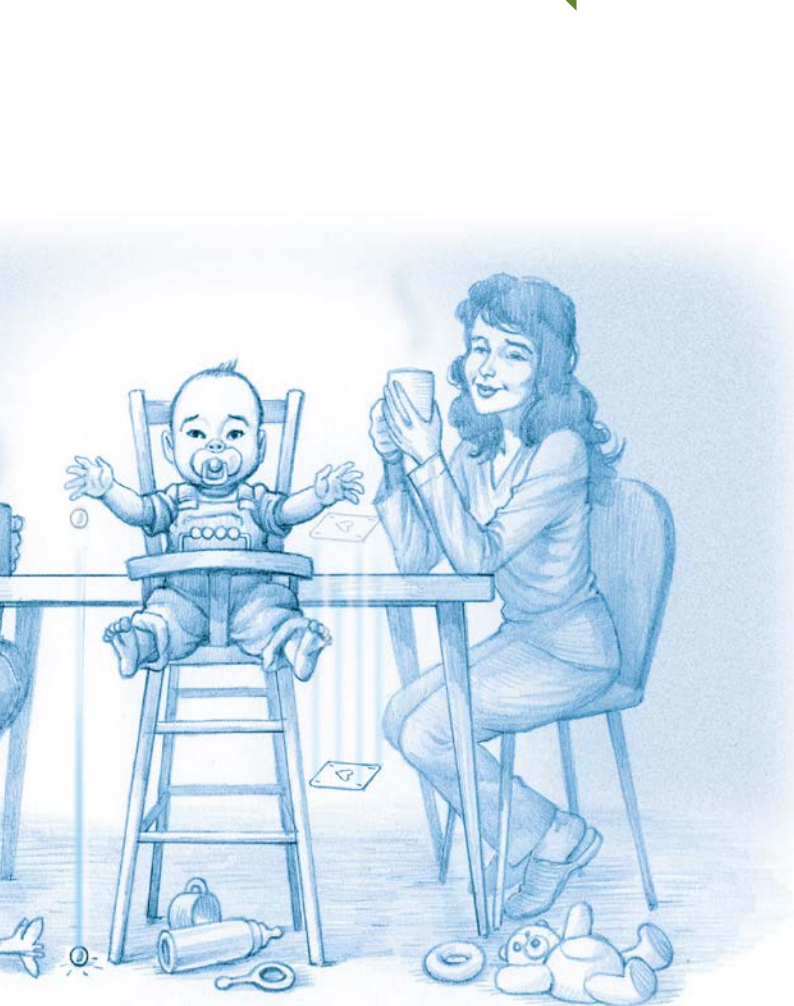


## L'EXPÉRIENCE CLASSIQUE

**U**ne expérience simple, pratiquée depuis plus de trois siècles, illustre le fait que tous les corps chutent de la même façon si l'on s'affranchit des forces non gravitationnelles. On fait le vide dans un tube de verre vertical contenant une plume et une bille de plomb (ou tout autre objet compact, une pièce de monnaie par exemple). On retourne rapidement le tube, de façon que ces deux objets se retrouvent en haut du tube, et l'on constate qu'ils chutent de façon identique : ils arrivent en bas du tube en même temps. Mais une telle expérience ne permet pas de faire des tests précis de l'universalité de la chute libre.



de petite taille, les pompes et les étanchéités actuelles permettent de mettre sous basse pression des volumes importants.

Il y a quelques années, le physicien et vulgarisateur britannique Brian Cox a ainsi réalisé une version spectaculaire d'expérience de chute libre dans une chambre à vide de la Nasa haute de plus d'une trentaine de mètres et où l'on peut réduire la pression jusqu'à  $1/10\,000$  pascal, soit 1 milliardième d'atmosphère : lâchées en même temps d'environ 10 mètres de haut, une plume de paon et une boule de bowling ont bien atteint le sol simultanément.

Pour des expériences plus précises, les physiciens disposent de la tour de

chute libre à Brême, en Allemagne, haute de 146 mètres. Dans un cylindre faisant 110 mètres de hauteur, on abaisse la pression à moins de 10 pascals. La masse volumique de l'air atteint alors 0,12 gramme par mètre cube ! Dans ces conditions, la capsule d'expérience (plus de 300 kilogrammes, 80 centimètres de diamètre) chute en 4,74 secondes, et sa décélération due à la traînée fait moins de  $10^{-5}g$  ( $g$  étant l'accélération de la pesanteur).

Malgré cette performance et la longue durée de la chute, commode pour réaliser des expériences, ce n'est pas satisfaisant pour les scientifiques qui testent la chute libre.

Pour faire mieux, il faut aller dans l'espace. Sur la Lune par exemple. En juillet 1971, l'astronaute David Scott y fit une petite démonstration de chute libre en lâchant un marteau et une plume de faucon, arrivés au sol plus lentement que sur Terre, mais en même temps. Cependant, la Lune manque encore d'infrastructures !

Près de la Terre, alors ? À une altitude de 250 kilomètres, la masse volumique de l'atmosphère tombe à  $7 \times 10^{-8}$  gramme par mètre cube ; et à 820 kilomètres d'altitude, elle est de  $3 \times 10^{-11}$  gramme par mètre cube – des valeurs difficilement atteignables sur Terre. Mieux encore : en ➤

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



► choisissant convenablement la vitesse d'un satellite, on peut lui conférer une orbite quasi circulaire où il est en perpétuelle chute quasi libre, ce qui permet d'allonger considérablement la durée des expériences.

### UN ESPACE PAS SI VIDE

Ce tableau idyllique doit cependant être nuancé. D'abord, d'autres forces entrent en jeu, notamment la pression de radiation qu'exerce la lumière du Soleil sur la structure du satellite et qui peut varier le long de l'orbite selon son orientation et son ensoleillement.

On peut aussi penser aux impacts de micrométéorites. Ensuite, la force de traînée n'est pas si faible, car la vitesse d'un satellite en orbite basse est très élevée (de l'ordre de 7,5 kilomètres par seconde).

Dans le cas du satellite *Spot-4*, qui pesait 2,76 tonnes et qui était en orbite à 822 kilomètres d'altitude, la décélération due à la traînée était ainsi égale à  $1,3 \times 10^{-8}$  mètre par seconde carrée. Cela ne faisait perdre que 2,5 mètres d'altitude par jour au satellite. En revanche, si le même satellite avait été placé à 250 kilomètres d'altitude, il aurait perdu 5 kilomètres par jour à cause de la prodigieuse augmentation de la masse volumique de l'air (même si elle reste très faible) ! Sa durée de vie se serait alors comptée en semaines.

On comprend mieux pourquoi tous les satellites doivent être munis de propulseurs d'appoint : ces derniers sont nécessaires pour corriger leurs trajectoires et leurs positions avec précision.

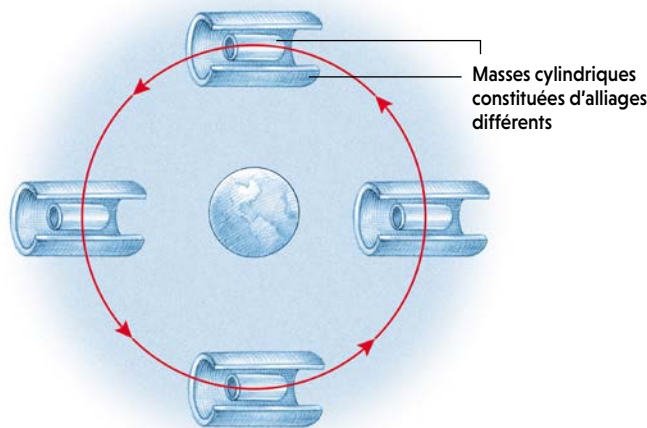
Alors, que faire pour s'approcher encore mieux de la chute libre ? Utiliser des moteurs pour compenser les forces perturbatrices agissant sur le satellite – et cela en continu et non pas en remontrant périodiquement le satellite sur son orbite nominale, comme cela se fait habituellement. C'est le principe de la traînée compensée, mis en œuvre avec le satellite *Microscope*.

Lancé le 25 avril 2016, ce satellite en cours d'exploitation a déjà permis de vérifier avec une précision record le principe d'équivalence, c'est-à-dire l'égalité de la masse pesante et de la masse inerte. L'expérience consiste à mesurer l'éventuelle différence d'accélération entre deux cylindres creux concentriques de compositions différentes (platine et rhodium pour l'un ; titane, aluminium et vanadium pour l'autre) en chute libre autour de la Terre (voir l'encadré ci-dessus).

Ce système de deux masses emboîtées est suspendu à l'intérieur du satellite

## CHUTE LIBRE AU SEIN D'UN SATELLITE

**L**e satellite *Microscope* (acronyme de Microsatellite à traînée compensée pour l'observation du principe d'équivalence), lancé en 2016, contient un système de deux masses cylindriques concentriques constituées d'alliages différents. Le système est suspendu sans contact avec le reste du satellite, dont les moteurs assurent qu'il reste immobile par rapport au système des deux masses. Le mouvement du système des deux masses le long de son orbite s'effectue alors avec des forces aérodynamiques totalement négligeables, l'air résiduel à l'intérieur du satellite étant immobile par rapport au système en question. Il s'agit donc d'une véritable chute libre sous l'effet exclusif de la gravitation de la Terre. L'expérience consiste à vérifier qu'il n'y a pas de mouvement d'une masse par rapport à l'autre. Sinon, le principe d'équivalence serait violé : la chute libre différencierait selon la nature du corps.



sans qu'il y ait contact avec la structure de celui-ci, grâce à des forces électrostatiques bien contrôlées. Ainsi, contrairement au satellite, le dispositif n'est pas soumis aux perturbations de l'atmosphère résiduelle extérieure ni à la pression de radiation solaire.

### TRAÎNÉE COMPENSÉE

Par ailleurs, l'accélération moyenne du dispositif est mesurée et sert à piloter les moteurs du satellite de façon que celui-ci reste immobile par rapport au système expérimental. Tout se passe alors comme si le satellite était en chute libre, la traînée atmosphérique étant compensée par la poussée des moteurs. En outre, les masses d'épreuve restent immobiles par rapport à l'air résiduel présent à l'intérieur du satellite, ce qui garantit que les forces aérodynamiques agissant sur ces masses sont totalement négligeables.

Ainsi, avec cette traînée compensée, le satellite suit une trajectoire de chute libre. Sur sa durée de vie, l'expérience pourra alors cumuler de longues périodes de chute parfaitement libre, l'objectif étant d'améliorer d'un facteur 100 la précision du test du principe d'équivalence. ■

### BIBLIOGRAPHIE

P. Touboul et al., **MICROSCOPE mission : First results of a space test of the equivalence principle**, *Physical Review Letters*, vol. 119, article 231101, 2017.

E. M. Gaposchkin et A. J. Coster, **Analysis of satellite drag**, *The Lincoln Laboratory Journal*, vol. 1, pp. 203-224, 1988.

J. P. Marec et al., **Contrôle d'orbite d'un satellite de navigation à traînée compensée**, *Acta Astronautica*, vol. 4, pp. 947-984, 1977.

**Le principe d'équivalence**, Wikipédia ([fr.wikipedia.org/wiki/Principe\\_d'équivalence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d%27%C3%A9quivalence)).