

## Les fusées à ergols

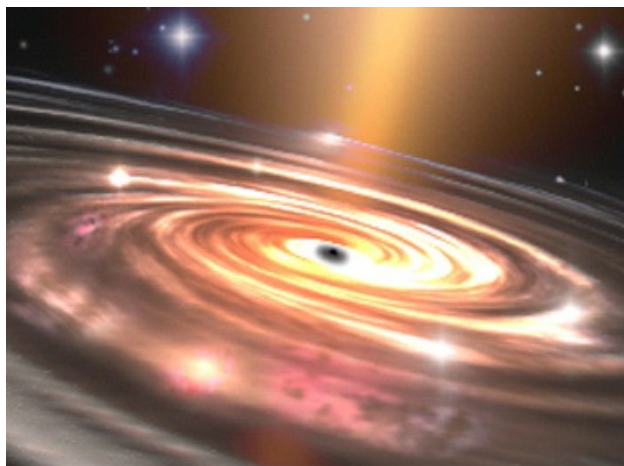
Beaucoup rêvent déjà des vaisseaux archanges et des portails distrants imaginés par Dan Simmons, voyageant à des vitesses supra-luminiques ou permettant à leurs utilisateurs de se téléporter en n'importe où dans l'espace. La réalité est différente ....

### Page 1/5 - Les fusées à ergols

Beaucoup rêvent déjà des vaisseaux archanges et des portails distrants imaginés par Dan Simmons, voyageant à des vitesses supra-luminiques ou permettant à leurs utilisateurs de se téléporter en n'importe quel point de l'espace. La réalité des moteurs fusée actuels, si elle est tout aussi passionnante, s'éloigne un peu de la science-fiction...

En effet, si les moteurs utilisés sur les fusées et navettes d'aujourd'hui font appel aux technologies les plus poussées en termes de matériaux, d'électronique et de chimie, les principes physiques à la base de leur fonctionnement sont des plus simples : la combustion dans une chambre d'un combustible et d'un comburant, par exemple l'oxygène et l'hydrogène, l'expulsion des gaz résultants à travers une tuyère, et la propulsion de la fusée proprement dite par application de la loi de l'action et de la réaction dictée par Newton.

Qu'il s'agisse de la navette américaine, des vecteurs Soyouz russes ou des fusées Ariane, les moteurs utilisés sur les véhicules spatiaux d'aujourd'hui font tous appel à la propulsion chimique. Néanmoins, ils peuvent se classer en deux catégories : les moteurs à propulsion liquide d'une part, dans lesquelles le comburant et le combustible (communément appelés « ergols ») sont stockés à l'état liquide, et les moteurs à propulsion solide d'autre part, qui font brûler des blocs solides de propergol, contenant un mélange intime des deux réactifs et n'attendant qu'une étincelle pour s'enflammer.



Voyager à travers les trous noirs : l'un des nombreux rêves des scientifiques en matière de propulsion spatiale © T. Lombry

**Alors qu'aujourd'hui les agences spatiales internationales et le public s'extasient sur les moteurs ioniques, nucléaires, voire les moteurs à antimatière, pourquoi a-t-on toujours recours à des fusées à propulsion chimique ? Est-ce par choix ou par nécessités ? D'autre part, quelles sont les différences entre**

la propulsion liquide et la propulsion solide ? Peut-on remplacer ces moteurs dits « traditionnels » par des technologies plus avancées ?

---

## Page 2/5 - Pourquoi la propulsion chimique ?

### A - Un regard en arrière...

**Si l'origine de la propulsion chimique liquide est relativement récente, il faut revenir loin dans le passé pour découvrir celle de la propulsion solide.**

En effet, le premier propergol solide fut probablement inventé par les chinois, entre 600 et 800 après J.C. Nommée « poudre noire » ou « poudre à canon », elle était constituée de charbon, de bois, de soufre et de Salpêtre, et fut déjà utilisée en 1232 au siège de Kai-Fang-Fu par les mongols pour propulser des flèches incendiaires.

Mais ce fut en 1687, quand Isaac Newton posa son principe de l'action et de la réaction, à la fois simple et révolutionnaire, que le concept de fusée prit réellement son envol. On venait alors de comprendre qu'il suffisait de créer une poussée vers le bas pour que, par réaction, une force d'égale intensité propulse la fusée vers le haut.

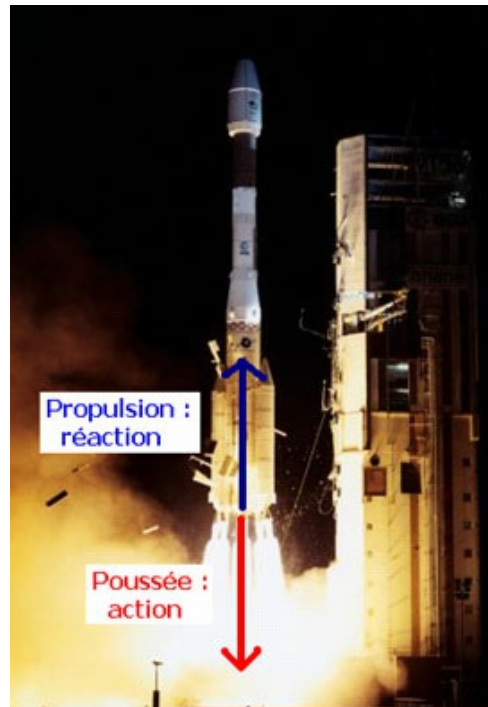


Portrait de Jules Verne



Portrait d'Isaac Newton (1642-1727)

Ainsi, comme on le voit sur la photo ci-dessous, représentant le décollage d'Ariane 4 pour son vol 126 du 24 Janvier 2000, les moteurs de la fusée expulsent des gaz à des conditions de température et de pression élevées, créant ainsi une forte poussée vers le bas (flèche rouge). **Par application du principe de l'action et de la réaction, on sait qu'une force dirigée vers le haut et de même intensité s'applique sur la fusée (flèche bleue). C'est ainsi que la fusée s'arrache de l'attraction terrestre et monte dans le ciel.**



Ariane 4 au décollage – Principe de l'action et de la réaction  
D'après une photo du Service optique du CSG

Forts de cette nouvelle découverte, les motoristes de l'époque construisirent les premiers prototypes de fusées dignes de ce nom. **C'est ainsi que des missiles d'une portée de 2800 mètres utilisant la propulsion à poudre furent utilisés en 1806 par Sir William Congreve (1722-1828) lors de l'attaque de Boulogne.** Et en 1850, ce fut au tour de la France de rivaliser avec une fusée à poudre de 20 kg et d'une portée de 3200 mètres.

Enfin, c'est en 1865 que Jules Verne (dont on commémore le centenaire cette année), avec son roman *De la Terre à la Lune*, fit rêver des millions d'hommes, leur fit lever les yeux vers les étoiles, inaugurant ainsi – sans le savoir ? – une longue et passionnante quête de l'espace et de ses confins.

## B - Un coup d'œil sur la physique de la propulsion fusée



Ariane 5 ESC-A - © ESA - Ejection de matière au décollage

Les fusées équipées de moteurs chimiques d'aujourd'hui se basent sur la production dans une chambre de combustion de grandes quantités de matière sous forme gazeuse. Les gaz issus de la réaction, à hautes températures (plus de 600 degrés Celsius) et fortes pressions (d'un ordre de grandeur de 100 bars, soit près de 100 cent fois la pression atmosphérique), sont détendus dans une tuyère et éjectés à grande vitesse à l'arrière du moteur. Ce sont ces éjections qui forment la traînée caractéristique de la fusée.

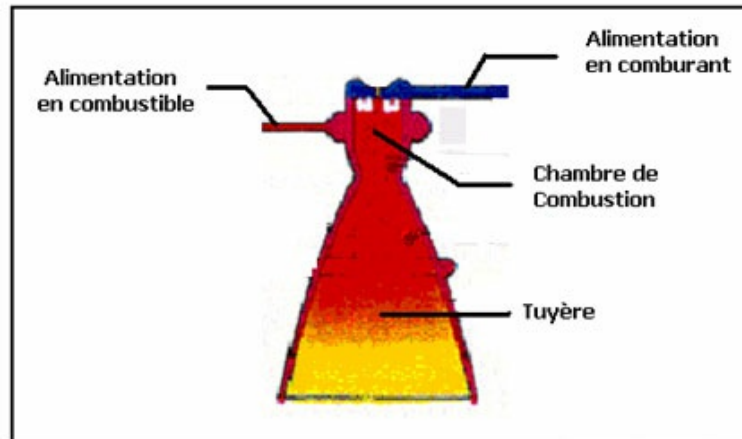
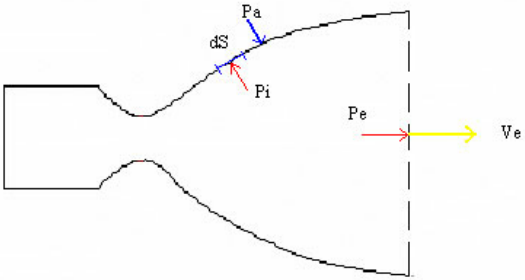


Schéma de principe d'un moteur fusée liquide « classique »  
D'après un document de l'ESA

- Les deux réactifs entrent dans la chambre de combustion via deux circuits d'alimentation différents, sont mis en contact et réagissent dans la chambre de combustion.
- Les gaz issus de la combustion sont détendus et accélérés dans le divergent de la tuyère, de forme conique, puis éjectés à l'arrière du moteur.

Cette éjection de matière dans l'atmosphère ou dans le vide crée une force dirigée vers le bas, que l'on nomme la poussée. **D'après le principe de l'action et de la réaction de Newton, une force opposée, donc dirigée vers le haut, et d'égale intensité, s'applique sur le fuselage de la fusée et la propulse en avant.**

**Zoom sur le calcul de la poussée d'un moteur fusée**



La poussée du moteur fusée est directement relié au débit  $Q$  de gaz éjecté à la sortie de la tuyère, à la vitesse d'éjection  $V_e$  de ces gaz (d'où l'intérêt d'accélérer les produits de la combustion), à la section (la surface) de sortie de la tuyère  $S$  et à la différence entre la pression des gaz éjectés  $P_e$  et la pression atmosphérique  $P_a$ .

En effet, d'après le théorème des quantités de mouvement, avec les notations du schéma ci-dessus, la poussée  $F$  du moteur (en Newton) est donnée par :

$$F = QV_e + (P_e - P_a).S$$

La poussée du moteur fusée est directement relié au débit  $Q$  de gaz éjecté à la sortie de la tuyère, à la vitesse d'éjection  $V_e$  de ces gaz (d'où l'intérêt d'accélérer les produits de la combustion), à la section (la surface) de sortie de la tuyère  $S$  et à la différence entre la pression des gaz éjectés  $P_e$  et la pression atmosphérique  $P_a$ .

En effet, d'après le théorème des quantités de mouvement, avec les notations du schéma ci-dessus, la poussée  $F$  du moteur (en Newton) est donnée par :

Ces premières notions nous permettent déjà de comprendre un certain nombre de points importants dans la propulsion fusée :

- **Du bon choix des réactifs**

On a vu que, plus la pression des gaz éjectés et le débit de gaz sont importants, plus la combustion est bonne dans la chambre et meilleure est la poussée. C'est là qu'intervient le problème des choix des réactifs et de la richesse du mélange. Si de nombreux composants chimiques sont susceptibles de réagir en produisant d'importantes quantités de gaz, ils ne produisent pas tous des gaz suffisamment énergétiques pour un emploi dans les moteurs fusées.

Mais on ne peut pas se contenter de choisir les réactifs produisant les gaz les plus énergétiques car, comme d'habitude en matière de construction spatiale, tout est une affaire de compromis. En effet, le poids des réactifs revêt également une grande importance puisqu'il faut les stocker à bord en vue de leur utilisation en vol et que, plus la fusée sera lourde, plus elle devra fournir une forte poussée pour décoller.

- **Du bon choix de la tuyère**



### Le moteur liquide Vinci, à tuyère déployable

La tuyère intervient pour une grande part dans la vitesse d'éjection des gaz. En effet, de par la géométrie conique de son divergent, elle transforme l'énergie chimique contenue dans les molécules en énergie cinétique et les accélère considérablement.

Le choix de la longueur de la tuyère et de sa section de sortie est déterminant et est encore une fois affaire de compromis. En effet, quand la fusée décolle et quitte l'atmosphère, elle est soumise à une pression atmosphérique décroissante. Ainsi, si l'équation précédente nous informe que la poussée est maximale pour  $P_e = P_a$  (cas de la « tuyère adaptée »), cette adaptation ne peut être effective qu'à un instant donné. D'autre part, une fois qu'elle a quitté la terre, la fusée est soumise à une pression atmosphérique nulle, et tout allongement de tuyère s'accompagne d'un accroissement de la poussée.

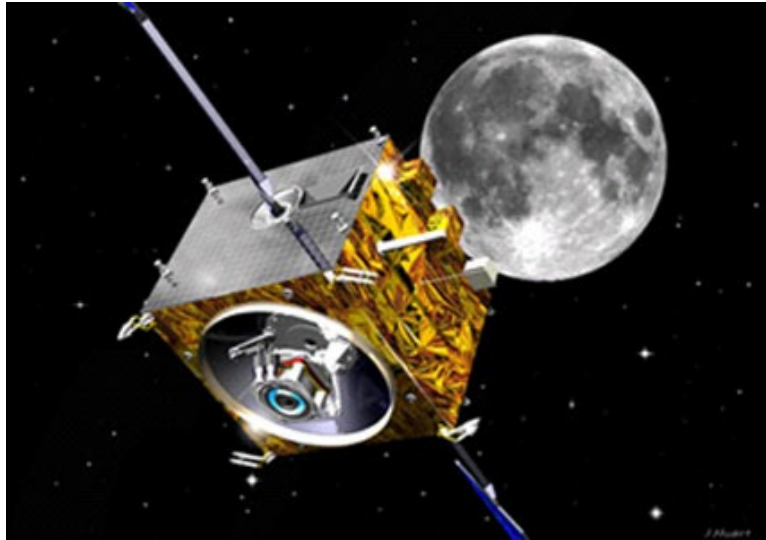
En résumé :

- **Un divergent trop long** nuit aux performances dans l'atmosphère.
- **Un divergent trop court** n'optimise pas la poussée dans le vide.

Cependant, en pratique, les moteurs des deuxième et troisième étages des lanceurs fonctionnent soit dans le vide soit dans le quasi-vide, et on a donc tout intérêt à augmenter le rapport de section des tuyères.

Il faut également noter que des projets plus ambitieux ont également vu le jour, tel le moteur Vinci (cf. photo ci-dessus) développé par la Snecma, dont la tuyère est déployable en vol.

### C - Pourquoi encore utiliser la propulsion chimique ?



Sonde orbitale lunaire Smart 1 équipée d'un moteur ionique  
© ESA

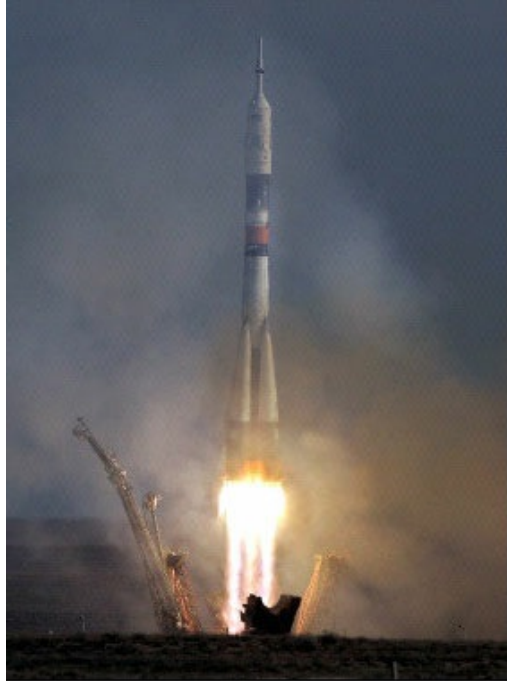
On l'a vu, les premières fusées chimiques ne datent pas d'hier. Si à l'origine celles-ci étaient davantage destinées à constituer des vecteurs de missiles plutôt que des vaisseaux d'exploration spatiaux, elles sont aujourd'hui communément utilisées pour les mises en orbite de satellite (lanceurs Ariane, Soyouz, Vega...) et pour les missions de ravitaillement de la Station Spatiale Internationale.

Pourtant, avec les progrès technologiques du vingtième siècle, des moteurs de plus en plus innovants et prometteurs n'ont cessé d'apparaître : le moteur nucléaire, nanti d'une mini centrale portant à haute température un propergol léger comme l'hydrogène, le moteur ionique (Smart 1), reposant sur l'ionisation d'un gaz et l'éjection des particules chargées à grande vitesse dans une tuyère

**Ces moteurs révolutionnaires sont souvent utilisés sur les sondes ou comme contrôleur d'attitude, mais on ne les voit jamais équiper les fusées qui quittent Cap Canaveral ou Kourou.** Alors pourquoi un tel désintérêt pour ces moteurs novateurs quand il s'agit de quitter la Terre ?

Le problème, c'est l'attraction terrestre. Quand la fusée décolle, elle est soumise à son poids, égale au produit de sa masse par l'intensité du champ gravitationnel, qui s'oppose à son élévation. Cette force est maximale à la surface et décroît au fur et à mesure que la fusée gagne en altitude. Ainsi, c'est pendant les premières secondes du décollage que l'attraction est la plus forte et que le moteur doit fournir la poussée la plus grande. Et cela, sur un plan technique, les moteurs ioniques, électriques, photoniques en sont bien incapables.





01/10/2005 : Décollage de la fusée Soyouz FG - C'est au moment du décollage que la poussée nécessaire est la plus importante

© AFP Journal Internet

Mais qu'en est-il du nucléaire ? Alors qu'on le sait, c'est bien souvent le poids des « ergols », des réactifs, qui grève les performances d'un lanceur, il est négligeable dans le cas d'un moteur nucléaire. En effet, la petite centrale que le moteur contient chauffe un fluide avant de l'éjecter, ce qui permet de s'abstenir d'emporter deux réactifs au profit d'un seul très léger, comme l'hydrogène. Pourtant, si les performances des moteurs nucléaires peuvent rivaliser avec celles des moteurs chimiques, les raisons de cette bouderie sont à chercher dans un autre domaine que la physique ou la chimie. En effet, c'est l'éthique qui s'oppose à l'utilisation de moteurs nucléaires pendant les phases de traversée de l'atmosphère. Et si la fusée connaissait un ennui et explosait en plein ciel ? Quelles seraient les conséquences sur la population ?

**Certains projets prévoient de faire escale sur une base relais comme la Station Spatiale Internationale à l'aide de moteurs conventionnels, d'équiper le lanceur en orbite d'un moteur nucléaire puis de l'envoyer en mission. Mais le prix d'un tel voyage serait encore trop exorbitant...**

Ainsi, si les moteurs chimiques (les moteurs à ergols) sont les seuls à fournir les poussées nécessaires au décollage et à la traversée de l'atmosphère, leur utilisation est mal adaptée aux manœuvres précises ou au contrôle d'attitude en vol. Et ceci précisément en raison de leur grande poussée.

### **On peut donc retenir les points suivants :**

- **Les moteurs à ergols** sont utilisés pour tous les vols commerciaux : envoi de satellites en orbite, ravitaillement de l'ISS.
- **Les moteurs ioniques**, s'ils ne peuvent arracher un lanceur à l'attraction terrestre, sont des moteurs réallumables à faible poussée qui offrent un plus grande manoeuvrabilité que les moteurs à ergols. Pour ces raisons, ils sont souvent utilisés sur les sondes.
- **Les moteurs ioniques, nucléaires et photoniques** sont les seuls susceptibles de nous mener aux confins du système solaire (la masse d'ergols à embarquer pour un tel voyage serait beaucoup trop important dans le cas d'un moteur chimique.)

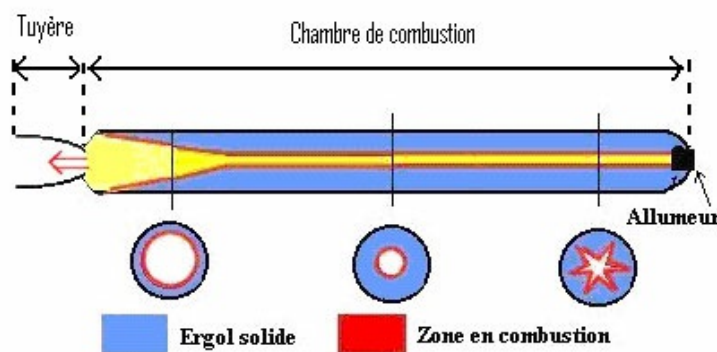


## Page 3/5 - La propulsion solide

### A - Le principe

Un moteur chimique fait réagir deux constituants, et se propulse en éjectant les gaz à pression et température élevés issus de leur réaction. Dans le cas de la propulsion solide, les deux constituants sont prémélangés dans une pâte et stockés à l'intérieur du corps du propulseur, sous la forme d'un ou plusieurs blocs solide(s). Comme la poudre d'un pétard qui reste neutre tant que l'on n'a pas allumé la mèche, la pâte (le « propergol ») ne brûle pas sans avoir été initié au préalable par l'allumeur de la chambre de combustion.

Ci-dessous, en bleu ciel figure le propergol solide, la pâte constituée du mélange des deux réactifs. Quelque soit sa forme, la géométrie de la pâte est de révolution autour d'un canal central servant de conduit d'échappement aux gaz de combustion (conduit jaune sur le schéma ci-dessus). Quand l'allumeur est mis en marche, la température s'échauffe dans la chambre de combustion et le propergol commence à brûler. Du gaz apparaît, et circule dans le canal central jusqu'à la tuyère. Il faut noter que la combustion se fait « par couches parallèles », de l'intérieur de la chambre vers l'extérieur, c'est-à-dire que c'est la surface intérieure qui brûle (en rouge sur le schéma), puis la couche située au dessus, etc.



Quelques éléments de réponses : Les deux boosters solides de la navette américaine  
© NASA

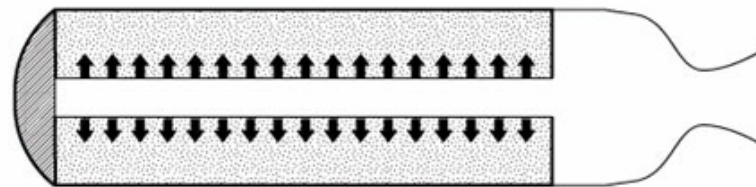
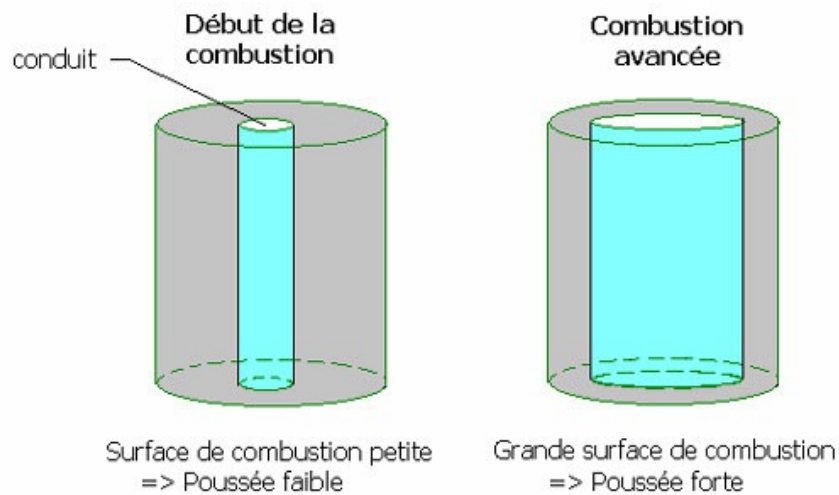
**Les gaz produits par la combustion ont une température supérieure à 2000 degrés et une très haute pression. Ils traversent la chambre de combustion via le conduit jaune puis sont accélérés dans la tuyère, fournissant la poussée au lanceur.**



Les deux boosters solides de la navette américaine  
© NASA

Si la fabrication et la mise en œuvre d'un moteur à propergol solide semble simple de prime abord, la principale difficulté (parce qu'il y en a toujours une !!) est liée à la forme du bloc inflammable, dont la géométrie dépend du type de mission, de la durée du vol et de la poussée désirée. En effet, à un instant donné, plus la surface de pâte en train de brûler est grande, plus la densité de gaz produit est importante, et donc plus la poussée est forte. Et si l'on ajoute à cela que les moteurs à propergols solides fonctionnent le plus souvent sur une courte durée (inférieure à 100 secondes), et que l'on désire une poussée constante pendant tout leur fonctionnement, on arrive rapidement à un vrai casse tête chinois.

**Considérons dans un premier temps que le lanceur ne contient qu'un seul bloc, de forme cylindrique. Le bloc est alors de la forme présentée ci-dessous, la pâte (le propergol) étant colorée en gris. Au début de la combustion le conduit d'échappement des gaz, le canal central, est un cylindre (en bleu ciel).** Au cours du temps, le propergol brûle et le conduit s'élargit. D'autre part, comme nous l'indique le principe de la combustion par couches parallèles, le canal garde une forme cylindrique tout au long de la combustion. Ainsi, la surface de combustion (la surface du cylindre bleu) s'accroît au cours du temps, et la poussée augmente invariablement. Cette solution n'est donc pas acceptable si l'on recherche une poussée constante.

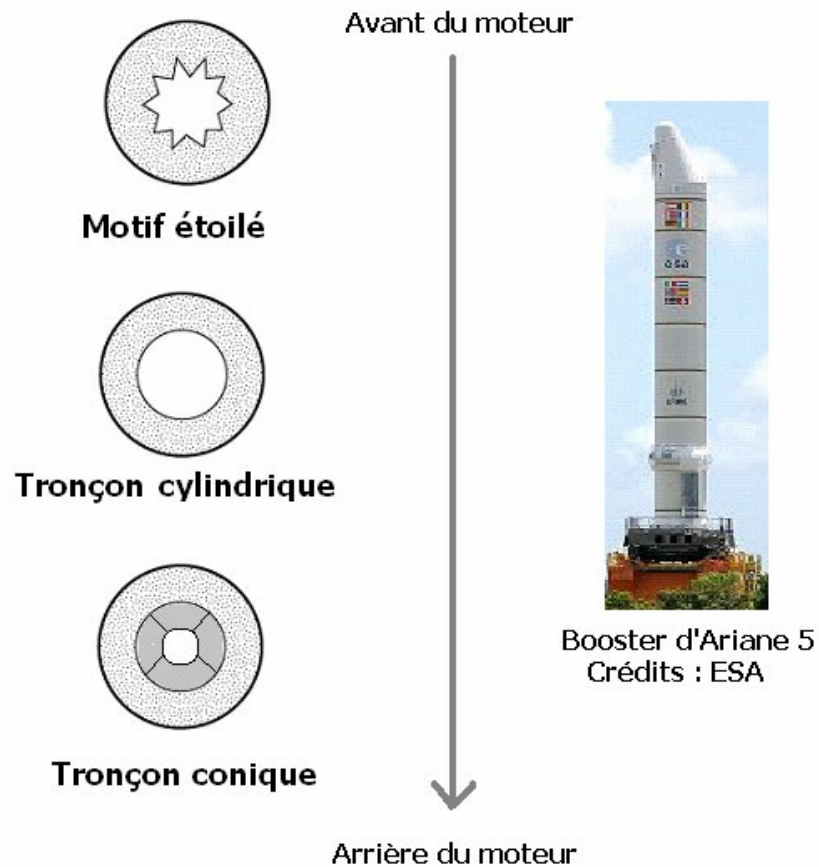


Monobloc cylindrique d'ergol et canal central  
La combustion est de révolution, dans le sens des flèches

Cette contrainte de poussée permanente implique que la plupart des blocs de propergol solides actuels adoptent une géométrie beaucoup plus complexe que celle d'un monobloc cylindrique. En réalité, ils présentent plutôt une succession (dans le sens allumeur-tuyère) de trois blocs : le premier à motif « étoilé », le second cylindrique et le dernier conique :

- **Le bloc étoilé offre au démarrage une très grande surface de combustion**, surface qui diminue au fur et à mesure que le bloc se consume.
- **Le bloc médian** présente quant à lui une surface de plus en plus grande au fur et à mesure qu'il brûle et que son trou central s'élargit.
- **La surface de combustion du bloc final**, de forme conique tend aussi à décroître avec le temps.

### Succession des motifs dans un bloc de propergol



### B - Les moteurs à propergols solides d'hier et d'aujourd'hui



Fusée Ariane 5 au décollage © ESA

Les moteurs à propergols solides sont souvent appelés « boosters », du fait de leur forte poussée et de leur

capacité à arracher la fusée du sol, ce qu'un moteur liquide ne pourrait faire seul. C'est pourquoi on les retrouve par paires sur de nombreux lanceurs actuels, comme Ariane 5 (européenne) et Titan 4 (USA), ainsi que sur la navette américaine.



A droite, Fusée Vega sur son pas de tir : les trois premiers étages de ce lanceur sont à propergol solide © ESA  
A gauche, Lanceur Falcon I à propergol solide © SpaceX

## C - Les avantages et les inconvénients de la propulsion solide

### • 1 - Une forte poussée

Comme nous l'avons vu précédemment, le principal avantage des moteurs à propergol solide est leur très forte poussée. Malgré le développement de la technologie liquide, il est encore très difficile d'atteindre les performances d'un moteur solide. Ainsi, des « boosters » sont nécessaires pendant le décollage et les premières secondes de vol, pour soulever les dizaines de tonnes du lanceur et les élever dans les airs, puis largués dès que la pression atmosphérique devient suffisamment faible.

### • 2 - Une grande fiabilité

Le second grand avantage des moteurs solides est leur grande fiabilité. Forts de dizaines d'années d'expérience, les motoristes ont aujourd'hui de grandes connaissances dans ce domaine. **Comme le moteur n'est pas alimenté en ergols, on n'a pas besoin de circuit de distribution comme dans le cas d'un moteur, ce qui rend leur construction relativement simple : il suffit de « couler » le bloc de propergol dans l'étage du lanceur, en lui faisant adopter la géométrie voulue à l'aide d'une arête centrale.**

D'autre part, de par la simplicité de leur principe, les lanceurs à propergol solides peuvent être stockés pendant de longues années sans crainte de défaillance, ce qui n'est pas le cas d'un moteur liquide, où l'architecture plus complexe se dégrade avec le temps, et où les ergols liquides doivent être amenés à bord juste avant le décollage. On peut noter que c'est également la raison pour laquelle on retrouve des moteurs solides sur la totalité des fusées et missiles français.

### • 3 - De l'impossibilité de rallumer en vol

Le plus gros inconvénient de ce type de moteur est l'impossibilité de l'éteindre et de le rallumer en vol. Comme dans le cas d'un pétard, une fois que l'on a mis le feu aux poudres, on ne peut plus revenir en arrière. **Quand on utilise un moteur solide, on ne dispose que d'un bouton « allumage », ce qui est à la fois inquiétant et frustrant pour un motoriste : si par exemple un booster connaît un incident lors du décollage, les ingénieurs n'ont aucune possibilité d'intervenir.**

D'autre part, la poussée étant déterminée uniquement par la géométrie du bloc de propergol, il est également impossible de régler la poussée du moteur en cours de vol.

- **4 - La nécessité de contrôles non destructifs**

Comme les moteurs solides ne sont pas réutilisables, on ne peut pas les tester avant le décollage pour vérifier leur intégrité. Une mise à feu impliquerait la destruction totale du bloc, et induirait donc l'impossibilité d'une utilisation ultérieure.

Ainsi, pour contrôler la bonne forme du propergol et la qualité du moteur, on doit faire appel à des contrôles non destructifs : localisation des défauts par méthode laser, utilisation de miroirs...

Ainsi, le test du bon fonctionnement d'un moteur solide ne peut pas être direct comme dans le cas d'un allumage sur banc d'essai, mais repose sur des contrôles non destructifs.

---

## Page 4/5 - La propulsion liquide

**Le principe de la propulsion liquide est plus complexe. Ici le combustible et le comburant (les deux « ergols ») sont stockés séparément, à l'état liquide et à basse pression (de l'ordre de 2 bars), dans deux sphères de stockage.** A l'allumage du moteur, ils montent en pression et sont injectés conjointement dans la chambre de combustion du moteur. La réaction chimique crée alors une combustion très vive qui produit une grande quantité de gaz à hautes températures et pressions. Ces gaz sont accélérés dans la tuyère à des vitesses de 2000 m/s à 3000m/s puis éjectés.

### A - Une prouesse technologique et un cauchemar d'horloger

Les contraintes de ce type de propulsion sont nombreuses. En effet, contrairement à la propulsion solide, il ne suffit plus d'insérer un bloc de propergols dans le moteur, puis de « mettre le feu aux poudres » pour l'allumer. L'extrême réactivité des deux ergols impose qu'ils ne soient pas mis en présence avant leur entrée dans la chambre de combustion. **En effet, avec la tuyère, seule cette partie du moteur dispose de suffisamment de protections thermiques pour ne pas fondre sous la chaleur.**

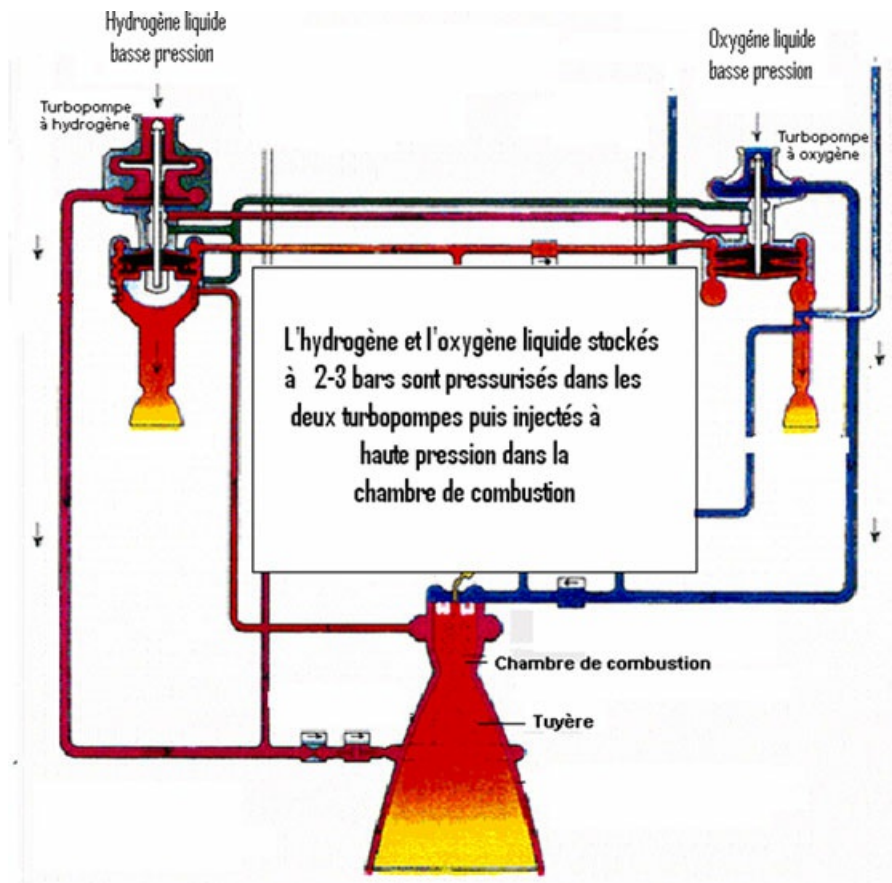
Ainsi, le moteur n'est plus simplement constitué d'une chambre de combustion, d'une tuyère et d'un allumeur comme dans le cas du solide, mais également de réservoirs, de turbopompes et d'un important réseau de lignes d'alimentation.



Sur cette photo du moteur Vulcain - © ESA, on peut mieux apprécier la densité du réseau de lignes et de vannes d'alimentation qui entourent la chambre de combustion d'un moteur à ergols liquides. Une tuyauterie à faire blêmir le plus patient des plombiers...

**La seconde grande difficulté provient de la pressurisation des ergols. En effet, si ceux-ci doivent être injectés à haute pression (supérieure à cent bars) dans le divergent (pour améliorer les performances de la combustion et donc la poussée), ils ne peuvent être stockés à une telle pression.** Pourquoi ? Simplement parce que plus un liquide est pressurisé, plus il pèse lourd. Et il est facilement compréhensible que plus la masse de la fusée est importante, plus il est difficile de l'arracher au sol. Ainsi, les ergols sont stockés à des pressions de 2 ou 3 bars (2 à 3 fois la pression atmosphérique) et doivent être pressurisés avant leur entrée dans le moteur. Il faut donc ajouter à cette « plomberie » complexe un cauchemar d'horloger, sous la forme de deux turbopompes qui pressurisent les ergols et doivent tourner pour ce faire à plusieurs dizaines de milliers de tours par minutes. Une particule de la taille d'un grain de sable dans les rouages, et c'est l'explosion !





Pressurisation de l'hydrogène et de l'oxygène par turbopompes du moteur cryotechnique Vulcain 2, (d'après un document CNES - ARIANESPACE).

## B - La question du stockage des ergols

**Les ergols susceptibles d'être utilisés dans les moteurs liquides sont nombreux, et se distinguent par leur température de stockage.** Ce que les motoristes recherchent quand ils font le choix des composants chimiques est une réaction qui dégage le plus d'énergie possible, mais aussi des constituants très légers. Encore une fois, tout est une affaire de compromis.

Si le kérosène peut être conservé à température ambiante, il n'en est pas de même du couple Oxygène - Hydrogène (ou plus précisément LOX/LH2) utilisés dans les moteurs Vulcain et Vulcain 2 des fusées Ariane, qui, pour être stockés puis utilisés à l'état liquide, doivent être maintenus à des températures nettement inférieures à zéro degré celsius. Ces ergols, dits cryotechniques, doivent faire l'objet de précautions particulières, et imposent en particulier ce que l'on nomme une mise en froid du moteur avant la mise à feu.



Sphères de stockage d'ergols © EADS

La mise en froid, qui a souvent lieu à H0 – 5 secondes, consiste en un balayage au gaz neutre (ne réagissant pas avec les ergols, tel l'hélium) et cryogénique des lignes et vannes d'alimentation du moteur, afin que lors du début de l'injection, tout le circuit de distribution soit assez froid pour le passage des ergols cryotechniques.

### **C - Les avantages de la propulsion liquide**

**Ils sont très nombreux. Une fois qu'on arrive à passer outre la complexité de moteur liquide, il offre tout un champ de nouvelles possibilités.**

Tout d'abord, il est réallumable. Ceci permet de le tester sur banc d'essai et de réaliser une expertise complète en terme de pressions, de températures et de poussée avant de l'intégrer au lanceur. Cela signifie également qu'il peut être éteint en vol si un incident survient dans l'étage, et qu'il peut être utilisé pour plusieurs manœuvres séparées dans le temps, ce qui lui confère un avantage non négligeable par rapport aux moteurs solides.

**Ensuite, le moteur liquide peut être à poussée variable, c'est-à-dire qu'en théorie, son accélération peut être contrôlée en temps réel.** Néanmoins, il n'est pas possible de piloter une fusée comme une voiture et, dans la pratique, un moteur ne fonctionne que sur un ou deux points de réglage. Dans le cas d'Ariane 5 équipée d'un moteur Vulcain 2 et deux boosters à propergol solide :

- **Le moteur Vulcain 2** fonctionne sur un point de réglage « bas » entre H0 et H0+110 secondes. Ce choix est motivé par le co-allumage des deux boosters à poudre, dont les poussées cumulées suffisent à arracher la fusée du sol ;



Fusée Ariane 5 au décollage © Crédit Arianespace

- **Les deux boosters à propergol solide** sont allumés, ainsi que le moteur liquide cryotechnique Vulcain 2 ;
- Pendant les cent premières secondes de vol, de par la présence des boosters, le moteur fonctionne sur un point « bas » ;
- **Ensuite il fonctionne sur un point supérieur**, afin de pallier à la perte de poussée due au largage des boosters ;
- **Enfin, au terme de la traversée de l'atmosphère** il repasse sur le même point « bas ». Ici, c'est la pression atmosphérique qui est moins élevée, et la poussée du moteur qui s'en trouve accrue.

---

## Page 5/5 - Conclusion

Loin d'être en concurrence, les moteurs solides et liquides sont plutôt complémentaires. **Les premiers sont utilisés au décollage et pendant les premières secondes de vol, quand l'attraction terrestre se fait forte, tandis que les seconds, à poussée variable et réallumables, garantissent la manoeuvrabilité et la poussée nécessaire au bon placement en orbite et au parfait largage de la charge utile (sonde ou satellite) dans l'espace.**

Les autres types de moteurs (ioniques, nucléothermiques...), par leur coût et la faiblesse de leur poussée, ne sont pas encore adaptés aux vols commerciaux. Ils ne sont encore utilisés que pour des missions d'exploration ou des sondes envoyées vers des astres lointains, dans les domaines où, massivement subventionnées par les gouvernements, les industries sont moins regardantes sur les coûts.

On verra donc encore longtemps décoller des fusées à ergols à Kourou, Cap Canaveral et Baïkonour. **Mais qui se lasse du grondement des boosters au décollage, de la vibration du sol perceptible à des kilomètres à la ronde, et de cette fusée, majestueuse, qui se drape d'un manteau de fumée avant de s'élever dans les airs ?**

