



Frédéric Elie on
ResearchGate

Ascenseur en chute libre et impesanteur

Frédéric Élie
avril 2006

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous de dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Quel rapport y a-t-il entre le fait que, dans une station orbitale, les cosmonautes semblent flotter, et le fait que, dans un ascenseur en chute libre, suite à la rupture de ses câbles (accident dramatique), son occupant semble également flotter ? Dans les deux cas on a affaire à l'impesanteur, ou apesanteur (à ne pas confondre avec la microgravité qui désigne une attraction gravitationnelle négligeable).

SOMMAIRE :

- 1 - Impesanteur dans un ascenseur en chute libre
 - 1.1 - *Détaillons cela*
 - 1.2 – *Remarque*
 - 1.3 - *Conclusion et remarques*
- 2 - Impesanteur dans les stations orbitales ou les avions
 - 2.1 - *Forces et mouvements sur une capsule spatiale ou un avion*
 - 2.2 - *Microgravité apparente : ses intérêts, ses effets*
- 3 - De l'impesanteur au principe d'équivalence locale en relativité générale

1 - Impesanteur dans un ascenseur en chute libre

Considérons un ascenseur se déplaçant verticalement à l'intérieur d'un immeuble et son malheureux occupant. Au cours de ses déplacements l'ascenseur est soumis à des accélérations et décélérations dues à sa machinerie et directement transmises à la cabine par le câble. Comment se transmettent-elles à l'occupant ?

Dans le référentiel galiléen (R) ramené par exemple à l'immeuble, ou encore au centre de la Terre supposé immobile, l'ascenseur est soumis aux forces extérieures qui sont celle de la pesanteur terrestre et celle due à ses accélérations et décélérations au cours de ses déplacements.

Dans le référentiel (R') rattaché à la cabine de l'ascenseur l'occupant est soumis à deux types de forces :

- les forces extérieures constituées de son poids (pesanteur terrestre), de celles dues à ses accélérations propres et des forces de réactions (contact avec le plancher),
- les forces d'inertie dues au déplacement du référentiel ascenseur (R') par rapport au référentiel galiléen (R)

La question soulevée ici est : que se passe-t-il pour l'occupant lorsque les forces extérieures

auxquelles est soumis l'ascenseur se réduisent seulement à celle de la pesanteur (ascenseur en chute libre) ?

A noter que cette situation (chute libre de l'ascenseur) arrive lorsque les forces dues aux accélérations propres de l'ascenseur disparaissent, c'est-à-dire lorsque l'ascenseur n'est plus entraîné par le câble suite à sa rupture (situation accidentelle qui fait que l'on parle d'un malheureux occupant).

1.1 - Détaillons cela (voir figures)

Pour commencer le raisonnement, n'oublions pas que la seconde loi de Newton (somme des forces = ma , où a est l'accélération) doit s'écrire dans un référentiel galiléen, c'est-à-dire un référentiel translaté à vitesse uniforme. Or celui-ci n'est sûrement pas le référentiel de l'ascenseur qui est soumis aux accélérations ou aux décélérations, l'ascenseur se réduit à un référentiel galiléen uniquement lorsqu'il se déplace à vitesse constante. Le référentiel galiléen à choisir peut donc être celui de la Terre ou encore celui lié à l'immeuble (ou tout référentiel se déplaçant rectilignement à vitesse constante par rapport à eux). Soit alors O l'origine du référentiel galiléen (Oz) et O' celui du référentiel lié à l'ascenseur ($O'z'$), où on suppose les axes verticaux Oz et $O'z'$ sur la même droite.

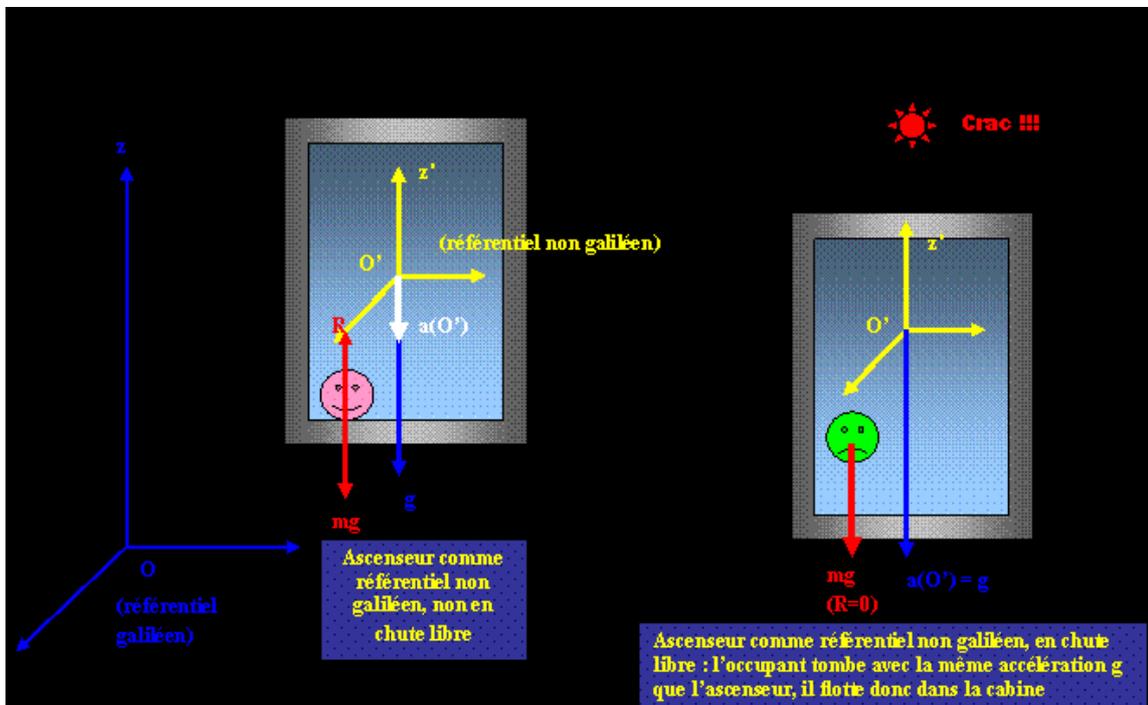


figure 1

Désignons par M l'occupant de l'ascenseur assimilé à un point (figure 1). Pour simplifier on supposera que les centres d'inertie de la cabine et de l'occupant sont confondus. On a :

- vitesse de M dans le réf. galiléen (Oz):

$$\vec{v}(M) = \frac{d\vec{OM}}{dt}$$

Or on a : $\vec{OM} = \vec{OO'} + \vec{O'M}$

d'où :

$$\vec{v}(M) = \frac{d\vec{OO'}}{dt} + \frac{d\vec{O'M}}{dt} = \vec{v}(O') + \vec{v}'(M)$$

où la vitesse de M dans le réf. ($O'z'$) est $\vec{v}'(M) = d\vec{O'M}/dt$ et $\vec{v}(O')$ vitesse d'entraînement du

référentiel (O'z') par rapport à (Oz).

- accélération de M dans le référentiel galiléen (Oz):

$$\vec{a}(M) = \frac{d\vec{v}(M)}{dt} = \frac{d\vec{v}'(M)}{dt} + \frac{d\vec{v}(O')}{dt} = \vec{a}'(M) + \vec{a}(O')$$

où j'ai posé $\mathbf{a}'(M) = d\mathbf{v}'(M)/dt$ accélération de M dans le repère mobile, et $\mathbf{a}(O') = d\mathbf{v}(O')/dt$ accélération d'entraînement.

- l'application de la loi de Newton **dans le référentiel galiléen (Oz)** donne:

$$m \vec{a}(M) = m \vec{g} + \vec{R} + \vec{f} = \text{somme des forces sur M}$$

avec: $m\mathbf{g}$ poids de M, \mathbf{R} réaction du sol, \mathbf{f} force quelconque exercée sur M que l'on va supposer ici nulle pour simplifier. Pour le moment l'accélération \mathbf{a} n'est pas forcément celle de l'ascenseur, mais c'est toujours celle de M dans (Oz).

- Comme $m\mathbf{a}(M) = m\mathbf{a}'(M) + m\mathbf{a}(O')$, si M est immobile dans l'ascenseur on a $\mathbf{a}'(M) = 0$ (pas d'accélération propre de M dans (O'z')).

Dans ce cas seulement on a: $\mathbf{a}(M) = \mathbf{a}(O')$, autrement dit l'accélération de M dans le référentiel galiléen est égale à celle de l'ascenseur. Il en résulte que, sous cette restriction,

$$m \vec{a}(M) = m \vec{a}(O') = \vec{R} + m \vec{g}$$

En conséquence:

- si $\mathbf{a}(O') = 0$ (ascenseur immobile ou à vitesse constante, autrement dit c'est un référentiel galiléen), on a bien $\mathbf{R} = -m\mathbf{g}$ (la réaction du sol compense le poids).

- si $\mathbf{a}(O') = \mathbf{g}$ (ascenseur en chute libre, l'ascenseur n'est plus un référentiel galiléen): $\mathbf{R} = 0$ (plus de réaction du sol), et l'occupant est soumis à la même accélération que l'ascenseur ; il est localement en apesanteur (ou impesanteur) dans le référentiel non galiléen.

1.2 - Remarque

Qu'indiquerait une balance sur laquelle est monté l'occupant pendant les mouvements de montée et de descente de l'ascenseur ?

La balance indique toujours une force \mathbf{F} égale et opposée à \mathbf{R} , donc: $\mathbf{F} = -\mathbf{R} = m(\mathbf{g} - \mathbf{a}(O'))$, c'est le poids apparent.

- Si $\mathbf{a}(O') > 0$ (l'ascenseur descend) avec $\mathbf{a}(O') < \mathbf{g}$, le poids apparent est inférieur au poids réel $m\mathbf{g}$.

Pour perdre du poids descendez par l'ascenseur (hélas! ce serait trop beau, car en réalité on ne perd évidemment pas de la masse !).

- Si $\mathbf{a}(O') < 0$, (l'ascenseur monte), donc $-\mathbf{a}(O') > 0$, le poids apparent \mathbf{F} devient supérieur au poids réel $m\mathbf{g}$.

Pour augmenter votre poids prenez l'ascenseur pour monter (là par contre c'est déjà plus vrai, mais pas pour ces raisons! On évite une occasion de faire de l'exercice...).

1.3 - Conclusion et remarques

- Si, en plus de la force de gravité et de réaction du sol, l'individu est soumis à d'autres forces \mathbf{f} , et s'il est animé d'un mouvement propre $\mathbf{a}'(M)$ non nulle, l'accélération de l'ascenseur ne se confond pas avec celle du corps M dans le référentiel galiléen: elle intervient dans les forces d'inertie $\mathbf{F}_i(M) = m\mathbf{a}(O')$.

- L'apesanteur n'est donc surtout pas l'absence de gravitation : c'est au contraire une situation où seules subsistent les forces de gravitation (chute libre). L'absence de gravitation, ou tout au

moins une gravitation d'intensité très faible, est la microgravité.

- Lorsque l'ascenseur est en chute libre, affirmer que l'occupant « tombe » avec la même accélération que lui (ce qui entraîne l'état d'impesanteur) est valable seulement si l'on admet que la masse inerte se confond avec la masse gravitationnelle. La masse inerte est celle qui intervient comme facteur de l'accélération dans la seconde loi de la dynamique de Newton : $m\mathbf{a}$; la masse gravitationnelle est celle qui intervient dans le poids du corps : $m'\mathbf{g}$. Si ces deux masses étaient différentes, dans la situation de l'ascenseur en chute libre on aurait $m\mathbf{a} = m'\mathbf{g}$: dans ce cas l'occupant tomberait avec une accélération $(m'/m)\mathbf{a}$ différente de celle de l'ascenseur, et il n'y aurait pas d'impesanteur. C'est un principe, dit principe d'équivalence, qui pose que $m = m'$, et jusqu'à présent il est vérifié expérimentalement avec une précision relative de 10^{-12} . S'il ne l'était plus, cela aurait des conséquences fondamentales : une nouvelle physique devrait être bâtie.

On verra plus loin que le principe d'équivalence a été exploité dans les principes de la relativité générale d'Einstein.

2 - Impesanteur dans les stations orbitales ou les avions

Tout ce qui précède peut être étendu au cas :

- d'une station orbitale ou satellite gravitant autour de la Terre,
- d'un système en vol balistique ayant pour mission de reproduire une situation d'impesanteur pour l'entraînement des cosmonautes.

2.1 - Forces et mouvements sur une capsule spatiale ou un avion

Par rapport à ce qui a été dit sur l'ascenseur, on va maintenant introduire les forces non gravitationnelles exercées sur la cabine de la capsule, et établir les équations de la dynamique dans le référentiel galiléen lié à la Terre ($R ; Oxyz$), le référentiel lié à la capsule étant ($R' ; O'x'y'z'$). Le but est d'identifier l'accélération à laquelle est soumise la capsule, notée $\mathbf{a}(O')$, et qui intervient dans l'équation du mouvement de son occupant par rapport au référentiel galiléen. Soit M la masse de la capsule. Elle est soumise aux forces suivantes :

- force due à la gravitation exercée au centre d'inertie O' de la capsule: $M\mathbf{g}(O')$
- force de poussée, ramenée au centre d'inertie O' : $\mathbf{F}(O')$
- résultante aérodynamique, due à la résistance de l'air : $\mathbf{T}(O')$, qui se décompose en traînée $\mathbf{R}(O')$ (composante colinéaire et opposée à l'axe de la vitesse) et en portance $\mathbf{P}(O')$ (composante perpendiculaire à l'axe de la traînée), $\mathbf{T}(O') = \mathbf{R}(O') + \mathbf{P}(O')$

On appelle accélération statique de la capsule, l'accélération due aux forces non gravitationnelles, elle vaut donc :

$$\vec{a}_s(O') = \frac{\vec{F}(O') + \vec{T}(O')}{M}$$

il vient donc : $\mathbf{a}(O') = \mathbf{g}(O') + \mathbf{a}_s(O')$. Il en résulte que l'occupant de la capsule est sensible uniquement à l'accélération statique, du moins lorsqu'il n'a pas d'accélération propre, comme on l'a vu pour le cas de l'ascenseur plus haut : $\mathbf{a}(M) = \mathbf{a}(O')$. En effet, le passager est soumis à la même accélération de pesanteur que la capsule, donc la seule accélération qu'il ressent par rapport à celle de la capsule est l'accélération spécifique.

A bord de la capsule le passager ne pourra donc mesurer, par des moyens appropriés, que :

- l'accélération spécifique
- la vitesse de rotation éventuelle de la capsule par rapport au référentiel galiléen.

Le passager sera en impesanteur dans la capsule si l'accélération spécifique s'annule, donc lorsque la poussée et la traînée s'annulent mutuellement : $\mathbf{F}(O') + \mathbf{T}(O') = 0$. Cette situation arrive dans les deux cas suivants :

- soit, la capsule étant dans le vide spatial, il n'y a pas de force aérodynamique, et dans ce cas il suffit d'annuler la poussée (on coupe les moteurs) ;
- soit, la capsule est encore dans l'atmosphère, et dans ce cas il faut piloter le mobile

de telle sorte que poussée et force aérodynamique se compensent exactement : c'est le cas du pilotage d'un avion à zéro-G qui nécessite une très grande finesse. Le vol est alors balistique, c'est-à-dire s'effectuant sous le seul effet de la pesanteur comme un obus tiré d'un canon, et l'on sait que la trajectoire est parabolique (voir article « [balistique extérieure](#) »). Un avion zéro-G, comme le « A300-zéro G » de Airbus Industries, permet aux cosmonautes de s'entraîner en apesanteur pendant quelques secondes (phase balistique du vol).



figure 2 - avion A300-zéroG. Il permet d'entraîner les cosmonautes en apesanteur pendant 25 secondes environ (photo © CNES)

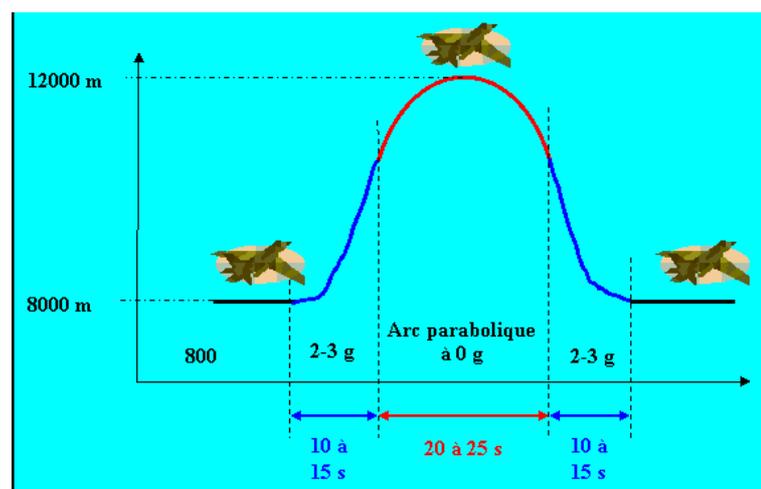


figure 3 - obtention de l'impesanteur en vol balistique d'un avion d'entraînement

2.2 - Microgravité apparente : ses intérêts, ses effets

On a dit que la microgravité est la quasi-absence de champ de gravitation. C'est ce qui se passe lorsque nous sommes suffisamment éloignés d'un corps massif comme une planète par exemple.

Pour un satellite au voisinage de la Terre, ce n'est pas le cas. Si le satellite est à une altitude h de la surface de la Terre, de rayon R , la gravitation à cette altitude vaut :

$$g(h) = g(0) \left(\frac{R}{R+h} \right)^2$$

où $g(0)$ est la gravité à la surface de la Terre ($9,81 \text{ m/s}^2$). Sachant que $R = 6340 \text{ km}$, pour avoir une gravité de l'ordre de $0,0001 \text{ g}$ il faudrait que le satellite soit à une distance $h = 628000 \text{ km}$,

bien plus loin que la Lune donc ! Aussi, la présence d'une apesanteur dans la capsule pour des altitudes de quelques centaines de km est-elle imputable au fait que le cosmonaute et la capsule dans laquelle il se trouve sont tous deux en chute libre, c'est-à-dire soumis aux seules forces de pesanteur.

On parle pourtant de microgravité dans les capsules gravitant au voisinage de la Terre, et d'expériences réalisées dans ces conditions, avec des effets physiques, chimiques et physiologiques différents de ceux qu'on trouve sur Terre. En fait il s'agit de microgravité apparente, c'est-à-dire l'accélération $a'(M)$ à laquelle est soumis le cosmonaute, ou le système considéré, en interne au référentiel de la capsule.

Pour s'en rendre compte, réécrivons le bilan complet des forces exercées sur la capsule et le cosmonaute, en suivant les démarches présentées plus haut pour l'ascenseur et le mobile (les notations gardent leurs mêmes significations):

- deuxième loi de Newton pour le cosmonaute écrite dans le référentiel galiléen (Terre) :

$$m \vec{a}(M) = m \vec{a}(O') + m \vec{a}(M) = m \vec{g} + \vec{R} + \vec{f}$$

- deuxième loi de Newton pour la capsule écrite dans le référentiel galiléen :

$$M \vec{a}(O') = M \vec{g} + \vec{F} + \vec{T}$$

où g est l'accélération de la pesanteur à l'altitude h donnée précédemment. En projetant sur un axe radial passant par le centre de la Terre et le centre d'inertie de la capsule, et en utilisant l'accélération spécifique, ces relations deviennent :

$$\vec{a}(O') = \vec{g} + \frac{\vec{F} - \vec{T}}{M} = \vec{g} + \vec{a}_s \quad \text{accélération du centre d'inertie de la capsule}$$

$$m \vec{a}(M) = m \vec{g} + m \vec{a}_s + m \vec{a}'(M) = m \vec{g} + \vec{R} + \vec{f}$$

$$\text{d'où : } \vec{a}'(M) = \frac{\vec{R} + \vec{f}}{m} - \vec{a}_s$$

et finalement l'expression de l'accélération exercée sur le cosmonaute, ou gravité apparente dans la capsule :

$$\vec{a}'(M) = \vec{g} - \vec{a}(O') + \frac{\vec{R} + \vec{f}}{m}$$

C'est cette pesanteur apparente qui doit remplacer celle g qui intervient dans les diverses forces et effets, lorsque l'on s'intéresse à ces forces ou effets sur le cosmonaute ou sur les systèmes embarqués. Lorsqu'elle est très faible, il s'agit d'une microgravité apparente. Cette situation, on l'a déjà vu, apparaît lorsque la capsule est en chute libre (impesanteur) : $g = a(O')$. Il reste alors les accélérations résiduelles dues à divers facteurs $(R + f)/m$. On appelle en fait microgravité lorsque ces accélérations résiduelles sont de l'ordre de 10^{-4} à $10^{-8} g$.

Chaque fois que la gravité intervient sur Terre dans un phénomène physique, c'est la gravité apparente qui doit être prise en compte dans la capsule. Si elle devient négligeable (microgravité apparente) ces phénomènes disparaissent au profit d'autres phénomènes qu'ils limitaient sur Terre en gravité normale. Il s'agit donc des phénomènes suivants (liste non exhaustive) :

- **Pression hydrostatique des fluides :**

Elle est exprimée par le **théorème de Pascal** : $\text{grad } P = \rho g$, où g est à remplacer par $a'(M) \sim 0$

en microgravité

Elle disparaît donc en microgravité (la pression ne varie pas avec la hauteur). Seule subsiste la pression dynamique lorsque le fluide est en mouvement.

- **Convection naturelle :**

En présence d'un gradient de température, sous l'effet de la gravité un champ de vitesse du fluide s'installe par suite des variations de la densité avec la température, le fluide s'écoulant des zones froides vers les zones chaudes. C'est le phénomène de convection thermique.

On montre que le champ de vitesse dépend directement du **nombre de Rayleigh** :

$$Ra = \frac{\alpha \Delta T g L^3}{k \nu}$$

où α coefficient de dilatation thermique du fluide, ν viscosité cinématique du fluide, k coefficient de conductivité thermique, L dimension caractéristique de l'espace où évolue le fluide. Lorsque g , remplacé par $a'(M)$, devient négligeable, le champ de vitesse convectif disparaît.

En microgravité la convection thermique naturelle (c'est-à-dire non forcée, par une pompe par exemple) disparaît.

- **Poussée d'Archimède :**

Cette poussée est la force qui s'oppose au poids d'un solide plongé partiellement ou non dans un fluide. Elle est directement reliée au poids du fluide dont le volume est déplacé par le solide :

$$\vec{F}_A = -\rho \vec{g} V$$

Lorsque g , remplacé par la gravité apparente $a'(M)$ devient négligeable, F_A devient négligeable aussi.

En microgravité la **poussée d'Archimède** disparaît : aucun corps ne peut flotter dans un fluide.

- **Sédimentation :**

Sous l'effet de la pesanteur les solides ou les liquides les plus denses tendent à se déposer au fond d'un récipient. En microgravité cette situation ne se produit plus : il n'y a plus de sédimentation ou de stratification.

- **Phénomènes liés à la tension superficielle :**

La force capillaire ou tension superficielle est liée au fait que pour faire varier la surface externe d'un liquide d'une quantité dS il faut dépenser une énergie dW qui lui est proportionnelle, par l'intermédiaire d'une quantité γ appelée densité d'énergie de surface:

$$dW = \gamma dS$$

la grandeur γ s'exprime en J/m^2 ou encore en N/m . Physiquement, l'énergie qu'il faut déployer pour déformer la surface trouve son origine dans les interactions entre les molécules du même liquide et entre celles-ci et les molécules du milieu au externe au contact du liquide. L'explication détaillée fait appel aux **forces de Van der Waals** et aux théories moléculaires des états liquides, qui ne sont pas à l'ordre du jour de cet article (voir références à la fin). L'énergie de déformation est le travail d'une force, appelée force de tension superficielle (F) ou force capillaire, le long d'un parcours perpendiculaire au pourtour de la surface (dr), ainsi:

$$dW = \gamma dS = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

On démontre qu'une surface de liquide séparant deux milieux, l'un à la pression p , l'autre à la pression p' , prend localement une forme de rayon de courbure R , sous l'effet de la tension superficielle, donnée par (**relation de Laplace**) :

$$\frac{\gamma}{R} = p - p'$$

Si l'on applique cette relation à la surface libre d'un liquide placé dans un récipient et soumis à l'extérieur à la pression atmosphérique p' , et à l'intérieur, à la pression hydrostatique $p' + \rho gh$ (où h est la hauteur du ménisque au contact de la paroi du récipient, par rapport à la surface horizontale du liquide loin de cette paroi donc soumise à la seule gravité), on obtient pour le rayon de courbure :

$$Rh = \frac{\gamma}{\rho g}$$

où ρ est la masse volumique du liquide. On appelle longueur capillaire la quantité :

$$l = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

Elle représente, en ordre de grandeur, la longueur où la surface libre du liquide se raccorde de la paroi (où les effets capillaires sont importants) à la surface horizontale (où seul l'effet de gravité est important) (voir figure 4).

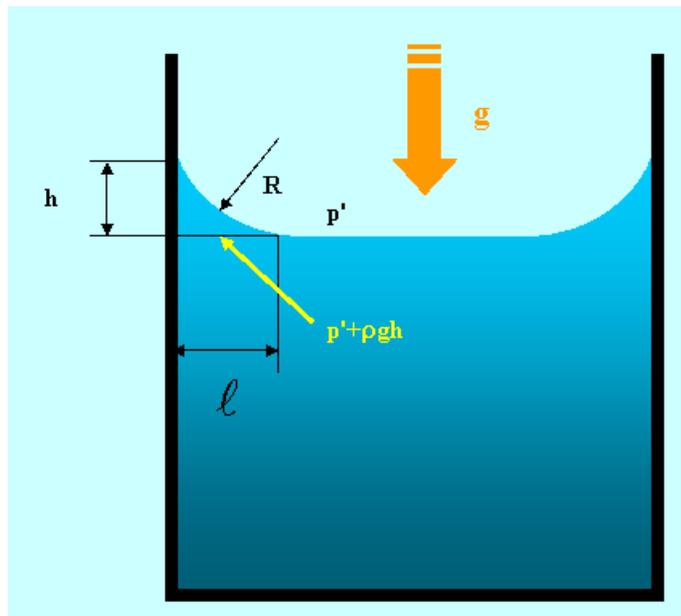


figure 4

Lorsqu'un fluide n'est pas au contact d'une paroi, son énergie de surface tend à se minimiser ce qui le conduit à prendre une forme sphérique conformément à la loi de Laplace.

Par contre, lorsqu'il est dans un récipient, la force capillaire entre en compétition avec la pesanteur : elle est prépondérante au voisinage de la paroi, et négligeable au-delà de la longueur capillaire. Or celle-ci augmente lorsque la gravité g diminue (relation précédente). Donc si g est faible les effets de la tension superficielle se font sentir sur des domaines plus importants du fluide. A la limite, lorsque $g \approx 0$ ces effets affectent toute la surface de liquide. Le produit Rh tend vers l'infini, ce qui se produit lorsque :

- soit $h = 0$ (pas de ménisque) et $R = \text{infini}$ (surface plane même au contact de la

paroi). Mais cela ne convient pas car la surface du liquide ne correspond pas au minimum de l'énergie de surface.

- Soit h tend vers l'infini (hauteur du ménisque maximale) et R tend vers 0 (la surface s'incurve au maximum). Si le liquide est mouillant (surface creusée) il va tendre à se plaquer à l'intérieur du récipient pour que le contact avec la paroi soit réalisé au maximum. Il ne se mettra pas en boule et quitter le récipient contrairement à ce qui est montré dans l'aventure de Tintin « *On a marché sur la Lune* » (Hergé) lorsque Haddock voit son whisky sortir du verre en apesanteur : les forces de surface, prédominantes, ne sont contrebalancées par aucune autre force (gravitationnelle) et maintiennent le liquide au contact de la paroi.

En revanche, pour un liquide non mouillant (surface bombée vers l'extérieur) l'absence de pesanteur entraîne que les effets prépondérants de la force superficielle l'obligent à se détacher de la surface et par suite à se mettre en boule pour minimiser l'énergie de surface.

En apesanteur, un liquide mouillant placé dans un récipient doit d'abord être soumis à une force extérieure plus importante que la force capillaire pour pouvoir sortir du récipient : soit en secouant celui-ci, soit en le pressant suffisamment pour l'expulser par un orifice. Une fois sorti du récipient, le liquide n'étant plus soumis à aucune force autre que celle de sa propre force capillaire, il va prendre une forme sphérique pour minimiser son énergie de surface. C'est bien ce qui est montré, par exemple, dans le film « *Mission to Mars* », lorsque, dans le vaisseau spatial en apesanteur et dépressurisé, un cosmonaute presse un sachet de coca-cola pour expulser le liquide : celui-ci s'échappe sous forme de plusieurs gouttes sphériques qui migrent sous le seul effet d'une force de dépression vers le trou que des météorites ont provoqués sur la coque du vaisseau.

• **Effets physiologiques de la microgravité :**

- **perturbation de la régulation de la pression artérielle :**

L'organisme assure la régulation de la pression artérielle : celle-ci doit être ni trop faible (hypotension) ni trop élevée (hypertension). Cette régulation est réalisée d'une part par le système nerveux, notamment les barorécepteurs (détecteurs de pression) de la crosse aortique et des sinus carotidiens, d'autre part par le système hormonal. Selon la pression artérielle détectée, les barorécepteurs agissent sur la puissance cardiaque et le diamètre des vaisseaux. Le système hormonal, quant à lui, modifie également le diamètre des vaisseaux et agit en outre sur le taux d'élimination de l'eau par les reins, modifiant ainsi le volume du sang dans les vaisseaux et par suite sa pression.

En situation de pesanteur normale le volume sanguin est plus important dans les zones inférieures du corps que dans les zones supérieures, et c'est une condition nominale pour les barorécepteurs.

Or, en apesanteur, le sang n'est plus soumis aux forces de pesanteur et va se distribuer de manière homogène dans toutes les parties du corps. Cette répartition va être interprétée par les barorécepteurs situés dans la partie haute du corps comme un afflux anormal du sang dans cette partie. Autrement dit les barorécepteurs vont réagir comme en présence d'une hypertension, et déclencheront donc, avec le système hormonal : une élimination de l'eau excessive par les reins, une dilatation des vaisseaux et un ralentissement du rythme cardiaque. Le transfert des liquides physiologiques des zones inférieures vers les zones supérieures du corps entraîne un rhume, dit de l'espace, à cause de congestion pulmonaire, un amaigrissement des membres inférieurs, un gonflement des muqueuses et du visage. L'élimination excessive de l'eau du sang par les reins provoque une concentration élevée des globules rouges : la viscosité du sang augmente, avec risque de thrombose veineuse en conséquence.

Pour prévenir ces difficultés l'astronaute doit boire beaucoup d'eau afin de compenser la perte hydrique par les reins. Une combinaison spéciale qui crée une dépression au niveau des

membres inférieurs lui permet également d'y maintenir les liquides physiologiques. Naturellement, le retour sur Terre, en gravité normale, entraîne une phase de réadaptation qui s'accompagne de symptômes comme vertige, fatigue, perturbation de la pression artérielle et du rythme cardiaque...

- **perturbations des sens :**

La posture et l'équilibre sont régis par un système complexe qui fait appel aux capteurs suivants :

► Capteurs agissant sur la tonicité musculaire afin de contrôler les positions : ils sont situés au niveau de la peau (récepteurs de pression de Paccini, qui permettent de différencier l'orientation haut de l'orientation bas), des articulations, des tendons (organes de Golgi) et des muscles (récepteurs neuromusculaires). Grâce à eux le système nerveux possède à tous moments une cartographie des positions du corps.

► Capteurs de l'oreille interne informant sur les accélérations du corps et de la tête (canaux semi-circulaires) et sur les variations de la position du corps (capteurs constitués d'otolithes et des cellules ciliées). Ces capteurs travaillent normalement en coordination avec les capteurs de tonicité musculaire et de position.

En apesanteur les capteurs de position de l'oreille interne ne sont plus activés et donc ne travaillent plus de manière cohérente avec les autres capteurs de posture et d'accélération. Il s'ensuit des symptômes très désagréables comme : perte de repère visuel, mélange du haut et du bas, sensation d'un environnement mobile autour de soi, nausée... C'est le mal de l'espace, comparable au mal de mer qui affecte les personnes ayant un problème au niveau des capteurs de l'oreille interne. Beaucoup d'entraînement est nécessaire pour apprendre à s'affranchir de ces inconvénients, et à bord, un haut et un bas conventionnels sont nécessaires pour aider les astronautes dans leurs tâches.

A noter que, l'astronaute ne pouvant prendre appui au sol par ses pieds, certaines actions, comme le vissage, lui sont difficiles : lorsqu'il tourne le tournevis ce n'est pas la vis qui tourne mais lui-même et en sens inverse (conservation du moment cinétique)!...

- **Perturbations des muscles et du squelette :**

Sur Terre, et sous l'action des contraintes mécaniques, le tissu osseux se renouvelle en permanence : de cellules spécialisées contribuent à la croissance osseuse, d'autres à sa destruction, le tout en parfaite cohérence en situation normale. Ainsi, l'ensemble des tissus osseux chez un être humain est entièrement renouvelé en 5 années.

En apesanteur, en revanche, l'absence de contrainte favorise la destruction du tissu osseux au détriment de sa création : les os, notamment ceux de la hanche, du talon, des lombaires, le fémur... sont détruits et dissous progressivement dans le système circulatoire sous forme de carbonate de calcium, lequel peut former des calculs rénaux. Autrement dit il y a ostéoporose.

Quant aux muscles, l'absence de pesanteur entraîne une disparition progressive des fibres musculaires, notamment ceux qui participent à la station debout.

Pour prévenir ces problèmes l'astronaute doit pratiquer de l'exercice physique pour maintenir sa masse musculaire et l'irrigation correcte de ses os par le sang.

• **Intérêts techniques de la microgravité :**

Sur terre, la gravité normale masque certaines forces qui, si elles étaient seules, peuvent donner des résultats inattendus. Elle introduit aussi des effets indésirables dans certains processus où l'on recherche une pureté ou une homogénéité des propriétés physicochimiques (science des matériaux par exemple). Au vu des processus physiques où intervient la gravité présentés plus haut, l'intérêt de la microgravité dans les techniques suivantes peut être comprise.

- **techniques recherchant l'absence de phénomènes convectifs :**

Toutes les techniques d'obtention de matériaux les plus homogènes possible sont concernées : le principe de base repose sur un processus de transfert thermique et chimique sous gradient de température et gradient solutal orientant la croissance d'un matériau par effet de conduction et de diffusion. En présence de convection, cet effet risque d'être gêné, empêchant alors d'obtenir l'homogénéité recherchée. Il s'agit principalement des techniques suivantes :

- croissance de monocristaux (voir par exemple article « [croissance cristalline](#) »)
- obtention de pièces en alliages ou cristaux ayant une structure homogène dans une direction privilégiée, par solidification dirigée : le matériau fondu est refroidi sous un gradient thermique et prend une structure orientée par le seul effet de la conduction thermique
- circuits intégrés obtenus par vaporisation et dépôt sous vide de matériaux actifs sur des supports gravés. La précision du dépôt est garantie par l'absence de convection
- obtention de films minces par croissance cristalline en phase vapeur
- production de verres et de céramiques sans impuretés
- études expérimentales sur la combustion : en présence de pesanteur la combustion est incomplète à cause des phénomènes convectifs ; ceci est la cause de la couleur jaune des flammes, signe de la présence de carbone (voir par exemple article « [combustion d'une bougie](#) »). La combustion incomplète est source de pollution. Des recherches sont effectuées sur la combustion complète, qui présente un meilleur rendement énergétique et une meilleure préservation de l'environnement ; mais pour être menées à bien elles nécessitent l'absence de convection donc de pesanteur.

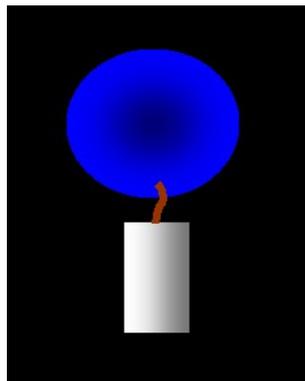


figure 5 - flamme de bougie en microgravité :

il n'y a pas de zone convective où la combustion est incomplète (zone jaune) ; seule existe la zone de conduction où la combustion est complète (zone bleue) en l'absence de pesanteur la flamme a une forme sphérique (dessin d'après une expérience dans la station MIR)

- **techniques recherchant l'absence de sédimentation :**

- Il s'agit, entre autres, d'expériences biotechnologiques où l'on réalise la culture des cellules. En présence de pesanteur celles-ci finissent par se déposer au fond du bain de culture par sédimentation, rendant ainsi leur manipulation difficile. En apesanteur, elles ne sédimentent plus et restent en suspension.
- Des expériences nécessitent de séparer des constituants chimiques par électrophorèse : en l'absence de sédimentation celle-ci est réalisée avec une excellente précision
- Obtention de mélanges homogènes d'espèces chimiques dans des émulsions non stratifiées
- Obtention de molécules sans contamination en biologie moléculaire, etc...

- **Techniques utilisant la lévitation :**

La lévitation est l'absence de contamination d'un produit chimique ou biologique par l'enceinte où il est contenu. En pesanteur normale, le produit est évidemment forcé d'être au contact de son contenant. En microgravité, ce contact n'est plus imposé. On peut alors réaliser l'encapsulation de produits (cellules biologiques) dans des microsphères sans risquer de les contaminer (technique de microencapsulation).

- **Techniques nécessitant l'absence de vibrations**

L'absence d'accélération dans la cabine du laboratoire spatial, et la possibilité de s'affranchir des contacts avec les parois, permettent de réaliser des tâches très précises

- Etc...

Des exemples d'expériences en microgravité sont décrits dans de nombreuses revues scientifiques (CNES par exemple).

3 - De l'impesanteur au principe d'équivalence locale en relativité générale

Terminons par l'apport à la théorie de la relativité générale de l'hypothèse de l'égalité de la masse inerte à la masse gravitationnelle, hypothèse jusqu'alors vérifiée (grâce d'ailleurs aux expériences dans l'espace) et qui nous a permis d'introduire la notion d'impesanteur ci-dessus. Quelques précisions "utiles" mais fort incomplètes:

- La relativité générale repose sur le principe d'équivalence d'Einstein: on peut toujours compenser localement une force d'inertie par une force de gravitation et réciproquement. C'est ce qui différencie de manière fondamentale la relativité générale de la relativité restreinte.

- Or les forces d'inertie sont liées à la géométrie du référentiel dans lequel on observe le mouvement (ou tout phénomène en général). Pour prendre un exemple imagé, considérons un observateur qui fait un tour de manège qui tourne en rond. Il est fixe dans son propre référentiel et tend à y rester quoi qu'il advienne: plus exactement il tend à rester soumis à ses seules forces d'inertie. Mais comme il est soumis aux forces d'inertie qui apparaissent du fait de la rotation du référentiel lié au manège, s'il lâche une balle directement vers le sol sa trajectoire ne sera pas rectiligne mais déformée par les seules forces d'inertie liées au référentiel de l'observateur (force centrifuge ici) et la balle partira vers l'extérieur.

Le principe d'équivalence dit que la force centrifuge (d'inertie) peut être compensée par une force de gravitation: si le manège était isolé dans l'espace, sans l'influence d'aucune planète, il suffirait de placer une masse suffisante en son centre pour "annuler" la force centrifuge. A l'inverse pour créer une gravité à bord d'un vaisseau il suffit de le mettre en rotation, laquelle gravité est ni plus ni moins équivalente à la force centrifuge due à la rotation. Ou encore, pour entraîner sur terre les cosmonautes en apesanteur on utilise des avions en chute libre suivant une trajectoire déterminée: dans le référentiel lié à l'avion apparaît une force d'inertie égale et opposée à la force de gravitation.

- Le principe d'équivalence est donc presque une observation de bon sens (si les masses inerte et gravitationnelle sont égales !), mais ses conséquences sont révolutionnaires: puisque les forces d'inertie dépendent de la géométrie de l'espace-temps, alors il en est de même pour la gravitation. Et puisque la gravitation est liée à la présence des masses, voici donc, ajoutée aux forces d'inertie classiques (complémentaires, Coriolis, etc.) une force d'inertie de nouveau type: celle qui dépend des masses et, plus généralement, des énergies et impulsions (car en relativité restreinte les masses peuvent être reliées aux énergies-impulsions).

Le mérite d'Einstein est d'avoir pu exprimer cette nouvelle inertie sans référence à une force:

pour cela il a établi l'équivalence entre la source d'énergie ou de masse et la courbure de l'espace temps local à 4 dimensions (mathématiquement cela revient à évaluer le tenseur d'énergie-impulsion au tenseur de courbure).

- La géométrie de l'espace-temps est ainsi liée à la présence des masses (ou des énergies). Cela signifie que deux observateurs placés près d'une masse et qui observent un même phénomène obtiendront sur celui-ci des mesures différentes. Or, invoquant un des principes fondamentaux de la science (principe d'objectivité), Einstein a estimé qu'il n'y a pas d'observateurs plus privilégiés que d'autres: les référentiels d'observation doivent rendre compte du même phénomène, les mesures différentes obtenues par deux observateurs doivent avoir pour point commun qu'elles décrivent le même phénomène. La référence commune ne peut pas être l'espace et le temps tels que perçus par chaque observateur: c'est ce qui les rend... relatifs. Elle est par contre liée à la conservation du même élément métrique de la géométrie de l'espace-temps issue de la masse, le fameux ds^2 , ou temps propre.

On montre que cela est dû au principe de constance de la célérité de la lumière: tout échange d'énergie entre deux référentiels différents se fait avec une célérité finie et constante c . Par le principe d'objectivité chaque observateur ramène le phénomène au même temps propre ds , mais c'est lorsqu'on compare son temps avec celui d'un autre que l'on trouve des différences. On passe de l'un à l'autre par des transformations du référentiel qui conservent la métrique ds^2 ; par exemple, en relativité restreinte ce sont les transformations de Lorentz-Poincaré et on montre qu'elles ne changent pas la forme des équations du champ électromagnétique (équations de Maxwell-Faraday).

- Ainsi, la relativité n'est pas du relativisme: l'absolu n'est plus le temps ou l'espace pris séparément, mais une quantité, le temps propre ds , qui se conserve lorsque l'on change de référentiel pour mesurer le même phénomène.

L'absolu n'a pas disparu en science, il s'est déplacé des sphères locales ou anthropocentriques vers une réalité, certes moins directe et concrète, mais plus universelle car permettant de relier des observations différentes en terme de l'objet commun qu'elles traitent. C'était en tous cas le credo d'Einstein.

- L'univers pris dans son ensemble est un hyper-espace-temps à 4 dimensions qui n'échappe pas aux principes de la relativité générale: l'ensemble des masses, énergies et ondes qu'il contient (ou qui le constituent?) sont responsable d'une courbure globale de sa géométrie. La cosmologie a pour but de déterminer cette géométrie et c'est encore un objet de recherches et de controverses. Quel que soit le modèle le rayon de courbure de l'univers est lié à un "temps", celui du temps propre de la métrique. Depuis le big-bang le temps est de l'ordre de 15 milliards d'année, ce qui veut dire que les objets les plus lointains que l'on peut observer sont situés à 15 milliards d'année-lumière et proches de la singularité initiale (le big bang).

- L'espace-temps à 4 dimensions est-il "immergé" dans un hyper-espace à 5 dimensions ou plus? Sous certaines conditions, rien ne l'empêche en principe. Je citerai pour mémoire la théorie de Kaluza-Klein qui généralise la relativité générale dans un espace-temps à 5 dimensions et qui, semble-t-il, permet de retrouver certains résultats de la physique quantique (mais la théorie a des insuffisances qui font que l'on cherche encore à unifier les interactions de la physique dans des espaces à $n > 5$ dimensions comme en théorie des cordes par exemple).

- On a vu que la masse est responsable de la déformation de l'espace-temps mais "déformation par rapport à quoi?". Il s'agit de la différence entre une géométrie d'une 4-surface présentant une courbure (géométrie de Riemann par exemple) et celle d'une 4-surface sans courbure (dite "plane") comme par exemple la géométrie pseudo-euclidienne de Minkowski où s'applique la relativité restreinte. Par passage à la limite, on passe d'une géométrie courbe à une géométrie plane (en 4 dimensions!) en négligeant les masses.

- Enfin les ondes gravitationnelles ne sont pas à confondre avec les ondes quantiques du

champ gravitationnel. Les ondes gravitationnelles sont directement prévisibles par la relativité générale sans référence à la théorie quantique. Elles décrivent une perturbation sous forme d'ondes (comme des vagues) de la géométrie de l'espace-temps, laquelle perturbation se propage à la célérité c de la lumière. Ces ondes ont une intensité extrêmement faible (par rapport aux ondes électromagnétiques) et apparaissent pour des variations intenses et rapides (au sens du temps propre) de la source de gravitation (comme un pulsar par exemple). Difficile donc de les observer sur Terre, et par cette voie la télékinésie n'est pas pour demain!

En revanche, du point de vue quantique, le champ de gravitation est traité comme tout champ d'interaction de la physique, sans référence aux principes de relativité générale, moyennant l'outil mathématique appelé théorie quantique des champs. Comme tous les autres, ce champ a pour vecteurs d'échange des bosons intermédiaires. Pour la gravitation ces bosons sont des gravitons, tandis que pour le champ électromagnétique ce sont les photons (pour l'interaction forte qui lie les quarks dans les nucléons, les bosons sont des gluons). Les bosons intermédiaires, conséquences directes de la quantification des champs, s'échangent entre les fermions (les particules de "matière" en quelque sorte) permettant ainsi leurs interactions.

Toute particule possède un spin (moment cinétique propre): tous les fermions ont des spins demi-entiers et tous les bosons ont des spins entiers. A cause de cela leurs états ne suivent pas les mêmes statistiques: Fermi-Dirac pour les fermions, Bose-Einstein pour les bosons. La masse du graviton est nulle, son spin est 2: on montre que cela est responsable d'une interaction attractive en $1/r^2$ et que le champ est non linéaire (bien que de masse nulle le graviton possède une énergie et, de ce fait, est source de gravitation à son tour), situation prévue également par la relativité générale.

La difficulté d'ailleurs n'est pas tant de relier le point de vue quantique à celui de la relativité générale (Richard Feynmann a montré que l'on retrouvait les résultats de la gravitation en relativité générale à partir de la théorie quantique du graviton); elle réside dans les transformations qui pourraient exister entre l'interaction gravitationnelle et les autres interactions (électromagnétique, faible, forte) et qui aboutiraient à une théorie unitaire des champs.

Or aujourd'hui on n'a pas encore observé de gravitons, on a en théorie réuni l'interaction électromagnétique et faible (où interviennent des bosons de Higgs dans l'attribution de la masse aux particules), mais les tentatives d'unification de l'interaction forte à l'interaction électrofaible sont encore incertaines et celle avec la gravitation pose encore de réels problèmes...