

ARTICLE DE FOND

Qu'est-ce que l'impesanteur ?

Christian Larcher

Après les conceptions initiales, Christian Larcher nous propose de revenir sur ce qu'est l'impesanteur.

Dans la théorie de Newton, tous les corps matériels s'attirent mutuellement. Grâce à cette interaction, nous pouvons « garder les pieds sur Terre ». Cette force appelée poids est dirigée vers le centre de la Terre, elle nous permet de nous déplacer à sa surface et d'en faire le tour si on le souhaite. Chacun perçoit l'effet de son poids parce que celui-ci est contrecarré en permanence par les obstacles qui s'opposent à son action. Il s'agit le plus souvent de l'action du sol ou du siège sur lequel on est assis dans un véhicule (voiture, train, avion).

Il n'est pas possible, près de la Terre, de supprimer le poids mais on peut en estomper ses effets si on se met en situation de se soumettre à sa seule action :

si rien ne s'oppose au poids, on ne perçoit plus la pesanteur, on est en impesanteur.

Le terme impesanteur est différent du terme « apesanteur ». Dans le terme « apesanteur » le a est privatif, il indique l'absence de toute gravité. Il s'agit d'une vue de l'esprit car, près d'un astre, il est impossible de supprimer son influence gravitationnelle. Avec le terme impesanteur on veut dire que l'effet de la pesanteur est annulé, mais le poids est toujours présent. Vu de la Terre, on est en "chute libre".

Dans une première partie, nous allons présenter trois cas d'impesanteur, qui permettent de faire des mesures :

- dans un ascenseur qui chute verticalement (en négligeant l'action de l'air qui créerait des frottements) ;
- dans un satellite artificiel sur une trajectoire circulaire régie par les seules lois de la pesanteur, c'est à dire moteur arrêté sans action de freinage aérodynamique ;
- dans un « Airbus zéro-g » qui suit une trajectoire balistique (parabole), du fait de sa vitesse initiale et de son poids.

Dans les trois cas il s'agit bien de « chute libre », comme nous allons le préciser ci-dessous, car la seule force qui se manifeste est celle due à la gravité, mais ils diffèrent par la forme de la trajectoire, verticale, circulaire ou parabolique dans le référentiel, supposé galiléen, lié à la Terre.

Dans une seconde partie, nous présenterons une simulation d'impesanteur en labo.

L'impesanteur

En « chute libre » verticale dans un ascenseur

Albert Einstein fut le premier, à l'aide d'expérience de pensée, à percevoir clairement que, si vous êtes dans un ascenseur dont le câble de traction se rompt brutalement, vous tombez en même temps que la cabine « en chute libre » (à condition de négliger l'action de l'air). Avant que l'action ne se termine mal, vous auriez pendant quelques secondes l'impression de « flotter » dans la cabine... La sensation serait brève !

Mais il ne s'agit pas seulement d'une sensation, les objets aussi sont en impesanteur ! On peut filmer des expériences durant le temps de chute libre d'un dispositif tombant du haut d'une tour. Si on accroche un objet pesant à un dynamomètre durant la chute, celui-ci indique zéro car le poids de l'objet est compensé par une force d'inertie (voir plus loin) ; son poids apparent est nul.

La chute est-elle rigoureusement verticale ?

La réponse est non, il existe une très légère « déviation vers l'est » résultant de la rotation de la Terre. Cette déviation est de l'ordre du cm pour 100 m de chute. Pour en savoir plus, consulter les Cahiers Clairaut n° 130 (juin 2010) p. 31.

La chute est-elle vraiment une chute libre ?

Elle serait vraiment libre s'il n'y avait pas l'action exercée par l'air. D'où une question posée jadis aux candidats du bac :

On dit parfois qu'un parachutiste qui saute d'un avion sans ouvrir son parachute est en « chute libre » que pensez-vous de cette affirmation ?

La réponse attendue faisait intervenir la résistance de l'air et l'atteinte d'une vitesse limite quand cette résistance compense exactement le poids du parachutiste et de son parachute.

En « chute libre » dans un satellite

Que ce soit la Lune, satellite naturel de la Terre, ou un satellite artificiel, comme la station spatiale internationale ISS qui tourne autour de la Terre depuis 1998, ces objets gravitent autour de la Terre sans avoir recours à un quelconque dispositif propulsif. Leur seul moteur **c'est la gravitation universelle** qui, en permanence, « les fait tomber sur la Terre ». Comment cela se fait-il ?

Un objet lancé tangentiellement à la surface terrestre à la vitesse v , s'il n'était soumis à aucune force, parcourrait en ligne droite une distance D en une seconde ; il s'écarterait alors du sol d'une distance a pendant ce temps. Mais il est soumis à la pesanteur. Un corps en chute libre sans vitesse initiale par rapport au sol, parcourt 5 m verticalement vers le centre de la Terre en une seconde ($1/2 \text{ gt}^2$) pour la valeur de g au niveau du sol. L'objet lancé s'écarte donc du sol du fait de sa vitesse initiale mais tombe du fait de son poids. Les deux effets peuvent se compenser de telle sorte que cet objet reste constamment à la même distance du sol ; il est alors "satellisé".

Le calcul montre que pour que cet écart au sol "a" soit compensé exactement par la chute il faut que la distance parcourue en ligne droite en une seconde soit $D = 8 \text{ km}$. On peut le démontrer en utilisant le théorème de Pythagore dans le triangle rectangle TAB dessiné sur la figure 1.

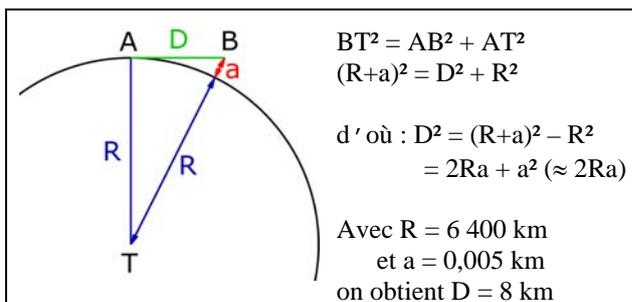


Fig.1. Calcul de la distance de chute en 1 seconde d'un objet satellisé autour de la Terre.

Les satellites ne sont bien sûr pas lancés au ras du sol, mais assez haut pour éviter ou minimiser la résistance de l'air. La vitesse de satellisation est alors un peu inférieure à 8 km/s car le poids est moindre. Par exemple la station spatiale internationale ISS évolue à une altitude d'environ 350 km. Sa vitesse linéaire est de 27 700 km/h soit 7,7 km/s.

Dans les satellites, les astronautes ne perçoivent pas l'effet de leur poids, ils flottent dans la cabine, de

façon plus durable que dans l'ascenseur, de même que les objets qui les entourent. Vu de la Terre, satellite, astronautes et objets « tombent » sur la Terre, à la même vitesse.

Impesanteur imparfaite dans les satellites

En pratique, les cosmonautes ne sont pas soumis à une impesanteur parfaite. Il existe des accélérations parasites qui proviennent de très légères forces de frottement atmosphérique, sans compter un mouvement de rotation du véhicule spatial qui tourne sur lui-même.

Le mouvement de la Terre : une « chute libre » continue vers le Soleil

La Terre, dans son mouvement autour du Soleil, « tombe » en permanence sous l'effet de l'attraction gravitationnelle du Soleil. Alors pourquoi les terriens ne flottent-ils pas comme les astronautes dans leur capsule ?

La différence provient de ce que la Terre crée elle aussi un champ de gravitation. La capsule ISS est en chute libre vers la Terre mais elle n'exerce qu'une force d'attraction négligeable sur les astronautes du fait de sa faible masse.

En « chute libre » dans un avion Airbus A300 ZÉRO-G

Quand vous tapez dans un ballon de foot, vous lui communiquez une vitesse initiale et il décrit dans l'air une courbe nommée parabole sous l'effet du seul poids. Si l'on suppose que de petits objets se trouvent à l'intérieur du ballon, ils sont en état d'impesanteur par rapport au ballon.

La situation est similaire pour les passagers de l'Airbus A300 ZÉRO-G. Cet appareil spécialement conçu par le CNES effectue 30 paraboles à chaque vol en ré-accélérant entre chaque « chute » pour obtenir à nouveau une vitesse initiale vers le haut et entamer la parabole suivante. Les passagers sont donc en "chute libre" pendant une vingtaine de secondes. On dit qu'ils sont en situation d'impesanteur, ils flottent dans l'avion.

Comme l'avion évolue dans l'atmosphère, il y a toujours une certaine résistance due à l'air. Le pilote de l'avion ne coupe pas les moteurs, il les utilise pour contrer la résistance de l'air et rester dans les conditions de la « chute libre ». Il peut aussi faire en sorte d'annuler partiellement l'effet de la pesanteur pour simuler la gravitation qui existe sur Mars ou sur la Lune.

Depuis le 4 décembre 2012 la société Novespace organise trois vols par an ouverts au grand public. Vous pourrez vous envoyer en l'air en vous allégeant d'environ 6 000 €. Précisons que pour ce

prix vous effectuerez un vol d'une durée de 2 h 30 comprenant 15 paraboles soit cinq minutes d'impesanteur cumulées. La première parabole simule la gravité martienne avec 0,38 g pendant 30 secondes. Deux paraboles simulent la pesanteur lunaire avec 0,16 g pendant 25 secondes et enfin douze paraboles vous mettront en impesanteur (vous aurez l'impression de ne subir que 1 % de la pesanteur sur Terre !) durant 22 secondes. Vous aurez droit à un diplôme officiel. Le premier vol en impesanteur a eu lieu le 15 mars 2013 depuis l'aéroport de Bordeaux-Mérignac.

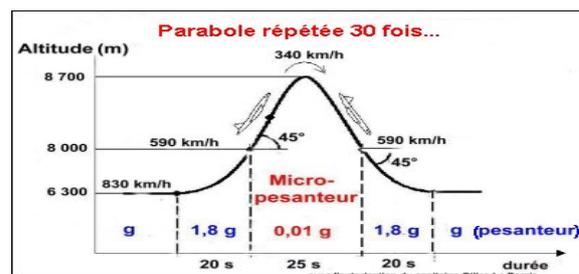


Fig.2. Les étapes d'une parabole.

Une question de référentiel

Dans les trois cas précédents, les objets et les personnes embarquées sont en chute libre vus de l'extérieur, mais en impesanteur car ils "flottent" les uns par rapport aux autres.

De façon plus précise :

- **pour un observateur terrestre**, tous ces objets, voyageurs inclus, tombent « en chute » libre sous l'action de la seule force de pesanteur, avec la même vitesse quelle que soit leur masse. Le référentiel terrestre est dans ce cas considéré comme galiléen ou inertiel ;

- **pour les objets et les personnes embarqués, ils sont en état d'impesanteur**. Tout se passe pour eux comme si ils n'étaient soumis à aucune force alors même qu'ils sont toujours soumis à l'action de la pesanteur. Pour continuer à utiliser les lois de la mécanique newtonienne (conditions d'équilibre dynamique), on est amené à introduire des forces d'inertie qui compensent exactement le poids de chaque objet. Ces forces sont particulières car elles dépendent du système de repère ou référentiel utilisé et, pour cette raison, on les appelle parfois « pseudo-forces ».

Sur Terre, lorsqu'une voiture accélère, freine ou encore prend un virage, les objets et passagers sont projetés vers l'arrière, vers l'avant ou vers le côté extérieur au virage par rapport au véhicule du fait des forces d'inertie.

Ces forces d'inertie existent (on peut les mesurer) dans un référentiel lié au mobile, qu'on appelle

référentiel non galiléen, mais elles n'existent pas dans un référentiel extérieur supposé galiléen.

Référentiel galiléen

On dit qu'un système est galiléen ou "inertiel" lorsque le principe d'inertie énoncé dans la première loi de Newton y est vérifié : un corps sur lequel la résultante des forces appliquées est nulle est en mouvement rectiligne uniforme (ou au repos) c'est à dire que sa vitesse est constante en direction et en norme (ou nulle).

Dans un référentiel lié à l'ascenseur, le satellite ou l'avion, les objets sont immobiles alors qu'ils sont soumis à la force de gravitation. Pour continuer à utiliser les lois de Newton, on introduit une force d'inertie qui compense le poids de telle sorte que la résultante des forces appliquées soit nulle. Le principe d'inertie est alors vérifié.

Simulation d'impesanteur

On peut aussi obtenir d'une manière statique des situations **similaires à celles de l'impesanteur**, en appliquant des forces qui s'opposent à celles de gravitation.

En état d'impesanteur, un objet "flotte" par rapport à un véhicule, la force d'inertie équilibre le poids, dans le référentiel lié à ce véhicule. Nous venons de voir quelques cas où l'on peut obtenir cet état soit brièvement, en "chute libre" verticale ou en trajectoire parabolique, soit de façon plus durable dans un satellite.

Une façon de **simuler** l'apesanteur est d'opposer à la pesanteur une force autre que l'inertie. Par exemple la poussée d'Archimède dans le cas d'un liquide qui flotte dans un autre liquide. Les causes sont différentes mais les effets sont identiques comme on peut le percevoir avec l'expérience suivante.

Rappelons-nous tout d'abord la stupéfaction du capitaine Haddock, dans les aventures de Tintin « *On a marché sur la Lune* » p. 5, lorsqu'il voit son whisky se mettre en boule : « *un honnête whisky ne se comporte pas de cette façon !* »

Voici une expérience facile à réaliser qui **simule** le phénomène de la boule de whisky du capitaine Haddock. Cette expérience n'est pas récente elle fut étudiée par le physicien Belge Joseph Plateau (1801- 1883).

Marie Curie l'utilisait avec ses enfants et ceux de quelques grands scientifiques français de l'époque (Jean Perrin, Paul Langevin) qui avaient décidé de s'occuper eux-mêmes de la formation scientifique de leurs enfants. En avance sur leur temps, ces scientifiques souhaitaient que leurs enfants apprennent les phénomènes physiques en réalisant eux-mêmes des expériences. On a retrouvé les notes de cours prises par l'un de ces enfants (Isabelle Chavannes) qui était à l'époque la plus âgée (elle

avait 13 ans). Ces notes ont fait l'objet d'une publication intitulée « **Leçons de Marie Curie** » Éditions EDP Sciences 2003. Dans la leçon numéro 9 (p. 106) on trouve le passage suivant :

« *Nous allons faire maintenant une très jolie expérience. Voici deux verres. Dans l'un, il y a de l'eau et de l'huile : l'huile flotte parce qu'elle est moins dense que l'eau. Dans l'autre, il y a de l'huile et de l'alcool. L'huile est au fond parce qu'elle est plus dense que l'alcool. Puisque l'huile nage sur l'eau et qu'elle se noie dans l'alcool, on peut faire un mélange d'eau et d'alcool, tel que l'huile ne se noie ni ne flotte. Vous verrez que l'huile prendra la forme d'une boule et que ce sera très joli. Il faut tâtonner. Si l'huile monte, c'est que nous avons mis trop d'eau dans notre mélange ; si elle se noie et va vers le fond du vase, c'est que nous avons mis trop d'alcool. Chaque enfant arrive à former une belle boule jaune or qui se tient suspendue au milieu du liquide ».*

Le matériel nécessaire est donc des plus simples, de l'huile d'olive, de l'alcool et un peu d'eau. Lorsque les quantités d'eau et d'alcool sont adéquates, on obtient une belle boule jaune au milieu du mélange eau-alcool. Le liquide immergé a subi les mêmes effets que le whisky du capitaine Haddock !

Le liquide est en équilibre statique ; il est soumis à la force de gravité comme n'importe quel autre corps et à la poussée d'Archimède mais également à des forces de surface (force de tension superficielle). Sous l'effet de ces forces le liquide se comporte comme s'il était couvert par une membrane élastique tendue uniformément et qui agirait tangentiellement à sa surface. L'action de ces forces tend à donner à celle-ci une aire minimale. Pour un volume donné, c'est la sphère qui offre la surface la plus faible. Vous pouvez le vérifier en effectuant les rapports surface/volume de quelques solides géométriques simples. La boule immergée est en équilibre sous l'effet de deux forces qui se compensent exactement : son poids et la poussée d'Archimède qui est la résultante des forces de pression qui s'exercent sur le liquide immergé.



Pour l'entraînement des astronautes, avec leur scaphandre, on utilise la poussée d'Archimède en piscine non pas pour simuler l'impesanteur mais pour simuler une gravitation plus faible que sur Terre en compensant partiellement le poids. Cela les habitue aussi à faire des mouvements lents nécessaires dans l'espace... ■