7 LE POIDS APPARENT

Quels sont le poids apparent (grandeur et direction) et le nombre de g subi par un pilote d'avion de chasse de 70 kg quand il est catapulté d'un porte-avion sachant que l'avion accélère jusqu'à une vitesse de 77 m/s (150 nœuds) sur une distance de 94,5 m (sur le USS Nimitz) ?

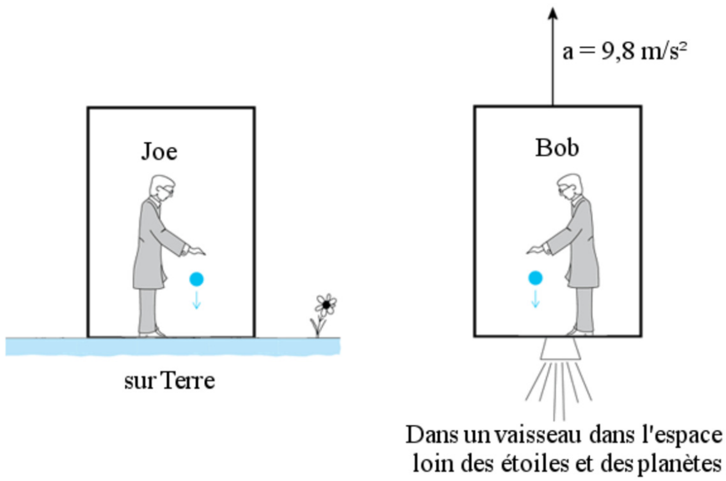
commons.wikimedia.org/wiki/File:US_Navy_071006-N-4166B-033_An_F-A-18_Hornet_attached_to_the_Warhawks_of_Strike_Fighter_Squadron_(VFA)_97_conducts_a_touch_and_go_landing_and_takeoff_aboard_the_Nimitz-class_aircraft_carrier_USS_Abraham_Lincoln_(CVN_72).jpg

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

7.1 LE VECTEUR POIDS APPARENT

La formule du poids apparent

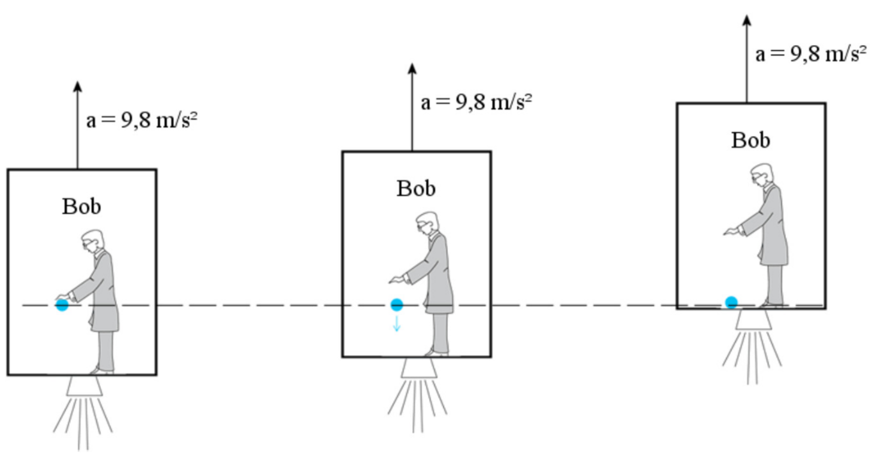
Le point de départ de la relativité générale d'Einstein est le principe d'équivalence. Pour l'illustrer, prenons les deux situations illustrées sur la figure. Dans la figure de gauche, Joe est enfermé dans une boite posée à la surface de la Terre. Dans la figure de droite, Bob est enfermé dans une boite dans l'espace loin de toutes masses importantes. Cette boite accélère dans la direction indiquée sur la figure avec une accélération de 9,8 m/s².



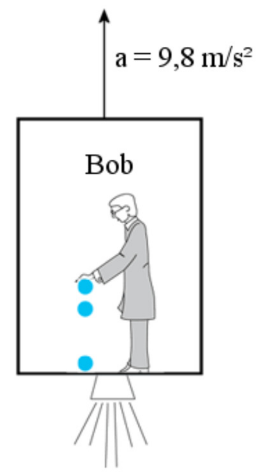
thinkingscifi.wordpress.com/2012/07/21/intelligence-and-imagination/

Le principe d'équivalence dit que tout ce qui se passe dans la boite doit être absolument identique pour Bob et Joe. Par exemple, examinons ce qui se produit si Bob et Joe lâchent une balle qu'ils tiennent dans leur main. Quand Joe lâche sa balle, la force de gravitation fait tomber la balle vers le sol avec une accélération de 9,8 m/s².

Quand Bob lâche sa balle, il n'y a plus de force sur la balle et elle cesse d'accélérer alors que la boite de Bob continue d'accélérer vers le haut. Supposons qu'au moment où Bob lâche sa balle, la vitesse du vaisseau est nulle. On a alors le mouvement illustré sur la figure suivante.

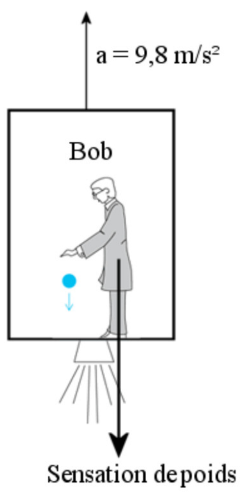


La balle reste en place, puisqu'aucune force n'agit sur elle, pendant que la boite de Bob accélère vers le haut.



De l'intérieur de la boite, ça donnera l'impression que la balle s'est dirigée vers le sol avec une accélération de 9,8 m/s². En fait, le mouvement de la balle observé par Bob est identique au mouvement de la balle observé par Joe.

Le principe d'équivalence signifie aussi que si vous êtes enfermé dans une boite et que vous observez des objets accélérant vers le bas de la boite, il n'y a aucun moyen de déterminer si cela se produit parce qu'il y a de la gravitation ou parce que vous êtes dans une boite qui accélère. Aucune expérience ne pourra vous dire si vous êtes sur Terre ou si vous êtes en train d'accélérer à 9,8 m/s².

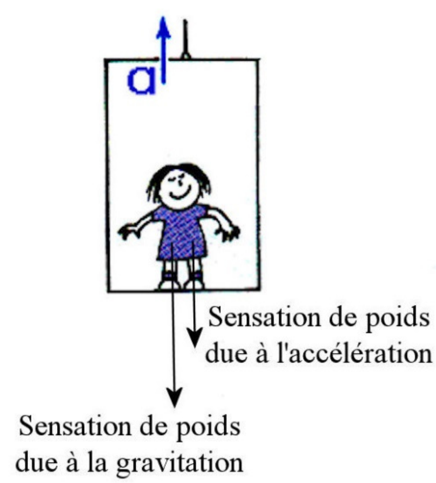


Si tout est exactement identique, alors Bob doit ressentir une sensation de poids tout à fait identique à celle ressentie par Joe faite par la force de gravitation. Comme Joe se sent attiré vers le plancher, Bob doit également se sentir attiré aussi vers le plancher, donc dans la direction opposée à l'accélération. De plus, si la force de gravitation est proportionnelle à la masse, alors l'effet sur Bob doit aussi être proportionnel à la masse de Bob. Ainsi, la grandeur de cette sensation de poids sur Bob doit donc être *ma*.

Si on accélère et qu'on subit une force de gravitation, la sensation de poids sera simplement la somme de ces deux effets. C'est cette somme qui est le poids apparent.

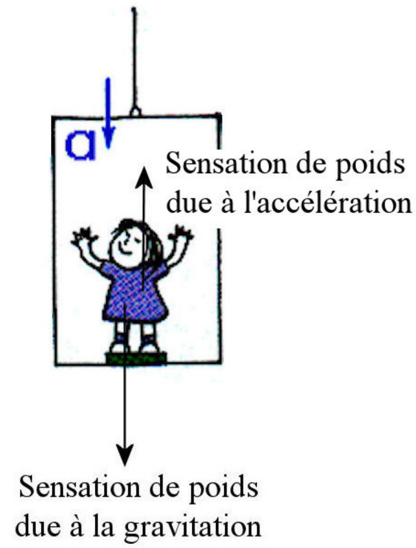
$$\vec{P}_{app} = m\vec{g} + \left(-m\vec{a}\right)$$

Pour comprendre la signification de cette équation, regardons ce qui se passe quand vous prenez l'ascenseur pour monter quelques étages. Quand l'ascenseur commence son mouvement, il accélère vers le haut, ce qui donne une sensation de poids dans la direction opposée, soit vers le bas. Cette sensation s'ajoute à la sensation de poids fait par la force de gravitation et on se sent alors plus lourd.



www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1150/05UCMGrav/Wt.html

Quand l’ascenseur arrive à destination, il freine et accélère donc vers le bas. Cela ajoute une sensation de poids vers le haut à la sensation faite par la force de gravitation vers le bas. On se sent alors plus léger.



Pour calculer le poids apparent, on va plutôt travailler avec les composantes (avec l’axe des *x* horizontal et l’axe des *y* vers le haut). On a donc les équations suivantes.

Le poids apparent à partir de l’accélération

$$\vec{P}_{app} = m\vec{g} + \left(-m\vec{a}\right)$$

En composantes :

$$P_{app\,x} = -ma_x$$
$$P_{app\,y} = -mg - ma_y$$

avec l’axe des *x* horizontal et l’axe des *y* vers le haut

On peut également obtenir une autre formule pour calculer le poids apparent en utilisant la deuxième loi de Newton. Cette formule est

$$\vec{P}_{app} = m\vec{g} + \left(-m\vec{a}\right)$$
$$\vec{P}_{app} = m\vec{g} + \left(-\sum \vec{F}\right)$$

Ce qui donne la formule suivante.

Le poids apparent à partir des forces

$$\vec{P}_{app} = -\left(\sum \vec{F} - m\vec{g}\right)$$

En composantes :

$$P_{app\,x} = -\sum F_x$$
$$P_{app\,y} = -\sum F_y - mg$$

avec l’axe des *x* horizontal et l’axe des *y* vers le haut

Cette formule nous dit qu'on peut trouver le poids apparent en faisant la somme des forces sur l'objet, mais en ne comptant pas la force de gravitation. Le poids apparent est égal à la somme de ces forces, mais dans la direction opposée. C'est ce qui fait que certains définissent le poids apparent comme la force qu'on doit faire pour soutenir l'objet.

Erreur fréquente : Utiliser les mauvais axes pour calculer les composantes du poids apparent.

Les équations des composantes ont été obtenues pour un axe des *y* pointant vers le haut et un axe des *x* horizontal. Vous ne pouvez pas tourner les axes.

Erreur fréquente : Mettre directement des chiffres dans les équations $\vec{P}_{app} = m\vec{g} + \left(-m\vec{a}\right)$ **ou** $\vec{P}_{app} = -\left(\sum \vec{F} - m\vec{g}\right)$

Ces équations sont des équations vectorielles. Ainsi, on obtient rarement la bonne réponse en mettant directement les valeurs de *g* de *a* ou de *F* directement dans ces équations. Il faut plutôt travailler avec les composantes *x* et *y* de ces équations.

Le nombre de *g*

Il est souvent utile de comparer le poids apparent au poids réel sur Terre pour se donner une meilleure idée de la sensation de poids. En faisant le rapport de la grandeur du poids apparent sur le poids réel, on obtient le nombre de *g*.

Le nombre de *g*

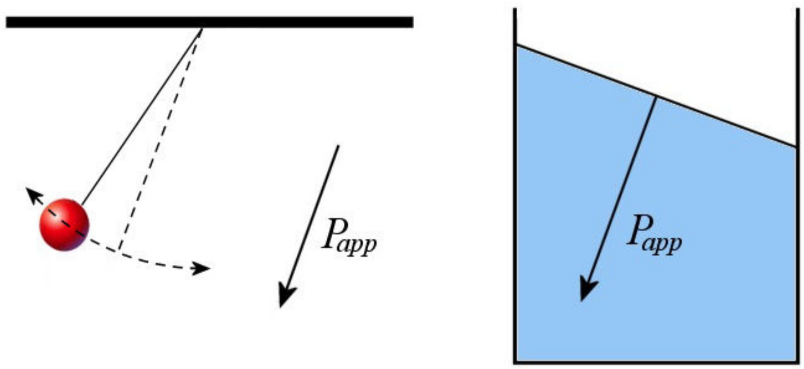
$$n_g = \frac{\left|P_{app}\right|}{P_{\text{reel sur Terre}}} = \frac{\left|P_{app}\right|}{m \cdot 9{,}8 \frac{m}{s^2}}$$

Ainsi, si le nombre de *g* vaut 1,2, cela signifie qu'on se sent 1,2 fois plus lourd que normalement.

Tout se passe comme si la gravitation était dans la direction du poids apparent

Le principe d'équivalence nous dit qu'on ne peut pas faire la différence entre l'effet de la gravitation et l'effet de l'accélération. En clair, cela veut dire que tout se passe exactement comme si la gravitation était dans la direction du poids apparent.

Si on lâche un objet, il va tomber dans la direction du poids apparent. S'il y a un pendule fixé au plafond, il ne va pas osciller d'un côté à l'autre de la verticale, mais d'un côté à l'autre de la direction de poids apparent. S'il y a un récipient avec de l'eau, la surface ne sera pas horizontale, mais elle sera perpendiculaire à la direction du poids apparent.



De plus, tout se passe comme si la gravitation était multipliée par n_g. Par exemple, tout va se passer comme si g était 2 fois plus grand si $n_g = 2$. Si on laisse tomber un objet vers le sol, l'accélération de l'objet sera de 19,6 m/s² si $n_g = 2$. La normale d'un objet posé sur le sol serait 2 fois plus grande (si le sol est perpendiculaire à la direction du poids apparent). La poussée d'Archimède serait 2 fois plus grande et elle serait dans la direction opposée au poids apparent.

7.2 LE POIDS APPARENT AVEC DES ACCÉLÉRATIONS EN LIGNE DROITE

Exemple 7.2.1

Quels sont le poids apparent et le nombre de g subi par une personne de 60 kg dans un ascenseur dans les situations suivantes ?

a) Dans un ascenseur qui monte à vitesse constante.

La seule chose qui peut changer le poids apparent est une accélération. Comme l'accélération est nulle ici, le poids apparent est donc égal au poids. On a donc

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg \\ &= -60kg \cdot 9{,}8\tfrac{m}{s^2} \\ &= -588N \end{aligned}$$

Puisque la valeur de $P_{app\ y}$ est négative, le poids apparent est de 588 N vers le bas.

Le nombre de g est

$$n_g = \frac{588N}{588N} = 1$$

La personne dans cet ascenseur se sent donc comme si elle avait le même poids qu'elle a normalement sur Terre dans un ascenseur en mouvement à vitesse constante.

b) Dans un ascenseur qui accélère vers le haut avec une accélération de 2 m/s².

Le poids apparent est

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -60kg \cdot 9,8\tfrac{m}{s^2} - 60kg \cdot 2\tfrac{m}{s^2} \\ &= -708N \end{aligned}$$

Puisque la valeur de $P_{app\ y}$ est négative, le poids apparent est de 708 N vers le bas.

Le nombre de g est

$$n_g = \frac{708N}{588N} = 1,204$$

La personne dans cet ascenseur se sent donc comme si elle avait un poids valant 1,204 fois le poids qu'elle a normalement sur Terre. C'est ce genre de sensation qu'on est dans un ascenseur qui amorce son mouvement vers le haut (et qui accélère donc vers le haut).

c) Dans un ascenseur qui accélère vers le bas avec une accélération de 2 m/s².

Le poids apparent est

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -60kg \cdot 9,8\tfrac{m}{s^2} - 60kg \cdot \left(-2\tfrac{m}{s^2}\right) \\ &= -468N \end{aligned}$$

Puisque la valeur de $P_{app\ y}$ est négative, le poids apparent est de 468 N vers le bas.

Le nombre de g est

$$n_g = \frac{468N}{588N} = 0,796$$

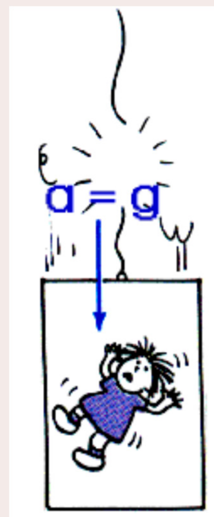
La personne dans cet ascenseur se sent donc comme si elle avait un poids valant 0,796 fois le poids qu'elle a normalement sur Terre. C'est ce genre de sensation qu'on a dans un ascenseur qui arrête son mouvement vers le haut (et qui accélère donc vers le bas).

d) Dans un ascenseur qui accélère vers le bas avec une accélération de 9,8 m/s².

Le poids apparent est

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -60kg \cdot 9{,}8\tfrac{m}{s^2} - 60kg \cdot \left(-9{,}8\tfrac{m}{s^2}\right) \\ &= 0N \end{aligned}$$

Le poids apparent est donc de 0 N.



Le nombre de g est

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{0N}{588N} \\ &= 0 \end{aligned}$$

La personne dans cet ascenseur se sent donc comme si elle avait un poids nul. Elle a l'impression qu'il n'y a plus de gravitation et elle flotte librement dans l'ascenseur (jusqu'à ce qu'elle devienne de l'écrapou quand l'ascenseur arrive au bas de la cage). En chute libre, l'effet de l'accélération annule toujours exactement l'effet de la gravitation et notre poids apparent est toujours nul.

e) Dans un ascenseur qui accélère vers le bas avec une accélération de 15 m/s².

Le poids apparent est

$$\begin{aligned} P_{app} &= -mg - ma_y \\ &= -60kg \cdot 9{,}8\tfrac{m}{s^2} - 60kg \cdot \left(-15\tfrac{m}{s^2}\right) \\ &= 312N \end{aligned}$$

Puisque la valeur de $P_{app\ y}$ est positive, le poids apparent est de 312 N vers le haut.

Le nombre de g est

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{312N}{588N} \\ &= 0{,}531 \end{aligned}$$

La personne dans cet ascenseur se sent donc comme si elle avait un poids valant 0,531 fois le poids qu'elle a normalement sur Terre, mais dirigé vers le haut. Elle marche donc au plafond de l'ascenseur.

(Notez qu'il y a une corde qui tire l'ascenseur vers le bas, car son accélération ne peut pas dépasser 9,8 m/s² s'il n'y a que la gravitation qui tire l'ascenseur vers le bas.)

Selon la formule du poids apparent à partir des forces, on peut mesurer le changement de poids apparent dans un ascenseur avec une balance. Il n'y a alors qu'une seule force qui agit sur la personne si on exclut le poids : c'est la normale. Cela veut dire que la normale est de même grandeur (mais de direction opposée) que le poids apparent dans ce cas puisque

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -\sum F_y - mg \\ &= -\left(-mg + F_N\right) - mg \\ &= -F_N \end{aligned}$$

Comme une balance mesure la force de contact entre la personne et la balance, donc la normale, on peut voir le changement de poids apparent sur la balance. On verra la valeur indiquée par la balance changer au départ et à l'arrivée (donc quand il y a des accélérations). C'est ce qu'on peut voir sur ce vidéo.
https://www.youtube.com/watch?v=z42xuQLkkGQ

Exemple 7.2.2

Quel est le nombre de *g* subi par une personne dans une fusée au décollage si l'accélération de la fusée est de 6 m/s² vers le haut ?

Le poids apparent est

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -m\left(g + a_y\right) \end{aligned}$$

On ne peut pas calculer le poids apparent puisqu'on ne sait pas la masse de l'astronaute. On peut cependant trouver le nombre de *g*.

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{\left|P_{app}\right|}{mg} \\ &= \frac{\left|-m\left(g + a_y\right)\right|}{mg} \end{aligned}$$

$$= \frac{\left| -\left(g + a_y \right) \right|}{g}$$

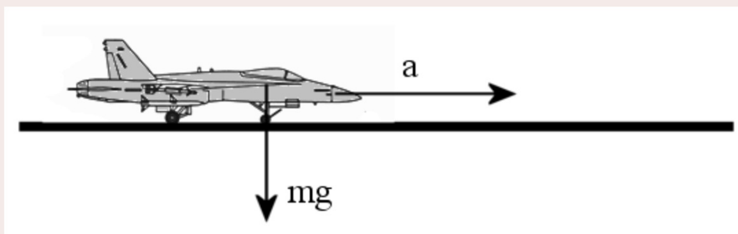
$$= \frac{\left(9,8 \frac{m}{s^2} + 6 \frac{m}{s^2} \right)}{9,8 \frac{m}{s^2}}$$

$$= 1,61$$

Contrairement à la croyance populaire, les astronautes ne subissent pas un nombre de *g* très important au décollage. La force exercée par la fusée est très importante, mais elle ne donne pas une accélération si grande à la fusée. Tout le monde pourrait subir ce nombre de *g* sans le moindre entrainement.

Exemple 7.2.3

Quels sont le poids apparent (grandeur et direction) et le nombre de *g* subi par un pilote d'avion de chasse de 70 kg quand il est catapulté d'un porte-avion sachant que, lors du catapultage, l'avion accélère jusqu'à une vitesse de 77 m/s (150 nœuds) sur une distance de 94,5 m (sur le USS Nimitz) ?



www.fas.org/programs/ssp/man/uswpns/air/fighter/f18.html

Les deux composantes du poids apparent sont

$$P_{app\ x} = -ma_x$$
$$P_{app\ y} = -mg$$

Pour calculer la composante en *x*, il faut connaitre l'accélération. Comme on sait que la vitesse passe de 0 à 77 m/s sur une distance de 94,5 m, l'accélération est

$$2a_x(x - x_0) = v^2 - v_0^2$$
$$2 \cdot a_x \cdot (94,5m - 0m) = \left(77 \frac{m}{s} \right)^2 - 0$$
$$a_x = 31,4 \frac{m}{s^2}$$

Les composantes du poids apparent sont donc

$$P_{app\ x} = -ma_x = -70kg \cdot 31,4 \frac{m}{s^2} = -2198N$$

$$P_{app\ y} = -mg = -70kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = -686N$$

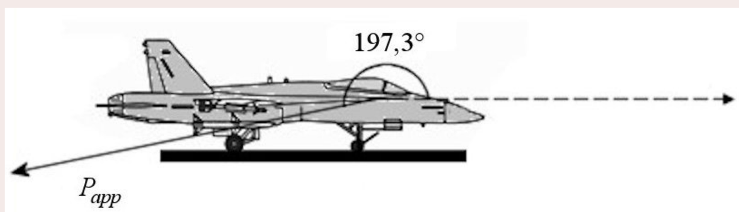
La grandeur du poids apparent est donc

$$\begin{aligned} P_{app} &= \sqrt{P_{app\,x}^{\;2} + P_{app\,y}^{\;2}} \\ &= \sqrt{(-2198N)^2 + (-686N)^2} \\ &= 2302N \end{aligned}$$

La direction du poids apparent est

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan \frac{P_{app\,y}}{P_{app\,x}} \\ &= \arctan \frac{-686N}{-2198N} \\ &= 197{,}3° \end{aligned}$$

Ce qui donne la direction suivante.



Le pilote se sent donc attiré vers l'arrière de l'avion et un peu vers le bas.

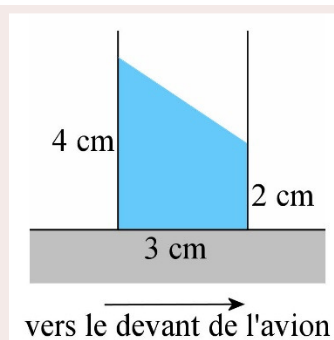
Le nombre de g subi est

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{P_{app}}{mg} \\ &= \frac{2302N}{686N} \\ &= 3{,}36 \end{aligned}$$

Notre pilote se sent donc 3,36 fois plus lourd.

Exemple 7.2.4

Un verre d'eau est solidement fixé sur une table dans un avion qui décolle. Si la surface de l'eau est orientée comme sur la figure, quelle est l'accélération de l'avion ?

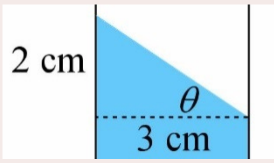


Sachant que la surface est perpendiculaire au poids apparent, on va pouvoir trouver la direction du poids apparent. Ensuite, on pourra trouver les composantes du poids apparent puisque la direction d'un vecteur est donnée par

$$\tan\theta = \frac{P_{app\ y}}{P_{app\ x}}$$

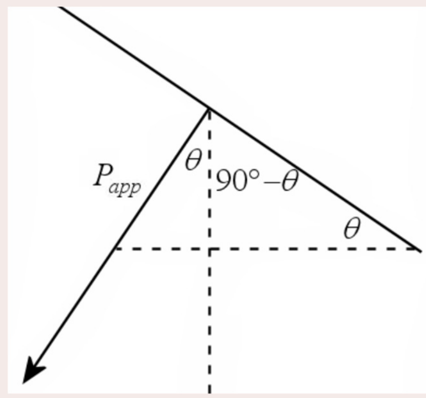
Avec ces composantes, on pourra trouver l'accélération.

Pour trouver la direction du poids apparent, on va commencer par trouver l'angle d'inclinaison de la surface. Selon la figure de gauche, cet angle est



$$\begin{aligned}\theta &= \arctan\frac{2cm}{3cm}\\ &= 33,7°\end{aligned}$$

Cet angle est aussi l'angle entre la verticale et le poids apparent comme on peut le voir sur la figure de droite. L'angle entre le poids apparent et l'axe des x positifs est donc



$$-(90° + 33,7°) = -123,7°$$

Les composantes du poids apparent sont

$$\begin{aligned}P_{app\ x} &= -ma_x\\ P_{app\ y} &= -mg\end{aligned}$$

L'accélération se trouve finalement avec la formule de la direction d'un vecteur

$$\tan\theta = \frac{P_{app\ y}}{P_{app\ x}}$$

$$\tan\theta = \frac{-\cancel{m}g}{-\cancel{m}a_x}$$

$$\tan(-123,7°) = \frac{9,8\frac{m}{s^2}}{a_x}$$

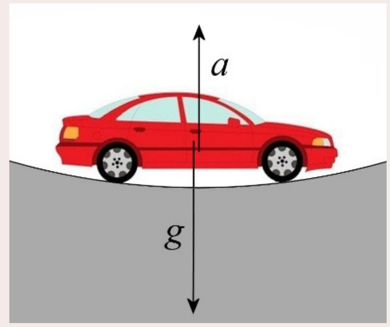
$$a_x = 6,53\tfrac{m}{s^2}$$

7.3 LE POIDS APPARENT LORS DE MOUVEMENTS CIRCULAIRES

Dès qu'un objet est en mouvement circulaire, le poids apparent de l'objet n'est plus égal à son poids réel, car il y a alors une accélération.

Exemple 7.3.1

Léo, qui a une masse de 60 kg, est dans une voiture qui passe dans un creux à 90 km/h. Le rayon du creux est de 125 m.



a) Quel est le poids apparent de Léo ?

Comme il n'y a que de l'accélération en y, les composantes du poids apparent de Léo sont

$$P_{app\ x} = 0$$
$$P_{app\ y} = -mg - ma_y$$

Il faut donc trouver l'accélération de Léo. L'accélération est

$$\begin{aligned} a_y &= \frac{v^2}{r} \\ &= \frac{\left(25\frac{m}{s}\right)^2}{125m} \\ &= 5\frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Le poids apparent de Léo est donc

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -60kg \cdot 9{,}8\frac{m}{s^2} - 60kg \cdot 5\frac{m}{s^2} \\ &= -888N \end{aligned}$$

b) Quel est le nombre de g subi par Léo ?

Le nombre de g est

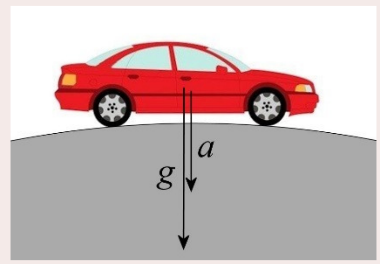
$$\begin{aligned} n_g &= \frac{\left|P_{app}\right|}{mg} \\ &= \frac{888N}{588N} \\ &= 1{,}51 \end{aligned}$$

Le poids apparent reste vers le bas et Léo a l'impression de peser 151 % de son poids habituel.

On peut faire un mouvement identique en avion en suivant une trajectoire qui courbe vers le haut. Dans ce cas, les passagers de l'avion auront une sensation de poids vers le bas (puisque le poids apparent est négatif) et ils se sentiront plus lourds que d'habitude (puisque la grandeur du poids apparent est plus grande que la grandeur du poids.).

Exemple 7.3.2

Léo, qui a une masse de 60 kg, est dans une voiture qui passe sur une bosse à 90 km/h. Le rayon de la bosse est de 125 m.



a) Quel est le poids apparent de Léo ?

Comme il n'y a que de l'accélération en y, les composantes du poids apparent de Léo sont

$$P_{app\ x} = 0$$
$$P_{app\ y} = -mg - ma_y$$

Il faut donc trouver l'accélération de Léo. L'accélération est

$$\begin{aligned} a_y &= -\frac{v^2}{r} \\ &= -\frac{\left(25\frac{m}{s}\right)^2}{125m} \\ &= -5\frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Le poids apparent de Léo est donc

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -60kg \cdot 9,8\frac{m}{s^2} - 60kg \cdot \left(-5\frac{m}{s^2}\right) \\ &= -288N \end{aligned}$$

b) Quel est le nombre de g subi par Léo ?

Le nombre de g est

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{\left|P_{app}\right|}{mg} \\ &= \frac{288N}{588N} \\ &= 0,49 \end{aligned}$$

Le poids apparent reste vers le bas, mais Léo a l'impression de ne peser que 49 % de son poids habituel.

On peut faire un mouvement identique en avion en suivant une trajectoire qui courbe vers le bas. Dans ce cas, les passagers de l'avion auront toujours une sensation de poids vers le bas (si la grandeur de l'accélération ne dépasse pas 9,8 m/s²), mais ils se sentiront moins lourds que d'habitude (puisque la grandeur du poids apparent est plus petite que la grandeur du poids.).

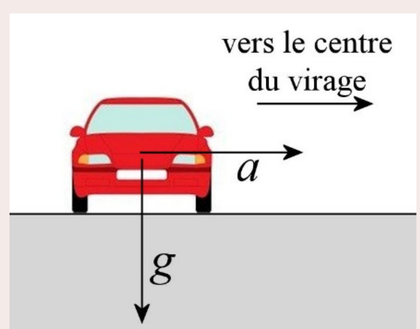
L'avion pourrait suivre cette trajectoire avec une accélération dont la grandeur est plus grande que 9,8 m/s². Par exemple, l'avion pourrait avoir une accélération de -12 m/s². Dans ce cas, le poids apparent serait

$$\begin{aligned} P_{app\ y} &= -mg - ma_y \\ &= -m \cdot 9{,}8 \tfrac{m}{s^2} - m\left(-12 \tfrac{m}{s^2}\right) \\ &= m \cdot 2{,}2 \tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

On voit que si l'accélération vers le bas a une grandeur plus grande que 9,8 m/s², alors le poids apparent devient positif, ce qui veut dire que le poids apparent sera dirigé directement vers le plafond de l'avion. Selon le principe d'équivalence, tout va se passer comme si la gravitation était dirigée vers le plafond de l'avion.
https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=CtnXWwzn368
Ça c'est un peu dégueu…
https://www.youtube.com/watch?v=NGcojK436LQ
Lors de turbulences, une accélération importante vers le bas peut rapidement transformer un poids apparent vers le bas en un poids apparent vers le haut.
https://www.youtube.com/watch?v=envRYX6JnXo

Exemple 7.3.3

Gladys, qui a une masse de 60 kg, est dans une voiture qui prend un virage à 90 km/h. Le rayon du virage est de 100 m.



a) Quelle est la grandeur du poids apparent de Gladys ?

Comme il n'y a que de l'accélération en x, les composantes du poids apparent sont

$$\begin{aligned} P_{app\ x} &= -ma_x \\ P_{app\ y} &= -mg \end{aligned}$$

Pour calculer la composante en x, il faut connaitre l'accélération. L'accélération est

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{v^2}{r} \\ &= \frac{\left(25\frac{m}{s}\right)^2}{100m} \\ &= 6,25\frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Les composantes du poids apparent sont donc

$$\begin{aligned} P_{app\,x} &= -ma_x \\ &= -60kg \cdot 6,25\frac{m}{s^2} \\ &= -375N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{app\,y} &= -mg \\ &= -60kg \cdot 9,8\frac{m}{s^2} \\ &= -588N \end{aligned}$$

La grandeur du poids apparent de Gladys est donc

$$\begin{aligned} P_{app} &= \sqrt{P_{app\,x}^{\;2} + P_{app\,y}^{\;2}} \\ &= \sqrt{(-375N)^2 + (-588N)^2} \\ &= 697,4N \end{aligned}$$

b) Quel est le nombre de g subi par Gladys dans le virage ?

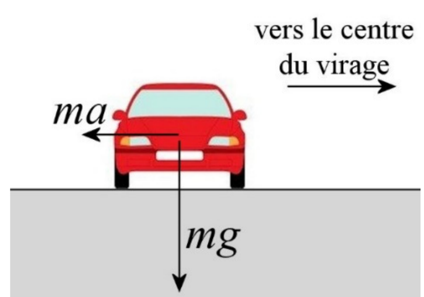
Le nombre de g est

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{\left|P_{app}\right|}{mg} \\ &= \frac{697,4N}{588N} \\ &= 1,186 \end{aligned}$$

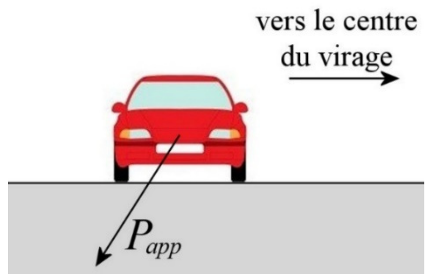
Examinons la direction du poids apparent dans la voiture pendant ce virage. La direction du poids apparent est donnée par cette somme vectorielle.

$$\vec{P}_{app} = m\vec{g} + (-m\vec{a})$$

Voici la direction des deux vecteurs $m\vec{g}$ et $-m\vec{a}$ (qui est un vecteur de grandeur ma dans la direction opposée à l'accélération.)



Si on additionne ces 2 vecteurs, on obtient la direction du poids apparent montrée sur la figure de droite.



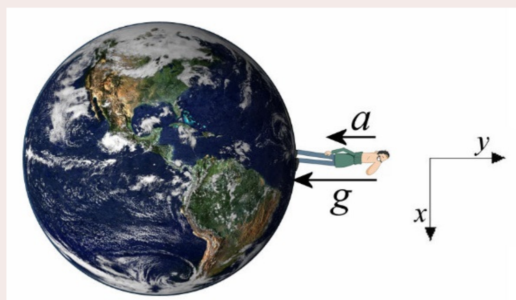
La personne dans la voiture se sent donc attirée vers le bas et vers l'extérieur du virage. (C'est cette composante du poids vers l'extérieur que les gens vont faussement attribuer à une force centrifuge.)

On peut voir ce dernier effet dans ce vidéo montrant comment change l'orientation de la surface d'un liquide dans une voiture quand on prend un virage.
https://www.youtube.com/watch?v=yOFERQMtGNM

Généralement, le nombre de g n'est pas très grand quand on prend un virage en voiture. Il pourrait difficilement dépasser 1,5 g (si la route n'est pas inclinée). Cependant, en formule 1, le nombre de g dans un virage peut monter jusqu'à 6, voire jusqu'à 7.
https://www.youtube.com/watch?v=WGoVT1J9yMk

Exemple 7.3.4

Parce que la Terre tourne, chaque personne sur Terre fait un mouvement circulaire. Cela fait en sorte que le poids apparent sur Terre n'est pas égal à notre véritable poids. Sachant cela, quel est le nombre de g subi par une personne à l'équateur ?



Comme il n'y a que de l'accélération en y (rapellez-vous, l'axe des y doit être opposé à la gravitation), les composantes du poids apparent sont

$$P_{app\,x} = 0$$
$$P_{app\,y} = -mg - ma_y$$

Il faut donc trouver l'accélération de la personne pour déterminer le nombre de g. Comme la personne fait un cercle d'un rayon de 6380 km en 24 h (en fait un peu moins que 24 h…), l'accélération centripète, vers le centre de la Terre, est

$$\begin{aligned} a_y &= -\frac{4\pi^2 r}{T^2} \\ &= -\frac{4\pi^2\left(6,38\times10^6 m\right)}{\left(86400s\right)^2} \\ &= -0,03374 \tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Le nombre de g est donc

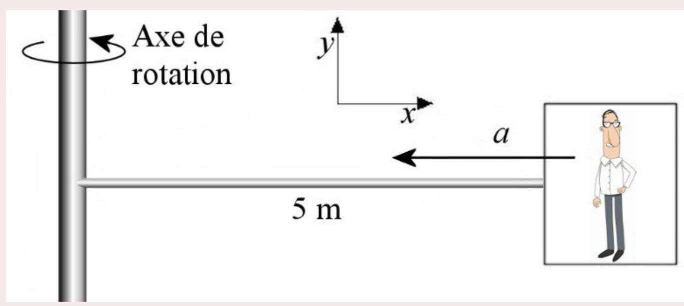
$$\begin{aligned} n_g &= \frac{\left|P_{app}\right|}{mg} \\ &= \frac{\left|-mg - ma_y\right|}{mg} \\ &= \frac{\left|-g - a_y\right|}{g} \\ &= \frac{\left|\left(-9,8\,\tfrac{m}{s^2} - -0,03374\,\tfrac{m}{s^2}\right)\right|}{9,8\,\tfrac{m}{s^2}} \\ &= 0,9965 \end{aligned}$$

Ainsi à l'équateur, on ressent un poids qui est 99,65 % de celui qu'on ressentirait si on était au pôle (où il n'y a pas d'accélération due à la rotation de la Terre).

Pour soumettre une personne à un nombre important de g, on peut l'assoir dans une boite qu'on fait tourner au bout d'une longue tige. Avec l'accélération qu'il y a lors d'un mouvement circulaire, le poids apparent augmente. Plus ça tourne vite, plus il y a d'accélération, plus le poids apparent devient grand. Voici une centrifugeuse de ce type en action.
https://www.youtube.com/watch?v=sG6PPWxjgu0

Exemple 7.3.5

Une centrifugeuse ayant un rayon de 5 m fait un tour en 1,5 seconde. Quel est le nombre de g subi par la personne dans la centrifugeuse ?



Comme il n'y a que de l'accélération en x, les composantes du poids apparent sont

$$P_{app\,x} = -ma_x$$
$$P_{app\,y} = -mg$$

La grandeur du poids apparent est donc

$$P_{app} = \sqrt{(mg)^2 + (ma_x)^2}$$

Il nous faudra donc la grandeur de l'accélération. Dans un mouvement circulaire uniforme, on peut la trouver avec

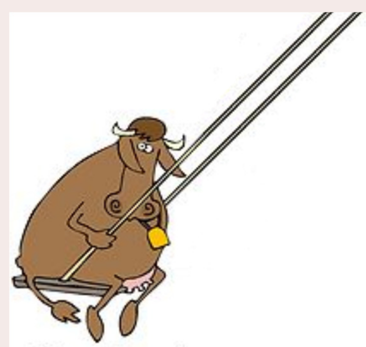
$$\begin{aligned} a_x &= -\frac{4\pi^2 r}{T^2} \\ &= -\frac{4\pi^2 5m}{(1,5s)^2} \\ &= -87,73 \tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

On ne peut pas trouver le poids apparent, car on ne sait pas la masse de la personne dans la centrifugeuse. Cependant, on peut trouver le nombre de g avec

$$\begin{aligned} n_g &= \frac{P_{app}}{mg} \\ &= \frac{\sqrt{(mg)^2 + (ma_x)^2}}{mg} \\ &= \frac{\sqrt{m^2 g^2 + m^2 a_x^2}}{mg} \\ &= \frac{\sqrt{m^2\left(g^2 + a_x^2\right)}}{mg} \\ &= \frac{\cancel{m}\sqrt{g^2 + a_x^2}}{\cancel{m}g} \\ &= \frac{\sqrt{\left(9,8 \tfrac{m}{s^2}\right)^2 + \left(-87,73 \tfrac{m}{s^2}\right)^2}}{9,8 \tfrac{m}{s^2}} \\ &= 9,01 \end{aligned}$$

Exemple 7.3.6

Quelles sont la grandeur et la direction du poids apparent sur cette vache qui se balance ? La corde fait un angle de 10° avec la verticale, la vitesse de la vache est de 5 m/s, la vache a une masse de 720 kg et les cordes ont une longueur de 6 m. (On néglige la friction de l'air.)



www.clipartof.com/portfolio/djart/illustration/cow-elephant-and-pig-swinging-together-on-a-playground-39760.html

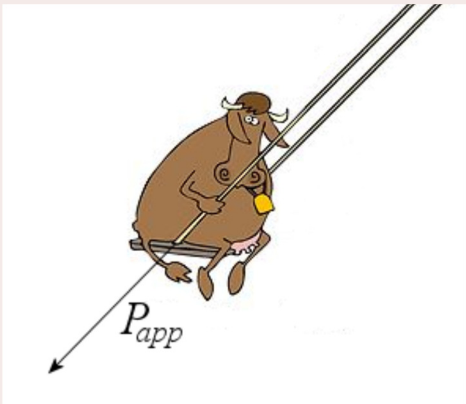
La solution de ce problème est assez compliquée si on utilise les formules

$$\begin{aligned} P_{app\,x} &= -ma_x \\ P_{app\,y} &= -mg - ma_y \end{aligned}$$

Il faudrait alors trouver les accélérations centripète et tangentielle, trouver la grandeur et la direction de l'accélération totale et ensuite trouver les composantes de l'accélération totale en prenant des axes horizontal et vertical.

Toutefois, c'est beaucoup plus simple si on utilise la formule avec la somme des forces

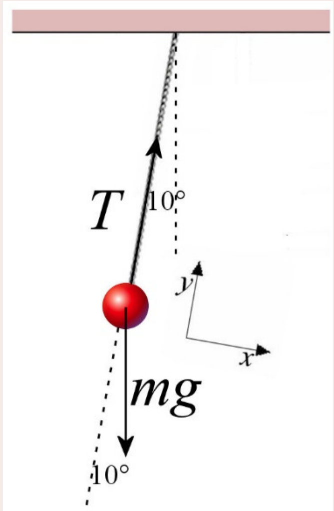
$$\vec{P}_{app} = -\left(\sum \vec{F} - m\vec{g}\right)$$



Cette formule nous dit que le poids apparent est dans la direction contraire de la somme des forces, en ne comptant pas la force de gravitation. Comme ici il n'y a qu'une seule force (la tension) si on exclut la force de gravitation, le poids apparent est dans la direction opposée de la tension. La direction du poids est donc celle montrée sur la figure.

Si cette vache pouvait tenir un verre d'eau (si elle avait des doigts), la surface de l'eau serait toujours perpendiculaire à la direction de la corde.

Il ne reste qu'à trouver la tension de la corde pour trouver la grandeur du poids apparent.



La somme des forces en y est

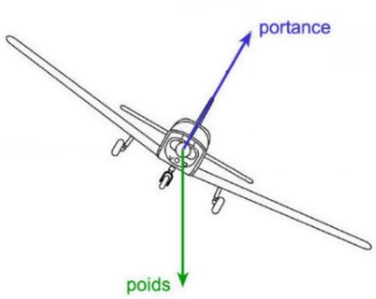
$$\sum F_y = T + mg\sin\left(-80°\right) = m\frac{v^2}{r}$$

La tension est donc

$$\begin{aligned} T &= m\frac{v^2}{r} - mg\sin\left(-80°\right) \\ &= 720kg \cdot \frac{\left(5\frac{m}{s}\right)^2}{6m} - 720kg \cdot 9{,}8\tfrac{N}{kg} \cdot \sin\left(-80°\right) \\ &= 9949N \end{aligned}$$

La grandeur du poids apparent est donc 9949 N. (On pourrait alors calculer que la vache subit 1,41 g.)

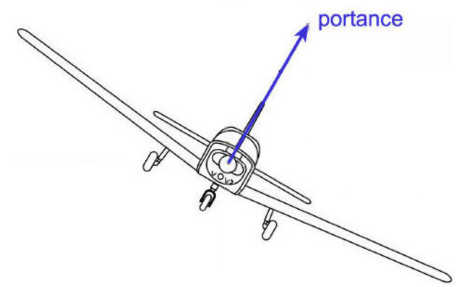
Lors d'un virage en avion, le poids apparent reste toujours perpendiculaire au plancher de l'avion.



En effet, nous avons vu que la force centripète est faite par la portance (la force faite par l'air sur les ailes) lors d'un virage.

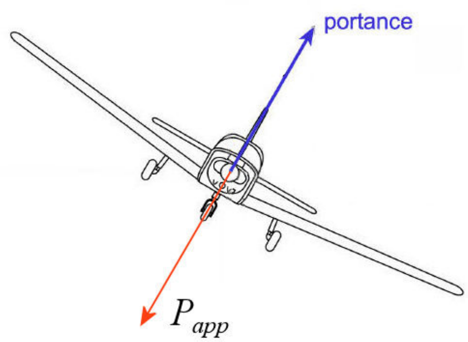
On peut alors trouver la direction du poids apparent dans l'avion avec cette formule.

$$\vec{P}_{app} = -\left(\sum \vec{F} - m\vec{g}\right)$$



Si on ne compte pas le poids, il reste seulement une force (figure de droite).

La somme des forces sauf le poids est donc égale à la portance. Comme le poids apparent est égal à l'opposé de cette somme, on a un poids apparent opposé à la portance.



Comme la force de portance est toujours perpendiculaire aux ailes, la direction du poids apparent est donc aussi toujours perpendiculaire aux ailes. Cela signifie qu'on se sent toujours attiré directement vers le plancher de l'avion, même quand l'avion est incliné. On ne se sent pas attiré vers un côté de l'avion, même si l'angle d'inclinaison dans le virage est très prononcé.

Comme le principe d'équivalence dit qu'on ne peut pas faire la distinction entre l'effet de la gravitation et l'effet de l'accélération, tout se passe comme si la gravitation était toujours dirigée exactement vers le plancher de l'avion. Si on laisse tomber un objet, il va tomber directement vers le plancher de l'avion même si l'avion est incliné. S'il y a une boule sur le plancher, elle ne va pas rouler vers un côté de l'avion. S'il y a un verre d'eau dans l'avion, la surface de l'eau restera parallèle au plancher et ne s'inclinera pas dans le verre.

Tout se passe comme si la gravitation était dirigée exactement vers le plancher de l'avion. On peut même se verser un verre d'eau normalement pendant un virage.
https://www.youtube.com/watch?v=g99ho_ExApU
https://www.youtube.com/watch?v=_7n0hflAxD4

En résumé, on ne sent pas l'inclinaison dans l'avion ! Il n'y a qu'une seule différence pendant le virage : la gravitation semble plus grande dans un virage parce que le nombre de g est supérieur à 1 (et l'augmentation n'est pas très grande pour les vols commerciaux). À part cette différence, tout se passe comme si la gravitation était perpendiculaire au plancher de l'avion.

On peut donc être facilement désorienté en avion. Quand c'est la nuit et qu'on ne voit plus l'horizon, il se peut que les pilotes ne se rendent pas compte que l'avion s'incline lentement d'un côté s'ils ne sont pas attentifs. Plusieurs accidents d'avion ont commencé comme ça.

En combinant les virages dans différentes directions, on peut faire constamment varier le poids apparent, au grand plaisir des passagers (ou pas).
https://www.youtube.com/watch?v=aR-fA6OG21w

7.4 L'IMPESANTEUR[1]

Il se peut que la sensation de poids dû à l'accélération soit complètement annulée par la sensation de poids dû à la gravitation, comme c'était le cas avec l'ascenseur en chute libre. Alors le poids apparent devient nul et les personnes flottent alors comme s'il n'y avait pas de gravité. On dit alors qu'ils sont en état d'impesanteur ou d'apesanteur.

En fait, dès qu'on accélère vers le bas avec la même accélération que l'accélération gravitationnelle, le poids apparent devient nul. Cela inclut évidemment tous les cas de chute libre.

En orbite

C'est ce qui se passe pour les occupants de la station spatiale. On a vu que la station spatiale en orbite autour de la Terre fait un mouvement de chute libre sans fin vers la Terre. Ainsi, l'accélération de la station spatiale est exactement la même que l'accélération gravitationnelle et le poids apparent des astronautes est nul.

Erreur fréquente : Penser que la force de gravitation sur les astronautes en orbite est nulle.

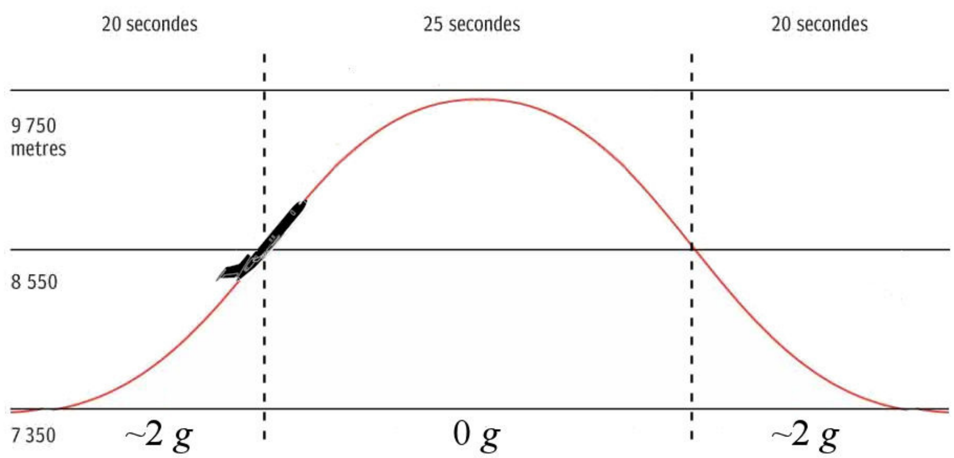
Ce n'est pas le poids (la force de gravitation) qui est nul, c'est le poids apparent. En réalité, le poids des astronautes en orbite est à peine inférieur à ce qu'il est sur Terre. D'ailleurs, si le poids était nul, il n'y aurait pas de force sur les astronautes et ils ne pourraient pas faire de mouvement circulaire autour de la Terre, car il n'y aurait pas de force centripète.

Le vol parabolique

Pas besoin d'être dans la station spatiale pour se retrouver en état d'impesanteur, il suffit d'accélérer vers le bas avec une accélération de 9,8 m/s². Évidemment, on peut s'enfermer

[1] Le terme « apesanteur » est souvent utilisé pour désigner l'absence de poids apparent ; cependant, les confusions orales fréquentes entre « l'apesanteur » et « la pesanteur » ont conduit à utiliser le terme « impesanteur ». L'Académie française constate cependant que le terme a du mal à s'imposer.

dans une boite et se laisser tomber, mais il y a quelques problèmes : la friction de l'air qui va diminuer notre accélération et, évidemment, le choc avec le sol. On peut faire un peu mieux avec un avion. On donne une trajectoire parabolique comme celle-ci à l'avion.



www.telegraph.co.uk/travel/travel-truths/how-do-zero-gravity-planes-work-parabolic-flights/

La partie courbe la plus haute de la trajectoire est une parabole, la même parabole qu'aurait un objet en chute libre. Cela signifie que pendant environ 25 secondes on accélère avec une accélération de 9,8 m/s² vers le bas et que le poids apparent devient nul pendant cette partie de trajectoire. Voici un vidéo montrant les occupants d'un avion faisant une telle trajectoire.
https://www.youtube.com/watch?v=Lhu198E8z2U

On peut même le faire en touriste.
https://www.youtube.com/watch?v=pH2TCEiYwKs

On peut aussi le faire avec son propre avion.
https://www.youtube.com/watch?v=bsdr3-dey2Y

On peut aussi le faire pour un clip de OK go.
https://www.youtube.com/watch?v=LWGJA9i18Co

7.5 LE NOMBRE DE *g* MAXIMUM QUE PEUT SUPPORTER L'ÊTRE HUMAIN

Sans entrainement, 3 ou 4 g peuvent devenir rapidement inconfortables. Le déplacement des fluides dans le corps pouvant priver le cerveau de sang et l'effort musculaire nécessaire pour se maintenir en place peuvent rapidement épuiser quelqu'un. C'est pourquoi le nombre de g maximal qu'on peut atteindre dans des montagnes russes est d'environ 4 g vers le bas et de 0,5 g vers le haut. (On supporte nettement moins bien les g vers le haut puisque le sang s'accumule alors dans la tête.)

Si on pratique des activités qui nous amèneront à dépasser 4 *g*, il faut s'entrainer. Par exemple, les pilotes de formule 1 peuvent subir jusqu'à 7 *g* dans des virages très rapides et ils doivent donc préalablement s'entrainer pour pouvoir supporter de tel poids apparent.

Les pilotes d'avion de chasse peuvent subir un nombre important de *g* au cours de manœuvres avec beaucoup d'accélération comme lors de virages très serrés. Ils doivent donc être en mesure de supporter un nombre de *g* important, ce qui n'est pas facile. Si, par exemple, ils subissent 10 *g* vers le haut, le sang de leur corps s'accumulera dans leurs membres inférieurs et il y aura un manque de sang dans le cerveau. Cela peut entrainer une perte de conscience, ce qui peut être catastrophique en pilotant un avion de combat. Pour pouvoir supporter un nombre de *g* élevé, les pilotes doivent contracter tous les muscles de leurs jambes en même temps pour empêcher le sang de s'accumuler à cet endroit. On a même développé des combinaisons de pilotes qui serrent les jambes quand il y a des accélérations importantes pour empêcher le sang de s'y accumuler.

Les futurs pilotes américains doivent passer un test avant de devenir pilotes d'avion de combat. Ils doivent supporter 9 g pendant 10 secondes. Ils ont deux chances pour réussir ce test sinon ils ne seront pas pilotes de combat. Voici certains de ces pilotes.
https://www.youtube.com/watch?v=jKNDhEdHoBc
https://www.youtube.com/watch?v=JrUCGZO5H9s

Mais peut-on aller plus loin ? Durant les années 40 et 50, John Stapp chercha à répondre à ces questions avec une série du test avec des accélérations de plus en plus grandes. Voici d'ailleurs un de ces tests.
https://www.youtube.com/watch?v=3UEYxf4fl_A
Stapp survécut à un test de 46,2 *g*. Puisqu'il avait la tête penchée vers l'avant dans ce test, le sang s'est accumulé dans sa tête et cela fit éclater plusieurs capillaires dans ses yeux. Ces derniers se sont alors emplis de sang et il fut aveugle pendant quelques jours.

Si l'accélération agit pendant un très court laps de temps, les fluides n'auront pas le temps de se déplacer et il n'y aura pas d'effort musculaire déployé pour se maintenir. On peut alors résister à des nombres de *g* beaucoup plus grand. Il n'est pas rare que des gens survivent à des accidents de voiture alors qu'ils ont subi jusqu'à 50 *g*. Au-delà de 50 *g*, de sérieuses blessures peuvent survenir, mais on peut quand même survivre à un accident dans lequel on subit 100 *g*. Kenny Bräck a même survécu à cet accident au cours duquel il encaissa, durant un très court moment, 214 *g* ! (On le sait parce qu'il y a des accéléromètres dans les voitures de course)
https://www.youtube.com/watch?v=Hy8fgGiI1WA
Bräck fit un retour en course 2 ans plus tard… mais il n'était plus le même pilote.

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Le poids apparent à partir de l'accélération

$$\vec{P}_{app} = m\vec{g} + (-m\vec{a})$$

En composantes :

$$P_{app\ x} = -ma_x$$
$$P_{app\ y} = -mg - ma_y$$

avec l'axe des x horizontal et l'axe des y vers le haut

Le poids apparent à partir des forces

$$\vec{P}_{app} = -\left(\sum \vec{F} - m\vec{g}\right)$$

En composantes :

$$P_{app\ x} = -\sum F_x$$
$$P_{app\ y} = -\sum F_y - mg$$

avec l'axe des x horizontal et l'axe des y vers le haut

Le nombre de g

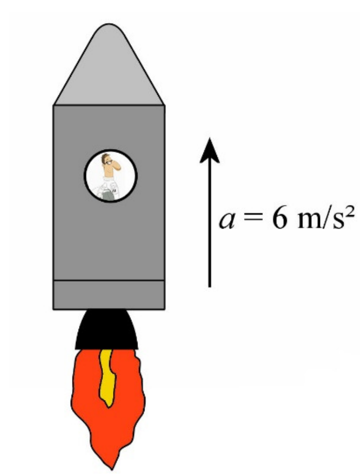
$$n_g = \frac{\left|P_{app}\right|}{P_{\text{reel sur Terre}}} = \frac{\left|P_{app}\right|}{m \cdot 9{,}8 \frac{m}{s^2}}$$

EXERCICES

7.2 Le poids apparent avec des accélérations en ligne droite

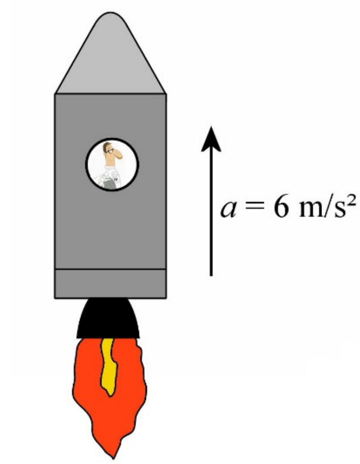
1. Karl, d'une masse de 70 kg, est dans une fusée. Au décollage, la fusée a une accélération de 6 m/s² vers le haut.

   a) Quel est le poids de Karl (grandeur et direction) ?
   b) Quel est le poids apparent de Karl (grandeur et direction) ?
   c) Quel est le nombre de g subi par Karl ?



2. Karl, d'une masse de 70 kg, est dans une fusée. Cette fois-ci, la fusée décolle verticalement, mais à partir de la surface de la Lune (où g ne vaut que 1,6 N/kg). Au décollage, la fusée a une accélération de 6 m/s² vers le haut.

    a) Quel est le poids de Karl (grandeur et direction) ?
    b) Quel est le poids apparent de Karl (grandeur et direction) ?
    c) Quel est le nombre de g subi par Karl ?



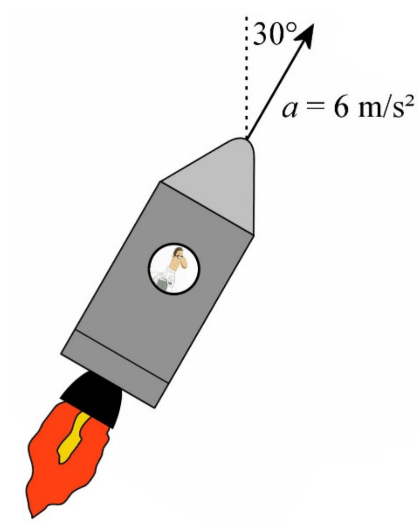
3. White Zombie est une voiture électrique aux allures modestes, mais ayant des performances extraordinaires.

    Elle peut atteindre une vitesse de 100 km/h en seulement 1,8 s, laissant loin derrière des voitures telles que des Ferrari. En supposant que l'accélération est constante, quel est le nombre de g subi par le pilote pendant cette accélération ?

theelectricautoreview.com/2010/03/25/electric-drag-racing-white-zombie/

4. Karl, d'une masse de 70 kg, est dans une fusée. Un peu après le décollage de la Terre, la fusée a une accélération de 6 m/s² dans une direction faisant 30° avec la verticale.

    a) Quel est le poids apparent de Karl (grandeur et direction) ?
    b) Quel est le nombre de g subi par Karl ?

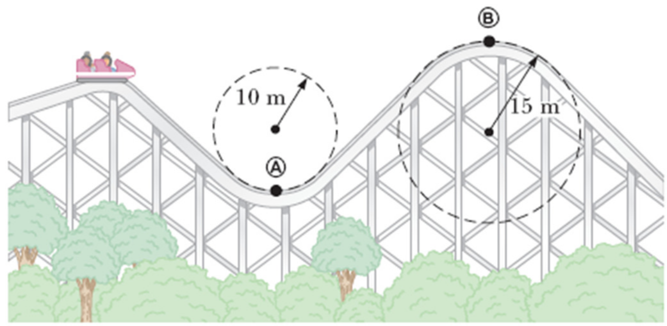


7.3 Le poids apparent avec des accélérations dues à des mouvements circulaires

5. Odette, d'une masse de 120 kg, est dans une voiture de montagnes russes qui roule sur la piste montrée sur cette figure.

   a) Quels sont le poids apparent et le nombre de *g* subi par Odette quand la voiture passe au point A si la vitesse du charriot est de 25 m/s à cet endroit ?

   b) Quels sont le poids apparent et le nombre de *g* subi par Odette quand la voiture passe au point B si la vitesse de charriot est de 10 m/s à cet endroit ?



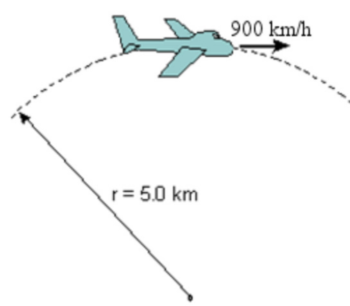
www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/physics-archive-2011-november-02

6. Quelle devrait être la période de rotation de la Terre si on voulait que le poids apparent d'une personne devienne nul à l'équateur ? (Prenez 6378 km pour le rayon de la Terre.)

7. Juliette, d'une masse de 60 kg, est dans un avion qui suit cette trajectoire à vitesse constante.

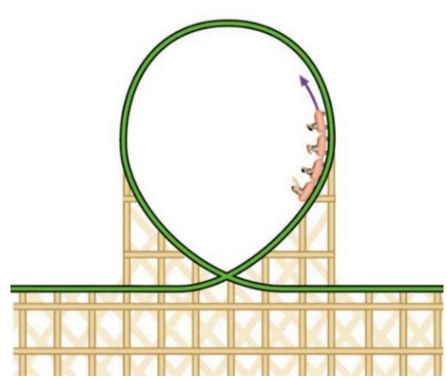
   a) Quel est le poids apparent de Juliette (grandeur et direction) ?

   b) Quel est le nombre de *g* subi par Juliette ?



www.physics.fsu.edu/users/ng/Courses/phy2053c/HW/Ch05/ch05.htm

8. Victor, d'une masse de 50 kg, fait un tour de montagnes russes. Sur le parcours, il y a une boucle telle qu'illustrée sur cette figure. Au sommet, le rayon de courbure de la piste est de 10 m. Quelle doit être la vitesse du charriot pour que Victor ait un poids apparent dirigé vers le haut dont la grandeur est égale au double de la grandeur de son poids ?



cnx.org/content/m42086/latest/?collection=col11406/latest

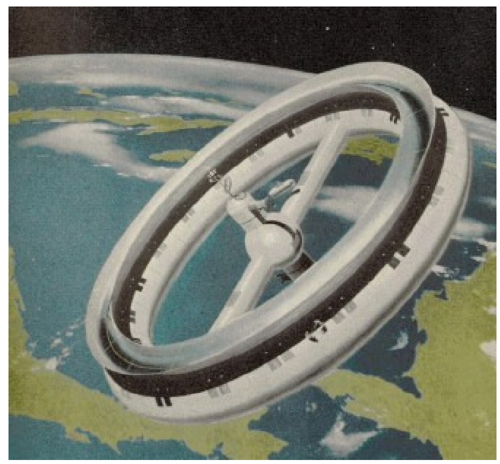
9. Le pilote de cette formule 1 subit 4 g dans ce virage. Quel est le rayon de courbure du virage si la formule 1 va à 180 km/h ?

digitalcatharsis.wordpress.com/tag/crowne-plaza-hotel/

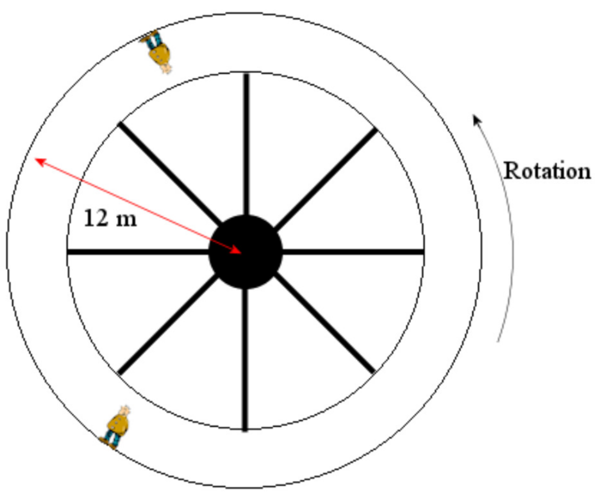
10. Pour éviter de se retrouver en impesanteur dans l'espace, on propose de construire une station spatiale tournante ayant la forme montrée sur la figure de droite.

Avec la rotation de la station, les astronautes font un mouvement circulaire qui leur donne une accélération et donc un poids apparent.

Les astronautes marcheraient sur le mur externe de la station comme montré sur cette figure.



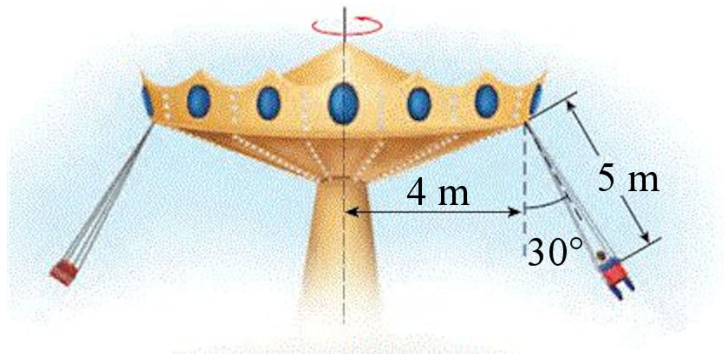
www.rogersrocketships.com/page_view.cfm?id=24



Avec les dimensions montrées sur la figure, quelle devrait être la période de rotation de la station pour que les personnes dans la station aient un poids apparent égal à leur poids sur Terre si cette station est dans l'espace, loin de toutes planètes ou étoiles ?

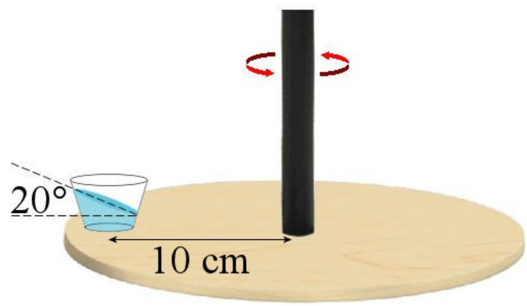
www.batesville.k12.in.us/Physics/PhyNet/Mechanics/Circular%20Motion/answers/assign_4_answers.htm

11. Quelle est la période de rotation de ce manège qui tourne à vitesse constante ?



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/popular-carnival-ride-consists-seats-attached-central-disk-cables-passengers-travel-unifor-q1568766

12. La surface de l'eau dans ce verre est inclinée de 20°. Quel serait l'angle d'inclinaison de la surface de l'eau si le verre était à 6 cm de l'axe de rotation et que la plaque tournait toujours à la même période ?

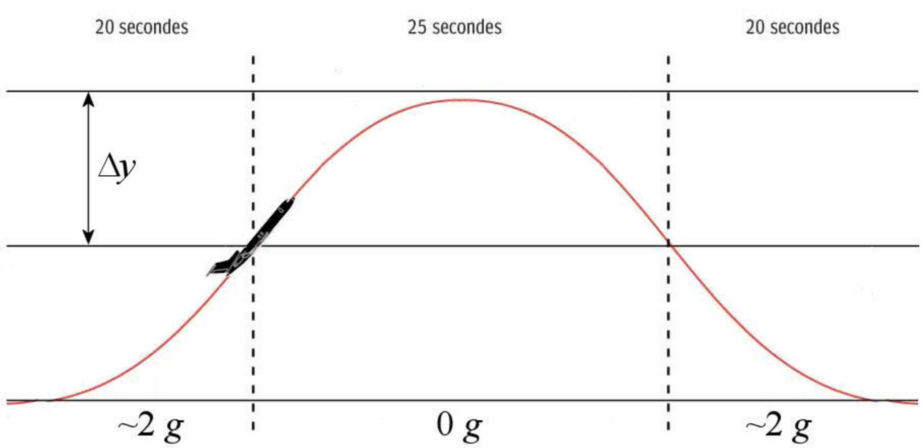


www.foundalis.com/phy/Mach-bucket.htm

7.4 L'impesanteur

13. Quand le poids apparent reste nul dans un avion pendant 25 secondes, cela signifie que l'avion fait un mouvement de projectile pendant ces 25 secondes. Ici, l'avion se déplace à 720 km/h au début du mouvement parabolique.

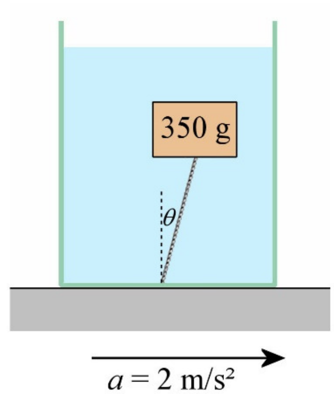
a) Quel est l'angle de montée de l'avion quand commence cette partie du vol ?
b) Quelle est la variation d'altitude pendant la partie ascendante du mouvement de projectile ?



Défis

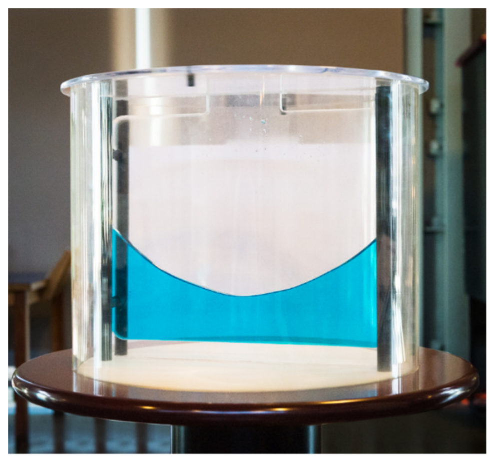
(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

14. Un bloc de cèdre de 350 g et ayant un volume de 400 cm³ est attaché au fond d'un récipient rempli d'eau tel qu'illustré sur la figure. Ce récipient est dans une voiture qui accélère vers la droite avec une accélération de 2 m/s².



a) Quelle est la poussée d'Archimède (grandeur et direction) sur ce bloc de cèdre ? (La masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³)
b) Quelle est la tension de la corde ?
c) Quel est l'angle θ sur la figure ?

15. On met de l'eau dans un récipient qui tourne avec une période T. Quelle est l'équation $y = f(x)$ de la forme tracée par la surface de l'eau ? (Autrement dit, on cherche une formule qui donne la hauteur de l'eau en fonction de la distance de l'axe de rotation.)



www.exploratorium.edu/snacks/water-spinner

RÉPONSES

7.2 Le poids apparent avec des accélérations en ligne droite

1. a) 686 N vers le bas b) 1106 N vers le bas c) 1,612
2. a) 112 N vers le bas b) 532 N vers le bas c) 0,7755
3. 1,865
4. a) 1070,5 N à -101,3° b) 1,56

7.3 Le poids apparent avec des accélérations dues à des mouvements circulaires

5. a) 8676 N vers le bas, $n_g = 7{,}378$ b) 376 N vers le bas $n_g = 0{,}32$
6. 84,48 min
7. a) 162 N vers le haut b) 0,2755
8. 17,15 m/s
9. 65,87 m
10. 6,953 s
11. 6,734 s
12. 12,32°

7.4 L'impesanteur

13. a) 37,8° b) 765,6 m

Défis

14. a) 4 N à 78,47° b) 0,5 N c) 11,5°
15. $y = \frac{2\pi^2 x^2}{gT^2} + y_0$ (C'est une parabole.)