

Le phénomène d'impesanteur *

par Jean-Pierre PENOT,
C.N.E.S., Toulouse.

La vie à l'intérieur d'un laboratoire spatial, en orbite autour de la Terre, est une source d'étonnements. Pour qui la découvre, ne serait-ce qu'à l'occasion de la projection d'un documentaire télévisé, il est évident que « là-haut » les choses sont bien différentes : pour se déplacer les hommes de l'espace utilisent... leurs bras et progressent le plus souvent à la manière des plongeurs sous-marins ; quant aux objets qui les entourent, du moins ceux qui ne sont pas fixés à un support, ils « flottent dans l'air ». Ce sont là des manifestations les plus visibles et sûrement les plus connues que l'on associe à l'état d'impesanteur.

Depuis NEWTON, il est admis que les corps matériels exercent les uns sur les autres une attraction qui est dite gravitationnelle (voir EI, n° 25, p. 14).

La planète Terre, comme tous les corps célestes, attire tout corps matériel de son voisinage. A la surface du sol, cette attraction se traduit par l'existence d'une force tirant inéluctablement tout objet « vers le bas » : c'est ce qu'on appelle usuellement son **poinds**.

Peut-on supprimer cette force ? Non, car l'attraction terrestre est un phénomène naturel sur lequel on ne peut agir. La sensation que nous avons de cette force peut-elle disparaître ? Oui. Et comment ? Simplement en ne résistant pas à cette force, en se soumettant complètement à son action...

Car tout le paradoxe attaché à la notion de poids tient en cette idée : **nous ressentons les effets du poids parce que certains obstacles exercent sur nous des forces qui s'opposent à la gravitation.** (Le plus souvent, l'obstacle c'est le sol, mais ce peut

(*) *N.D.L.R.* : Cet article est tiré de la revue « Espace Information » n° 26, édité par le C.N.E.S. dont nous remercions le rédacteur J.-P. PENOT qui nous a autorisés à reprendre ce texte.

être également le siège d'un véhicule terrestre ou le plancher d'une nacelle de montgolfière.) Cédons-y, laissons un objet quelconque subir — sans résistance aucune — l'attraction gravitationnelle : toute apparence de poids disparaît aussitôt !

DE L'IMPESANTEUR CONSIDEREE COMME UNE CONSEQUENCE NATURELLE DE LA GRAVITATION UNIVERSELLE.

Pour bien saisir tous les aspects de cette question, interrogeons-nous sur ce qui, sur Terre, donne à un homme la sensation de son poids. La réponse est simple : c'est le support sur lequel il repose, sur lequel il prend appui...

La Terre attire les différentes parties du corps mais ce sont les pieds qui sont en contact avec le sol et qui supportent l'ensemble du corps. Pour l'individu, la sensation de poids qui en résulte prend en compte de multiples informations et sensations (réponses du système nerveux et des centres d'équilibration, lourdeur des membres — par exemple, les bras « tirent » les épaules vers le bas —, « enfoncement » de la tête dans la partie supérieure du corps, etc.) qu'on associe à un sentiment d'équilibre et de bonne stabilité sur le sol.

Dans la vie courante nous évoluons, le plus souvent, sur un sol consistant et nous oublions l'attraction terrestre à laquelle nous sommes habitués, en présence de laquelle nous nous sommes développés. Mais que le sol soit moins ferme et cette attraction devient manifeste, perceptible ; il est bien connu qu'on s'enfonce dans un marécage ! Pour en donner un autre exemple, soumettons un individu à une expérience banale en le plaçant sur une balance (du type pèse-personne). De quoi se compose cet instrument ? D'une partie fixe, en contact avec le sol, et d'une partie supérieure, mobile, où reposent les pieds du patient. Sous l'effet du poids du corps, la partie mobile s'enfonce plus ou moins (un système de ressort permettant d'atteindre une position d'équilibre) ce qui fournit une indication sur le poids (mais le cadran de la balance est gradué en masse).

Revenons à l'hypothèse du sol mou et poussons plus loin le raisonnement : qu'advierait-il de notre individu si, brutalement, le sol était supprimé ? La réponse est évidente : il tomberait ! Imaginons que cette chute se produise dans un puits. Rapidement, du fait de la résistance de l'air, sa vitesse de chute atteindrait une valeur limite, constante.

Éliminons donc l'air de ce puits. Le vide étant fait, notre cobaye (qu'on a revêtu d'une combinaison spatiale et d'un équipement de survie) est en **chute libre** ; ce qui signifie qu'aucune force

(autre que la gravité, responsable de son mouvement), qu'aucun phénomène ne vient contrarier son mouvement.

Pour autant que les variations de g demeurent négligeables et si l'on fait l'hypothèse que le repère terrestre auquel on rapporte le mouvement est galiléen, **son mouvement est rectiligne (1) et uniformément accéléré.**

Soumis à la seule attraction terrestre, il tombe avec une accélération (g) égale à celle de la pesanteur (valeur moyenne au niveau du sol : $g_0 \approx 9,8 \text{ m. s}^{-2}$). Sa vitesse ($v = v_0 + gt$) croît proportionnellement au temps et il parcourt une distance dont la valeur ($e = gt^2/2$) est donnée par la relation établie par GALILÉE (voir EI, n° 25, p. 3).

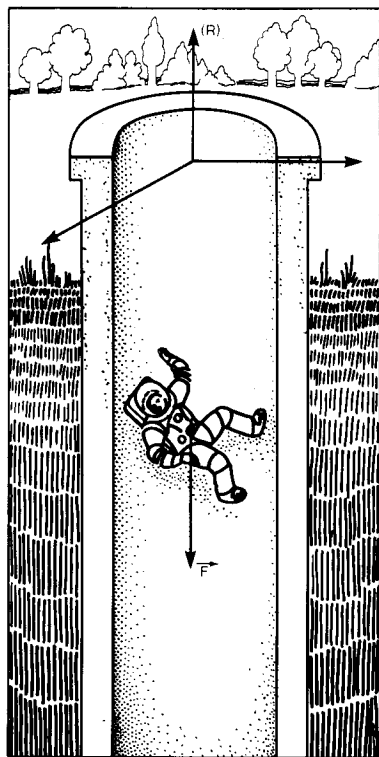
Qu'en est-il de la sensation de poids ? Elle a disparu. La pesanteur semblant ne plus se manifester, on parle d'un **état d'impesanteur** (en anglais : *weight-lessness* ou *zero-g conditions* ; en allemand : *die Schwerelosigkeit*). Pour des raisons essentiellement phonétiques, on préfère ce terme d'impesanteur à celui d'apesanteur. (Comment, dans la conversation, distinguer « la pesanteur » de « l'apesanteur » ?)

*Au risque d'anticiper un peu, il nous semble très important d'insister dès à présent : le terme **impesanteur** doit exclusivement laisser entendre que les effets de la pesanteur ne se manifestent plus, donc que la pesanteur est nulle ou très faible, ce qui n'implique nullement la disparition réelle de la gravité ! Certes, les phénomènes qu'on lui attribue habituellement au sol ne s'observent pas dans le cas d'une chute libre mais elle existe toujours bel et bien... puisque c'est elle qui est à l'origine de ce mouvement que constaterait un observateur terrestre !*

Cette distinction — fondamentale — devra être présente à l'esprit quand on rencontrera les expressions : « absence de gravité », « microgravité », « gravité réduite ou nulle », etc.

(1) Pour être exact, il faut indiquer que son mouvement (dans le repère géocentrique) n'est pas rigoureusement rectiligne en raison de la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles qui provoque — sauf aux pôles — une très petite déviation vers l'est. Cet écart par rapport à la verticale — toujours infime — ne peut être mis en évidence qu'au moyen d'expériences spéciales. Par exemple, lors des expériences de REICH faites en 1831, à Friedberg (51° de latitude Nord), en Allemagne, et portant sur une chute effectuée dans un puits de mine de 158 m de profondeur, on a mesuré une déviation de... 28 mm vers l'est (voir *Mécanique*, Dunod Université, 1976, p. 147).

C'est là une manifestation de la force d'inertie complémentaire (dite de CORIOLIS) qui doit, en toute rigueur, être prise en compte lorsqu'on étudie un corps en mouvement dans un repère lui-même animé d'une rotation instantanée par rapport à un repère galiléen.



Peut-on connaître l'état d'impesanteur ailleurs qu'à bord d'un satellite artificiel ? Oui, par exemple en effectuant une chute libre dans un puits débarrassé de son atmosphère. Est-il utile d'ajouter que c'est là une expérience infiniment plus dangereuse que la première ?

(Doc. EI - Boltana/Reilles).

Terminons par quelques rappels (voir EI, n° 25, p. 14) qui aideront peut-être le lecteur à y voir plus clair.

* Soit un corps céleste solide. Depuis Newton, on sait qu'il exerce une certaine attraction sur tout objet de son voisinage (et réciproquement) : c'est le phénomène de **gravitation**. On appelle **gravité** la force de gravitation exercée par ce corps céleste sur un corps quelconque.

* Supposons que ce corps céleste soit une planète en rotation sur elle-même et considérons, à présent, un habitant de cette planète désireux de déterminer, depuis le sol de sa planète, la valeur de cette gravité. Quoi qu'il fasse, il ne pourra obtenir

qu'une mesure prenant en compte, simultanément, la gravité et des forces d'inertie (notamment celle due à la rotation signalée).

Ce phénomène physique global qu'il aura la possibilité d'étudier s'appelle le **pesanteur**. On a coutume de désigner par **poids** la force associée au phénomène de pesanteur.

* Les physiciens donnent de la pesanteur d'un astre la définition suivante : définie dans un repère non galiléen, c'est la somme de la force de gravitation (ou gravité) et des forces d'inertie agissant dans ce repère (essentiellement celle qui est due à l'accélération d'entraînement du repère considéré par rapport à un repère galiléen).

Au sol, c'est la pesanteur qui confère aux objets leur poids.

* A titre d'aide-mémoire, on peut proposer les associations de concepts suivantes : d'une part, gravitation/gravité/absence de forces d'inertie/repère galiléen ; d'autre part, pesanteur/poids/existence de forces d'inertie/repère non galiléen, associations qui prendront tout leur sens à la lecture de ces pages.

Aussi peut-on dire que **la sensation de poids existe dès qu'il y a obstacle au mouvement de chute libre**. Supprimons l'obstacle et toute sensation de poids disparaît... Si notre malheureux cobaye, dans sa chute vertigineuse vers le fond du puits, avait le loisir d'utiliser son pese-personne, il observerait que la partie mobile de la balance ne s'enfonce pas et que l'aiguille reste au zéro : il ne pèse rien ! Et s'il se débarrassait de son bracelet-montre ou de son mouchoir, il constaterait qu'ils « descendent » comme lui, ni plus vite, ni moins vite...

Soumis à la seule attraction terrestre, tous les corps tombent avec la même accélération dans le vide (donc avec la même vitesse si les conditions initiales étaient identiques) ainsi que l'a reconnu GALILÉE au début du XVII^e siècle. Il en résulte que dans un système de référence en chute libre, les effets de la pesanteur disparaissent : les observateurs et les objets solidaires de ce système de référence se trouvent en **état d'impesanteur**. La réciproque est vraie : s'il y a impesanteur dans un système de référence, celui-ci est en chute libre. Etayé par des expériences très précises, ce fait constitue l'un des fondements de la relativité générale d'EINSTEIN (voir EI, n° 25, pp. 20-21).

Cette **équivalence entre chute libre et impesanteur** se comprend en mécanique newtonienne par l'introduction des **forces d'inertie** (2) dans tout système de référence qui n'est pas galiléen (3).

(2) Le concept de **force d'inertie** aurait été introduit en mécanique par Jean LE ROND D'ALEMBERT (1717-1783), écrivain, philosophe et mathématicien français, surtout connu comme un des animateurs de l'*Encyclopédie*.

Les forces d'inertie sont parfois appelées « pseudo-forces » car elles peuvent être modifiées, voire éliminées, par un changement de système de référence, ce qui n'est pas le cas des « vraies » forces. (Malheureusement, ces appellations ont souvent été à l'origine d'erreurs de raisonnement et ont, selon l'expression d'un enseignant qui souhaitait « en finir (avec elles) une bonne fois pour toutes », « fait suffisamment de dégâts jusqu'à ce jour ! »)

En particulier, **dans un système galiléen, il n'y a pas de forces d'inertie**. C'est pourquoi on dit aussi qu'un système galiléen est un système d'inertie.

(3) Un repère galiléen est un système de référence dans lequel la loi d'inertie (voir El, n° 25, p. 7) est vérifiée : un mobile qui ne serait soumis à aucune force serait, par rapport à ce repère, soit au repos, soit en mouvement de translation uniforme.

De surcroît, tout mobile de ce type peut constituer à son tour un référentiel galiléen : *les référentiels galiléens sont en mouvement de translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres*.

En toute rigueur, du fait, d'une part, de la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles et, d'autre part, du mouvement du centre de la Terre dans le repère de COPERNIC (voir p. 33) qui lui est pratiquement galiléen (*), un repère terrestre ne devrait pas être considéré comme galiléen.

Toutefois, en première approximation, on peut considérer qu'un repère terrestre est galiléen : cette approximation est suffisante pour l'étude de la majorité des problèmes de mécanique sur la Terre... mais ne l'est plus pour l'analyse du mouvement des satellites artificiels terrestres.

Donnons deux exemples simples dans lesquels se manifestent des forces d'inertie :

- un train progresse en ligne droite à vitesse constante par rapport à un repère terrestre considéré comme galiléen : c'est donc aussi un repère galiléen. Soudain il aborde un virage tout en maintenant constante sa vitesse : ce n'est plus un repère galiléen (car le mouvement n'est plus rectiligne par rapport au repère terrestre de référence) et des forces d'inertie se manifestent (les voyageurs sont déportés vers l'extérieur du virage) ;
- le même train, revenu à l'état initial, change brutalement de vitesse tout en poursuivant son mouvement rectiligne : ce n'est plus un repère galiléen (car le mouvement n'est plus uniforme par rapport au repère terrestre de référence) et des forces d'inertie se manifestent (les voyageurs sont projetés vers l'avant du train, s'il y a eu ralentissement, ou vers l'arrière du train, s'il y a eu accélération).

(*) Il ne s'agit encore que d'une approximation car le système solaire ne peut être considéré comme absolument isolé des autres corps de l'univers.

L'approche mathématique n'est pas trop complexe dans le cas d'un repère en mouvement de translation uniformément accélérée ou en mouvement de rotation uniforme par rapport à la Terre.

*Afin d'illustrer ce qui vient d'être écrit, reprenons l'exemple de notre cobaye que nous supposerons, cette fois, à l'intérieur d'une cabine d'ascenseur, à l'atmosphère respirable, sans aucun contact (visuel ou autre) avec l'extérieur. Et cette cabine est en chute libre dans le puits où a été fait le vide. Étudiée sur une distance telle que l'accélération de la pesanteur terrestre puisse être considérée comme constante, la cabine a — par rapport à la Terre — un mouvement accéléré : **c'est un référentiel non galiléen.***

*Quelles forces s'exercent sur notre passager, la cabine étant prise comme référentiel ? D'une part, la force \vec{F} de gravitation, dirigée vers le bas et cause du mouvement, d'autre part (et parce que la cabine n'est pas un référentiel galiléen), **une force d'inertie, égale et de sens opposé.** (Insistons bien sur le fait que cette force d'inertie n'a de signification que dans le référentiel défini, autrement dit pour le passager. Pour un observateur au sol, raisonnant dans un repère galiléen, cette force d'inertie n'existe pas !)*

*Notre cobaye est donc soumis à deux forces dont la somme est nulle. (On verra plus loin que ce n'est vrai qu'en première approximation). Par rapport aux parois de la cabine d'ascenseur, rien ne se déplace sans impulsion initiale (d'où l'emploi du terme « flotter » pour décrire cette stabilité des choses à l'intérieur de la cabine, leur maintien dans l'air) et, **aux yeux du passager, la gravité semble ne plus s'exercer : rien ne pèse et rien ne tombe (4) vers le plancher de la cabine.** Ainsi peut-on expliquer le phénomène d'impesanteur (5).*

Insistons cependant sur le côté paradoxal de cette conclusion : dans un champ de gravitation, un mobile peut être soumis à un mouvement de chute libre, ce qui donne à ses passagers l'illusion que... le champ de gravitation n'existe pas !...

De la même façon, on rendra compte de l'état d'impesanteur qu'il est possible d'instaurer en soumettant divers véhicules à

(4) A condition, bien sûr, qu'aucun objet n'ait reçu d'impulsion initiale.

(5) Pour une interprétation mathématique plus approfondie, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages scolaires de son choix ou, par exemple, à deux articles du **Bulletin de l'Union des Physiciens** dont on trouvera en p. 43 les coordonnées complètes : *A propos de l'impesanteur* (n° 593) et *Pour essayer de résoudre un problème de mécanique* (n° 611).

une chute libre (qu'il s'agisse d'expériences en tour d'impesanteur, à bord d'avions ou de fusées-sondes en vol balistique ou encore à l'intérieur des satellites artificiels; ce sera l'objet du numéro 28 d'Espace Information).

On peut même envisager — c'est une hypothèse toute théorique mais utile à la compréhension du phénomène — un « moyen artificiel » de parvenir à cette chute libre dans le cas d'une résistance extérieure. Imaginons un projectile sous-marin largué verticalement dans un océan. Sous l'effet de son poids, il descend mais, ralenti par l'eau, il n'est pas en chute libre. Dotons-le d'un système propulsif très puissant lui permettant de vaincre cette résistance et de descendre avec une accélération égale à celle de l'attraction terrestre à ce niveau (soit $\simeq 9,8 \text{ m. s}^{-2}$ en surface) : son mouvement sera alors assimilable à une chute libre et l'état d'impesanteur existera à l'intérieur du projectile.

C'est en usant d'un artifice du même ordre que dès 1935 l'Allemand VON DIRINGSHOFEN aurait connu, durant huit secondes, l'état d'impesanteur en mettant son avion en piqué depuis une grande altitude et en annulant la traînée atmosphérique avec son moteur (6).

Jusqu'ici on a entendu par chute libre un mouvement se faisant exclusivement sous l'influence de l'attraction terrestre avec une accélération égale à celle de la pesanteur (au niveau considéré). Mais la généralisation est possible, **aussi doit-on considérer comme étant en chute libre tout corps qui n'est soumis qu'à l'action du champ gravitationnel sous l'influence duquel il se trouve.**

Autrement dit, est en chute libre tout objet « tombant » (au sens de Newton, voir EI, n° 25, p. 11) vers le corps céleste qui l'attire. **Dans tout champ de gravitation** (dû au Soleil, à la Lune, aux planètes, aux étoiles,...) **la chute libre constitue le mouvement naturel et l'impesanteur la règle.**

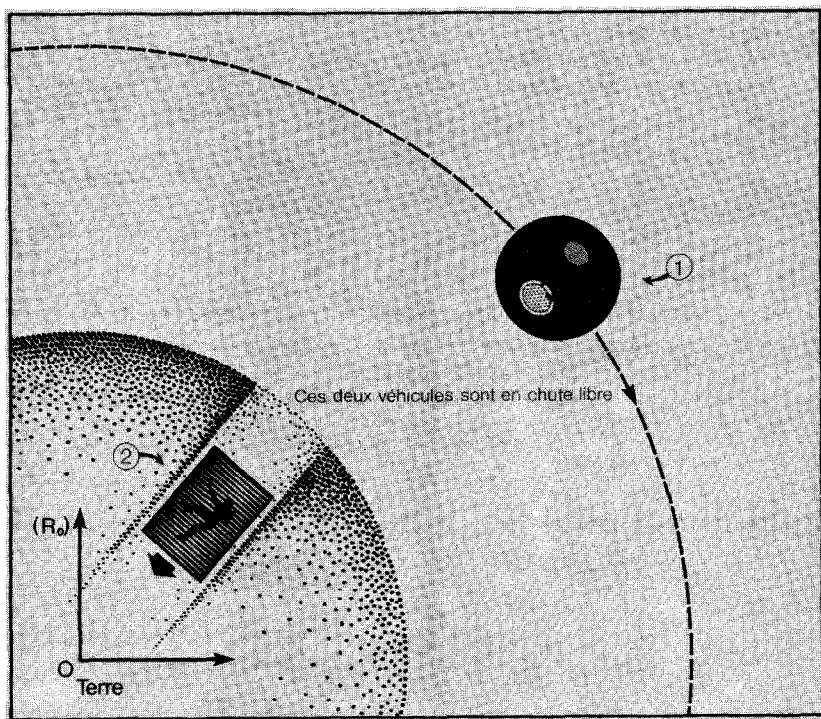
(Pour ne pas se trouver dérouter par la suite de l'article, nous demanderons au lecteur d'oublier provisoirement le sens généralement attaché à l'expression « chute libre », à savoir : mouvement vertical prenant fin avec un impact au sol.

Pour notre part, nous entendrons par « chute libre » un mouvement régi par la gravité et sur des trajectoires variées (cercle, ellipse, parabole, ligne droite,...), parfois même dans des circonstances qui, à première vue, étonnent : pour nous, une fusée-sonde en vol devra être considérée comme en « chute libre »

(6) Cité par M. R. SHARPE dans *La vie dans l'espace*, Larousse, 1970, p. 93.

dès lors que la résistance de l'air pourra être négligée (c'est-à-dire à haute altitude), en particulier dans la partie ascendante de sa trajectoire... et pourtant, à ce moment-là, elle s'éloigne encore du sol.)

Mais il est possible de voir dans notre cabine d'ascenseur la forme la plus rudimentaire du véhicule spatial et d'élargir ainsi notre vision. Aussi peut-on affirmer que **tout véhicule spatial suivant une trajectoire soumise aux seules lois de la gravitation** (en absence de toute autre force extérieure, par exemple celle d'un système propulsif ou encore la traînée aérodynamique lors de la traversée d'une atmosphère) **est en chute libre.**



Que veut-on montrer avec ce schéma ? Qu'un ascenseur qui tombe dans un puits où règne le vide et un satellite qui gravite autour de la Terre ont en commun d'être en chute libre.

Les deux mouvements étant rapportés au référentiel géocentrique (R_0) , supposé galiléen, on peut dire que :

(suite de la légende page suivante)

C'est, bien sûr, le cas des satellites artificiels tournant autour de la Terre, qu'il s'agisse d'orbites circulaires ou elliptiques. Mais c'est aussi celui des sondes spatiales qui s'arrachent à l'attraction terrestre selon des trajectoires paraboliques ou hyperboliques (considérées dans le repère géocentrique et au voisinage de la Terre afin de négliger toutes les influences autres que celle de la gravitation terrestre).

S'éloignant de la Terre **toute sonde spatiale**, qu'elle se dirige vers la Lune (cas des capsules Apollo), vers Mars ou Vénus, qu'elle se mette en orbite autour du Soleil (cas de quelques Pioneer, des satellites Hélios, OSO,...), qu'elle quitte le système solaire (cas des sondes Pioneer-10 et 11, Voyager-1 et 2) **est en chute libre** (7) (parce que soumise exclusivement aux lois de la gravitation universelle). Et à l'intérieur de tout **véhicule en chute libre règne l'état d'impesanteur**. (A l'extérieur aussi, d'ailleurs, comme l'ont illustré les multiples sorties de l'Homme dans l'espace à partir d'un véhicule spatial ; voir Annexe 5).

(7) Du moins tant que les moteurs servant à la stabilisation ou à la correction de trajectoire sont arrêtés.

(suite de la légende de la page 9)

* **le satellite (1)** décrit une trajectoire qu'on a supposé circulaire et n'est soumis qu'à la force de gravitation terrestre, (on néglige les autres forces, bien plus faibles, s'exerçant sur lui) ;

* **la cabine d'ascenseur (2)** décrit une trajectoire dirigée vers le centre de la Terre. Si l'on a pris la précaution de creuser ce puits selon l'axe des pôles (pour annuler la force d'inertie d'entraînement) et si l'on néglige la force d'inertie de Coriolis, on peut admettre — en première approximation — que cette cabine est exclusivement soumise à la force de gravitation terrestre.

Les deux mobiles peuvent être considérés comme étant en chute libre, la seule différence tenant au fait que le satellite a reçu une impulsion initiale (selon une direction perpendiculaire au rayon terrestre en ce point).

Il faut bien avouer que la parenté des **deux** mouvements n'est pas évidente a priori. (Pour compléter la scène, et ajouter une troisième manière de générer un mouvement de chute libre, on aurait pu représenter également une fusée-sonde en vol balistique.)

Ces deux mobiles ont des vitesses et des trajectoires différentes, mais dans les deux cas **leurs passagers sont en impesanteur**.

Profitons de cette analogie pour rappeler — essentiellement à l'intention des jeunes lecteurs — que pas plus que notre ascenseur qui tombe dans son puits, pas plus qu'une pierre lancée en l'air et qui revient vers le sol, le satellite n'a besoin d'aucun moteur pour tourner autour de la Terre : **leur seul « moteur », c'est la gravitation universelle**, cause unique de leur mouvement. (Document EI - Boltana/Reilles).

Mais cette chute libre peut prendre fin à tout instant, notamment lorsqu'une de ces sondes vient à se poser sur le sol d'une planète : elle ne « tombe » plus ce qui met un terme à l'état d'impesanteur (observé dans le repère lié à la sonde). De nouveau la sensation de poids se manifeste.

En l'absence de tout champ gravitationnel (condition hypothétique qui n'a de sens qu'au plan théorique puisqu'elle ne peut être remplie qu'à très grande distance de toute masse matérielle), serait considéré comme en chute libre (dans un repère galiléen ; mais comment le définir en absence de toute matière ?) tout corps... au repos ou se déplaçant en ligne droite à vitesse constante (on retrouve le principe d'inertie de NEWTON, voir EI, n° 25, p. 7).

Une question un peu hâtive pourrait être : *la Terre étant en chute libre dans l'espace* (car elle « tombe » en permanence sur le Soleil, au sens où l'entendait NEWTON affirmant que la Lune « tombe » sur la Terre ; voir EI, n° 25, p. 11 ; **tomber étant ici synonyme de graviter**), *pourquoi ses passagers ne ressentent-ils pas l'état d'impesanteur ?*

Tel serait le cas si la Terre avait une masse négligeable (par exemple si elle était creuse). Mais la Terre est massive. Elle est même tellement massive qu'elle crée, dans son voisinage, un fort champ de gravité auquel les hommes sont sensibles : c'est d'ailleurs ce qui les « plaque » au sol et est à l'origine de leur poids.

Du fait de cette gravité, les hommes disposent de l'intéressante faculté de se déplacer sans difficulté sur toute la surface (solide !) du globe terrestre un peu comme des fourmis en mouvement sur un ballon d'enfant... Possibilité qui ne cesse d'étonner les enfants (« Mais comment ils font, en Australie, pour marcher la tête en bas ? » disent-ils.)

L'analogie entre la Terre, satellite naturel habité du Soleil, et une station orbitale artificielle habitée tournant autour de la Terre bute sur la différence fondamentale suivante : l'attraction gravitationnelle de la station sur ses occupants est totalement négligeable... ce qui n'est pas le cas de la Terre vis-à-vis de ses habitants.

L'imagination éprouve quelques difficultés en essayant de se représenter, à l'intérieur de notre Galaxie en mouvement dans l'espace et en rotation sur elle-même, notre Soleil autour duquel tourne la Terre, autour de laquelle tourne la Lune, autour de laquelle graviterait une station spatiale dans laquelle des cosmonautes seraient en état d'impesanteur ! Etrange ballet cosmique...

En résumé, **dès qu'un véhicule spatial gravite** (dans quelque endroit de l'univers que ce soit), **on peut affirmer que ses équipements et ses passagers sont en état d'impesanteur.**

A ce sujet, il convient de signaler l'erreur commise par Jules VERNE dans son récit *Autour de la Lune*, publié en 1871, en ne faisant apparaître l'état d'impesanteur qu'en une zone précise de la trajectoire Terre-Lune, là où les influences gravitationnelles de la Terre et de la Lune se compensent (ce qu'il appelle le « point d'égale attraction » et qu'on désigne aujourd'hui par « point d'équigravité du système Terre-Lune »). En réalité tout le voyage — à supposer qu'il ait pu prendre naissance — aurait dû se dérouler en état d'impesanteur. (Les missions Apollo vers la Lune en ont apporté la preuve.)

Voyons ce qu'écrivit Jules VERNE (8) dont les trois héros, rappelons-le, ont pris place à l'intérieur d'un projectile, *Columbiad*, qu'un canon a propulsé en direction de la Lune :

(...) Barbicane et ses deux compagnons eurent le sentiment très marqué d'un nouveau phénomène.

Depuis le moment où ils avaient quitté la Terre, leur propre poids, celui du boulet et des objets qu'il renfermait, avaient subi une diminution progressive. S'ils ne pouvaient constater cette déperdition pour le projectile, un instant devait arriver où cet effet serait sensible pour eux-mêmes et pour les ustensiles ou les instruments dont ils se servaient. (...)

On sait que l'attraction, autrement dit la pesanteur, est proportionnelle aux masses et en raison inverse du carré des distances. De là cette conséquence : si la Terre eût été seule dans l'espace, si les autres corps célestes se fussent subitement annihilés, le projectile, d'après la loi de Newton, aurait d'autant moins pesé qu'il se serait éloigné de la Terre, mais sans jamais perdre entièrement son poids, car l'attraction terrestre se fût toujours fait sentir à n'importe quelle distance.

Mais dans le cas actuel, un moment devait arriver où le projectile ne serait plus aucunement soumis aux lois de la pesanteur, en faisant abstraction des autres corps célestes dont on pouvait considérer l'effet comme nul.

En effet, la trajectoire du projectile se traçait entre la Terre et la Lune. A mesure qu'il s'éloignait de la Terre, l'attraction terrestre diminuait en raison inverse du carré des distances, mais aussi l'attraction lunaire augmentait dans la même proportion. Il devait donc arriver un point où, ces deux attractions se

(8) *Autour de la Lune*, J. VERNE, Livre de poche, n° 2035, 1979, pp. 122-127.

neutralisant, le boulet ne pèserait plus. Si les masses de la Lune et de la Terre eussent été égales, ce point se fût rencontré à une égale distance des deux astres. Mais, en tenant compte de la différence des masses, il était facile de calculer que ce point serait situé aux quarante-sept cinquante-deuxièmes du voyage, soit, en chiffres, à soixante-dix-huit mille cent quatorze lieues (9) de la Terre. (...)

Or, comment reconnaîtraient-ils que le projectile avait atteint ce point neutre situé à soixante-dix-huit mille cent quatorze lieues de la Terre ?

Précisément lorsque ni eux ni les objets enfermés dans le projectile ne seraient plus aucunement soumis aux lois de la pesanteur.

Jusqu'ici, les voyageurs, tout en constatant que cette action diminuait de plus en plus, n'avaient pas encore reconnu son absence totale. Mais ce jour-là, vers onze heures du matin, Nicholl ayant laissé échapper un verre de sa main, le verre, au lieu de tomber, resta suspendu dans l'air.

« Ah ! s'écria Michel Ardan, voilà donc un peu de physique amusante ! »

Et aussitôt, divers objets, des armes, des bouteilles, abandonnés à eux-mêmes, se tinrent comme par miracle. Diane, elle aussi, placée par Michel dans l'espace, reproduisit, mais sans aucun truc, la suspension merveilleuse opérée par les Caston et Robert Houdin. La chienne, d'ailleurs, ne semblait pas s'apercevoir qu'elle flottait dans l'air.

Eux-mêmes, surpris, stupéfaits, en dépit de leurs raisonnements scientifiques, ils sentaient, ces trois aventureux compagnons emportés dans le domaine du merveilleux, ils sentaient que la pesanteur manquait à leur corps. Leurs bras, qu'ils étendaient, ne cherchaient plus à s'abaisser. Leur tête vacillait sur leurs épaules. Leurs pieds ne tenaient plus au fond du projectile. Ils étaient comme des gens ivres auxquels la stabilité fait défaut. Le fantastique a créé des hommes privés de leurs reflets, d'autres privés de leur ombre ! Mais ici la réalité, par la neutralité des forces attractives, faisait des hommes en qui rien ne pesait plus, et qui ne pesaient pas eux-mêmes !

Soudain Michel, prenant un certain élan, quitta le fond, et resta suspendu en l'air comme le moine de la Cuisine des Anges de Murillo.

(9) La lieue, ancienne mesure de distance, valait approximativement 4 kilomètres.

Ses deux amis l'avaient rejoint en un instant, et tous les trois, au centre du projectile, ils figuraient une ascension miraculeuse.

« Est-ce croyable ? Est-ce vraisemblable ? Est-ce possible ? s'écria Michel. Non. Et pourtant cela est ! Ah ! si Raphaël nous avait vus ainsi, quelle « Assomption » il eût jetée sur sa toile !

— L'Assomption ne peut durer, répondit Barbicane. Si le projectile passe le point neutre, l'attraction lunaire nous attirera vers la Lune. » (...)

(Bien entendu, les passages que nous avons fait composer en caractères gras — afin d'attirer l'attention du lecteur — ne se détachaient pas du reste du texte dans le livre de J. VERNE. Note de la rédaction.)

L'erreur de Jules VERNE s'explique par une confusion dans les repères : il prétend observer à l'intérieur de *Columbiad* les modifications d'un poids défini dans un repère (géocentrique) lié à la Terre et ne prenant en compte que les variations de la gravité terrestre et lunaire. Mais on a vu que la valeur de g n'a rien à voir avec l'impesanteur qui est essentiellement un *phénomène dynamique* affectant tout projectile subissant passivement la gravitation universelle — et cela quelle que soit la valeur de g tout au long de sa trajectoire.

Par contre, HERGÉ, dans *On a marché sur la Lune*, publié en 1954, a bien distingué la phase balistique (qui s'accompagne d'un état d'impesanteur à l'intérieur de la fusée) et la phase propulsée (avec création d'une pesanteur artificielle).

Examinons à présent les conséquences que peut avoir l'application d'une force supplémentaire sur un véhicule spatial en chute libre.

1. Moteurs éteints, un vaisseau spatial progresse dans le vide interplanétaire : il est en chute libre. Soudain ses moteurs sont allumés et le vaisseau exécute un brusque virage. Du fait de son inertie, le passager est projeté contre la paroi et l'ensemble de son corps ressent les effets de cette poussée. Les parois du vaisseau l'obligent à suivre la nouvelle direction prise par le vaisseau : *tant qu'agit cette poussée le vaisseau n'est plus en chute libre et l'astronaute n'est plus en impesanteur.*

2. Même prologue : le vaisseau spatial est en chute libre. Soudain surgit un corps céleste de forte densité qui dévie (par attraction gravitationnelle) le vaisseau spatial d'une façon rigoureusement identique au cas précédent (exécution d'un virage comparable). L'astronaute ne ressent absolument rien. En fait, *le vaisseau est toujours en chute libre et l'astronaute se trouve toujours en état d'impesanteur.* Ce n'est pas la paroi du vais-

seau qui l'oblige à changer de direction, mais le nouveau champ de gravitation. Et ce champ agit de façon quasi semblable aussi bien sur son corps que sur le vaisseau, de telle sorte que l'astronaute ne ressent aucune modification.

Ajoutons encore, pour en terminer avec ce sujet, que contrairement à ce qui est parfois écrit dans la littérature de science-fiction, *l'état d'impesanteur ne cessera pas nécessairement au voisinage d'une grosse planète* : tant qu'un véhicule décrit librement une trajectoire gravitationnelle, il est en chute libre... quelle que soit la proximité du corps attractif.

PARTICULARITES DE L'ETAT D'IMPESANTEUR.

Avant d'aborder ce sujet, il convient de préciser que pour différentes raisons, on ne peut, dans la pratique, obtenir dans un véhicule spatial une impesanteur parfaite, forces de gravité et forces d'inertie ne se compensant pas exactement. Diverses causes (par exemple l'inhomogénéité de la Terre, le frottement atmosphérique, le mouvement du véhicule sur lui-même qui provoque l'apparition de ce qu'on appelle la force d'inertie de CORIOLIS,...) font qu'il subsiste toujours une accélération résiduelle ou qu'apparaissent sans cesse des accélérations parasites.

En particulier, au voisinage de la Terre, la *gravité-zéro* est une limite vers laquelle on peut tendre mais qu'on ne saurait atteindre. Aussi les spécialistes préfèrent-ils le terme de **micro-gravité** (du grec *mikros* : petit) pour désigner cet état (10).

Quels sont les effets de l'impesanteur sur le contenu d'un véhicule spatial en chute libre ?

Pour les découvrir, revenons à notre cobaye du début qui n'est plus dans une banale cabine d'ascenseur mais dans un vaste local sans ouverture, qu'on appellera son laboratoire : il est confortablement installé sur une chaise, derrière un bureau sur lequel reposent quelques objets usuels. Pour le moment ce laboratoire est immobile sur la surface terrestre.

La caractéristique essentielle de cette scène banale est que tous les objets de ce laboratoire sont soumis à **leur poids qui les plaque sur leur support** : l'expérimentateur sur sa chaise, la chaise sur le plancher, le plancher sur la structure du laboratoire, le téléphone, les crayons et les livres sur la table, l'eau

(10) Néanmoins la définition officielle du mot **impesanteur** impliquant une somme des forces d'inertie et gravitationnelle nulle ou très faible, il est loisible d'employer indifféremment l'un ou l'autre terme, ce que nous ferons dans cet article.

dans un verre, le verre sur une soucoupe, etc. Et il faut exercer des forces non négligeables pour les en déloger. Si notre cobaye saisit une gomme et la laisse tomber, elle se dirige naturellement vers le sol.

Dans l'espoir d'observer des changements notables, mettons ce laboratoire en mouvement au voisinage de la surface terrestre. Par exemple, soumettons-le à des vitesses élevées ou à de fortes accélérations. Pour cela, installons-le dans un train à très grande vitesse (jusqu'à 300 km/h) ou dans la soute d'un avion supersonique (jusqu'à 2 000 km/h). Que constate-t-on ? A vrai dire très peu de différences. Bien sûr, si le décollage de l'avion est un peu violent ou si le train modifie brutalement son mouvement, un livre peut glisser sur le bureau et même tomber au sol. Mais nécessairement il s'arrêtera quelque part et y restera.

Et le verre d'eau que l'on tient fermement ? Son contenu peut subir, en raison de mouvements extérieurs brutaux du même type, de vives secousses. Une fraction du liquide peut s'en échapper, s'écouler sur la table, puis sur le sol du laboratoire. Suivant la « pente naturelle » et soumise à son poids, l'eau va gagner les parties les plus basses du véhicule (comme pour se diriger vers le centre de la Terre) puis n'en bougera pratiquement plus.

Au total, rien de bien inhabituel, que le laboratoire soit immobile ou en mouvement. La raison ? C'est que *la pesanteur terrestre ne cesse d'agir et de manifester ses effets.*

Et en impesanteur, alors ? Nous y venons. Le laboratoire — toujours lui — est tranquillement posé à la surface terrestre quand soudain... la Terre s'entrouvre et il entame une descente vertigineuse à l'intérieur du puits (évoqué précédemment) où le vide a été fait (pour éviter toute résistance atmosphérique) : il tombe en chute libre et, entre ses murs, c'est l'état d'impesanteur. Son passager prend-il conscience de ce changement d'état ? Constate-t-il quelque chose d'anormal ?

Oh ! que oui ! Dans son corps, tout d'abord, qui est le siège de modifications importantes : sur le système cardiovasculaire (nouvelle répartition de la masse sanguine, déplacement de sang et de liquides organiques (11) vers les parties supé-

(11) Il faut toutefois signaler la possibilité d'une compensation partielle de cet effet par application d'une pression négative à la partie inférieure du corps.

C'est d'ailleurs une technique (connue sous le signe **LBNP**, *Lower Body Negative Pressure*) utilisée en médecine spatiale à des fins diverses : pour contrecarrer les effets circulatoires de l'impesanteur et pallier le manque de charge gravitationnelle à bord des stations Saliout (combinaison Tchibis des Soviétiques ; voir El, n° 15, p. 6). Les Américains, eux, y virent un moyen de suivre le processus de déconditionnement des astronautes au terme des missions Skylab.

rieures, ce qui induira des perturbations du système de contrôle neuro-hormonal), sur le squelette et les muscles (qui n'ont plus à « supporter » le poids du corps), sur l'appareil de l'équilibration enfin.

En impesanteur, deux des trois sources d'informations contribuant au maintien de l'équilibre (d'une part, *le système nerveux* et ses divers capteurs reliés, entre autres, à la peau, aux articulations et aux muscles, d'autre part, *l'appareil vestibulaire* — qui détecte les accélérations angulaires et linéaires — situé dans l'oreille interne) sont perturbées ; la troisième, la *vision*, n'étant pas altérée. Pour notre cobaye, il en résulte une sensation très particulière (12) : il ne perçoit plus ni haut ni bas, son corps ne pèse plus, ses membres non plus ; il éprouve la sensation de flotter.

Mais ses fonctions vitales ne sont pas affectées : il voit, il respire, il entend ; au prix de précautions particulières il peut s'alimenter. (Pour plus de détails sur les différents aspects de la vie en impesanteur — modifications physiologiques, travail, sommeil, loisirs, nutrition, élimination des déchets, santé, aspects psychologiques — nous renvoyons le lecteur à l'article *L'Homme dans l'espace* paru dans EI, n° 15, 1^{er} trimestre 1979.)

Par contre, attardons-nous sur le comportement des objets du laboratoire. Voulant renouveler l'expérience faite sur Terre, notre cobaye s'empare de sa gomme et ouvre la main pour la laisser tomber : *elle ne bouge pas*. Pourquoi ? Comme tous les objets du laboratoire, elle est déjà soumise à une chute libre, alors le fait que la main soit ouverte ou fermée ne change rien à son mouvement. (Par rapport au laboratoire, pris comme référentiel, il y a compensation entre force d'inertie et force gravitationnelle. C'est au centre d'inertie du laboratoire que cette compensation est le mieux réalisée, mais on sait bien qu'elle n'est pas parfaite en raison d'autres forces perturbatrices, par exemple la traînée atmosphérique.)

Etonné, il cherche à l'éloigner de lui et lui imprime une brève poussée : elle décrit une trajectoire rectiligne (dans le sens de la poussée) jusqu'à heurter une paroi puis rebondit avant d'entreprendre une course complexe. Pourquoi ? C'est là un comportement dont rend compte la loi fondamentale de la dynamique (voir EI, n° 25, p. 8) : à une impulsion fait suite un mouvement

(12) Selon les individus, les sensations éprouvées vont de l'euphorie, du bien-être physique et psychique à une forte angoisse (sensation de chute ininterrompue, vertiges accompagnés de nausées, désorientation totale,...). Toutefois ces divers troubles ne se manifestent pas chez les cosmonautes qui sont sélectionnés pour leur résistance à la désorientation et, de plus, subissent un entraînement approprié préalable.

rectiligne (13). Dans notre cas pourtant la résistance de l'air du laboratoire viendra à bout de ce mouvement qui ne se poursuivra pas indéfiniment bien que de nouvelles forces parasites puissent remettre la gomme en mouvement.

Souhaitant se désaltérer notre cobaye s'empare du verre que l'on suppose encore posé sur la table, ce qui est loin d'être évident. Arrêtant le verre à hauteur de ses lèvres, il verra le liquide poursuivre son mouvement : l'eau va quitter le verre, vraisemblablement lui heurter la face et se fractionner en volumes de petites dimensions tendant plus ou moins à prendre la forme de sphères qui flottent autour de lui. Pourquoi ? Parce que contrairement à ce qui se passe au sol, ce ne sont plus les forces de volume (le poids) qui s'imposent mais celles de surface : c'est *la tension superficielle qui est responsable de la forme sphérique qu'ont tendance à adopter tous les liquides en impesanteur* (voir p. 23 le chapitre consacré aux liquides).

N'y tenant plus, le passager veut se lever et pour cela prend appui sur ses jambes... ce qui le fait quitter rapidement son siège et le sol : il s'élève vers le plafond ! Pourquoi ? Parce que toute action, même minime, engendre une force de réaction dont l'effet est souvent spectaculaire en impesanteur. Dans cet état, un objet n'est plus « plaqué » contre son support par la gravité. Le simple contact peut être maintenu, mais la moindre perturbation va le séparer de son support et il va errer à travers la cabine... (Sur Terre, quand pour quitter un siège nous prenons appui sur nos pieds, notre poids nous maintient tou-

(13) A ce propos, précisons que si, en impesanteur, un objet n'a plus de poids, *il possède toujours une masse d'inertie*. Il ne faut pas imaginer que des astronautes, en impesanteur autour de la Terre, déplaceront aisément et rapidement de très lourds objets... Tout objet oppose en permanence une résistance à toute modification de son état de mouvement ou d'immobilité (c'est l'inertie); et pour déplacer ne serait-ce qu'une caméra de télévision *un astronaute doit fournir un certain effort*, l'effort à accomplir dépendant de l'accélération voulue.

En effet, pour déplacer un objet de masse m , il faut lui communiquer une accélération \vec{a} , donc appliquer une force \vec{F} telle que $\vec{F} = m\vec{a}$. Et l'effort que doit fournir l'astronaute correspond au travail de \vec{F} .

Plus la masse est grande, plus la force nécessaire pour lui communiquer une accélération donnée doit être grande. Plus l'accélération est faible, plus la vitesse obtenue au bout d'une durée donnée est faible. Et plus la vitesse est faible, plus le déplacement obtenu au bout d'une durée donnée est faible.

jours *contre* le sol. En impesanteur, ce même mouvement revient à nous éloigner vivement du plancher !)

Pour cette raison, tous les objets qui n'étaient pas fixés vont être dispersés en peu de temps à travers le laboratoire. GAGARINE, le premier homme de l'espace, commentait ainsi son expérience :

Arraché au plancher, je suis resté suspendu entre plancher et plafond. (...) Tout est devenu soudain plus léger. Mes bras, mes jambes, tout mon corps semblaient n'être plus à moi. Ils ne pesaient rien. Je n'étais ni assis ni couché, je flottais. Et les objets non arrimés planaient, eux aussi, je les observais comme en rêve. (...) Les gouttes de liquide sorties d'un tuyau avaient pris l'aspect de billes, elles se déplaçaient librement dans l'espace et, au contact des parois de la cabine, y adhéraient comme de la rosée à une fleur. (...) (14)

C'est ainsi d'ailleurs qu'ayant égaré son crayon, « parti » en un endroit inaccessible de la cabine, GAGARINE dut dicter ses notes à un magnétophone.

Car, bien sûr, tout ce qui vient d'être décrit par le biais de cette expérience fictive mettant en scène un laboratoire en chute libre dans un puits *est valable pour tout véhicule spatial* soumis à la seule influence de la gravitation.

Un milieu expérimental différent.

Alors que les processus physiques ou biologiques ont été bien étudiés en hypergravité ($g > g_0$) il n'en est pas de même en hypogravité ($g/g_0 < 1$) principalement aux très faibles niveaux de gravité ($g/g_0 < 0,001$) (15).

La diversité des modifications physiologiques observées sur l'organisme humain montre la richesse du champ d'investigations qui s'offre aux chercheurs concernés par les problèmes de survie et d'adaptation de l'Homme dans l'espace. Mais il sera tout aussi intéressant de soumettre à ces conditions particulières des représentants du règne animal ou du règne végétal. L'ensemble de ces recherches spatiales qui touchent aussi bien à la médecine qu'à la biologie (zoologie, botanique,...) s'insère dans ce qu'on appelle les *sciences de la vie* (16). Elles se proposent d'étudier l'influence

(14) *La route de l'espace*, Youri GAGARINE, Prosvéchtchénié, Moscou, 1961, pp. 160-162.

(15) g_0 correspond à l'accélération de la pesanteur terrestre au niveau de la mer et g à celle obtenue naturellement ou artificiellement du lieu de l'expérience.

(16) *Les sciences de la vie et la science des matériaux dans l'espace* ont été largement développées dans le numéro 28 d'Espace Information qui traitera des **recherches en microgravité**.

de la pesanteur sur les organismes vivants (dont l'Homme) au cours de leur évolution et pendant la période de maturation ou sur le fonctionnement normal d'un organisme.

Second grand domaine d'études mettant à profit les particularités de l'impesanteur, la *science des matériaux* (16). En effet, de curieuses et importantes modifications apparaissent lorsqu'on examine de plus près le comportement de la matière. Qu'observe-t-on lorsque s'établit une pesanteur très réduite ? D'une part, la disparition de phénomènes admis comme « naturels » sur Terre, d'autre part, l'apparition de phénomènes inobservables en temps normal (lorsque règne une pesanteur normale) ; de secondaires certains mécanismes deviennent prépondérants.

Ces modifications sont particulièrement sensibles pour certains processus physiques ou chimiques (de type métallurgique) mettant en jeu au moins une solidification d'alliages, séparation électrocinétique de substances biologiques,... En impesanteur, ces processus vont se dérouler dans des *conditions très différentes* de celles rencontrées sur Terre : leur étude fait l'objet des recherches en science des matériaux dans l'espace.

Recensons les principales différences constatées :

★ **absence des phénomènes de séparation** observés, sur Terre, dans les systèmes hétérogènes (une phase fluide et des éléments solides, liquides ou gazeux) du fait des écarts de densité. Il s'agit de la *sédimentation* (précipitation de matière dissoute ou en suspension) et de la *poussée d'Archimède* (en anglais : *buoyancy*) qui, sur Terre, sont dominantes dans tous les systèmes fluides : ici-bas, c'est bien connu, dans un milieu liquide, le « plus léger » monte et le « plus lourd » descend. (En impesanteur, au contraire, ceci ne se produit plus, lourd et léger n'ayant plus de sens.)

Avantage évident : en impesanteur on peut espérer disposer de mélanges qui, sur Terre, évolueraient rapidement d'une façon défavorable (liquides thermodynamiquement immiscibles, suspensions de particules solides ou de bulles gazeuses au sein d'un fluide (17),...). Et ces mélanges pourront être solidifiés sans séparation ni ségrégation (18). Pour les scientifiques et les techniciens, c'est l'espérance d'obtenir des matériaux ou alliages impos-

(17) Un film réalisé lors d'une mission spatiale sur Skylab montre un astronaute en train de souffler, à l'aide d'une paille, une grosse goutte d'eau (puis une bulle d'air à l'intérieur !) qui se met ensuite à flotter librement dans la station...

sibles (ou difficiles) à produire sur Terre et intéressants par leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques, magnétiques ou autres.

En contrepartie, dans l'espace, les inclusions gazeuses seront plus difficiles à éliminer (sur Terre le dégazage a lieu naturellement) et l'existence de phénomènes secondaires rendra quasiment impossibles la stabilisation d'une répartition de particules dans un fluide et la suppression de tout mouvement interne. De toute façon, il ne faut pas croire que les particules puissent demeurer immobiles : une publication récente de l'ESA (19) a recensé dix-neuf mécanismes pouvant être responsables du mouvement d'une particule au sein d'une phase fluide en impesanteur !

★ **disparition du phénomène de convection naturelle dans les fluides** (20). Sur Terre, ce phénomène résulte de la formation de zones plus ou moins denses, les plus lourdes tendant à descendre, les plus légères à monter.

On lui doit — entre autres — le mouvement des masses d'air chaud et froid de l'atmosphère, plus prosaïquement celles d'un appartement, ou encore le brassage naturel des liquides (par exemple les zones chaudes et froides de l'eau des océans mais aussi de celle contenue dans une casserole placée sur une plaque chauffante.)

Dans le cas des liquides — qu'il s'agisse de substances naturellement liquides à la température ambiante ou de substances fondues —, des variations de composition ou de concentration (dues à des réactions chimiques, à des variations de tempéra-

(18) En fait le processus est plus compliqué qu'on ne le pensait initialement : outre la gravité, beaucoup d'autres forces entrent en jeu comme l'ont montré de récentes expériences sur fusées-sondes.

On sait, en effet, qu'un liquide simple constitué d'une seule phase demeure immobile en impesanteur tandis que les liquides non miscibles, à deux phases, sont encore animés de mouvements internes mal connus dus à des interactions physiques et physico-chimiques aux limites de phase.

(19) *Challenges and perspectives of microgravity research in space*, par Y. MALMÉJAC, A. BEWERSDORFF, I. DA RIVA et L. G. NAPOLITANO, ESA BR-05, 1981, p. 34.

(20) Du moins le phénomène de convection régi par la gravité car d'autres effets convectifs secondaires peuvent apparaître en raison des gradients de tension superficielle, des variations de volume, de l'application d'un champ électrique ou magnétique externe... Ils peuvent limiter les avantages escomptés.

ture,...) sont à l'origine d'écarts de densité qui donnent naissance à une *circulation* dite *convective* favorisant le mélange du système liquide.

Mais en impesanteur, « lourd » et « léger » n'ont plus de signification et ce type de convection disparaît.

Pour cette raison, une expérience aussi banale que *la combustion d'une bougie ne peut se poursuivre normalement en impesanteur*. Rapidement la flamme s'entoure d'air chaud qui ne s'élève pas. Cet air chaud, riche en produits de combustion, empêche l'apport d'oxygène et provoque l'extinction de la flamme.

C'est également pour cette raison qu'est assurée la ventilation de l'atmosphère des stations orbitales afin de permettre l'uniformisation de la température ambiante et de favoriser le brassage du mélange gazeux respiré par les cosmonautes.

En impesanteur, l'absence de convection se traduira par la suppression de nombreux processus physiques modifiant le comportement diffusif des fluides. Grâce à cela, les chimistes peuvent espérer incorporer à un cristal en cours de formation une substance dopante d'une façon homogène lui donnant ainsi des propriétés uniformes (pour des applications possibles en électronique notamment);

★ suppression de la pression hydrostatique. Sur Terre, elle est notamment responsable de la tendance des liquides à se déformer sous l'effet de leur propre poids (un volume donné supportant le poids de ce qui est au-dessus de lui).

Le même phénomène existe aussi chez les solides et, pour ne considérer qu'un exemple à très grande échelle, l'impesanteur offrira la possibilité d'ériger dans l'espace de vastes structures (peut-être métalliques) qui — sur Terre — s'écrouleraient du fait de leur simple poids (voir EI, n° 22, p. 15).

Autre exemple, les panneaux solaires de grande envergure des satellites qui se briseraient au cours des essais si l'on tentait de reproduire au sol les manœuvres de déploiement prévues dans l'espace.

Ici-bas, la pression hydrostatique peut intervenir de façon défavorable lors de solidifications particulières (lentilles optiques, miroirs de télescopes,... (et avoir une influence nuisible sur la qualité des produits élaborés);

★ possibilité d'une lévitation naturelle de la matière. Sur Terre, pour fondre une substance minérale, pour la porter à des

températures élevées, on se sert d'un creuset. Dans l'espace cette opération pourra être faite « sans creuset » (*containerless* en anglais). Autrement dit, en impesanteur, il sera possible de maintenir une substance liquide ou solide dans une région donnée de l'espace sans contact physique avec le moindre support.

Sur Terre, en raison de la pression hydrostatique, un liquide n'a pas de forme propre et doit être contenu par un récipient. Le contact entre la substance à étudier et les parois du récipient peut être à l'origine de diverses interactions (contamination parasite, échanges thermiques, sites déclenchant prématurément une cristallisation,...) qu'on peut, dans certains cas, chercher à éliminer.

Par ailleurs, les propriétés de nombreux matériaux à l'état pur et les propriétés thermodynamiques à hautes températures de la plupart des matériaux sont encore inconnues en raison des limites imposées par la présence (c'est-à-dire le contact) de leur creuset. Il n'y a encore que peu de données sur les enthalpies, les chaleurs massiques, les densités, les viscosités et les tensions de surface des systèmes liquides au-dessus de 1000 °C ; c'est dire l'intérêt présenté par la possibilité d'une lévitation naturelle...

Grâce à l'impesanteur, une substance solide pourra être fondue, manipulée, solidifiée et étudiée sans aucun contact avec un corps étranger. Pour confiner l'échantillon, on fera appel à des procédés acoustiques, électromagnétiques ou électrostatiques.

Le comportement des liquides en impesanteur.

L'état liquide correspond à un état de la matière dans lequel l'agencement à grande distance des molécules n'est pas stable et que l'on peut caractériser par :

- la possibilité de déformations importantes sous l'effet de très faibles forces ;
- une incompressibilité pratiquement nulle ;
- l'existence de forces internes de frottement.

Dans les conditions de température, de pression et de gravitation qui règnent à la surface de la Terre, un liquide reste à l'intérieur du récipient qui le contient : il en épouse la forme et est séparé de l'air environnant par une surface plane bien délimitée, la *surface libre*.

Toute fraction d'un liquide peut être soumise à des forces de différentes natures :

★ **forces de volume** (force de gravitation due à un champ de gravité ; forces d'inertie dans un repère non galiléen ; éventuellement action d'un champ électrique ou magnétique) ;

★ **forces d'entraînement ou de contact** (réactions des parois du récipient sur la masse liquide contenue);

★ **forces de viscosité** (qui apparaissent au sein du liquide lors du déplacement relatif de deux éléments contigus. Ces forces de frottement sont sans influence sur les états d'équilibre statique);

★ **forces de surface ou capillaires** (21) (dues aux forces de liaison intermoléculaires; au sein du liquide, la somme de ces forces est nulle. Par contre, ces forces se manifestent aux frontières de la masse liquide, (c'est-à-dire à sa surface).

Deux cas sont à considérer :

- * deux phases sont en présence aux frontières du liquide (cas d'un mélange de deux liquides non miscibles ou d'un liquide en contact avec un gaz) : le liquide se comporte alors comme s'il était couvert d'une membrane élastique sous tension uniforme laquelle agit tangentiellement à la surface et tend à donner à celle-ci une aire minimale. On définit un coefficient de **tension superficielle** (cette tension est un rappel élastique équivalant à une force par unité de longueur) qui est une caractéristique thermodynamique (fonction de la température et de la teneur en impuretés) des deux milieux en présence ;
- * la surface de séparation des deux phases (liquide/liquide ou liquide/gaz) est en contact avec une paroi solide. Dans ce cas, il s'établit un équilibre entre les forces de cohésion du liquide et les forces d'adhésion liquide/solide. La valeur de l'angle de contact détermine le **caractère mouillant ou non mouillant** du liquide (on parle de phénomène de mouillabilité).

Selon que telle ou telle catégorie de forces sera dominante, on définira différents régimes de comportement du liquide. Pour simplifier, limitons-nous aux états d'équilibre statique (absence de mouvement du liquide) : les seules forces qui agissent sont celles de gravité et celles de surface.

Que se passe-t-il en absence de gravité (22) ? Ce sont les forces de surface qui vont s'imposer.

Dominant sur Terre, l'effet de pesanteur devient alors négligeable vis-à-vis des forces de cohésion et d'adhésion du liquide.

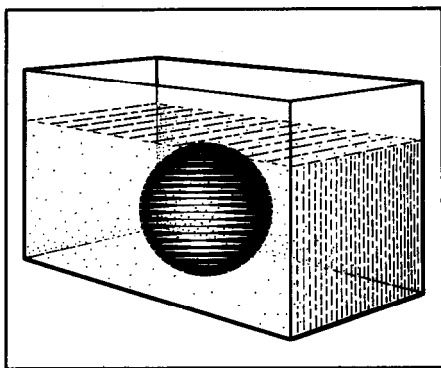
(21) Ainsi nommées parce qu'elles se manifestent plus nettement dans les **tubes capillaires**, c'est-à-dire de très petite section (littéralement : de la grosseur d'un cheveu; du latin *capillus* : cheveu).

(22) Sous-entendu : constatée par les occupants d'un véhicule spatial en impesanteur, voir p. 2.

Ce sont les phénomènes de tension superficielle et de mouillabilité qui détermineront la configuration du liquide, celle d'énergie minimale.

C'est ainsi qu'en impesanteur et en absence de contact avec des parois (cas d'un liquide en lévitation), tout volume de liquide tendra vers sa configuration d'énergie minimale, la plus stable : *la forme sphérique*. (Pour un volume donné, c'est la sphère qui offre la surface la plus faible.)

A titre d'illustration, on peut rappeler que c'est sur ce comportement qu'est basée la fabrication des plombs de chasse : de petites quantités de métal fondu mises en chute libre dans une installation appropriée adoptent la forme sphérique et se solidifient avant d'atteindre le sol.



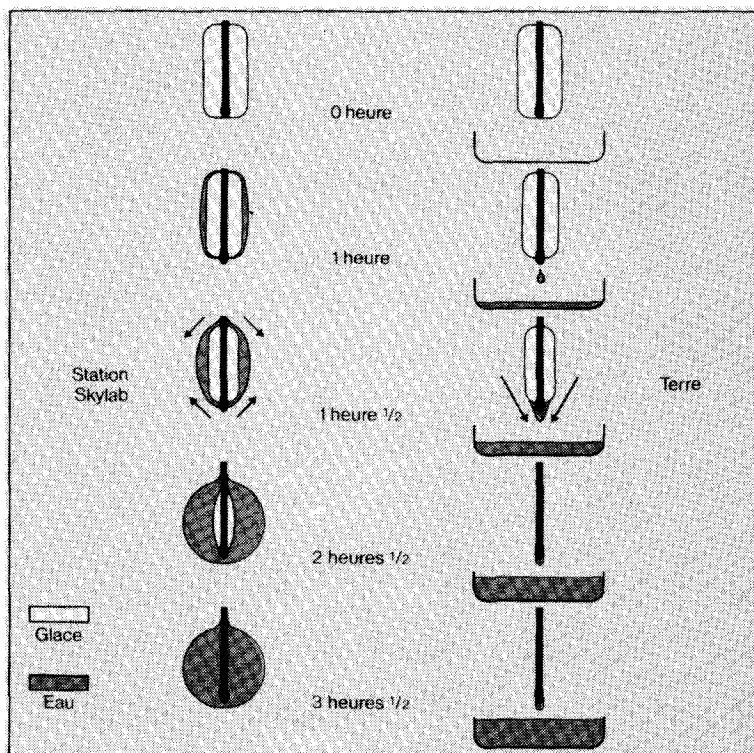
Cette expérience est une réplique de celle publiée en 1861 par Plateau : au moyen de deux liquides de même densité, mais non miscibles, on peut simuler — au sol — l'absence de pesanteur grâce à la flottabilité d'un liquide dans l'autre.

La masse liquide isolée au sein du second fluide adopte la configuration sphérique. Une précision : la notion de haut et de bas est conservée, ce qui n'est pas le cas en impesanteur.

(Doc. EI - Boltana/Reilles).

Sur le plan pratique, les complications qui résultent de ce comportement « insolite » sont évidentes. Comment contenir un liquide en impesanteur ? Comment le faire couler ? (Sur Terre il suffit de libérer un passage au point le plus bas de son récipient.) Comment, aussi, l'empêcher de se disperser ?

Pas question, bien sûr, de laisser un liquide à l'air libre dans une station orbitale : les boissons — maintenues dans des récipients clos — seront ingérées par aspiration, la toilette se



Considérons deux glaçons constitués autour d'un coton-tige. Le premier fut placé en impesanteur (dans Skylab, à gauche), le second subit une pesanteur normale (sur Terre, à droite). Lequel fondit le plus rapidement ?

Dans le premier cas, l'eau formée ne tombe pas mais adhère au glaçon qui se trouve entouré d'une sphère liquide laquelle retarde la fusion de la partie centrale.

Dans le second cas, les gouttelettes d'eau tombent au fur et à mesure de leur formation d'où une fusion plus rapide du glaçon.

(Doc. EI - Boltana/Reilles d'après un dessin NASA).

fera à l'aide de serviettes humides (23), le brossage des dents se fera bouche fermée (pendant un temps des industriels américains avaient songé à une pâte dentifrice comestible), etc.

(23) Sur les stations spatiales récentes, il faut noter l'existence d'une douche que l'on prend à l'intérieur d'une enceinte close, l'eau étant projetée en fines gouttelettes et aspirée à la partie opposée.

Comme l'expliquait J.-L. CHRÉTIEN lors d'une conférence faite au Centre spatial de Toulouse, (à la fin de 1982, en cas de fuite accidentelle d'un liquide dans la station, les cosmonautes n'ont d'autres ressources que d'éponger rapidement au moyen de pièces de tissu absorbant les fractions de liquide flottant dans l'atmosphère de la station...

Mais les difficultés *sur le plan technologique* ne sont pas moindres. On sait, en effet, que le fonctionnement de tout satellite requiert la présence d'un certain nombre d'équipements utilisant des liquides (24), en particulier le système propulsif (25) servant à l'acquisition et aux corrections d'orbite (26) ainsi qu'à la stabilisation du véhicule (contrôle de son mouvement autour du centre d'inertie pour son pointage sur la Terre, sur telle planète ou encore sur un secteur donné du ciel,...), etc.

(D'autres systèmes utilisent des liquides, en moindre quantité, pour la régulation thermique, la production d'eau et d'électricité — missions Apollo, Navette —, etc.)

En l'absence de précautions particulières, le liquide se répartirait au hasard dans le réservoir (en fait, de préférence le long

(24) Pour donner un ordre de grandeur des masses liquides embarquées, on peut indiquer que le futur satellite franco-allemand de télévision directe, TDF-1, pèsera au lancement environ deux tonnes dont **la moitié (!)** en substances liquides (ergols pour le moteur d'apogée, le contrôle d'attitude et d'orbite).

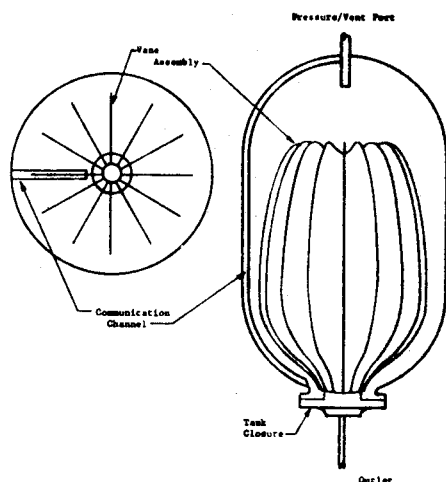
L'importance des problèmes liés à la présence des liquides n'est d'ailleurs pas nécessairement fonction du rapport des masses liquides/solides : dans les années soixante-dix, un satellite américain (ATS-F), stabilisé par rotation sur lui-même, a été « perdu » pour quelques dizaines de grammes de liquide malencontreusement disposés dans un calorimètre (système utilisé pour le contrôle thermique).

C'est un cas typique d'*instabilité dynamique* due à la dissipation d'énergie : le satellite ne tournait pas autour de son axe de plus grande inertie et était donc dans une configuration instable. Les mouvements de liquide dissipant de l'énergie ont provoqué le « basculement » du satellite vers une configuration stable à savoir la rotation autour de l'axe de plus grande inertie, le moment cinétique étant conservé tant en module qu'en direction ; c'est ce que les spécialistes appellent le « passage en flat spin ».

(25) Rappelons que le principe des propulseurs chimiques utilisés à cette fin consiste à générer des gaz à haute température à partir d'ergols stockés sous pression donc à l'état liquide (peroxyde d'azote-UDMH, hydrogène-oxygène, hydrazine...).

(26) Pour la mise et le maintien à poste des satellites géostationnaires, voir El, n° 16, p. 16 ; pour les satellites héliosynchrones, voir El, n° 20, p. 19.

des parois) et serait dans l'impossibilité d'alimenter régulièrement les propulseurs : il faut donc *assurer sa contention d'une façon adaptée et le contraindre à rester en contact permanent avec l'orifice de vidange*. Tâche d'autant plus ardue qu'il peut, en outre, exister des mouvements perturbateurs, des oscillations, des ballottements du liquide en raison d'interactions avec les mouvements propres du véhicule spatial : vibrations, accélérations, rotations,...



Coupe transversale (à gauche) et longitudinale (à droite) du réservoir à contention capillaire du système propulsif du module orbital de la sonde américaine Viking. (Doc. C.N.E.S.).

L'alimentation de l'orifice de puisage étant assurée par un dispositif adéquat, l'expulsion des liquides vers les propulseurs se fera grâce à la pressurisation du réservoir (un gaz étant lui-même stocké à cet effet dans le réservoir d'ergol). Pour des raisons d'optimisation, les réservoirs ont une forme souvent proche de la sphère.

Quant au moyen d'*assurer la présence de l'ergol près de l'orifice de puisage*, différentes solutions technologiques ont été trouvées.

Par exemple, dans le cas des satellites géostationnaires *spinés* (stabilisés par rotation rapide sur eux-mêmes), on peut utiliser l'effet centrifuge pour assurer l'alimentation en ergol (c'est le cas retenu pour les satellites européens Météosat).

Pour les satellites à stabilisation trois axes, on peut utiliser des réservoirs dotés d'une paroi mobile (membrane ou soufflet) qui permet d'isoler le gaz du liquide lequel sera chassé vers les propulseurs (les deux satellites Symphonie sont équipés d'un dispositif de ce type à soufflet métallique).

Autres exemples, les satellites européens OTS et le satellite français Télécom-1 (à lancer en 1984) sont dotés de membranes en élastomère.

Toutefois, les dispositifs le plus ingénieux sont sans doute ceux du type à **contention capillaire** (27) dont les premiers modèles ont été mis au point aux Etats-Unis au début des années soixante. Différentes variantes ont été réalisées selon le pays et les programmes.

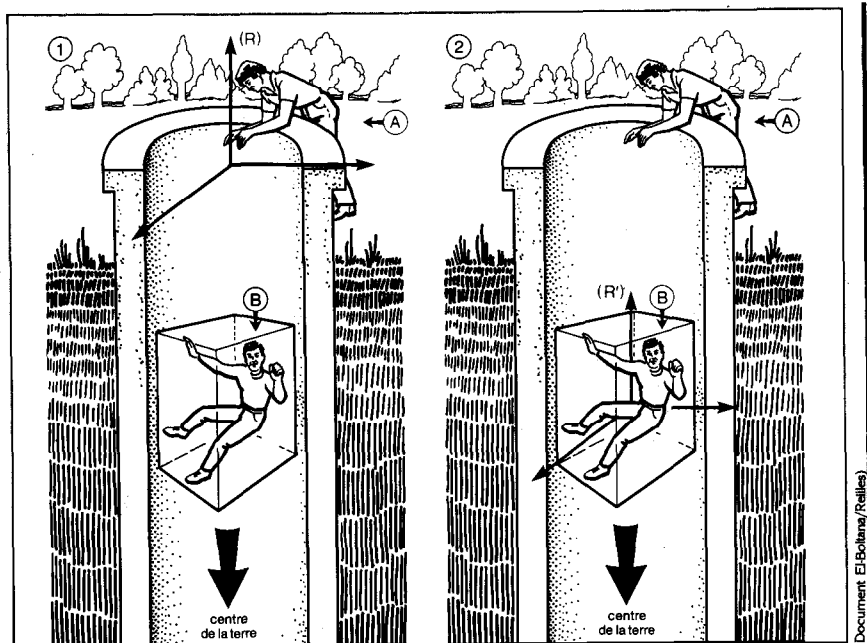
Leur fonctionnement repose sur la présence, au sein du réservoir, d'un dispositif collecteur de liquide (en liaison avec l'orifice de vidange) constitué d'un ensemble de toiles ou de parois métalliques (percées ou non) et de tubes de faible section — reliés entre eux — qui crée un réseau dense de structures que le liquide, du fait des forces superficielles, va investir. Dans ces conditions, on est en mesure d'assurer l'alimentation des propulseurs en permanence tout au long de la mission.

Par le passé, les sondes américaines Mariner-9 et les satellites Intelsat-5 — pour ne citer qu'eux — ont été équipés de tels réservoirs. Du côté français, les satellites SPOT-1 et TDF-1 (à lancer en 1985) utiliseront aussi ce type de réservoir à contention.

(27) Le principe de la **contention capillaire** consiste à maintenir un liquide au sein d'un réservoir grâce à l'existence de forces de surface entre ce liquide et les parois du réservoir. Ces mêmes forces sont également utilisées pour acheminer le liquide vers l'orifice de soutirage.

ANNEXE 1

**CHUTE LIBRE OU IMPESANTEUR ?
C'EST UNE QUESTION DE POINT DE VUE...**



Document El Bolana/Reilles

Point de vue de A (fig. 1).

Je suis A, observateur posté à l'ouverture du puits dans lequel « tombe » la cabine où a pris place mon ami B. (Pour supprimer la résistance de l'air, on a fait le vide dans le puits.)

Je suis immobile dans le repère (R) qui est solidaire de l'écorce terrestre. Je constate que la cabine, soumise à l'attraction de la Terre (*), est en mouvement pratiquement rectiligne et uniformément accéléré : j'en conclus qu'elle est en chute libre... Il en est de même de mon ami B.

Je suis formel ; pour moi, il n'y a pas d'autre explication possible : B est en chute libre.

(*) Pour plus de clarté, on néglige les forces d'inertie d'entraînement et de Coriolis qu'il conviendrait de prendre en compte puisque (R) n'est pas galiléen.

Point de vue de B (fig. 2).

Je suis B, observateur enfermé dans la cabine qui « tombe » à l'intérieur du puits. Mon cadre de référence ? Eh bien, je n'ai guère le choix... Il est matérialisé par les parois de cette cabine, c'est le repère (R'). Les physiciens disent que ce repère n'est pas galiléen.

Grâce à son talkie-walkie, mon ami A me dit qu'il voit ma cabine descendre de plus en plus vite vers le fond du puits. Il me demande ce que j'éprouve...

Sans vouloir mettre en doute sa parole, je dois bien avouer que j'ai du mal à le croire car moi je n'ai l'impression d'aucun mouvement ! Bien sûr, je dois préciser qu'il n'y a aucune ouverture me permettant de voir à l'extérieur de ma cabine.

Cependant, ici, *tout n'est pas comme d'habitude !* J'ai perdu toute sensation de poids et c'est un peu comme si dans ma cabine la gravité n'existait plus. L'attraction terrestre, si banale à la surface du sol, semble ne plus s'exercer. C'est ainsi que je « flotte » dans ma cabine. Si je prends appui sur le plancher, je monte vers le plafond ; si je prends appui sur le plafond, je descends vers le plancher. Mais dès que je parviens à me stabiliser, eh bien je demeure immobile par rapport aux parois de ma cabine...

Si je cherche à me débarrasser d'un objet que je tiens dans la main, il ne « tombe » pas vers le plancher... Tout cela est bien étonnant !

Pour moi, il n'y a pas de doute : je suis en train de connaître ce que les physiciens appellent l'état d'impesanteur.

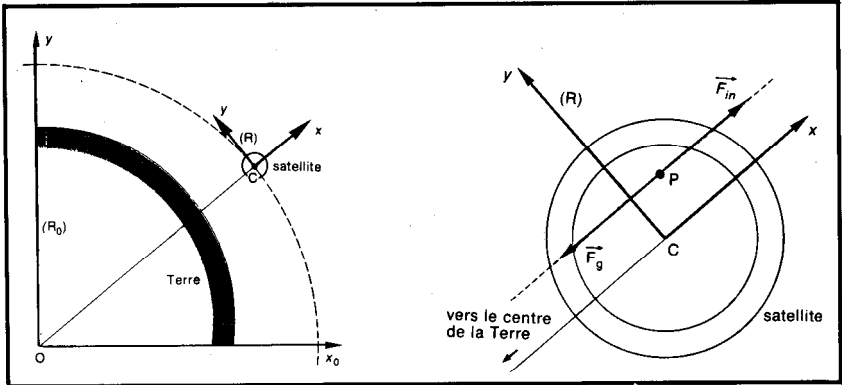
Qui, de A ou de B, se trompe ? A la vérité, ils ont tous deux raison ! Pourquoi ? Tout simplement parce que chacun raisonne dans son propre cadre de référence, par rapport à son propre repère.

Et c'est l'une des ambiguïtés du phénomène d'impesanteur que d'être perçu de façon différente par celui qui est dans le référentiel en mouvement et celui qui, situé dans un autre repère, peut constater le mouvement de ce référentiel.

Aucune des deux descriptions n'est plus « vraie » que l'autre : ce sont deux façons de rendre compte de la même réalité.

(Pour mémoire, rappelons le raisonnement similaire fait à propos du projectile lâché par un avion, voir EI, n° 25, p. 4.)

ANNEXE 2

COMMENT RENDRE COMPTE DE L'IMPESANTEUR
EXISTANT DANS UN SATELLITE ARTIFICIEL ?

Précisons d'abord les référentiels utilisés :

- le mouvement du satellite autour de la Terre (masse : M) est étudié dans le référentiel géocentrique (R_0) supposé galiléen ;
- le mouvement d'un objet dans le satellite est repéré par rapport au satellite lui-même qui constitue un référentiel (R) non galiléen. Au cours de son déplacement sur son orbite, le satellite demeure immobile par rapport aux axes du repère (R) .

Mouvement du satellite dans (R_0) .

Faisons l'hypothèse que la trajectoire du satellite est circulaire. Dans le référentiel (R_0) , la seule force extérieure s'exerçant sur le satellite est la force de gravitation.

Comportement d'un objet lâché dans le satellite.

Soit un objet ponctuel, de masse m , lâché en P dans le satellite, sans impulsion initiale. Quelles forces subit-il ? On raisonne dans le référentiel (R) . Deux forces s'exercent sur lui :

- la force de gravitation, due à la Terre :

$$\vec{F}_g = -g \cdot \frac{Mm}{(OP)^3} \cdot \vec{OP}$$

— la forme d'inertie d'entraînement :

$$\vec{F}_{in} = m\omega^2 \cdot \vec{OP}.$$

Ces deux forces sont de sens contraire et on démontrerait que leurs modules sont très voisins $\left(\omega^2 = \frac{g^M}{(OC)^3} \right)$. La somme

de ces forces, subie par P, est donc faible : en particulier, elle est nulle lorsque P coïncide avec C, le centre d'inertie du satellite.

En pratique l'objet de masse m n'est soumis qu'à une force négligeable et on peut considérer, en première approximation, que pour un observateur installé dans le satellite, se repérant par rapport au référentiel (R), **la pesanteur est quasiment nulle.**

Aux yeux d'un cosmonaute, un objet de petites dimensions, lâché à proximité du centre d'inertie de son véhicule spatial, demeurera pratiquement immobile par rapport aux parois, du moins pendant un intervalle de temps assez bref.

(Document extrait de *Fondements de la physique*, coll. A. CROS, Term. CE, 1980, p. 101, reproduit avec l'aimable autorisation des éditions Belin.)

ANNEXE 3

LES REPERES DE LA MECANIQUE NEWTONNIENNE

Le « temps » t est « absolu ». Il est le même dans tous les repères. L'horloge atomique permet de mesurer de façon satisfaisant ce paramètre t (il faut noter qu'en fait une horloge ne mesure pas le « temps » mais des durées : $\Delta t = t_2 - t_1$).

1. Le repère de Copernic.

Il a pour origine le centre d'inertie du système solaire et pour axes trois axes dirigés vers trois étoiles, ces trois axes formant un trièdre indéformable.

Il peut être *considéré comme galiléen.*

Tout repère en translation rectiligne et uniforme par rapport au repère de COPERNIC est galiléen.

2. Le repère de Képler.

Il a pour origine le centre d'inertie du Soleil et pour axes des axes parallèles à ceux de COPERNIC.

Le centre d'inertie du Soleil reste toujours très voisin du centre d'inertie du système solaire (à l'échelle du système solaire).

Le repère de Képler peut être considéré comme galiléen avec une très bonne approximation.

3. Les repères faisant intervenir la Terre.

Dans le repère de Képler, le centre d'inertie du système Terre-Lune décrit approximativement une ellipse.

Pour simplifier, on dit souvent que c'est le centre d'inertie de la Terre qui décrit lui-même une ellipse et que la Terre tourne autour de son axe SN par rapport aux étoiles.

Un repère lié à la Terre considérée comme un solide parfait, indéformable, n'est donc pas galiléen.

Néanmoins :

a) Un repère terrestre peut être considéré comme galiléen en première approximation.

A cette approximation, on néglige :

- la force d'inertie d'entraînement due au mouvement du centre de la Terre dans le repère de KÉPLER (*) ;
- la force d'inertie de CORIOLIS due à la rotation de la Terre autour de son axe ; la force d'inertie d'entraînement due à cette rotation est incluse dans le poids \vec{mg} .

Cette approximation est suffisante pour l'étude de la plupart des problèmes de mécanique terrestre.

Quelques exceptions.

Etude des marées, de la déviation vers l'est dans la chute des corps, des satellites terrestres, des gyroscopes, du pendule de FOUCAULT, des courants marins, des vents,...

b) Un repère ayant son origine au centre d'inertie de la Terre et pour axes des axes parallèles à ceux du repère de Képler (repère géocentrique céleste), peut être considéré comme galiléen en deuxième approximation.

(*) *Note de la rédaction du B.U.P.* : qui est d'ailleurs pratiquement compensée par les forces de gravitation dues aux astres, Soleil, Lune,...

Cette approximation est meilleure que celle du 3 a).

A cette approximation, on néglige seulement la force d'inertie d'entraînement due au mouvement du centre de la Terre dans le repère de KÉPLER (**).

Cette approximation est suffisante pour l'étude des exceptions mentionnées en 3 a), sauf pour l'étude des marées (***) .

Marcel EVENO.

(Extrait du *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 611, février 1979, pp. 660-662.)

(**) Même remarque que précédemment.

(***) *Note de la rédaction d'Espace Informaton* : c'est dans ce repère qu'est généralement étudié le mouvement des satellites artificiels.

ANNEXE 4

QU'EST-CE QUE LE POIDS ?

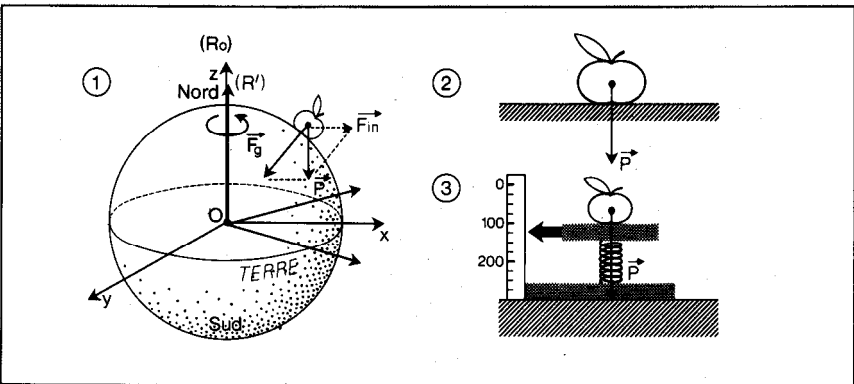


Schéma 1. Considérons une pomme reposant à la surface de la Terre. On peut l'étudier soit par rapport au repère géocentrique (R_0), que l'on peut considérer comme galiléen avec une approximation suffisante ici, soit par rapport au repère terrestre (R') lequel tourne autour de l'axe des pôles par rapport à (R_0); (R') n'est pas galiléen.

Supposons la pomme immobile par rapport à (R'). Dans le repère (R'), la pomme est soumise à la **force de gravitation** (\vec{F}_g), essentiellement la gravité terrestre, et à la **force d'inertie d'entraînement** (\vec{F}_{in}).

On démontre que : $F_{in} = m\omega^2 \cdot HM$ avec m : masse de l'objet, ω : vitesse angulaire de rotation de la Terre, HM : distance de l'objet à l'axe des pôles (voir EI, n° 25, p. 14).

On appelle **poids de la pomme** la somme (\vec{P}) de ces deux forces. Dans le cas de la Terre, F_{in} est relativement faible devant \vec{F}_g (à l'équateur, où sa valeur est maximale, elle est encore 300 fois plus faible). Autrement dit, sur Terre \vec{F}_g et \vec{P} sont pratiquement confondus (sur notre schéma, c'est intentionnellement qu'on a considérablement exagéré leur rapport), ce qui revient à admettre que gravitation et pesanteur sont ici assez comparables.

Le poids mesuré à la surface terrestre prend donc en compte une force d'inertie centrifuge qui vient en déduction de la gravité (sauf aux pôles où cette force d'inertie n'existe pas). Toutes choses égales par ailleurs, le poids d'un objet donné sera d'autant plus faible que la planète tournera plus rapidement sur elle-même.

Schéma 2. Dans la vie quotidienne, on appelle **poids** la force qui plaque un objet sur son support, ici à la surface du sol.

Schéma 3. Cette force attractive qu'exerce la Terre sur la pomme peut être mesurée. Dans notre exemple, la pomme repose sur un support mobile en contact avec le sol par l'intermédiaire d'un ressort compressible. Il est évident que notre instrument peut fournir une mesure de \vec{P} .

... ET L'IMPESANTEUR ?

Par définition, un champ d'impesanteur est réalisé dans tout système de référence (R') dans lequel la somme $\vec{F}_g + \vec{F}_{in}$ est nulle ou très faible devant \vec{F}_g , \vec{F}_{in} désignant la force d'inertie d'entraînement dans (R').

Le poids d'un corps au repos dans (R'), mesuré avec des appareils liés au système (R'), est alors nul ou voisin de zéro.

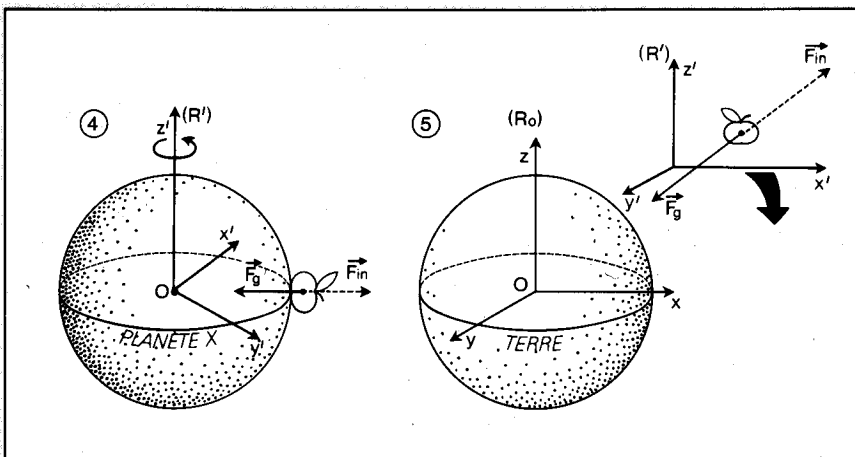
Schéma 4. Il illustre la possibilité pour les deux vecteurs \vec{F}_g

et \vec{F}_{in} de se compensent. Pour ce faire, il convient de placer l'objet à l'équateur (alignement des deux vecteurs) et d'envisager une planète, qu'on dénommera X (même masse et mêmes dimensions que la Terre), tournant bien plus vite autour de l'axe des pôles.

Le calcul montre que **sa rotation doit être environ 17 fois plus rapide** ; autrement dit, elle effectuerait un tour sur elle-même en un peu moins d'une heure et demie, contre 23 h 56 mn 4 s pour la Terre.

(Pour alléger le schéma, nous avons omis le repère R_0).

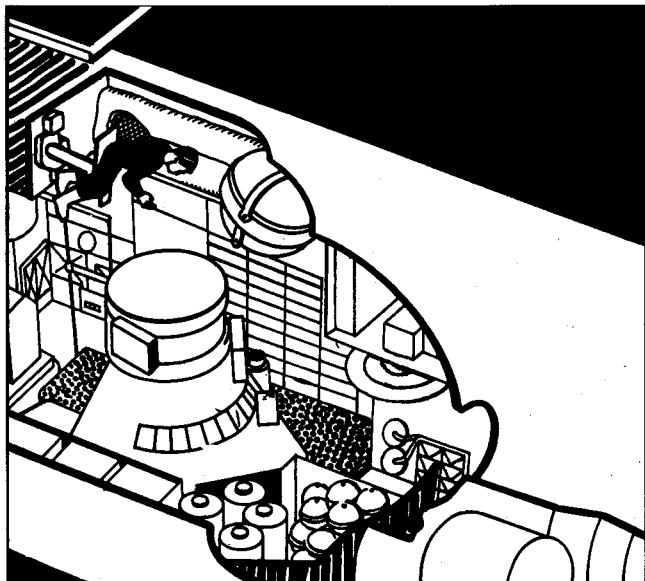
Schéma 5. Dans cet exemple-ci, l'objet n'est plus immobile par rapport à la surface terrestre, mais décrit une trajectoire gravitationnelle (ce peut être un satellite de la Terre ou simplement un objet qui tombe en direction de la Terre, la résistance de l'air étant négligée). Là encore, dans le repère (R'), on observe une compensation des forces \vec{F}_g et \vec{F}_{in} . C'est ce cas qui sera examiné en détail dans ce numéro. (Documents EI - Boltana/Reilles).



ANNEXE 5

COMMENT SE PESER DANS L'ESPACE ?

Il a été dit par ailleurs qu'une mission spatiale de longue durée à bord d'un laboratoire orbital n'était pas sans incidence



sur l'organisme — donc la santé — des hommes. Aussi une surveillance médicale est-elle régulièrement assurée par les cosmonautes eux-mêmes. Parmi les nombreux contrôles effectués figure, bien entendu, la pesée qui est un examen médical important.

Mais comment se peser dans l'espace alors que le poids est une notion qui n'a plus de sens ? Tout simplement en cherchant à mesurer... la masse des cosmonautes qui, elle, existe toujours.

A cette fin, la station soviétique Saliout-6 (ainsi que Saliout-7) disposait d'une **balance** installée au plafond (voir le schéma ci-après). Le principe de la pesée consiste à faire osciller la partie mobile d'un instrument sur laquelle prend place le cosmonaute ; la fréquence des oscillations étant en relation avec la masse du patient. Un étalonnage fait au sol, avant le vol, permet d'établir la relation fréquence/masse).

Au cours des vols de longue durée, l'opération de pesée est faite de deux à quatre fois par mois.

C'est vraisemblablement dans cette position que les occupants des stations spatiales Saliout procèdent à la détermination de leur masse.
(Doc. EI - Boltana/Reilles d'après une gravure soviétique).

ANNEXE 6

QUELQUES IDEES FAUSSES SUR L'IMPESANTEUR...

A la question : « **Pourquoi les occupants d'une station orbitale sont-ils en impesanteur ?** », il n'est pas rare de s'entendre répondre : « Parce qu'il n'y a plus d'air autour ! », ou bien : « Parce qu'ils sont très loin et que la Terre ne les retient plus », ou encore : « Parce qu'ils vont très vite, alors ils flottent »...

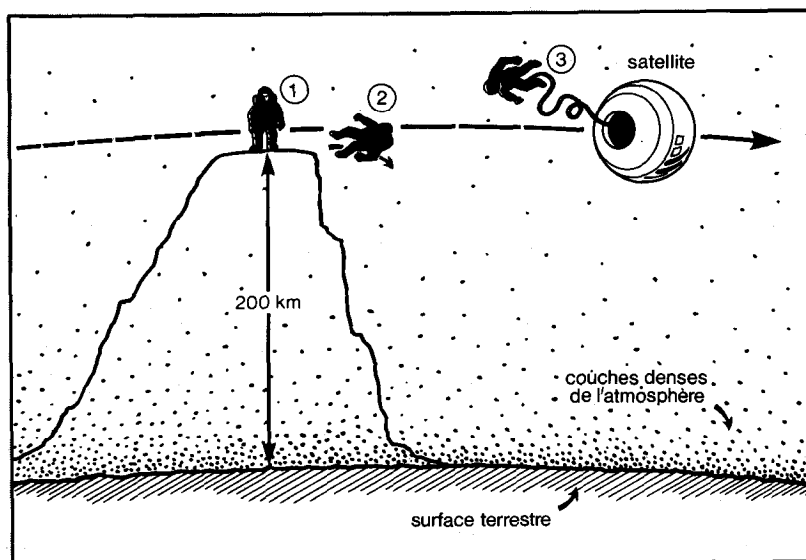
Avec cette annexe, nous voudrions faire un sort aux prétendues « explications » de ce type qui traduisent une mauvaise compréhension du phénomène d'impesanteur et qui sont autant d'idées reçues qu'il faut balayer...

★ **Ce n'est pas en raison de l'absence d'atmosphère à l'extérieur de leur station orbitale que les cosmonautes flottent au-dessus de leurs sièges !**

On retrouve là la confusion regrettable qui conduit certaines personnes à associer, d'une part, la présence d'atmosphère et l'attraction terrestre, d'autre part, le vide et l'absence d'attraction terrestre donc l'impesanteur. Rien n'est plus faux ! (*)

Le vide s'obtient simplement en extrayant l'atmosphère gazeuse d'un local ou d'une enceinte tandis que *l'impesanteur ne peut s'obtenir que par un mouvement de chute libre* ; ce qui n'a aucun rapport ! Pour s'en convaincre, il suffit de placer quelques objets à l'intérieur d'une cloche à vide pour constater qu'ils n'ont pas perdu leur poids pour autant...

(*) Cette affirmation mérite cependant d'être nuancée. Car il est vrai que pour rendre compte, dans certains cas, de l'absence d'atmosphère autour d'une planète ou d'un satellite naturel, on peut être amené à invoquer sa trop faible pesanteur incapable de retenir les molécules gazeuses, voir EI, n° 25, p. 17.



Expérience fictive destinée à dissiper certaines idées fausses sur l'impesanteur.

Soit trois hommes se trouvant sensiblement à une même distance au-dessus du sol, de l'ordre de 200 km, à l'instant où l'on s'intéresse à eux.

A cette altitude, il n'y a pratiquement plus d'atmosphère, aussi ont-ils revêtu une tenue protectrice de cosmonaute.

* **Le premier** se tient immobile au sommet d'une montagne de 200 km (sic, c'est de la fiction !) qu'il a escaladée ;

* **Le deuxième** est un désespéré qui, pour des raisons personnelles, se jette dans le vide depuis le même sommet ;

* **Le troisième** est passager d'un satellite artificiel qu'il vient de quitter pour se livrer à des activités extra-véhiculaires.

Combien d'entre eux sont en impesanteur ? Et pourquoi ? (La réponse est en page 41). (Document EI - Boltana/Reilles).

(Rappelons aussi l'exemple de la Lune qui n'a pas d'atmosphère mais possède néanmoins une pesanteur non négligeable : on ne flotte pas à la surface de la Lune !)

Mais il est vrai que ce mouvement de chute libre — générateur du phénomène d'impesanteur — peut être contrarié par diverses forces de frottement (gazeux ou liquide) d'où la néces-

sité d'un assez bon vide dans l'aire d'évolution du véhicule considéré (satellite, avion ou fusée en vol balistique, tour d'impesanteur).

Pour conclure, disons que l'absence d'atmosphère est — à quelques exceptions près — une condition nécessaire à l'obtention de l'impesanteur mais qu'elle n'est pas du tout une condition suffisante !

Réponses aux questions de la page 40.

* **L'alpiniste** (1) reste soumis à une pesanteur assez peu différente de celle qui existe au niveau de la mer (à 200 km, son poids a diminué d'environ 6 %). Bien entendu, il n'éprouve rien de particulier.

* **Le désespéré** (2) décrit une trajectoire balistique (comme le boulet de canon envisagé dans EI, n° 25, p. 4) : il est en chute libre et se trouve en état d'impesanteur.

* **Le cosmonaute** (3) est également en état d'impesanteur car son véhicule est presque exclusivement soumis à la gravité terrestre.

Cette expérience vise à montrer que l'état d'impesanteur n'est pas nécessairement lié à l'absence d'atmosphère (1 reste soumis à une pesanteur presque normale), ni à un certain éloignement de la Terre (identique pour les trois hommes), ni à des vitesses élevées (au début de sa chute, 2 n'a qu'une vitesse très faible par rapport au sol comparée à celle de 3).

★ **Il est faux d'invoquer l'éloignement de la Terre** pour expliquer l'impesanteur, autrement dit de sous-entendre que vers 300 km, à l'altitude moyenne des stations habitées, l'attraction terrestre serait très faible, en un mot négligeable !

S'il est vrai que la valeur de la pesanteur terrestre diminue quand on s'éloigne de la Terre (voir EI, n° 25, p. 15), ce n'est qu'au rythme moyen de 1 % tous les 32 km ; ce qui signifie qu'à 300 km elle n'a pas encore perdu 10 % de sa valeur au sol. Elle est donc loin d'être nulle !

(Et quand bien même, serait-elle nulle... Rappelons que, de toute façon, la valeur de g — quel que soit l'astre attracteur, Soleil, Lune, planètes, comètes,... — n'a rien à voir avec l'état d'impesanteur qui n'est lié qu'à l'existence d'une chute libre. Il a été dit par ailleurs, p. 6, qu'un véhicule spatial — même soumis à une très faible attraction gravitationnelle — n'était pas en impesanteur si son système propulsif fonctionnait ou s'il subissait un frottement aérodynamique, par exemple en traversant une atmosphère gazeuse. Au contraire, même soumis à une attraction gravitationnelle considérable, un véhicule spatial serait

en impesanteur s'il subissait un mouvement de chute libre « authentique »...).

★ On n'obtient pas nécessairement l'état d'impesanteur en conférant une vitesse élevée à un véhicule !

Par exemple à l'intérieur d'une tour d'impesanteur (où une capsule expérimentale est mise en chute libre) l'état d'impesanteur est atteint dès le début de l'expérience alors que la vitesse est encore très faible (elle est donnée par la relation : $v = gt$ avec $g \simeq 10 \text{ m.s}^{-2}$ et t la durée en secondes) : au bout de trois secondes, elle n'est que d'environ 108 km/h.

On peut aussi créer un état de quasi-impesanteur pendant une trentaine de secondes à bord d'un avion auquel on fera suivre une trajectoire balistique, à grande altitude : sa vitesse par rapport au sol pourra cependant rester inférieure à 1 000 km/h.

Par contre, pendant son vol propulsé, le dernier étage d'un lanceur de satellite artificiel atteindra (dans le repère géocentrique) une vitesse proche de 30 000 km/h... sans pour autant être en impesanteur. (Il le sera dès que la propulsion — qui crée une pesanteur artificielle, encore plus importante que celle de la Terre — aura cessé !)

Un véhicule quelconque ne peut connaître l'état d'impesanteur que lorsqu'il *subit une chute libre non contrariée*, ce qui n'a rien à voir avec sa vitesse. Il lui faut pour cela céder à l'attraction gravitationnelle ambiante ce qui peut le conduire à posséder — selon les conditions expérimentales — des vitesses très différentes les unes des autres :

- sa vitesse peut demeurer pratiquement constante en module (mais non en direction, c'est le propre du mouvement circulaire uniforme) : cas des satellites artificiels de la Terre en orbite circulaire ; mais la vitesse d'un satellite à 200 km d'altitude sera différente de celle d'un satellite gravitant à 36 000 km, 7,8 km/s pour le premier et 3,1 km/s pour le second ;
- elle peut être d'abord très faible puis croître régulièrement (cas d'une capsule dans une tour d'impesanteur) ;
- elle peut aussi varier considérablement sur la même trajectoire sans que l'état d'impesanteur en soit affecté pour autant. Lors du lancement vers la Lune d'une capsule Apollo, la vitesse du véhicule passait d'environ 40 000 km/h au voisinage de la Terre (après la phase propulsée) à moins de 3 300 km/h puis croissait de nouveau jusqu'à la Lune.

En résumé : *l'impesanteur, ce n'est pas une question de vitesse !*

★ Autre interprétation dont il faut se méfier, celle faisant intervenir un **prétendu équilibre** auquel serait soumis le véhicule en impesanteur. Elle est plus subtile car elle peut être correcte... à condition que quelques précisions complémentaires soient fournies, notamment la nature du repère considéré (mais le plus souvent, il n'est pas mentionné).

Prenons le cas du satellite artificiel de la Terre. Affirmer qu'il est en équilibre entre la force d'attraction terrestre et une force d'inertie centrifuge est passablement insuffisant. Dans quel repère raisonne-t-on ?

* Si c'est le repère géocentrique (considéré comme galiléen), c'est faux ! Dans ce cas-là, le satellite n'est soumis qu'à une seule force, celle de gravitation. Et, sous l'action de cette force, il est en chute libre, il « tombe » au sens où l'entendait NEWTON (voir EI, n° 25, p. 11), mais sans toutefois rejoindre le sol...

* Si c'est dans le repère tournant avec le satellite (donc non galiléen), il est vrai qu'on est amené à postuler l'existence de la force d'inertie d'entraînement pour rendre compte du phénomène d'impesanteur (voir ce numéro, p. 5).

★ Terminons en rappelant **quelques brèves « vérités »** dont les justifications ont été apportées dans l'article principal de ce numéro :

* pour les satellites, l'impesanteur ne s'obtient pas exclusivement sur les orbites circulaires !

* en aucun cas une centrifugeuse ne peut servir à simuler sur Terre l'état d'impesanteur !

* l'espace ne recèle aucune « zone particulière » (voir le récit de Jules VERNE, p. 12) où les objets sembleraient perdre subitement leur poids !

A LIRE...

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'ouvrage abordant le thème de l'impesanteur dans ses généralités. Cependant trois articles méritent d'être signalés :

* **A propos de l'impesanteur**, par J.-P. SARMANT, Bulletin de l'Union des Physiciens, n° 593, avril 1977, pp. 951-961, 20 F.

* **Les effets de marée**, par H. GIÉ, Bulletin de l'Union des physiciens, n° 652, mars 1983, pp. 703-713, 20 F.

*** Pour essayer de résoudre un problème de mécanique**, par M. EVENO, Bulletin de l'Union des physiciens, n° 611, février 1979, pp. 635-666, 20 F.

Par contre de nombreuses publications traitent des *recherches en microgravité*, mais nous les mentionnons dans le numéro 28 d'Espace Information qui est consacré à ce sujet.

N.D.L.R. : La revue Espace Information est une publication du C.N.E.S. paraissant trois fois par an.

Pour tout renseignement sur l'abonnement, écrire à : C.I.M.M. - Espace Information, 15, rue des Pénitents-Blancs, 31000 Toulouse.
