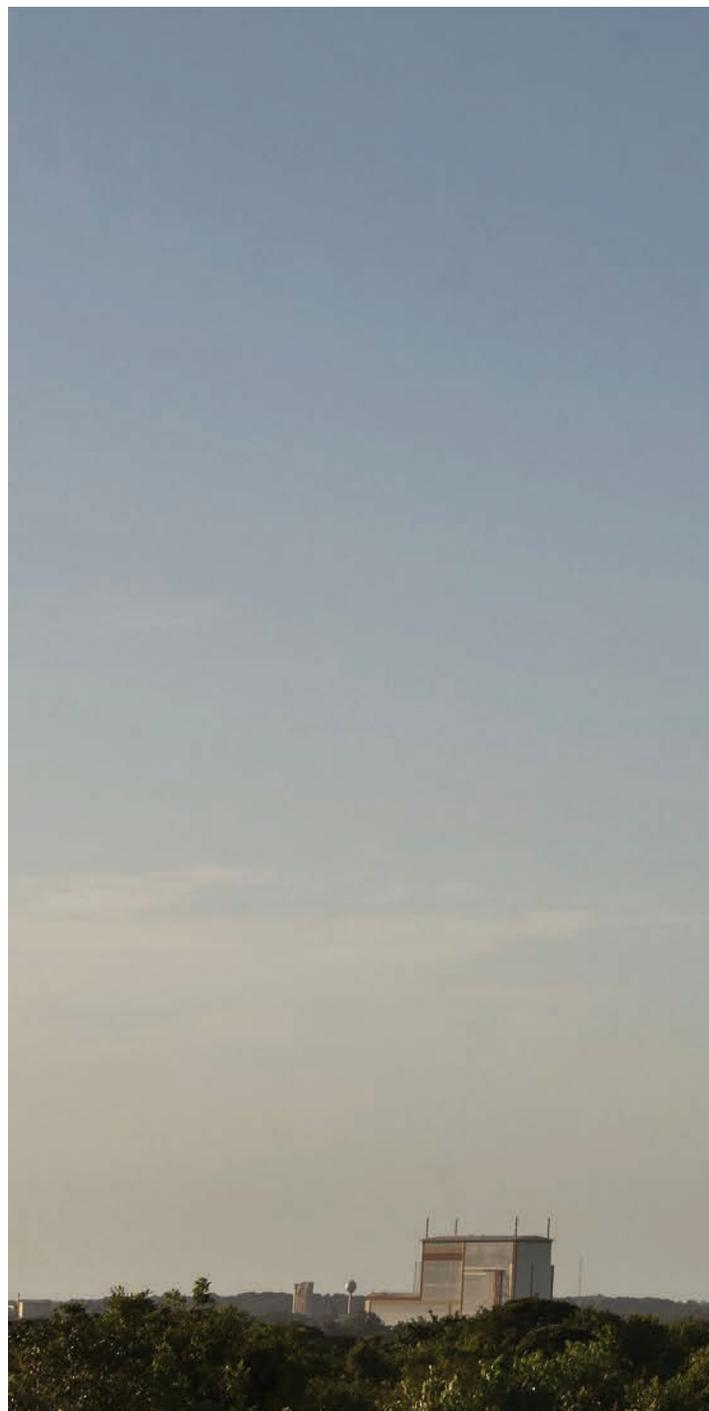


PROPULSION

Booster pour s'arracher de terre

LILIANE FEUILLERAC POUR LE CNES ^[1]

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 T¹ 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 aux « temps, mouvement et évolution ». Une manière de booster aussi l'intérêt des jeunes pour les sciences.



■ Décollage de jour d'Ariane 5, depuis le port spatial de

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



© CNES/ILL. DAVID DUCROS. 2014

l'Europe, en Guyane

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 prémélangés sous forme de gomme. Les propergols

Mots-clés

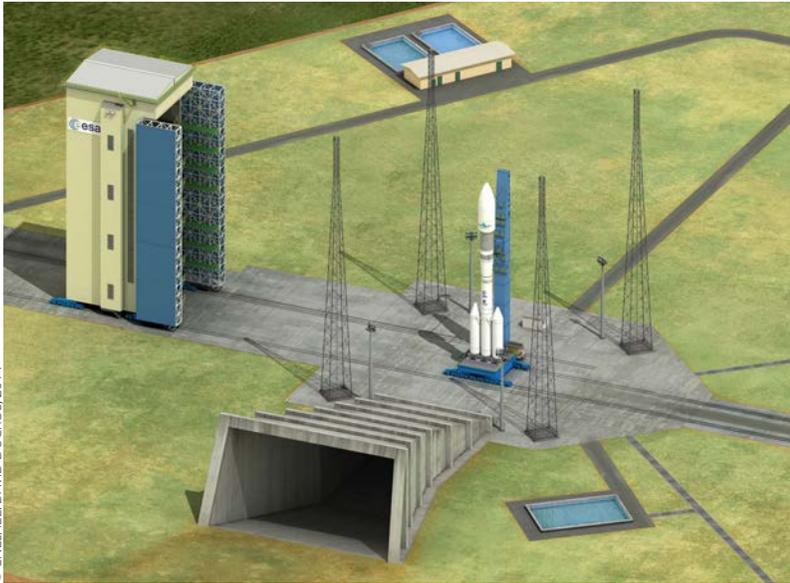
design industriel, machine, R&D

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 et 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

[1] Article tiré de *Cnes Mag éducatif*, supplément d'information au *Cnes Mag*, n° 57, avril 2013.



© CNES/ILL. DAVID DUCROS, 2014

■ Illustration du lanceur Ariane 6 sur son futur pas de tir

liquides qu'à très basse température (– 250 °C 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.

● **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 celle des « 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.

PORTRAITS CROISÉS

Pascal Fortunier et Romain Perrier Gustin, à la direction des Lanceurs

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 faire 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.



© CNES/HERVÉ PIRAUD, 2013

Bac pro MEI (Maintenance des équipements industriels) en poche, il a conclu quatre ans d'apprentissage à la SNCF par un BTS. Une prépa ATS (adaptation technicien supérieur) 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 fusées 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.

EXERCICE DE PHYSIQUE

Attention, Ariane 5 décolle !

Les trois 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 de valeur constante $F = 1,46 \times 10^7$ 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 $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

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

$$10 / 780 = 1,3 \%$$

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.

$$650 / 780 = 84 \%$$

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 cm pour 5×10^6 N.

$$P = m \cdot g = 780\,000 \times 9,8 = 7,6 \times 10^6 \text{ N}$$

Soit une longueur de 1,5 cm pour P et de 2,9 cm pour F .

4. Hypothèse n° 1 : la masse de la fusée est constante au décollage.

Hypothèse n° 2 : l'accélération de la fusée est constante entre $t = 0$ s et $t = 2$ 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 :

$$d\vec{p} / dt = \vec{P} + \vec{F}$$

Soit, en projetant, $Ma = F - P$, d'où

$$a = (F - P) / M = (4,46 \times 10^7 - 7,6 \times 10^6) / 780\,000 = 8,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

- 4.2. En supposant cette accélération constante, pourquoi peut-on déduire que $z = (a / 2) t^2$, z représentant l'altitude ?

Si l'accélération est constante, $v = a \cdot t$, car, à $t = 0$ s, $v_0 = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Soit encore, $z = (a / 2) t^2$, puisque, à $t = 0$ s, $z = 0$ 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 ?

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

- 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 où retombent-ils ?

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, au bout de 2 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.



■ Lanceurs Ariane 5 ME adapté (à gauche) et Ariane 6 (à droite)

Remerciements

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.

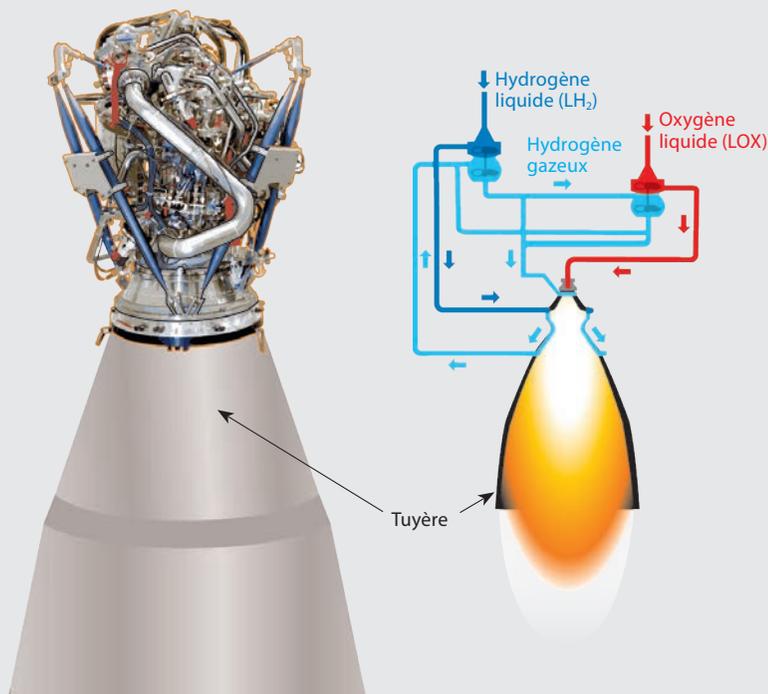
Du principe de Newton au pas de tir

Depuis 1974, la direction des Lanceurs (DLA) du Cnes a été mandatée par l'Agence spatiale européenne pour concevoir les lanceurs Ariane et maîtriser la chaîne de développement. Du papier au pas de tir, elle mobilise tous ses métiers. Mais elle doit aussi imaginer l'avenir pour étudier les systèmes de transport spatial du futur. Elle prépare les lanceurs de nouvelle génération avec l'appui de l'industrie et des organismes de recherche.

QUI FAIT QUOI ?

La propulsion cryotechnique

La propulsion cryotechnique est utilisée pour obtenir de meilleures performances. Les ergols sont composés d'hydrogène liquide (-253 °C) comme carburant et d'oxygène liquide (-183 °C) comme comburant. Le moteur fonctionne dans des conditions extrêmes : il faut passer du vide à une pression de 300 bars environ et de -253 °C à $3\,500\text{ °C}$, tout en restant léger, et en délivrant une forte poussée (voisine de 18 tonnes pour le moteur Vinci). Ces contraintes sont étudiées de façon rigoureuse en fonction de toutes les phases de la mission. La propulsion cryotechnique concentre de nombreuses disciplines scientifiques : combustion, matériaux, aérodynamique, thermodynamique, hydraulique, ou encore la mécanique des structures.



L'avionique

L'avionique, dans un lanceur, c'est un peu comme le système nerveux chez les humains ! Un réseau dense qui assure le fonctionnement des équipements électriques, électroniques, microélectroniques : capteurs de mesure, ordinateurs de bord, vérins répartis sur l'ensemble du lanceur. Mais elle alimente aussi les équipements



des stations sol. Il faut donc construire une architecture câblée, cohérente, permettant de véhiculer le flux des informations nécessaires vers des fonctions essentielles : télémesures, contrôle de vol, sauvegarde, séparation des étages. C'est aussi ce service qui développe les logiciels pour assurer la bonne transmission des commandes entre cerveau et équipements.

Les structures sur un lanceur

Un lanceur est constitué de plusieurs structures : les réservoirs contiennent les ergols, les jupes se trouvent entre deux étages. Situées au-dessus du dernier étage, d'autres structures font l'interface entre le lanceur et les satellites. Ces fonctions différentes déterminent les différents matériaux. On utilise les matériaux métalliques comme l'acier pour les boosters à propulsion solide, l'aluminium pour les réservoirs cryogéniques, les composites à base de fibre de carbone pour les structures allégées (jupes et structures hautes), voire des élastomères pour l'amortissement des satellites ou pour certains équipements. L'enjeu est de concevoir des structures capables de supporter les très gros efforts liés à la poussée des moteurs et à la traversée de l'atmosphère en restant le plus légères possible. La masse gagnée sur les structures est rendue disponible pour le satellite et ses missions.

L'environnement dynamique

Les avions n'échappent pas aux secousses et aux turbulences ! Pour un lanceur, c'est pire ! Il est sujet à d'intenses phénomènes vibratoires générés par des sources d'excitations dynamiques très variées : le bruit des moteurs au décollage, les transitoires d'allumage des moteurs, les rafales de vent dans les hautes couches de l'atmosphère. Ces vibrations peuvent être très dangereuses et occasionner des aléas divers : rupture d'une carte électronique, création d'une fuite sur un équipement hydraulique. Un effort important est donc fait pour prévoir et contrôler ces vibrations.

La conduite du vol

Contrairement aux voitures, les lanceurs sont des véhicules autonomes : il n'y a pas de pilote à bord ! Leurs décisions sont prises grâce au programme de vol chargé dans l'ordinateur de bord. Ils s'appuient sur des fonctions et algorithmes appelés « contrôle de vol » ou GNC (*guidance, navigation, control*).

Pour mettre le satellite en orbite, le lanceur décrit une trajectoire adaptée en temps réel. La fonction **navigation** utilise des capteurs inertiels : à chaque instant, le lanceur connaît sa position avec une grande précision. La fonction **guidage** détermine le chemin qu'il doit suivre pour atteindre sa destination finale (l'orbite souhaitée).



■ Coiffe de protection du satellite

par le satellite). La fonction **pilotage** lui permet de suivre le chemin indiqué par le guidage; son action peut malgré tout être perturbée par divers facteurs : vent pendant le vol atmosphérique, phase de largage des étages. Pour que le lanceur prenne les bonnes décisions, les algorithmes doivent pouvoir traiter toutes les situations et être parfaitement validés avant le décollage.

L'acoustique (la coiffe)

Un satellite est fragile et doit être protégé de toutes sortes d'agressions, comme la pluie, l'humidité, les poussières dans l'environnement du pas de tir. Mais il faut aussi l'isoler du bruit des moteurs du lanceur au décollage. La coiffe assure cette protection acoustique optimale. Après le lancement, elle protège le satellite des effets aérodynamiques et aérothermiques quand il traverse l'atmosphère terrestre. Quand le lanceur atteint plus de 100 km, la densité de l'air devient négligeable, la coiffe est découpée et éjectée.

ET DEMAIN

Les propulsions du futur à l'étude

Avec des décennies de fonctionnement, la propulsion chimique reste, à l'heure actuelle, la technologie la plus utilisée pour les lanceurs et les satellites. Mais des moteurs de plus en plus innovants et prometteurs voient le jour.

La propulsion nucléaire

La propulsion nucléo-thermique : Cette technologie a déjà cinquante ans; elle a été testée au sol par les Russes et les Américains. L'énergie est fournie par un cœur nucléaire. La poussée obtenue serait importante et plus efficace que celle obtenue par la propulsion cryotechnique, mais les conditions d'essai au sol sont très (voir trop) contraignantes.

La propulsion nucléo-électrique : C'est une véritable petite centrale nucléaire associée à des propulseurs électriques. Très

efficace, mais de très faible poussée, ce mode de propulsion pourrait convenir aux missions martiennes habitées.

La propulsion solaire

Il s'agit de concentrer l'énergie des rayons solaires pour chauffer un fluide et l'accélérer dans une tuyère. L'énergie solaire est gratuite, la performance est bonne, le concept simple. Le problème reste de concentrer les rayons avec précision.

COMMUNICATION

Suivez le fil d'Ariane sur Dailymotion

Vous voulez tout savoir sur Ariane? Le Cnes consacre une série de petits films d'animation au fonctionnement des lanceurs, et plus particulièrement à celui de la fusée européenne Ariane. Traité avec légèreté, le graphisme emprunte au dessin humoristique, à la BD. Le scénario drôle et inventif et la mise en scène percutante font de ces vidéos des supports dynamiques, frais, rythmés. C'est fun! La simplicité du propos n'enlève rien à la rigueur scientifique, explicative. Alternant voix off et témoignages des ingénieurs de la DLA, en trois ou quatre minutes chrono, ces films d'animation délivrent l'essentiel des informations sur une question. Sous le titre générique *Le Fil d'Ariane*, ces neuf épisodes combleront toutes vos lacunes sur les trajectoires, la propulsion, la télémétrie, les ordres de grandeur et le cerveau du lanceur, la pyrotechnie, la table de lancement, les matériaux et structures, ainsi que l'ambiance dynamique du lanceur. Clin d'œil à toute l'excellence technologique et à l'ingéniosité en jeu dans le domaine des lanceurs, la voix de cette série qui décortique le lanceur Ariane est celle qui double en français le personnage de Mac Gyver.

<http://itunes.apple.com/fr/app/cnes/id403538004?mt=8>

www.dailymotion.com/playlist/x23esL_CNES_le-fil-d-ariane/1#video=xsfrwt