

Notions abordées en cours de physique-chimie et situations de la vie courante

II. L'univers en mouvements et le temps

1-Mouvement et force

Notion	Illustrations/Situations
1.1-Relativité du mouvement. Trajectoire, chronophotographie, référentiel, observateur.	- Nicole Oresme - Vers le principe de relativité - Le principe de relativité de Galilée - Cela sert-il de courir ou non sous la pluie pour s'abriter ?
1.2- Principe de l'inertie. Effets d'une force sur le mouvement d'un corps. Rôle de la masse du corps. Principe d'inertie pour un observateur terrestre. Forces qui se compensent. Peut-il y avoir mouvement sans force ?	- Inertia - L'inertie en action - Effet Coriolis - Inertie paradoxale
1.3- La gravitation universelle. Interaction gravitationnelle entre deux corps. La pesanteur résulte de l'attraction terrestre. Comparaison du poids d'un corps sur la terre et sur la lune. Trajectoire d'un projectile : influence de la vitesse de lancement et de la direction de lancement sur le mouvement d'un projectile. Interprétation du mouvement d'un satellite. Pourquoi la lune ne tombe-t-elle pas sur la Terre ?	- Une citation de Paul Valéry - Si les martiens existaient, seraient-ce des petits hommes verts ? - Lanceur de balle pour chien - Arroseur de jardin

2- Le temps

Notion	Illustrations/Situations
2.1- Phénomènes astronomiques. Phénomènes périodiques. L'alternance des jours et des nuits, des phases de la lune, des saisons règle le rythme de la vie (jour, heure, mois, année). Principe de construction du calendrier.	- Newton est-il bien né le jour de Noël ?
2.2- Dispositifs construits par l'homme. Comment mesurer une durée ? Pendule simple, horloge, sablier, clepsydre, cadran solaire, gnomon, montre à quartz, chronomètre.... Comment une horloge fonctionne-t-elle ?	- Galilée, Huygens et le pendule - Un système MKS de poche - Plus tu vas loin, plus ton temps est précieux - Synchronisation

Préambule : les amateurs trouveront de très nombreuses simulations en physique sur le site suivant, entièrement téléchargeable : <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/index.html>

1-Mouvement et force

1.1-Relativité du mouvement.

Nicole Oresme.

Nicole Oresme (1325-1382) fut en son temps ecclésiastique et conseiller du roi Charles V, mais aussi physicien, astronome, mathématicien, économiste, philosophe, psychologue, musicologue, théologien et traducteur français d'Aristote. Non content de traduire ce dernier, il le commenta abondamment et souvent de façon remarquablement moderne. Ainsi, pour contester le dogme aristotélicien stipulant que la Terre est immobile au centre de l'univers et s'appuyant sur le fait qu'« on voit bien les astres se lever et disparaître », il note — près de deux cents ans avant Copernic :

« De plus, je suppose, le mouvement d'un lieu à un autre ne peut être constaté avec évidence que dans la mesure où l'on constate qu'un corps se situe différemment par rapport à un autre corps. Ainsi, quand un homme est sur un bateau appelé *A* qui se meut sans à-coup notable, rapidement ou lentement, et que cet homme ne voit rien d'autre qu'un autre bateau appelé *B* qui se meut tout à fait exactement de la même façon que *A*, je dis qu'il semblera à cet homme que ni l'un ni l'autre de ces bateaux ne se meut. Si *A* est fixe et que *B* est en mouvement, il lui apparaît avec évidence que *B* est en mouvement ; si *A* est en mouvement et que *B* est fixe, il lui apparaît aussi que *A* est fixe et que *B* est en mouvement. De même, si *A* était fixe pendant une heure et que *B* fût en mouvement, et si dans l'heure immédiatement consécutive, à l'inverse *A* était en mouvement et que *B* fût fixe, cet homme ne pourrait constater ce changement, cette variation, mais il lui semblerait que *B* fût en mouvement continu : voilà qui ressort de l'expérience. La cause en est que ces deux corps *A* et *B* ont continuellement relativité de regard l'un par rapport à l'autre, tout à fait de la même manière quand *A* est en mouvement et que *B* est fixe ou quand à l'inverse *B* est en mouvement et *A* est fixe. Il est établi au livre IV de La Perspective de Witelo [1230-1280] que l'on ne constate un mouvement que dans la mesure où l'on constate qu'un corps se comporte d'une autre manière au regard d'un autre.

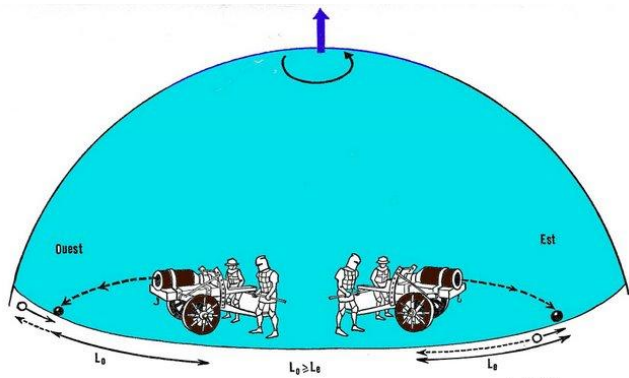
Je dis donc que si des deux parties du monde susdites celle d'en haut était mue aujourd'hui d'un mouvement journalier comme elle le fait et celle d'en bas non, et que demain ce fût au contraire celle d'ici-bas qui fût en mouvement journalier, et l'autre, c'est-à-dire le ciel étoilé, non, nous ne pourrions en rien constater cette mutation mais que tout semblerait être d'une même façon aujourd'hui et demain à ce sujet. Il nous semblerait continuellement que la partie où nous sommes fût fixe et que l'autre fût toujours en mouvement, comme il apparaît à un homme sur un bateau en mouvement, que les arbres à l'extérieur sont en mouvement. De la même façon, si un homme était au ciel, une fois admis qu'il fût en mouvement journalier, et si cet homme qui est entraîné avec le ciel voyait clairement la terre et distinctement les monts, vaux, fleuves, villes et châteaux, il lui apparaîtrait que la terre serait mue d'un mouvement journalier, comme il nous apparaît que ce soit le cas du ciel à nous qui sommes sur terre. Semblablement, si la terre était mue d'un mouvement journalier et le ciel non, il nous semblerait qu'elle fût fixe et le ciel en mouvement ; toute personne qui a bon entendement peut facilement imaginer cela. Par là se manifeste clairement la réponse à la première expérience, car l'on dirait que le soleil et les étoiles paraissent alors se coucher, se lever, et le ciel tourner, à cause du mouvement de la terre et des éléments parmi lesquels nous nous trouvons. »

Texte d'Oresme extrait du *Traité du ciel et du monde* (1377), adapté en français moderne par P. Souffrin et R. Lassalle.

Vers le principe de relativité.

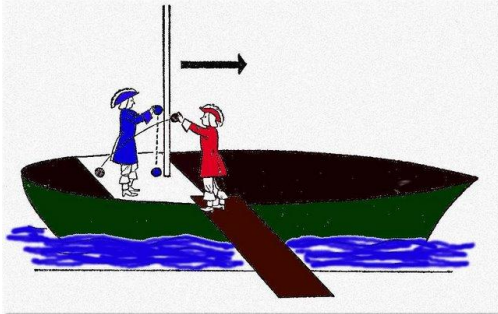
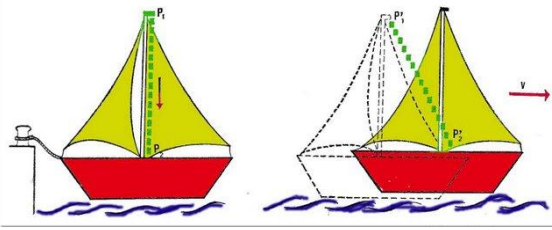
L'astronome danois Tycho Brahé (1546-1601), contemporain de Galilée, proposa en 1588 une expérience de pensée susceptible de prouver l'immobilité de la Terre :

« Que se passerait-il... si d'un grand canon, on tirait un boulet vers l'Orient ?... Et puis, du même canon, on en tirait un autre vers l'occident ?... Par suite du mouvement diurne extrêmement rapide de la Terre (s'il y en avait un), l'obus tiré vers l'Orient ne pourrait jamais franchir autant d'espace sur la surface de la Terre, la Terre (de son mouvement propre) venant au-devant de lui, que celui qui de la même manière serait lancé vers l'Occident. »



A noter qu'il ne s'agit là que d'une expérience de pensée dont la réalisation ne pouvait être menée à bien — comment être sûr que le canon tirerait le boulet exactement de la même manière vers l'Est et vers l'Ouest ?

Un autre contemporain de Galilée, l'Italien Giordano Bruno (1548-1600), paya de sa vie le fait en particulier d'avoir pris au pied de la lettre les thèses de Copernic. Pour avoir retiré aux thèses de l'astronome polonais beaucoup des ses aspects archaïques, pour avoir supprimé la sphère des fixes, postulé l'existence d'une infinité de mondes dans un univers infini,... mais aussi pour avoir glissé du monothéisme à une forme de panthéisme, Bruno fut brûlé vif pour hérésie à l'aube même du XVIIe siècle.



Quant à l'idée de relativité, il avait une conception radicalement opposée à celle de Tycho Brahé. Il l'illustra en 1584 d'une autre expérience de pensée usant d'un bateau et montrant que si on lâche une pierre du haut d'un mât d'un navire immobile ou en mouvement, cette pierre arrivera au pied du mât (l'illustration ci-contre inspirée du texte de Bruno omet cependant l'aspect accélération uniformément accélérée). Il va plus loin en imaginant une autre expérience. En considérant deux hommes, un dans un navire en marche, l'autre immobile sur la rive, ces deux hommes étant tels qu'ils peuvent avoir à un instant donné leurs mains en un même point. Ils laissent à cet instant tomber une pierre. Celle lâchée par le premier tombe à ses pieds, la seconde tombe en arrière du premier. Et Bruno de conclure : *« Ce qui ne provient de rien d'autre que de ce que la pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire... possède une certaine vertu imprimée que ne possède pas l'autre... De cette diversité, nous ne pouvons donner aucune raison, sinon celle que les choses qui sont rattachées au navire se meuvent avec celui-ci... »* Galilée ne dira rien d'autre en formalisant son principe de relativité quelques dizaines années plus tard.

Le principe de relativité de Galilée.

Contrairement à ce que l'on peut croire, ce n'est pas Albert Einstein (1879-1955) qui le premier a énoncé le principe de relativité — il l'a seulement généralisé à tout phénomène physique : c'est Galileo Galilei dit Galilée (1564-1642) qui le fit dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632) et ce d'une manière à l'orée de la poésie :

« Enfermez-vous... dans une vaste salle, bien à couvert, au fond d'un grand navire. Et là munissez-vous de mouches, de papillons et d'autres petits animaux semblables. Ayez aussi un grand bocal d'eau contenant des poissons, suspendez au plafond un petit seau dont l'eau, goutte à goutte, par un orifice, tombe dans un vase à col étroit, posé sur le sol...

Là, Galilée donne la manière avec laquelle il mesure le temps : mesurer le temps écoulé revenait à peser l'eau écoulée du petit seau (clepsydre). Continuons la lecture du texte de Galilée :

Le navire étant arrêté, observez soigneusement les petits animaux volant, les poissons nageant indifféremment de tous côtés, les gouttelettes d'eau tombant dans le vase situé sur le sol. Et vous-même, lancez quelque chose à un ami et constatez que dans n'importe quel sens vous obtiendrez le même résultat, si les distances sont égales...

Cette remarque de Galilée décrit l'isotropie de l'espace, à savoir qu'il a les mêmes propriétés dans toutes les directions. Poursuivons :

Maintenant faites marcher le navire, aussi vite que vous voudrez, pourvu que le mouvement soit uniforme, sans oscillation d'aucune sorte...

A noter que la conception du mouvement uniforme de Galilée est la même que celle que nous avons aujourd'hui.

Vous ne discernerez aucun changement dans tous les effets précédents, et aucun d'eux ne vous renseignera si le navire est en marche ou s'il est arrêté : en sautant vous franchirez les mêmes distances... les sauts ne seront pas plus grands vers la poupe que vers la proue... Les gouttes d'eau tomberont comme précédemment dans le vase inférieur...

Autrement dit, la mesure du temps est la même que le navire soit immobile ou non.

Les poissons dans leur eau et sans plus de fatigue nageront d'un côté comme de l'autre... Enfin les papillons et les mouches continueront leur vol indifférent dans n'importe quel sens, sans être influencé par la marche et la direction du navire... La cause de la permanence de tous ces effets, c'est que le mouvement uniforme est commun au navire et à ce qu'il contient, y compris l'air... Le mouvement est mouvement et agit comme mouvement en tant et seulement qu'il est en rapport avec les choses qui en sont privées ; mais en ce qui concerne celles qui y participent toutes également, il est sans effet ; il est comme s'il n'était pas. LE MOUVEMENT EST COMME RIEN ! »

En un mot, les lois de la mécanique doivent être les mêmes dans le navire immobile et dans le navire en mouvement rectiligne uniforme. Dans les deux cas, le navire constitue ce que nous appelons aujourd'hui un référentiel galiléen.

Cela sert-il de courir ou non sous la pluie pour s'abriter ?

Instinctivement, lorsqu'il pleut, nous courons pour atteindre un abri. La question est : est-ce que nous faisons bien ?

Ou plutôt, que doit-on faire pour être le moins mouillé possible ? Appelons v_v et v_H les composantes respectivement verticale et horizontale de la vitesse de la pluie par rapport au sol et, pour simplifier, supposons que notre homme ne court que suivant la direction de la composante horizontale de la vitesse de la pluie. Dans le cas d'un écoulement stationnaire et uniforme, le volume de fluide traversant une surface d'aire S durant Δt est égale à $vS\Delta t$ où v est la vitesse du fluide orthogonale à S . C'est aussi le volume de fluide que recevrait cette surface si elle était imperméable. Si V est la vitesse de l'homme par rapport au sol et s'il court contre la pluie, la pluie a une vitesse horizontale par rapport à lui égale à $v_H + V$. En négligeant ce que reçoit l'homme sur la tête — il a une capuche qui le protège —, en appelant S l'aire verticale qu'il offre à la pluie et L la distance à parcourir pour atteindre l'abri, le volume total d'eau qu'il reçoit est donc égal à :

$$V + v_H \Delta t = \left(1 + \frac{v_H}{V}\right) SL$$

Pour une composante horizontale v_H donnée, l'homme a donc tout intérêt à courir le plus vite possible pour recevoir le moins d'eau possible.

Si la pluie tombe verticalement, quoi qu'il fasse, courir ou marcher, il recevra le même volume d'eau SL : donc autant marcher, il s'éclaboussera moins.

Si l'homme court en sens inverse de la pluie, la pluie a une vitesse horizontale par rapport à lui égale à $v_H - V$ et le volume total d'eau reçu est maintenant égal à :

$$\left(\frac{v_H}{V} - 1\right) SL$$

Autrement dit, ce volume est nul si l'homme a une vitesse égale à v_H et il lui serait donc possible d'atteindre l'abri sans être mouillé... Si nous voyons là toutes les limites d'un modèle, il n'en reste pas moins que l'homme sera bien moins mouillé dans ces conditions que lorsqu'il court contre la pluie.

1.2-Principe de l'inertie.

Inertia.

Etymologiquement, le mot *inertie* est constitué du *in* privatif, la racine provenant du latin *ars, artis* signifiant *façon d'être ou d'agir*. En latin, le mot *inertia* ne signifie pas *inertie* — il y aurait là anachronisme — mais *incapacité, mollesse*. C'est Johannes Kepler (1571-1630) qui introduisit le terme *inertia* dans le langage scientifique, mais pas encore dans notre acception moderne : pour lui, tout corps « *présente une inertie naturelle ou repos qui fait qu'il demeure au repos en tout lieu où il est situé isolément.* »

En fait, le concept d'inertie trouve son sens moderne par le biais du *principe d'inertie*, à savoir la propriété des corps à rester dans leur état de mouvement si aucune action extérieure ne vient à le modifier. Galileo Galilei dit Galilée (1564-1642) énonça un premier principe de ce genre dans *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632), réservant le mouvement inertiel aux rectilignes uniformes — par extrapolation du mouvement sur un plan incliné idéal dont l'inclinaison s'annule —, mais aussi aux mouvements circulaires célestes pour expliquer la permanence des révolutions planétaires.

Il est d'usage de faire de René Descartes (1596-1650) le père du principe d'inertie moderne puisqu'il écrit dans ses *Principes philosophiques* (1644) :

« *Que chaque chose, pour autant qu'il est en elle, persévère toujours dans le même état ; et ainsi ce qui a commencé une fois de se mouvoir, s'efforcera toujours de se mouvoir... Chaque chose, en tant qu'elle est simple et indivise, demeure, pour autant qu'il est en elle, toujours dans le même état, à moins que des causes extérieures ne la changent. Que tout mouvement est par lui-même droit ; et ainsi, ce qui se meut en cercle, tendra toujours à s'éloigner du centre du cercle qu'il décrit.* »

Il faut cependant ajouter que Dieu à sa part dans ce principe puisque ce dernier est chapeauté par le super-principe de conservation suivant : « *Dieu de sa toute puissance a créé la matière avec le mouvement et le repos et conserve maintenant en l'Univers, par son concours ordinaire, autant de mouvement et de repos qu'il y en a mis en le créant.* »

De plus, Descartes ne conçoit la modification du mouvement que par contact (choc).

Hans Christiaan Huygens (1629-1695) en introduisant le concept de *force centrifuge* (1673) fit grandement avancer la question et permit de réserver le caractère inertiel au mouvement rectiligne uniforme : « *Le mouvement droit n'est que relatif entre divers corps ; le circulaire est autre chose et a son critérium que le droit n'a point* » ce critérium étant justement la force d'inertie centrifuge.

Mais en définitive, c'est Isaac Newton (1642-1727) qui, dans ses *Principia* (1687), énonça clairement le principe d'inertie que nous connaissons (première loi de Newton) : « *Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, sauf si des forces « imprimées » le contraignent d'en changer.* »

L'inertie en action.

L'inertie est omniprésente dans notre quotidien : quand nous sommes projetés vers le pare-brise lors d'un freinage brusque — d'où la nécessité de mettre sa ceinture de sécurité —, quand nous ressentons la force centrifuge dans un virage — propriété utilisée dans les *centrifugeuses* pour séparer des corps de densité différente ou pour simuler de fortes accélérations avec les centrifugeuses pour astronautes —, par les distances de freinage — d'où les deux chevrons sur autoroute —, par la difficulté de mettre en mouvement une armoire normande,...

En Afrique, il y eut un certain nombre d'accidents graves chez les transporteurs de grumes qui amarraient mal les billes de bois sur leur remorque : roulant rapidement sur les pistes mais obligés de freiner brusquement pour cause de passage d'un être humain ou d'un animal, les grumes continuaient leur course par inertie et décapitaient la cabine du poids lourd... et ce qu'il y avait dedans.

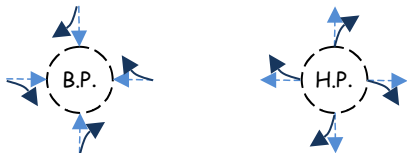
Exemple spectaculaire vécu : un dimanche soir, sur une route rectiligne de Normandie, un poids lourd roulait tranquillement quand, pour une raison inconnue, le conducteur a « pilé ». La cabine du poids lourd s'est arrêtée net mais, par inertie, la remorque a continué en un gracieux mouvement de rotation autour de son point d'attache : le camion s'est mis « en portefeuille » — cf. une très belle mise en portefeuille d'un camion citerne à la fin du film *Mission Impossible III*. La fourgonnette qui précédait l'observateur fut alors cueillie par la remorque comme pelote basque par chistéra et, sous l'impulsion reçue, vit sa quantité de mouvement fortement modifiée ce qui la projeta dans le champ d'à côté, les quatre roues en l'air. L'observateur et la voiture qui le suivait ayant respecté les distances

de freinage, il n'y eut pas plus de mal que cela, le conducteur de la fourgonnette s'en étant tiré avec seulement quelques contusions... ce qui ne fut pas le cas de la fourgonnette elle-même.

Le concept d'inertie a diffusé dans d'autres domaines que la mécanique : inertie *thermique* associée à la capacité thermique des corps, inertie *électrique* traduite par l'inductance électrique d'un circuit, inertie *lumineuse* des corps phosphorescents,... Dans tous les cas, l'inertie traduit une « résistance » aux *changements* — de température, d'intensité,...

Effet Coriolis.

Un mot sur un effet d'inertie plus sophistiqué que l'inertie d'entraînement : celui dit de Coriolis. Si vous êtes à la périphérie d'un grand plateau tournant dans le sens direct, vous ressentez toujours la force d'inertie centrifuge qui tend à vous éjecter du plateau. Mais si vous décidez de marcher vers le centre du plateau, vous ressentez en plus une force qui vous dévie vers la droite de votre mouvement. Si vous voulez vous éloigner du centre, cette force de déviation s'exerce également vers la droite de votre mouvement.



Cet effet permet d'expliquer, entre autres, la permanence des zones dépressionnaires et anticycloniques dans l'hémisphère nord, ainsi que le sens de rotation du vent autour de ces zones — cf. les animations des bulletins météo télévisés. Considérons, par exemple, une zone dépressionnaire. La pression y est plus faible qu'alentour et les vents s'orienteraient vers le centre de cette zone si la Terre ne tournait pas.

Mais l'effet Coriolis dévie les vents vers la droite de leur mouvement et ceux-ci se mettent à tourner dans le sens anti-horaire autour de la zone dépressionnaire, la pérennisant. Pour la même raison, les vents tournent dans le sens horaire autour des anticyclones. Cela pour l'hémisphère nord.

Pour l'hémisphère sud, la rotation terrestre apparaît localement comme inverse et donc le sens de rotation des vents autour de ces zones est lui-même inversé.

Inertie paradoxale.

Expérience vécue : l'observateur a acheté pour sa fille un ballon de baudruche. Après la promenade, il rentre au bercail et sa fille lâche son ballon qui se met à flotter dans l'habitacle de la voiture. Que se passe-t-il quand il démarre ? Et quand il tourne à gauche en sortant du parking ? Au démarrage, le ballon se déplace vers l'avant et quand la voiture tourne à gauche, le ballon se déplace aussi vers la gauche. Bref, ce ballon semble défier les lois de l'inertie, ce qui plonge l'observateur dans un abîme de perplexité jusqu'à ce qu'il freine à un feu rouge, rejetant ainsi le ballon vers le fond de l'habitacle.

En fait, la force d'Archimède dans un référentiel accéléré comporte deux composantes : une verticale ascendante s'opposant au poids du ballon (c'est la fameuse « poussée ») et une horizontale s'opposant à la force d'inertie d'entraînement. Au démarrage, le ballon subit donc une force dans le sens du mouvement et dans un virage une force centripète.

1.3- La gravitation universelle.

Une citation de Paul Valéry.

En 1939, le poète Paul Valéry nota dans *Mélange* : « Il fallait être Newton pour apercevoir que la lune tombe, quand tout le monde voit bien qu'elle ne tombe pas. » Effectivement, la Lune est soumise à l'attraction gravitationnelle de la Terre — la plus intense au niveau de la Lune. Elle devrait donc « tomber » comme la pomme de l'arbre. Mais dans le référentiel lié à la Lune, celle-ci est soumise en plus de la gravitation à la force d'inertie centrifuge — en assimilant la trajectoire de la Lune à un cercle. La Lune étant évidemment immobile dans son référentiel propre, la force d'inertie centrifuge doit équilibrer la force de gravitation. En se plaçant alors dans le référentiel géocentrique, la force de gravitation doit donc être égalée à une force centripète : c'est la résultante dynamique de la Lune.

Si les martiens existaient, seraient-ce des *petits* hommes verts ?

Il est raisonnable de penser que la hauteur d'un éventuel organisme de type humanoïde marchant sur deux jambes est conditionnée par la valeur du champ de pesanteur de la planète où il vit. Par exemple, la hauteur maximale d'un tel organisme serait celle au delà de laquelle une chute sur la tête de la hauteur de son corps serait certainement mortelle. L'énergie potentielle de la tête d'un Martien doit donc être du même ordre de grandeur que celle de la tête d'un Terrien de façon que les énergies cinétiques en cas de chute soient identiques sur Mars et sur Terre. En admettant que les Martiens soient de même constitution que les Terriens — résistance de la boîte crânienne équivalente par exemple — et sachant que le champ de pesanteur sur Mars est de $g_{Mars} = 3,7 \text{ m/s}^2$, nous avons, la masse de la tête de l'un ou de l'autre disparaissant du bilan énergétique — $mgh = mv^2/2$:

$$h_{martien} g_{mars} \approx h_{terrien} g_{terre} \Rightarrow h_{martien} \approx h_{terrien} g_{terre} / g_{mars} \approx 2,65 \cdot h_{terrien}$$

Autrement dit, les martiens devraient être en moyenne pratiquement trois fois plus grands que les terriens. Et les sélénites direz-vous ? La gravité sur la Lune étant environ six fois plus faible que sur Terre, les sélénites devraient être 6 fois plus grands... ce qui les rendraient *a priori* inoffensifs sur Terre, leurs muscles n'étant pas prévus pour une gravité six fois plus grande.

Lanceur de balle pour chien.



L'observateur promenant sa chienne au bord de la mer tenait à la main un lanceur de balle pour chien — cf. document ci-contre. Croisant un autre promeneur, ce dernier s'exclame : « Ah ! C'est bien ça ! Ca donne plus de force à la balle ! » Belle preuve que les raisonnements aristotéliens ont la peau dure ! Car en fait de *force* l'observateur sait que ce lanceur lui permet de lancer la balle bien plus loin avec un moindre effort. En fait, quand la balle quitte le lanceur, elle ne subit plus la force de réaction du logement où elle était — réaction dont la composante normale s'annule dès que le contact cesse. La fonction de ce lanceur n'est donc pas de donner de la force, mais de la *vitesse* ou mieux, de la *quantité de mouvement* à la balle qui, une fois lancée continuerait en ligne droite s'il n'y avait la pesanteur. Mais il y a la pesanteur. La *portée* étant proportionnelle au carré de la vitesse imprimée à la balle et le lanceur doublant *grosso-modo* la longueur du bras de l'observateur, ce dernier peut ainsi envoyer la balle quatre fois plus loin qu'avec son seul bras.

Précisons les choses en déterminant la portée de ce lanceur, c'est-à-dire la distance séparant le lanceur du point d'impact de la balle sur le sol. Si la balle est lancée dans le champ de pesanteur g d'une hauteur h avec une vitesse v_0 et sous un angle θ_0 par rapport à l'horizontale, un calcul relativement simple montre que la portée L est égale à :

$$L = 2h_0 \cos \theta_0 \sin \theta_0 + \sqrt{\sin^2 \theta_0 + h/h_0} \quad \text{avec } h_0 = v_0^2/2g$$

Pour une vitesse v_0 donnée, cette portée est maximale pour l'angle θ_{0m} suivant — là aussi passons sur le calcul :

$$\theta_{0m} = \arcsin 1/\sqrt{2 + h/h_0}$$

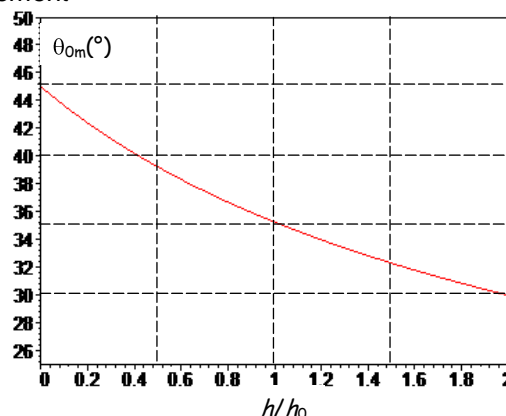
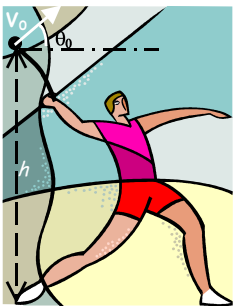
La portée maximale est alors égale à :

$$L_{\max} = 2h_0 \sqrt{1 + h/h_0} = v_0/g \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

Il apparaît donc que le paramètre h/h_0 régit la portée et que plus il est faible, plus on tend

vers une portée maximale caractérisée par $\theta_{0m} = \pi/4, L_{\max} = v_0^2/g$

— celle calculée usuellement

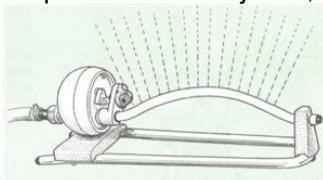


Pour le problème qui nous occupe, il est possible de lancer sans trop d'effort la balle à 10 m sans le lanceur. On peut alors en déduire que la vitesse de lancement est de l'ordre de 10 m.s^{-1} . Avec le lanceur, cette vitesse passe à quelque chose comme 20 m.s^{-1} : la hauteur h_0 est donc de l'ordre de 20 m. Comme la balle est lancée d'une altitude d'environ 2,5 m, il s'ensuit que le rapport h/h_0 est de l'ordre de 0,125. L'angle de lancement optimum est donc légèrement inférieur à 45° et la portée est alors d'un peu plus de 40 m, ce que l'observateur a pu vérifier sans trop se fatiguer. En se fatigant un peu, il est possible d'augmenter notablement cette portée.

Remarque : bien sûr ces calculs ne tiennent pas compte de la traînée subie par la balle, cette traînée étant ici en première approche proportionnelle au carré de la vitesse. Depuis le 20 mai 1990, le record du monde masculin de lancer du poids est détenu par l'américain Randy Barnes avec un jet de 23,12 m : on peut en conclure que le boulet a quitté sa main avec une vitesse d'environ 15 m.s^{-1} , son bras faisant vraisemblablement un angle d'environ 45° avec l'horizontale.

Arroseur de jardin.

Lorsqu'on arrose son jardin, on constate que le jet d'eau épouse une courbe qui a tout du parabolique.



Arroseur oscillant

Effectivement, chaque particule liquide n'est alors soumise qu'à la pesanteur et suit donc les lois de la balistique.

L'observateur a constaté que son arroseur oscillant couvre parfaitement la largeur de son jardin qui est de 10 m. La portée maximale du jet étant ici obtenue pour un angle de 45° , il est possible d'en déduire la vitesse d'éjection de l'eau :

$$v_0 = \sqrt{gL_{\max}} = \sqrt{50} \approx 7 \text{ m.s}^{-1}$$

2- Le temps

2.1- Phénomènes astronomiques.

Newton est-il bien né le jour de Noël ?

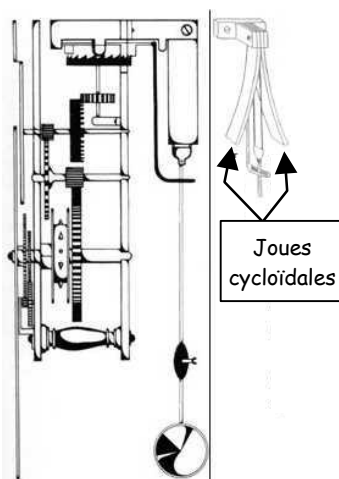
Dans certains ouvrages, on trouve que Newton est né le 25 décembre 1642 — l'année de la mort de Galilée — au manoir de Woolsthorpe dans le Lincolnshire en Angleterre. Et dans d'autres ouvrages qu'il serait né le 4 janvier 1643. Qui a raison ? En fait, le certificat de naissance du grand homme est bien établi à la date du 25 décembre 1642, mais dans le calendrier *julien* en cours à l'époque en Angleterre. Et sur le tombeau de Newton à Westminster Abbey on trouve aussi les dates de 25/12/1642 et de 20/03/1727 pour la mort. Les dates de 4 janvier 1643 pour la naissance et de 31 mars 1727 pour la mort ressortent au calendrier *grégorien*, en décalage de 11 jours par rapport au calendrier julien, et qui ne fut adopté par l'Angleterre qu'en septembre 1752 sous le règne de George II. Mais en tout état de cause, on fêtait bien Noël quand le petit Newton est né.

Pour en savoir plus sur l'histoire des calendriers, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

<http://pages.infinit.net/histoire/calendrier.html>

2.2-Dispositifs construits par l'homme. Comment mesurer une durée ?

Galilée, Huygens et le pendule



Le premier à avoir véritablement abordé scientifiquement l'étude du pendule pesant fut Galilée (1564-1642). Il découvrit la loi d'isochronisme des oscillations du pendule en 1583 — il n'a alors pas encore 20 ans — en observant le balancement d'un lustre au cours d'un office religieux dans la cathédrale de Pise. Pour vérifier la régularité du mouvement, il mesura *grosso modo* la durée des allers-retours du lustre en s'aidant de son pouls et du tempo des chants religieux. Plus tard, en 1638, il établit la loi liant le carré de la période du pendule à sa longueur. Il croyait cependant que la période des oscillations était indépendante de l'amplitude du pendule.

Plusieurs dizaines d'années plus tard, le physicien hollandais Christiaan Huygens (1629-1695) reprit les travaux de Galilée. Il montra en particulier que la période du pendule dépend de l'amplitude de son mouvement pour les grandes oscillations et il en fit une théorie rigoureuse qu'il exposa dans *Horlogium oscillatorium* (1673). Cette étude lui permit d'utiliser le pendule pour réguler le mouvement des horloges — il imagina ainsi *l'échappement à ancre* — cf. figure ci-contre.

Afin de compenser la variation de période, Huygens, s'appuyant sur un travail théorique remarquable — et sans le secours du calcul différentiel qui n'était pas encore inventé —, disposa en haut de son pendule des joues cycloïdales, la période s'avérant alors indépendante de l'amplitude — on trouvera sur le site de l'Université du Mans une simulation du pendule ainsi corrigé. S'il existait déjà au XVII^e siècle des dispositifs « *disant l'heure* » — étymologie du mot *horloge* —, celle de Huygens représenta un progrès notable en assurant un quasi parfait isochronisme. Son gros défaut était cependant d'être difficilement transportable et de perdre toute précision dans un navire par exemple.

Un système MKS de poche.

L'observateur ne se déplace jamais sans une montre à gousset qui pourtant est arrêtée depuis longtemps sans espoir de résurrection. Pourquoi ? Parce qu'elle a une masse de 20 g, soit le cinquantième du kilogramme. La longueur de la chaîne jusqu'au centre de la montre est de 25 cm, soit le quart du mètre. Enfin, pour les petites oscillations, la période est approximativement de 1 seconde. En effet :

$$T = 2\pi\sqrt{l/g} \approx 2\pi\sqrt{1/4\pi^2} = 1 \text{ s}$$

Avec une telle montre, l'observateur dispose ainsi d'un concentré approché du système Mètre-Kilogramme-Seconde.

Plus tu vas loin, plus ton temps est précieux.

Le début des voyages transocéaniques ont rendu nécessaire, voire vitale, une mesure précise du temps. En effet, s'il est aisé de mesurer la latitude — position du parallèle terrestre où l'on se trouve — à l'aide d'un sextant par exemple et de tables astronomiques, la mesure de la longitude — position du méridien — nécessite une référence temporelle établie au port de départ. On tenta d'utiliser pour cela des sabliers qu'un mousse avait pour responsabilité de retourner périodiquement, mais quand le mousse oubliait ou quand une tempête se déclarait, le procédé s'avérait bien aléatoire. On tenta aussi d'utiliser des pointages astronomiques qui perdaient toute efficacité par temps couvert et qui étaient difficiles à mettre en œuvre. Ainsi des navires pouvaient-ils se perdre jusqu'au drame : dans la nuit brumeuse du 22 octobre 1707, deux mille marins de la Royal Navy périrent sur les récifs des îles Scilly suite à une erreur de navigation résultant d'une méconnaissance de la longitude.

La question de la mesure de la longitude représenta donc jusqu'à la moitié du XVIII^e un enjeu humain, scientifique, technique, économique et stratégique. Il n'est donc pas étonnant que les puissances européennes, le Royaume Uni en tête, se soient fortement investies pour trouver une réponse fiable à cette question. Et cette réponse fut donnée en 1761 non pas par les scientifiques mais par un horloger anglais hors pair : John Harrison (1693-1776). En 1735, il proposa une première horloge H1 présentant de nombreuses innovations mais ce ne fut qu'en 1761 qu'il réalisa un « garde-temps » H4, une sorte de grosse montre, qui se révéla parfaitement efficace pour les voyages maritimes. Les horloges de Harrison, qui fonctionnent toujours, peuvent être admirées à l'observatoire de Greenwich. Le livre de

Dava Sobel, *Longitude. L'Histoire vraie du génie solitaire qui résolut le plus grand problème scientifique de son temps* (Points Sciences, Le Seuil, 1998) narre de façon passionnante cette quête de la mesure du temps.

Il n'en reste pas moins qu'à l'heure des voyages spatiaux et du GPS, la précision des horloges n'est pas qu'une question de record : tout positionnement précis se doit de recourir aux horloges atomiques. Début 2008, l'équipe dirigée par le professeur Jun Ye du Joint Institute for Laboratory Astrophysics de l'Université du Colorado a réalisé une telle horloge présentant une précision record de l'ordre de 10^{-16} : théoriquement, dans 200 millions d'années, cette horloge aura pris moins d'une seconde d'avance ou de retard.

Pour en savoir plus, en n'oubliant pas de croiser les informations proposées :

http://www.futura-sciences.com/newsrss-horloge-atomique-toujours-heure-200-millions-annees_666280_0.php

Synchronisation

Avoir une mesure précise du temps est une chose. Synchroniser les horloges en est une autre.

L'*heure universelle*, réglée sur le méridien de Greenwich, est tellement entrée dans les mœurs qu'elle semble avoir existé de tout temps. Pourtant, son installation fut loin d'être chose aisée. Tout commença en gros en 1875 avec la signature à Paris de la « Convention du mètre » qui consacrait la création du *Bureau International des Poids et Mesures*. Dans le même esprit de rationalisation et compte tenu de la mondialisation — déjà ! — des échanges en tout genre, se posa alors le problème de la rationalisation de l'heure — et accessoirement des mesures angulaires à base non décimale. En effet, à cette époque, chaque ville avait *son* heure. Or, le développement des chemins de fer allié à celui de la télégraphie électrique nécessitait de plus en plus d'harmoniser toutes ces heures. Ainsi, quelqu'un qui prenait le train à Brest était-il en face de trois heures différentes : celle de Brest, celle dans la salle d'attente synchronisée sur Paris et celle du quai, en retard de trois à cinq minutes pour rendre irrecevables les contestations de voyageurs. La télégraphie, développant une véritable « toile » en réseau sur le globe, donnait l'occasion de synchroniser les horloges, la chose étant plus facile à dire qu'à faire. Il y a certes les problèmes techniques, et au travers eux les problèmes théoriques — propagation du signal électrique — mais aussi des problèmes d'ordre économique, politique, diplomatique, géographique, voire nationaliste. En 1884, après une conférence houleuse qui eut lieu à Washington, un traité fut signé instituant le méridien de Greenwich comme méridien de référence. Les Français qui, pratiquement seuls contre tous, militaient pour la neutralité de la référence horaire — en tout cas tout, mais pas Greenwich et de préférence Paris —, ne se rallièrent à ce traité qu'en... 1911 et restèrent ainsi en avance sur le monde de 9 minutes 21 secondes pendant 27 ans.

L'immense physico-mathématicien Henri Poincaré (1854-1912), membre du Bureau des Longitudes en 1893 — il en devint le président en 1899 — fut ainsi confronté à l'ensemble des problèmes soulevés par la cartographie électrique usant tout d'abord du télégraphe électrique, puis de la télégraphie sans fil après 1900. Voulant décimaliser les mesures angulaires — les fameux « grades » — et horaires, il fut en butte à l'opposition des... physiciens : en effet, décimaliser le temps contraint à modifier toutes les unités où il intervient. Quoi qu'il en soit, établir avec précision les longitudes conduisit rapidement à se poser des questions de fond : comment synchroniser deux horloges qui ne sont pas au même endroit ? Que signifie que deux événements sont *simultanés* ? En 1898, Poincaré montra ainsi combien la mesure du temps est affaire de « convention » — « *La simultanéité de deux événements ou l'ordre de leur succession, l'égalité de deux durées, doivent être définies de telle sorte que l'énoncé des lois naturelles soit aussi simple que possible.* »

Pour en savoir plus, on ne peut que vivement recommander la lecture du livre passionnant de Peter Galison sur la question, à savoir *L'empire du temps, les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré* (Robert Laffont, 2005).