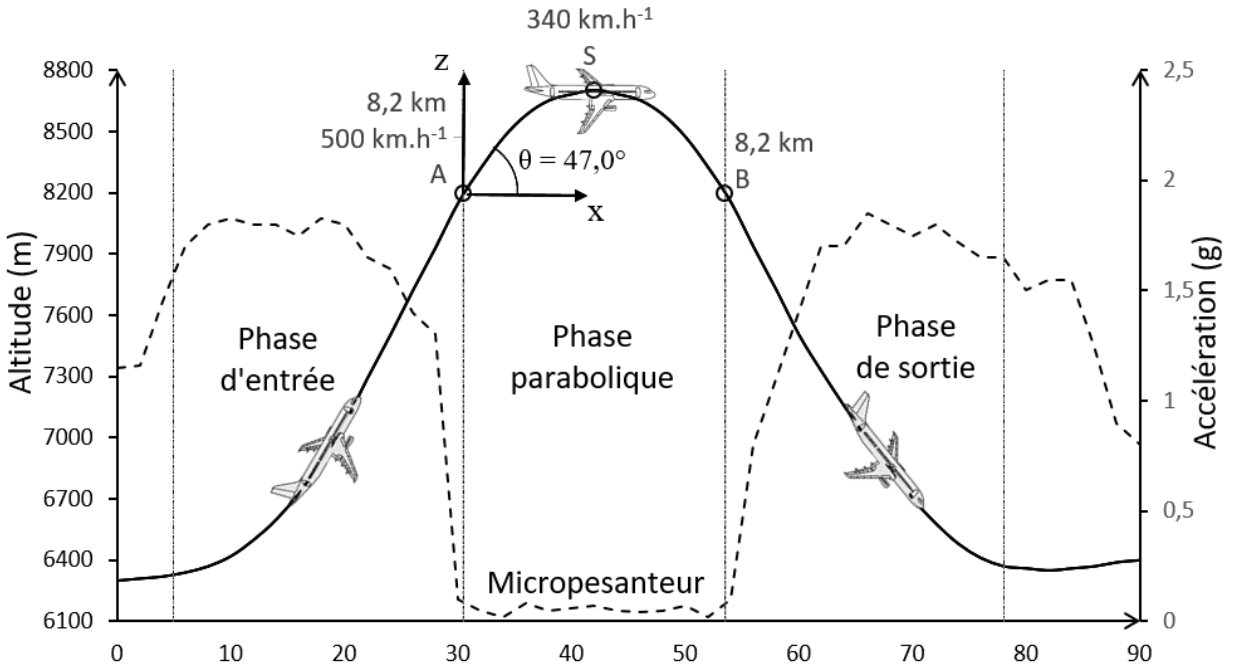
Expériences en impesanteur : vol « zéro g »

L'impesanteur est l'absence ressentie de pesanteur. L'état d'impesanteur permet d'étudier des phénomènes physiques, chimiques ou biologiques habituellement masqués par la gravité sur Terre. Il peut être obtenu dans un avion en vol parabolique (l'Airbus A300 « zéro G » par exemple) ou dans une station spatiale en orbite autour de la Terre (la Station Spatiale Internationale ISS par exemple). Nous nous proposons d'étudier ces deux situations.

Document : Vol parabolique de l'Airbus A 300 zéro G

La figure 1 traduit une situation simplifiée lors d'un vol parabolique



Description du vol : l'avion, en vol horizontal vers 6,3 km d'altitude, monte à environ 7,7 km en se cabrant à 47,0 ° (phase d'entrée). Le pilote diminue ensuite la poussée des réacteurs de façon à juste compenser les frottements de l'air. L'avion n'est alors soumis qu'à son poids et entre en situation de « chute libre » (phase parabolique) vers 8,2 km d'altitude. Son élan lui permet d'atteindre une altitude voisine de 8,7 km avant de retomber. Le pilote augmente à nouveau la poussée des réacteurs vers 8,2 km d'altitude (phase de sortie) puis l'avion reprend son vol horizontal vers 6,3 km. L'opération dure environ une minute pour obtenir 21 secondes d'impesanteur. Cette séquence est répétée 30 fois au cours d'un vol.

En pratique, l'impesanteur parfaite (ou « zéro g ») n'est pas tout à fait réalisée dans la phase parabolique où l'on obtient plutôt une micropesanteur (0,05g).

Données :

- Masse de la Terre : $M_T = 5{,}98.10^{24}$ kg
- Rayon de la Terre : $R_T = 6{,}38.10^{3}$ km

1. Champ de pesanteur terrestre

1.1. Donner l'expression du champ de pesanteur de la Terre g(z) à l'altitude z en fonction de la constante de gravitation universelle G, de la masse de la Terre M_T , du rayon de la Terre R_T et de l'altitude z.

1.2. Calculer la valeur g_0 à l'altitude z = 0 km et g_A à l'altitude z_A = 8,20 km.

1.3. On considère qu'on peut négliger la variation de g entre les deux altitudes si elle est inférieure à 1%. Peut-on négliger la variation entre g_0 et z_A ?

2. Phase parabolique

On s'intéresse au mouvement du centre d'inertie de l'avion de masse m dans le repère (A, x, z) de la figure 1, au cours de la phase parabolique du vol. L'avion atteint cette phase à l'altitude z_A = 8,20 km avec une vitesse initiale $v_A = 500\ km.h^{-1}$ faisant un angle θ = 47,0 ° par rapport à l'horizontale. On prendra la valeur $g = 9,80\ m.s^{-2}$ pour les calculs numériques.

2.1. Etablir les expressions littérales des équations horaires de la vitesse $v_x(t)$ et $v_z(t)$ et du mouvement x(t) et z(t) dans le repère (A, x, z) en proposant un raisonnement rigoureux.

2.2. En déduire l'expression littérale de la trajectoire z(x) dans le repère (A, x, z).

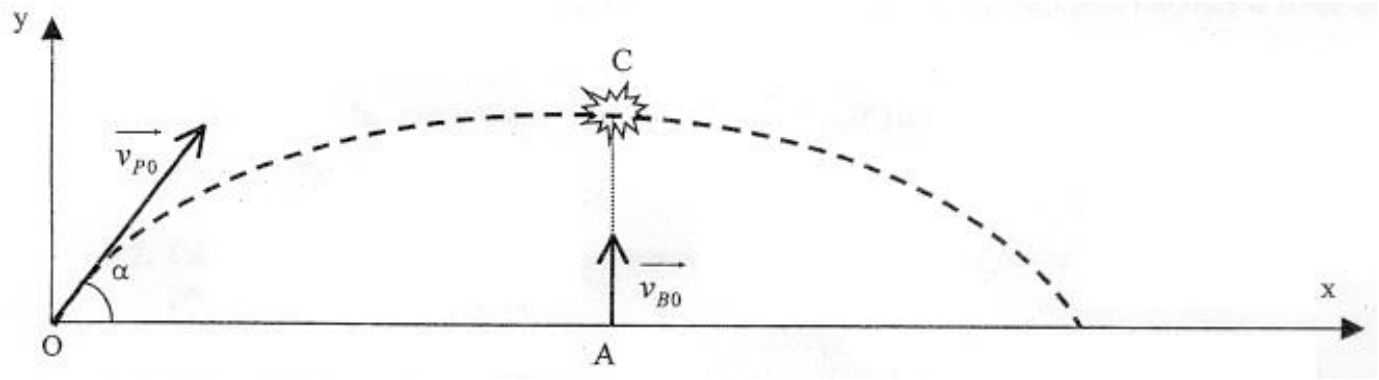
2.3. Soit S le sommet de la trajectoire de l'avion. Calculer la durée t_s de la phase ascendante pour aller de A et S.

2.4. En déduire l'altitude maximale z_S atteinte par l'avion ainsi que sa vitesse v_S en ce point. Comparer avec les informations données.

2.5. L'avion quitte sa phase parabolique au point B à l'altitude z_B = 8,20 km. Calculer la durée totale t_B de la phase parabolique et la comparer aux informations données.

TIR AU PIGEON D'ARGILE

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 $\overrightarrow{V_{PO}}$ de valeur V_{PO}= 30 m.s^{-1} 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_{BO}=500m.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).
On donne g = 10 m.s^{-2}.



Attention : les temps correspondants à chaque mouvement sont notés différemment : *t* pour le pigeon d'argile et *t'* pour la balle de fusil.

1. Étude du mouvement du pigeon d'argile

On notera *t* le temps associé au mouvement du pigeon d'argile. A l'origine du mouvement *t* = 0.

1.1. Donner les composantes de l'accélération $\overrightarrow{a_P}$ dans le repère (O, x, y).

1.2. Établir les composantes $v_{Px}(t)$ et $v_{Py}(t)$ du vecteur vitesse $\vec{v}_P$ dans le repère (O, x, y) en fonction du temps *t*

1.3. Établir les composantes $x_P(t)$ et $y_P(t)$ du vecteur position $\overrightarrow{OM}$ dans le repère (O, x, y) en fonction du temps *t*.

2. Tir réussi

2.1. D'après le schéma et l'énoncé, quelle est l'abscisse x_C du point d'impact C du pigeon d'argile et de la balle ?

2.2. Vérifier, à partir de l'abscisse x_C de l'impact, que le temps de « vol » du pigeon est Δt = 2,1 s.

2.3. On néglige toutes les forces s'exerçant sur la balle.

2.3.1. Que peut-on dire de son accélération a_B ? Que peut-on dire de sa vitesse v_B ?
Déterminer alors la vitesse v_B.

2.3.2. 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.

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

3. Discussion de l'effet du poids de la balle

Dans cette partie l'effet du poids de la balle n'est plus négligé mais on négligera toujours la force de frottement de l'air.

3.1. Établir que la composante de la vitesse $v_{By}(t')$ dans le repère (O,x,y) vérifie l'équation $v_{By}(t') = v_{B0} - g\,t'$.

3.2. Calculer la vitesse v_{By} au bout d'un temps $\Delta t'$ = 0,044 s, justifier pourquoi on a négligé le poids dans la partie 2.

Expériences en impesanteur

1.1.	$F_{T\to B} = G \cdot \frac{m \cdot M_T}{(R_T+z)^2}$ et $P = m \,.\, g_z$ Or $P = F_{T\to B}$ D'où $m \cdot g_z = G \cdot \frac{m \cdot M_T}{(R_T+z)^2}$ ce qui donne $g_z = G.\frac{M_T}{(R_T+z)^2}$
1.2.	$g_0 = 9{,}80\ m.s^{-2}$ $g_A = 9{,}77\ m.s^{-2}$
1.3.	$\frac{\Delta g}{g_0} = 0{,}3\%$ < 1 % donc g considéré comme constant.
2.1.	Bilan des forces dans le repère $\vec{P}\begin{vmatrix}0\\-mg\end{vmatrix}$ (situation de chute libre) 2ème loi de Newton $\vec{a}\begin{vmatrix}0\\-g\end{vmatrix}$ Vitesse $\vec{v}\begin{vmatrix}v_x(t) = V_A \cos\alpha\\v_z(t) = -g \cdot t + V_A \sin\alpha\end{vmatrix}$ Equations horaires $\overrightarrow{OM}\begin{vmatrix}x(t) = V_A \cos\alpha \cdot t\\z(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + V_A \sin\alpha \cdot t\end{vmatrix}$
2.2.	$z = -\frac{1}{2v_A^2} \cdot \frac{g}{\cos^2\alpha} \cdot x^2 + \tan\alpha \cdot x$
2.3.	$t_S = \frac{v_A.\sin\alpha}{g}$ A.N. $t_S = 10{,}4\ s$
2.4.	$z_S = 8{,}73 \times 10^3\ m$ conforme à 8,7 km $v_S = 94{,}7\ m.s^{-1} = 341\ km.h^{-1}$ conforme à 340 m.s^{-1}
2.5.	$t_B = 2 \times t_S = 20{,}8\ s$ conforme à 21s

Tir au pigeon

1.1. Coordonnées du poids dans le repère imposé sont : $\vec{P}\begin{vmatrix}0\\-mg\end{vmatrix}$

$\begin{cases}sur\ Ox: a_x = 0\\sur\ Oy: a_y = \frac{-mg}{m}\end{cases}$ $\begin{cases}a_x = 0\\a_y = -g\end{cases}$

D'où les coordonnées du vecteur accélération : $\overrightarrow{a_p}\begin{vmatrix}0\\-g\end{vmatrix}$

1.2. $\overrightarrow{v_p}\begin{vmatrix}v_{px}(t) = V_{p0x}\\v_{py}(t) = -g \cdot t + V_{p0y}\end{vmatrix}$ or $\overrightarrow{v_{p0}}\begin{vmatrix}V_{p0x} = V_{p0}\cos\alpha\\V_{p0y} = V_{p0}\sin\alpha\end{vmatrix}$

soit $\overrightarrow{v_p}\begin{vmatrix}V_{p0}\cos\alpha\\-g \cdot t + V_{p0}\sin\alpha\end{vmatrix}$

1.3. $\overrightarrow{OM}\begin{vmatrix} x_p(t) = V_{p0x} \cdot t + x_0 \\ y_p(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + V_{p0y} \cdot t + y_0 \end{vmatrix}$ à t=0 $\overrightarrow{OM_0}\begin{vmatrix} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{vmatrix}$

soit $\overrightarrow{OM}\begin{vmatrix} x_p(t) = V_{p0}\, cos\, \alpha \cdot t \\ y_p(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + V_{p0}\, sin\, \alpha \cdot t \end{vmatrix}$

2.1. $x_C = x_A = OA = 45m$

2.2. A partir de la composante suivant x du vecteur $\overrightarrow{OM}$, on peut établir l'équation :

$x_p(t_C) = V_{p0}\, cos\, \alpha \cdot t_C$ avec $t_C = \Delta t$ et $x_p(t_C) = x_C$

D'où $\Delta t = \frac{x_C}{V_{p0}\, cos\, \alpha}$ A.N. $\Delta t = 2{,}1s$

2.2.1. Selon le principe d'inertie, comme aucune force n'agit sur la balle au cours de son mouvement, le mouvement de la balle est rectiligne et uniforme. $a_B = 0$ et $v_B = cste = 500 m.s^{-1}$

2.2.2. $\Delta t' = \frac{y_C}{v_B}$ A.N. $\Delta t' = 4{,}4.10^{-2}s$ soit 44ms

2.3. $\frac{\Delta t}{\Delta t'} = \frac{2{,}1}{0{,}044} \approx 48$ La durée mise par la balle est environ 50× plus courte que le temps de vol du pigeon, on peut quasiment la négliger.

3.1. Deuxième loi de Newton : $\vec{P} = m \cdot \vec{a}$

Avec $\vec{P}\begin{vmatrix} 0 \\ -mg \end{vmatrix}$

projetons la 2ème loi sur les axes du repère :

$\begin{cases} sur\ Ox : 0 = m \cdot a_x \\ sur\ Oy : -mg = m \cdot a_y \end{cases}$ soit $\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$

D'où les coordonnées du vecteur accélération : $\vec{a}\begin{vmatrix} 0 \\ -g \end{vmatrix}$

Par intégration :

$\overrightarrow{v_B}\begin{vmatrix} 0 \cdot t + A = A \\ -g \cdot t' + B \end{vmatrix}$ or à t'=0 $\overrightarrow{v_{B0}}\begin{vmatrix} A \\ B \end{vmatrix}$ or $\overrightarrow{v_{B0}}\begin{vmatrix} V_{B0x} = 0 \\ V_{B0y} = V_{B0} \end{vmatrix}$ d'où $\begin{vmatrix} A = 0 \\ B = V_{B0} \end{vmatrix}$

soit $\overrightarrow{v_B}\begin{vmatrix} v_{Bx}(t) = 0 \\ v_{By}(t) = -g \cdot t' + V_{B0} \end{vmatrix}$

Remarque : on utilise ici t' pour la variable temps et non t car l'origine du mouvement de la balle et du pigeon ne sont pas les mêmes (=2chronos différents, déclenchés à 2 instants différents)

3.2. $\overrightarrow{v_B(0{,}044)}\begin{vmatrix} 0 \\ v_{By}(0{,}044) = 499{,}6m.s^{-1} \end{vmatrix}$ soit $v_{By} = 500 m.s^{-1}$ en considérant la précision de l'exercice.

La prise en compte du poids n'intervient pas au niveau de la valeur de la vitesse de la balle.