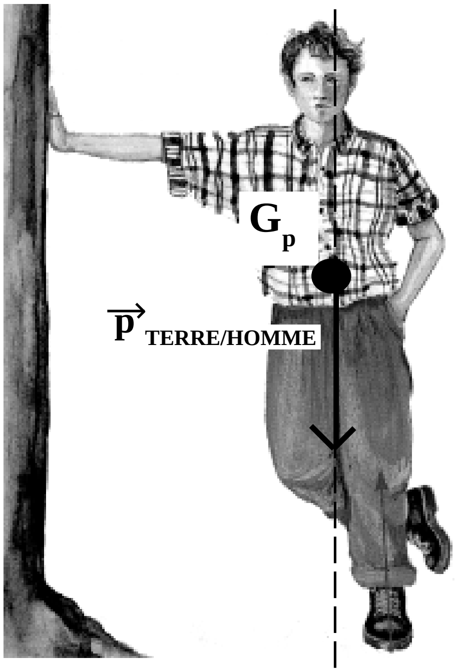
PROJECTILE DANS UN CHAMP DE PESANTEUR

1. FORCE EXERCEE PAR LA TERRE SUR UN SOLIDE EN MOUVEMENT.

1.1. LA FORCE DE PESANTEUR.

Un objet qui se trouve au voisinage de la Terre subit une force gravitationnelle $\vec{F}$ qui peut s'identifier à la force de pesanteur $\vec{P}$

Le poids, action répartie dans tout le volume d'un objet, peut être représenté par une force, notée p, dont:



le point d'application est appelé centre de gravité.

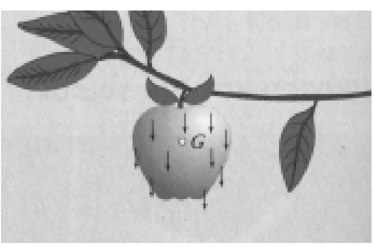
la direction est *rigoureusement:* suivant la droite qui relie les deux centres G_p et G_T
en exercice: verticalement

le sens est *rigoureusement:* vers le centre de la Terre.
en exercice: vers le bas

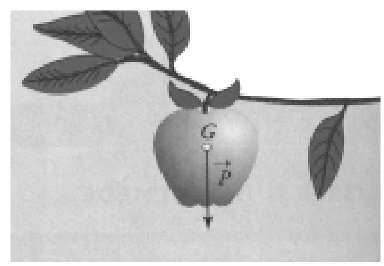
l'intensité se nomme p et s'exprime en Newton (N).

$$p = m \times g$$

avec g l'intensité de la pesanteur; elle s'exprime en N / Kg.
Cette constante varie selon l'endroit où on se trouve.
En France g est de l'ordre de 10 N / Kg.



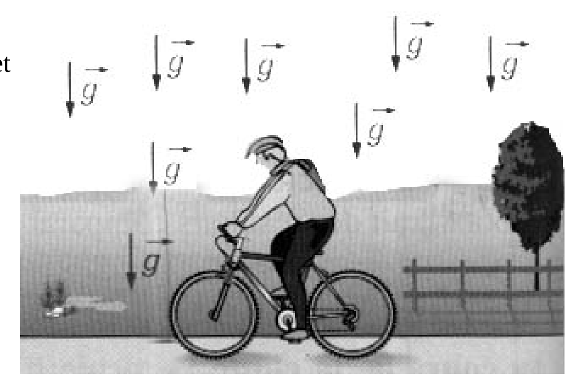
L'attraction gravitationnelle de la Terre s'exerce sur chaque particule d'un coprs placé en son voisinage. L'ensemble des actions exercées par la Terre sur la pomme est équivalente à une force unique.



1.2. LE CHAMP DE PESANTEUR EST UNIFORME.

La relation **p = m x g** est supposée vraie partout.

En réalité g dépend du lieu, m ne change pas. Donc p dépend du lieu. C'est la faible variation de la valeur de g à la surface de la Terre qui crée la confusion entre masse et poids.



Ainsi:
- Il faut s'écarter de 111 km pour que l'angle de deux verticales atteigne un degré;
- D'autre part, il faut s'élever en altitude de 30 km pour que l'intensité de la pesanteur diffère de 1% de sa valeur au sol.

Ainsi, nous pouvons considérer que dans un domaine où les dimensions n'excèdent pas quelques kilomètres, le champ de pesanteur est identique en direction, sens et intensité: on dit que le champ de pesanteur est uniforme. Dans une telle région le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$ est constant.

Lorsque le champ de pesanteur est uniforme, son vecteur est porté par des verticales parallèles: ce sont des lignes du champ de pesanteur qui sont orientées de haut en bas comme le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$.

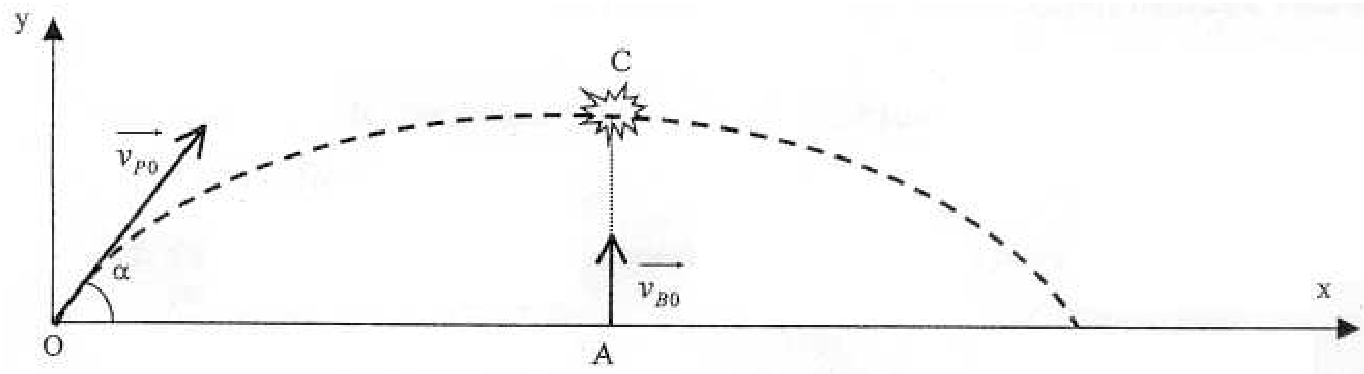
Remarque.

Ce champ existe en un point au voisinage de la Terre qu'il y ait ou non un objet de masse m placé en ce point au voisinage de la Terre. Cet objet ne sert qu'à détecter le champ qui est crée par la Terre.

2. CHUTE PARABOLIQUE SANS FROTTEMENT.

On étudie le mouvement d'un pigeon d'argile lancé pour servir de cible à un tireur de ball-trap.

Le pigeon d'argile de masse m_P = 0,10 kg assimilé à un point matériel M est lancé avec un vecteur vitesse v_0 de valeur v_0 = 30 m/s, faisant un angle α de 45° par rapport à l'horizontale. Le participant situé en A tire verticalement une balle de masse m_B = 0,020 kg avec un fusil. La vitesse initiale de la balle est v_{B0} = 500 $m.s^{-1}$, la balle, assimilée à un point matériel B, part du point A tel que OA = 45 m (Les vecteurs vitesse ne sont pas à l'échelle sur le schéma).



Dans cette étude la vitesse atteinte par la balle étant faible, on considère comme négligeables les frottements de l'air dans tout l'execcice. A l'aide de la deuxième loi de Newton, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on peut établir les équations horaires du mouvement de la balle ainsi que l'équation de sa trajectoire dans le repère (O, x, y).

2.1. L'EXPRESSION DU VECTEUR ACCELERATION A PARTIR DU BILAN DES FORCES.

Le mouvement de ce projectile est étudié dans un domaine de l'espace où le champ de pesanteur est considéré comme uniforme (ce n'est pas le cas pour un satellite !!).

Nous allons négliger les frottements dus à l'air et la poussée d'Archimède.

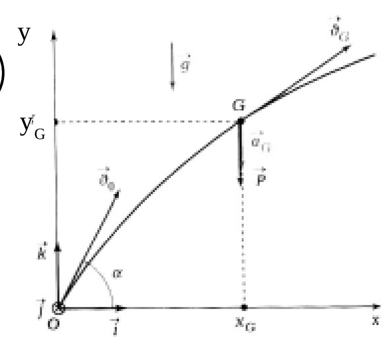
On étudie le système projectile dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

Inventaire des forces appliquées au système.

Le poids $\vec{p}$	Point d'application:	G
	Direction:	Verticale
	Sens:	vers le centre de la Terre
	Valeur:	p = m x g

On peut appliquer la seconde loi de Newton, qui établit une relation vectorielle dans le cas d'un mouvement de translation rectiligne non uniforme:

mtr varié ⇒ **Selon la seconde loi de Newton** ⇒ $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$



On a donc la relation $\vec{p} = m\vec{g} = m\vec{a}$ donc $\vec{a} = \vec{g}$

Le vecteur accélération du centre d'inertie d'un solide en chute libre est égal au vecteur champ de pesanteur g.
La valeur de l'accélération est indépendante de la masse.

2.2. LES COMPOSANTES DU VECTEUR ACCELERATION DANS LE PLAN (O, x, y).

On projette cette relation sur les trois axes en tenant compte des grandeurs algébriques:

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

2.3. LES COMPOSANTES DU VECTEUR VITESSE DANS LE PLAN (O, x, y).

Par intégration et en se plaçant dans les conditions initiales pour trouver les expressions des constantes d'intégrations, on obtient

$$\vec{a}\ \left|\begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = -\,g \end{array}\right. \Longrightarrow \vec{v}\ \left|\begin{array}{l} v_x = v_{x0} = V_0.\cos\alpha \\ v_y = -\,g.t + v_{z0} = -\,g.t + V_0.\sin\alpha \end{array}\right.$$

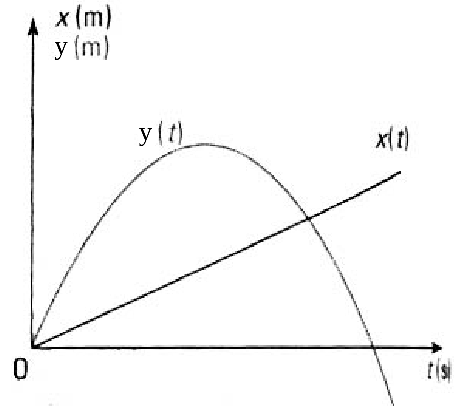
2.4. LES COMPOSANTES DU VECTEUR POSITION DANS LE PLAN (O, x, y).

Par intégration et en se plaçant dans les conditions initiales pour trouver les expressions des constantes d'intégrations, on obtient

$$\vec{v}\ \left|\begin{array}{l} v_x = V_0.\cos\alpha \\ v_y = -\,g.t + V_0.\sin\alpha \end{array}\right. \Longrightarrow \vec{OM}\ \left|\begin{array}{l} x = V_0.t.\cos\alpha\ + x_0 = V_0.t.\cos\alpha \\ y = -\dfrac{1}{2}\,g.t^2 + V_0.t.\sin\alpha + z_0 = -\dfrac{1}{2}\,g.t^2 + V_0.t.\sin\alpha \end{array}\right.$$

Les équations horaires montrent:

- Selon l'axe Oz, le mouvement est celui d'une chute libre verticale de vitesse initiale de valeur $v_0\sin\alpha$;
- Selon l'axe Oy, puisque y = 0 à tout instant du mouvement, le mouvement du projectile s'effectue dans le plan (xOz), qui contient le vecteur vitesse initial v_0;
- Selon l'axe Ox, puisque la composante v_x du vecteur vitesse selon l'axe Ox est indépendante du temps, donc constante au cours du mouvement, le mouvement sur l'axe Ox est donc uniforme;
- Puisque la composante a_z de l'accélération est constante, le mouvement sur l'axe Oz est uniformément varié.

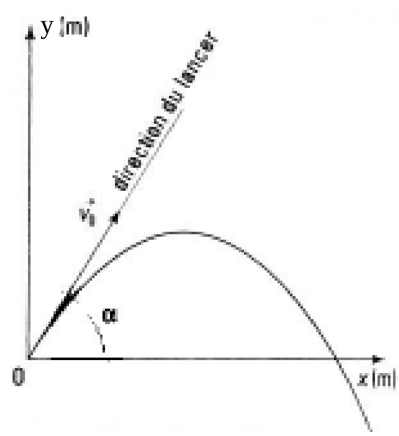


2.5. EQUATION DE LA TRAJECTOIRE.

Pour trouver l'équation de la trajectoire du centre d'inertie d'un projectile, il suffit de remplacer le paramètre temps dans l'expression de z par:

$$t = \frac{x}{V_0.\cos\alpha} \quad \text{ce qui donne} \quad y = -\frac{1}{2}\,g\left[\frac{x}{V_0.\cos\alpha}\right]^2 + V_0\sin\alpha\,\frac{x}{V_0.\cos\alpha}$$

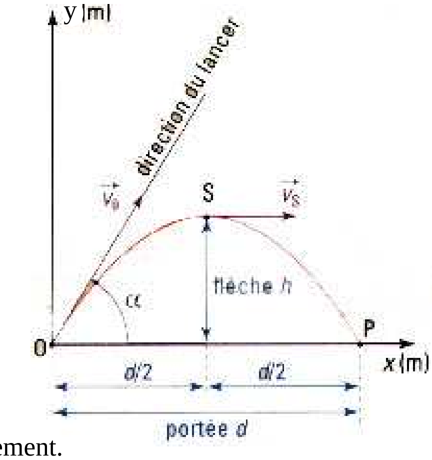
$$y = -\frac{1}{2}\,g\left[\frac{x}{V_0.\cos\alpha}\right]^2 + x\,.\tan\alpha$$



La trajectoire du centre d'inertie d'un projectile lancé avec une vitesse quelconque est une portion de parabole située dans le plan vertical contenant $\vec{v_0}$.

2.6. PORTEE DE TIR.

On appelle portée de tir la distance entre le point de lancement O et le point d'impact P sur le plan horizontal contenant O. Dans l'équation de la trajectoire, c'est la valeur de x différente de zéro qui annule z:



$$y_P = -\frac{1}{2}\, g \left[\frac{x}{V_0.\cos\alpha}\right]^2 + x_P.\tan\alpha = 0$$

on en déduit $$OP = x_P = \frac{2.v_0^2.\sin\alpha.\cos\alpha}{g} = \frac{v_0^2.\sin 2\alpha}{g}$$

La portée est maximale si $\sin 2\alpha = 1$ ou si $\alpha = 45°$

2.7. LA FLECHE DE LA TRAJECTOIRE.

La flèche de la trajectoire est l'altitude maximale atteinte par le point G par rapport au point de lancement.

Au sommet de la parabole, le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire donc horizontal. Par conséquent la composante v_{Sy} est nulle.

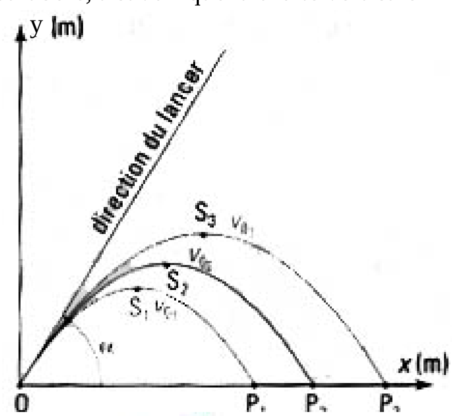
$v_y = -g.t + V_0.\sin\alpha = 0$ on en déduit l'instant t_S, date de passage du projectile au sommet S: $t_S = \dfrac{V_0.\sin\alpha}{g}$

On remplace ensuite t par cette expression dans les équations paramétriques de position pour déterminer les coordonnées de S:

$$OS \left| \begin{array}{l} x_S = v_0.t_S.\cos\alpha = v_0.\dfrac{v_0.\sin\alpha}{g}.\cos\alpha = \dfrac{v_0^2.\sin 2\alpha}{2g} \\[2ex] y_S = -\dfrac{1}{2}g.t_S^2 + V_0.t_S.\sin\alpha = \dfrac{1}{2}\,\dfrac{v_0^2.\sin^2\alpha}{g} \end{array} \right.$$

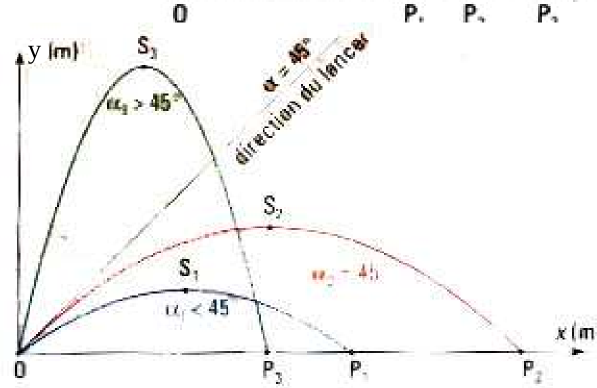
Remarque. A noter que $x_P = 2 . x_S$, de sorte que l'on retrouve une propriété de construction de la parabole, à savoir que la droite verticale passant par le sommet S est un axe de symétrie de la parabole.

2.8. INFLUENCE DE LA VALEUR DE LA VITESSE INITIALE.



A α donné (0° < α < 90)), on fait varier la valeur v_0 de la vitesse initiale. La flèche h et la portée d sont proportionnelles à v_0^2: plus la valeur v_0 de la vitesse initiale est grande, et donc plus le projectile s'élève et parcourt une distance importante.
La vitesse initiale communiquée au projectile résulte d'un transfert d'énergie sous forme d'énergie cinétique (bras d'un lanceur, système de projection d'une machine...), il faut aussi, pour aller plus loin ou plus haut, ajuster l'angle de tir.

2.9. INFLUENCE DE L'ANGLE DE TIR.



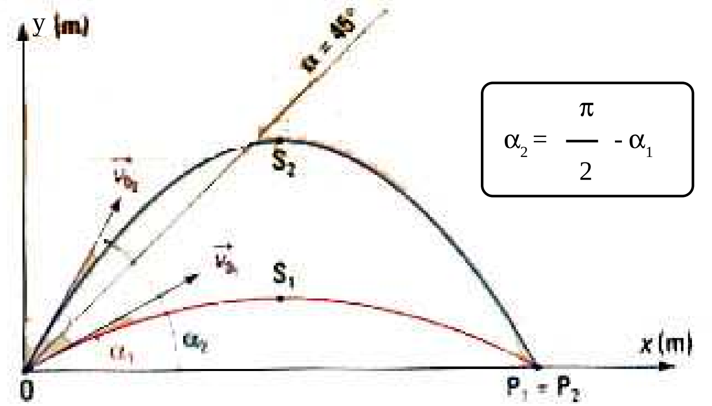
● A v_0 donné, on fait varier la valeur de l'angle de tir α entre 0° et 90°. D'après les expressions respectives, la flèche h est proportionnelle à $\sin^2\alpha$ et la portée d est proportionnelle à $\sin(2\alpha)$:

- Lorsque α croît de 0° à 45°, la flèche et la portée d augmentent;
- Pour α = 45°, la portée d est amximale ($\sin(2\alpha) = 1$). C'est cette valeur que les lanceurs de poids, de marteau ou de javelot, recherchent pour donner à leurs jets une efficacité optimale;
- Lorsque α croît de 45° à 90°, la flèche h continue à augmenter, alors que la portée diminue.

La flèche est maximale et la portée est nulle pour α = 90°: on retrouve alors le cas particulier de la chute libre verticale.

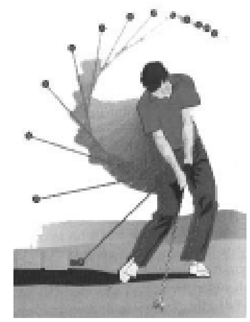
● A une valeur v_0 de la vitesse initiale donnée, deux projectiles lancés respectivement avec les angles de tir α_1 et α_2 complémentaires ont la même portée, mais des flèches différentes. Cette propriété est couramment utilisée par des joueurs de basket qui "lobent" un adversaire, ou de façon moins plaisante, par les artilleurs qui bombardent une position en éviatant des obstacles de faibles hauteurs.

Remarque Si $\alpha_1 < \alpha_2$, le premier tir est tendu et le second est en cloche.



$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1$$

2.10. REMARQUES.



Les résultats précédents ne sont valables que si les conditions de l'étude sont respectées (chute libre).

Dans l'air, la vitesse du projectile doit être assez faible pour qu'on puisse considérer que la force de frottement exercée par l'air est négligeable devant le poids du solide.

Ce n'est, par exemple, pas le cas si l'on étudie le mouvement d'une balle de golf qui est lancée à une vitesse v_0 de plusieurs dizaines de $m.s^{-1}$.

Dans ce cas le modèle de la chute libre n'est plus applicable: la trajectoire réelle n'est plus parabolique.

3. CHUTE VERTICALE SANS FROTTEMENT: CHUTE LIBRE.

On dit qu'un solide est en chute libre si la seule force qui s'exerce sur lui est la force de pesanteur. Cette condition n'est réalisée que dans le vide.

Cependant, pour des solides denses et pour des hauteurs de chute faibles (de l'ordre du mètre), on admettra que la chute de l'objet étudié est une chute libre.

De ce fait, les forces agissant sur le solide se ramènent à la seule force de pesanteur.

3.1. EQUATIONS PARAMETRIQUES DU MOUVEMENT DE LA BALLE DE FUSIL.

Le mouvement de ce projectile est étudié dans un domaine de l'espace où le champ de pesanteur est considéré comme uniforme (ce n'est pas le cas pour un satellite !!).

Nous allons négliger les frottements dus à l'air et la poussée d'Archimède.

On étudie le système projectile dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

Inventaire des forces appliquées au système.

Le poids $\vec{p}$

Point d'application:	G
Direction:	Verticale
Sens:	vers le centre de la Terre
Valeur:	p = m x g

On peut appliquer la seconde loi de Newton, qui établit une relation vectorielle dans le cas d'un mouvement de translation rectiligne non uniforme:

mtr varié $\xRightarrow{\text{Selon la seconde loi de Newton}}$ $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}$

On a donc la relation $\vec{p} = m\,\vec{g} = m\,\vec{a}$ donc $\vec{a} = \vec{g}$

Le vecteur accélération du centre d'inertie d'un solide en chute libre est égal au vecteur champ de pesanteur g.
La valeur de l'accélération est indépendante de la masse.

3.2. LES COMPOSANTES DU VECTEUR ACCELERATION DANS LE PLAN (O, x, y).

On projette cette relation sur les trois axes en tenant compte des grandeurs algébriques:

$$\vec{a} \left| \begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{array} \right.$$

3.3. LES COMPOSANTES DU VECTEUR VITESSE DANS LE PLAN (O, x, y).

Par intégration et en se plaçant dans les conditions initiales pour trouver les expressions des constantes d'intégrations, on obtient

$$\vec{a}\left|\begin{array}{l} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{array}\right. \Longrightarrow \vec{v}\left|\begin{array}{l} v_x = v_{x0} = 0 \\ v_y = -g.t + v_{z0} = -g.t + V_{B0} \end{array}\right.$$

3.4. LES COMPOSANTES DU VECTEUR POSITION DANS LE PLAN (O, x, y).

Par intégration et en se plaçant dans les conditions initiales pour trouver les expressions des constantes d'intégrations, on obtient

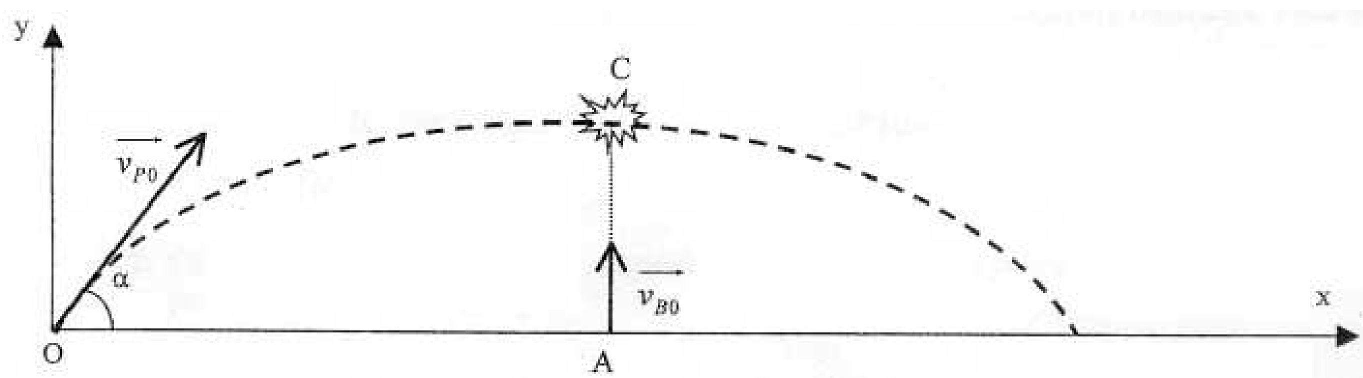
$$\vec{v}\left|\begin{array}{l} v_x = = 0 \\ v_y = -g.t + V_{B0} \end{array}\right. \Longrightarrow \vec{OM}\left|\begin{array}{l} x = x_0 = 0 \\ y = -\frac{1}{2} g.t^2 + V_{B0} + z_0 = -\frac{1}{2} g.t^2 + V_{B0} \end{array}\right.$$

<u>Si vous étiez dans un ascenseur en chute libre, le fait de sauter juste avant de vous écraser au sol vous sauverait-il ?</u>

Désolé, sauter n'évitera pas l'issue tragique de cette chute purement théorique (les ascenseurs, à part dans les films, sont équipés de systèmes de freinage de secours). Pourquoi l'atterissage est-il si douloureux ? Parce que dans votre descente à toute berzingue, disons à 80 km/h, l'ascenseur et vous avez une énergie cinétique très importante. Quand, lors du fatal contact avec le rez-de-chaussée, votre vitesse devient subitement nulle, cette énergie cinétique ne disparaît pas (l'énergie ne disparaît pas); elle se transforme en énergie mécanique de déformation. En langage non scientifique: vous, comme l'ascenseur, vous écrabouillez. En quoi sauter pourrait-il vous aider ? En réduisant votre vitesse de descente, donc votre énergie cinétique au moment de l'impact, et finalement la déformation que devraient encaisser vos rotules. Mais voilà, aucun humain ne peut bondir à une vitesse proche de 80 km/h (tout en évitant le plafond de l'ascenseur). Les meilleurs basketteurs atteignet à peine les 8 km/h. En plus, pour vous en sortir, il vous faudrait non seulement faire des sauts de super-héros mais en plus avoir une vision aux rayons X pour savoir à quel moment produire l'effet salvateur ...

4. POUR TERMINER L'EXERCICE: TIR REUSSI

4.1. Quelle est l'abscisse x_C du point d'impact C du pigeon d'argile et de la balle ?
4.2. Vérifier, à partir de l'abscisse x_C de l'impact, que le temps de « vol » du pigeon est $\Delta t = 2,1$ s.
4.3. Calculer $\Delta t'$ le temps de « vol » de la balle jusqu'à l'impact connaissant l'ordonnée du point de l'impact $y_C = 22$ m.
4.4. Comparer Δt et $\Delta t'$ et expliquer pourquoi le tireur peut viser directement le pigeon.



5. LA RELATIVITE GENERALE.

5.1. 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 materielle 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 lâchées 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.

5.2. GRAVITATION ET ACCELERATION ONT LES MEMES EFFETS.

Regardez le personnage ci-contre qui s'amuse avec une pomme. Il se tient debout dans une cabine d'ascenseur suspendue à un câble, dans une tour immense et transparente; la force d'attraction de la Terre l'attire vers le bas. Ce qui explique que ses pieds s'appuient fermement sur le plancher. Il a lâché la pomme: la Terre attire aussi le fruit qui tombe sur le plancher de l'ascenseur.
Panique à bord: le câble de l'ascenseur s'est détaché ! Le bonhomme est en chute libre, il a la sensation de flotter. Nous avons vu dans le paragraphe précédent que tous les corps tombent avec la même accélération. Résultat, quand le personnage tombe, la pomme et l'ascenseur tombent avec lui. Ils l'accompagnent dans sa chute, ils restent au repos par rapport à lui, ils ne vont aps plus vite. Entre eux et lui, il n'y a aucune force, aucune accélération, aucun mouvement: tout le contenu de la cabine est en "impesanteur". C'est exactement ce qui se passe dans un vaisseau qui tourne autour de la Terre à vitesse constante. Pourtant, dans l'ascenseur comme dans le vaisseau, l'attraction terrestre continue de jouer ! Alors, qu'est-ce-qui fait qu'on ne la sente plus ? Précisèment le fait que le personnage de l'ascenseur comme l'astronaute soient en train de tomber à la même vitesse; C'est l'accélération qui annule les effets de la gravitation.
A partir de cette expérience de pensée, Einstein énonce un des plus importants principes de la physique, le principe d'équivalence: en un endroit donné, tous les effets de la gravitation peuvent être compenss par ceux d'une accélération.

5.3. VERIFICATION.

Le eprsonnage de l'ascenseur se trouve maintenant loin de toute planète dans un vaisseau spatial. Au début, le vaisseau n'accélère pas, tout ce qui s'y trouve est en impesanteur. Puis, progressivement, le vaisseau accélère à 10 m/s. Le bonhomme se retrouve alors dans la même situation que tout à l'heure: les pieds appuyés sur le sol. S'il lâche la pomme, elle tombe sur le plancher du vaisseau. Ici, pas question d'attraction terrestre puisque le vaisseau est loin de norte planète. Einstein explique les choses ainsi: c'est le vaisseau en accélération qui vient à la rencontre des pieds de l'astronaute qui, de ce fait, touchent le sol. Il vient aussi à la renconrte de la pomme si on la lâche. Le principe d'équivalence se confirme: gravitation et accélération ont les mêmes effets. Dans un ascenseur sans fenêtre, impossible de savoir si l'on est soumis à l'une ou l'autre.
Voici posé le grand mystère auquel Newton ne pouvait répondre: comment se fait-il que les effets de la gravitation et de l'accélération soient indiscernables ? D'où vient cette équivalence ? Est ce un pur hasard ? Cette énigme intriguait Einstein au plus haut point et c'est pour la résoudre qu'il a construit la théorie de la relativité générale.

5.4. QUAND LA LUMIERE NE FILE PAS DROIT

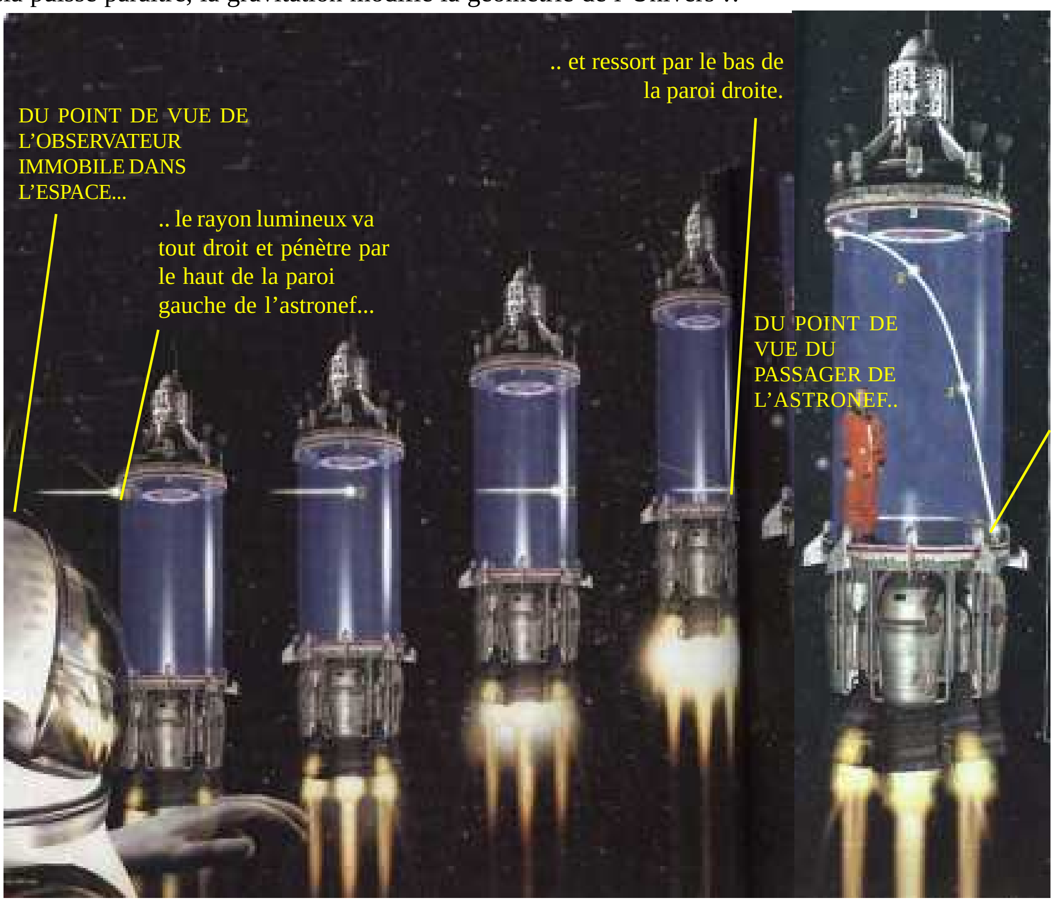
Procédons encore à une petite expérience de pensée. Nous sommes immobiles dans l’espace. Devant nous, un astronef ransparent passe à une vitesse très élevée en accélérant constamment. Un rayon lumineux émis par une étoile lointaine arrive par la gauche. Il traverse le vaisseau de gauche à droite. Mais 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 apr tous les points intermédiaires représentées 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.

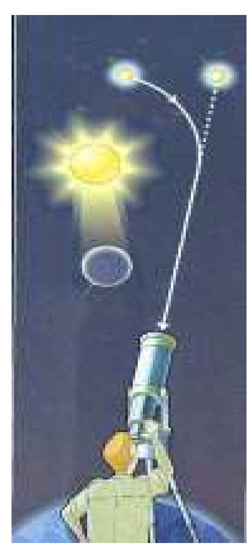
Aussi fou que cela puisse paraître, la gravitation modifie la géométrie de l’Univers !!



.. la lumière suit une ligne courbe et tombe comme une pierre sur le sol.

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

Dès 1919, le sidées d’Einstein reçoivent une confirmation éclatante: le Soleil dévie la lumière qui le frôle. C’est l’asronome 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 aprages, 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 apsse 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, précisèment 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.

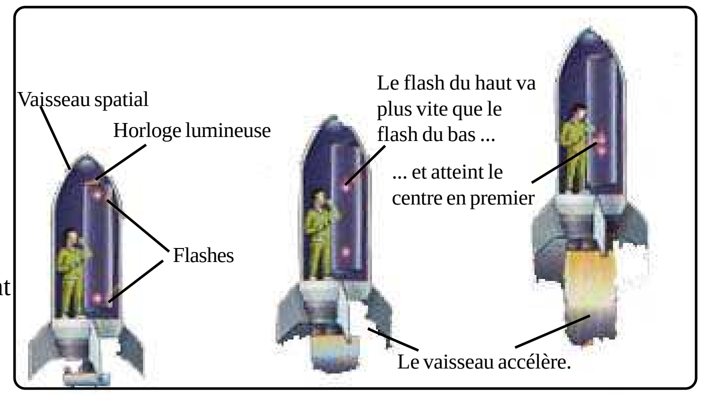


5.6. L’ESPACE-TEMPS EST RELATIF.

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 révéle 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 !

A la différence de Newton, Einstein n’accepte aps que l’espace et le temps soient indépendants l’un de la’utre. au constraire, il les marie au point d’en faire un être composite, l’espace-temps. Impossible de toucher à l’un sans toucher à l’autre, explique-t-il. La vitesse illustre bien cette idée. LA vitesse, c’est de l’esapce divisé par du temps. Augmenter la vitesse, c’est accélérer, c’est parcourir plus d’espace en un temps donné. Banal, direz-vous. Certes, mais l’idée inverse est-elle aussi banale: une accélération peut-elle freiner le temps ?



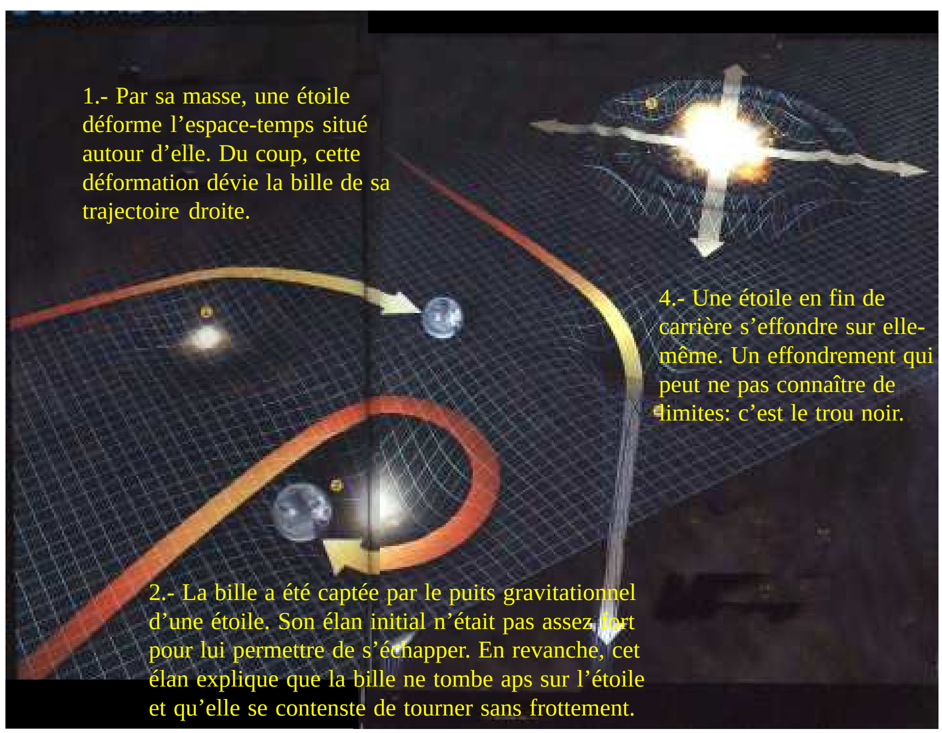
La réponse est oui, comme le prouve cette expérience de pensée. On installe dans un vaisseau spatial une horloge lumineuse synchronisée de telle sorte que les deux flashes arrivent au centre du vaisseau en même temps. Top chrono, les deux flashes sont émis en même temps. puis, un micro-instant plus tard, le vaisseau accélère à fond les manettes. O surprise, cette accération perturbe la simultanéité: le flash supérieur va plus vite que le flash intérieur et atteint le centre le premier ! Un observateur extérieur dira que c’est logique: le plancher du vaisseau vient à la rencontre du flash supérieur tandis qu’il court derrière le flash inférieur. Le commandant de bord placé au centre du vaisseau en concluera, lui, que l’horloge inférieure est plus lente. Des expériences réalisées avec des horloges atomiques ont confirmée cette idée ahurissante. Une horloge placée au rez-de-chaussée d’une tour bat plus lentement que si elle se trouve au dernier étage !!

5.7. 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:

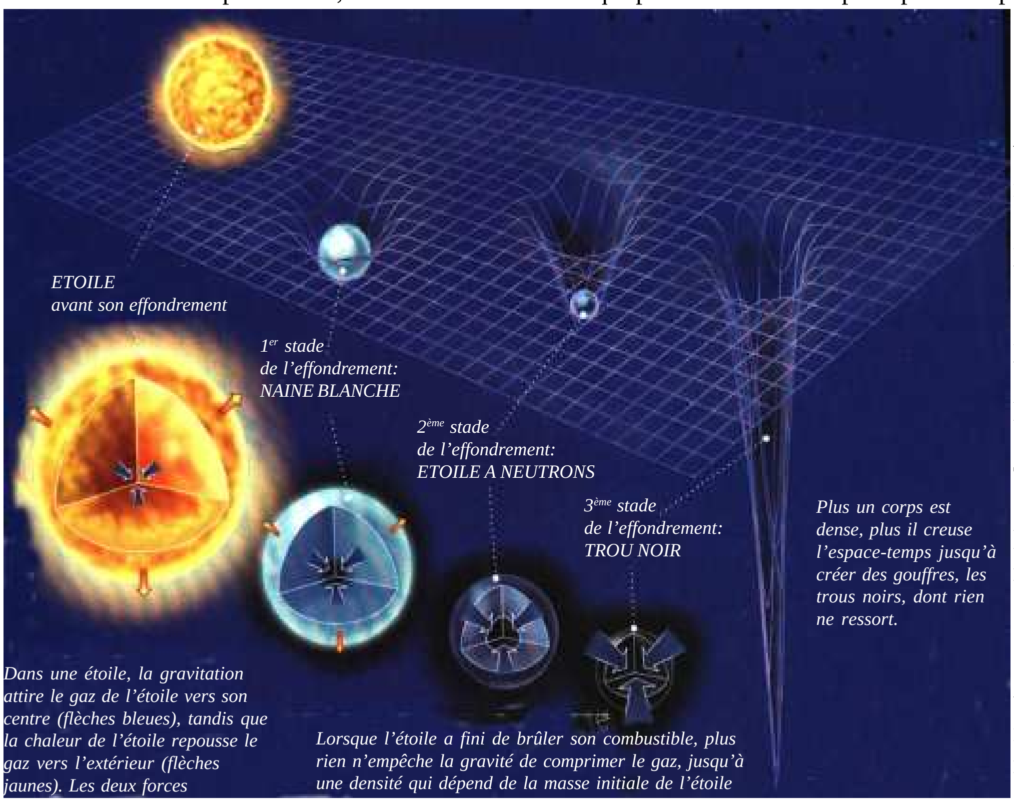
Selon la première, la bille est liée par une ficelle invisible qui la contraint à décrire un cercle autour du point d’attache. Tiré par les cheveux ? Pourtant c’est à peu près la vision de Newton.

On peut imaginer plus naturel: il suffit que la surface soit légèrement incurvée, comme une asiette 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, apr 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.



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 tournoyer autour de la boule d’acier, sans tomber sur elle, telle la Lune autour de la Terre. Maintenant, placons une bille très proche de la boule: elle va tomber immanquablement 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 obets 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: nue 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 efondrement.... 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....

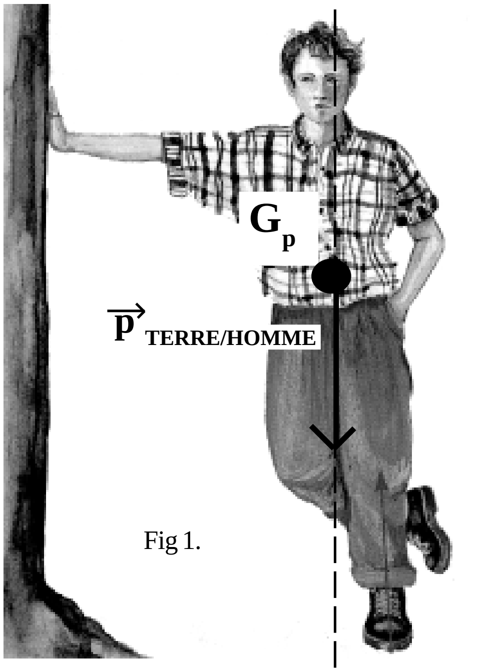


Fig 1.

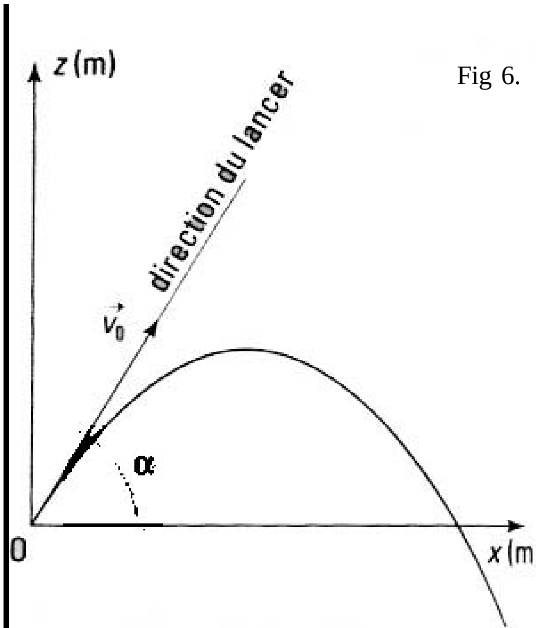


Fig 6.

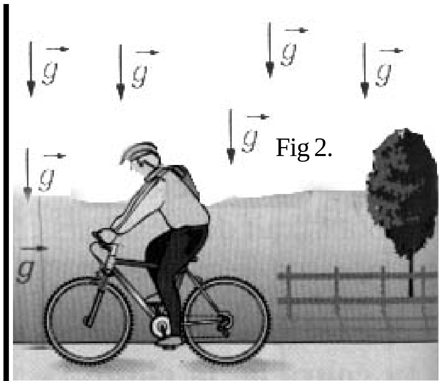


Fig 2.

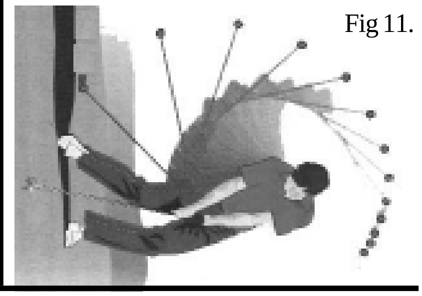
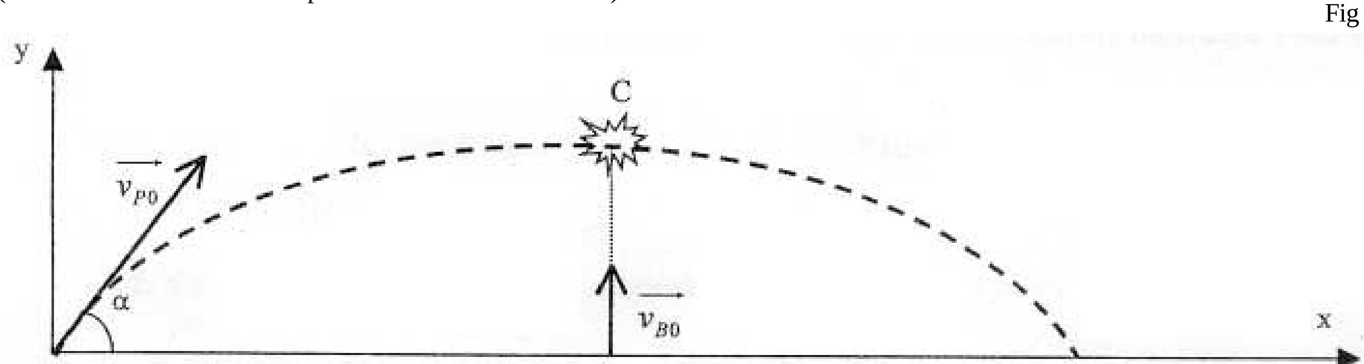


Fig 11.

On étudie le mouvement d'un pigeon d'argile lancé pour servir de cible à un tireur de ball-trap.

Le pigeon d'argile de masse $m_p = 0,10$ kg assimilé à un point matériel M est lancé avec un vecteur vitesse v_0 de valeur $v_0 = 30$ m/s, faisant un angle α de 45° par rapport à l'horizontale. Le participant situé en A tire verticalement une balle de masse $m_B = 0,020$ kg avec un fusil. La vitesse initiale de la balle est $v_{B0} = 500$ m.s^{-1}, la balle, assimilée à un point matériel B, part du point A tel que OA = 45 m (Les vecteurs vitesse ne sont pas à l'échelle sur le schéma).

Fig 3.



Dans cette étude la vitesse atteinte par la balle étant faible, on considère comme négligeables les frottements de l'air dans tout l'execcice. A l'aide de la deuxième loi de Newton, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on peut établir les équations horaires du mouvement de la balle ainsi que l'équation de sa trajectoire dans le repère (O, x, y).

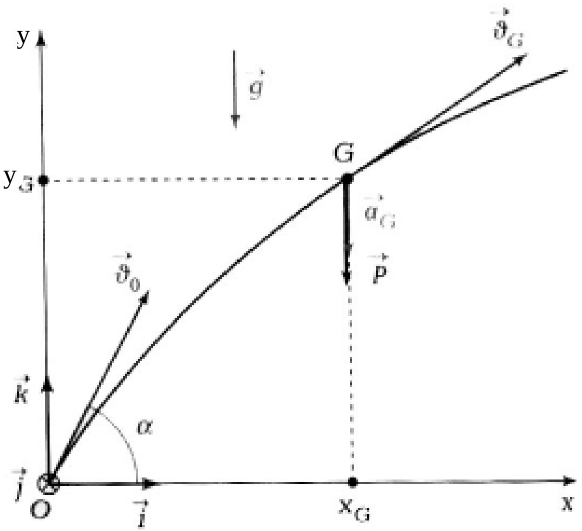


Fig 4.

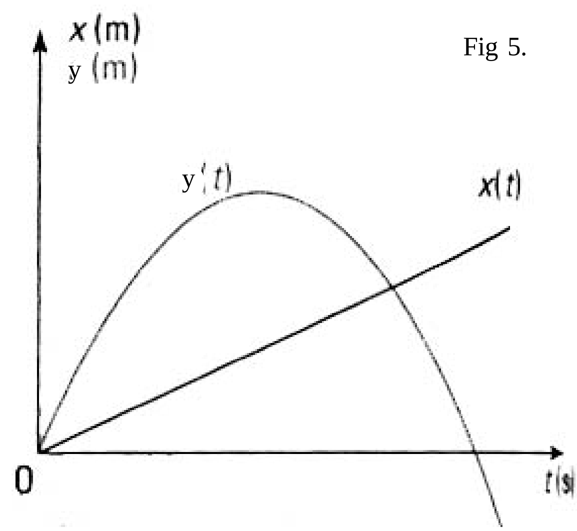


Fig 5.

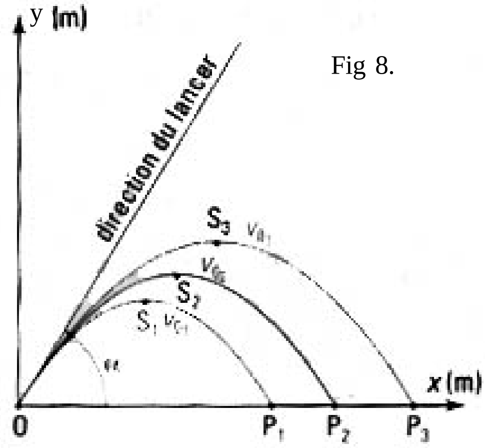


Fig 8.

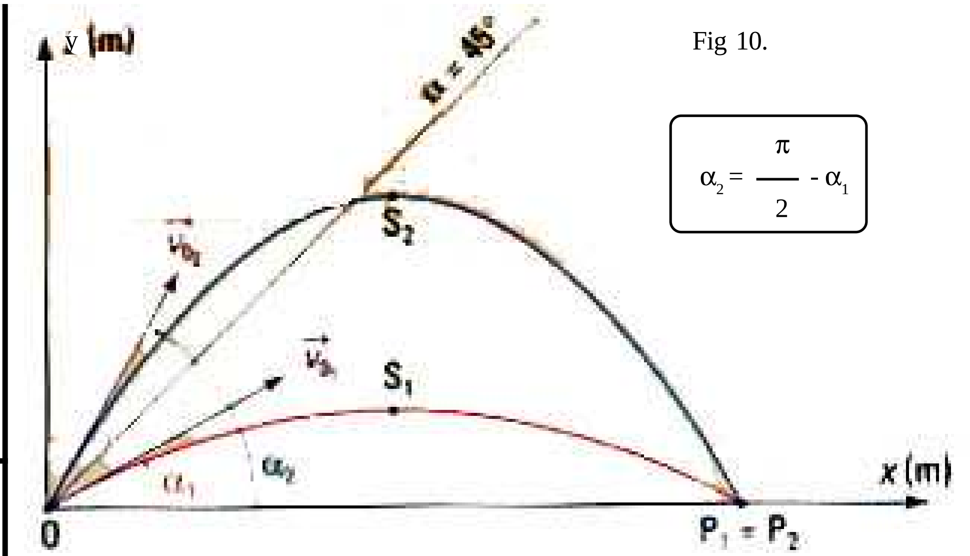


Fig 10.

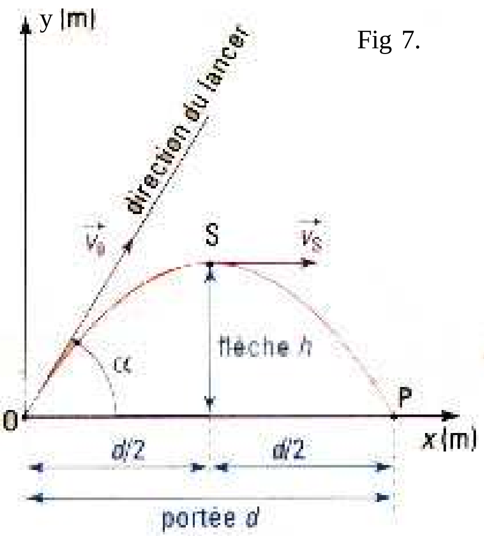


Fig 7.

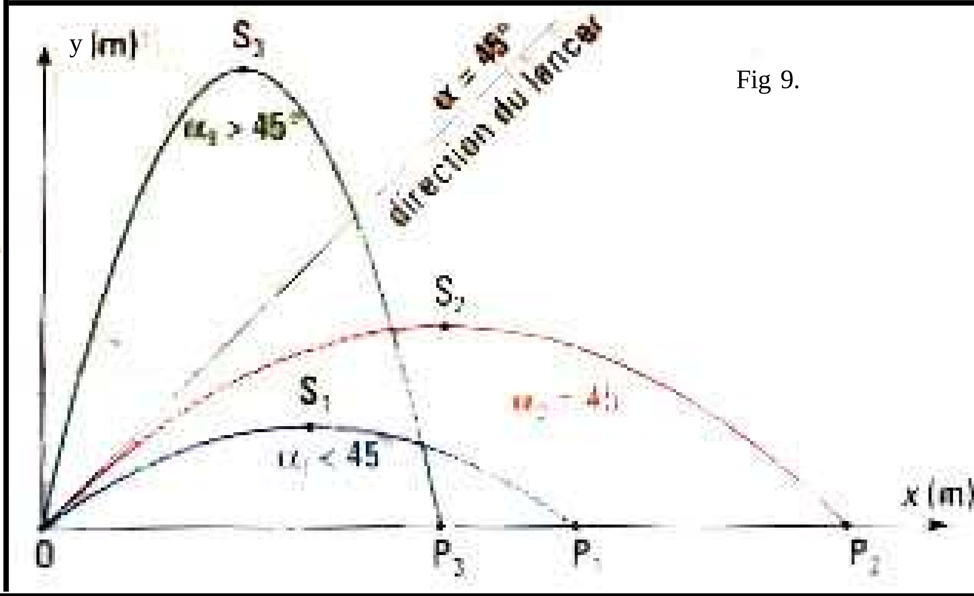


Fig 9.

Fig 12.

4.1. Quelle est l'abscisse x_C du point d'impact C du pigeon d'argile et de la balle ?

4.2. Vérifier, à partir de l'abscisse x_C de l'impact, que le temps de « vol » du pigeon est $\Delta t = 2{,}1$ s.

4.3. Calculer $\Delta t'$ le temps de « vol » de la balle jusqu'à l'impact connaissant l'ordonnée du point de l'impact $y_C = 22$ m.

4.4. Comparer Δt et $\Delta t'$ et expliquer pourquoi le tireur peut viser directement le pigeon.