



© CNES/J.L. MOURAD CHEREF, 2013

Illustration du lanceur Ariane 6 sur son futur pas de tir. Artist's impression of Ariane 6 on its future launch pad.

Propulsion / Booster pour s'arracher de Terre

LILIANE FEUILLERAC POUR LE CNES

De tout temps, l'homme a cherché à aller dans l'espace. Mais, pour porter ses ambitions, la propulsion a mieux réussi que Pégase. La propulsion ? C'est ce phénomène inscrit dans la 3^e loi de Newton et édicté par le fameux principe d'action/réaction : « À toute action correspond une réaction égale et en sens opposé ». Vous connaissez ? Les lanceurs le prouvent. Avec trois étages et un nombre de boosters modulable, la future Ariane 6 en fera une nouvelle et implacable démonstration.

Pour « s'arracher », les collégiens curieux peuvent être invités à découvrir ce principe dès la classe de troisième. Il est effleuré dans le programme au travers de la notion de « poids ». Mais, dès la seconde, le principe de base de la propulsion est à chercher, en filigrane, dans l'étude de la pesanteur terrestre à l'index « Univers ». Les chapitres consacrés à la mécanique newtonienne ou à l'étude des forces dans les cas simples peuvent conduire à approfondir ces questions. Mais le public le plus concerné est incontestablement celui des lycéens des classes de terminale S. Le principe d'action/réaction peut y être abordé très simplement dans les chapitres consacrés aux « actions réciproques ». La mécanique newtonienne est également reprise dans la partie « Comprendre, lois et modèles », consacrée au « temps, mouvement et évolution ». Une manière de booster aussi l'intérêt des jeunes pour les sciences.

PROPULSION

Escaping Earth

LILIANE FEUILLERAC FOR CNES

Humans have always set their sights on space. But to get there, propulsion is a surer way than Pegasus. So what is propulsion? It's a phenomenon enshrined in Newton's third law of motion, which defines the famous principle that "for every action there is an equal and opposite reaction". You've probably heard that before. Well, launchers prove it. And with three stages and a modular number of boosters, the future Ariane 6 will provide a convincing demonstration. Middle-school pupils can be invited to discover Newton's principle in 10th grade, where it is touched on when studying the concept of weight. Moving up to 11th grade, the basic principle underlying propulsion is looked at with respect to Earth's gravity, and chapters devoted to Newtonian mechanics or simple forces are a useful way to probe these questions in more depth. But 12th grade science-stream lessons are where this subject most comes into play, as the action-reaction principle can be studied in the chapters on reciprocal forces. The part of the syllabus devoted to understanding laws and models, and more specifically time, movement and evolution, also deals with Newtonian mechanics—a good way to get young people interested in science.



Portraits croisés.

Profil

> P. 4

LA PROPULSION EN TROIS QUESTIONS

■ Qu'est-ce qui fait décoller et avancer un lanceur ?

Pour aller dans l'espace, il ne suffit pas de s'envoler. Il faut « s'arracher » à l'attraction terrestre. À son décollage, Ariane 5 pousse 20 fois plus qu'un avion de ligne. Cette énergie est produite par les moteurs de fusées : la combustion dans ces moteurs délivre une énergie thermique. Les gaz de combustion, qui se trouvent dans un espace confiné, sont expulsés à des vitesses considérables après passage dans un conduit conique – la tuyère. En vertu du principe d'action/réaction, cette expulsion propulse le lanceur. La vitesse est d'autant plus grande que la pression et la température de combustion sont élevées.

■ Quels sont les différents modes de propulsion ?

La **propulsion chimique** est la plus utilisée pour les moteurs de fusée. Elle peut être :

Solide – Dans ce cas, les comburants et carburants sont pré-mélangés sous forme de gomme. Les propergols solides sont faciles à stocker et rapides à mettre en action. Mais ils ne permettent pas le rallumage des moteurs.

Liquide – Les ergols (comburants et carburants) sont stockés sous forme liquide. Les moteurs peuvent être éteints et rallumés plusieurs fois. Ils facilitent la modulation de la poussée.

La **propulsion cryotechnique** – Dans la famille de la propulsion liquide, le couple hydrogène-oxygène est le plus performant. Mais ces gaz ne deviennent liquides qu'à très basse température (-250° pour l'hydrogène), une des difficultés étant de les amener et de les maintenir à ces températures. L'étage supérieur d'Ariane a presque toujours fait confiance à ce mode de propulsion, qui a fait le succès de la « famille Ariane ». Enfin le respect de l'environnement est ici optimisé : la combustion dégage surtout de la vapeur d'eau.

Three questions about propulsion

How does a launcher lift off and ascend into space?

To reach space, a launcher doesn't just lift off—it literally has to tear itself away from Earth's attraction. At launch, Ariane 5's engines generate 20 times more thrust than a commercial airliner: combustion gases inside these engines deliver thermal energy as they are expelled from a confined space at high speed through cone-shaped nozzles. By virtue of the action-reaction principle, this expulsion of gases propels the launcher forward: the higher the combustion pressure and temperature, the higher its velocity.

What different kinds of propulsion exist?

Chemical propulsion is the most widely used for rocket engines. It may be:

- **Solid** – The oxidizer and fuel are pre-mixed with a binder into a solid block or 'grain'. Solid propellants

are easier to store and ignite faster, but they cannot be restarted.

- **Liquid** – Liquid-propellant engines can be shut down and restarted several times and are also easier to throttle.

Cryogenic propulsion – Hydrogen and oxygen are the most effective liquid propulsion combination. But as these gases only liquefy at very low temperature (-250°C for hydrogen), one of the difficulties is how to cool them and then maintain them at this temperature. The success of the Ariane family of launchers is largely based on the use of this form of propulsion, which is also lighter on the environment since combustion mostly produces water vapour.

Electric propulsion – Thrust is produced by accelerating plasma (an ionized gas) with electric or

electromagnetic fields. Electric thrusters are a lot less powerful than chemical thrusters, but they are more efficient. They need to operate for much longer to accomplish their mission. They are suited to unmanned deep-space exploration missions, for example to Mars.

Why does Ariane 6 need so many solid-rocket boosters?

Ariane 6 is set to make its first flight in 2020. It will be a 'modular' launcher able to carry payloads of 2 to 8 tonnes for the satellite market, using either 2 or 3 boosters. Using solid propulsion in this way will allow Ariane 6 to adapt to requirements, since solid propellants can be stored as one or more blocks. And as they can be stored for longer, they can be used much more flexibly to meet demand.



Décollage de jour d'Ariane 5, depuis le port spatial de l'Europe, en Guyane.
Daytime launch of Ariane 5 from Europe's spaceport in French Guiana.

La **propulsion électrique** – La poussée résulte de l'accélération de plasma (un gaz chargé d'ions) par des champs électriques ou électromagnétiques. Ces moteurs développent une poussée notablement plus faible que les « chimiques », mais avec des rendements supérieurs. Ils doivent fonctionner sur des durées beaucoup plus longues pour assurer leurs missions. Ils sont adaptés aux missions d'exploration automatiques et lointaines, comme les missions martiennes.

■ Pourquoi Ariane 6 a-t-elle besoin d'autant de propulsion solide ?

Ariane 6 devrait être lancée à l'horizon 2020. Ce lanceur sera « modulable » : le poids de la charge utile doit pouvoir varier de 2 à 8 tonnes pour répondre au marché des satellites. De la même façon, il pourrait moduler le nombre de ses boosters (2 ou 3). En utilisant la propulsion solide, Ariane 6 satisfait à cette nécessité d'adaptation : les propergols peuvent être stockés sous la forme d'un ou plusieurs blocs solides. Comme ils peuvent être stockés longtemps, ils peuvent être utilisés de manière souple, en fonction de la demande.



© CNES / RONAN LIETAR

EXERCICE DE PHYSIQUE

ATTENTION, ARIANE 5 DÉCOLLE !!

Les 3 moteurs de la fusée Ariane 5, le moteur Vulcain 2 et les deux moteurs EAP, exercent ensemble une poussée modélisée par une seule force verticale et de valeur constante $F = 1,46 \cdot 10^7 \text{ N}$. La masse de la fusée est de 780 t au décollage. (dont 10 t pour le satellite embarqué et 650 t pour la masse totale des ergols).
Donnée : intensité de pesanteur : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-1}$

1 / Calculer le pourcentage de masse que représente le satellite par rapport à la fusée. Proposer un commentaire.

$\frac{10}{780} = 1,3\%$. Le satellite ne représente à peine que 1% de la masse totale de la fusée !

2 / Calculer le pourcentage de masse des ergols par rapport à la fusée. Proposer un commentaire.

$\frac{650}{780} = 84\%$. Les ergols sont de très loin ce qu'il y a de plus lourd dans une fusée.

On suppose pendant la phase de vol que le poids P et la force de poussée sont constants.

3 / Sur un schéma, représenter ces forces qui s'exercent au centre de gravité G de la fusée.

L'échelle utilisée sera $1 \text{ cm} = 5 \cdot 10^6 \text{ N}$
 $P = m \times g = 780000 \times 9,8 = 7,6 \cdot 10^6 \text{ N}$
Soit une longueur de 1,5 cm pour P et 2,9 cm pour F

4 / Hypothèse n°1 : masse de la fusée constante au décollage
Hypothèse n°2 : l'accélération de la fusée est constante entre $t = 0 \text{ s}$ et $t = 2 \text{ min}$.

4.1 / Calculer la valeur de l'accélération a que subit la fusée au décollage.

En supposant le référentiel d'étude galiléen et comme système la fusée, la deuxième loi de Newton permet d'écrire :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{p} + \vec{F} \text{ soit en projetant, } Ma = F - P \text{ d'où}$$

$$a = \frac{F - P}{M} = \frac{1,46 \cdot 10^7 - 7,6 \cdot 10^6}{780000} = 8,9 \text{ m.s}^{-2}$$

4.2 / En supposant cette accélération constante, pourquoi peut-on déduire que $z = \frac{a}{2} t^2$, z représentant l'altitude ?

Si l'accélération est constante, $v = a \times t$ car à $t = 0 \text{ s}$, $v_0 = 0 \text{ m.s}^{-1}$.
Soit encore, $z = \frac{a}{2} \times t^2$ puisque à $t = 0 \text{ s}$, $z = 0 \text{ m}$.

Résultats obtenus en intégrant successivement.

4.3 / Au bout de 2 minutes environ les deux EAP sont abandonnés. À quelle altitude se trouvent-ils alors ?

$z = \frac{a}{2} \times t^2 = \frac{9,0}{2} \times 120^2 = 64 \text{ km}$

4.4 / Est-on sorti de l'atmosphère (altitude de l'atmosphère 100 km) ?

Non.

4.5 / Ils ne seront donc pas brûlés lors de leur chute. Mais savez-vous où ils retombent alors ?
Ils retombent dans l'océan Atlantique.

4.6 / Que pensez-vous des hypothèses de travail proposées ?

Hypothèse 1 : au décollage, sur les premières secondes, on peut considérer la masse de la fusée comme constante.

Hypothèse 2 : vu que la combustion des ergols génère la force de poussée, on bout de deux minutes la fusée a perdu une bonne partie de ces ergols donc l'hypothèse visant à considérer la masse de la fusée constante est bien loin de la réalité.

Ariane 5 ME adapté (à gauche);
Ariane 6 (à droite).
Adapted Ariane 5 ME (left)
Ariane 6 (right)



Schéma 3. Diagram 3.



PHYSICS EXERCISE

All eyes on Ariane 5, ready to launch!

The Ariane 5 launcher's three engines—the Vulcain 2 and two solid-rocket boosters—together deliver a modelled thrust via a single and constant vertical force $F = 1.46 \cdot 10^7 \text{ N}$. The launcher's total mass at lift-off is 780 t (of which 10 t for the satellite payload and 650 t in total propellant mass).
Data: force of gravity $g = 9.8 \text{ m.s}^{-1}$

1/ Calculate the satellite's mass as a percentage of the launcher's. Comment on your finding.
 $\frac{10}{780} = 1.3\%$. The satellite is barely 1% of the launcher's total mass!

2/ Calculate the mass of the propellants as a percentage of the launcher's. Comment on your finding.

$\frac{650}{780} = 84\%$. The propellants are by far the heaviest thing on a launcher.

We assume during the flight phase that the weight W and the thrust are constant.

3/ Draw a diagram to represent these forces exerted on the launcher's centre of gravity G . Use a scale of $1 \text{ cm} = 5 \cdot 10^6 \text{ N}$

$W = m \times g = 780,000 \times 9.8 = 7.6 \cdot 10^6 \text{ N}$
I.e., 1.5 cm for W and 2.9 for F

4/ Hypothesis 1: the launcher's mass at lift-off is constant
Hypothesis 2: the launcher's acceleration is constant between $t=0 \text{ s}$ and $t=2 \text{ min}$.

4.1 / Calculate the acceleration a to which the launcher is subjected at lift-off.
Assuming a Galilean reference frame and the launcher as the system, Newton's 2nd law of motion means we can write:

$$\frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{w} + \vec{F}, \text{ i.e. by projecting, } Ma = F - W \text{ and thus}$$

$$a = \frac{F - W}{M} = \frac{1.46 \cdot 10^7 - 7.6 \cdot 10^6}{780,000} = 8.9 \text{ m.s}^{-2}$$

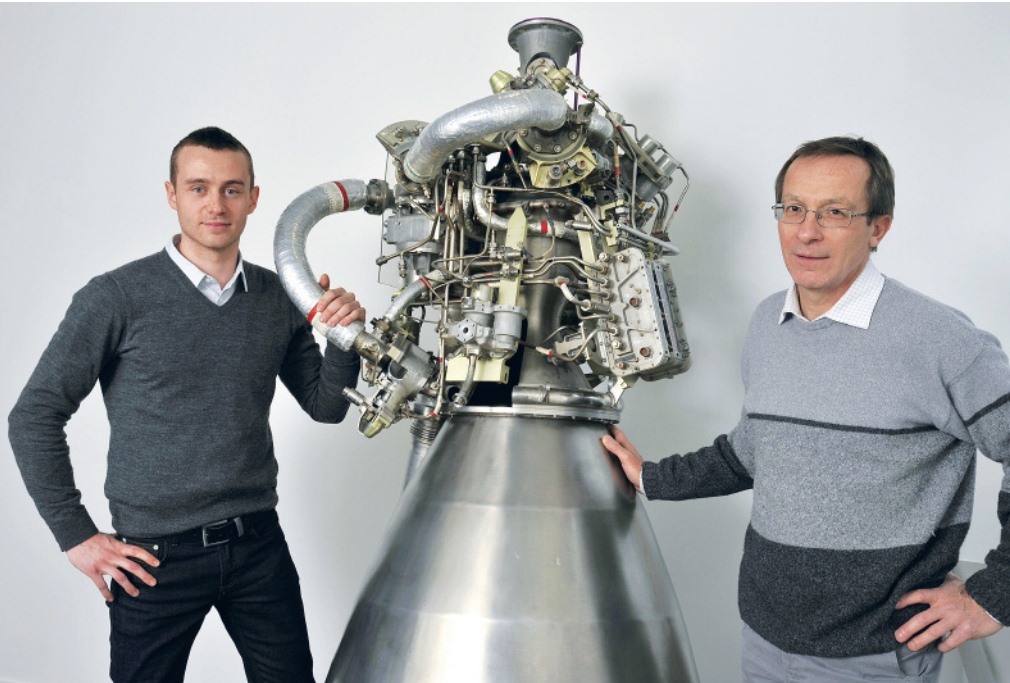
4.2 / Assuming this acceleration is constant, why can we deduce that $z = \frac{a}{2} t^2$, where z is the altitude?
If the acceleration is constant, $v = a \times t$ since at $t = 0 \text{ s}$, $v_0 = 0 \text{ m.s}^{-1}$.
Or, $z = \frac{a}{2} \times t^2$ since at $t = 0 \text{ s}$, $z = 0 \text{ m}$. These results are obtained by integrating successively.

4.3 / After about 2 minutes, the two solid-rocket boosters are jettisoned. At what altitude does this occur?
 $z = \frac{a}{2} \times t^2 = \frac{8.9}{2} \times 120^2 = 64 \text{ km}$

4.4 / Is the launcher outside the atmosphere yet (upper limit of the atmosphere = 100 km)?
No.

4.5 / They will not therefore burn up. Where will they fall back to Earth?
In the Atlantic Ocean.

4.6 / What do you think of the working hypotheses proposed here?
Hypothesis 1: during the first seconds of the flight, at lift-off, the launcher's mass can be considered constant.
Hypothesis 2: Since combustion generates the thrust, after 2 minutes the launcher has burned a large amount of its propellants, so the hypothesis that the launcher's mass is constant is far from the truth.



© CNES/E. GRIMALT, 2013

Des trajectoires atypiques et convergentes

Ils n'ont ni même âge, ni même formation, ni même parcours. Au sein de la Direction des lanceurs, Pascal Fortunier et Romain Perrier Gustin se retrouvent dans l'enthousiasme partagé pour les moteurs de fusée, leur cœur de métier. « *C'est le domaine le plus ouvert et le moins sclérosant qui soit* », précise Pascal Fortunier.

La propulsion spatiale, c'est une approche multidisciplinaire qui donne accès à la thermodynamique, à la thermique, à la mécanique des fluides, à la mécanique des structures, à la dynamique, à l'électrique..., et l'inventaire n'est pas exhaustif. Tous deux ne sont pas nés dans le spatial. Ils ont eu « une vie avant » ; leur avis est donc précieux. Longtemps ingénieur motoriste avion, Pascal Fortunier a sauté le pas un peu par le jeu des concours de circonstances. Il ne l'a jamais regretté : « *On découvre les choses peu à peu. Mais alors qu'ailleurs les fonctions et les missions de chacun sont cloisonnées, ici, il faut obligatoirement s'intéresser à toutes les disciplines, et c'est une vraie richesse. C'est un message qu'il faut absolument passer aux jeunes. Quel que soit le cursus, le profil de chacun, la motorisation de fusée, c'est une porte grande ouverte sur demain. Il suffit d'être curieux* », dit-il. Frais entré au CNES, en septembre 2012, Romain Perrier Gustin ne dit pas autre chose. Bac pro MEI¹ en poche, il a conclu quatre ans d'apprentissage à la SNCF par un BTS. Une prépa ATS² lui donne le goût du spatial en même temps qu'elle lui ouvre la porte des Arts et Métiers... un parcours atypique qu'il ne regrette pas. Il a fait son miel de tout et a pris dans chaque formation le plus constructif. Il fait ses premières armes sur les moteurs de fusée à la faveur d'un stage : « *Mon parcours différent m'avait donné la culture industrielle, ce que ne donnent pas forcément des formations classiques.* » À la DLA, il a trouvé ce qu'il cherchait : « *J'ai pris conscience que, derrière la technique, il y avait des services, des applications, des projets pour le futur. Le lanceur, ce n'est pas une fin en soi. Derrière les systèmes, il y a des applications. C'est direct, concret, mais aussi, c'est global ; ça ouvre à toutes les technologies. Il suffit de s'intéresser, d'être curieux.* » À la génération près, l'engouement pour cette diversité, cette richesse, est incontestablement le même.

¹ Maintenance des équipements industriels.
² Adaptation technicien supérieur.

PROFILE

PASCAL FORTUNIER AND
 ROMAIN PERRIER GUSTIN,
 Launch Vehicles Directorate

Atypical paths converge

They come from different generations and career backgrounds. But at CNES's Launch Vehicles Directorate (DLA), Pascal Fortunier and Romain Perrier Gustin share the same enthusiasm for rocket engines. "It's the most open and least inhibiting domain you could think of," says Pascal Fortunier.

Space propulsion is a multidisciplinary field taking in thermodynamics, thermal control, fluid and structural mechanics, electricity and more. Neither of our two engineers in this story was 'born' into the space field, so they have valuable insights to offer. After working for many years on aircraft engines, Pascal Fortunier made a career change he has never regretted: "Elsewhere you find functions and missions are stove-piped, but here you have to develop an interest in all fields, which is really stimulating. The message we need to get across to young people is that, whatever your career path and preferences, rocket engines offer great prospects for the future," he says. Romain Perrier Gustin only joined CNES last September, but he feels exactly the same way. After acquiring a baccalaureate in industrial maintenance, he completed a BTS diploma and spent four years as an apprentice with SNCF. A specialist technical qualification then gave him a taste for space, while opening a window into the world of arts and crafts—an atypical path he doesn't regret. Throughout his education, he has retained the most constructive aspects at every stage. He first got to grips with rocket engines as an intern: "Unlike most conventional qualifications, my unusual career path had given me an industry culture," he says. At DLA, he found what he was looking for: "I realized that behind the technologies there were services, applications and projects for the future. A launcher isn't an end in itself. Real-world applications lead to all kinds of technologies, you just need an enquiring mind."

(NDLR. Nos remerciements vont à Jean-Paul Castro, professeur de Physique, Michel Vauzelle et Vincent Doumerc, professeurs chargés de mission auprès du CNES, Philippe Pascal, Christophe Bonhomme et Marie Jacquesson du CNES.)
 (Editor's note: Our thanks to physics teacher Jean-Paul Castro; Michel Vauzelle and Vincent Doumerc, teachers and advisors to CNES; and to Philippe Pascal, Christophe Bonhomme and Marie Jacquesson at CNES.)