

La gravitation

Primaire et collège

Résumé

C'est à un voyage dans le temps et dans l'espace que cette présentation de la gravité vous invite. Le voyage commence vers 1590, à l'intérieur du Duomo de Pise, et se termine mille ans plus tard, quand la mission conduite par le capitaine Map (2543-2590) pénètre – pour toujours – à l'intérieur du trou noir SgrA*, au centre de notre galaxie.

la gravitation

Pierre Binetruy

C'est à un voyage dans le temps et dans l'espace que cette présentation de la gravité vous invite. Le voyage commence vers 1590 à l'intérieur du Duomo de Pise et se termine mille ans plus tard, quand la mission conduite par le capitaine Map (2543-2590) pénètre – pour toujours – à l'intérieur du TROU NOIR SgrA*, au centre de notre galaxie.

Galilée et la chute des corps

Nous sommes effectivement avec Galilée (1564-1642) à l'intérieur de la cathédrale de Pise. Son attention se porte sur les lustres suspendus dans la nef centrale ; ils oscillent doucement. La légende veut qu'un petit tremblement de terre se soit produit précisément à ce moment-là en Toscane. Ce qui provoque l'étonnement de Galilée, c'est que, si les cordes qui soutiennent les lustres sont toutes de même longueur, les lourds candélabres sont de poids et de formes très variés : pourtant, ils oscillent avec la même fréquence. Pourquoi cette fréquence d'oscillation serait-elle la même pour tous ?

L'attention de Galilée à cette oscillation procédait en fait d'une étude attentive du mouvement de chute des corps. Avant de décrire en détail l'approche de Galilée, il est nécessaire de préciser un peu l'état des connaissances à son époque. La physique

reposait alors sur des considérations aristotéliennes vieilles de deux mille ans. Par exemple, selon Aristote, les objets tombent à des vitesses proportionnelles à leur POIDS : la plume tombe moins vite que la balle. L'observation immédiate montre que le mouvement dépend du milieu : une bille de plomb ne tombe pas de la même façon dans l'air, dans l'eau ou dans l'huile. Aristote en déduit que le milieu est nécessaire au mouvement et rejette ainsi l'idée de vide : dans le vide, le mouvement serait instantané, une absurdité. Bien sûr, la chute n'est pas le seul mouvement possible. Selon les aristotéliens, on distingue mouvement naturel (mouvement vers le haut ou vers le bas selon que l'élément constituant tient plus de l'air ou plus de la terre) et mouvement forcé, c'est-à-dire sous l'action d'une force. Le mouvement des étoiles, qui ne semblent ni tomber ni s'éloigner puisqu'elles reviennent toutes les nuits, relève d'une catégorie spéciale : le mouvement circulaire, parfait et éternel, celui des sphères célestes. Tout ceci peut sembler bien naïf, mais est-ce si éloigné de ce que notre perception immédiate nous indique ?

Si nous lâchons une boule d'acier et une boule de liège à hauteur de bras, le mouvement est trop rapide pour qu'il soit possible de l'étudier directement en détail, surtout avec les moyens qui étaient



Les plans inclinés de Galilée

Matériel : une planche de 5 mètres de long ; une boule de pétanque en acier, une boule de bois et une boule de polystyrène ou de liège, si possible de même taille ; un chronomètre.

Inclinez la planche de façon à ce qu'elle fasse un angle d'une dizaine de degrés avec l'horizontale ; comparez le mouvement de roulement des trois boules le long de la planche inclinée ; étudiez en détail le mouvement de la boule d'acier en repérant sa position après une, deux et trois secondes (en faisant cette expérience sur la terrasse des Treilles, nous nous sommes aperçus que suivre la boule des yeux entraînait une erreur de mesure ; il est donc préférable de faire une première fois l'expérience en marquant les positions successives de la boule par des papiers numérotés, puis de vérifier en répétant l'expérience les yeux fixés sur chacun des papiers et non sur la boule – du travail pour tout le monde).

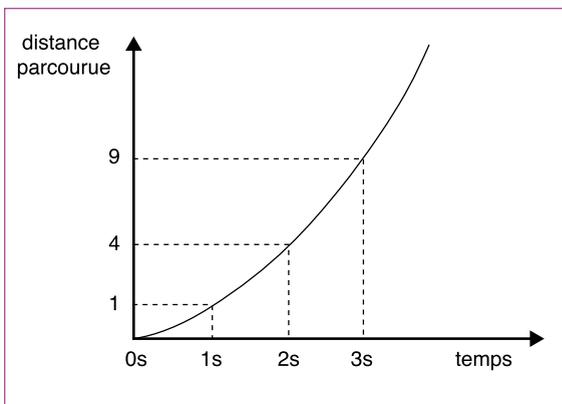
à la disposition de Galilée pour mesurer le temps (la légende veut qu'il ait parfois utilisé son pouls, en se souvenant probablement de ses études de médecine). Pour ralentir le mouvement, et pouvoir ainsi l'étudier, il eut l'idée d'utiliser des plans inclinés.

L'intérêt des expériences sur plan incliné est qu'on peut faire varier l'influence du milieu (par exemple en ayant une surface plus ou moins rugueuse, ou plus ou moins cirée). On voit ainsi comment la présence d'un frottement plus ou moins important influe sur le mouvement. On peut alors se convaincre que, dans l'expérience précédente, dans la limite où les frottements auraient été nuls, les distances auraient varié comme les carrés des temps, c'est-à-dire dans un rapport $1/4/9$ quand on prend les repères à $1/2/3$ secondes (ci-contre).

C'est ce que l'on appelle « mouvement uniformément accéléré » : l'accélération, c'est-à-dire le taux d'accroissement de la vitesse, est ici constante. En d'autres termes, quand les frottements sont négligeables – nous dirons : dans le vide –, le mouvement de chute se fait de façon identique pour tous

les corps. Galilée réintroduit donc d'une certaine façon la notion de vide.

Une autre façon d'appréhender le vide avec des plans inclinés est de considérer le montage page suivante. Dans la limite où il n'y aurait pas de frottement, la boule lâchée sur le plan A remonterait à la même hauteur sur le plan B (*a*). On peut s'en convaincre en faisant varier la rugosité des plans inclinés : moins il y a de frottements, plus la boule se rapproche de la hauteur initiale. Le vide correspond donc à un cas idéal, à un milieu limite dans lequel la loi de la chute des corps prend une forme simple et universelle. Abaissons maintenant le plan B : moins il



Expérience : une feuille et un livre tombent de la même façon.

Matériel : un livre et une feuille de papier de même taille.

Tenir à bout de bras une feuille et un livre et les laisser tomber. Répéter l'expérience en mettant le livre sur la feuille. Qu'observez-vous et comment l'expliquez-vous ? Vérifiez votre interprétation en mettant finalement la feuille sur le livre. Qu'attendez-vous comme résultat ? Qu'observez-vous ? Dans ces conditions, la feuille n'est plus soumise aux frottements contre l'air et tombe à la même vitesse que le livre !

est incliné (b), plus la boule part loin vers la droite. Dans la limite où B serait horizontal (c), la boule partirait indéfiniment vers la droite (dans la limite idéale du vide, c'est-à-dire en l'absence de frottement) avec une vitesse constante, la vitesse acquise au bas du plan A. Ce mouvement à vitesse constante va nous permettre d'illustrer la notion très importante d'INERTIE.

Selon le principe d'inertie, si aucune force ne s'exerce sur un corps, il se déplace d'un mouvement linéaire uniforme avec une vitesse constante égale à sa vitesse initiale (ou reste immobile s'il l'était déjà). Le corps continue sur sa trajectoire parce qu'il a de l'inertie. Si l'on veut le faire changer de trajectoire, on doit exercer une force, mais plus le corps est massif, plus il a d'inertie. En fait, la MASSE d'un corps est une mesure de son inertie, c'est-à-dire de sa résistance aux changements de mouvement.

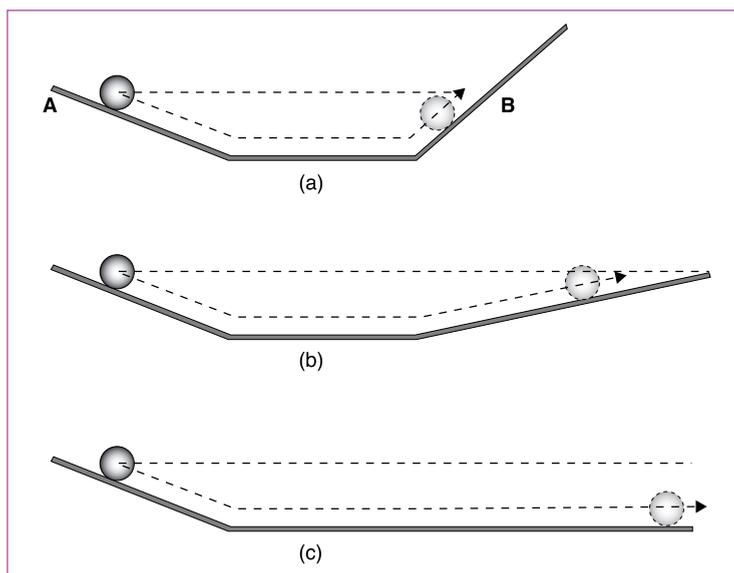
On a souvent tendance à confondre poids et masse, parce qu'ils sont proportionnels dès qu'on est dans le CHAMP DE PESANTEUR terrestre, mais ils se réfèrent à deux propriétés physiques distinctes. Le poids d'un corps est la force qui s'exerce sur

ce corps dans le champ de pesanteur. La masse mesure l'inertie. Précisons la notion d'inertie par quelques exemples.

Vous travaillez dans la mine. Si vous ne vous nommez pas Stakhanov, vous préférez certainement mettre en branle un chariot vide plutôt qu'un chariot plein de minerai. Le chariot plein a plus de masse, donc plus d'inertie, et résiste donc plus aux changements de mouvement. Mais peut-être pensez-vous que c'est plutôt parce qu'étant plus pesant, il appuie plus sur les rails et que vous devez vaincre des frottements plus importants ? Alors, une question : préférez-vous arrêter un chariot vide ou un chariot plein ? Malgré tout, le chariot vide. Vous devez de nouveau modifier le mouvement du chariot (le faire passer de la vitesse qu'il a acquise à une vitesse nulle) : l'inertie du chariot est ici aussi sa résistance au changement de mouvement. Nous venons de le voir, le chariot plein a plus d'inertie et résistera davantage au changement de mouvement, c'est-à-dire au passage d'un mouvement de vitesse non nulle à un arrêt complet.

Revenons un instant sur les expériences de Galilée sur les plans inclinés. Pour

éliminer les frottements de la façon la plus efficace possible, il faudrait pouvoir s'affranchir du plan incliné : ce serait le meilleur moyen de « faire le vide ». Pour cela, on peut attacher la boule (voir la figure page 57) : elle va se mettre à osciller comme un pendule. C'est pour cette raison qu'en cette matinée de 1590 où commence notre histoire, Galilée s'intéresse aux candélabres du Duomo. Ils sont en « chute », disons contrôlée, dans le champ de pesanteur et le fait qu'ils oscillent tous de la même





Expérience

Matériel : un verre rempli d'eau, une feuille de papier (sèche), une serpillière.

Posez la feuille sur une table et le verre au centre de la feuille. Tirez doucement la feuille vers vous. Qu'observez-vous ? Tirez brusquement la feuille vers vous (pour éviter les éventuels dégâts collatéraux, on aura intérêt à éloigner les observateurs à une distance raisonnable...). Qu'observez-vous ? Comparez l'inertie de la feuille à celle du verre. La feuille a une masse plus faible que le verre et peut être mise en mouvement beaucoup plus facilement ; le verre reste, lui, sur la table parce que sa masse, donc son inertie, est plus grande.

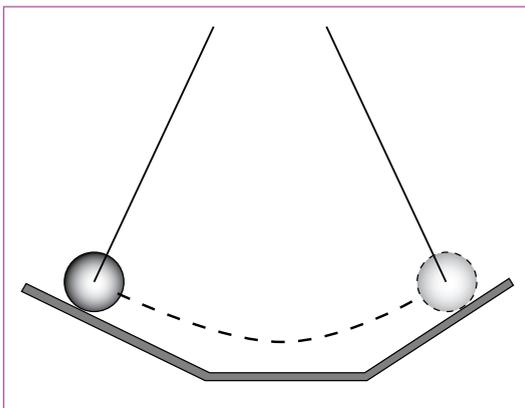
Questions/réponses

Comment un astronaute en état d'apesanteur fait-il la différence entre deux boîtes de sucre, l'une vide et l'autre pleine (sans les ouvrir) ? *En les agitant. Le poids est nul mais pas la masse, donc pas l'inertie.*

Pour enfoncer un clou dans une caisse, préférez-vous taper avec le marteau sur le clou ou précipiter la caisse et son clou sur la tête du marteau ? *Le marteau est moins massif que la caisse, il a donc moins d'inertie et peut être mis en mouvement plus facilement.*

façon est une indication précieuse que tous les corps tombent de la même façon.

En observant vos pendules bouger, vous devriez avoir tout le temps de réfléchir à la beauté de cette expérience et de ce qu'elle permet de découvrir : puisque ces corps si différents battent avec la même PÉRIODE, c'est le signe qu'il y a derrière ce mouvement une loi fondamentale qui s'applique à tous les corps. Nous sommes au cœur de ce qu'est le raisonnement physique, mélange subtil



Les pendules du Duomo

Matériel : les trois boules de l'expérience des plans inclinés ; trois ficelles d'environ 2,50 m de long ; trois bras assez stables.

Attachez les trois boules aux extrémités des ficelles, et réalisez ainsi trois pendules de même longueur ; lâchez-les simultanément et avec la même amplitude ; observez combien de temps ils restent synchrones (en mesure).

de raisonnement empirique (fondé sur l'expérience réelle et sur l'expérience par la pensée) et de formalisation mathématique. Un dernier mot : les boules des pendules n'arrêtent pas de « tomber » dans le champ de pesanteur (ou plus exactement d'être en chute « contrôlée »). Pourquoi sont-elles moins sensibles au frottement de l'air que si elles étaient en chute libre ? Parce que ces frottements sont proportionnels à la vitesse : l'astuce du pendule est que l'on n'atteint jamais de grandes vitesses (il suffit de comparer la vitesse d'oscillation des candélabres du Duomo à celle qu'ils acquerraient si la corde qui les retient cédait), ni donc de grands frottements.

Newton et la chute de la Lune

Galilée a eu le mérite d'identifier les notions de masse et d'accélération et de formuler la loi de la chute des corps. Mais c'est Newton



(1642-1727) qui a compris que cette loi était un cas particulier de l'attraction qui s'exerce entre deux corps massifs, que ce soit entre une boule en chute libre et la Terre ou entre deux corps célestes. On appelle « gravitation » cette forme d'attraction.

Le poids d'un corps est donc la force gravitationnelle exercée par la Terre sur ce corps. Il est mesuré, comme toute force, en... newtons (abréviation : N).

Repartons alors de l'observation de Galilée : tous les corps tombent avec la même accélération. L'accélération augmente avec le poids mais diminue avec la masse, puisque celle-ci mesure une résistance aux changements de mouvement. En fait, une masse deux fois plus grande aura un poids deux fois plus grand mais la même accélération, soit :

$$\frac{\text{poids}}{\text{masse}} = \text{accélération}$$

Le poids est une force. Cette relation n'est en fait qu'un cas particulier de ce qu'on appelle « seconde loi de Newton » :

$$\text{force} = \text{masse} \times \text{accélération}$$

L'accélération de la pesanteur est notée g et vaut environ 10 m/s^2 ou N/kg . Si nous notons P le poids et m la masse, alors on peut écrire l'équation sous la forme :

$$P = mg$$

J'ai dit plus haut que le mérite de Newton est d'avoir compris que la force gravitationnelle s'exerce aussi bien entre les corps célestes comme les planètes et les étoiles. Nous allons maintenant faire

quelques expériences avec une simple balle de tennis (à la Galilée), à laquelle nous allons bientôt faire jouer un rôle « cosmique » (à la Newton). Si nous lançons la balle devant nous vers le haut, sa trajectoire est une courbe mathématique bien connue : la parabole (une remarque de Galilée, toujours lui). Ceci indique encore que, derrière le simple acte de lancer une balle, se profile une loi fondamentale, celle de la chute des corps (toujours Galilée).

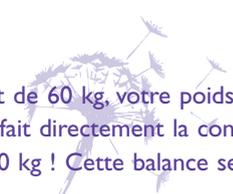
Montons maintenant au deuxième étage : nous sommes à 5 m du sol. Si nous lâchons la balle (sans vitesse initiale), elle arrivera au sol une seconde plus tard. Si maintenant nous envoyons la balle avec une vitesse horizontale de 1 m/s, le mouvement selon la verticale restera inchangé et la balle atteindra le sol au bout d'une seconde ; la différence est qu'à cause de sa vitesse horizontale, elle aura franchi 1 m selon l'horizontale et tombera donc à 1 m de nous. Si nous lançons la balle avec une vitesse horizontale de 10 m/s, elle tombera sur le sol une seconde plus tard à 10 m de nous. Si nous prenons un peu de potion magique et lançons la balle avec une vitesse de 8 000 m/s, elle franchira 8 000 m pendant la seconde où elle tombera de 5 m.

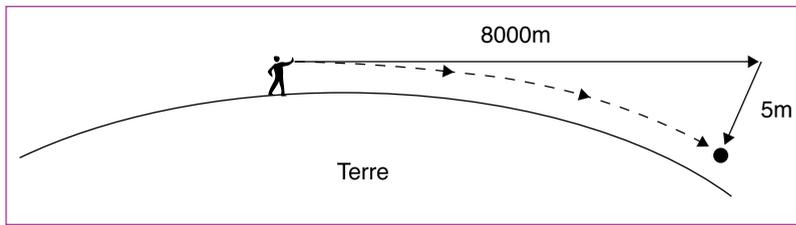
J'ai choisi la valeur de 8 000 m à dessein. Parce que la Terre est ronde, si nous traçons à partir d'un point de la surface terrestre un segment de ligne droite de 8 000 m, son extrémité opposée se trouve 5 m au-dessus du sol. Redescendons donc au rez-de-chaussée et lançons la balle horizontalement



Quel poids faites-vous ?

- Se peser sur une balance, c'est mesurer une force. Si, par exemple, votre masse est de 60 kg, votre poids est de $60 \text{ kg} \times 10 \text{ N/kg}$, soit 600 N. La balance devrait donc indiquer 600 N. Mais elle fait directement la conversion, étant graduée en kilogrammes, et vous donne une mesure de votre inertie : 60 kg ! Cette balance serait évidemment fautive sur la Lune.





à 8 000 m/s : elle se retrouvera une seconde plus tard 8 000 mètres plus loin, toujours à la même hauteur par rapport au sol et, si sa vitesse n'a pas diminué, continuera son mouvement autour de la Terre : nous aurons mis la balle en orbite !

Évidemment, il y a un problème : les frottements de la balle sur l'air. Ceux-ci seraient énormes sur une balle animée d'une telle vitesse et la réduiraient même en cendres. Pour éviter ces frottements, nous pouvons nous extraire de l'atmosphère et répéter l'expérience à quelques centaines de kilomètres d'altitude. C'est exactement sur ce principe que fonctionne la mise en orbite des satellites. Un satellite en orbite n'arrête pas de tomber sur la Terre. En particulier le plus gros de tous : la Lune, satellite naturel !

C'est précisément à ces considérations qu'est associée la légendaire pomme de Newton. C'est en regardant une pomme tomber d'un arbre que Newton se serait posé la question de savoir si la pomme tomberait de la même façon si l'arbre avait 100 m de haut, 1000 m de haut... ou allait jusqu'à la Lune. Et si la Lune tombait ? La Lune tombe, comme la pomme, dans le champ de pesanteur de la Terre, mais sa vitesse horizontale est suffisante pour qu'elle orbite autour de la Terre. Ainsi, le mouvement circulaire uniforme n'est pas le mouvement parfait des sphères célestes, comme le pensait Aristote. Ce n'est qu'une des formes des mouvements possibles dans le champ d'attraction de la Terre, décrite par la même loi que la balle que je lance.

À l'époque, Kepler (1571-1630) avait établi avec précision les lois sur le mouvement des planètes, mais en avait déduit faussement que la force s'exerçait dans la direction

du mouvement : nous venons de voir qu'il n'en est rien pour la Lune, par exemple, où la force s'exerce selon l'axe Terre-Lune. Précisons un point à ce propos. Nous avons parlé plus haut d'attraction gravitationnelle : la Lune attire autant la Terre que la Terre attire la Lune ; c'est la Lune qui bouge parce que sa masse, donc son inertie, est plus faible. Cette attraction réciproque est un cas particulier de la LOI DITE DE L'ACTION ET DE LA RÉACTION. Newton généralise l'exemple Terre-Lune. Ainsi, la force d'attraction exercée dans le système solaire peut être considérée comme issue du Soleil même. Et la Terre exerce sur le Soleil une force d'attraction en retour qui est égale en grandeur. Cette fois-ci, c'est la Terre qui bouge parce qu'elle a moins d'inertie (de masse) !

Si nous assimilons le Soleil à une sphère, des arguments de symétrie peuvent nous convaincre que l'attraction gravitationnelle à grande distance serait identique si toute sa masse était concentrée en son centre. On en déduit (voir l'expérience page suivante) que la force gravitationnelle varie en raison inverse du carré de la distance au centre. Ceci est caractéristique d'un effet causé par une source localisée qui émet dans toutes les directions. Cela est dû au fait qu'à une distance r de la source, l'effet doit se répartir uniformément sur une sphère de rayon r , et donc de surface qui varie en r^2 .

Nous pouvons maintenant récapituler. Nous avons introduit une force unique qui décrit aussi bien l'interaction entre les



Le tag cosmique

- Pour vous en convaincre, vous pouvez vous représenter projetant de la peinture sur un mur à partir d'une bouteille sous pression. Si vous projetez la peinture pendant une durée déterminée (disons une minute), et que vous vous placez successivement à 1 m, 2 m puis 3 m du mur, l'épaisseur de la couche sur le mur sera respectivement dans un rapport de 1, 1/4 et 1/9. La surface couverte sera au contraire d'autant plus grande que vous serez éloigné.
- De la même façon, l'intensité lumineuse reçue par votre œil quand vous êtes à une distance de 5 m, 10 m ou 15 m d'une bougie est aussi dans un rapport de 1, 1/4 et 1/9.

planètes que celle entre la Terre et un objet en chute libre : la force gravitationnelle ou gravité. Deux corps de masse m et M situés à une distance d l'un de l'autre (pensez à la Terre et à la Lune) exercent l'un sur l'autre une force d'attraction F égale à :

$$F = G \frac{mM}{d^2}$$

où g est une constante universelle, appelée constante de Newton et qui est extrêmement petite (nous allons la calculer). J'ai écrit la formule ci-dessus parce qu'elle est fondamentale, et parce qu'elle résume en quelques signes toutes les considérations précédentes. Elle est appelée LOI DE LA GRAVITATION UNIVERSELLE de Newton.

Jouons un peu avec cette formule, au moins pour ceux qui ne sont pas totalement réfractaires aux formules mathématiques. Par exemple, nous avons dit que le poids d'un corps est la force gravitationnelle exercée par la Terre sur ce corps. Si nous considérons un corps de masse m situé à la surface de la Terre, nous pouvons appliquer la formule avec $M = M_T$, la masse de la Terre, et $d = R_T$, la

distance entre le centre de la Terre et le corps, soit ici le rayon de la Terre (6000 km) :

$$poids = G \frac{mM_T}{R_T^2} = m \times \frac{GM_T}{R_T^2}$$

On reconnaît que le poids peut se mettre sous la forme mg et on peut relier l'accélération de la pesanteur g à la constante universelle G . (Ceux que n'effraient pas les puissances de 10 peuvent aisément calculer G à partir de g , R_T et de la masse de la Terre $M_T = 6 \times 10^{24}$ kg. Ils devraient trouver une valeur pour G de l'ordre de 6×10^{-11} Nm²/kg².)

Vous en savez maintenant bien assez pour comprendre (presque) toutes les subtilités des phénomènes des marées, par exemple. Elles résultent des interactions couplées entre la Terre, la Lune et le Soleil. Quant à nous, sautons un peu dans le temps pour retrouver Albert Einstein (1879-1955) au début du XX^e siècle. Einstein a effectivement révolutionné nos conceptions sur la gravitation avec sa THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE. Comme nous allons le voir, il a montré que la masse « courbait l'espace ».



Questions/réponses

- Quel est votre poids si vous êtes à une altitude de 6 000 km ? Quelle est votre masse ?
- La masse est évidemment inchangée, disons 60 kg. Quant au poids, plus vous éloignez de la Terre, moins vous subissez son attraction gravitationnelle. Vous êtes à une distance du centre de la Terre de deux fois le rayon terrestre : la force gravitationnelle est donc divisée par 4 par rapport à l'altitude zéro (où la distance est un rayon terrestre). Elle valait 600 N à la surface de la Terre. Elle ne vaut plus que 150 N. Pas de quoi s'inquiéter (ou se réjouir) : votre masse est toujours de 60 kg.

Mais avant d'expliciter ces termes, nous devons d'abord suivre Einstein dans sa réflexion sur l'espace et le temps, résumée dans sa THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE, qui date de 1905.

Einstein et le ballon ovale

Nous rejoignons Einstein dans un train. Tous les rideaux du wagon sont tirés et, dès lors que le train avance à une vitesse constante, il est impossible de connaître sa vitesse de l'intérieur. Pis : il est même impossible de savoir s'il avance. Seuls l'indiquent les moments d'accélération (augmentation de la vitesse) ou de décélération (diminution) pendant lesquels le corps ressent une poussée vers l'arrière ou vers l'avant.

Le wagon est notre espace de référence, celui à partir duquel nous « prenons nos marques ». C'est ce que les physiciens appellent un RÉFÉRENTIEL. La vache qui regarde le train passer a clairement un autre référentiel (et probablement d'autres échelles de valeur, mais là, nous quittons la physique) : dans son référentiel, notre train se déplace.

En suivant Galilée, Einstein élève l'observation précédente au niveau d'un postulat : toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres. Il qualifie ces référentiels de GALILÉENS, en hommage à qui vous savez.

Ce postulat d'Einstein a des conséquences très profondes : elles vont jusqu'à remettre en cause notre notion du temps. De quoi hésiter à faire un voyage en train avec Einstein ! Voyons quand même cela de plus près.

Les lois de l'ÉLECTROMAGNÉTISME, fixées à la fin du XIX^e siècle par Maxwell (1831-1879), font intervenir de façon centrale la vitesse de

la lumière, notée c ($c = 300\,000$ km/s). Rien d'étonnant, puisque l'électromagnétisme inclut l'optique : les ondes électromagnétiques (y compris lumineuses) se propagent dans le vide à la vitesse c . Puisque les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens, la vitesse de la lumière doit y être la même.

Cette assertion en apparence anodine va entraîner la relativité des mesures du temps par rapport à l'observateur qui fait la mesure. Revenons dans le wagon, ouvrons les rideaux et faisons l'expérience (fictive) suivante (voir le schéma page suivante). Une très brève impulsion de lumière est émise par une lampe placée au sol et l'on mesure avec un chronomètre (a de la figure page suivante) le temps que cette impulsion met à se réfléchir sur un miroir accroché au plafond et à revenir à son point de départ. On a la relation standard :

$$\frac{\text{distance}}{\text{temps}} = c$$

Nous avons procuré un second chronomètre à la vache qui voit passer le train, et elle a fait une mesure similaire. Similaire, mais différente ! Décomposons en effet le mouvement du train (b). La distance parcourue par l'impulsion entre le moment où elle est émise et celui où elle est réfléchi sur le miroir est plus grande que précédemment : pour la simple raison que le miroir s'est déplacé (avec le train) par rapport à la vache. Même remarque pour la distance parcourue par l'impulsion entre la RÉFLEXION sur le miroir et le retour au point de départ. Nous allons appeler cette nouvelle distance dans le référentiel de la vache distance ♣. Puisque le rapport de la distance au temps est la vitesse de l'impulsion de lumière, qui ne peut être que c , nécessairement le temps mesuré par le chronomètre de la vache est un nouveau temps ♣ de façon que :

$$\frac{\text{distance } \clubsuit}{\text{temps } \clubsuit} = c$$

Donc, quand nous comparons les deux chronomètres, ils marquent une durée différente entre le départ et l'arrivée de l'impulsion. Et inutile de se livrer à un ANTHROPOCENTRISME de mauvais aloi : la vache a autant raison que nous, au moins sur ce point-là.

Puisque la distance mesurée de l'extérieur est la plus grande (distance $\clubsuit >$ distance), la durée mesurée par la vache est la plus grande (temps $\clubsuit >$ temps) : la même succession d'événements semble prendre moins de temps dans les référentiels en mouvement (ici le train). Les horloges en mouvement semblent donc aller plus lentement. C'est ce qu'on appelle « dilatation des temps dans les référentiels en mouvement ». De façon remarquable, cette dilatation des temps a été mesurée expérimentalement : on a synchronisé deux horloges atomiques puis fait voyager l'une d'entre elles dans un avion

pendant près de vingt-quatre heures. Quand on l'a comparée à l'horloge qui était restée immobile, elle retardait.

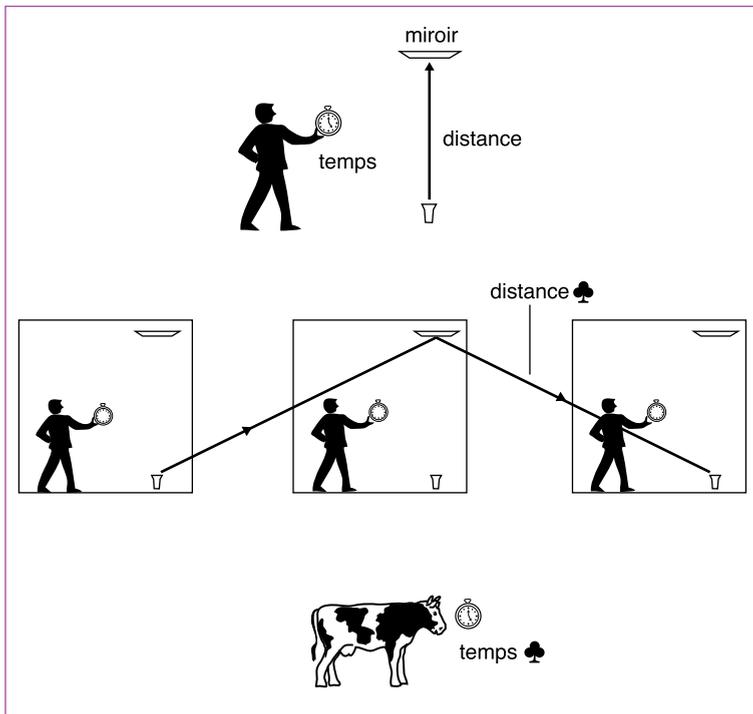
Bien sûr, notre exemple de train n'avait qu'une vertu pédagogique. La dilatation des temps dans un train est tout à fait négligeable. Il serait nécessaire que la vitesse du train soit comparable à celle de la lumière pour qu'il en soit autrement.

Que se passe-t-il quand la vitesse du référentiel mobile tend vers la vitesse de la lumière ? Dans ce cas, la dilatation des temps s'accroît infiniment et, d'une certaine façon, l'on peut dire que le temps s'arrête. C'est pour cela que la vitesse de la lumière représente une valeur limite pour les vitesses dans le cadre de la théorie de la relativité.

Si la notion de temps est devenue relative, la notion d'espace l'est tout autant. Si la vitesse de notre train était proche de celle de la lumière, alors un ballon de football apparaîtrait à un observateur immobile (notre vache) comme aplati dans la direction du

mouvement : comme un ballon ovale, quoi ! On appelle ceci « CONTRACTION DES LONGUEURS dans les référentiels en mouvement ». Notons que la déformation (contraction) ne se fait que dans la direction du mouvement : les longueurs restent inchangées dans la direction perpendiculaire au mouvement (la grande dimension de notre ballon ovale).

Nous voyons donc que les notions d'espace et de temps, nous dirons dorénavant d'espace-temps, sont bouleversées par le postulat d'Einstein.



Einstein et les ascenseurs en chute libre

Einstein considérait toutefois que la restriction de son postulat à des référentiels galiléens était une limitation injustifiée d'un point de vue physique. C'est en cherchant à s'affranchir de cette restriction qu'il a conçu la théorie de la relativité générale.

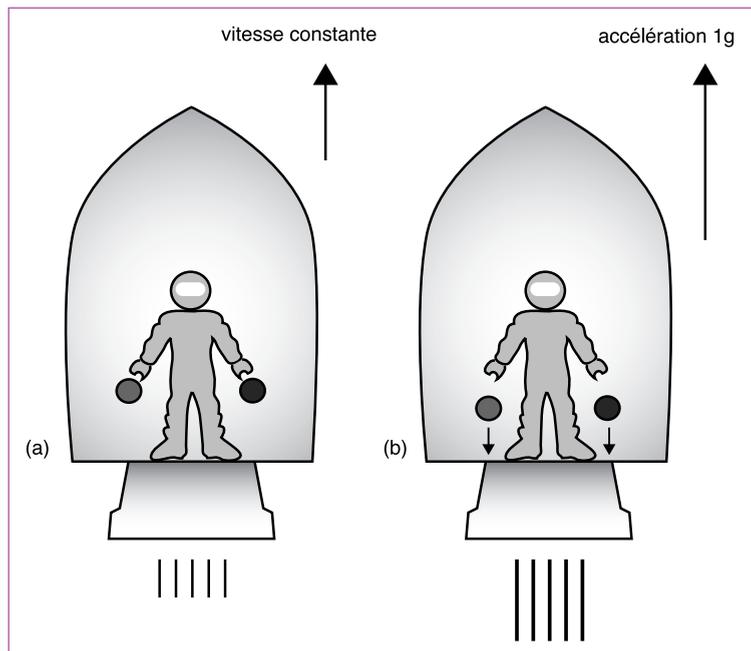
Échangeons notre train pour un vaisseau spatial suffisamment loin de la Terre pour ne pas en subir l'attraction : nous sommes en état d'apesanteur. Dans le cas où le vaisseau spatial est en mouvement uniforme, si nous lâchons une boule de bois et une boule de plomb, elles flotteront immobiles à l'intérieur du vaisseau : elles ont la même vitesse que le vaisseau et continuent donc à l'accompagner dans son mouvement (*a*, ci-dessous). Si maintenant le vaisseau subit une accélération, disons égale à 1 g pour fixer les idées, alors quand nous lâchons les boules, elles vont sembler tomber (*b*) : en fait, elles continuent à avancer à la vitesse qu'elles avaient quand nous les avons lâchées mais puisque le vaisseau a accéléré, c'est-à-dire a augmenté sa vitesse, il s'est déplacé relativement aux boules. Comme nous nous déplaçons avec lui, ce sont les boules qui semblent se déplacer.

Une simple question de mouvement apparent. Pourtant, une nouvelle fois, Einstein va l'élever au niveau de postulat ! Il nous dit que nous n'avons aucun moyen physique de distinguer entre le mouvement de boules sous l'effet de la gravitation terrestre (nous dirons : dans le CHAMP GRAVITATIONNEL de la Terre, un champ gravitationnel

étant pour nous simplement une région de l'espace où les corps sont soumis à une force gravitationnelle) et le mouvement des boules dans le vaisseau spatial accéléré. Deux phénomènes – gravitation et accélération – d'origines bien différentes et pourtant équivalents.

Une autre façon de présenter cette équivalence est la suivante : nous sommes maintenant de retour sur Terre, nous nous enfermons dans une pièce et nous fermons bien les volets pour n'avoir pas de contact avec l'extérieur. De nouveau, nous lâchons les deux boules qui tombent par terre. Impossible pourtant de voir une différence avec le mouvement des boules dans le vaisseau spatial. Autrement dit, tant que nous n'avons pas rouvert les volets pour voir à l'extérieur, impossible de dire si nous sommes sur Terre ou dans un vaisseau spatial soumis à une accélération de 1 g.

Si accélération et gravitation sont équivalentes, on devrait pouvoir annuler les effets de la gravitation par une accélération appropriée. Rien de plus facile ! Il suffit, lors



d'une descente en ascenseur, de couper le câble. Einstein nous dit que rien ne peut différencier notre mouvement à l'intérieur de la cage d'ascenseur du mouvement d'un astronaute dans un vaisseau spatial en mouvement uniforme : nous semblons flotter dans la cage d'ascenseur en chute libre comme l'astronaute en état d'apesanteur. La conquête spatiale à portée de toutes les bourses !

Il y a toutefois des voyages spatiaux qui se terminent mal.

Le postulat d'Einstein qui établit une équivalence entre accélération et gravitation a pour nom **PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE** : les observations faites dans un référentiel en accélération sont impossibles à distinguer d'observations faites dans un champ de gravitation.

Appliquons ceci à la lumière. Pour cela, reprenons place dans notre vaisseau spatial et émettons un rayon de lumière horizontalement. Si le vaisseau est en mouvement uniforme (a), nous savons que la lumière se propage en ligne droite (c'est le cas sur Terre et donc dans tout référentiel

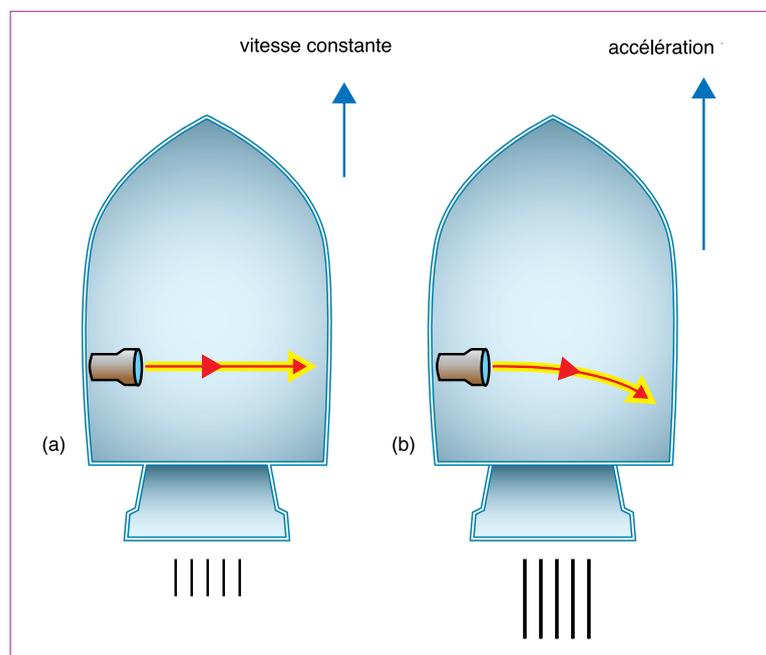
en mouvement uniforme par rapport à la Terre). Mais ce n'est plus le cas si le vaisseau est en mouvement accéléré. Comme pour la boule, le vaisseau continue à accélérer une fois la lumière émise et, pour l'observateur dans le vaisseau, la lumière semble tomber (b) : sa trajectoire est courbe. Mais si la trajectoire de la lumière est courbe dans un vaisseau accéléré, alors, d'après le principe d'équivalence, elle est aussi courbe dans un champ gravitationnel. Les rayons lumineux sont déviés par un champ gravitationnel intense. L'effet a été mesuré sur des rayons lumineux passant près du Soleil (et donc soumis au champ gravitationnel solaire, beaucoup plus intense que le champ gravitationnel de la Terre parce que le Soleil est beaucoup plus massif).

Les montres molles

Nous allons interpréter cet effet comme une preuve que l'espace-temps est courbe. Commençons par faire une petite expérience en chambre pour mieux appréhender la notion d'espace courbe (ci-contre).

Cette expérience était destinée à nous donner une idée intuitive de la notion d'espace courbe. Voyons plus en détail les raisons qui nous conduisent à introduire un espace-temps courbe.

Pour cela, notre voyage nous conduit dans une fête foraine. L'attraction qui va nous intéresser est l'un de ces manèges en forme de vastes plateaux circulaires qui tournent rapidement sur eux-mêmes comme des tourne-





Questions/réponses

Comment peut-on s'affranchir de la lumière du Soleil pour observer le rayon lumineux défléchi ?

En faisant l'observation lors d'une éclipse. La première observation a été faite lors de l'éclipse totale de Soleil de 1919.

disques : une bonne façon d'expérimenter les effets de la force centrifuge. Dans la fête foraine où nous sommes, le plateau représente grossièrement une vieille montre de gousset.

Nous montons sur le manège munis d'un mètre et de quelques réveils pour effectuer quelques mesures. Attention aux âmes sensibles et aux estomacs délicats : pour que les effets que nous cherchons soient mesurables, il va falloir faire fonctionner le manège à des vitesses proches de celle de la lumière. En route !

Une fois la vitesse de croisière atteinte, nous commençons par tester la force centrifuge : plus la distance au centre est grande, plus la force que nous subissons est importante. Cette force centrifuge est liée à l'accélération inhérente à tout mouvement circulaire : nous en concluons que l'accélération augmente quand on s'éloigne du centre et est maximale à la périphérie.

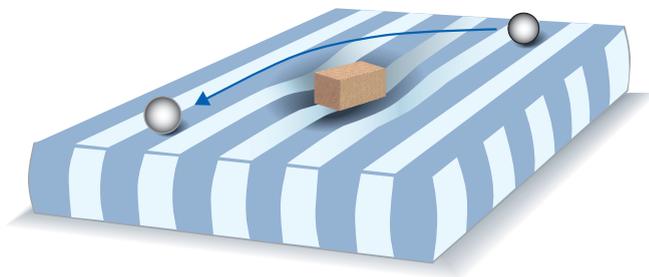
Nous poursuivons nos investigations en mesurant le rayon du manège : 5 m. Puis nous en mesurons la circonférence externe. La mesure est *a priori* superflue : la circonférence est égale à 2π fois le rayon, soit environ 31,4 m. Notre mesure donne pourtant 28 m. Est-ce dû aux incertitudes de mesure ? Pour cela, nous répétons plusieurs fois la mesure et retrouvons approximativement 28 m, disons à 30 cm près.

En fait, nous en avons suffisamment appris pour comprendre ce qui se passe. Notons d'abord que dans le mouvement circulaire du manège, chaque point du plateau se déplace selon un cercle. Quand nous mesurons le rayon du plateau, nous effectuons une mesure perpendiculaire au mouvement : il n'y a donc pas d'effet de contraction des longueurs (décrit plus haut dans le cas du ballon rond qu'on observe ovale). Par contre, lorsque nous avons

« Dans un grand lit doré »

Matériel : un lit double pas trop dur ; une grosse pierre ; un cochonnet.

Lissez bien le matelas. Faites rouler à sa surface le cochonnet et vérifiez qu'il roule à peu près en ligne droite. Déposez au centre du lit la pierre et répétez l'expérience en vous débrouillant pour que le cochonnet s'approche de la pierre sans la percuter. Le cochonnet suit une trajectoire courbe qu'on appelle GÉODÉSIQUE. Plus la pierre est lourde, plus elle creuse le matelas et plus la trajectoire est courbe. De la même façon, le Soleil, très massif, courbe l'espace autour de lui : les rayons de lumière suivent les géodésiques.



mesuré la circonférence, nous avons effectué une mesure dans le sens du mouvement et nous avons effectivement mesuré une contraction des longueurs : de 31,4 m à environ 28 m. Et si le manège tourne plus vite, l'effet sera plus important. Autrement dit, dans notre référentiel en mouvement, le rapport circonférence sur rayon n'est pas égal à 2π . Ceci nous éloigne de l'espace euclidien auquel nous sommes habitués, et est en fait caractéristique d'un espace courbe (voir ci-dessous). Rappelons que le manège de notre fête foraine a une forme de montre, mais de montre molle puisque sa circonférence varie selon sa vitesse de rotation. Une montre non euclidienne ! Toute ressemblance avec le célèbre tableau de Dalí *La Persistance de la mémoire* n'est certainement pas fortuite. Il a été peint par Dalí en 1931 comme une métaphore de l'espace-temps courbe

d'Einstein. Dans les termes mêmes du maître : « *Les montres molles de Dalí ne sont rien d'autre que le tendre, l'extravagant, le solitaire camembert paranoïaque-critique de l'espace et du temps* » (Dalí, 1968).

C'est en contemplant à la fin d'un dîner un camembert bien coulant qu'il aurait eu l'intuition de son tableau. Après la pomme, notre menu cosmique se complète peu à peu.

Nous sommes apparemment bien loin de nos rayons lumineux suivant des géodésiques courbes au voisinage du Soleil. Et pourtant ! Nous venons de constater que dans le référentiel accéléré du manège, l'espace est courbe. Nous avons appris que les mêmes effets peuvent être reproduits par une accélération ou par un champ gravitationnel. Un champ gravitationnel courbe donc l'espace.



Un peu de géométrie non euclidienne

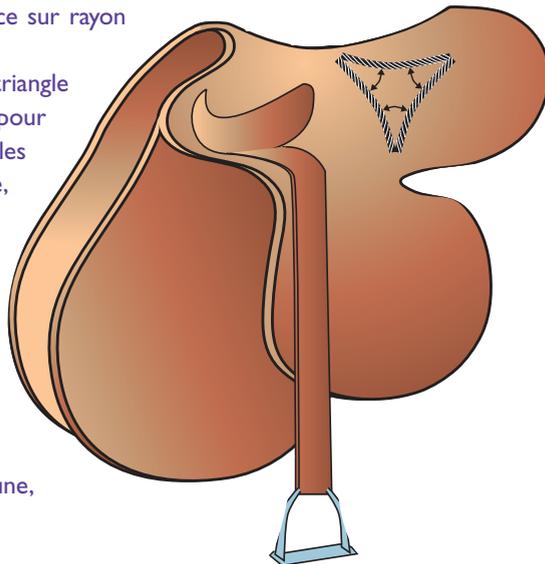
Matériel : un globe terrestre (un ballon bien gonflé peut faire l'affaire), quelques brins de laine.

La sphère est l'espace courbe avec lequel nous sommes le plus familiers. Nous pouvons donc vérifier à son propos quelques faits indiqués dans le texte.

a) Tracez un cercle sur le globe terrestre. Pour cela, marquez un point, fixez-y une extrémité d'un fil de laine et tracez le cercle dessiné par l'autre extrémité du fil de laine quand on le fait tourner autour du point de référence. Mesurez le rayon du cercle (c'est-à-dire la longueur du fil de laine) et la circonférence (par exemple avec un autre brin de laine) et comparez le rapport circonférence sur rayon à la valeur attendue en géométrie euclidienne. Nous observons que le rapport circonférence sur rayon est inférieur à 2π .

b) En géométrie euclidienne, la somme des angles d'un triangle est égale à 180° . Fixez trois bouts de laine sur le globe pour former un triangle (« sphérique »). Mesurez les trois angles du triangle (attention, pour faire une mesure correcte, vous devez en principe avoir un rapporteur flexible : la mesure se fait sur la sphère) et calculez leur somme. Vous devriez trouver un nombre supérieur à 180° . Ceci est caractéristique d'un univers dit « fermé » (la sphère est un objet « fermé »). Un univers ouvert correspondrait à une somme inférieure à 180° . Pouvez-vous imaginer une surface sur laquelle on pourrait dessiner un tel triangle ?

Une selle ! Si d'aventure vous arrivez à vous en procurer une, refaites-y la mesure avec vos trois brins de laine.



Et le temps dans tout cela ? Si nous répartissons des réveils sur le plateau tournant à des distances variées du centre, nous constatons que plus on s'éloigne du centre, plus le temps se ralentit ! C'est un simple effet de la dilatation des temps dans les repères en mouvement : plus on se rapproche de la périphérie, plus la vitesse est grande et plus le temps se dilate. On en déduit que le temps coule plus lentement là où l'accélération est plus grande (c'est-à-dire près de la périphérie). Donc le temps coule plus lentement là où le champ gravitationnel est plus intense. Pour paraphraser une expression familière, tout près du Soleil, ils se la coulent plus douce que nous.

Terminons en expérimentant un peu en espace courbe (expérience ci-contre).

En mission vers le trou noir

Lorsqu'on lance un vaisseau spatial de la Terre, il faut lui communiquer une vitesse suffisante pour qu'il puisse s'arracher du champ de gravitation terrestre. La vitesse doit être plus grande qu'une valeur qu'on appelle « vitesse de libération ». Si la Terre était une planète (ou une étoile) plus massive, le champ d'attraction serait plus fort et donc la vitesse de libération nécessaire plus grande.

Imaginons une étoile tellement massive que la vitesse de libération soit supérieure à 300 000 km/s, la vitesse c de la lumière. Puisque c est la vitesse maximale, aucun corps ne pourrait quitter l'étoile. Pas même la lumière : si nous émettions à partir de la surface de l'étoile un rayon de lumière vers le haut, ce rayon (courbé, comme nous l'avons vu, par le champ gravitationnel intense) retomberait sur l'étoile. Un tel objet astrophysique est appelé « trou noir ».

Ce n'est pas à proprement parler une étoile, mais on pense qu'il peut apparaître à la suite de l'effondrement d'une étoile.

Plus précisément, dans une étoile, il y a un équilibre entre deux effets :

- l'attraction gravitationnelle entre ses différents éléments (qui tend à contracter l'étoile) ;
- les processus nucléaires qui libèrent de l'énergie (et tendent donc à dilater l'étoile).

Quand le fuel nucléaire disparaît, l'effet de dilatation cesse et il y a effondrement gravitationnel. Si l'étoile est suffisamment massive, il peut y avoir formation d'un trou noir.

Ce trou noir est caractérisé par une surface sphérique qu'on appelle un HORIZON : tout ce qui pénètre (matière ou lumière) à l'intérieur de cet horizon ne peut plus en ressortir parce qu'il est happé par le champ gravitationnel du trou noir. Il serait erroné de croire que ce qui pénètre dans l'horizon est immédiatement broyé par les effets gravitationnels. Une image est souvent utilisée pour faire comprendre ce qu'est l'horizon du trou noir : celle d'une rivière en amont d'une cataracte. Une personne qui nage dans la rivière n'a pas à se préoccuper de la présence de la cataracte si elle nage suffisamment en amont, mais si elle se rapproche de la cataracte, elle franchit à un certain moment une ligne fictive telle qu'elle ne pourra plus remonter le courant. Même si cette personne est un excellent nageur, elle n'a plus le temps de rejoindre les bords avant que le courant ne l'entraîne dans la cataracte. Pourtant, elle n'a rien remarqué quand elle a traversé la ligne fictive, l'« horizon » de la chute d'eau.

De même que, dans notre exemple, la cataracte représente la catastrophe finale, le centre du trou noir représente le but ultime de

tout ce qui tombe dans le trou noir. On l'appelle SINGULARITÉ, parce que la géométrie de l'espace-temps y a un comportement singulier. Ce comportement singulier est à rapprocher de cette fameuse singularité initiale qu'on appelle le big-bang. La différence est que si nous remontons le temps, nous atteindrons la singularité tandis que, tant que nous sommes hors de l'horizon du trou noir, nous sommes protégés de sa singularité : aucune information ne peut provenir de l'intérieur de l'horizon. Personne ne peut aller faire un tour de l'autre côté de l'horizon pour « voir » la singularité puis revenir nous dire ce qu'il a vu.

Ceci nous amène tout naturellement à parler de la mission entreprise par le capitaine Map pour pénétrer à l'intérieur du trou noir SgrA* (nous sommes en 2590). Ce trou noir très massif serait (ceci, au moins, n'est pas de la science-fiction.) localisé au centre de notre galaxie. Lorsque le vaisseau spatial approche l'horizon puis le traverse, rien de dramatique ne se passe du point de vue du vaisseau spatial. La retransmission des images sur Terre (par ondes électromagnétiques) montre toutefois une version différente. Quand le vaisseau devient très proche de l'horizon, il se produit un retard entre les images envoyées et les images reçues qui s'accroît au fur et à mesure de l'approche. Sur nos écrans terriens, les gestes du capitaine Map se ralentissent de plus en plus, jusqu'à ce que son geste d'adieu se fige complètement. Peu de temps après, les images transmises s'affaiblissent puis disparaissent : les ondes électromagnétiques émises par le vaisseau retombent à l'intérieur du trou noir. L'aventure du capitaine Map continue pourtant, probablement pas très agréable, mais nous n'en saurons plus rien.

Bibliographie

On fait souvent remonter à Galilée les premiers raisonnements de la physique moderne s'appuyant sur l'expérience (réelle ou en pensée). La lecture de quelques pages du chapitre « Chute des corps » de son *Discours concernant deux sciences nouvelles* (PUF, coll. « Épiméthée », 1995) est chaudement recommandée. C'est lumineux.

Un excellent livre d'introduction à la physique classique et moderne sans (presque de) formules est *Conceptual Physics* de P.G. Hewitt (éd. Scott, Foresman and Company). Malheureusement, il est en anglais et je n'en connais pas de traduction. Beaucoup de petites expériences sont proposées, dont certaines ont inspiré celles présentées ici.

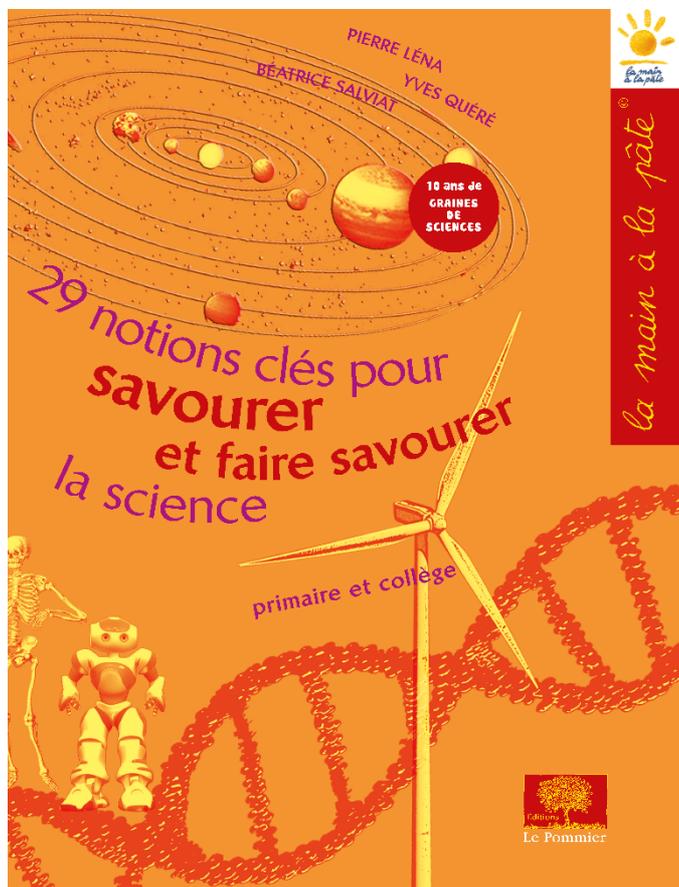
Le grand physicien George Gamow a inventé un personnage, M. Tompkins, dont les aventures lui permettent de décrire en termes simples la physique moderne. Le livre dont il est le héros vient d'être complété par Russell Stannard et réédité sous le titre *Le Nouveau Monde de M. Tompkins* (Le Pommier, 2002). Le premier chapitre, « Vitesse limitée en ville », nous concerne particulièrement : Gamow imagine une ville où la vitesse de la lumière serait de 36 km/h. Tous les effets relativistes que nous avons mentionnés (dilatation des temps, contraction des longueurs) deviennent des faits de la vie quotidienne. Le chapitre suivant explique ces effets.

Pour aller beaucoup plus loin dans l'étude des trous noirs, consulter le livre de Jean-Pierre Luminet, *Les Trous noirs*, et notamment le chapitre 9 (Seuil, col. « Points Sciences », 1992).

Sur la Toile

Pour de superbes clichés de trous noirs ou d'autres objets astrophysiques, consulter le site du télescope *Hubble* : <http://hubble.esa.int/>

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE