

FRANK LEHOT

Préface de l'astronaute **Jean-François Clervoy**

# *Voler en apesanteur*



**« INCROYABLE, EXALTANT,  
À DÉCOUVRIR D'URGENCE! »**

deboeck **B**  
SUPÉRIEUR



Frank Lehot

# *Voler en apesanteur*

**« INCROYABLE, EXALTANT,  
À DÉCOUVRIR D'URGENCE! »**

Préface de Jean-François Clervoy

Illustrations de Tristan Lehot



## Du même auteur aux éditions De Boeck Supérieur

J.-F. Clervoy & F. Lehot, *Histoire de la conquête spatiale*, 3<sup>e</sup> édition, 2019

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web :

**[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)**

En couverture : Vague en apesanteur © Laurent Theillet / Air Zero G. Airbus A310 Zero G © Alex Magnan - AIRBORNE FILMS

Maquette intérieure, mise en page & relecture : Jean-Louis Liennard/GraphieProd  
Couverture : SCM, Toulouse

Dépôt légal :  
Bibliothèque royale de Belgique : 2020/13647/137  
Bibliothèque nationale, Paris : août 2020

ISBN : 978-2-8073-2585-2

*Tous droits réservés pour tous pays.*

*Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme ou de quelque manière que ce soit.*

© De Boeck Supérieur SA, 2020 - Rue du Bosquet 7, B1348 Louvain-la-Neuve  
De Boeck Supérieur - 5 allée de la 2<sup>e</sup> DB, 75015 Paris

# Sommaire

---

Préface de Jean-François Clervoy .....	5
1. Introduction. Comment assouvir sa passion pour l'espace .....	7
2. Gravité, pesanteur, apesanteur : définitions .....	10
3. Gravité, pesanteur, apesanteur : idées fausses .....	14
4. Comment produire l'état d'apesanteur sur Terre et au voisinage de la Terre? ..	18
5. Qu'est-ce qu'un vol parabolique en avion? .....	28
6. Historique des vols paraboliques en avion .....	33
7. Caractéristiques générales des avions Zero G .....	48
8. La recherche scientifique au cours des vols paraboliques en avion .....	59
9. Où faire un baptême d'apesanteur? .....	71
10. Quel est le coût d'un baptême d'apesanteur? .....	78
11. Procédures d'inscription .....	83
12. L'aptitude médicale au vol parabolique .....	89
13. Le planning type de la journée du baptême d'apesanteur .....	94
14. L'accueil des participants .....	96
15. Briefing et préparation au vol .....	100
16. Contrôle de sûreté. Embarquement. Consignes de sécurité .....	104
17. Le déroulement du vol parabolique .....	108
18. Après le vol, un débriefing détendu .....	116
19. Quelles sensations éprouve-t-on en apesanteur? .....	120
20. Comment s'occuper en apesanteur? .....	126
21. Que faut-il emporter en apesanteur? (Objets utiles, déconseillés, interdits) ...	136
22. Expériences ludiques et faciles à réaliser en apesanteur et en hyperpesanteur .	140
23. Est-on malade lors d'un baptême d'apesanteur? .....	145
24. Le vol parabolique est-il dangereux? A-t-on peur en vol? .....	154
25. Tout ce qu'on ne doit pas faire en apesanteur .....	159
26. Témoignages .....	163
27. Personnalités ayant effectué un baptême d'apesanteur .....	168
28. Des records en vol parabolique .....	171
29. Voler en famille, se marier, faire la fête en apesanteur .....	173
30. Arts et artistes en apesanteur .....	178
31. De belles actions en apesanteur .....	188
32. L'ère de la pub non pesante .....	191

33. Des réalisations insolites en vol parabolique .....	193
34. Voler en apesanteur avec un astronaute .....	200
35. Médias et réseaux sociaux sans gravité .....	202
<b>Annexes</b>	
Vol parabolique : principes physiques (Jean-François Clervoy) .....	205
Répartition des vols paraboliques dans le monde .....	210
Principaux avions ayant effectué des vols paraboliques .....	211
Où voir un avion Zero G? .....	213
Fiche descriptive Convair C-131 B Samaritan .....	217
Fiche descriptive North American AJ-2 Savage .....	221
Fiche descriptive Boeing KC-135A « <i>Weightless Wonder IV</i> et V» .....	224
Fiche descriptive McDonnell Douglas C-9B « <i>Weightless Wonder VI</i> » .....	228
Fiche descriptive Caravelle Zero G .....	232
Fiche descriptive Airbus A300 Zero G .....	236
Fiche descriptive Airbus A310 Zero G .....	240
Fiche descriptive Boeing 727-200F « <i>G Force One</i> » .....	244
Fiche descriptive Iliouchine IL-76 MDK .....	249
Liste des acronymes et symboles .....	253
Remerciements .....	254
Index thématique .....	255

## Avertissement

### ***Apesanteur ou impesanteur ?***

La plupart des dictionnaires définissent le mot *pesanteur* comme le caractère pesant d'un corps, c'est-à-dire la sensation de lourdeur. Pour exprimer l'absence de cette sensation de poids, on utilise indifféremment les préfixes «a» ou «im» montrant le contraire, donnant ainsi les termes *apesanteur* ou *impesanteur*. Le terme *apesanteur* étant le plus médiatisé et employé dans le langage courant, il sera le plus utilisé dans ce livre destiné au grand public.

### ***Micropesanteur ou microgravité ?***

Comme le niveau de pesanteur recréé à bord d'un avion en vol parabolique ou de la station spatiale n'est pas nul mais très réduit, les spécialistes scientifiques utilisent de préférence le terme *micropesanteur* qu'*apesanteur*. On trouve aussi le mot *microgravité* bien que ce dernier ne soit pas exact : ce n'est pas la gravité qui est réduite dans un avion ou la station spatiale, mais son effet ressenti. Le terme *micropesanteur* sera donc employé dans ce livre.

### ***Hyperpesanteur ou hypergravité ?***

Pour exprimer la sensation de poids augmenté ressentie lors des ressources d'un avion en vol parabolique il faut parler d'«hyperpesanteur» et non d'«hypergravité» (la gravité n'est pas augmentée). La déviation du langage courant conduit souvent à utiliser l'expression «hypergravité» mais c'est le mot *hyperpesanteur* qui sera employé dans ce livre.

# Préface

---

J'ai vécu ma première véritable expérience d'astronaute en 1988 dans un avion de la NASA en vol parabolique. C'était un an après ma thèse d'ingénieur navigant d'essai sur le sujet et un an avant que je démarre le premier programme similaire en Europe dont j'ai alors inventé la dénomination Zero G.

Tous ceux qui ont vécu cette même expérience de véritable apesanteur vous convaincront qu'il faut la vivre à votre tour. Flotter librement sans effort dans la cabine d'un gros avion imprégnera à vie chacune de vos cellules de cette sensation purement extraterrestre.

J'avais cumulé l'équivalent de plusieurs orbites d'apesanteur dans ces avions avant mon premier vol spatial au cours duquel je me suis senti spontanément très familier avec cette sensation, ou devrais-je dire absence de sensation. On ne sent plus son poids. Comme doté d'un pouvoir magique, on se déplace librement à volonté dans toutes les directions et toutes les orientations.

Ces avions spécialement aménagés, sans siège et aux parois capitonnées, ont longtemps été utilisés exclusivement pour l'entraînement des astronautes et pour la recherche scientifique. Ils sont désormais accessibles au public et aux projets privés pour le cinéma, la publicité, les concerts et autres activités artistiques en apesanteur.

Ces vols sont rares et embarquent peu de personnes à la fois. Il en coûte donc tout de même quelques milliers d'euros. Mais cela reste un prix raisonnable, comparé au prix d'un ticket de vol suborbital à 200 000 euros ou, pire, à celui d'un ticket de vol orbital à 30 millions d'euros. Que l'on soit aventurier ou casanier, scientifique ou artiste, cognitif ou intuitif, cartésien ou sensitif..., on découvre tous l'apesanteur avec la même sensation étrange et inoubliable de légèreté, d'absence totale de poids. Son caractère ludique est incontournable. Elle catalyse l'imagination, car soudain toutes sortes de géométries du corps impensables sur Terre deviennent possibles. On ne peut s'empêcher d'en partager les émotions ressenties avec son entourage. On veut comprendre : comment peut-on échapper à la pesanteur sans quitter l'atmosphère ? C'est tellement contraire à l'expérience de la vie sur notre planète que le vol parabolique peut vous faire facilement croire que vous êtes devenu un extraterrestre, ou même un être dépourvu de corps.

Et pourtant, il est totalement sans danger, sans conséquence autre que celle d'avoir gravé en soi le souvenir de s'être échappé bizarrement de la pesanteur terrestre. Vous pouvez le vivre sans aucune crainte. La part d'inconnu qui vous attend n'est que pure joie de la découverte.

Avec plus de 350 paraboles à mon actif, je vis personnellement chacune d'entre elles avec le même enchantement que la première fois, il y a plus de trente ans. Et depuis mes 3 vols à bord de la navette spatiale américaine, chacune me fait revivre à l'identique les sensations du lancement et de l'insertion en orbite.

Tous les gestes et mouvements sont à réinventer pour travailler, s'amuser ou faire du sport. D'un caractère joueur, j'aime à chaque fois inventer de nouveaux jeux improbables d'orientation ou de manipulation d'objets. Et j'imagine facilement qu'il y aura un jour des olympiades en apesanteur. Il n'y a pas un vol Zero G au cours duquel je ne trouve un moment pour m'asseoir au plafond et m'habituer à observer la cabine à l'envers.

Songez-y lors de votre prochain vol, et inventez la discipline dans laquelle vous excellerez. Ou bien exécutez la même cascade de Tom Cruise ou le sprint en pesanteur lunaire de Usain Bolt, qui sont venus voler avec moi à bord d'Air Zero G. Oui, j'oubliais de préciser que tous les niveaux de pesanteur réduite sont possibles en vol parabolique. On peut recréer à bord pour une trentaine de secondes continues le champ de pesanteur lunaire ou martien, sans aucun artifice ou accessoire. Magique, n'est-ce pas ?

Vous serez étonné de constater combien l'être humain s'adapte facilement à cet environnement spatial. Vous comprendrez aussi le potentiel de découvertes offertes par la recherche en micropesanteur.

Personne n'était mieux placé que Frank Lehot, médecin aéronautique et passionné d'aventure spatiale, pour écrire ce livre. Il a volé dans 7 avions Zero G différents et totalise 3 500 paraboles. Il détient le record du nombre de fonctions différentes exercées en vol parabolique, selon le cas : médecin de bord, instructeur, navigant de sécurité, expérimentateur, sujet d'expérience, et aussi du nombre de vols de découverte de l'apesanteur en tant que passager (10 vols). Frank a réuni ici de très nombreuses informations à partir d'une riche collection d'interviews, d'articles et de documents photo, audio et vidéo couvrant les premiers vols paraboliques des années cinquante jusqu'à ce jour. Depuis les définitions et l'explication du phénomène physique jusqu'aux témoignages post-vols de passagers venant d'horizons divers, en passant par l'historique, la préparation, les expériences intéressantes à réaliser, la description précise du vol, etc., vous trouverez toutes les réponses aux questions que vous vous posez. Il s'agit du premier ouvrage consacré exclusivement au vol parabolique. Vous pourrez l'aborder comme un dictionnaire et piocher à votre convenance dans la table des matières, ou bien le lire d'une traite comme pour vous immerger à l'avance dans cette expérience unique.

Après lecture de ce guide du baptême d'apesanteur, vous ne pourrez pas vous soustraire à cette tentation de pouvoir évoluer vous-même en 3D totalement librement et sans effort. Votre corps et votre esprit seront enrichis à jamais de cette sensation inouïe. Vous serez devenu astronaute le temps d'un vol Zero G.

Jean-François Clervoy

Astronaute

Fondateur d'Air Zero G

Initiateur des vols paraboliques en Europe

# 1 Introduction. Comment assouvir sa passion pour l'espace

---

Cinquante ans après les premiers pas sur la Lune, la conquête spatiale séduit à nouveau un large public. Des prouesses technologiques, comme le retour sur Terre et la réutilisation des premiers étages du lanceur *Falcon 9* de SpaceX, ont donné à l'astronautique moderne une touche de science-fiction. Les réseaux sociaux diffusent le quotidien des astronautes de la station spatiale internationale (*ISS*) à des internautes qui peuvent même les accompagner virtuellement lors de leurs sorties dans l'espace. Le secteur privé multiplie les programmes innovants.

La décennie 2020–2030 s'annonce spatiale. Les véhicules suborbitaux développés par Blue Origin et Virgin Galactic devraient transporter régulièrement des touristes à la frontière de l'espace. De nouveaux lanceurs et vaisseaux habités vont multiplier les moyens d'accès à l'*ISS* et à de possibles stations orbitales privées. SpaceX développe le *Starship*, pouvant desservir l'orbite basse, la Lune et un jour Mars. Le retour de l'homme sur notre satellite est programmé dans quelques années pour établir une base permanente à son pôle Sud. Une station spatiale devrait être assemblée en orbite lunaire. Les opérateurs privés comme Blue Origin se chargeront de la desserte commerciale de la Lune, y acheminant des charges utiles, des sondes, des rovers, pour des besoins scientifiques et de soutien aux missions habitées.

Malgré ces perspectives enthousiasmantes, qui promettent aux fans de la conquête spatiale d'être témoins d'épopées passionnantes, il n'y a pas eu de démocratisation de l'accès à l'espace à l'image de celle des vols aériens commerciaux quelques décennies après le vol des frères Wright. Depuis Youri Gagarine, il y a près de 60 ans, moins de 600 humains différents ont voyagé dans le cosmos. En 2019, seuls douze astronautes ont séjourné dans l'espace, ce qui représente statistiquement moins d'un humain sur 645 millions! Dans ces conditions, quelles réelles perspectives s'offrent à nous qui sommes passionnés par la conquête spatiale, de vivre au cours de notre existence un peu de ce que connaissent les astronautes? Nous pouvons assister à leurs lancements, suivre leurs missions sur les réseaux sociaux, lire leurs ouvrages, écouter leurs conférences, les rencontrer. Mais sommes-nous « condamnés » à être seulement spectateurs de cette épopée spatiale qui nous fascine?

---

## ***Nous ne ferons probablement pas de vol orbital touristique.***

---

De Dennis Tito en 2001 jusqu'à Guy Laliberté en 2009, sept touristes spatiaux, tous multimillionnaires, ont effectué des séjours en orbite terrestre d'une durée de 7 à 14 jours à bord de l'*ISS*. Mais, depuis l'arrêt des navettes spatiales américaines en 2011, les vaisseaux *Soyouz* n'ont convoyé que des astronautes professionnels et

aucun touriste spatial n'a plus voyagé en orbite. Quand les nouvelles capsules habitées américaines *Starliner* et *Crew Dragon* seront opérationnelles, des sièges à bord pourront à nouveau être disponibles pour des touristes, à destination de l'*ISS* où d'éventuelles stations spatiales privées. Mais, comme le tarif de ces voyages en orbite ne sera pas inférieur à plusieurs dizaines de millions de dollars par passager, ils seront réservés aux multimillionnaires seuls.

---

### ***Nous ferons peut-être un vol suborbital touristique.***

---

Le concept de vol suborbital touristique, porté par l'Ansari X Prize dès 1996 et la victoire du *SpaceShipOne* de Scaled Composites en 2004, est né de la volonté de permettre l'accès à l'espace à un plus grand nombre de Terriens ; en pratique, quelques passagers prennent place à bord d'une capsule ou d'un avion spatial qui les transporte à la frontière de l'espace pour aller contempler la beauté de la Terre pendant quelques minutes en état d'apesanteur. Les engins utilisés ne disposent pas de l'énergie suffisante pour se satelliser : après une brève phase de vol propulsée, ils poursuivent une trajectoire balistique qui dure quelques minutes, culminant à la frontière de l'espace puis rentrent rapidement dans l'atmosphère. En contrepartie, la technologie employée est plus simple, et le coût par passager est divisé d'un facteur cent par rapport au vol orbital. Deux sociétés ont poursuivi le développement de vaisseaux suborbitaux et leurs tests en vol en vue d'une commercialisation : Virgin Galactic avec l'avion spatial de 6 places *SpaceShipTwo*, et Blue Origin avec le lanceur *New Shepard*, qui comprend un booster et une capsule 6 places réutilisables. Depuis 2005, plus de 600 passagers ont déjà réservé leur place auprès de Virgin Galactic, dont le coût actuel est de 250 000 \$. Si le vol suborbital touristique prend réellement son essor, quelques centaines de passagers pourraient dans les années à venir vivre une expérience spatiale pour un coût envisageable pour eux mais restant hors de portée pour beaucoup, ce qui n'est pas vraiment une démocratisation de l'accès à l'espace.

---

### ***Nous pouvons découvrir l'apesanteur au cours d'un vol parabolique en avion.***

---

Ouvert au public depuis 2004, le vol parabolique en avion est actuellement la plus accessible des activités à connotation spatiale puisqu'il permet de découvrir l'état d'apesanteur. Appelé aussi vol Zero G, il consiste à répéter plusieurs fois une manœuvre aérienne particulière appelée « manœuvre parabolique », qui reproduit pour les passagers pendant quelques secondes le même état d'apesanteur que dans l'espace. Bien sûr, c'est un vol atmosphérique et non spatial. Depuis les années 1950, son accès était réservé avant tout aux chercheurs pour effectuer des expériences scientifiques en apesanteur, et aux astronautes pour leur entraînement. Permettre désormais au public de connaître au cours de sa vie la sensation unique et magique de l'apesanteur est une véritable révolution ! Et l'apesanteur ne déçoit jamais ceux qui la découvrent : elle inscrit instantanément sur leur visage plein d'étonnement un large sourire, elle procure une jubilation profonde, des rires, une joie d'enfant. Émotion pure, véritable tour de magie, elle marque en profondeur de manière indélébile. Tous ceux qui l'expérimentent sont

unanimes : c'est l'une des expériences les plus fortes de leur vie. Les superlatifs sont dépassés et on cherche en vain des mots qui n'existent pas pour expliquer cette sensation. Faire tourner lentement un objet en apesanteur à quelques centimètres de soi... c'est fascinant ; contempler une sphère d'eau qui lévite... c'est extraordinaire ; ne plus ressentir son propre poids, être comme un pur esprit flottant... c'est inimaginable ; voler dans la cabine de l'avion... c'est incroyable !

Le baptême d'apesanteur en avion : voilà comment les passionnés d'astronautique et d'espace, les amateurs de sensations nouvelles, ou le public en général, peuvent au cours de leur vie connaître une sensation véritablement spatiale ! Son coût, variable selon la prestation et les opérateurs (de 2 700 à 8 530 €), représente le prix du rêve. À défaut ou en attendant d'aller un jour véritablement dans l'espace.

Ce livre est consacré à la description du vol parabolique en avion : le principe, l'histoire, les activités habituelles ou insolites menées en vol et les avions utilisés. Il est aussi un véritable guide du baptême d'apesanteur, décrivant toutes les étapes de l'expérience depuis la réservation du billet jusqu'à la remise du diplôme en descendant de l'avion. Puisse-t-il convaincre le lecteur de vivre à son tour l'expérience incroyable de l'apesanteur, et l'aider à préparer et profiter de son vol !



*Passagers effectuant un baptême d'apesanteur en avion. (© Air Zero G)*

# 2 Gravité, pesanteur, apesanteur : définitions

La **masse** d'un corps (appelée aussi « masse inerte ») est la quantité de matière qu'il contient (atomes, molécules). On la note  $m$ , son unité est le kilogramme, kg.

La composition d'un objet ne varie pas en fonction du lieu où il se trouve. La masse est donc constante. Un homme placé à la surface de la Terre, de la Lune ou dans l'espace a toujours la même masse.

Le **pooids** d'un corps est la résultante des forces qu'exerce sur sa masse un astre qui l'attire et l'entraîne éventuellement avec sa propre rotation. On le note  $P$ , son unité est le newton, N. Sa formule est :

$$P = m \cdot g$$

où  $g$  est l'unité de pesanteur de l'astre considéré. Par exemple, à la surface de la Terre, elle vaut  $9,81$  N/kg.

Le poids varie selon l'astre considéré. Par exemple, un homme placé à la surface de la Lune pèse six fois moins que sur Terre, bien que sa masse soit toujours la même.

Les forces exercées à la surface d'un astre sont essentiellement composées de la force gravitationnelle (gravité) de cet astre, et des forces beaucoup plus faibles que sont les forces gravitationnelles des autres astres de l'Univers, et la force centrifuge éventuelle exercée par l'astre s'il tourne sur lui-même.

La **gravitation** est le phénomène physique d'attraction qu'exerce une masse sur une autre masse. C'est l'une des quatre interactions fondamentales qui relient entre elles les particules élémentaires de l'Univers et permettent la cohésion de la matière à toutes les échelles (noyaux atomiques, atomes, particules, corps, astres, galaxies, etc.).

Les trois autres interactions fondamentales sont : l'interaction nucléaire faible, l'interaction nucléaire forte, l'interaction électromagnétique.

Les interactions fondamentales s'effectuent grâce à des forces. Dans le cas de la gravitation, cette force est appelée « force gravitationnelle » ou plus simplement « gravité ».

La **gravité** est la force produite par le phénomène de gravitation, donc résultante de l'attraction qu'exerce un corps céleste, comme une planète, sur un corps présent à sa surface ou à proximité.

En réalité, chacun des objets exerce une force d'attraction sur l'autre. Isaac Newton a établi en 1678 la loi de la gravitation universelle :

Deux corps de masses respectives  $m_1$  et  $m_2$  situés à une distance  $d$  l'un de l'autre s'attirent avec une force  $F$  proportionnelle à leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare :

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

avec  $G$  = constante de gravitation universelle ( $6,6742 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ).

Les unités sont :  $m_1$  et  $m_2$  : kilogramme ;  $d$  : mètre ;  $F$  : newton.

Dans le cas de notre planète, la Terre est le corps de masse principale. Elle exerce sur tout autre corps de son voisinage doté d'une masse une force d'attraction qui l'attire vers elle. Cet autre corps peut être un humain à la surface, un avion en vol, une station spatiale en orbite, la Lune, etc.

## COMPARAISON ENTRE POIDS

## ET GRAVITÉ (FORCE DE GRAVITATION) SUR TERRE

Dans le cas d'un objet posé à la surface de la Terre, l'équation de Newton de la force gravitationnelle exercée à la surface est :

$$F = G \cdot \frac{m_T \cdot m}{d^2}$$

avec  $m_T$  : masse de la Terre ;  $m$  : masse de l'objet ;  $d$  : distance entre l'objet et le centre de la Terre ( $d$  est égal au rayon  $r$  de la Terre, puisque l'objet est à sa surface).

Elle est donc le produit de la masse  $m$  par la constante  $F = G \cdot \frac{m_T}{r^2}$ , dans laquelle :

$$G = 6,6742 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2,$$

$$r = 6,38 \times 10^6 \text{ m},$$

$$m_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg},$$

c'est-à-dire  $G \cdot m_T / r^2 \approx 9,81 \text{ N/kg}$ , qui se trouve en première approximation identique à la constante de pesanteur  $g$ , vue plus haut, car la différence entre les deux – l'effet centrifuge de la rotation de la Terre – est très faible.

C'est pourquoi on assimile souvent, dans le cas de la Terre, la force de gravitation et le poids :

$$F = P = m \cdot g.$$

Si la Terre avait une vitesse de rotation beaucoup plus élevée, cette approximation ne serait plus valable, le poids devenant plus faible que la force gravitationnelle.

L'**accélération de la pesanteur** est l'augmentation de la vitesse d'un corps en chute libre dans le vide, c'est-à-dire livré à la seule force de son poids. Elle est donnée par une autre équation de Newton :  $F = m \cdot A$ , où  $F$  est la force appliquée au corps de masse  $m$ , et  $A$  l'accélération du mouvement qui en résulte. Dans notre exemple terrestre,  $F$  est le poids  $P = m \cdot g$ , et  $A$  vaut  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Cette valeur numérique identique à celle de l'unité de pesanteur terrestre est due au principe d'équivalence qui assimile la gravité

à l'accélération de la pesanteur, c'est-à-dire qui assimile la masse inerte  $m$  à la masse pesante utilisée dans l'expression du poids.

Le **champ de gravité** est l'espace tridimensionnel dans lequel s'exerce la force gravitationnelle. Il n'a pas de limite de distance et, en théorie, la Terre exerce une attraction sur tous les autres corps (planètes, étoiles, etc.) de l'Univers, même les plus éloignés.

Mais, comme la force d'attraction décroît de manière proportionnelle au carré de la distance, elle s'exerce de manière infime sur les corps très éloignés.

La lettre  $g$  est généralement utilisée comme unité de la pesanteur terrestre en surface (valant  $9,81 \text{ N/kg}$ ), ou bien selon le principe d'équivalence, comme l'unité d'accélération de la pesanteur terrestre en surface (valant  $9,81 \text{ m/s}^2$ ). Comme la direction de la pesanteur ainsi que la direction de l'accélération peut être exprimée selon des axes différents de la verticale terrestre, par exemple dans les axes de la cabine d'un avion incliné, la lettre  $\vec{g}$  peut aussi être utilisée comme le vecteur représentant ces deux grandeurs (poids ou accélération) dans les 3 dimensions. Il est alors formé des 3 composantes  $g_x$ ,  $g_y$  et  $g_z$  selon respectivement les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  de la cabine,  $z$  étant en général l'axe perpendiculaire au plancher.

En vol parabolique, on utilise souvent  $g$  ou  $\vec{g}$  pour exprimer la pesanteur « apparente » relativement à la cabine environnante, donc liée au ressenti des passagers qui ont l'impression de ne plus être soumis à aucune gravité, par manque de repère visuel qui pourrait leur faire réaliser qu'en fait ils sont bien en mouvement accéléré par rapport à la Terre.

## LA PESANTEUR

Comme indiqué plus haut, à la surface de la Terre, un homme ne subit pas seulement un phénomène d'attraction par la planète mais aussi un phénomène répulsif par effet centrifuge de rotation de celle-ci, lequel phénomène est maximum à l'équateur, c'est-à-dire à la distance la plus grande de l'axe de rotation. C'est l'intérêt de lancer des fusées depuis les faibles latitudes, comme la base de Kourou en Guyane française. On appelle **pesanteur** le phénomène global qui en résulte pour lui, et **poids** la résultante des forces qu'il subit.

Dans le langage courant, on mélange souvent la définition physique de la pesanteur (le cumul des effets de gravitation et de rotation de la Terre), son effet observé (la chute des corps vers le sol) et son effet ressenti (la sensation de poids, force qui lui est associée).

On dit que l'homme est dans un **état de pesanteur**. Pourtant, il ne ressent pas directement son propre poids, car c'est une force dite de « volume », qui s'applique à distance sur chaque élément de matière constituant son corps. Cependant, l'homme perçoit toutes les forces de contact à la surface de son corps, dont la pression du sol sous ses pieds qui s'oppose à son poids. On conviendra donc que la pesanteur n'est que la sensation de poids mais pas le poids lui-même.

## APESANTEUR ET IMPESANTEUR

Ces deux termes peuvent être utilisés indifféremment pour signifier l'absence de pesanteur, c'est-à-dire, selon notre définition précédente, l'absence de sensation de poids (ce qui ne veut pas dire que le poids n'existe pas).

Notons que, pour certains, le mot «apesanteur» serait réservé au cas d'absence totale de force gravitationnelle, ce qui reste une notion théorique puisque rigoureusement celle-ci n'a pas de limite de distance dans l'Univers. Pour d'autres, il vaut mieux éviter ce terme, au contraire d'«impesanteur», qui lui sera préféré en raison de la confusion phonétique possible entre «la pesanteur» et «l'apesanteur».

La **micropesanteur** (appelée souvent de manière impropre «microgravité») exprime le fait que, dans un avion en vol parabolique ou dans la station spatiale en orbite, il existe une infime pesanteur résiduelle, car des forces autres que le poids continuent de s'appliquer sur les corps (par exemple, les forces aérodynamiques sur l'avion que le pilotage ne permet pas de maintenir parfaitement à zéro durant toute la parabole, ou encore, dans la station spatiale, les vibrations générées par divers équipements en mouvement). Cette pesanteur résiduelle est de l'ordre du centième de  $g$  en vol parabolique en avion. En toute rigueur, il faudrait alors parler de «**centipesanteur**».



*En apesanteur, ces passagers ne ressentent plus leur poids bien qu'il soit toujours présent. (© Air Zero G)*

# 3

## *Gravité, pesanteur, apesanteur : idées fausses*

---

On constate que dans l'esprit du public les notions de gravité, de pesanteur et d'apesanteur sont parfois imprécises et même associées à des idées fausses. Il n'est pas facile de bien comprendre ces concepts qui sont parfois déroutants, et dont on a pu lire ou entendre des explications erronées. Voici les principales idées fausses rencontrées.

---

### *Les astronautes sont en apesanteur dans la station spatiale parce qu'il n'y a plus de gravité ?*

---

Même si le phénomène de gravitation exercée par la Terre sur tout autre corps décroît avec la distance, à l'altitude de la station spatiale internationale (400 km) la force de gravité est encore égale à 90% de sa valeur au sol. Les astronautes sont donc toujours soumis à l'attraction terrestre et à la gravité. Même la Lune, qui orbite à environ 380 000 km de la Terre, est soumise aussi à son attraction. Il faudrait s'éloigner très loin de la Terre pour échapper à sa force de gravité ; rappelons qu'elle ne sera jamais nulle puisque le phénomène de gravitation s'exerce en théorie à l'infini.

En réalité, les astronautes sont en apesanteur dans la station spatiale parce qu'ils sont comme elle en chute libre permanente autour de la Terre, et qu'en chute libre on ne ressent plus le poids. (On a imprimé une vitesse initiale très élevée à la station spatiale de sorte que cette chute s'effectue sur une trajectoire courbe qui contourne la Terre.) Si la Terre n'attirait plus la station spatiale, celle-ci partirait en ligne droite vers l'infini. Bien que cela semble paradoxal, être en état d'apesanteur, c'est être soumis à la gravité, et rien qu'à cette force, qui provoque le mouvement de pure chute libre où le poids n'est plus perçu.

---

### *Les astronautes sont en apesanteur parce qu'ils se trouvent dans le vide de l'espace ?*

---

C'est faux. On sait faire le vide sur Terre dans des chambres à vide et pourtant, à l'intérieur, les objets ne sont pas en apesanteur. La gravité s'exerce, que l'on soit dans le vide de l'espace ou dans l'air : elle ne dépend pas de la quantité d'atomes présents dans un volume donné. Par exemple, un astronaute à la surface la Lune se situe dans le vide, la Lune n'ayant pas d'atmosphère. Pourtant il n'est pas en apesanteur, car soumis à la force de réaction du sol lunaire, qui s'oppose à son poids. (Pour être en apesanteur,

il ne devrait être soumis qu'à la seule force de son poids, ce qui se produit brièvement à chacun de ses bonds sur la Lune !)

De la même façon, les astronautes en apesanteur dans la station spatiale ne sont pas dans le vide, puisque la station contient une atmosphère respirable donc constituée d'atomes.

Cela dit, le vide est un milieu intéressant pour les vaisseaux spatiaux en orbite, car n'ayant aucun obstacle à leur déplacement, ils n'ont besoin d'aucun moteur pour maintenir leur vitesse. Mais, comme on le verra au chapitre 5, dans le cas des vols paraboliques en avion, il faut compenser les forces aérodynamiques résiduelles sur l'avion par la poussée des moteurs.

---

### ***Il existe des lieux d'entraînement à l'apesanteur sur Terre ?***

---

Il est une réalité incontournable : il n'existe aucun moyen technique de supprimer momentanément la gravité (on doit dire plus exactement la pesanteur) en un endroit quelconque de la Terre. On ne peut disposer d'aucune « chambre à apesanteur », à l'image des « chambre à vide », enceintes hermétiques dans lesquelles des scientifiques peuvent quasiment recréer le vide spatial aux fins d'expériences.

Un objet à la surface de la Terre ou à proximité de celle-ci peut toutefois se trouver en état d'apesanteur s'il n'est soumis qu'à la seule force de son poids. C'est ce qui est réalisé dans les tours d'apesanteur ou en vol parabolique en avion (chapitre 4). Cet état d'apesanteur sera de durée courte dans tous les cas. Dans la vie quotidienne, lorsque l'on saute d'un muret ou d'un plongeur, on se trouve très brièvement en état d'apesanteur (trop brièvement pour s'en rendre compte), si l'on néglige le frottement de l'air qui reste très faible dans ce cas.

---

### ***Les astronautes et les objets en apesanteur « flottent » dans la station spatiale parce qu'ils n'ont plus de poids ?***

---

L'apesanteur se caractérise juste par le fait que les astronautes ne ressentent plus leur poids ni celui des objets qui les entourent, bien que le poids s'exerce toujours sur eux comme explicité dans la première idée fautive ci-dessus. Ce n'est pas l'absence de poids qui fait décoller un objet posé sur le plancher lorsqu'il est en état d'apesanteur. Les objets non attachés s'envolent de leur support seulement si une impulsion initiale leur est appliquée.

Ils semblent flotter du fait qu'ils se déplacent à la même vitesse et sur la même trajectoire que la station ou le vaisseau qui les contient. Ils sont en chute libre de la même manière, tous soumis à la seule force qu'est leur poids.

---

## ***Les astronautes peuvent déplacer facilement des objets très lourds parce que leur poids est devenu nul ?***

---

Le poids des objets reste le même car ils sont toujours soumis à la pesanteur terrestre (à peine réduite par la distance légèrement accrue les séparant de la Terre en orbite). C'est la sensation de poids qui disparaît. Et c'est le fait que les objets sont libres de mouvement qui facilite leur déplacement.

Rappelons que la deuxième équation de Newton donne la relation qui relie le mouvement d'un objet à la force qui lui est appliquée.

N'importe quelle force même très faible appliquée à un objet flottant au milieu de la cabine engendrera un déplacement proportionnel. Au contraire, sur Terre, avant de pouvoir déplacer un objet posé au sol, il faudra d'abord le soulever et pour cela exercer une force au moins égale à son poids.

Une façon sur Terre de se rapprocher de cette facilité à déplacer un objet lourd dans l'espace consiste à poser l'objet sur un support sans frottement tel que des billes, un bain d'huile ou un coussin d'air. Il devient alors aisé de le faire glisser sans effort important, mais seulement horizontalement.

---

## ***Un corps est immobile quand il est en apesanteur ?***

---

Sauf si l'on se trouve immobile dans certaines régions de l'espace où les attractions de deux astres se compensent (points de Lagrange), l'état d'apesanteur est forcément associé à un déplacement, puisqu'il est produit quand un corps est soumis à l'action de son poids et rien que son poids (quand il est en chute libre). De plus, ce corps peut avoir été préalablement doté d'une vitesse initiale, même très grande, ce qui n'est pas incompatible.

Les astronautes dans la station spatiale sont en apesanteur car seulement soumis à la force de leur poids. Ils se déplacent pourtant à 28 000 km/h par rapport à la Terre, vitesse initiale qui leur a été imprimée lors de leur lancement.

---

## ***L'expression « vol zéro gravité » employée parfois pour désigner le vol parabolique en avion traduit le fait que la gravité est supprimée lors de ces vols ?***

---

L'expression « vol zéro gravité » n'est qu'un raccourci commode pour exprimer le fait que, à bord d'un avion en vol qui effectue des manœuvres paraboliques, on ne ressentira plus par moments l'effet de la gravité (ou plus rigoureusement de la pesanteur), effet que l'on appelle le poids. Mais, comme cela a été dit plus haut, on ne peut en aucun cas faire disparaître la gravité terrestre, et donc sa valeur n'est jamais nulle, même si on ne la ressent plus. Rigoureusement, l'expression « vol zéro gravité » est donc impropre. Mais on comprend qu'il est plus explicite, notamment pour le public, de parler de « vol



*Astronautes en apesanteur à bord de la station spatiale.  
Leur vitesse par rapport au sol est de 28 000 km/h. (© NASA)*

« zéro gravité » que de vol « zéro pesanteur », en sous-entendant donc la signification de « zéro sensation de gravité ».

L'origine de l'expression « ZERO G » revient à l'astronaute Jean-François Clervoy, initiateur des premiers vols paraboliques en Europe, qui a inventé ce terme à la fin des années 1980 pour baptiser la *Caravelle*. Il explique qu'il a produit cette association pour son efficacité car le terme ainsi composé se lit en français comme en anglais, présente un style aéronautique associant souvent en majuscules des chiffres et des lettres, et enfin évoque la nature de l'activité. L'expression s'est démocratisée depuis dans le monde pour désigner les vols paraboliques, souvent écrite avec lettres minuscules « Zero G ». Cela dit, comme la lettre « G » est le symbole de la constante gravitationnelle découverte par Newton, on devrait plutôt utiliser le « g » minuscule afin d'évoquer plus justement l'unité de mesure du facteur de charge en aérodynamique (unité d'accélération), qui devient nulle lors des phases où l'avion est en apesanteur. Néanmoins, on trouve toujours en pratique la majuscule G au lieu de g comme « le vol Zero G » ou « un avion Zero G » pour rester proche du style des immatriculations aéronautiques.

Cette nouvelle expression née en France utilisant l'adjectif « zero g » ou « Zero G » est évidemment plus commode que « avion d'entraînement à l'apesanteur » ou « avion effectuant des manœuvres paraboliques ». C'est ainsi qu'il est maintenant consacré par l'usage depuis qu'il a figuré sur le fuselage de la *Caravelle*. Il a figuré en grosses lettres majuscules sur le fuselage de l'A300 de Novespace, puis initialement sur celui de l'A310, mais aussi sur celui du Boeing 727 de ZeroG Corp qui a réutilisé ce terme dont les droits n'avaient été déposés qu'en Europe.

# 4

## Comment produire l'état d'apesanteur sur Terre et au voisinage de la Terre ?

---

Quelques années avant d'envoyer le premier homme dans l'espace, les scientifiques manquent encore de certitudes quant à son comportement et à sa survie même en apesanteur. Ils ne savent pas si les organes vitaux (le cœur, les poumons, le cerveau) fonctionneront normalement. L'enregistrement des données du premier chien envoyé dans l'espace (la chienne Laïka en 1957) montre que la vie est possible en apesanteur. Mieux, en 1960, les chiennes Belka et Strelka reviennent de leur vol dans l'espace en bonne santé, prouvant ainsi que des mammifères ne sont pas gravement affectés par l'expérience de l'apesanteur. Bien que ce soit un résultat encourageant, il reste à étendre ces observations à l'homme et prouver que les fonctions cognitives sont également préservées. L'entraînement des premiers cosmonautes soviétiques en vol parabolique à bord de Mig-15 UTI montre que des tâches simples (manipuler des interrupteurs, écrire, lire, calculer) sont possibles en apesanteur. Par précaution, le vaisseau de Gagarine est conçu pour fonctionner automatiquement, de façon à limiter au maximum les tâches cognitives en apesanteur. Et c'est un soulagement d'entendre Gagarine s'exclamer : « L'apesanteur a débuté. Ce n'est pas du tout désagréable. Je me sens bien. »

Dès les années suivantes, on perfectionne les moyens de recréer l'état d'apesanteur, non seulement pour entraîner les futurs astronautes, mais aussi pour effectuer des expériences scientifiques, mettre au point et tester les appareils et matériels destinés à équiper les vaisseaux spatiaux. Tous s'appuient sur le principe que la chute libre des corps dans le champ gravitationnel produit un état d'apesanteur. On associe souvent la chute libre à une trajectoire verticale, mais un corps peut être en chute libre sur une trajectoire elliptique, parabolique ou circulaire. En revanche, il faut éliminer toutes les autres forces, notamment le freinage aérodynamique causé par l'air.

Lors de sa chute, un parachutiste rencontre la résistance de l'air qui applique sur lui une force de même direction et de sens opposé à son poids. Il n'effectue donc pas une véritable chute libre contrairement à l'expression consacrée, mais une chute contre la résistance de l'air. Il n'est donc pas en apesanteur, sauf très brièvement quand il sort de l'avion, avant que l'air ne commence à le freiner de manière significative.

Une chute sans force de réaction de l'air peut être réalisée en créant un état de vide artificiel (tours à impesanteur), dans le vide naturel (navette spatiale, station spatiale en orbite), dans l'air raréfié de la haute atmosphère (fusée-sonde, véhicule suborbital). Elle est aussi possible dans l'air à condition de compenser la réaction de frottement (cas

des manœuvres paraboliques en avion, où la poussée des moteurs compense la traînée de l'avion).

Il existe des molécules résiduelles dans la haute atmosphère comme dans l'espace qui freinent les véhicules spatiaux ou suborbitaux. De même, le frottement de l'air n'est jamais totalement supprimé lors d'un vol parabolique en avion. Dans tous les cas, l'état d'apesanteur est imparfait et on préfère employer le terme de micropesanteur (on parle souvent incorrectement de microgravité) pour dire que le niveau de pesanteur obtenu est faible mais non nul. Pour être totalement rigoureux, le terme de micropesanteur devrait être réservé au cas où le niveau de pesanteur est de l'ordre de  $10^{-6} g$ , sinon on devrait parler de « milli-pesanteur » pour  $10^{-3} g$  et de « centipesanteur » pour  $10^{-2} g$ .

Quand un véhicule enfermant une atmosphère est placé en chute libre, la masse d'air qu'il contient n'exerce pas de force de frottement sur ses occupants, puisqu'elle se déplace comme eux. Tout ce qui est contenu dans un corps en chute libre est, comme lui, en état d'apesanteur. Il en est ainsi des hommes, des animaux, des objets à bord de la station spatiale.

Chute libre simple	Chute libre en vol parabolique	Chute libre orbitale
Tours à impesanteur.	Avions. Fusées-sondes. Véhicules suborbitaux.	Stations spatiales. Vaisseaux spatiaux.

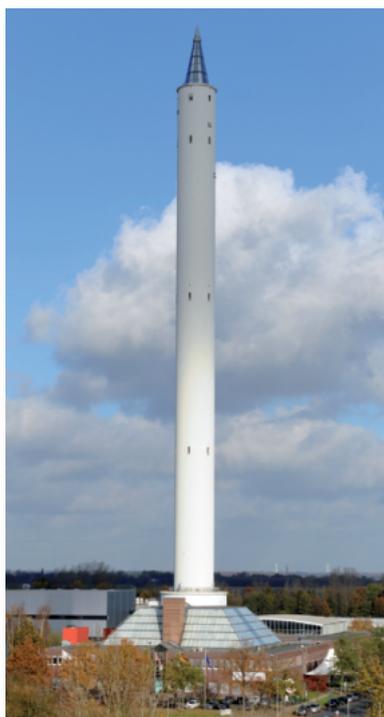
Tableau 1. Diverses plateformes de recherche en micropesanteur au voisinage de la Terre.

## REPRODUIRE UN ÉTAT D'APESANTEUR SUR TERRE ET DANS LA BASSE ATMOSPHÈRE

### Les tours à impesanteur (free-fall towers, drop towers)

À l'époque de Gagarine, les scientifiques de l'université de Moscou comprennent qu'il est possible d'obtenir l'état d'apesanteur pendant quelques secondes au cours d'une chute libre verticale. Le bâtiment de l'université a vingt-huit étages, c'est l'un des plus hauts de la ville. Une nacelle spéciale est larguée dans la cage d'ascenseur, et sa chute amortie en bas par des coussins à air comprimé. La précision d'apesanteur est imparfaite et sa durée n'excède pas trois secondes. Mais on perfectionne par la suite ce concept, jusqu'à réaliser des bâtiments dédiés à cette activité : les tours à impesanteur.

Ce sont de hautes colonnes verticales creuses construites en béton. Elles peuvent être semi-enterrées, ou souterraines si elles ont été aménagées dans un ancien puits de mine comme la tour du Japan Microgravity Center (JAMIC) au Japon. On laisse tomber à l'intérieur depuis leur sommet des capsules contenant des expériences scientifiques. (Pour éliminer le freinage lié au frottement de l'air, soit le vide est fait dans le tube



Drop tower de Brême.  
(© Ingo Wagner/Alamy)

soit d'autres techniques sont employées.) Pendant leur chute libre, les expériences sont en micropesanteur durant quelques secondes. Les capsules sont ensuite freinées par différents procédés. Pour augmenter la durée d'apesanteur, on peut parfois catapulter les capsules depuis le bas de la tour. Elles réalisent alors une parabole quasi verticale.

La tour à impesanteur du Centre de technologie spatiale appliquée et de micropesanteur (ZARM) de l'université de Brême, en Allemagne, est en fonction depuis 1990. Elle mesure 146 mètres de haut. Son diamètre est de 8,50 mètres. Elle autorise 110 mètres de chute, soit 4,74 secondes de micropesanteur. Cette durée est portée à 9,30 secondes en cas de catapultage, rendu possible depuis 2004. Les expériences sont enfermées dans une capsule de 80 centimètres de diamètre et de 1,60 ou 2,40 mètres de hauteur, qui chute à l'intérieur d'un tube de 3,50 mètres de diamètre dans lequel le vide a été fait par 18 pompes. La précision d'apesanteur est de l'ordre de  $10^{-6}g$ . Le freinage est assuré par un récipient de 8 mètres de hauteur rempli de billes de polystyrène de taille millimétrique. La décélération peut s'élever alors jusqu'à 50 g. Entre 1990 et 2008, 5 000 lâchers ou catapultages d'expériences ont été effectués. Actuellement, 400 sont réalisés chaque année.



Vue intérieure de la tour du ZARM, avec une capsule suspendue à un filin. (© ZARM Merikalio)

Plus récent, «l'Einstein Elevator» de l'Institut de technologie d'Hanovre est un dispositif permettant de catapulter des charges utiles plus volumineuses ( $1,7 \times 2$  m) et pesantes (1 000 kg) pour une durée de 4 secondes de micropesanteur. Plus de cent tests peuvent être réalisés quotidiennement.

Le centre de recherche Glenn de la NASA possède deux tours à impesanteur. Des expériences y sont menées depuis 1966. L'une des tours mesure 143 mètres et permet 132 mètres de chute libre dans une chambre à vide, recréant 5,18 secondes de micropesanteur. L'autre tour autorise 24 mètres de chute libre, soit 2,20 secondes de micropesanteur. La charge utile est préservée des frottements de l'air par un bouclier qui la précède. Plus de 26 000 tests y ont été effectués. Aux États-Unis, il existe également des tours à impesanteur à Portland et à Queensland.

La durée de micropesanteur obtenue est plus courte qu'à bord d'un avion, d'une fusée-sonde ou d'un vaisseau spatial en orbite. Mais elle suffit à réaliser des expériences variées, pour des coûts inférieurs. On effectue de la recherche fondamentale dans les domaines de la combustion, de la physique des fluides, de la rhéologie, de la thermodynamique, de la biotechnologie et des sciences des matériaux. La précision d'apesanteur varie de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}g$ , souvent meilleure qu'avec les autres plateformes qui ne parviennent pas à supprimer certaines accélérations parasites. Toutefois, pour plusieurs raisons évidentes, il n'est pas possible d'effectuer des expériences sur l'homme dans les tours à impesanteur.

### **Les avions**

Ils représentent la plateforme idéale d'étude de l'homme en condition d'apesanteur, sans nécessiter de vol spatial. De nombreux avions sont utilisés depuis les années 1950. Ils répètent jusqu'à plusieurs dizaines de fois en vol une manœuvre dite «manœuvre parabolique» qui restitue une durée d'apesanteur de 8 à 25 secondes selon le type d'avion utilisé. La précision d'apesanteur est de  $10^{-2}g$  (on devrait parler de centipésanteur et non de micropesanteur). Les avantages de l'avion comme plateforme de recherche en micropesanteur sont nombreux, ils sont détaillés dans le chapitre 8.



Airbus A310 Zero G. (© AIRBORNEFILMS)



Chercheurs effectuant des expériences scientifiques dans l'Airbus A310 Zero G. (© Novespace)



Sujet volontaire d'une étude en bed rest. (© NASA)

## SIMULER LES EFFETS DE L'APESANTEUR SANS CHUTE LIBRE

### *Les études en bed rest et en immersion sèche*

Les effets de l'apesanteur sur l'organisme humain sont recréés et étudiés sur Terre depuis des décennies grâce à deux techniques voisines. Il s'agit soit d'un alitement prolongé de volontaires sur des lits inclinés à  $-6^\circ$  (*bed rest*), soit d'un alitement à la surface de l'eau dont le sujet est isolé par une bâche plastique (immersion sèche). Ces techniques ne produisent pas un véritable état d'apesanteur, mais elles donnent un bon reflet des effets physiologiques de séjours prolongés dans l'espace, notamment pour les systèmes osseux, musculaire et cardio-vasculaire. La technique d'immersion sèche a été surtout utilisée en Russie, pour des expériences allant jusqu'à un an.

### *L'entraînement des astronautes en piscine*

L'immersion en piscine permet de diminuer les contraintes de la pesanteur. C'est le seul moyen de passer plusieurs heures à s'entraîner dans des conditions voisines de celles rencontrées dans l'espace. On y répète les gestes effectués lors des sorties extra-véhiculaires.

### *Les clinostats*

Les clinostats sont des appareils capables de simuler les conditions de micropesanteur grâce à une rotation tridimensionnelle. Des plantes, des cultures cellulaires, des embryons d'animaux sont soumis de façon prolongée à un mouvement rotatif plus ou moins rapide qui neutralise l'impact de la pesanteur sur leur croissance, leur développement, et certaines de leurs propriétés.

## L'APESANTEUR DANS LA HAUTE ATMOSPHÈRE ET DANS L'ESPACE

### *Les fusées-sondes*

Les fusées-sondes emportent des expériences scientifiques et des instruments de mesure pour des études terrestres, météorologiques, atmosphériques, astronomiques notamment. Elles permettent de tester les technologies scientifiques et spatiales qui seront utilisées à bord de satellites ou de stations. Des expériences de physiologie ont aussi été menées avec des animaux à bord (rats, chats, singes).

Elles ont permis de démontrer l'absence de graves effets de l'apesanteur sur la fréquence cardiaque, la pression artérielle ou la respiration, avant l'envoi d'hommes dans l'espace.

Leur utilisation a débuté après la fin de la Seconde Guerre mondiale par l'US Air Force à l'aide de fusées V2 récupérées en Allemagne. Celles-ci permettaient d'obtenir une durée d'apesanteur de deux à trois minutes, mais souffraient de problèmes de mise en

œuvre qui conduisaient à la perte de nombreuses capsules contenant des animaux et les données enregistrées.

Depuis, des milliers de fusées-sondes plus perfectionnées ont été lancées. Elles réalisent une trajectoire parabolique suborbitale dont l'apogée se situe habituellement entre 100 et 200 km d'altitude (extrêmes 50–1 000 km). Quand l'étage de propulsion est largué, la charge utile continue sur la trajectoire parabolique et l'expérience commence. La précision d'apesanteur ( $10^{-4}$  à  $10^{-5}g$ ) est meilleure qu'en avion, et la durée continue supérieure (jusqu'à vingt minutes). Les données de l'expérience peuvent être transmises au sol par télémétrie. Après sa rentrée dans l'atmosphère, la charge utile peut être récupérée sous parachute et réutilisée. Les fusées-sondes offrent un accès peu coûteux à l'espace, mais leur mise en œuvre est moins fréquente que celles d'autres plateformes (tours, avions).



Fusée-sonde Maxus. (© ESA)



# Voler en apesanteur

« INCROYABLE, EXALTANT, À DÉCOUVRIR D'URGENCE ! »

**D**e plus en plus de personnes réalisent chaque année l'une des expériences les plus incroyables qui soient données de vivre : le baptême d'apesanteur à bord d'un avion Zero G ! Oublier la gravité, ne plus ressentir son propre poids, flotter dans l'air, faire léviter des objets devant soi... « fantastique », « inoubliable », « indescriptible » : tous les superlatifs sont dépassés !

Frank Lehot est médecin, instructeur et navigant des vols Air Zero G de la société française Novespace. Dans ce livre, véritable guide pratique du passager de l'apesanteur, il retrace aussi l'histoire des vols paraboliques en avion, initialement dédiés à la recherche scientifique et désormais ouverts au public et aux réalisations les plus inattendues !

« N'essayez surtout pas, c'est addictif ! »

Bertrand Piccard, *pilote du Solar Impulse*

« Pendant des semaines après, je faisais des rêves très intenses où j'étais en apesanteur.

Je vis avec ce souvenir chaque seconde de chaque jour. »

Billy Gibbons, *guitariste du groupe ZZ Top*

« Les vols paraboliques me permettent encore de revivre régulièrement ces sensations inouïes que je souhaite à tous de connaître un jour. »

Jean-François Clervoy, *astronaute et fondateur d'Air Zero G*

« Le vol Zero G est la première marche vers le voyage spatial... Ce fut fantastique ! »

Professeur Stephen Hawking, *astrophysicien*

« Il n'existe, à ma connaissance, aucune sensation de liberté équivalente ! »

Bruce Benamran, *youtubeur, e-penser*

ISBN : 978-2-8073-2585-2



9 782807 325852

deboeck **B**  
SUPÉRIEUR

[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)