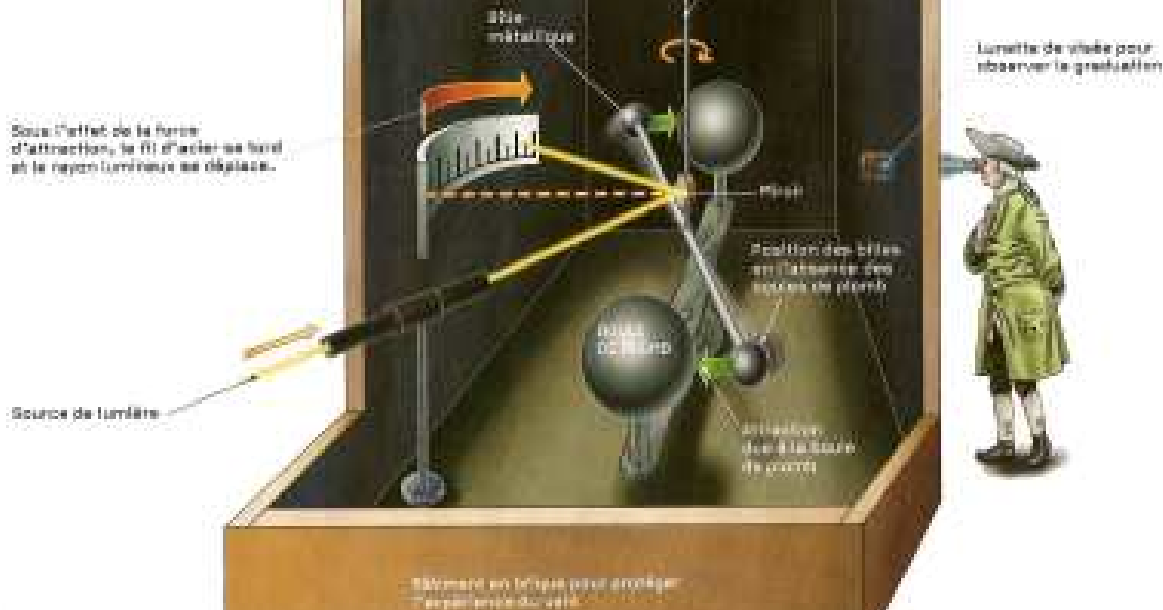
Mais attention si le poids change selon la position sur le méridien, la masse, elle, reste la même!!!

Comment les rides se forment-elles ?

Qui ne rêve de conserver la peau douce et lisse de ses jeunes années ? Las, les très mirifiques prouesses des crèmes cosmétiques n'y peuvent rien - ou si peu: inexorablement les rides apparaissent, et n'auront de cesse de s'affirmer chaque jour davantage. Il faut dire que les années qui passent et plissent les traits les plus fins peuvent compter sur un allié de poids: l'attraction terrestre. Ainsi, non contente d'encaisser une vie durant sourires, sourcils froncés et autres mimiques expressives, la peau subit-elle aussi sa propre masse, qui la tire à chaque instant vers le bas.

COMMENT SAIT-ON CE QUE PESE LA TERRE ?

L'EXPERIENCE D'HENRY CAVENDISH



L'idée vient d'un Anglais, John Michell. Tous les objets dans l'Univers, songe-t-il, s'attirent les uns les autres, d'autant plus fort que leur masse est grande et que la distance qui les sépare est petite... ou, plus exactement, le carré de cette distance.

Ainsi, nous sommes attirés par l'énorme masse de la Terre vers son centre, situé à 6,4 millions de mètres sous nos pieds. Si on comprime la Terre de moitié, elle aura toujours la même masse alors qu'on sera deux fois plus près du centre et la pesanteur sera donc multipliée par quatre. Si, au contraire, la Terre est deux fois plus grande mais garde toujours la même masse, l'attraction sera quatre fois plus faible. Vous suivez ?

Bon. Est-ce que ça marche aussi avec une miniplanète de la taille d'un gros ballon de plage et qui serait faite, mettons, en plomb ? Quelle serait son attraction ? Aussitôt, Michell invente un appareil destiné à la mesurer.

Deux petites balles métalliques suspendues à un fil d'acier sont attirées par deux grosses boules de plomb pesant chacune environ 40 tonnes, de sorte que le fil d'acier se tord un peu (voir schéma). Michell avait testé son fil d'acier avant de l'installer et savait que telle force appliquée sur les deux balles donnait tel angle de torsion.

C'est Henry Cavendish qui hérite de l'appareil à la mort de Michell. En mesurant la torsion du fil d'acier, il découvre que l'attraction que l'on ressent à 1 m du centre de chacune des boules de plomb est 3,6 millions de fois plus faible que l'attraction terrestre.

D'où vient une telle différence ? C'est que nos miniplanètes de plomb sont vraiment très, très petites drez-vous ! Sauf que ce n'est pas tant une question de taille que de masse. Si on gonfle une des boules de plomb sans changer sa masse jusqu'à ce qu'elle soit aussi grande que la Terre (6,4 millions de mètres de rayon), on sera 6,4 millions de fois plus loin de son centre et son attraction sera donc encore (6,4 millions au carré) 41 millions de millions de fois plus faible que dans l'expérience de Cavendish !

Autrement dit, comparée à la Terre, cette boule de plomb surgonflée aurait une attraction environ 148 millions de millions de millions de fois (1,6 millions fois 41 million de millions) plus faible que l'attraction terrestre ! On tient là le cœur du raisonnement : comparer l'attraction de la Terre à celle d'un objet dont on connaît la masse. Résumons-nous : grâce à la mesure de Cavendish, on sait maintenant qu'une planète de la même taille que la Terre, mais dont la masse ne ferait que 40 tonnes aurait une attraction 148 millions de millions de millions de fois plus faible que l'attraction terrestre. Il n'y a plus qu'à répondre à la question qui tue : pourquoi cette différence d'attraction entre notre vraie Terre, et la planète ultralégère de même taille ? Parce que la masse de la Terre est 148 millions de millions de millions de fois plus grande que les 40 tonnes de la boule de plomb, pardon ! D'où le résultat de la multiplication de 148 millions de millions de millions par 40 tonnes : environ 6000 millions de millions de millions de tonnes (ou $6 \cdot 10^{21}$ tonnes), le poids de notre chère vieille Terre. ●

5. TRAJECTOIRE D'UN PROJECTILE AU VOISINAGE DE LA TERRE.

Voir fiche Tp.

Dans l'air, un corps est soumis à son poids et à la force exercée par l'air sur le projectile. Si on néglige les forces de frottements exercées par l'air sur le corps, le projectile retombe en chute libre. Nous allons considérer que les forces de frottement sont inexistantes.....

Au voisinage de la Terre, le projectile en chute libre est soumis à une force unique, son poids, qui n'est donc pas compensée par d'autres forces. Le principe d'inertie permet de conclure que le *mouvement du centre du projectile n'est pas rectiligne uniforme.*

Relevés. Voir fiche Tp.

Conditions initiales de lancement

Tableau 1. A valeur de la vitesse v_{initiale} constante, plus la valeur de l'angle de tir se rapproche de 90° , plus l'altitude maximale atteinte par le corps est grande.

Par contre, la portée du tir n'est pas croissante avec l'angle de tir. On voit que:

- pour un angle de tir inférieur à 45° , la portée augmente;
- pour atteindre une valeur maximale pour un angle de 45° ;
- et diminuer par la suite, alors que l'angle de tir augmente.

A remarquer le cas particulier des angles extrêmes 0° et 90° où la portée est nulle (ou quasiment) mais où la hauteur est maximale pour un angle de 90° est quasiment nulle pour 0° .

Tableau 2. A angle de tir constant, plus la valeur v_{initiale} est grande, plus l'altitude maximale atteinte par le corps et la portée sont grandes.

Mais ces grandeurs ne sont pas proportionnelles: pour une vitesse doublée, la portée et la hauteur ne sont pas doublées.

Tableau 3. Sous l'effet de la seule attraction gravitationnelle (c'est-à-dire lorsque les frottements sont négligeables), le mouvement d'un projectile, dans le référentiel terrestre est indépendant de la masse.

Tableau 4. Dans le cas où on tient compte de la résistance de l'air, on constate:

- la vitesse finale n'est plus égale à la vitesse initiale;
- les valeurs de portée et de hauteur maximale sont plus petites;
- le facteur masse joue un rôle sur la trajectoire.

Conclusion.

Si on néglige la résistance de l'air, la trajectoire d'un projectile ne dépend ni de sa masse ni de sa forme; en un lieu donné, elle dépend uniquement de l'angle de tir α et de la valeur v_0 de la vitesse initiale.

Pour mettre un satellite en orbite autour de la Terre, il faut donc le lancer avec une vitesse adaptée.

6. DU PROJECTILE AU SATELLITE.

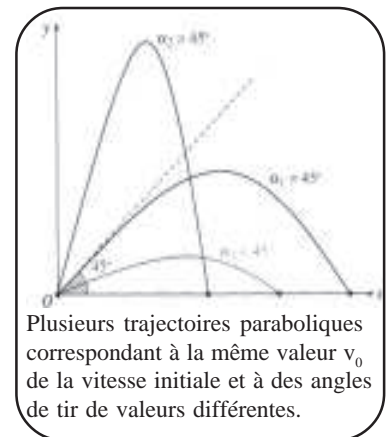
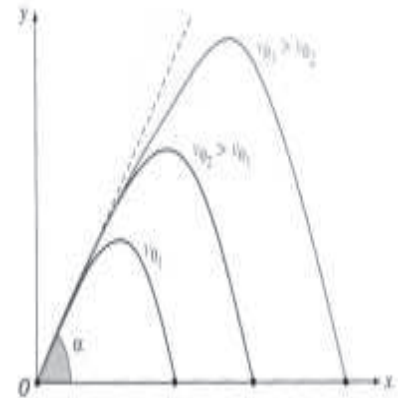
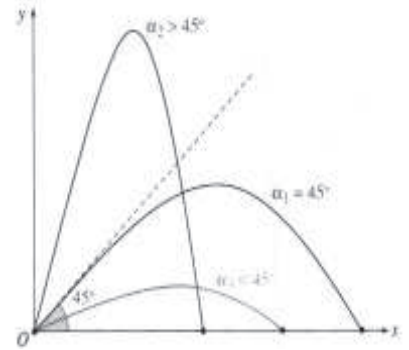
Pour mettre un satellite en orbite autour de la Terre, il faut le lancer avec une vitesse adaptée. Le lancement d'un satellite artificiel de la Terre s'effectue en trois étapes:

- le premier étage de la fusée Ariane amène, en trois minutes, le satellite hors de l'atmosphère (à 100 km d'altitude);
- le deuxième étage de la fusée permet, au cours des deux minutes suivantes, d'atteindre l'altitude de l'orbite de transfert (200 km);
- le troisième étage fournit, pendant treize minutes, l'accélération nécessaire pour atteindre la vitesse de satellisation.

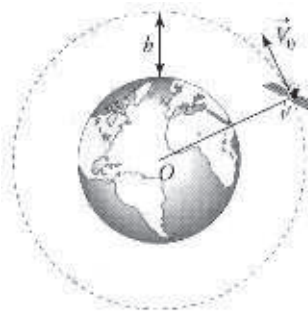
Lors de cette troisième phase, la direction et la valeur de la vitesse imposent la trajectoire ultérieure du satellite.

On lance le satellite avec une vitesse de direction parallèle à la surface terrestre, quatre cas sont envisageables:

- **cas 1.** Pour les faibles valeurs de la vitesse initiale v_0 , le corps retombe sur Terre (courbe 1);
- **cas 2.** Pour une valeur donnée de la vitesse initiale v_0 (appelée première vitesse cosmique), le corps se met en orbite circulaire autour de la Terre; il devient alors un satellite artificiel de la Terre (courbe 2);
- **cas 3.** Pour des valeurs v_0 supérieures à $11,2 \text{ km.s}^{-1}$ (valeur de la vitesse de libération de la Terre), le corps s'échappe à l'attraction terrestre et quitte le voisinage de la Terre; il devient alors une sonde spatiale (courbe 3).



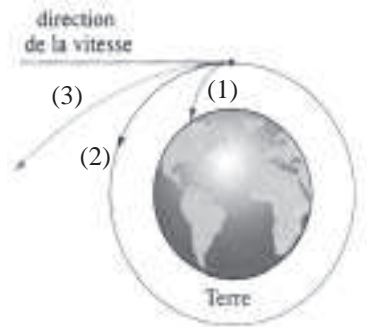
Plusieurs trajectoires paraboliques correspondant à la même valeur v_0 de la vitesse initiale et à des angles de tir de valeurs différentes.



La satellisation sur une trajectoire circulaire de rayon déterminé n'a lieu que si des conditions particulières sont respectées. Ces conditions lient l'altitude et la valeur (constante) de la vitesse du satellite sur son orbite, mais ne dépendent pas de sa masse.

Exemple.

Pour mettre un satellite en orbite circulaire au-dessus de l'atmosphère, à une altitude d'environ 100 km, il faut lui communiquer une vitesse égale à $7,8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, soit $28\,000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.



ARIANE 5

H + 200 s : La coiffe s'ouvre. Elle se sépare en deux parties éjectées sur les côtés. La fusée file à $2\,100 \text{ m/s}$, et se trouve à 113 km d'altitude.

H + 135 secondes : Les propulseurs se détachent. La fusée file à $1\,920,7 \text{ m/s}$ et se trouve à 69 km d'altitude.

Heure H : Le moteur Vulcain est allumé suivi de près par les propulseurs à poudre. L'allumage de la poudre se fait en haut du propulseur et la combustion se propage lentement vers le bas. Le conduit central permet aux gaz de combustion de s'échapper. L'éjection des gaz fournit la poussée : 540 tonnes par propulseur. La fusée s'élance.

COMMENT ÇA MARCHE

Ariane 5 décolle grâce à 2 propulseurs à poudre (90 % de la poussée) et au moteur Vulcain (10 %). Après deux minutes, les propulseurs s'éteignent et retombent dans l'océan, Vulcain prend le relais pendant dix minutes. Puis il le passe au moteur du deuxième étage, pendant trente minutes, jusqu'à mise en orbite des satellites.

H + 580 s : Le premier étage est largué. La fusée est propulsée jusqu'à l'orbite d'injection des satellites par un second petit moteur cryogénique. Sa vitesse est de $6\,700 \text{ m/s}$, son altitude de 215 km .

H + 1660 s : Les satellites sont mis en orbite. Le moteur est éteint, la fusée orientée et les satellites largués sur l'orbite d'injection afin d'accélérer à l'orbite géostationnaire à $35\,800 \text{ km}$ d'altitude. La vitesse d'Ariane est alors de $9\,360 \text{ m/s}$ pour une altitude de 650 km . Les éléments du deuxième étage retombent vers le sol.

Le moteur Vulcain

C'est le moteur principal d'Ariane. Il brûle de l'hydrogène avec de l'oxygène injecté sous haute pression par 2 turbopompes dans la chambre de combustion. La température y monte à $3\,500 \text{ kelvins}$ ce qui contribue à refroidir le divergent (ou tuyère) par circulation d'hydrogène. Le moteur fournit 115 tonnes de poussée et il est orientable pour diriger la fusée.

7. UNE LOI PHYSIQUE: SUCCES, ECHECS, ESPOIRS.

Cette formule est bien l'une des plus extraordinaires de la physique. Elle rend compte:

- de la chute des corps;
- du mouvement des satellites autour des planètes, ou des planètes et des comètes autour du Soleil;
- des marées;
- de la forme aplatie de la Terre;
- de la trajectoire des véhicules spatiaux.....
- plus généralement, cette formule décrit la force qui s'exerce entre deux corps quelconques de l'univers, entre la voie Lactée et la galaxie d'Andromède

La loi de l'attraction universelle trouvée par Newton était une autre façon de voir l'univers qui nous entoure. Rien d'étonnant à ce qu'elle ait ouvert des perspectives inédites.

C'est en l'utilisant que le Danois **Olaus Rømer** parvient à faire un premier calcul de la vitesse de la lumière;

C'est en vérifiant qu'elle s'applique bien aux planètes du Système solaire que l'Anglais **John Adams** et le Français **Urbain Le Verrier**, en 1845, découvrent des irrégularités dans l'orbite d'Uranus mesurée par les astronomes. Ces irrégularités peuvent s'expliquer par la présence d'une autre planète encore inconnue dont ils calculent, grâce à la formule de Newton, la masse et l'orbite. Les données sont envoyées le 23 septembre 1846, à l'astronome allemand Johann Galle (1842 - 1910) qui pointe son télescope vers la région du ciel prescrite et trouve (à moins d'un degré de la position prédite) aussitôt la planète nouvelle: Neptune. A noter que Le Verrier a fait tous ses calculs à la main, ce qui dure près d'un an, de l'été 1845 à l'été 1846. De nos jours, ces mêmes calculs seraient faits en quelques minutes, voire quelques secondes....

Un autre physicien et chimiste, l'Anglais **Henry Cavendish**, emploie la formule de Newton et un appareil simple mais extrêmement précis, une balance de torsion, pour mesurer la constante G et "peser" la Terre. Il trouve 6.10^{24} kg.

Olaüs Römer
(1644 - 1700)



Mais Newton est fort critique vis à vis de son propre postulat: "*Que la gravité soit infuse, inhérente et essentielle à la matière, de telle façon qu'un corps agisse à distance sur un autre à travers le vide (..) tout cela me paraît d'une telle absurdité qu'à mon sens, aucun homme capable de réfléchir en philosophie ne pourra jamais s'y laisser prendre*". Newton, en clair, voit une brèche dans sa théorie. Et c'est bien ce qui l'ennuie.

D'ailleurs l'observation des irrégularités du mouvement de la planète Mercure ne peuvent s'expliquer par la formule de Newton. La raison en est, explique **Albert Einstein**, que Mercure est très proche du Soleil et tourne très vite autour de lui; dans de telles conditions, la loi de Newton perd sa validité. Elle doit être remplacée par une autre théorie, la relativité générale.

Newton a fait des mathématiques les alliés de la physique.

A partir de Newton, les mathématiques ont accompagné les grandes avancées en physique. Depuis lors, il n'y a jamais eu de découverte théorique importante qui n'ait été basée sur une structure mathématique nouvelle et complexe. Il faut entendre cela dans le sens, non pas que ces mathématiques sont des simples outils venant formailser une théorie déjà pensée, mais qu'elles sont nécessaires au développement de la théorie, parfois même inventées par le physicien comme une partie de la théorie. PAr exemple, la géométrie newtonienne est fondée sur des mathématiques absolument nouvelles pour l'époque, que Newton a conçues pour construire sa théorie: le "calcul des luxions" (nommé aujourd'hui "calcul différentiel"). Ce nouveau calcul lui a permis de raisonner sur des échelles infiniment petites puis d'élargir son raisonnement aux phénomènes à grande échelle, comme la gravitation. De fait, il a inventé le calcul différentiel et intégral, si important dans les mathématiques et la physique contemporaines. Mais à l'époque, ces mathématiques étaient si nouvelles que personne n'y a rien compris au début.

7. LA RELATIVITE GENERALE.

7.1. EINSTEIN A L'ASSAUT DE LA FORTERESSE DE NEWTON.

Les travaux de Newton sont géniaux, mais ils clochent sur quelques points.

Enigme 1: La notion de force.

La théorie newtonienne implique que deux corps, la Lune et la Terre, par exemple, s'attirent sans aucun contact, sans aucune interaction matérielle et, de plus, instantanément. Instantanément ! Une horreur pour Einstein qui, en 1905, avait montré que rien ne peut être instantané. Pour cela, il faudrait une vitesse infinie, or, rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière. Par ailleurs, quelle chose étrange et surprenante que cette force d'attraction qui ressemble tant à la main de Dieu ! Newton était d'ailleurs conscient de cette difficulté. Il l'introduisit tout de même sans pouvoir, reconnaissait-il, la justifier. Einstein voulait aller plus loin. Il lui fallait trouver une théorie qui se passerait de ce lapin sorti du chapeau de Newton.

Enigme 2: La chute des corps.

Tous les corps lâchés simultanément, une plume, une pomme et un haltère arrivent en bas au même moment. L'expérience doit être réalisée dans le vide, pour que la résistance de l'air ne freine pas la plume. Sinon, ce n'est plus la gravitation que l'expérience testerait. Newton prenait en compte ce phénomène, mais sans fournir d'explication. Car enfin, qu'une très grosse quantité de matière réagisse comme une minuscule quantité, il y a de quoi s'étonner, non ? Pour Einstein, cet étonnement fut le signal d'alarme qui disait: la théorie de Newton n'est pas la théorie ultime, il faut chercher au-delà.

7.2. QUAND LA LUMIERE NE FILE PAS DROIT.

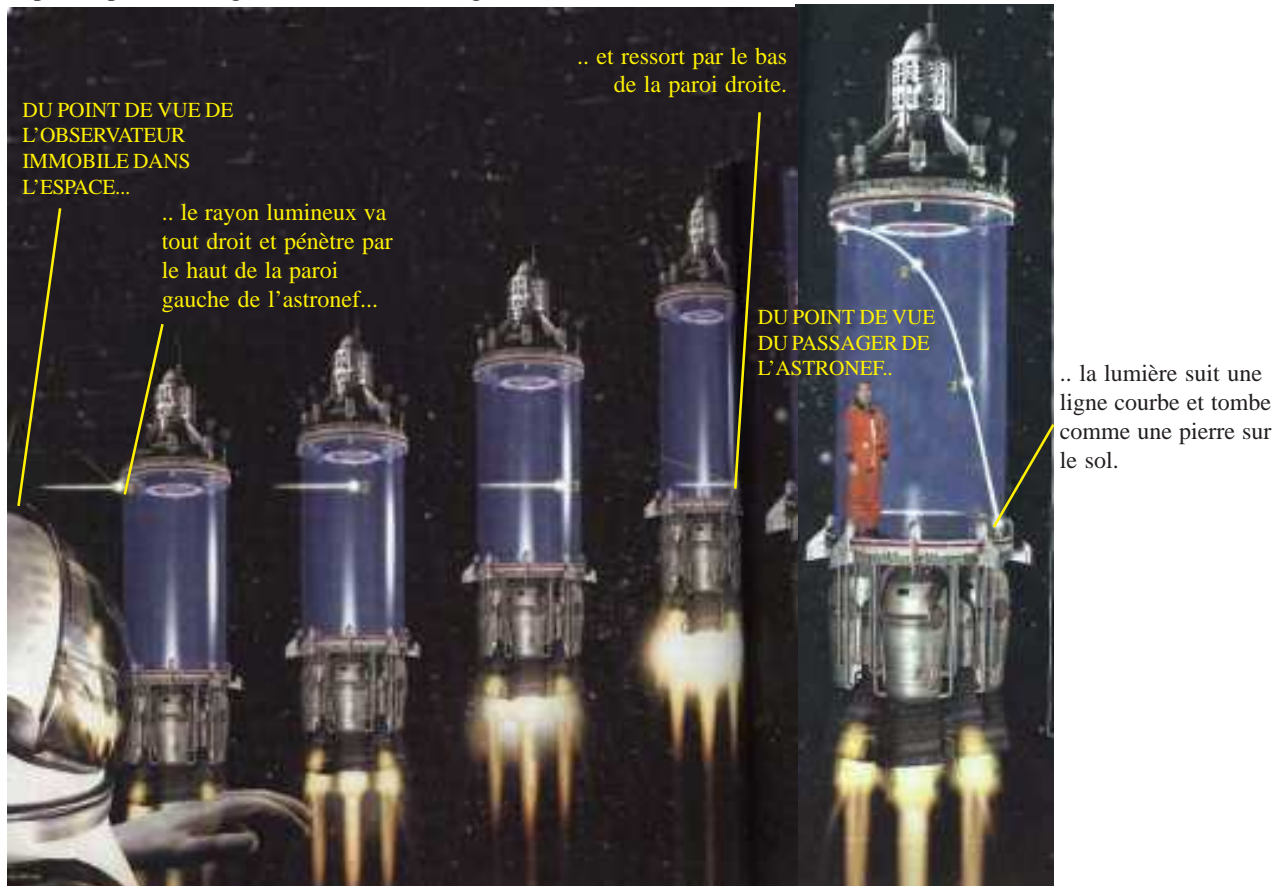
Procédons à une petite expérience de pensée. Nous sommes immobiles dans l'espace. Devant nous, un astronef transparent passe à une vitesse très élevée en accélérant constamment. Un rayon lumineux émis par une étoile lointaine arrive par la gauche. Il traverse le vaisseau de gauche à droite. Mais le vaisseau se déplace lui-même très vite et il faut au rayon de lumière un certain temps pour franchir la distance séparant les parois intérieures. Le rayon, qui va tout droit, pénètre par le haut de la paroi gauche mais ressort par le bas de la paroi de droite.

Voici maintenant le point de vue du passager de l'astronef en accélération. A ses yeux, la lumière subit une ligne courbe, formée par tous les points intermédiaires représentés dans le dessin précédent. Elle tombe littéralement vers le sol, comme une vulgaire pierre !! Encore plus étrange est l'interprétation qu'en donne Einstein. La lumière emprunte toujours le chemin le plus court pour aller d'un point de l'espace-temps à un autre. C'est vrai aussi à l'intérieur du vaisseau. Il faut alors admettre que la géométrie à l'intérieur du vaisseau a été déformée, courbée par l'accélération !! Cette géométrie est devenue courbe: la ligne droite n'y a plus cours.

Einstein en conclut:

- la lumière est influencée par la gravitation. Son trajet n'est pas rectiligne, il s'infléchit;
- cette courbure de la lumière n'est pas une simple curiosité. Elle nous révèle la géométrie même de l'espace-temps.

Aussi fou que cela puisse paraître, la gravitation modifie la géométrie de l'Univers !!



7.3. UNE DEMONSTRATION DE LA THEORIE: LE SOLEIL DEVIE LA LUMIERE.

Dès 1919, les idées d'Einstein reçoivent une confirmation éclatante: le Soleil dévie la lumière qui le frôle. C'est l'astronome anglais Arthur Eddington qui mit sur pied une double expédition au Brésil et sur l'île de Principe, au large de l'Afrique. Voici ce qu'il observa. La lumière émise par une étoile nous arrive en général en ligne droite. Tout naturellement, nous en déduisons sa direction dans le ciel. MAIS si le Soleil vient pointer ses rayons dans les abords, la lumière de l'étoile subit l'influence gravitationnelle de ce dernier. Autrement dit, elle "sente" la courbure engendrée par le Soleil. Résultat: elle doit être courbée et non pas rectiligne. Du coup, elle pointe dans une direction qui n'est plus vraiment celle de l'étoile, mais qui doit être légèrement décalée. Ainsi, lorsque le Soleil passe devant la direction de l'étoile, l'image de celle-ci se décale. Problème: l'effet est en général inobservable car la lumière du Soleil, beaucoup plus intense que celle de l'étoile, éblouit l'observateur et lui interdit toute mesure. A moins que la lumière du Soleil ne soit masquée, précisément ce qui se produit au cours d'une éclipse comme celle de 1919. Le résultat fut si proche des prédictions d'Einstein que la communauté scientifique pris vite fait et cause pour la nouvelle théorie.

7.4. L'ESPACE-TEMPS EST RELATIF.

Pour Newton, l'espace dans lequel s'inscrit l'Univers ressemble à un croquis d'architecte. Il est comme quadrillé par un échafaudage de barres rigides se coupant à angles droits. Ces barres sont des repères invisibles. Grâce à elles, on peut mesurer les trois coordonnées nécessaires à la localisation d'un événement: largeur, hauteur, profondeur. De ce fait, un même objet aura des mesures identiques où qu'il se trouve dans l'Univers. Le temps est quand à lui, totalement indépendant de l'espace. Et tout se passe comme si une seule et même horloge donnait l'heure à tout l'Univers.

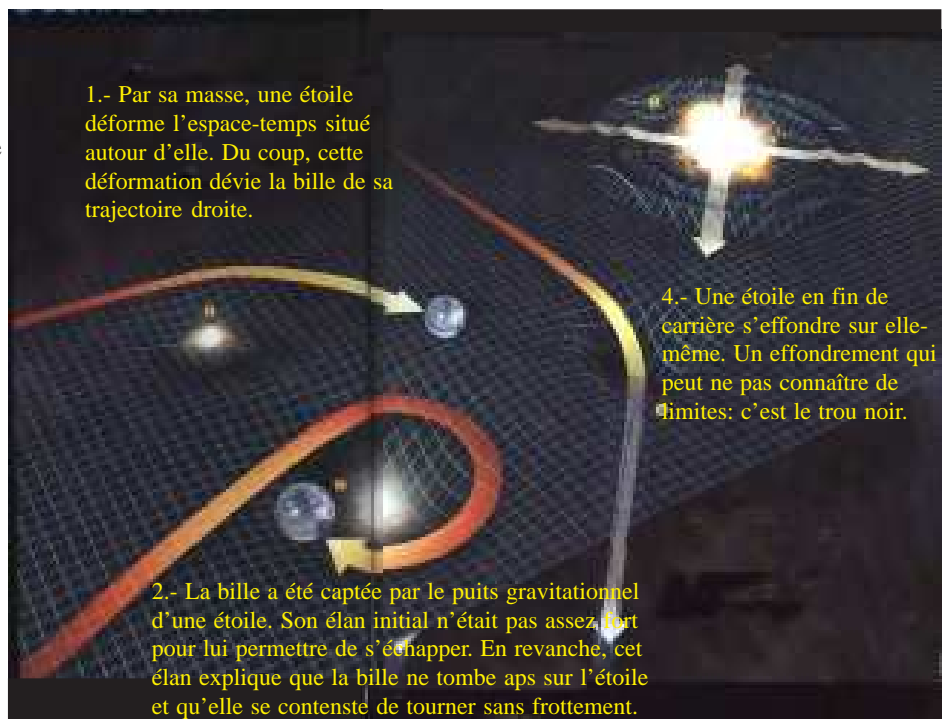
L'univers d'Einstein ne ressemble pas du tout à celui de Newton. Sa structure est révélée par les trajectoires de la lumière: elle est courbe. Les rayons lumineux ne s'y déplacent jamais en ligne droite. Toute chose y est repérée dans 4 dimensions indissociables: 3 d'espace et 1 de temps. Dans cet Univers courbe, on peut mesurer les objets. Mais il n'existe aucun étalon de mesure universel: transporté en des endroits différents, une règle aura des longueurs différentes! Pas de temps universel non plus: chaque lieu a son horloge qui indiquera son temps à lui !

7.5. L'ESPACE-TEMPS COMME UNE TOILE ELASTIQUE.

Observons une bille qui décrit sur une surface une trajectoire circulaire. Pourquoi ne va-t-elle pas tout droit ? Deux explications différentes:

Selon la première, la bille est liée par une ficelle invisible qui la contraint à décrire un cercle autour du point d'attache. Tiré par les cheveux ? Pourtant c'est à peu près la vision de Newton.

On peut imaginer plus naturel: il suffit que la surface soit légèrement incurvée, comme une assiette creuse. La bille n'a alors "pas le choix": elle ne peut que "suivre" cette courbure, qui détermine le caractère circulaire de sa trajectoire. Cette dernière ressemble à la relativité générale d'Einstein. Si les planètes, par exemple, décrivent des trajectoires courbes, c'est parce qu'elles se déplacent dans un espace-temps qui est courbe, et non pas parce qu'elles sont contraintes par des forces !! C'est cette courbure qui détermine le mouvement des corps.



1.- Par sa masse, une étoile déforme l'espace-temps situé autour d'elle. Du coup, cette déformation dévie la bille de sa trajectoire droite.

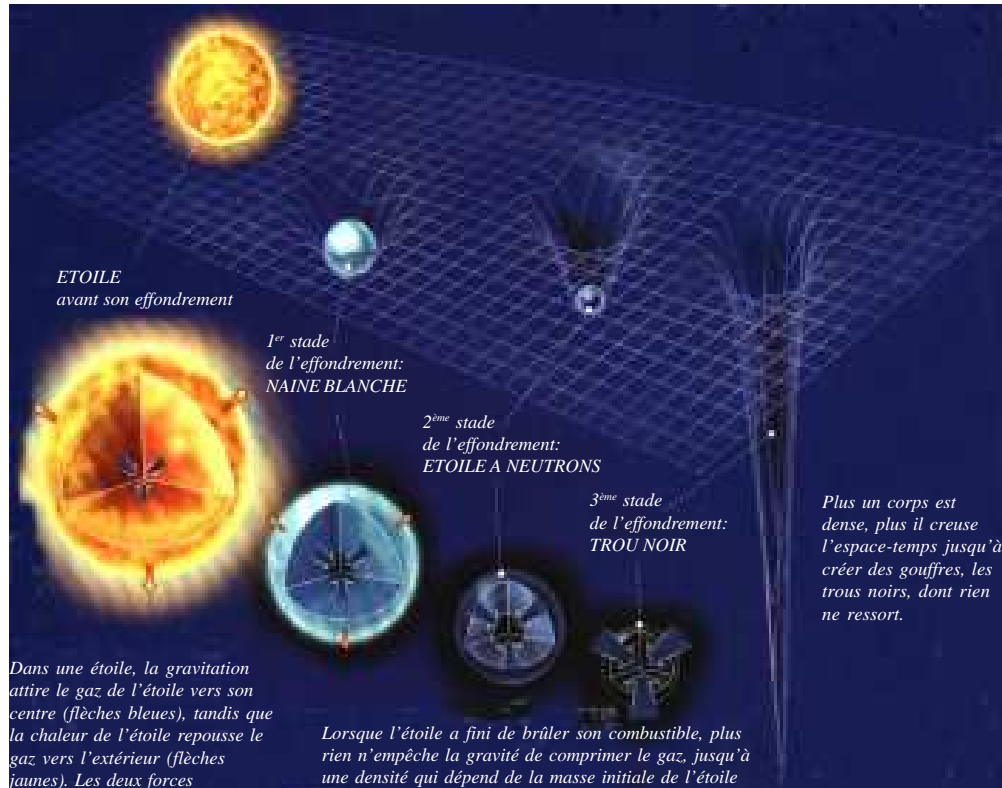
2.- La bille a été captée par le puits gravitationnel d'une étoile. Son élan initial n'était pas assez fort pour lui permettre de s'échapper. En revanche, cet élan explique que la bille ne tombe pas sur l'étoile et qu'elle se contente de tourner sans frottement.

4.- Une étoile en fin de carrière s'effondre sur elle-même. Un effondrement qui peut ne pas connaître de limites: c'est le trou noir.

D'où vient cette courbure de l'espace-temps ? De la masse des planètes, des étoiles et de tous les objets qui circulent dans l'Univers. Plus ces objets sont massifs, plus l'espace-temps autour d'eux est courbé, incurvé. Imaginons un drap tendu qui symbolise notre Univers à 2 dimensions au lieu de 4 (3 d'espace et 1 de temps). Si on y place une boule de pétanque, cette dernière va creuser le drap. Imaginons maintenant qu'on lance un cochonnet sur ce drap. En passant près de la boule, sa trajectoire sera déviée par la courbure du tissu, comme s'il subissait la fameuse attraction universelle. Selon sa vitesse et sa trajectoire, il pourra même se mettre à tourner autour de la boule d'acier, sans tomber sur elle, telle la Lune autour de la Terre. Maintenant, plaçons une bille très proche de la boule: elle va tomber inmanquablement sur elle, comme la boule de Galilée tombe sur la Terre !!!

Au passage, on peut remarquer que la vitesse de la chute de la bille ne dépend pas de sa masse, mais seulement du trou plus ou moins profond creusé par la boule. Ainsi des objets voisins suivent le même trajet, quelles que soient leur masse, leur taille ou leur forme. Ils "sentent" l'espace-temps de la même façon. La pomme et la plume de Galilée tombent à la même vitesse car elles sont toutes deux lancées sur les mêmes rails de l'espace-temps !!

Des objets peu massifs, comme la Terre, déforment très peu l'espace-temps. Dans ce cas, on n'a pas vraiment besoin de la théorie d'Einstein. Celle de Newton suffit pour, par exemple, calculer la trajectoire d'une fusée ou d'un satellite. Mais il y a dans l'UNivers des objets énormes ou super-denses, comme les trous noirs qui perturbent beaucoup l'espace-temps.



Lorsqu'une étoile meurt, elle se transforme en un véritable monstre galactique doté d'un pouvoir d'attraction inouï: naine blanche, une étoile à neutrons ou un trou noir.

Ces malabars de la gravitation ont tous un point commun: ce sont d'anciennes étoiles. Que leur est-il arrivé ? Un immense effondrement.... En effet, une étoile en pleine santé n'est qu'une grosse boule de gaz incandescente en équilibre. D'un côté, la chaleur et le rayonnement émis par son combustible éjectent le gaz hors de l'étoile. Tandis que la force de gravitation attire au contraire la matière vers le centre. Lorsque l'étoile a brûlé tout son combustible, plus rien ne s'oppose alors à l'effet de la gravitation. Elle s'effondre sur elle-même, creusant l'espace-temps au fur et à mesure que sa densité augmente. L'étoile devient un monstre. Naine blanche ? Etoile à neutrons ? Trou noir ? Tout dépend de la masse initiale...

- Pour des étoiles dont la masse est inférieure à 1,4 fois celle du Soleil, la contraction s'arrête lorsque le volume de l'étoile a été divisé par 1 million environ. L'étoile est devenue une naine blanche. L'équivalent d'un dé à coudre d'un tel astre pèse plus de 4 tonnes.
- Pour une masse comprise entre 1,4 et 3 fois celle du Soleil, l'étoile continue de se contracter jusqu'à ne plus mesurer que quelques dizaines de kilomètres de diamètre. La masse d'un dé à coudre d'étoile à neutrons est alors d'environ 1 milliard de tonnes !!
- Si la masse de l'étoile initiale est supérieure à 3 masses solaires, rien ne peut arrêter la gravitation qui comprime l'étoile à l'infini. Et la physique sèche lorsqu'il s'agit de décrire la matière dans cet état là. Les astrophysiciens donnent juste un nom éloquent à l'astre de tous les excès: trou noir. Sa densité est telle que quelques centimètres cubes de notre recordman absolu de la gravitation pèserait des centaines de milliards de tonnes !! Il creuse dans l'espace-temps un tel ravin que tout ce qui passe à proximité du trou noir est avalé sans espoir de retour. Absolument tout, même la lumière....

HUIT NOUVEAUX ANNEAUX D'EINSTEIN

Huit anneaux d'Einstein ont été décelés par l'équipe de l'astrophysicien Adam Bolton de Harvard, avec la complicité du télescope spatial Hubble. Prédites par la relativité générale, ces illusions d'optique naissent de la déviation de la lumière des galaxies lointaines par la présence d'objets très massifs - comme des galaxies elliptiques - qui courbent l'espace sur la trajectoire des rayons jusqu'à la Terre. Un anneau lumineux complet apparaît uniquement lorsque la galaxie émettant la lumière et celle qui la dévie, appelée lentille gravitationnelle, sont bien alignées. Jusqu'ici seuls trois anneaux avaient été observés dans le domaine visible. Les lentilles gravitationnelles sont l'un des rares moyens de traquer la matière noire, constituant invisible de l'essentiel de la masse de l'Univers.

Sciences & Avenir Janvier 2006.

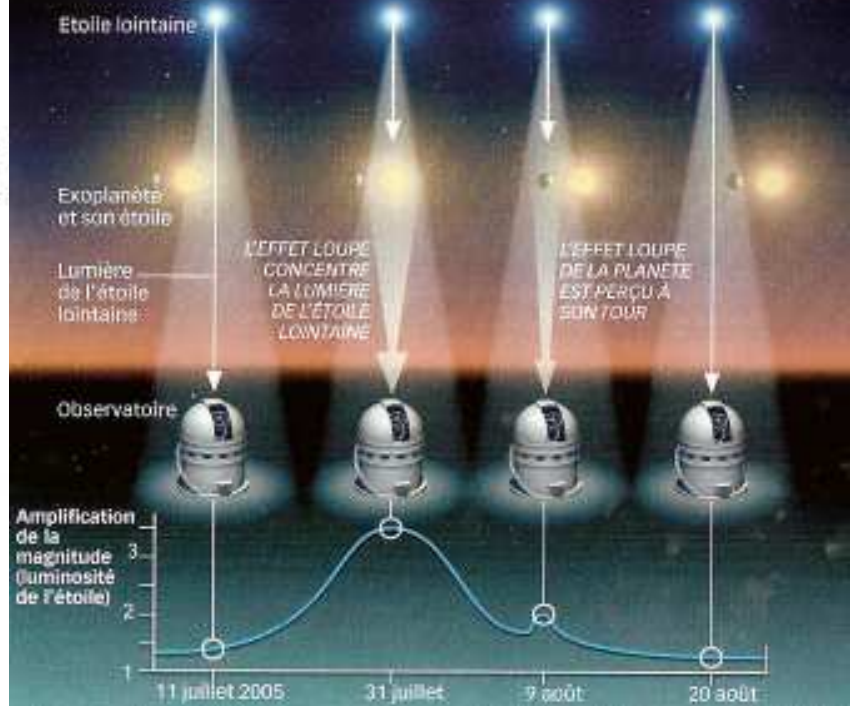
QUAND LES ETOILES FONT LENTILLES

Ce sont des lentilles qui ont permis la découverte de la première sœur de la Terre. Des lentilles "gravitationnelles", imaginées pour la première fois par Albert Einstein voici quatre-vingt-dix ans... Selon la théorie de la relativité générale, l'espace est courbe, dynamique, il se déforme en présence de masses comme les planètes, les étoiles, les galaxies. Les "mirages gravitationnels", images de galaxies lointaines déformées par des amas de galaxies d'avant-plan, sont connus des astronomes depuis vingt-cinq ans. L'idée d'utiliser les étoiles comme "microlentilles" est beaucoup plus récente : lorsque deux étoiles sont alignées, celle qui est devant déforme l'espace et forme une lentille virtuelle, qui amplifie la lumière de celle qui se situe derrière. Les microlentilles sont de véritables télescopes naturels :

l'amplification lumineuse peut atteindre un facteur mille ! C'est cet effet qui est mis à profit par les astronomes pour rechercher des exoplanètes, car celles-ci sont si peu lumineuses, comparées à leurs étoiles, qu'il est impossible de les observer avec des télescopes classiques. Si une lentille (une étoile, donc) passe devant une autre, la courbe de lumière de l'étoile en arrière-plan croît et décroît selon les lois très précises de l'optique gravitationnelle. Si une seconde "lentille" (l'exoplanète) se trouve dans le même champ, cette courbe change de profil, une bosse lumineuse apparaît en surimpression. L'étude de la courbe lumineuse, le temps du transit de la lentille devant l'étoile, etc., permettent de reconstituer précisément les caractéristiques de la planète : masse, distance à son étoile et durée de son orbite.

C'est par effet de loupe que l'exoplanète est repérée

Lorsque la planète et son étoile sont passées devant une étoile lointaine, leur masse a courbé l'espace, créant une lentille gravitationnelle. Cette "loupe" a amplifié la lumière de l'étoile lointaine. En la mesurant, les astronomes ont déterminé les positions, distances et masses de "l'étoile lentille" et de sa planète.



7.6. SELON EINSTEIN L'UNIVERS EST FIXE.

Einstein met donc au point une série d'équations plutôt complexes qui décrivent les modifications de l'espace-temps sous l'effet de la matière et de l'énergie. Les équations décrivent aussi la trajectoire des objets dans cet espace-temps. Einstein les applique à des corps de notre système solaire et calcule leur orbite autour du Soleil. Avec succès.

En 1917 Einstein se risque à appliquer ces équations à l'Univers tout entier. et alors rien ne va plus. Car la conclusion est sans appel: la taille de l'Univers change avec le temps. Elle peut augmenter ou diminuer. Mais en aucun cas rester constante. Et ça met Einstein hors de lui. Car, à l'époque, aucun astronome n'a encore observé l'Univers "bouger". Alors, pour Einstein, cet Univers qui se ratatine ou qui se dilate, c'est tout simplement une absurdité.

Pour coller à ce qui lui semble être la réalité, Einstein se résout à une solution extrême. Il modifie ses équations. Il ajoute un terme, sorti de son chapeau et le baptise "constante cosmologique". Sa mission: rendre possible la description d'un univers immobile. Einstein transforme ses équations afin qu'elles donnent ce qui pour lui est le bon résultat !!!!

Le problème, c'est qu'à force de tripatouiller les équations, que devient la physique ??? Car cette constante cosmologique, elle doit bien traduire quelque chose de réel dans l'Univers, une force quelconque ... Mais Einstein n'a pas la moindre idée de ce à quoi cette constante correspond physiquement. L'important, c'est qu'en s'opposant à la gravitation, cette force mystérieuse maintiendrait l'Univers dans sa splendide immobilité. C'est un peu bancal. Car si la gravitation est archiconnue, aucune force chargée de la contrecarrer n'a jamais été observée. "Onverra plus tard" semble penser Einstein. La constante cosmologique permet à ses équations de coller à l'observation, c'est tout ce qui compte.

7.7. ET POURTANT LES GALAXIES S'ENFUIENT

Nous savons maintenant (voir chapitre "Les spectres messagers des étoiles") que l'Univers est en expansion. En présentant son modèle de l'Univers en expansion, G Lemaître montre qu'Einstein a eu tort de ne pas croire les équations de la relativité générale. en effet un Univers qui enflait faisait partie des solutions possibles trouvées par Einstein. Mais Einstein avait refusé cette idée. Il s'est donc cassé la tête à ajuster sa constante cosmologique pour rien. La voilà devenue inutile, jetée aux poubelles de la science.

L'idée de Lemaître serait que l'Univers serait donc parti d'une tête d'épingle et depuis ne cesse de se dilater. D'abord très brutalement, puis à un rythme plus pépère. Car l'expansion est censée ralentir peu à peu sous l'effet de la gravitation. En effet, jusqu'à preuve du contraire, l'attraction gravitationnelle est la seule force à s'exercer sur de grandes distances dans l'Univers. Et cette force rapproche les corps. Au minimum, elle devrait donc au moins freiner l'expansion de l'Univers. Au maximum, elle inverserait carrément la tendance, provoquant au final un effondrement de l'Univers sur lui-même. Tout dépend, en fait, de la quantité de matière présente dans l'Univers. Plus la quantité de matière est importante, et plus l'Univers aura de chance de se recontracter fissa.

7.8. MAIS L'UNIVERS SE DILATE DE PLUS EN PLUS VITE.

Mais en 1998, en multipliant les observations, des astronomes reconstituent l'évolution de l'Univers et observent que non seulement les galaxies s'éloignent de nous, preuve que l'Univers est en expansion, mais contrairement à ce que l'on pourrait penser, cette expansion n'est pas entrain de ralentir, mais au contraire qu'il y a 4 milliards d'années l'expansion de cet Univers aurait accéléré. Que s'est-il passé à cette époque ? A quoi ressemble ce courant qui dilate l'Univers de plus en plus vite ?

Einstein n'en croit pas ses calculs. Selon eux, l'Univers n'a que deux avenir possibles. Dans le premier cas, il grandit indéfiniment. Mais quelle force repousserait ses limites (ici les deux planches) ? La seule force agissant à grande distance est la gravitation. Or, elle est censée rapprocher la matière (comme le font les ressorts sur notre dessin), mais pas l'éloigner. A priori, ce futur est inconcevable ...



Dans le second cas, l'Univers rapetisse et finit par s'effondrer sur lui-même. Et pourquoi pas ? Après tout, la gravitation pourrait se charger du boulot. Les ressorts, qui la représentent, ont bien tendance à rapprocher les planches.



Oui, mais Einstein est persuadé que la taille de l'Univers n'évolue pas dans le temps. Car aucune observation astronomique ne va dans ce sens. Alors il imagine la constante cosmologique chargée de s'opposer à la gravitation. Et de maintenir l'Univers fixe, ici par des planches disposées en entretoise.



7.8. UN SUSPECT: LA GRAVITATION.



Après tout, ce qui ne va pas dans cette histoire, c'est la gravitation. Elle ne fait plus son boulot qui consiste à contenir l'expansion de l'UNNivers, en liant les corps entre eux. Et si, sur de grandes distances, la fameuse attraction gravitationnelle finissait par lâcher la rampe toute seule ? Cette possibilité est prise très au sérieux par une équipe de physiciens théoriciens franco-américaine. Pour mieux comprendre il nous faut retourner dans le monde de la physique des particules. On se rappelle que dans un noyau, on trouve des protons et des neutrons. Une sous famille de ces particules est la famille des bosons. Les bosons sont des particules qui ne participent pas à la fabrication d'atomes. Ils sont porteurs d'interactions. Pour comprendre, imaginez que vous ayez

besoin de joindre l'un de vos camarades. Vous avez plusieurs solutions: prendre le bus pour aller chez lui, lui téléphoner ou encore lui envoyer une lettre. Et bien la compagnie de transport de votre ville, les impulsions électriques transportant votre voix dans le fil du téléphone ou encore la facteur sont des bosons. Ils vous permettent d'interagir avec votre camarade.

En physique, l'un des bosons les plus célèbres est le photon, qui porte sur ses épaules la lumière. Autre exemple: depuis des années, les physiciens sont à la recherche du graviton, le boson qui s'échangerait entre deux corps soumis à la force d'attraction gravitationnelle. L'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre deux corps peut être vue comme un échange de gravitons. Ainsi, on pourrait imaginer que le Soleil et la Terre, en interaction gravitationnelle, échangent des gravitons. A faible distance tout va bien.

Les gravitons voyageraient d'un astre à l'autre sans problème. Mais à grande distance, il y aurait des fuites. Exactement comme de l'eau coulant dans un tuyau percé, tous les gravitons ne se retrouveraient pas à l'arrivée. Or, l'intensité de l'attraction dépend de ces gravitons. Si certains manquent à l'appel, la gravitation se relâche.

Mais où les particules passent-elles donc ? Sur quoi débouchent les trous du tuyau ? C'est là que cela devient très sport ... Elles disparaîtraient dans une cinquième dimension ! Eh oui, c'est un des séismes qui secouent actuellement la physique. En plus des quatre dimensions (trois espaces, une de temps) dans lesquelles nous évoluons, il existerait d'autres dimensions que nous n'avons pas encore explorées. Tout simplement parce qu'elles seraient trop petites, repliées sur elles-mêmes.

Ainsi l'une des plus fameuses formules de la physique serait susceptible de changer de forme. Il ne faudrait plus diviser le produit des masses par le carré de la distance les séparant, mais par le cube !!! Autrement dit, la gravitation "longue distance" s'affaiblirait bien plus vite que dans sa forme "courte distance". Au final, les chercheurs ont même démontré, grâce à des modèles mathématiques poussés, que non seulement la gravitation s'affaiblirait du fait de cette fuite de gravitons, mais qu'elle pourrait même changer de signe et devenir répulsive !!! Là, difficile de trouver une image pour comprendre. C'est vraiment de l'abstrait. Mais dans cette configuration, les chercheurs n'auraient plus besoin d'énergie sombre pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers. Elle serait toujours le fait de la gravitation, plus que jamais seule force à s'exercer à très grande distance dans le cosmos.



UNE DIMENSION POUR L'HOMME, DEUX POUR LA FOURMI.



Des gravitons fuiraient dans une dimension cachée ! Ca ressemble à quoi, une dimension cachée ? Tout se passe un peu comme si vous deviez marcher sur une corde. Elle vous apparaîtrait comme un monde à une dimension, puisque vous n'auriez le choix d'avancer (ou de reculer) que dans une direction. Mais une petite fourmi la verrait comme un monde à deux dimensions car elle pourrait, vu sa taille, faire aussi le tour de la corde.

