

© NASA/JPL

Orbite / Itinéraire fléché pour les satellites

LILIANE FEUILLERAC POUR LE CNES

Vous êtes partants pour un périple dans le sillage des satellites ? Commencez par la première étape, le tracé de votre plan de route, autrement dit, le choix de l'orbite ! Pour les lycéens, le trajet peut être défini à partir du champ des sciences physiques et chimiques (SPC) ou de celui des mathématiques. Les programmes prévoient quelques pistes intéressantes : en seconde, le thème de l'Univers et sa déclinaison sur l'étude du Système solaire peuvent servir d'accroche en SPC ; les notions de force gravitationnelle abordées sont de bons supports. En terminale, la thématique « Comprendre, lois et modèles », et plus particulièrement le chapitre consacré au « Temps, mouvement et évolution », peut aussi s'avérer un bon cadre pour aborder ces questions. Les lois de la dynamique sont d'excellents indicateurs pour retrouver les caractéristiques d'une orbite. Quant aux mathématiques, elles offrent également matière à s'intéresser au calcul d'orbites. Les classes de seconde pourront l'aborder comme application du chapitre sur les vecteurs. Enfin, les collégiens peuvent, eux aussi, être invités à se mettre en orbite, notamment à partir du calcul de vitesse, une manière simple de se placer sur une bonne trajectoire. Bon et passionnant voyage !



Portrait Profile
Jean-Paul Berthias
> P. 4

www.cnes.fr

www.cnes.fr/enseignants-et-mediateurs

ORBIT

A signposted satellite itinerary

LILIANE FEUILLERAC FOR CNES

Ready for a ride with a satellite? The first step is to chart your route: in other words, to choose your orbit. High-school pupils can tackle this problem in physics, chemistry or mathematics lessons. In 10th grade, the Universe and solar system can be studied from the angle of gravitational forces, while in 12th grade, laws and models—particularly the part of the curriculum concerning time, motion and evolution—offer a useful basis for lesson plans. The laws of dynamics are a great way to learn about the characteristics of an orbit. Maths lessons might also focus on orbital calculations. For example, 10th graders could approach them as an application of vectors. And middle-school pupils can look at orbits through the prism of velocity calculations applied to orbital trajectories. Have an exciting trip!

ORBITE ET MISSION

L'INTERRELATION EN QUATRE QUESTIONS

Comment fait-on pour mettre un satellite sur l'orbite choisie ?

Pour qu'un satellite soit positionné à l'altitude voulue, il faut lui communiquer une vitesse suffisamment élevée pour que la force centrifuge compense la force de gravité. L'essentiel de cette mise en orbite est assuré par la fusée. À la fin de son vol, elle dépose les satellites destinés à l'orbite basse au plus près de leur orbite finale. Pour ceux destinés à l'orbite géostationnaire, on pratique en deux temps: la fusée dépose le satellite sur une orbite de transfert, puis le satellite augmente sa vitesse par lui-même pour rejoindre l'orbite finale. (Voir poster.)

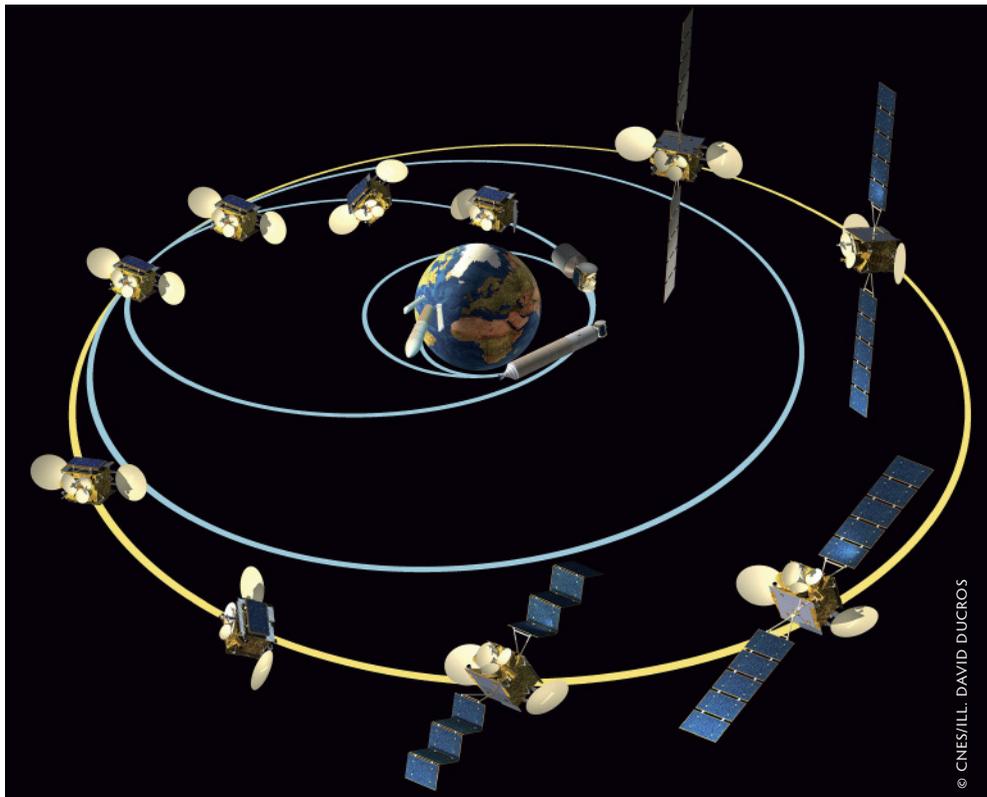
Comment pilote-t-on le satellite en orbite ?

En théorie, une fois arrivé sur son orbite de travail, le satellite y reste définitivement. En pratique, des forces perturbatrices influent sur les satellites et leurs orbites. À basse altitude (jusqu'à 1 000 km environ), par exemple, le frottement dû à l'atmosphère diminue l'énergie du satellite et fait baisser son altitude. Il faut le remonter régulièrement à l'aide de ses propulseurs. Ceux-ci exploitent le même principe « action/réaction » que les moteurs de fusée: de la matière¹ est éjectée à grande vitesse. Par réaction, le satellite reçoit une quantité de mouvement identique.

Que fait-on du satellite à la fin de sa mission ?

À la mort du satellite ou quand la communication est rompue, on ne peut plus modifier volontairement son orbite. Or, en volant au milieu des orbites utiles, il constitue un réel danger pour les autres satellites. Aujourd'hui, la loi relative aux opérations spatiales (Los) demande de prendre des mesures en fin de vie pour réduire ce risque. Pour les satellites en orbite basse, l'abaissement de l'altitude est la meilleure arme contre la prolifération des débris. Inversement, les satellites géostationnaires, eux, sont remontés à quelques centaines de kilomètres au-dessus de leur altitude.

¹ Matière: gaz dans le cas de propulsion chimique, ions dans le cas de propulsion électrique.
² De l'ordre de 11 km/s, soit 40 000 km/h.



© CNES/ILL. DAVID DUCROS

Tous les satellites tournent-ils autour de la Terre ?

Non. Certains satellites – appelés sondes – sont envoyés vers d'autres objets du Système solaire, la Lune, Mars, Vénus, Jupiter... Pour se libérer de l'attraction terrestre, la sonde doit avoir une vitesse élevée². Les objets quittant la Terre deviennent des satellites du Soleil. Lorsque ces satellites arrivent au voisinage des planètes, ils peuvent passer à côté pour les observer au cours d'un « survol ». Ils peuvent aussi freiner, de façon à être capturés et devenir des satellites de ces planètes. Ce freinage demande une grande énergie; c'est une manœuvre extrêmement critique. Si elle échoue, le satellite continue à tourner autour du Soleil.

ORBITS AND MISSIONS How they are related

How is a satellite placed in its chosen orbit?

To reach its assigned altitude, a satellite needs to gain sufficient velocity so that its centrifugal force offsets the force of gravity. Most of its trip to orbit is powered by the launch vehicle. At the end of its flight, the launcher places low-Earth-orbit (LEO) satellites as close to their final orbit as possible. Geostationary (GEO) satellites are orbited in two stages: the launcher first injects the satellite into a transfer orbit and the satellite then reaches its final orbit under its own thrust. (See poster)

How is a satellite controlled in orbit?

In theory, once a satellite has reached its operating orbit it will stay there forever. In practice, satellites and their orbits are subjected to perturbing forces. At low altitudes up to about 1,000 kilometres, atmospheric drag drains the

satellite's energy and lowers its orbit, so regular boosts are needed from the thrusters. These thrusters rely on the same 'action-reaction' principle as the launch vehicle's engines, ejecting matter¹ at high speed to impart motion to the satellite.

What happens to a satellite at the end of its mission?

When a satellite 'dies' or communicating with it proves impossible, we can no longer control its orbit, making it a danger to other orbiting satellites. In France, the recent act governing space operations dictates end-of-life measures to mitigate this risk. For LEO satellites, lowering their orbit is the best way to counter proliferation of space debris. Conversely, the orbit of GEO satellites is raised a few hundred kilometres above their mission orbit.

Do all satellites orbit Earth?

No. Some satellites, also called 'space probes', are sent to survey other bodies in the solar system like the Moon, Mars, Venus or Jupiter, for example. To escape Earth's attraction, a probe needs to reach a high velocity². Objects that escape Earth go into orbit around the Sun. When they arrive in the vicinity of other planets, they can observe them during a 'flyby'. They can also brake and be captured into orbit around another planet. Such a critical braking manoeuvre requires a great deal of energy, and if it fails the satellite will continue orbiting the Sun.

¹ Gas for chemical thrusters, ions for electric thrusters
² About 11 km/s or 40,000 km/h

EXERCICE 1

COMMENT ACCÉLÉRER UNE SONDE À MOINDRES FRAIS ?

En route pour un rendez-vous avec la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014, la sonde Rosetta a bénéficié de quatre assistances gravitationnelles, dont trois de la planète Terre. La sonde passe ainsi à proximité de notre planète afin d'augmenter sa propre vitesse sans entraîner une dépense excessive d'ergols. Afin d'en comprendre le principe, on peut déterminer géométriquement la vitesse de la sonde par rapport au Soleil. Pour cela, il faut ajouter les deux vecteurs \vec{v}_P (qui désigne la vitesse de la planète par rapport au Soleil) et $\vec{v}_{s/P}$ (qui désigne la vitesse de la sonde par rapport à la planète).

How to get a free boost for your space probe

En route to rendezvous with comet Churyumov-Gerasimenko in 2014, the Rosetta space probe has received four gravity assists, three from Earth. On each flyby, the probe swings past Earth to boost its velocity while saving propellant. To see how this works, we can determine geometrically the probe's velocity with respect to the Sun. To do that, we add the two vectors \vec{v}_P (the velocity of Earth with respect to the Sun) and $\vec{v}_{s/P}$ (the velocity of the probe with respect to Earth).

1) Représenter la vitesse de la sonde par rapport au Soleil avant et après le passage de la sonde à proximité de la Terre en suivant les indications précédentes.

1) Represent the probe's velocity with respect to the Sun before and after its Earth flyby, as explained above.

2) Que peut-on dire de l'évolution de la norme de la vitesse ?

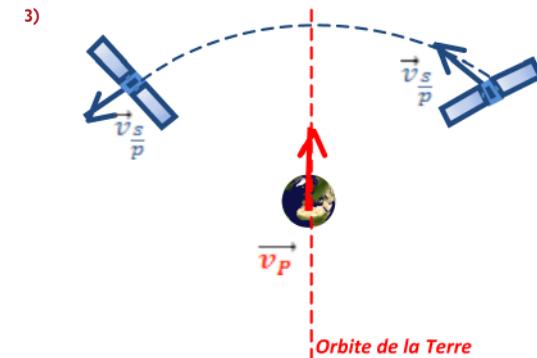
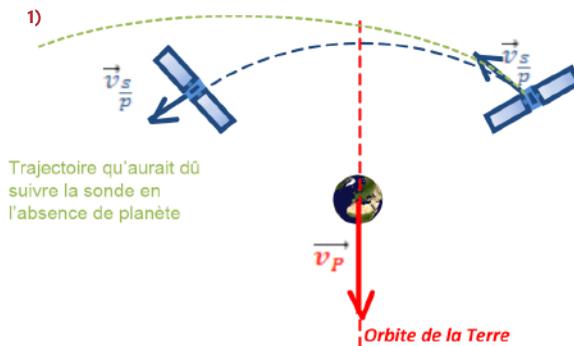
2) What can we say about the change in the velocity norm?

3) Faire de même lorsque le passage se fait en amont du passage de la planète.

3) Do the same for when the probe flyby is ahead of the transit of the planet.

4) Constate-t-on les mêmes effets ?

4) Do you note the same effects?



Correction / Answers

1) Voir schéma 1

1) See schema 1

2) La norme du vecteur vitesse de la sonde par rapport au Soleil est plus grande après le passage de la planète.

2) The norm of the probe's velocity vector with respect to the Sun is greater after the transit of the planet.

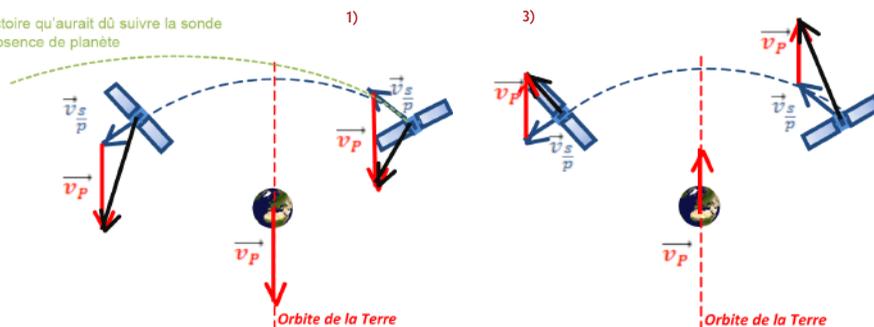
3) Voir schéma 3

3) See schema 3

4) Non, dans ce cas, la norme de la vitesse diminue sensiblement.

4) No, in this case the velocity norm is significantly smaller.

Trajectoire qu'aurait dû suivre la sonde en l'absence de planète



EXERCICE 2

L'ESPACE, TOUT UN PARADOXE !

La troisième loi de Kepler s'énonce ainsi : $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$, avec M la masse de la planète, T la période de révolution du satellite, r son rayon de courbure (nous supposons pour simplifier des orbites circulaires) et G la constante gravitationnelle.

La vitesse du satellite s'exprime alors ainsi : $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

À l'aide de ces informations, justifier les affirmations suivantes, qui semblent paradoxales :

1) Le frottement atmosphérique s'oppose au mouvement du satellite et pourtant, au final, il augmente sa vitesse : pourquoi ?

2) Que le satellite pèse 1 kg ou 1 000 kg, sa vitesse sera la même autour de la Terre à une orbite donnée !

3) Deux satellites A et B volent ensemble sur la même orbite. Le satellite A augmente alors brièvement sa vitesse. Après un tour, A sera-t-il devant ou derrière B ?

Correction :

1) Le frottement atmosphérique ralentit le satellite sur son orbite qui, donc, se rapproche de la Terre. Or, comme l'indique l'expression de la vitesse, s'il se rapproche, r diminue et donc la vitesse augmente !

2) Comme le précise la troisième loi de Kepler, la période T et la vitesse v sont indépendantes de la masse du satellite. Aussi paradoxal que cela puisse paraître, que le satellite soit léger ou lourd, les caractéristiques de sa trajectoire seront les mêmes.

3) A sera derrière B. En effet, A ayant augmenté brièvement sa vitesse, il augmente l'altitude moyenne de son orbite, et donc sa période orbitale T . Ainsi il mettra plus longtemps pour parcourir son orbite et arrivera après B au point de départ.

Space paradoxes

Kepler's third law of motion is written $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$, where M is the planet's mass, T the satellite's orbital period, r its radius of curvature (to simplify, we shall assume a circular orbit) and G the gravitational constant.

The satellite's velocity is therefore $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$. Using this information, justify these seemingly paradoxical statements:

1) Atmospheric drag acts as a brake on the satellite's motion, but in fact causes it to speed up. Why is this?

2) In any given Earth orbit, a satellite's orbital velocity will be the same whether it weighs 1 kg or 1,000 kg.

3) Two satellites A and B are flying in the same orbit. Satellite A briefly increases its speed. After one complete orbital revolution, will A be ahead of B or trailing it?

Answers:

1) As atmospheric drag slows the satellite down, its orbit gets closer to Earth. As indicated by the velocity equation, if it gets closer r is smaller and the velocity therefore increases!

2) As stated by Kepler's third law, the period T and velocity v are independent of the satellite's mass. Paradoxical though it may seem, the satellite's trajectory will be the same no matter how light or heavy it is.

3) A will trail B. When A briefly increases speed, in so doing it raises the mean altitude of its orbit and therefore its orbital period T . This means it will take longer to complete its orbit and will arrive at the point of departure after B.



“
LE SPATIAL, ÇA PARAÎSSAIT TRÈS COMPLIQUÉ, ÇA DONNAIT ENVIE DE DÉCRYPTER, D'ARRIVER À COMPRENDRE.
"Space seemed very complicated and yet it made me want to probe its mysteries and understand it."

© CNES/E. GRIMAULT, 2013

PROFILE
JEAN-PAUL BERTHIAS
Spaceflight dynamics expert at the Toulouse Space Centre

Theory of relativity meets childhood dreams

Jean-Paul Berthias is proud to count himself among the many 'children' of the Apollo era. As a kid, he wanted more than anything else to be part of it. In the Paris suburb where he lived, he indulged his passion at the local library. "Space seemed very complicated and yet it made me want to probe its mysteries and understand it," he says.

After a stellar career at school, he entered the Ecole Normale Supérieure in Paris, specializing in theoretical physics and chose general relativity for his thesis. He could easily have turned his back on space at this point. But after a last school year spent studying in the United States, an encounter with Ronald Hellings, a renowned expert in experimental tests of relativity in the solar system from NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL), offered him an opportunity to combine his interest in general relativity with his passion for space. The young graduate saw the chance to rediscover his childhood dreams. Professor Jacques Blamont helped make it real: as a science investigator for one of the instruments on the Soviet Phobos lander, Jean-Paul Berthias was put in charge of studying the dynamics of Phobos and conducting tests of general relativity, dividing his time between JPL and the Service d'Aéronomie of the French scientific research centre. While preparing algorithms for data processing he helped coordinate project activities. In all, he spent nearly five years at JPL, acquiring valuable experience and confirming his taste for the American way of life. Returning to France in 1991, he joined the space mathematics division at CNES where he helped to develop expertise in precise orbits and spaceborne orbit determination for the TOPEX/Poseidon mission and the DORIS system. He has since widened his scope of responsibilities, first as head of the precise orbit determination department and then the spaceflight dynamics division. Since 2004, he is Associate Deputy Director for Systems Engineering and Spaceflight Dynamics. Although he misses the challenge of interplanetary missions, Jean-Paul Berthias is happy to "help advance CNES's engineering expertise."

(NDR. Nos remerciements vont à Jean-Paul Castro, professeur de physique; Michel Vauzelle et Vincent Doumerc, professeurs chargés de mission auprès du CNES; Jean-Pierre Berthias, CNES) (Editor's note: Our thanks to physics teacher Jean-Paul Castro; Michel Vauzelle and Vincent Doumerc, teachers and advisors to CNES; and Jean-Paul Berthias, CNES).

La théorie de la relativité appliquée aux rêves d'enfant

Les missions Apollo ont laissé de nombreux héritiers. Jean-Paul Berthias est de ceux-là et le revendique. À ses yeux d'enfant, l'aventure était trop belle pour ne pas en être ! En banlieue parisienne, où il vit, il entretient le feu sacré à la bibliothèque du quartier. « *Le spatial, ça paraissait très compliqué et, par contre-coup, ça donnait envie de décrypter, d'arriver à comprendre.* »

Cursus

- 1975 – Baccalauréat série C.
- 1978 – Entrée à l'École normale supérieure, Paris.
- 1982 – Agrégation de sciences physiques.
- 1983 – Thèse en physique théorique, université Paris VI.
- 1991 – Entrée au CNES.
- 2010 – Exceptional Technology Achievement Medal de la Nasa, avec John Ries, de l'Université du Texas, pour les travaux sur l'orbite précise des satellites.
- Career path
- 1975 - Baccalaureate, science stream
- 1978 - Ecole Normale Supérieure, Paris
- 1982 - Agrégation in Physics
- 1983 - Thesis in theoretical physics, Paris
- 1991 - Joins CNES
- 2010 - NASA Exceptional Technology Achievement Medal, with John Ries, University of Texas, for outstanding achievements in improving precision orbit determination

Un parcours scolaire sans faute le conduit à l'ENSP¹; il s'intéresse à la physique théorique et fait sa thèse en relativité générale. Le spatial a failli y perdre un serviteur émérite. Mais le malin veillait ! Après l'agrégation et une cinquième année d'école passée aux États-Unis, une rencontre avec Ronald Hellings, un expert renommé des tests de relativité dans le Système solaire du JPL lui permet d'entrevoir comment combiner intérêt pour la relativité générale et passion pour le spatial. Le jeune diplômé retrouve ainsi le chemin de ses rêves d'enfant. Le professeur Jacques Blamont lui offre un cadre concret. Devenu co-investigateur d'un instrument de l'atterrisseur du programme soviétique Phobos, Jean-Paul Berthias est chargé de l'étude de la dynamique de Phobos et des tests de relativité. Une mission enthousiasmante ! Il partage son temps entre le service d'aéronomie du CNRS et le JPL; il prépare les algorithmes pour l'exploitation des données et aide à la coordination des activités du projet. Cumulées, ce sont presque cinq années qu'il passera au sein du laboratoire américain. Elles renforceront son expérience et son attirance pour l'American way of life.

En 1991, de retour en France, il intègre la division Mathématiques spatiales du CNES. Il contribue à développer l'expertise en orbite précise et en orbitographie embarquée avec Topex-Poseidon et le système Doris. Depuis, ses responsabilités se sont accrues. D'abord chef du service Orbitographie précise, puis chef de la division de Mécanique spatiale, il est, depuis 2004, adjoint au sous-directeur en charge des Activités système et dynamique spatiale. S'il regrette d'avoir quitté l'interplanétaire, « *le plus compliqué, donc le plus intéressant* », Jean-Paul-Berthias est satisfait de pouvoir, à son poste, « *aider à faire avancer les choix techniques du CNES* ».

¹ENSP : École normale supérieure de Paris.