

Aux limites de la propulsion spatiale

Aux limites de la propulsion spatiale

- Introduction
- I/ Les principes de base de la propulsion spatiale
- II/ La technologie de propulsion spatiale traditionnelle
- III/ Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet
- IV/ Les concepts futuristes
- V/ Les limites
- Conclusion

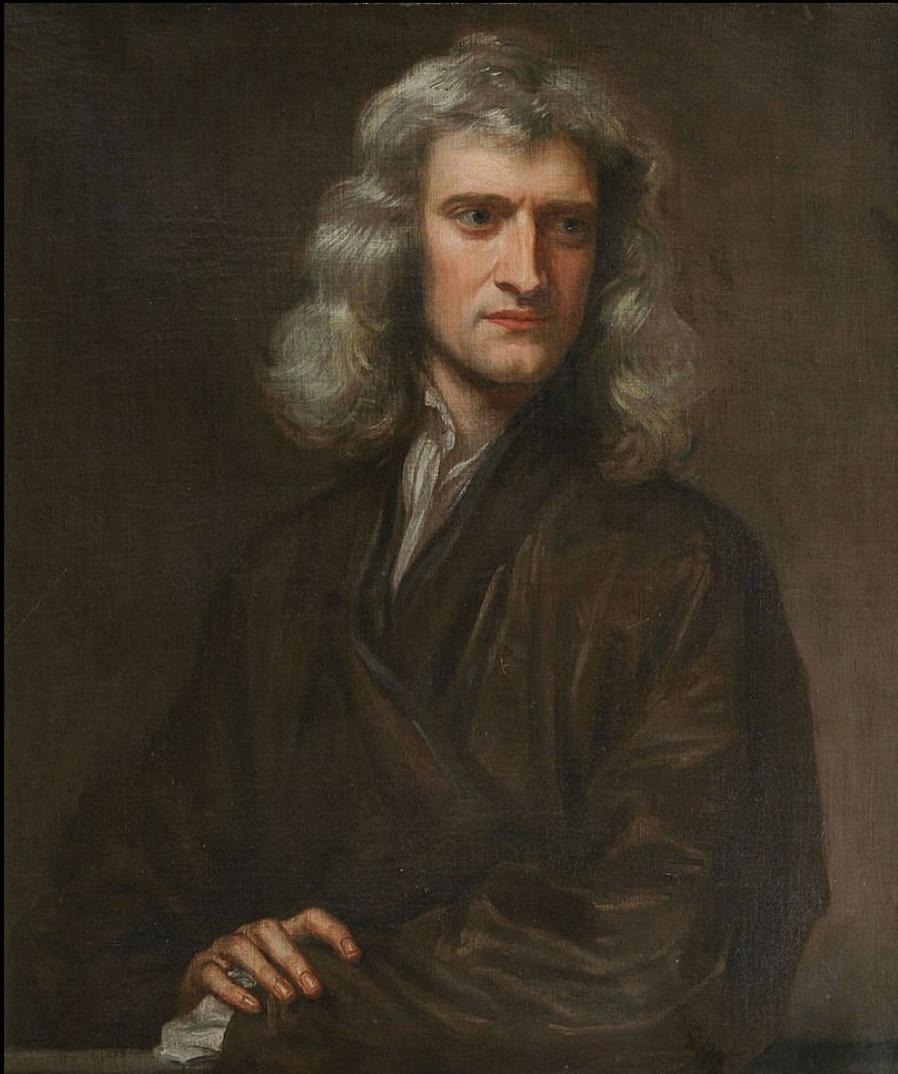
Introduction

- L'exploration du Système Solaire requiert des systèmes de propulsion qui mobilisent énormément d'énergie car il faut pouvoir s'arracher à la gravité de la Terre et atteindre la vitesse de libération qui représente environ 11 km/s.
- La première mise en orbite a été réalisée par les Soviétiques en 1957 avec le lancement du satellite Spoutnik.
- Depuis cet exploit historique, nous avons envoyé des hommes à la surface de la Lune, nous avons posé une sonde sur Titan et nous sommes allés au-delà de Pluton dans le Système Solaire.
- Cependant, les voyages interplanétaires sont particulièrement longs à notre échelle temporelle et la propulsion spatiale n'a pas vraiment connu de révolution technologique à l'échelle de celle du monde informatique par exemple.
- Quels sont les différents systèmes de propulsion spatiale à notre disposition aujourd'hui ? Quels sont les projets ou les concepts de propulsion spatiale pour aller plus loin plus vite ?
- Quelles sont les perspectives de la propulsion spatiale pour les années, les décennies ou les siècles à venir ?

Les principes de base de la propulsion spatiale

Les principes de base de la propulsion spatiale

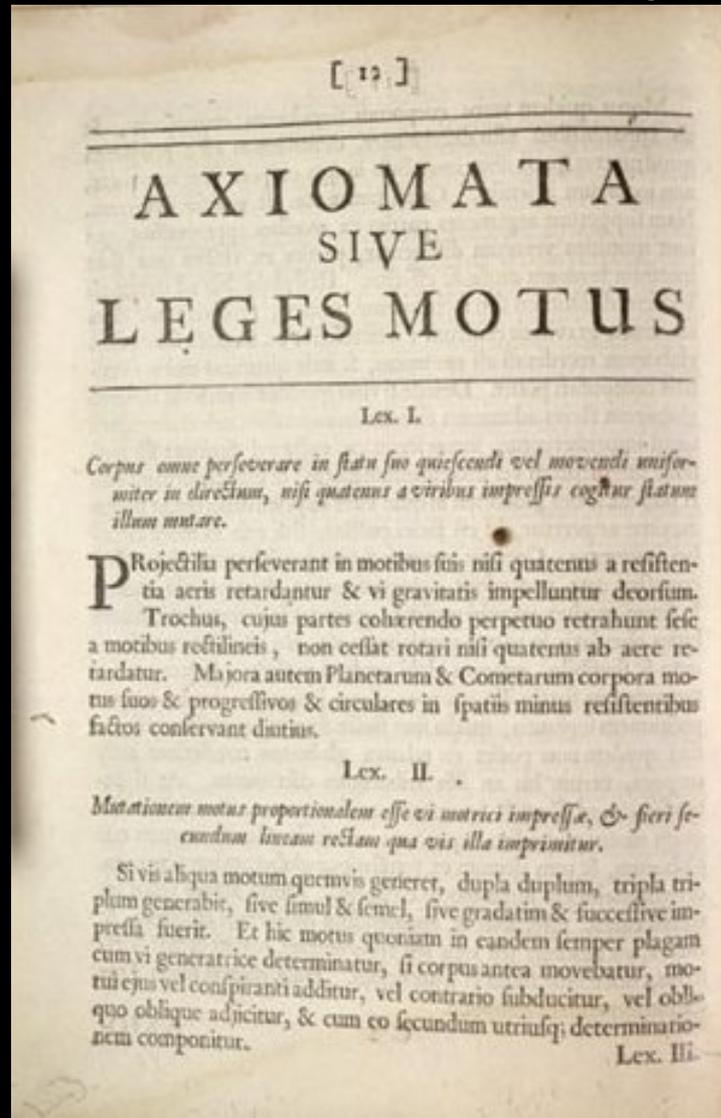
- Pour comprendre la dynamique d'une fusée, il faut déjà avoir en tête les lois de Newton.
- La première loi de Newton correspond au principe d'inertie: Dans un référentiel galiléen, le vecteur vitesse du centre d'inertie d'un système est constant si et seulement si la résultante des vecteurs forces qui s'exercent sur le système vaut le vecteur nul.



- Ci-contre, portrait d'Isaac Newton en 1689 par Godfrey Kneller.
Source de l'image: [Wikipedia](#).

Les principes de base de la propulsion spatiale

- La deuxième loi de Newton correspond au principe fondamental de la dynamique: Dans un référentiel galiléen, la dérivée de la quantité de mouvement p d'un solide est égale à la somme des forces extérieures F_i qui s'exercent sur le solide.
- La somme des forces est égale à la masse multipliée par l'accélération.



- Ci-contre, les deux premières lois de Newton dans l'édition originale de Principia Mathematica de 1687. [Source de l'image: Wikipedia.](#)

Les principes de base de la propulsion spatiale

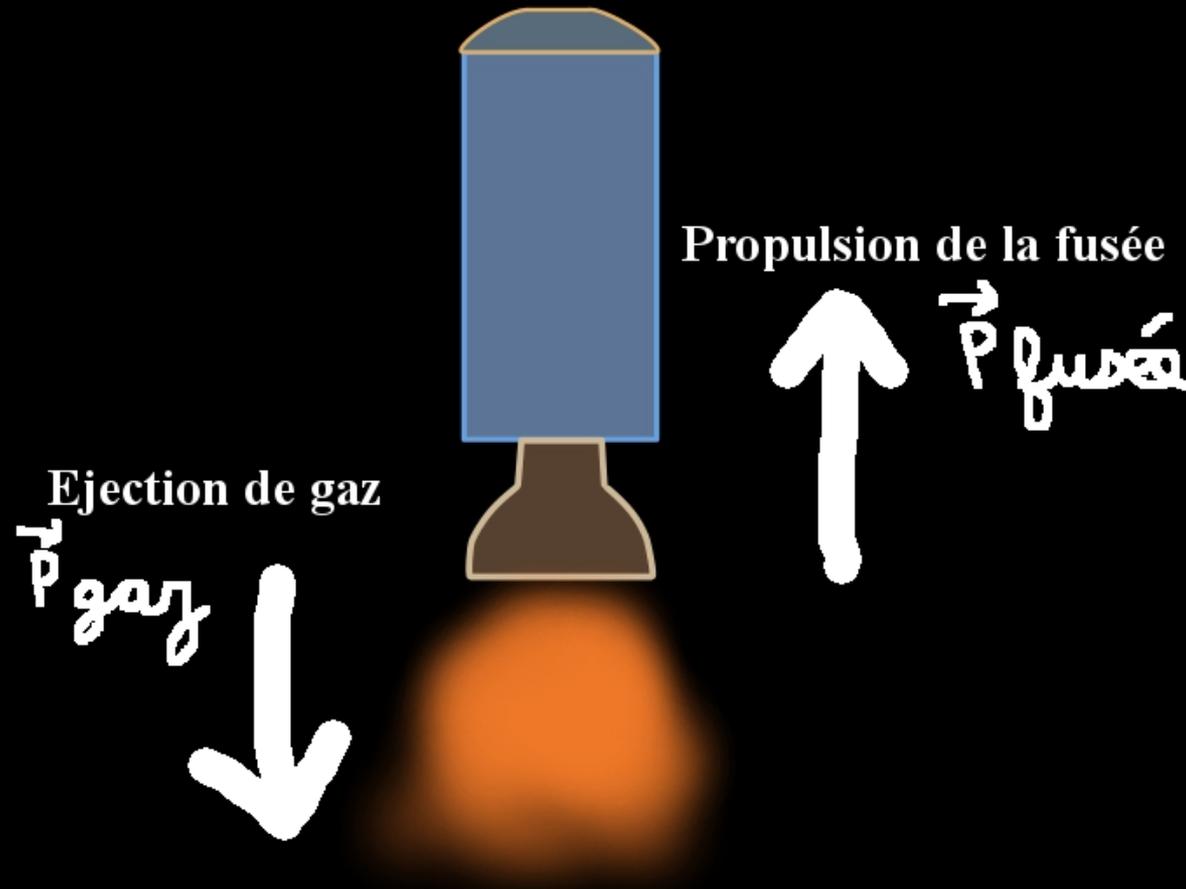
- La troisième loi de Newton correspond au principe des actions réciproques: "L'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires.



- Ci-dessus, illustration du principe d'interaction avec deux astronautes qui se repoussent. Le centre de masse commun reste à la même place. *Source de l'image:* [Wikipedia](#).

Les principes de base de la propulsion spatiale

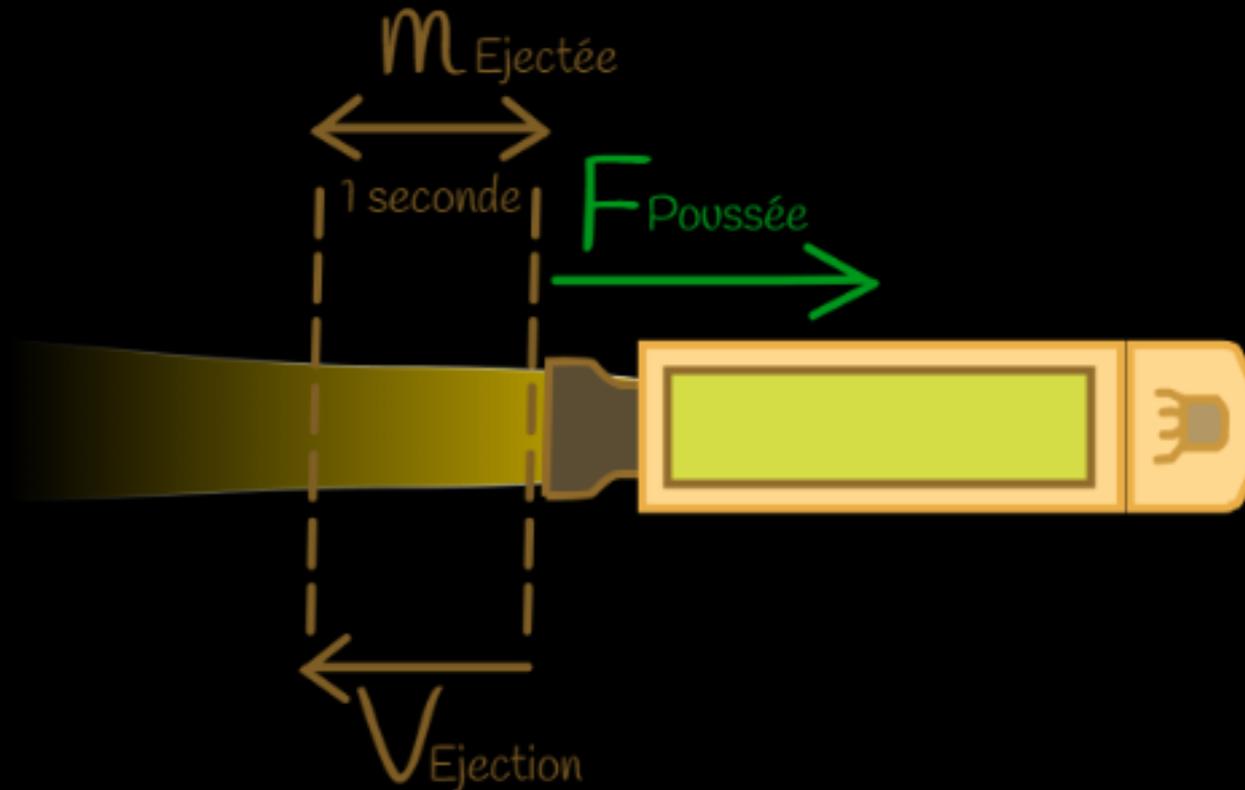
- Le principe de la conservation linéaire de la quantité de mouvement.



- Ci-dessus, illustration du principe de conservation de la quantité de mouvement dans un système isolé. **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

- La force de poussée exercée par le propergol
- Force de poussée en Newtons = Masse de propergol en kg * Vitesse d'éjection du propergol en m/s.

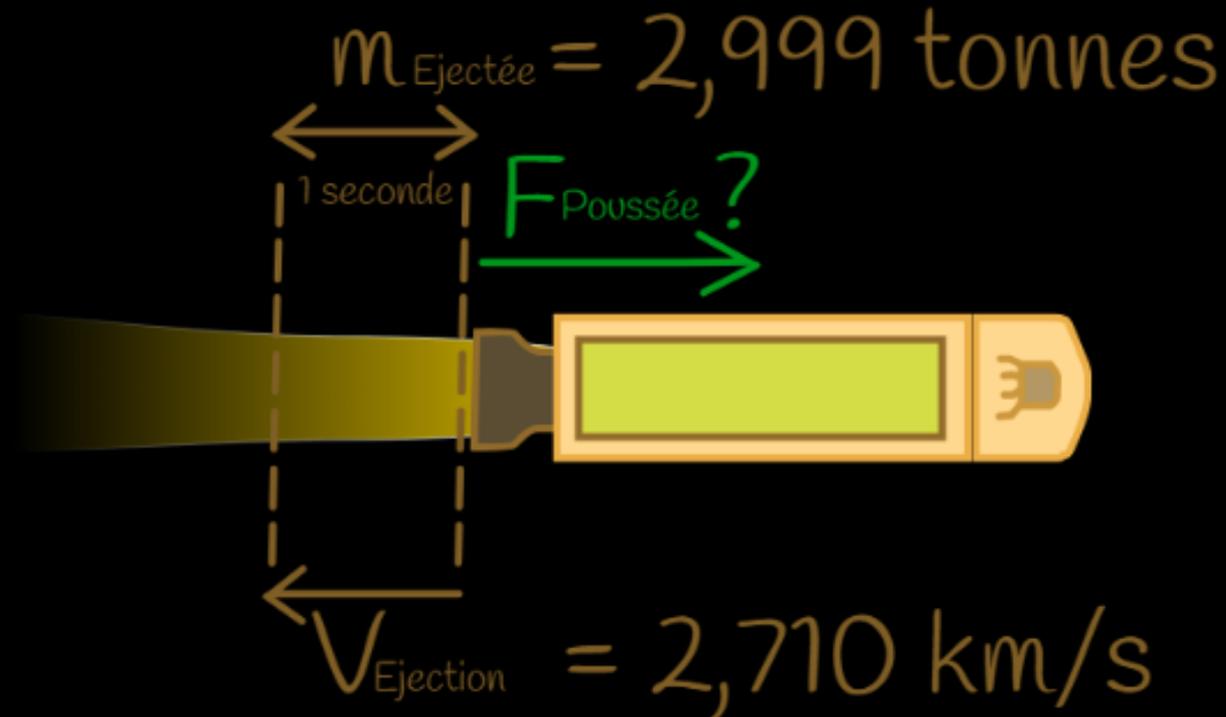


- Ci-dessus, schéma représentant le phénomène de poussée pour une fusée de base. **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

- Soit une fusée (de type Falcon 9 Bloc 5) qui éjecte une masse de 2,999 tonnes de propergol par seconde avec une vitesse d'éjection du propergol de 2,710 km / s. Quelle est la force de poussée ?
- Masse du propergol en kg : 2,999 tonnes * 1000 kg = 2999 kg
- Vitesse du propergol en m / s : 2,710 km/s * 1000 mètres = 2710 m / s
- Force de poussée en Newtons : 2999 kg * 2710 m / s = 8127290 Newtons.
- La force de poussée est donc de 8127290 Newtons, 8127,290 kiloNewtons ou encore 8,127290 megaNewtons.

- Ci-contre, schéma représentant le phénomène de poussée pour une fusée de type Falcon 9 Bloc 5 avec les données de l'exercice. **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.



Les principes de base de la propulsion spatiale

- Considérons une fusée dans l'espace interplanétaire dont la masse chargée est de 20000 kg. Elle ejecte chaque seconde 200 kg de propergol à la vitesse constante de 250 m/s. La durée d'ejection des gaz est de 30 secondes.

- Quelle est la force de poussée du propergol ?

→ $F \text{ poussée} = 200 \text{ kg} * 250 \text{ m/s}$; $F \text{ poussée} = 50000 \text{ Newtons}$.

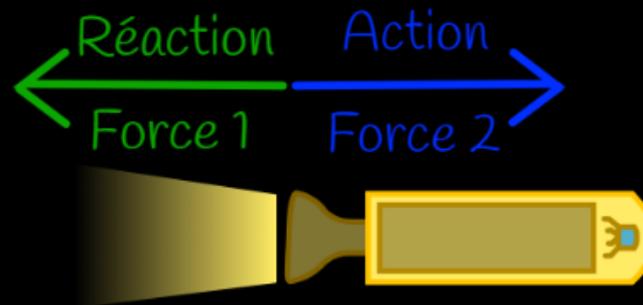
- Quelle est l'accélération de la fusée en t 0 seconde, t 15 secondes et t 30 secondes ?

→ En t 0 seconde: $200 \text{ kg} * 250 \text{ m/s} = (20000 \text{ kg} - 0 \text{ kg}) * \text{Accélération}$ soit $\text{Accélération} = 2,5 \text{ m/s}$.

→ En t 15 secondes: $200 \text{ kg} * 250 \text{ m/s} = (20000 \text{ kg} - 200 \text{ kg} * 15 \text{ secondes}) * \text{Accélération}$ soit $\text{Accélération} = 2,94 \text{ m/s}$.

→ En t 30 secondes: $200 \text{ kg} * 250 \text{ m/s} = (20000 \text{ kg} - 200 \text{ kg} * 30 \text{ secondes}) * \text{Accélération}$ soit $\text{Accélération} = 3,57 \text{ m/s}$.

- L'on voit ainsi que l'accélération de la fusée augmente du fait de la perte progressive de masse de la fusée.



- Les forces ont la même intensité et sont de sens opposé. **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

- L'équation de Tsiolkovski que l'on doit à Constantin Tsiolkovski et Hermann Oberth permet d'obtenir, pour une fusée dans un environnement sans forces extérieures, la variation de vitesse de la fusée sur un laps de temps donné en fonction de la vitesse d'expulsion du propergol, de la masse initiale et de la masse finale de la fusée.

- $\Delta V = V_{ex} * \ln (M_i / M_f)$



- Ci-contre, photo du scientifique russe Constantin Tsiolkovski qui a vécu de 1857 à 1935. Il est à l'origine de l'équation fondamentale de l'astronautique. [Source de l'image: Wikipedia.](#)

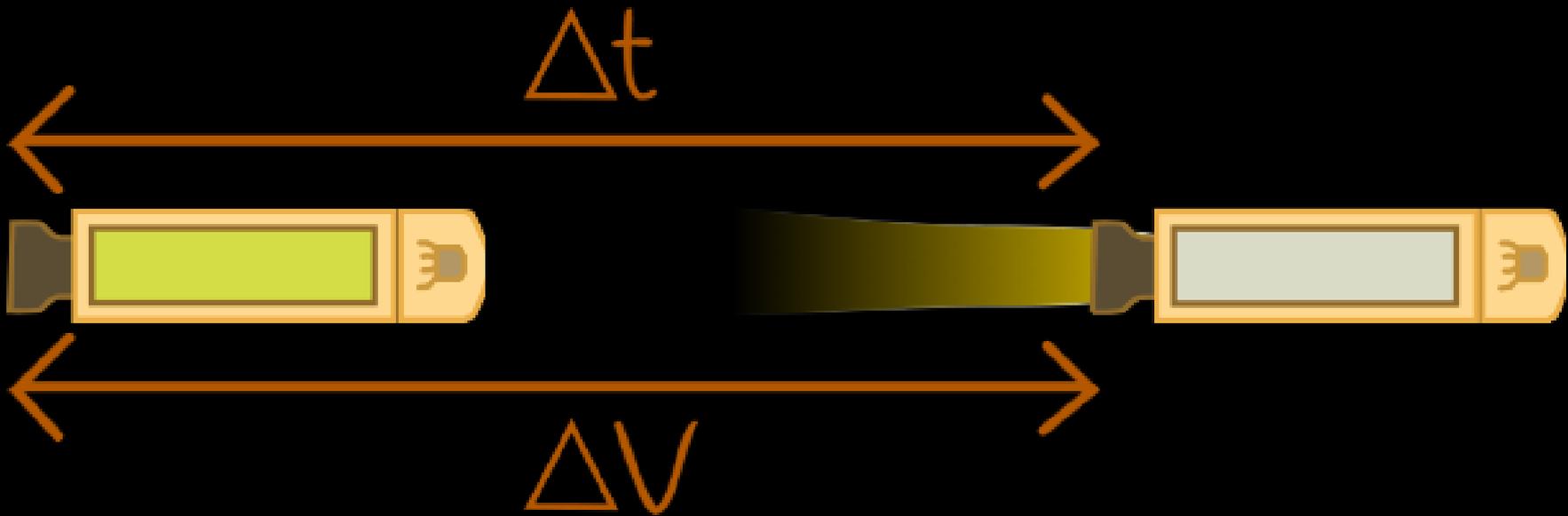
Les principes de base de la propulsion spatiale

- Soit une fusée (de type premier étage fusée Falcon 1) qui évolue dans l'espace interplanétaire. Sa masse chargée représente 22852 kg. Elle éjecte tout son propergol en 169 secondes avec un débit constant. La vitesse d'éjection du propergol est de 2943 m/s. La masse à vide de la fusée est de 1361 kg. Calculer la variation de vitesse de la fusée jusqu'à l'épuisement du propergol.

- $\Delta V = V_{ex} * \text{LN} (M_i / M_f)$

- $\Delta V = 2943 \text{ m/s} * \text{LN} (22852 \text{ kg} / 1361 \text{ kg})$

- $\Delta V = 8301,67 \text{ m/s}$.

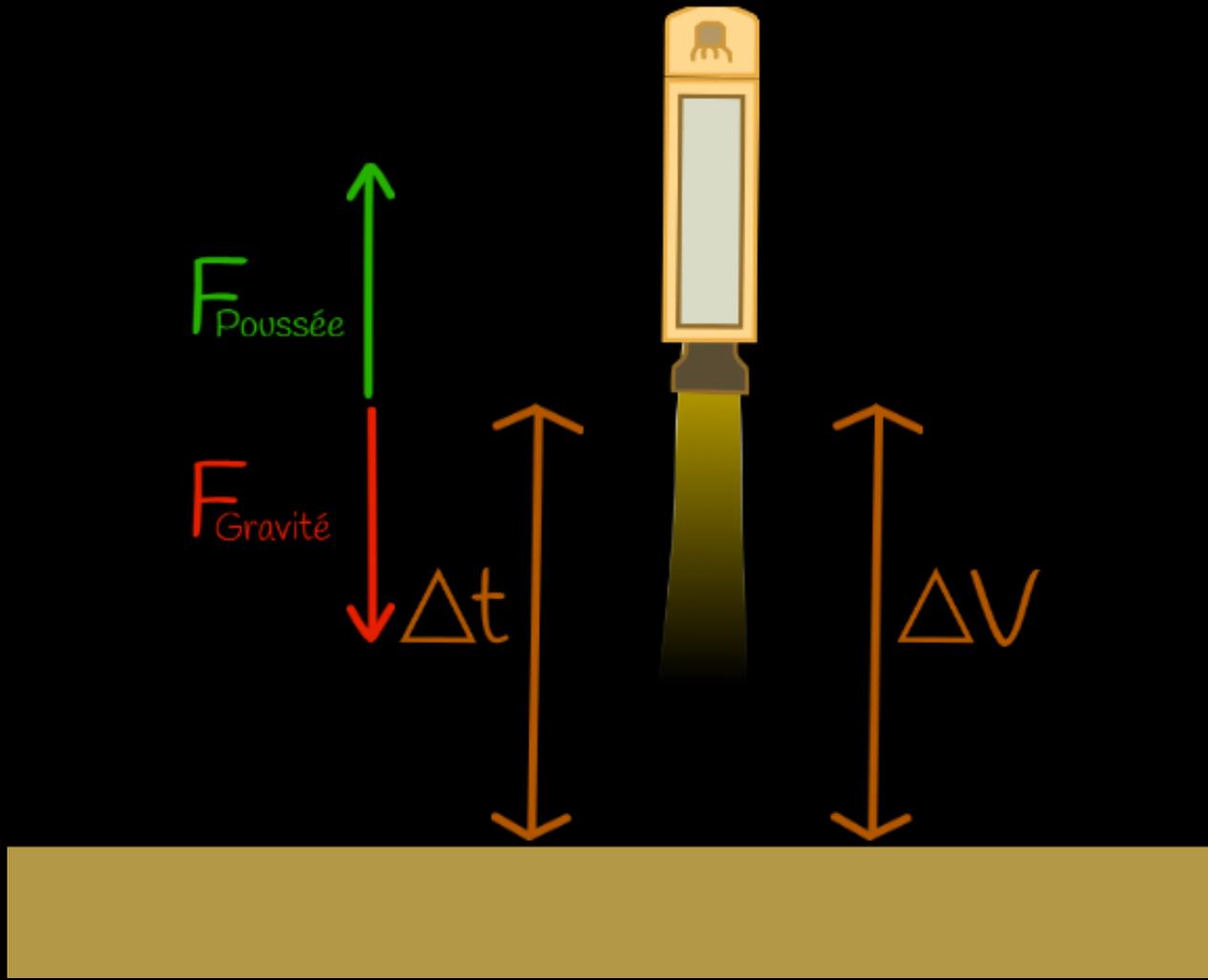


- Variation de vitesse (ΔV) avec épuisement des ergols (Δt de 169 secondes). **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

- Pour une fusée qui décolle depuis la Terre, il faut prendre en considération la force de gravité en particulier pour calculer le delta V et donc la variation de vitesse sur la durée d'éjection du propergol.

$$\Delta V = V_{ex} * \ln (M_i / M_f) - g * \Delta t$$



- La variation de vitesse de la fusée va dépendre notamment du “bras de fer” entre la force de poussée et la force de gravité.

Crédit de l'image: [Marc Lafferre, 2024.](#)

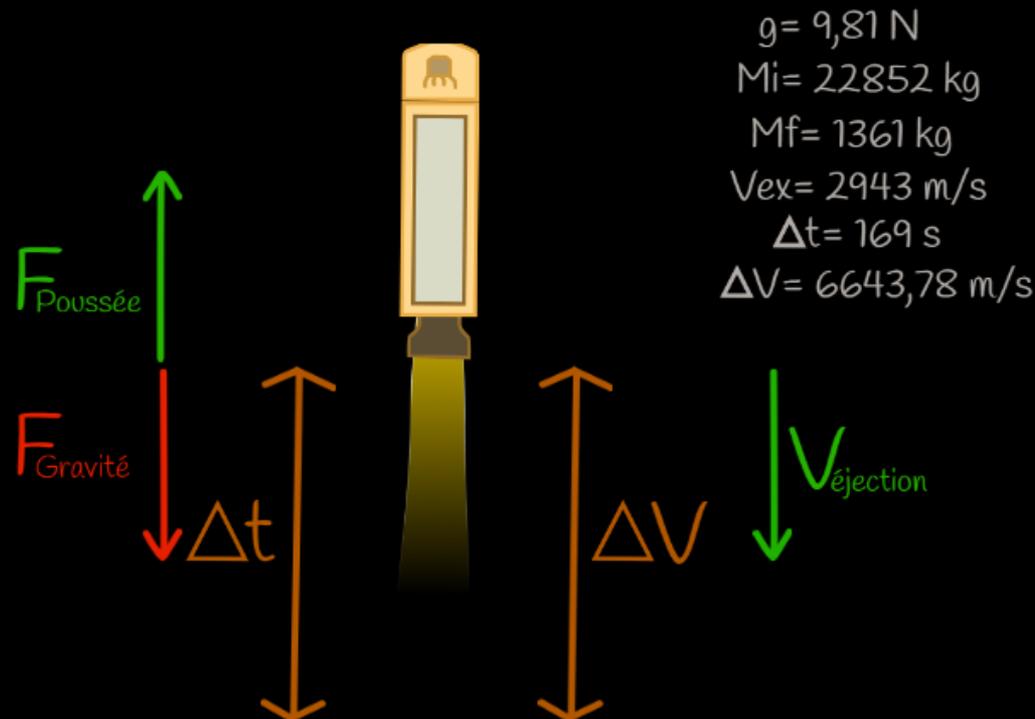
Les principes de base de la propulsion spatiale

- Soit une fusée (de type premier étage fusée Falcon 1) qui décolle depuis la Terre. Sa masse chargée représente 22852 kg. Elle éjecte tout son propergol en 169 secondes avec un débit constant. La vitesse d'éjection du propergol est de 2943 m/s. La masse à vide de la fusée est de 1361 kg. Calculer la variation de vitesse de la fusée jusqu'à l'épuisement du propergol.

$$\Delta V = V_{ex} * \ln (M_i / M_f) - g * \Delta t$$

$$\Delta V = 2943 \text{ m/s} * \ln (22852 \text{ kg} / 1361 \text{ kg}) - 9.81 \text{ m/s} * 169 \text{ s}$$

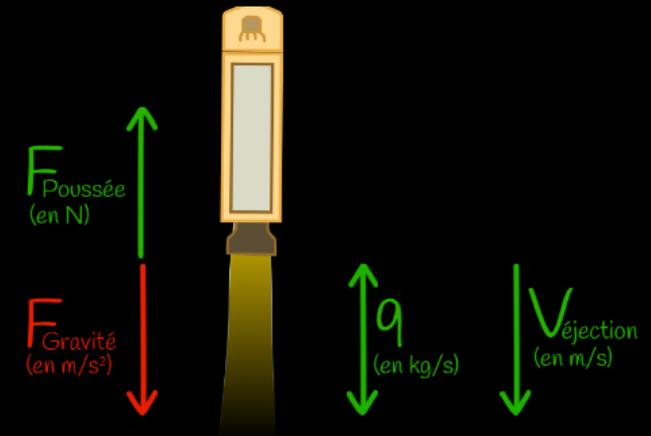
$$\Delta V = 6643,78 \text{ m/s.}$$



- La fusée doit épuiser le plus vite possible son propergol pour maximiser le delta V en raison de la force de gravité. **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

- L'impulsion spécifique ou I_{sp}
- L'impulsion spécifique permet de mesurer l'efficacité du système de propulsion de la fusée.
- L'impulsion spécifique représente la durée pendant laquelle un kilogramme de propergol génère la poussée nécessaire pour soulever une masse d'un kilogramme dans le champ gravitationnel terrestre.
- $I_{sp} = F / (q * g_0)$
- I_{sp} s'exprime en secondes; F désigne la poussée en N; q désigne le débit massique d'éjection des gaz en kg/s; g_0 désigne l'accélération de la pesanteur en m/s^2
- $I_{sp} = V_e / g_0$
- V_e désigne la vitesse d'éjection moyenne des gaz en m/s.



- Les paramètres pour le calcul de l'impulsion spécifique. **Crédit de l'image:**
Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

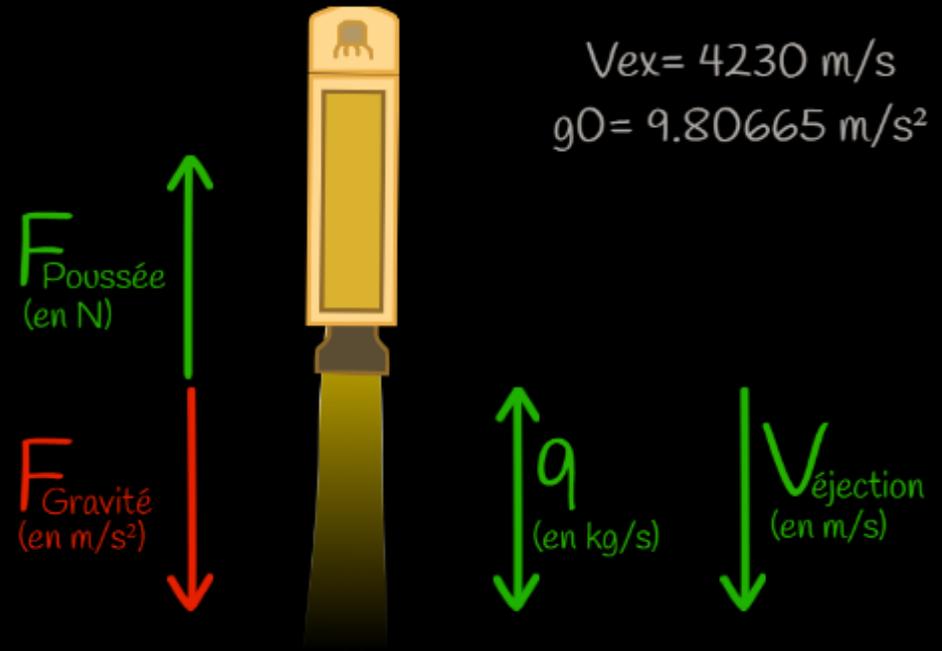
- Soit une fusée comprenant un moteur de type Vulcain Ariane 5 qui propulse le propergol à la vitesse d'éjection V_e de 4230 m/s.

- Calculer l'impulsion spécifique de la fusée.

$$\rightarrow I_{sp} = V_e / g_0$$

$$\rightarrow I_{sp} = 4230 \text{ m/s} / 9,80665 \text{ m/s}^2$$

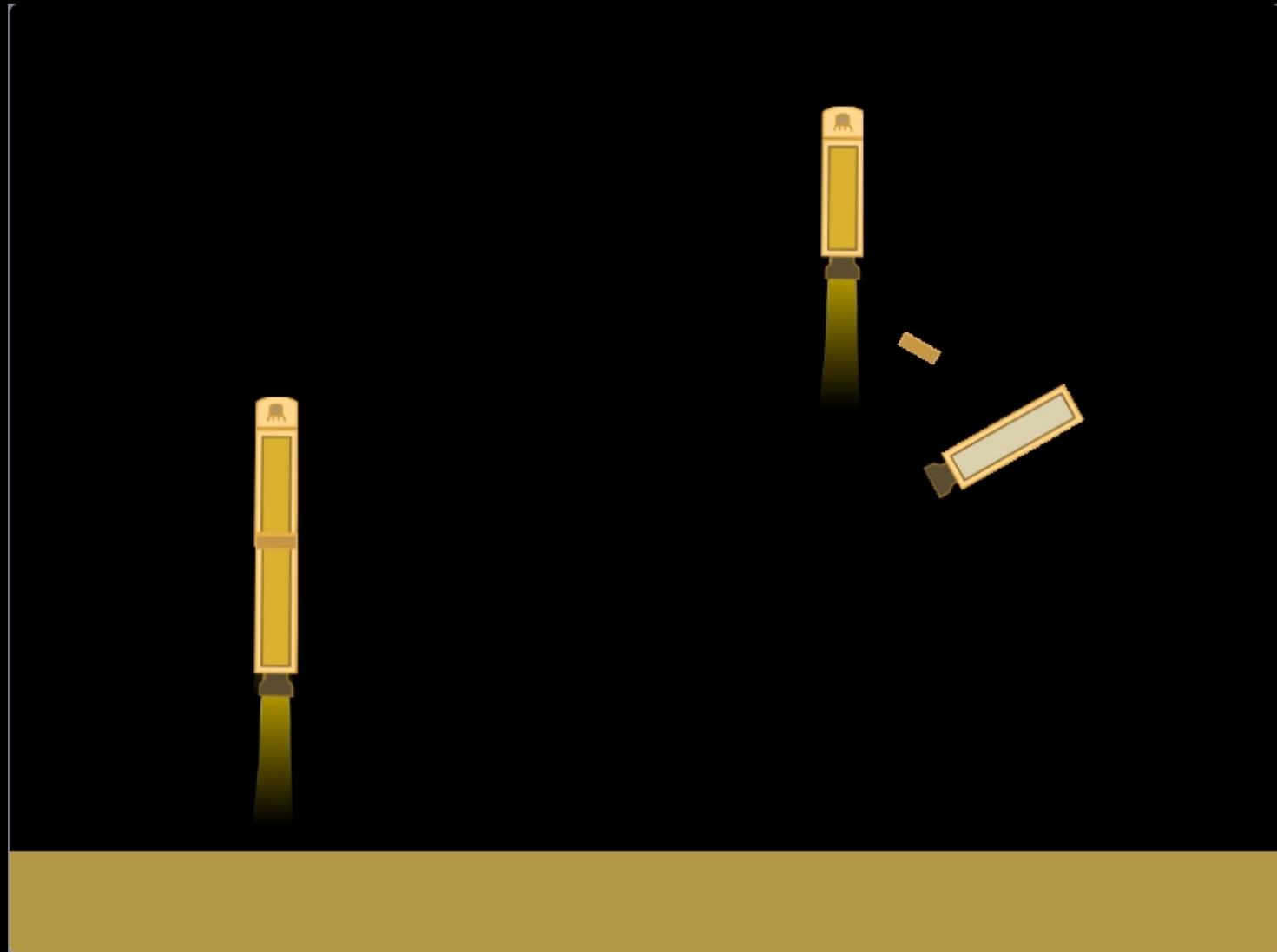
$$\rightarrow I_{sp} = 431,34 \text{ secondes (soit 7 minutes et 11,34 secondes)}$$



- Les paramètres pour le calcul de l'impulsion spécifique avec un moteur-fusée de type Vulcain Ariane 5. **Crédit de l'image:** Marc Lafferre, 2024.

Les principes de base de la propulsion spatiale

- L'on a recours à des fusées à plusieurs étages dans l'optique de maximiser la vitesse finale pour l'envoi de la charge utile.
- La séparation des étages permet de libérer une partie de la charge de structure qui n'est plus nécessaire pour la suite du vol.



- La séparation des étages va permettre un gain de vitesse finale pour l'envoi de la charge utile en orbite ou au-delà par rapport à la configuration d'une fusée à un seul étage. **Crédit de l'image:** [Marc Lafferre, 2024.](#)

Les principes de base de la propulsion spatiale

- Soit une fusée à deux étages de 134 tonnes chargée. Le premier étage représente 110 tonnes dont 100 tonnes d'ergol. Le deuxième étage fait 24 tonnes dont 20 tonnes d'ergol. La vitesse d'expulsion des gaz est de 4 km/s.

- Calculer le Delta V final.

- Quel est le gain de vitesse par rapport à la configuration où cette fusée n'aurait qu'un seul étage ?

→ Delta V jusqu'à séparation des étages:

$$\Delta V_1 = V_{ex} * \ln (M_i / M_f)$$

$$\Delta V_1 = 4000 \text{ m/s} * \ln (134000 \text{ kg} / 34000 \text{ kg})$$

$$\Delta V_1 = 5485,92 \text{ m/s.}$$

→ Delta V à partir de la séparation des étages:

$$\Delta V_2 = V_{ex} * \ln (M_i / M_f)$$

$$\Delta V_2 = 4000 \text{ m/s} * \ln (24000 \text{ kg} / 4000 \text{ kg})$$

$$\Delta V_2 = 7167,04 \text{ m/s.}$$

→ Delta V total = Delta V1 + Delta V2

$$\Delta V \text{ total} = 5485,92 \text{ m/s} + 7167,04 \text{ m/s}; \Delta V \text{ total} = 12652,96 \text{ m/s.}$$

Les principes de base de la propulsion spatiale

→ Delta V pour la fusée à un seul étage:

$$\Delta V = V_{ex} * \ln (M_i / M_f)$$

$$\Delta V = 4000 \text{ m/s} * \ln (134000 \text{ kg} / 14000 \text{ kg})$$

$$\Delta V = 9035,13 \text{ m/s.}$$

Le Delta V total pour la fusée à étages (12652,96 m/s) est donc bien supérieur au Delta V pour la fusée monobloc (9035,13 m/s).

→ Le gain de vitesse de la fusée à étages est de 3617,83 m/s par rapport à la fusée monobloc:

$$12652,96 \text{ m/s} - 9035,13 \text{ m/s} = 3617,83 \text{ m/s.}$$

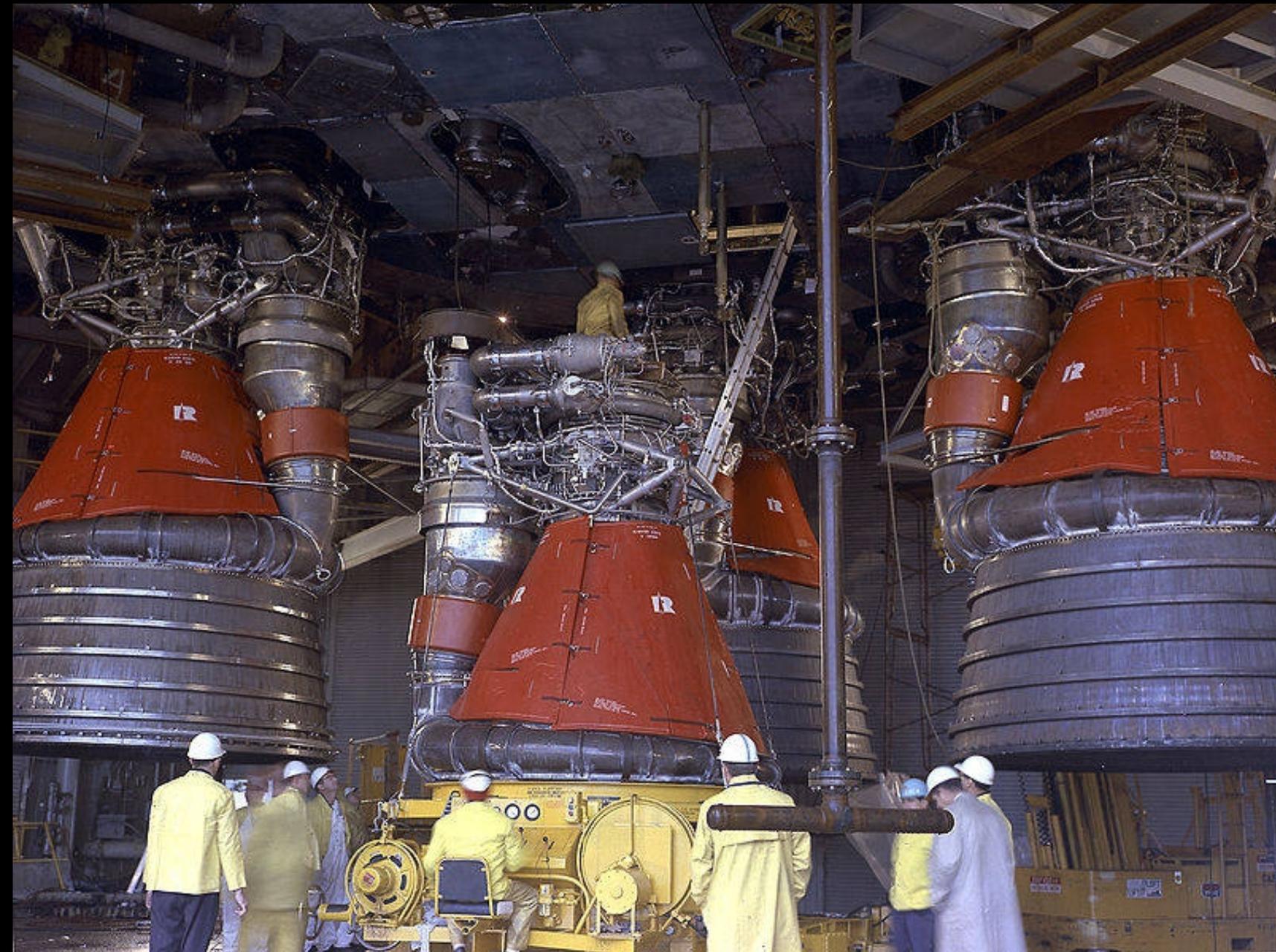


- La fusée à propulsion monobloc sera moins performante qu'une fusée à étages. **Crédit de l'image:** [Marc Lafferre, 2024.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

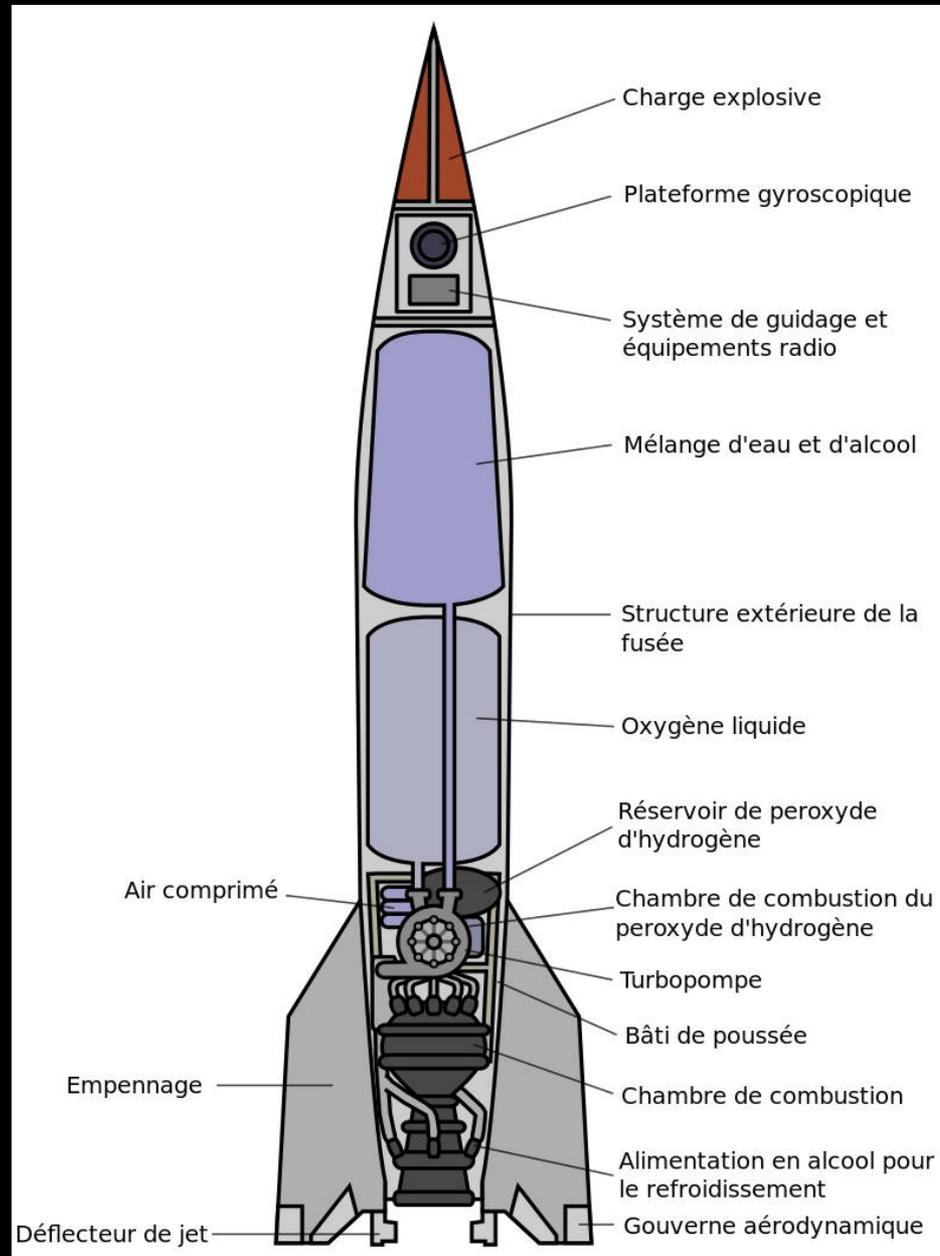
- La fusée de base est propulsée depuis la Terre à l'aide d'un moteur-fusée thermo-chimique.



- Ci-contre, installation de 5 moteurs F-1 de 10 tonnes chacun sur le premier étage de la fusée Saturn V.
Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

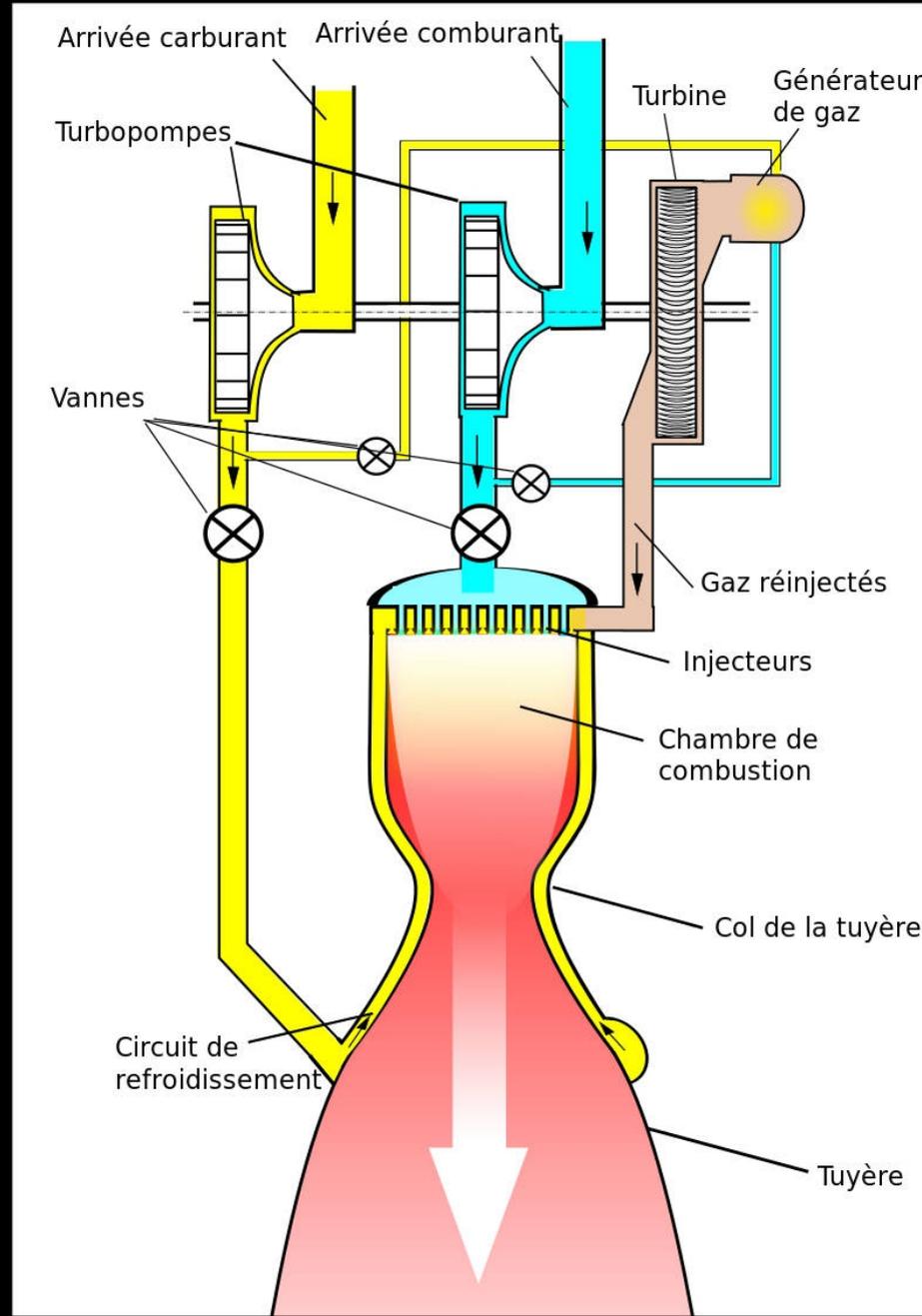
- La fusée de base à propulsion chimique comprend un réservoir de carburant et un réservoir de comburant (ergols) qui vont être brûlés dans la chambre de combustion.



- Ci-contre, représentation schématique de la structure d'une fusée V2. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le moteur-fusée comprend une chambre de combustion et une tuyère.



- Ci-contre, schéma de fonctionnement de moteur-fusée à ergols liquides typique. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

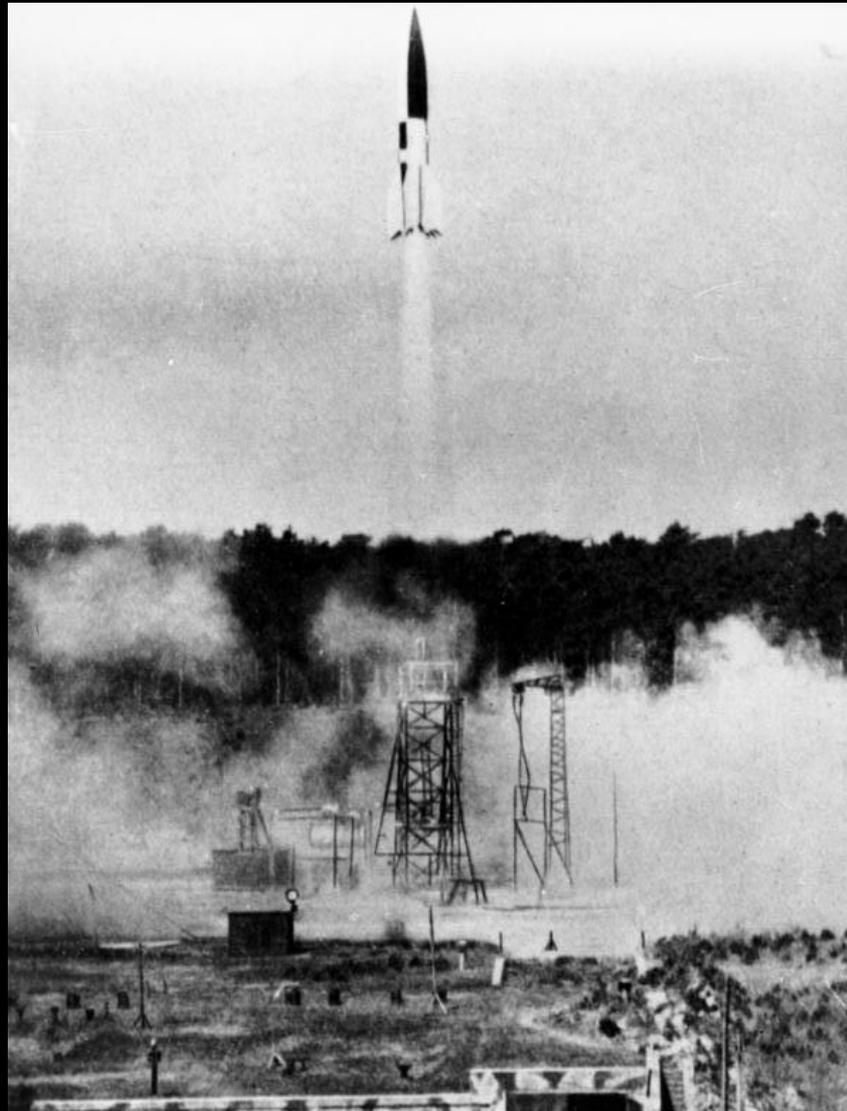
- L'on distingue les moteurs-fusées à ergols liquides et les moteurs-fusées à ergols solides.



- Ci-contre, la navette spatiale Discovery de la mission STS-120 décollant depuis le Kennedy Space Center le 23 octobre 2007. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La technologie des moteurs-fusées à ergols liquides mobilise des carburants et des comburants liquides par la réaction exothermique ou par décomposition.
- Le missile ou la fusée V2 représente la première application opérationnelle de cette technologie de propulsion en 1943.

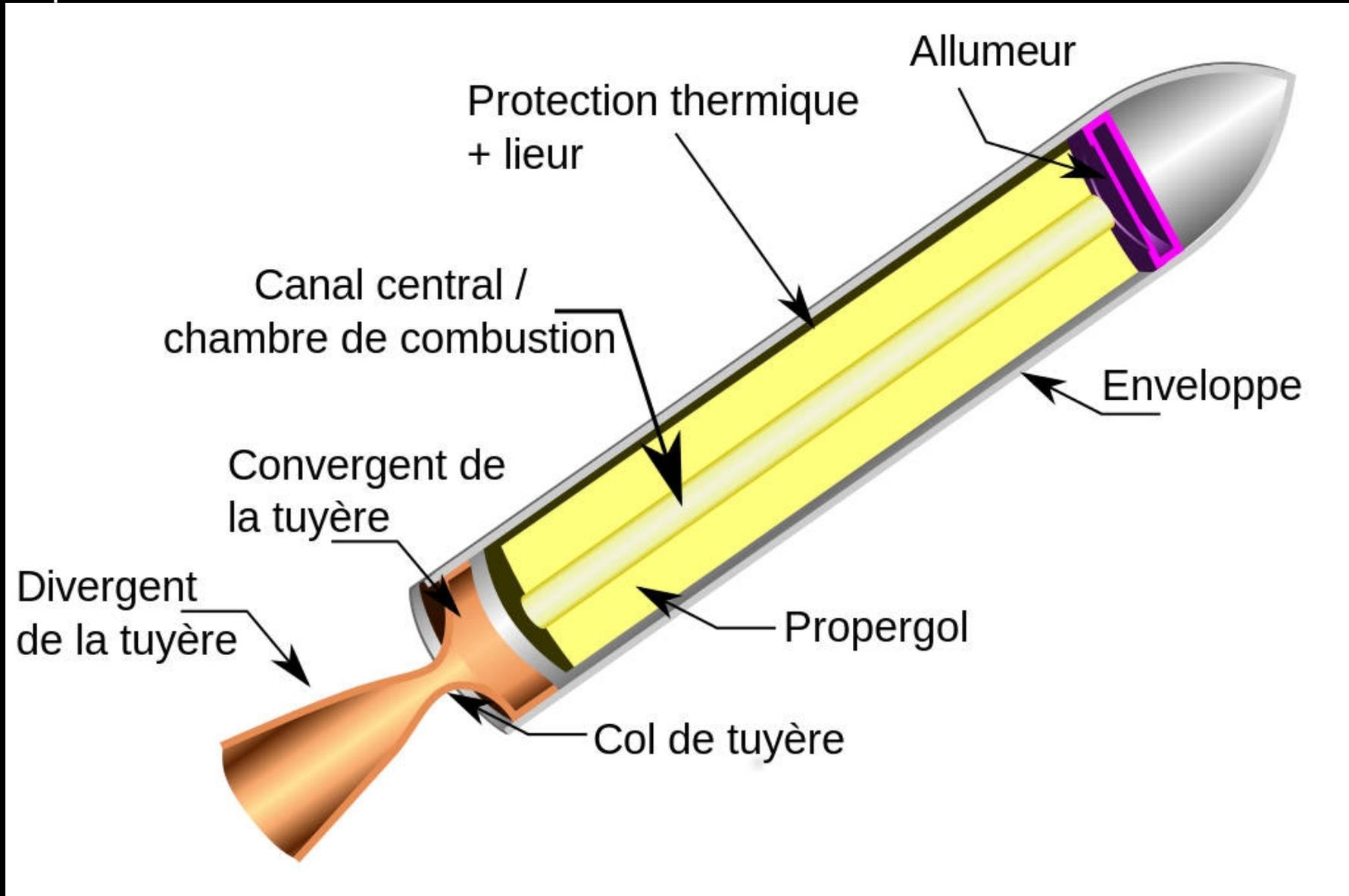


- Ci-contre, le lancement d'un missile ou d'une fusée V2 depuis le banc d'essai VII de la base militaire allemande de Peenemünde durant l'été 1943. **Source de l'image:**

[Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La technologie des moteurs-fusées à ergols solides est basée sur un propergol solide sous forme de poudre.



- Ci-dessus, schéma du fonctionnement d'une fusée à propergol solide. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le propergol solide a l'avantage de permettre des poussées fortes.
- La poussée avec le propergol solide est faiblement modulable.
- L'interruption de la combustion n'est en principe pas possible.
- Le propergol à poudre se stocke facilement.
- L'impulsion spécifique des propulseurs à poudre est limitée.



- Ci-contre, l'un des propulseurs à propergol solide (SRB) de la fusée Delta IV sur le point d'être mis en position verticale. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Les fusées à propergol solide sont utilisées comme propulseurs d'appoint au niveau du premier étage de certaines fusées pour apporter jusqu'à 90 % de la poussée.



- Ci-contre, le lanceur Ariane 5 le 23 décembre 2021 avec à son bord le JWST et avec ses deux boosters. Les deux boosters fournissent 92 % de la poussée au décollage. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Les fusées à ergols liquides peuvent mobiliser différentes combinaisons d'ergols.
- La combinaison oxydant/réducteur la plus connue est la combinaison LOX/LH2 (oxygène liquide/hydrogène liquide).
- L'on peut citer également les combinaisons acide nitrique/kérosène, oxygène liquide/kérosène, oxygène liquide/méthane liquide, oxygène liquide/hydrazine, peroxyde d'azote/kérosène, peroxyde d'azote/hydrazine et peroxyde d'azote-1/1-diméthylhydrazine (UDMH).



- Ci-contre, le décollage de la fusée Delta IV Heavy le 10 novembre 2007. L'étage inférieur comprend un propulseur principal mobilisant hydrogène liquide et oxygène liquide et le moteur RS-68 de Aerojet Rocketdyne. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

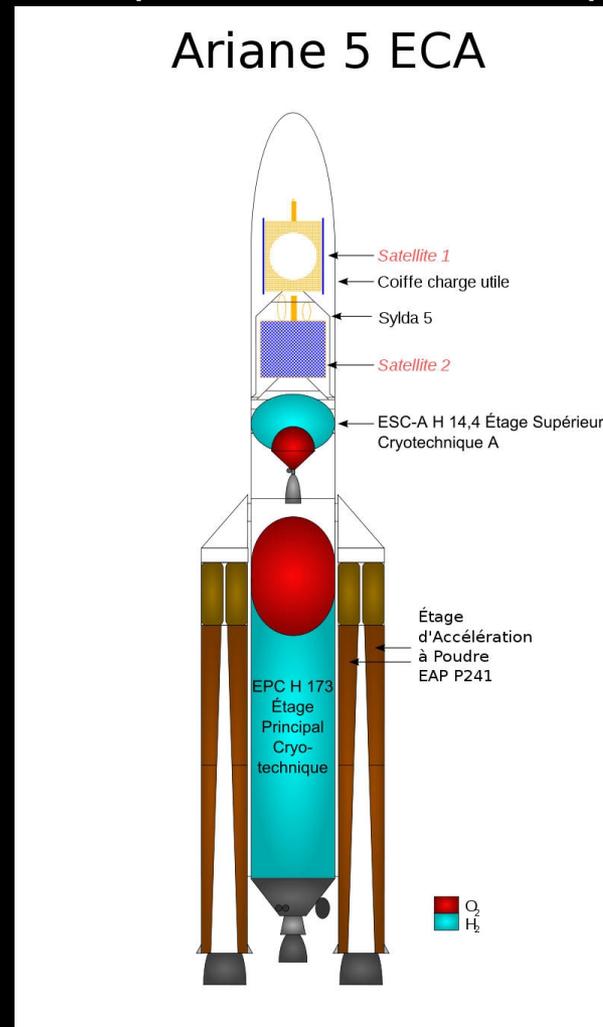
- La combinaison d'ergols oxygène liquide / kérosène (LOX / RP-1) est mobilisée pour les premiers étages des lanceurs Atlas V, Falcon 9, Falcon Heavy, Soyouz ou encore Long March 6.
- Cette combinaison d'ergols apporte moins de poussée que la combinaison LOX/LH2 mais elle est moins complexe à mettre en place.



- Ci-contre, une bouteille contenant environ 2 litres de kérosène de type RP-1.
Source de l'image
d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La combinaison LOX / LH2 est mobilisée dans les étages supérieurs de fusée Centaur, dans le lanceur Delta IV, dans le lanceur Ariane 5 ou encore dans le lanceur SLS.
- L'hydrogène liquide doit être maintenu à -253 degrés Celsius ce qui représente un défi dans l'environnement terrestre !
- Le stockage de l'hydrogène liquide requiert des volumes importants du fait de sa faible densité.



- Ci-contre, schéma de la structure de la fusée Ariane 5 ECA avec son étage principal cryo-technique qui mobilise O_2 et H_2 .

Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La combinaison LOX / Méthane liquide est mobilisée dans le lanceur Vulcan Centaur de ULA, la fusée New Glenn de Blue Origin, le lanceur Starship de SpaceX et le lanceur Neutron de Rocket Lab.
- Le méthane liquide est plus simple à stocker que l'hydrogène et a une densité supérieure permettant un volume de stockage plus faible à masse égale.



- Ci-contre, le lanceur Starship avec l'étage inférieur Super Heavy B4 et l'étage supérieur Starship S20. Les deux étages sont propulsés par des moteurs Raptor qui brûlent un mélange de dioxygène liquide et de méthane liquide. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- L'hydrazine (N_2H_4) est mobilisée notamment comme propergol pour la descente de sondes spatiales comme Curiosity en 2012 ou Perseverance en 2021.
- Les propulseurs à base d'hydrazine permettent des manoeuvres précises.



- Ci-contre, l'étage de croisière et la coquille comprenant l'étage de descente et le rover Curiosity de la mission MSL en 2008. L'étage de croisière comprend 8 petits moteurs-fusées qui consomment de l'hydrazine hypergolique.
Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le peroxyde d'azote ou tétraoxyde de diazote (N_2O_4) est mobilisé avec l'hydrazine (N_2H_4) ou le diméthylhydrazine asymétrique $H_2N-N(CH_3)_2$ pour former un propergol hypergolique.
- Le peroxyde d'azote est le comburant le plus utilisé dans les moteurs hypergoliques.
- Le peroxyde d'azote est un ergol relativement facile à stocker dans les réservoirs.



- Ci-contre, lancement du lanceur lourd russe Proton le 12 juillet 2000 depuis le cosmodrome Baïkonour avec le module de service Zvezda à son bord pour l'ISS. Les trois premiers étages du lanceur utilisent un mélange de N_2O_4 et de UDMH pour leur propulsion. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Les propergols solides de base sont la poudre noire, le monergol à base de nitrocellulose, le nitrate d'ammonium, le perchlorate d'ammonium et le zinc-soufre.



- Ci-contre, la navette Atlantis dirigée vers son pas de tir à l'aide d'un véhicule à chenilles le 15 février 2007.

Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

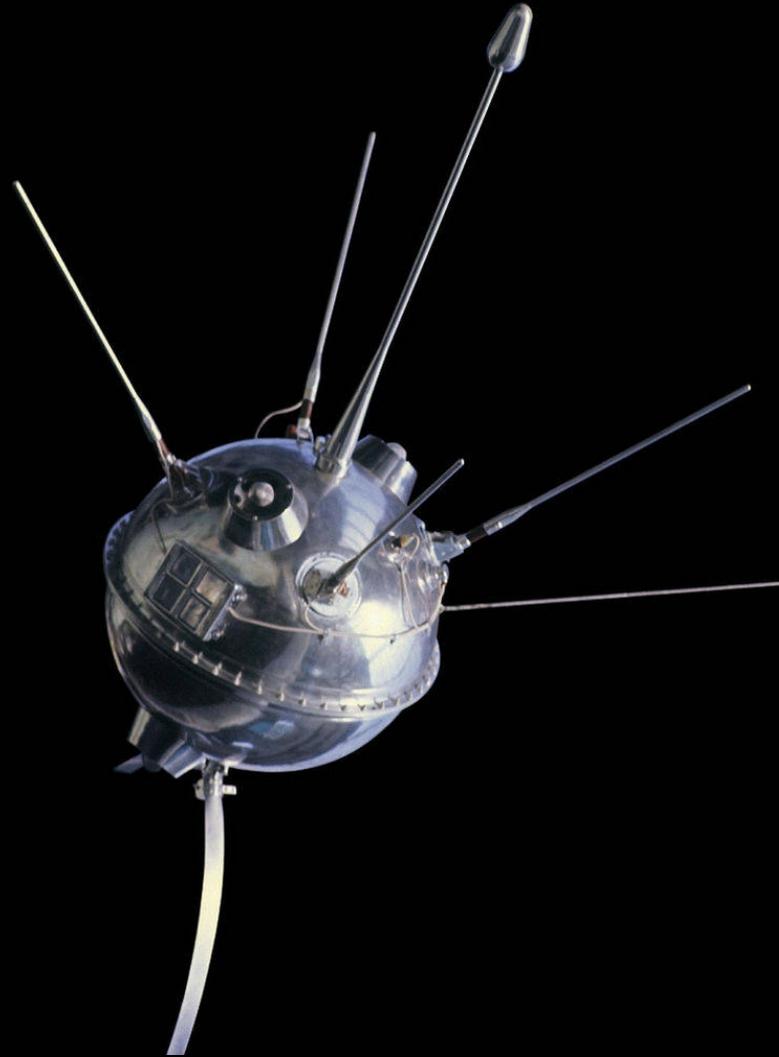
- Le propergol des propulseurs à poudre de la navette spatiale américaine et de la fusée Ariane 5 ECA représente un mélange de perchlorate d'ammonium, de poudre d'aluminium et de polybutadiène.
- Les SRB de la navette spatiale américaine contiennent ainsi 70% de perchlorate d'ammonium, 17% de poudre d'aluminium et 11% de polybutadiène.



- Ci-contre, le lancement de la navette spatiale Discovery le 26 juillet 2005 dans le cadre de la mission STS-114. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Les lanceurs doivent atteindre des vitesses considérables pour que la charge utile puisse être envoyée vers d'autres corps célestes.
- La vitesse de satellisation est de 7,9 km/s !
- La vitesse de libération est de 11,2 km/s !



- Ci-contre, la sonde Luna 1 exposée dans un musée. Luna 1 fut la première sonde à atteindre la vitesse de libération en 1959. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le lanceur Atlas-Centaur (AC27) qui lance, le 2 mars 1972, la sonde Pioneer 10 vers Jupiter pour la première fois atteint la vitesse sans précédent de 14,356 km/s par rapport à la Terre.



- Ci-contre, le lanceur Atlas-Centaur (AC27) comprenant la sonde Pioneer 10 peu avant son lancement. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La sonde Voyager 1 lancée le 5 septembre 1977 par un lanceur Titan 3E/Centaur atteint la vitesse de 15,517 km/s survolant ainsi Jupiter le 5 mars 1979 seulement.



- Ci-contre, le décollage du lanceur Titan 3E/Centaur transportant la sonde Voyager 1 le 5 septembre 1977. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La sonde spatiale New Horizons lancée le 19 janvier 2006 par un lanceur Atlas V-551 avec un troisième étage Star 48B à propergol solide atteint la vitesse record de 16,2 km/s seulement 45 minutes environ après le lancement.
- La sonde New Horizons survole Jupiter le 28 février 2007 un peu plus d'un an seulement après son lancement.

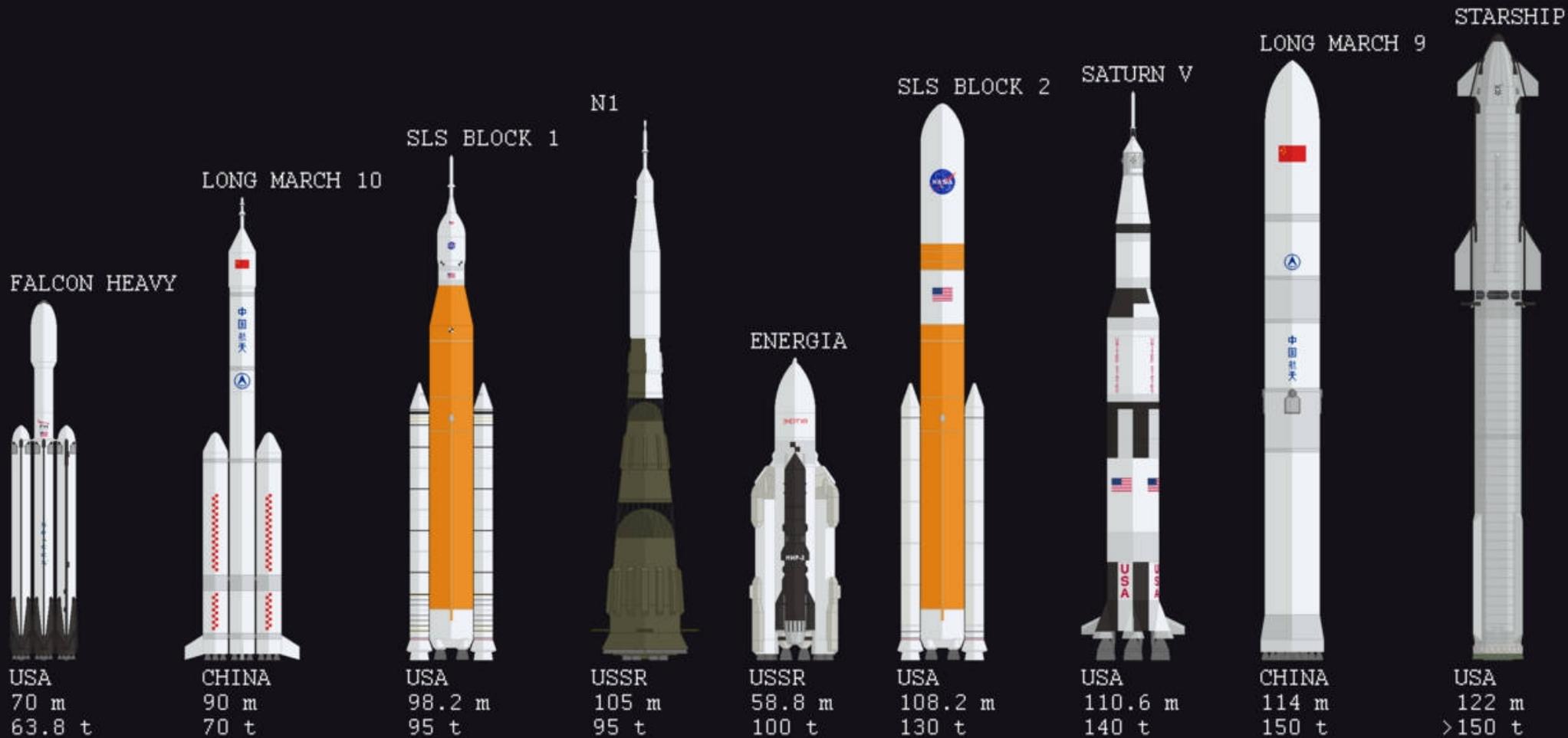


- Ci-contre, le lancement de la sonde New Horizons le 19 janvier 2006 par le lanceur Atlas V (551). [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Plusieurs lanceurs super lourds capables de mettre plus de 50 tonnes en orbite basse ont été développés depuis le lancement de Spoutnik en 1957.

- Les lanceurs les plus puissants sont Starship, Saturn V, la Navette spatiale américaine, SLS, Energia et N1.



- Ci-dessus, les lanceurs les plus puissants classés en fonction de la capacité d'envoi de charge utile vers l'orbite basse.

Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

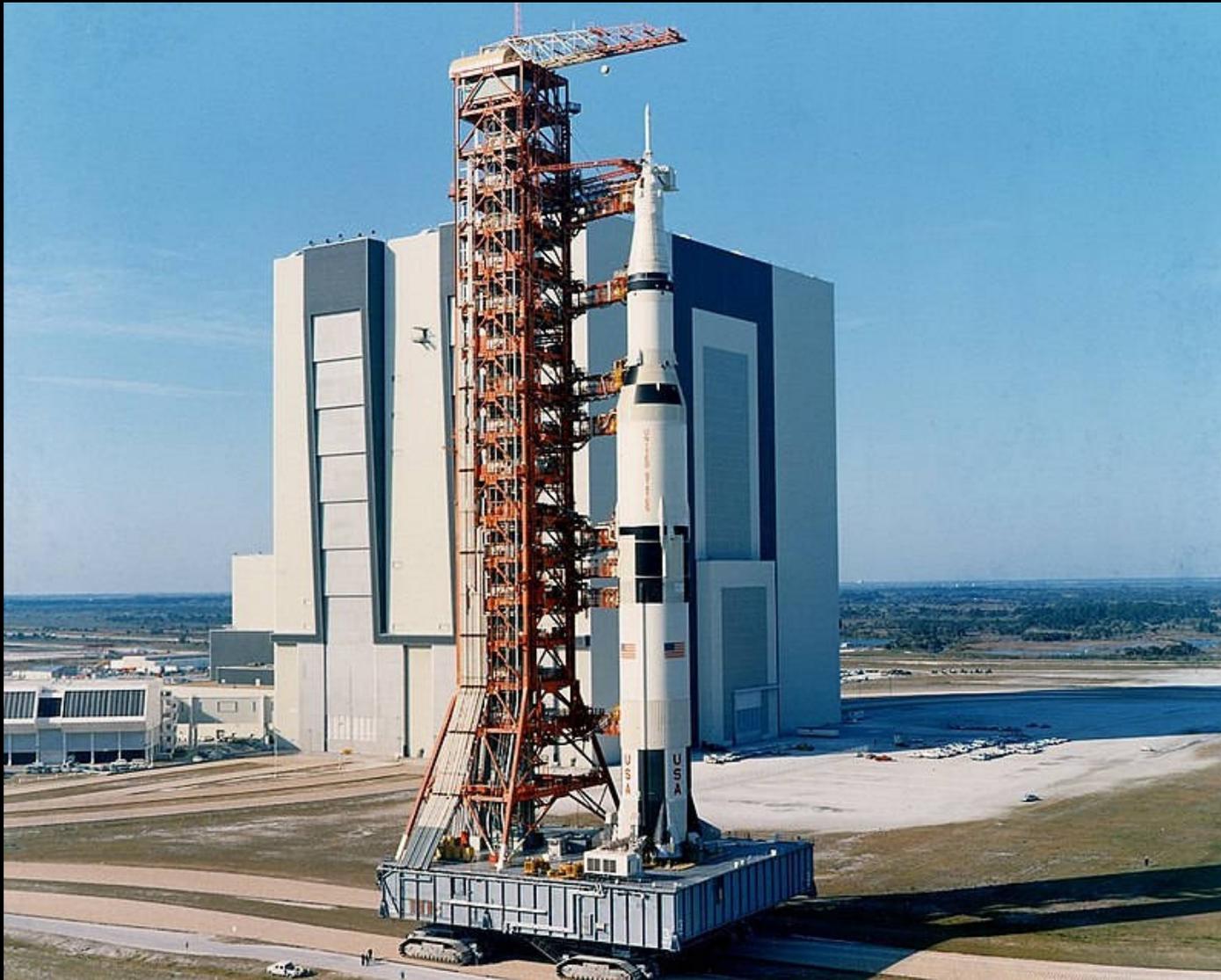
- Le lanceur Starship de la société SpaceX doit permettre le retour de l'homme sur la Lune et des missions ambitieuses vers Mars ou d'autres planètes.
- Le lanceur Starship pèse environ 5070 tonnes au décollage et génère une poussée de 76 MN.



- Ci-contre, le booster Super Heavy qui représente l'étage inférieur du Starship en phase de test à Boca Chica au Texas en 2023. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le lanceur Saturn V pesait 3038 tonnes au décollage, générait une poussée de 34 MN et pouvait envoyer jusqu'à 140 tonnes de charge utile en orbite basse et jusqu'à 47 tonnes de charge utile en orbite lunaire.
- Le premier étage était propulsé à partir du kérosène (RP-1) et de l'oxygène liquide (LOX).



- Ci-contre, la fusée Saturn V de la mission Apollo 10 quittant le VAB sur sa plateforme de lancement le 11 mars 1969. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- La Navette spatiale américaine composée d'un orbiteur (navette de type planeur), d'un réservoir externe et de deux propulseurs d'appoint (réutilisables) pouvait envoyer 24,5 tonnes de charge utile en orbite basse et générait 31 MN de poussée au décollage.
- Le réservoir externe (ET) qui alimentait les trois moteurs SSME de la navette comprenait de l'hydrogène liquide et de l'oxygène liquide.



- Ci-contre, les quatre astronautes de la mission STS-6 mobilisant la navette Challenger pour la première fois. De gauche à droite, nous trouvons Donald H. Peterson, Paul J. Weitz, Story Musgrave et Karol J. Bopko. La photo est prise le 20 octobre 1982 et le lancement est réalisé le 4 avril 1983. **Source de l'image d'origine:**

[Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le lanceur SLS (Space Launch System) dont le premier vol a lieu le 16 novembre 2022 a une masse de 2948 tonnes (Bloc 1B) et une poussée au décollage de 42 MN.
- Le SLS peut envoyer jusqu'à 130 tonnes de charge utile en orbite basse et jusqu'à 46 tonnes de charge utile en orbite lunaire.

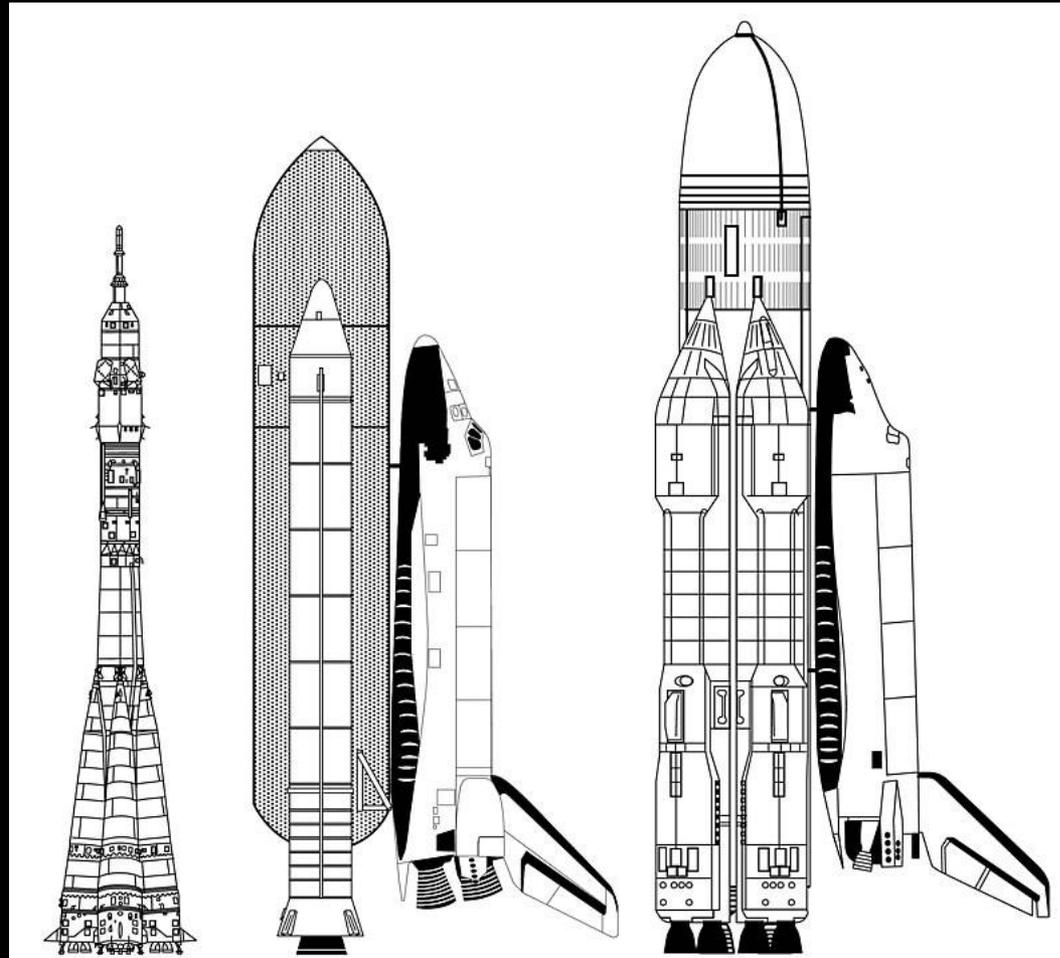


- Ci-contre, le lanceur SLS de la mission Artemis I le 18 mars 2022 depuis le pas de tir 39B au Kennedy Space Center.

Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

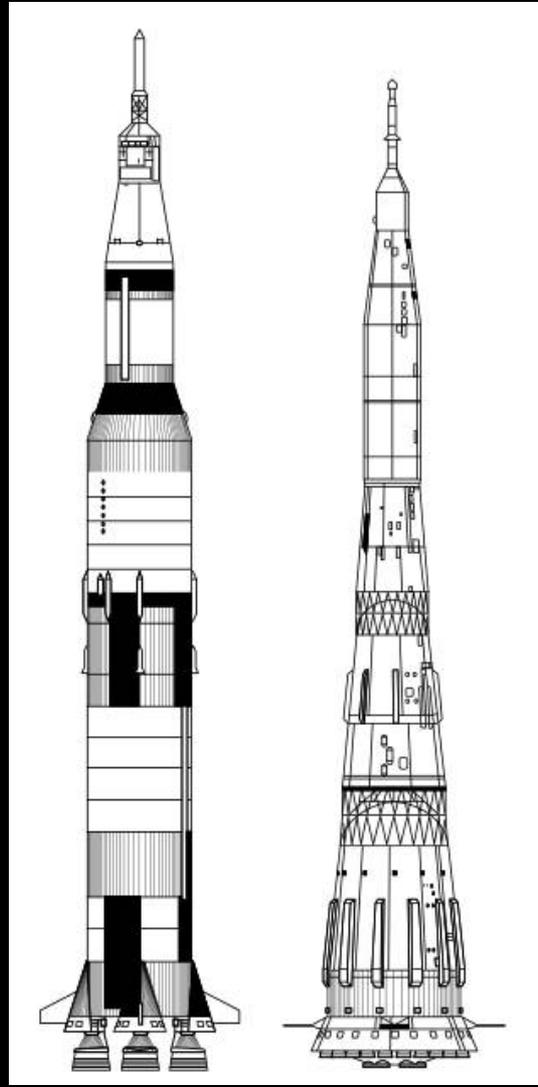
- Le lanceur spatial soviétique Energua transportant la navette Bourane et pesant 2371,6 tonnes au décollage générait une poussée au décollage de 39472,5 kN.
- Le lanceur pouvait envoyer 105 tonnes de charge utile en orbite basse et 29 tonnes de charge utile en orbite lunaire.
- Le lanceur mobilisé en 1987 et en 1988 rendait possible des missions d'exploration planétaire ambitieuses !



- Ci-contre, de gauche à droite, le lanceur Soyouz, le lanceur STS de la navette spatiale américaine et le lanceur Energua à l'échelle. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Le lanceur soviétique N-1 qui représentait le rival du lanceur américain Saturn V dans la course à la Lune pesait 2735 tonnes au décollage et générait une poussée au décollage de 46 MN.
- Il pouvait envoyer une charge utile de 95 tonnes en orbite basse.
- Il y aura eu 4 lancements et 4 échecs entre 1969 et 1972 !

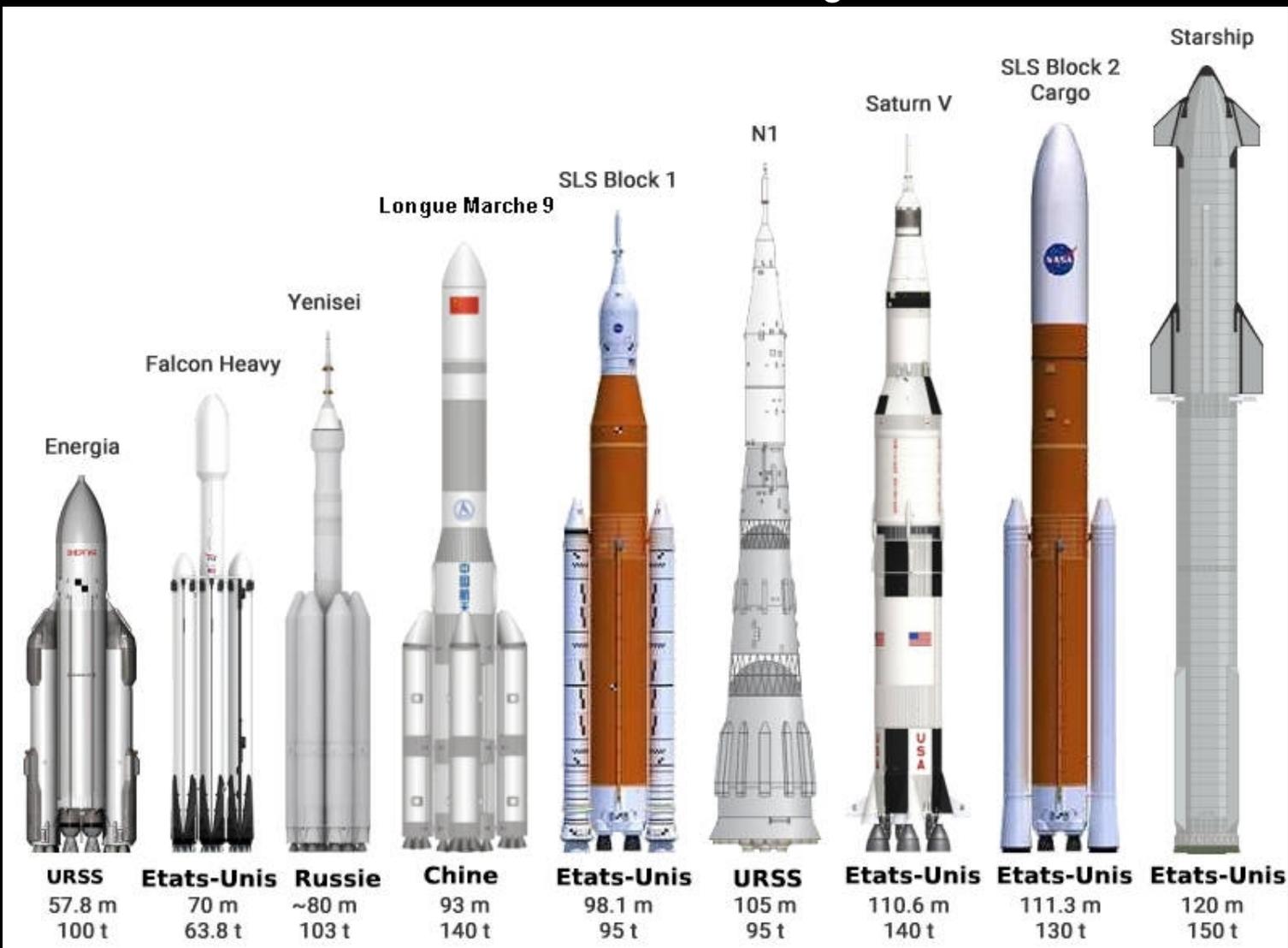


- Ci-contre, le lanceur américain Saturn V à gauche et le lanceur soviétique N1 à droite à l'échelle. **Source de l'image d'origine:**

[Wikipedia.](#)

La technologie de propulsion spatiale traditionnelle

- Plusieurs projets ambitieux de lanceurs lourds ou super lourds dans le contexte géopolitique actuel apparaissent.
- L'on peut mentionner notamment le lanceur russe Yenisei, le lanceur chinois Longue Marche 9 ou encore le lanceur New Glenn de Blue Origin.

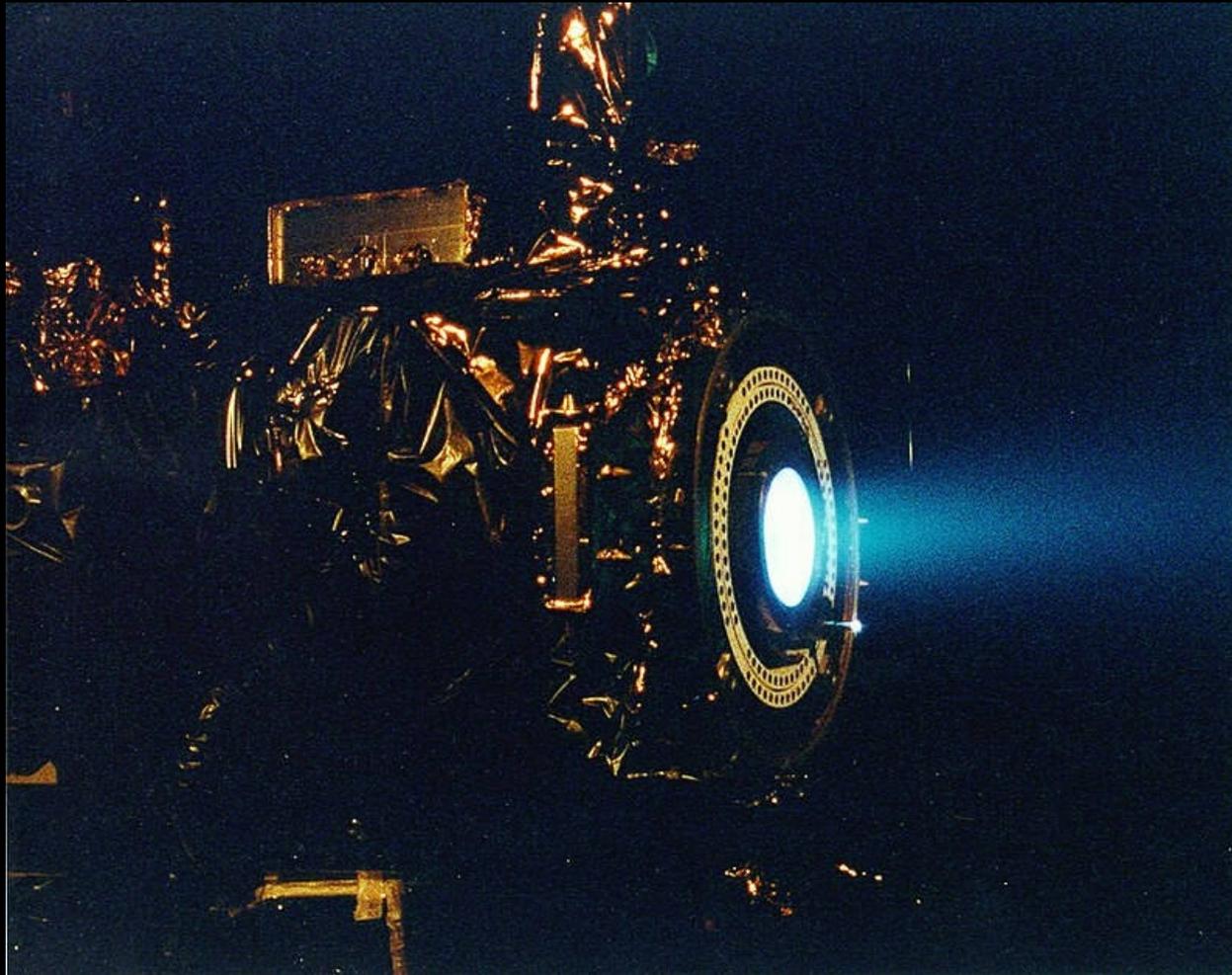


- Ci-contre, les grands lanceurs développés ou en cours de développement à l'échelle. **Source** de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale
en développement ou en projet

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

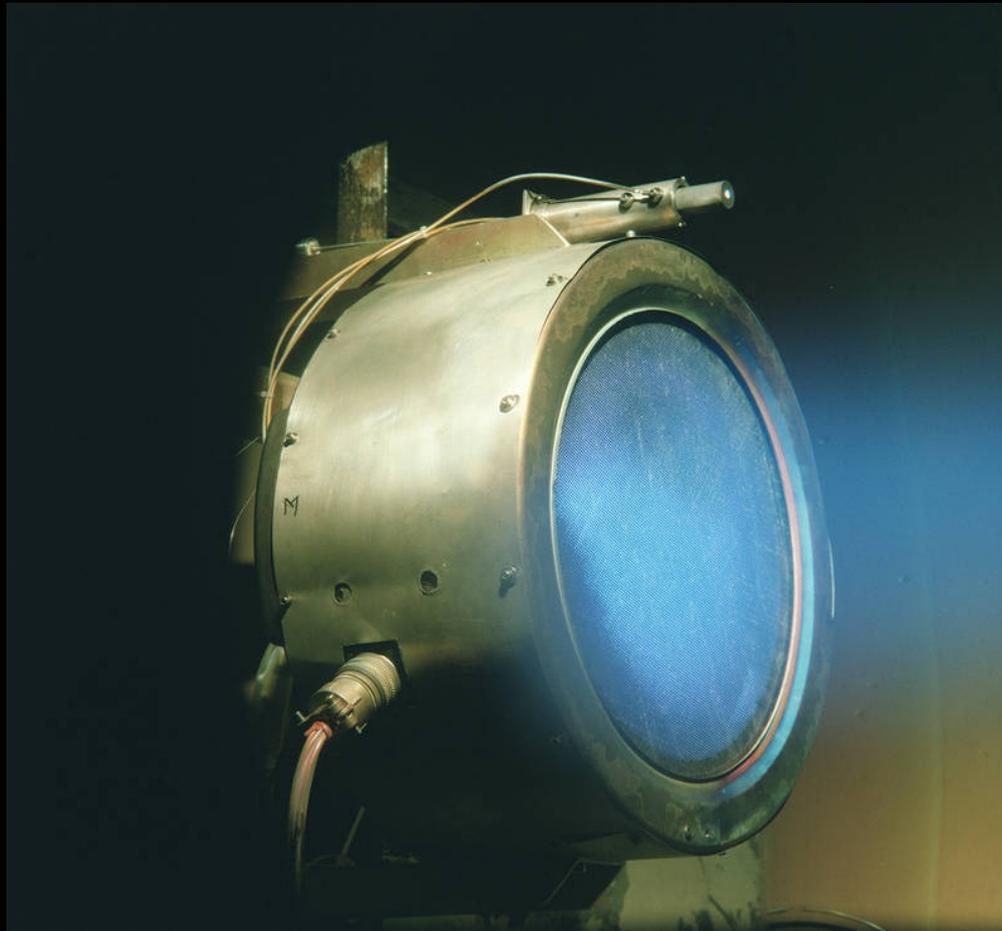
- Des alternatives au système de propulsion spatiale traditionnelle sont apparues.
- La technologie de propulsion ionique a pris forme.
- Un système de propulsion par explosions nucléaires a été expérimenté.
- Des systèmes de propulsion thermique nucléaire ou de propulsion électrique nucléaire sont en développement ou en projet !



- Ci-contre, le moteur ionique NSTAR testé sur banc d'essais. Le moteur est semblable à celui qui a propulsé Dawn dans sa campagne d'exploration de la ceinture d'astéroïdes.
Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

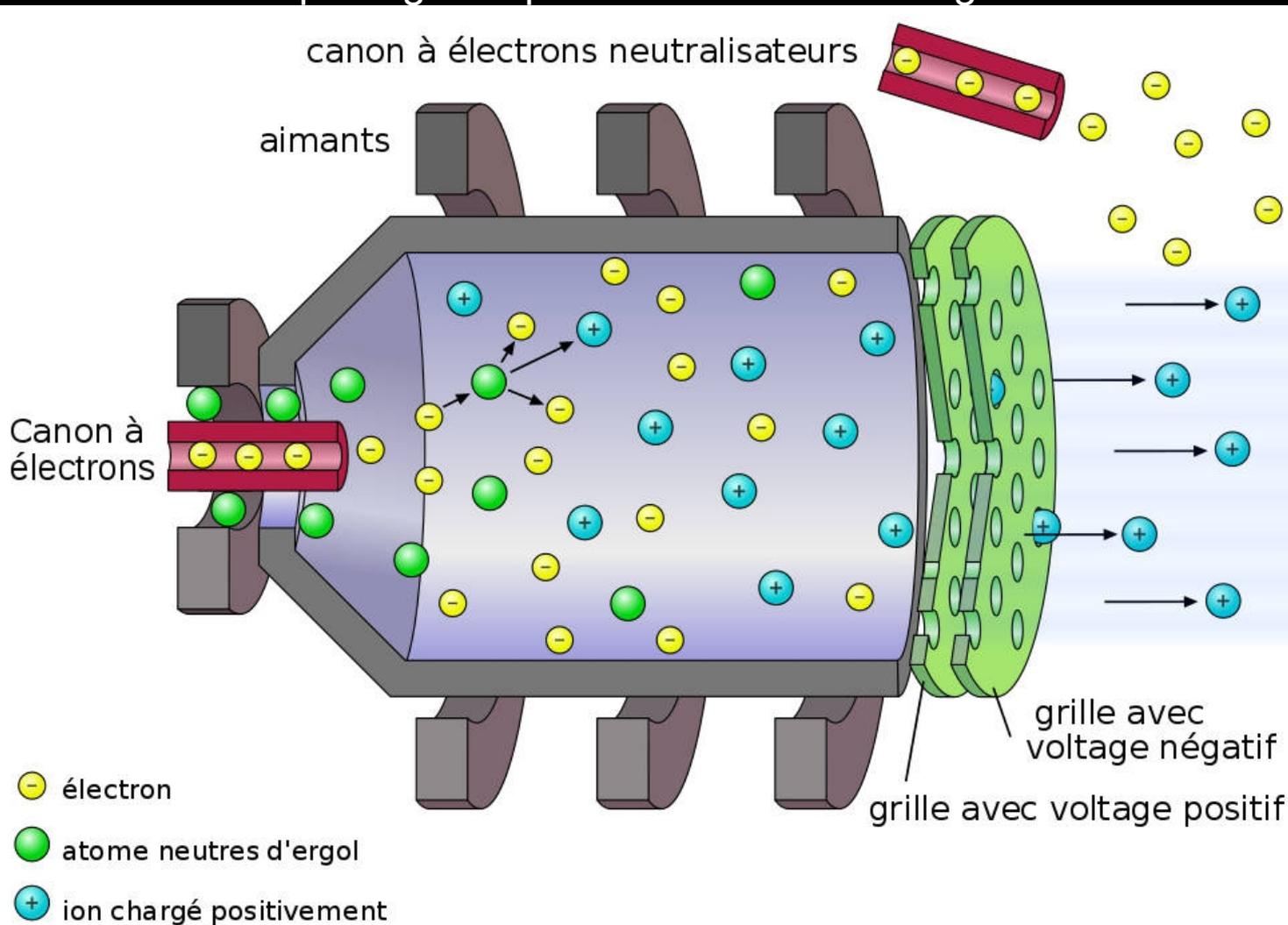
- La propulsion ionique permet une vitesse d'éjection des particules bien supérieure à celle d'un système de propulsion chimique conventionnel.
- Le moteur ionique génère aujourd'hui une poussée relativement faible (de 0,05 N à 5 N en 2018) mais il permet une impulsion spécifique bien supérieure à l'impulsion spécifique d'un lanceur classique.
- Le rendement relativement élevé d'un moteur ionique rend possible des variations de vitesse non négligeables.



- Ci-contre, le test d'un prototype de moteur ionique à base de xénon au JPL en 2005.. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

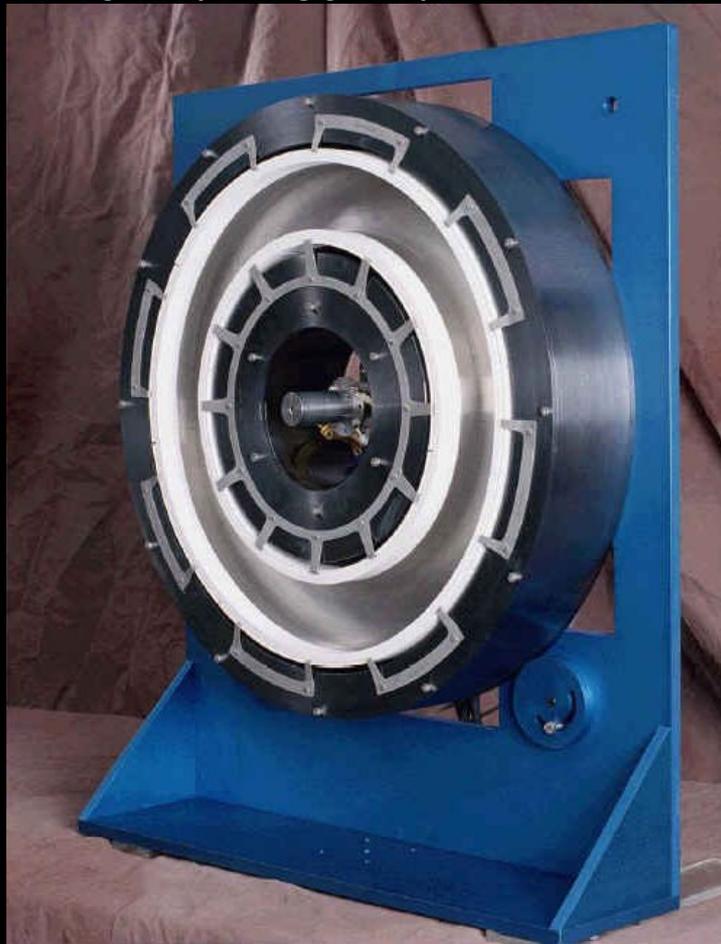
- Il existe plusieurs types de moteurs ioniques.
- L'on distingue les moteurs ioniques à grilles polarisées et les propulseurs à effet Hall ou moteurs à plasma stationnaire (SPT).
- Le moteur ionique à grilles polarisées mobilise en général du xénon comme masse d'appui.



- Ci-contre, le schéma d'un moteur ionique à grilles.
Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

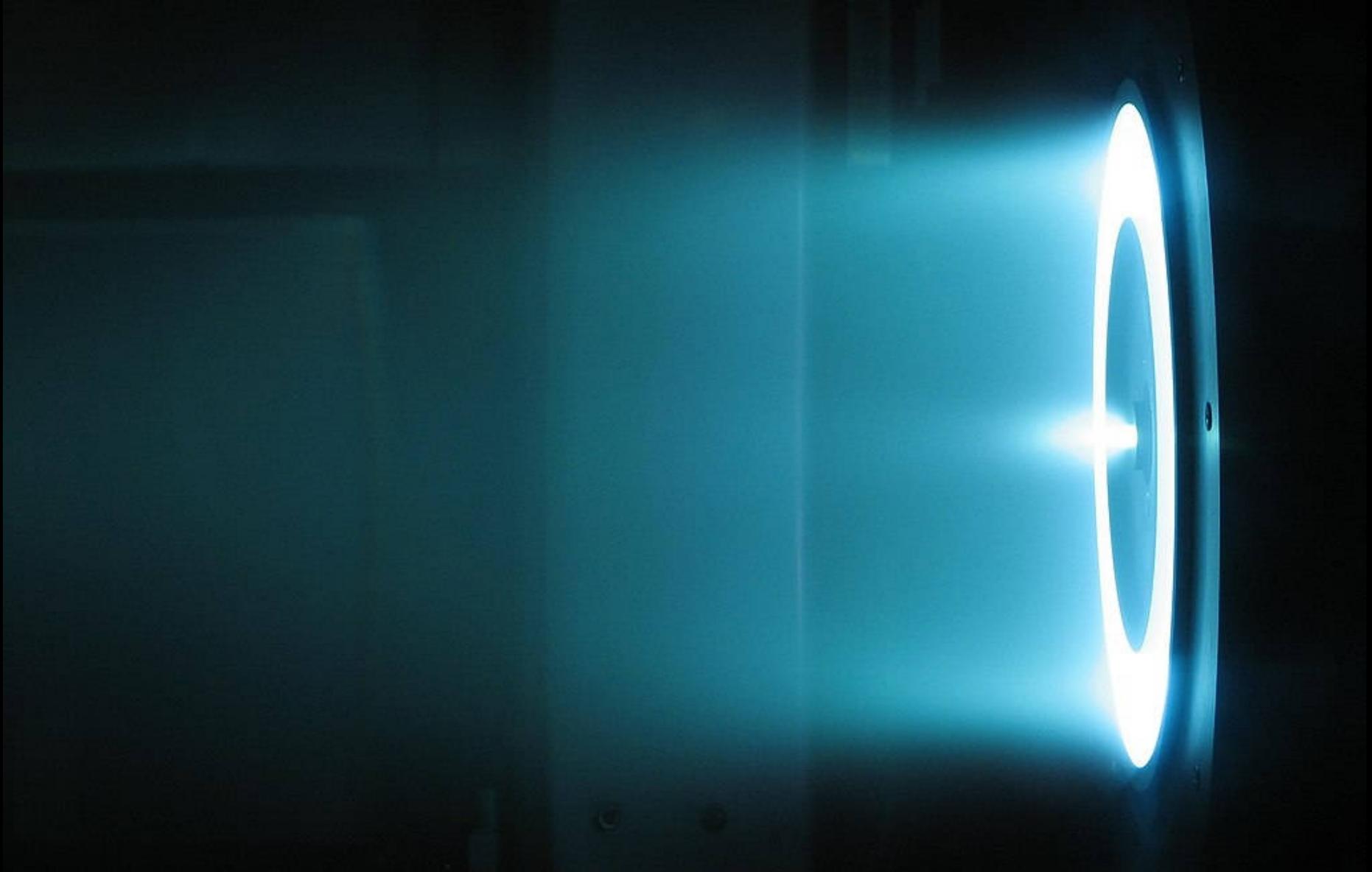
- Le moteur à effet Hall représente un propulseur à plasma qui mobilise un champ électrique pour accélérer des ions.
- Un champ magnétique permet de piéger les électrons qui servent à ioniser le gaz.
- Le gaz utilisé est en général le xénon mais le krypton, le bismuth, l'argon, l'iode, le magnésium et le zinc peuvent être aussi mobilisés.
- Les vitesses d'éjection varient de 10 km/s à 80 km/s en fonction de la puissance électrique.



- Ci-contre, un propulseur à effet Hall à grande puissance NASA-457M. La puissance électrique fournie est de 50 kW et la poussée maximale est de 2,3 N. [Source de l'image: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- Le moteur ionique est utilisé au départ pour l'exécution de petites corrections de trajectoire orbitale ou d'orientation pour des satellites notamment.



- Ci-dessus, un propulseur Hall au xénon de 6 kW du JPL. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- Le moteur ionique implique une production d'électricité qui peut se faire par différents moyens.
- Des panneaux solaires peuvent permettre la production d'électricité.
- Un générateur thermoélectrique à radioisotope peut être mobilisé également.

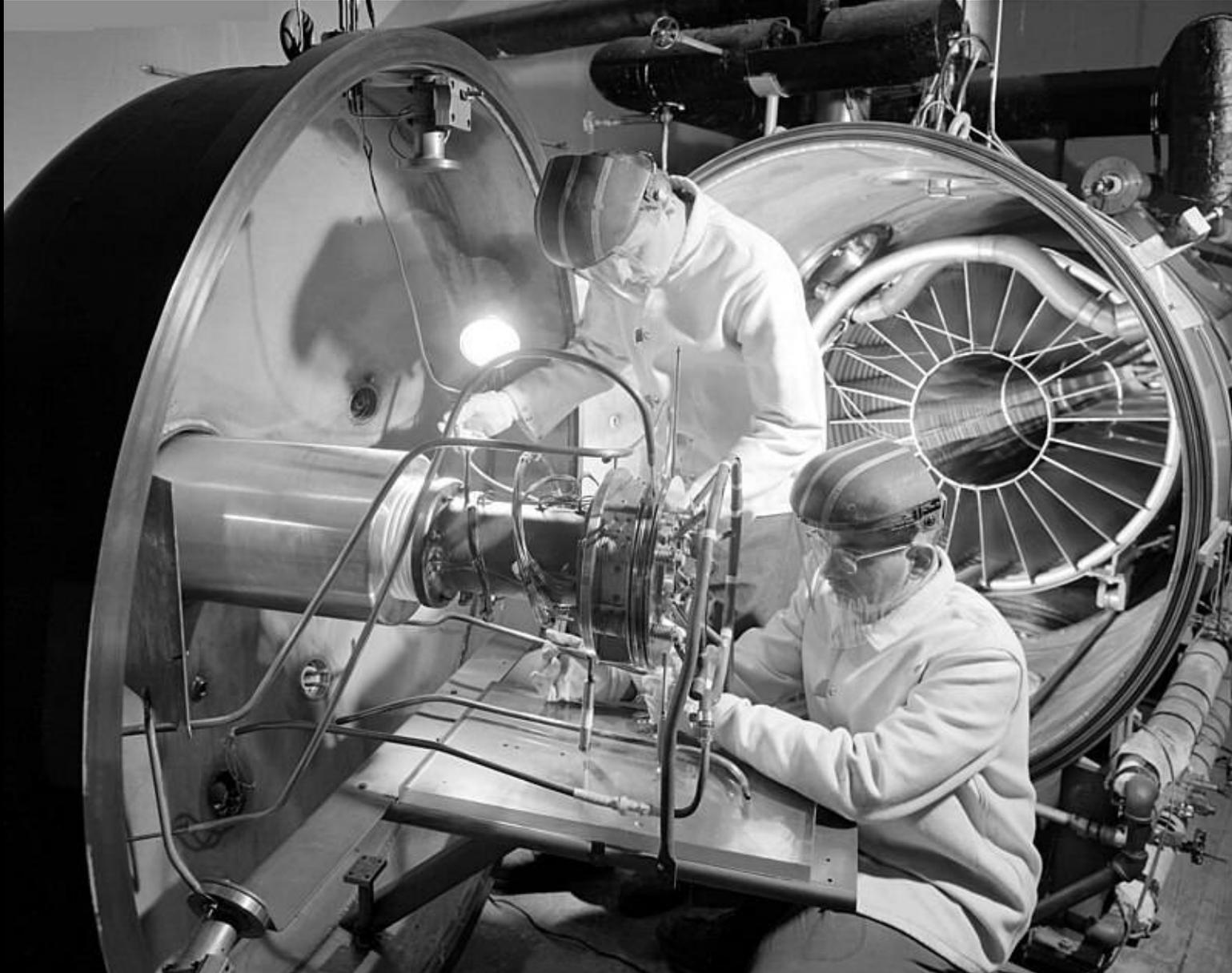


- Ci-contre, le modèle du Générateur Thermique à Radioisotope (GTR) connecté à la sonde New Horizons le 4 novembre 2005. Le vrai générateur sera installé plus tard peu avant le lancement le 19 janvier 2006.

Source de l'image d'origine: [Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

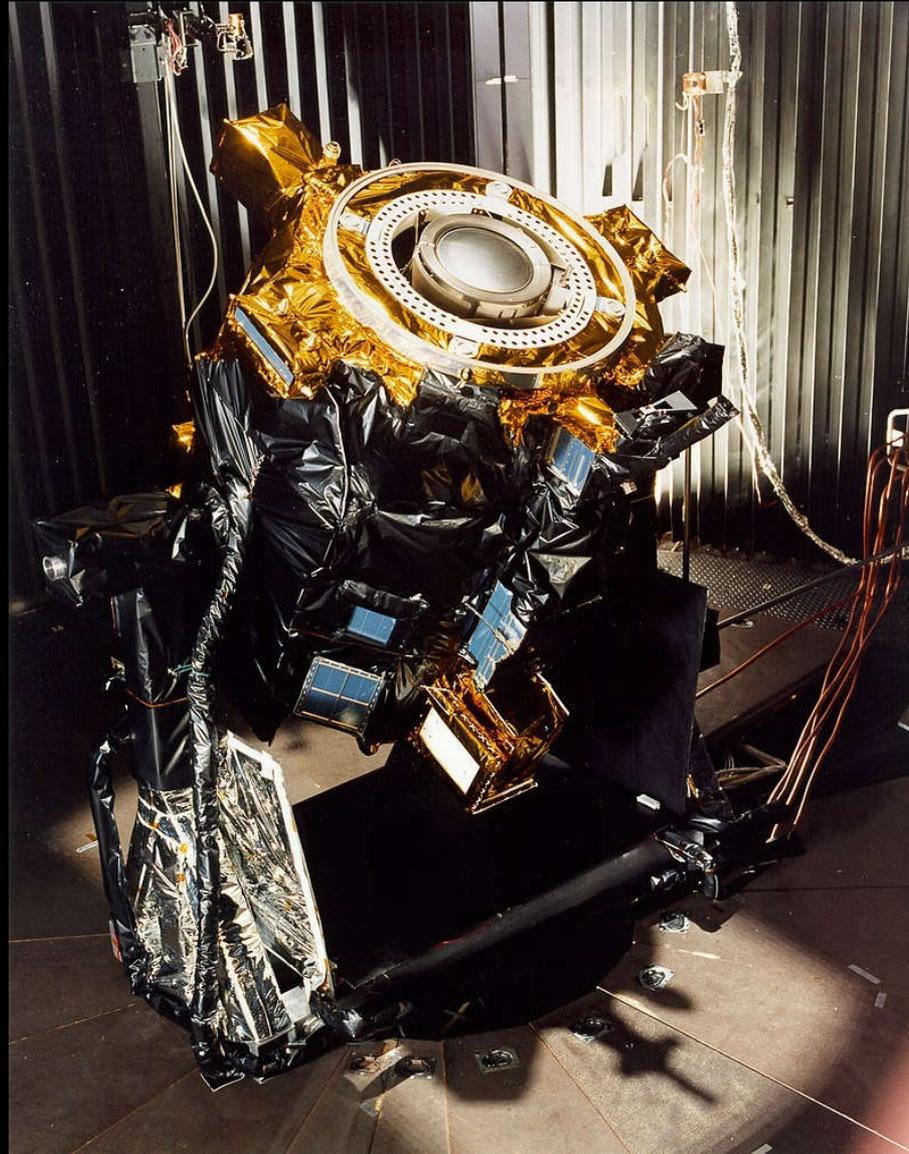
- Le premier moteur ionique, côté américain, est construit en 1959.



- Ci-dessus, un moteur ionique installé dans un réservoir à vide poussé au centre de recherche Lewis en 1959. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

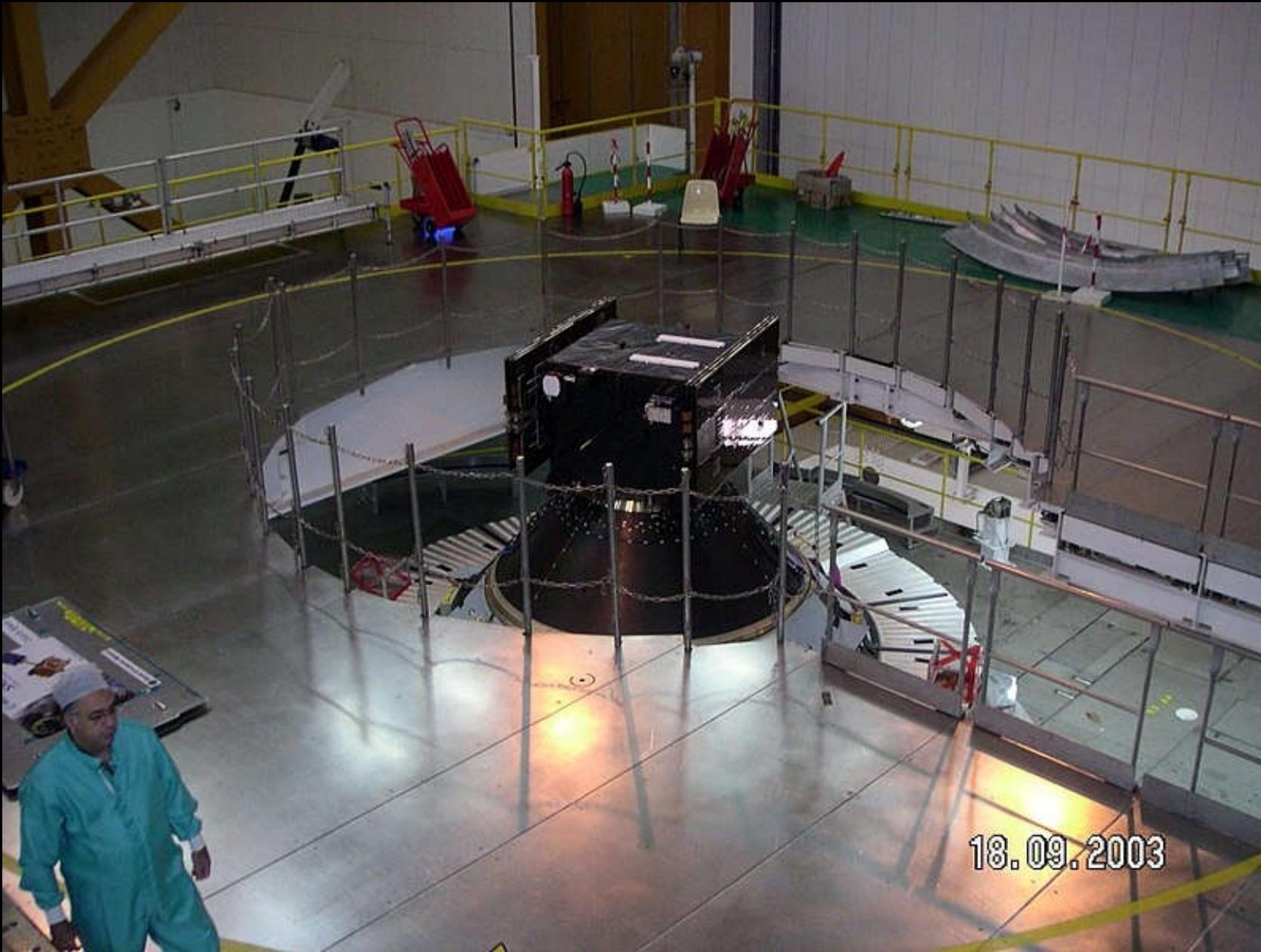
- Deep Space 1, lancée le 24 octobre 1998, devient la première sonde spatiale à mobiliser un moteur ionique comme propulsion principale.
- La sonde aura été accélérée de 4,2 kilomètres par seconde en consommant seulement 70 kg de xénon !



- Ci-contre, la sonde Deep Space 1 durant une phase de test. L'on peut identifier en particulier le moteur ionique NSTAR. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- La sonde spatiale SMART-1 de l'ESA qui a étudié la Lune entre 2003 et 2006 comprenait un moteur ionique de type propulseur à effet Hall.



- Ci-contre, la sonde SMART-1 fixée sur la partie supérieure du lanceur Ariane 5 à Kourou le 18 septembre 2003. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- La sonde Hayabusa qui a ramené sur Terre des échantillons de l'astéroïde Itokawa était propulsée, pour sa propulsion principale, par quatre moteurs ioniques.
- Les moteurs ioniques fonctionnaient sur la base du xénon qui était ionisé par induction HF.
- Les ions étaient accélérés via un champ électrique puissant.



- Ci-contre, une réplique de la sonde Hayabusa à l'International Astronautical Congress à Prague en République Tchèque en 2010. La sonde lancée le 9 mai 2003 avait ramené des échantillons sur Terre le 13 juin 2010. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

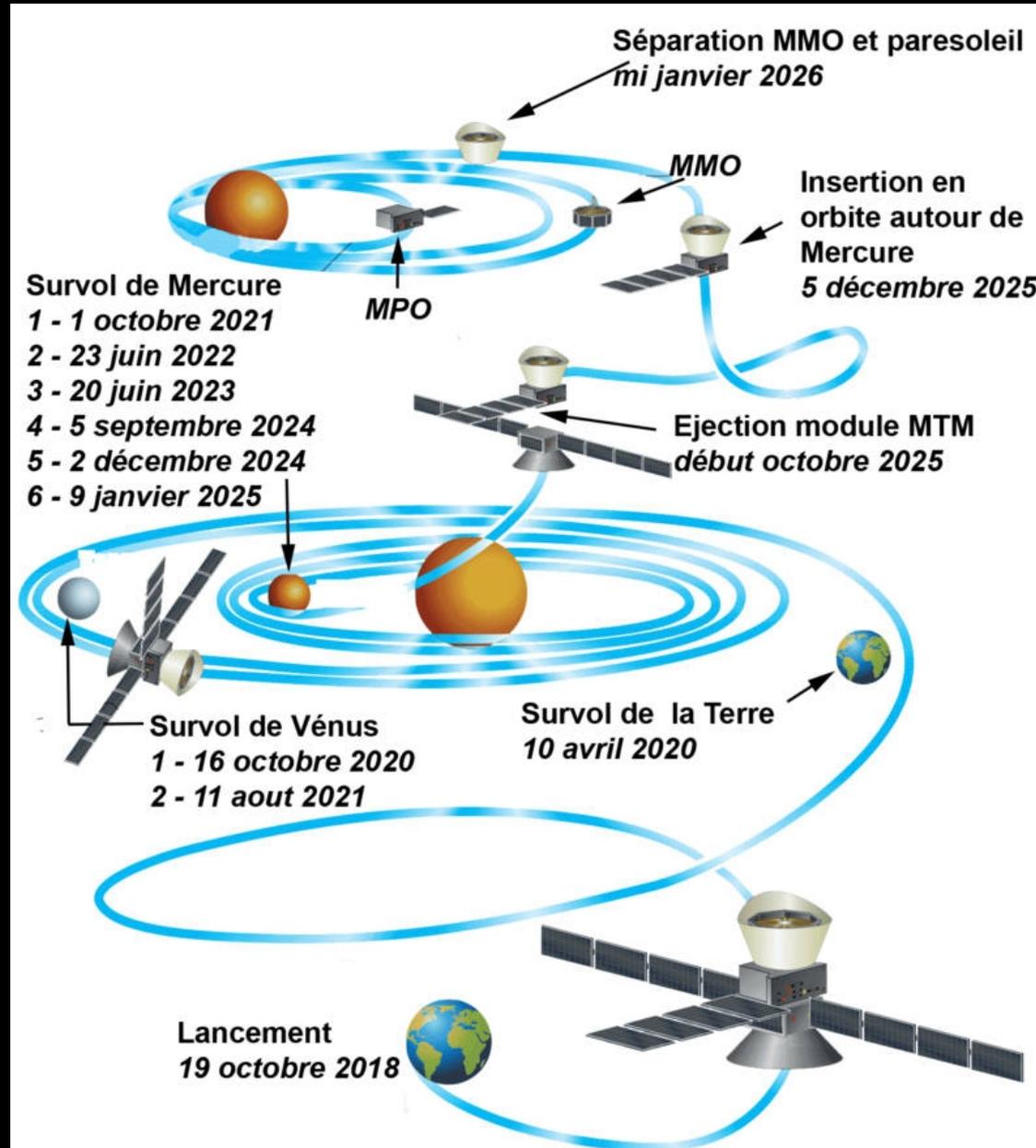
- La sonde Dawn qui a étudié Vesta en 2011 puis Cérès en 2015 était propulsée par 3 moteurs ioniques.
- La propulsion ionique a permis à Dawn d'accélérer de plus de 10 km/s.



- Ci-contre, montage d'un des deux panneaux solaires sur la sonde Dawn.
Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- La sonde BepiColombo qui doit étudier Mercure comporte 4 moteurs ioniques à grille fonctionnant sur la base du xénon.



- Ci-contre, schéma de l'itinéraire de la sonde BepiColombo depuis son lancement jusqu'à son insertion orbitale autour de Mercure. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

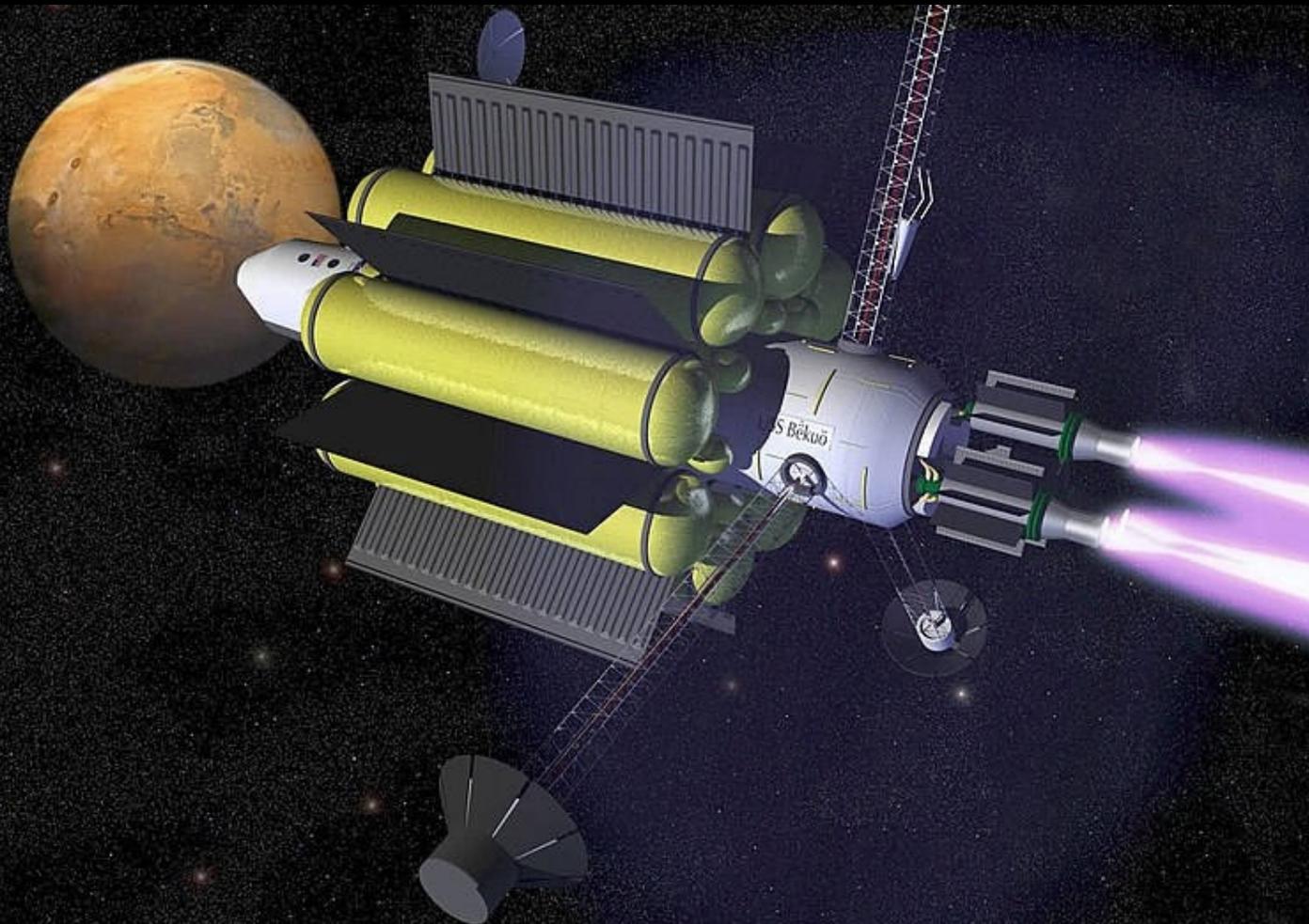
- La sonde Hayabusa 2 qui a récolté et ramené sur Terre des échantillons de l'astéroïde Ryugu était propulsée, en propulsion principale, par 4 moteurs ioniques.
- Les moteurs ioniques fournissent, sur la base du xénon comme masse d'appui, un delta-V total de 2 km/s.



- Ci-dessus, une maquette à l'échelle 1 de la sonde Hayabusa 2 au Tsukuba Space Center (JAXA) au Japon. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

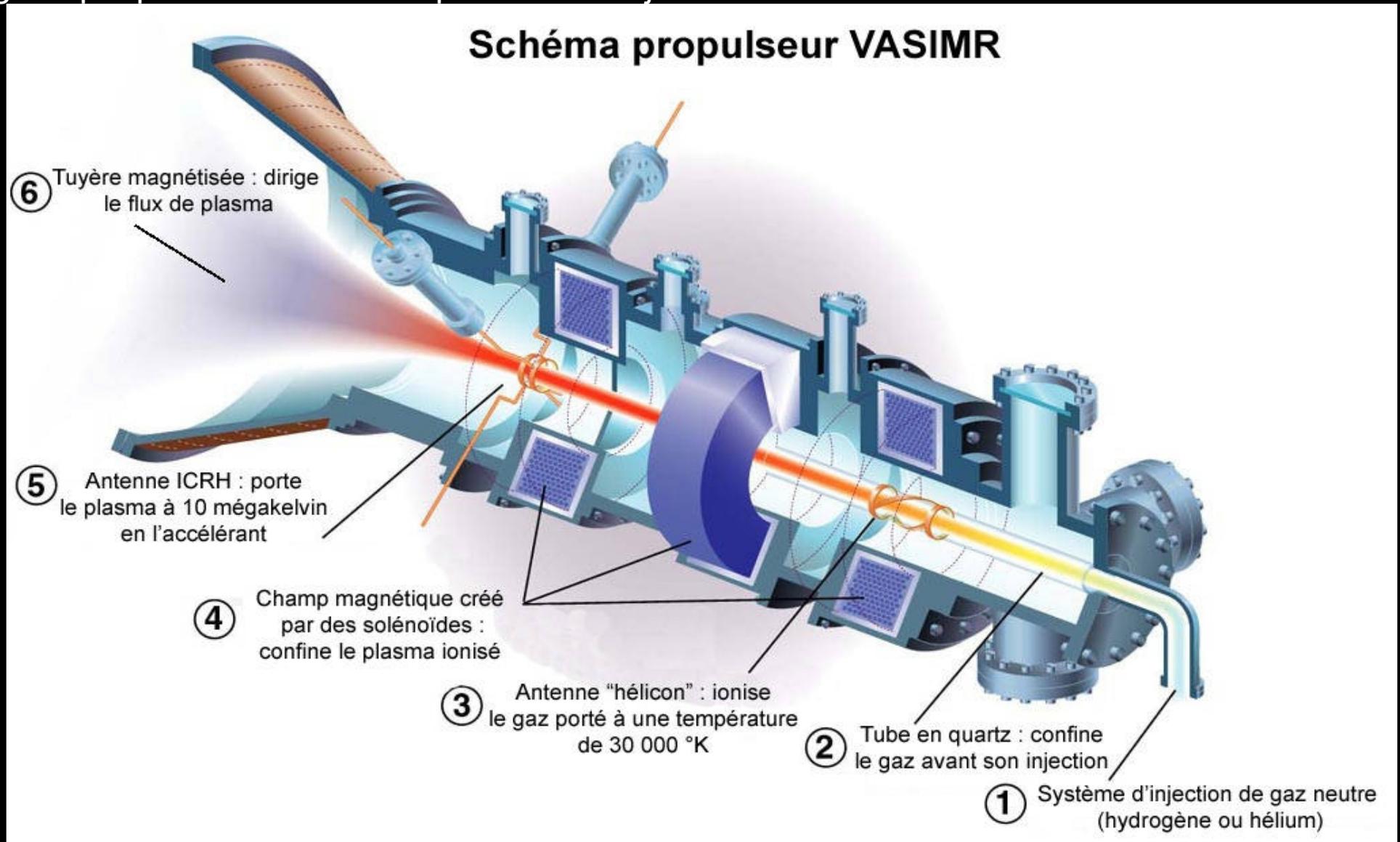
- La technologie VASIMR vise un voyage vers Mars en seulement 39 jours.
- La technologie VASIMR (Variable specific impulse magnetoplasma rocket) représente la propulsion magneto-plasmique à impulsion spécifique variable.
- La technologie VASIMR permet à la fois de fortes poussées et une impulsion spécifique élevée.



- Ci-contre, une représentation d'un vaisseau imaginaire à propulsion magnéto-plasmique à impulsion spécifique variable dans l'environnement martien. **Source** de l'image d'origine: [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

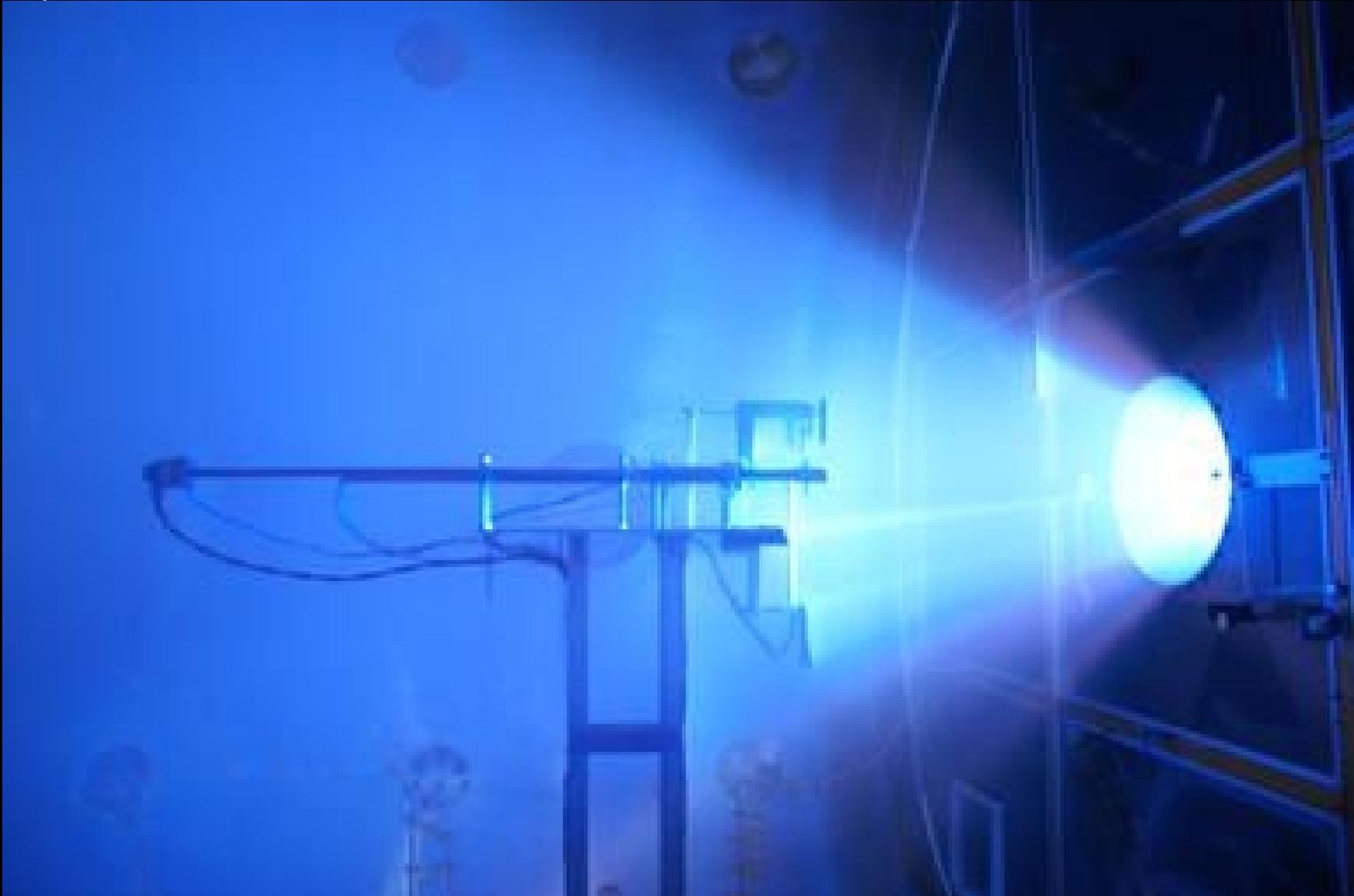
- Le système VASIMR mobilise notamment l'induction électromagnétique pour le processus de chauffage, un champ électrique pour l'ionisation et l'accélération des ions du plasma et un champ magnétique pour le contrôle du plasma et du jet.



- Ci-dessus, le schéma de fonctionnement du propulseur VASIMR. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- La technologie VASIMR a été expérimentalement testée en laboratoire avec notamment le moteur à plasma VX-200 de 200 kW.



- Ci-dessus, le moteur à plasma VX-200 expérimenté à pleine puissance, mobilisant les deux étages avec champ magnétique complet. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

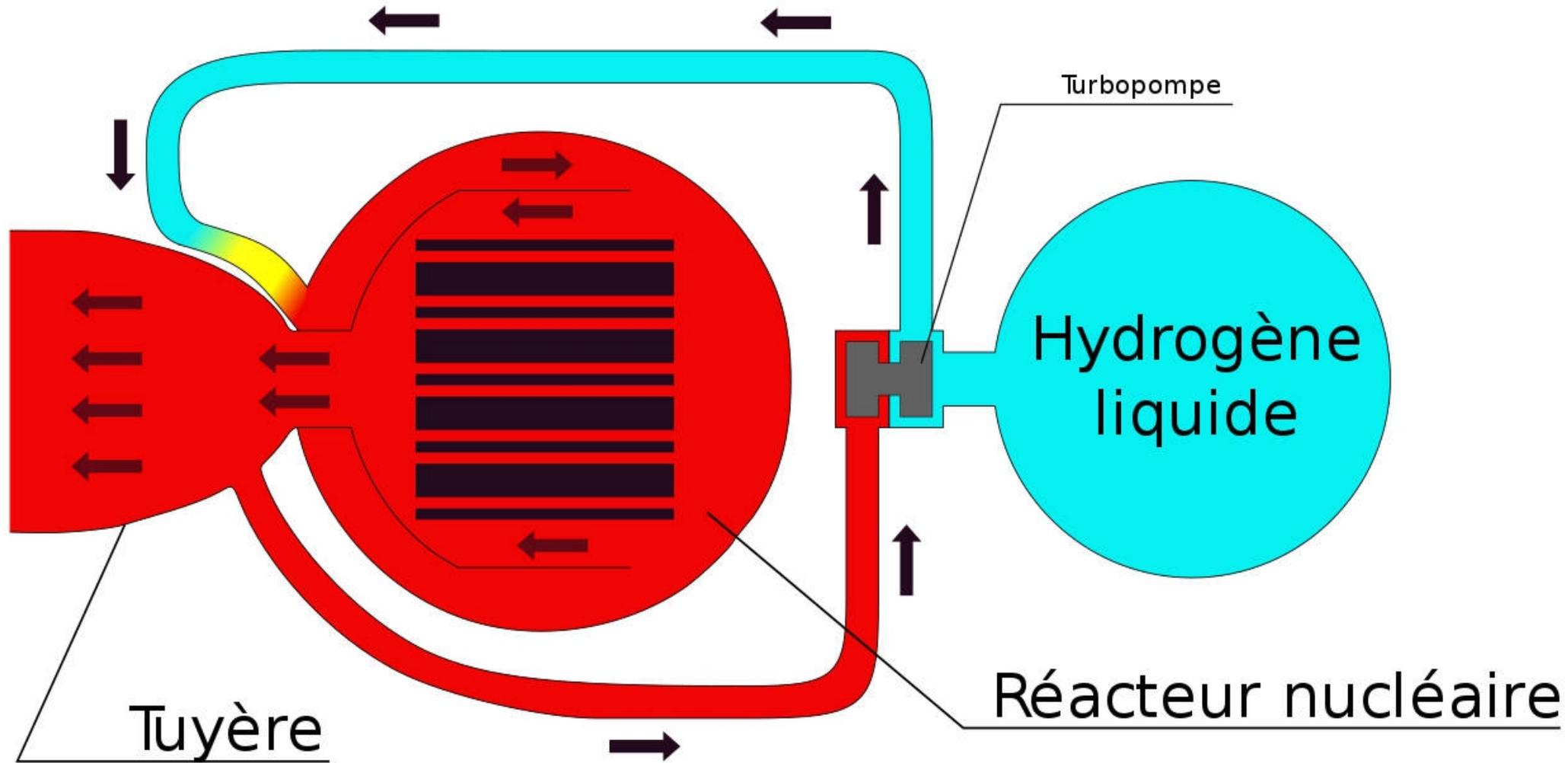
- Des technologies de propulsion spatiale mobilisant l'énergie nucléaire ont été développées ou théorisées.
- L'on peut citer notamment la propulsion nucléaire thermique (NTP) et la propulsion nucléaire électrique (NEP).



- Ci-contre, l'assemblage de crayons de combustible pour un réacteur de centrale nucléaire au "Novosibirsk Chemical Concentrate Works".
Source de l'image d'origine: [Wikipedia](#).
Crédit de l'image d'origine: [RIA Novosti](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- La propulsion nucléaire thermique (NTP) est basée sur un réacteur à fission nucléaire qui chauffe un fluide propulsif tel que l'hydrogène.



- Ci-dessus, le schéma de fonctionnement d'un système de propulsion thermique nucléaire (NTP) dont le fluide propulsif utilisé est l'hydrogène liquide. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- Des expérimentations sur la propulsion nucléaire thermique (NTP) ont été menées par les Américains avec le programme NERVA entre 1960 et 1972 et par les Soviétiques avec le moteur-fusée RD-0410 de 1965 aux années 1980.



- Ci-contre, le moteur-fusée avec réacteur nucléaire expérimental NERVA XE sur le site "Engine Test Stand One" au "Nevada Test Site". Deux techniciens sur la droite permettent de prendre la mesure de la taille du système. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

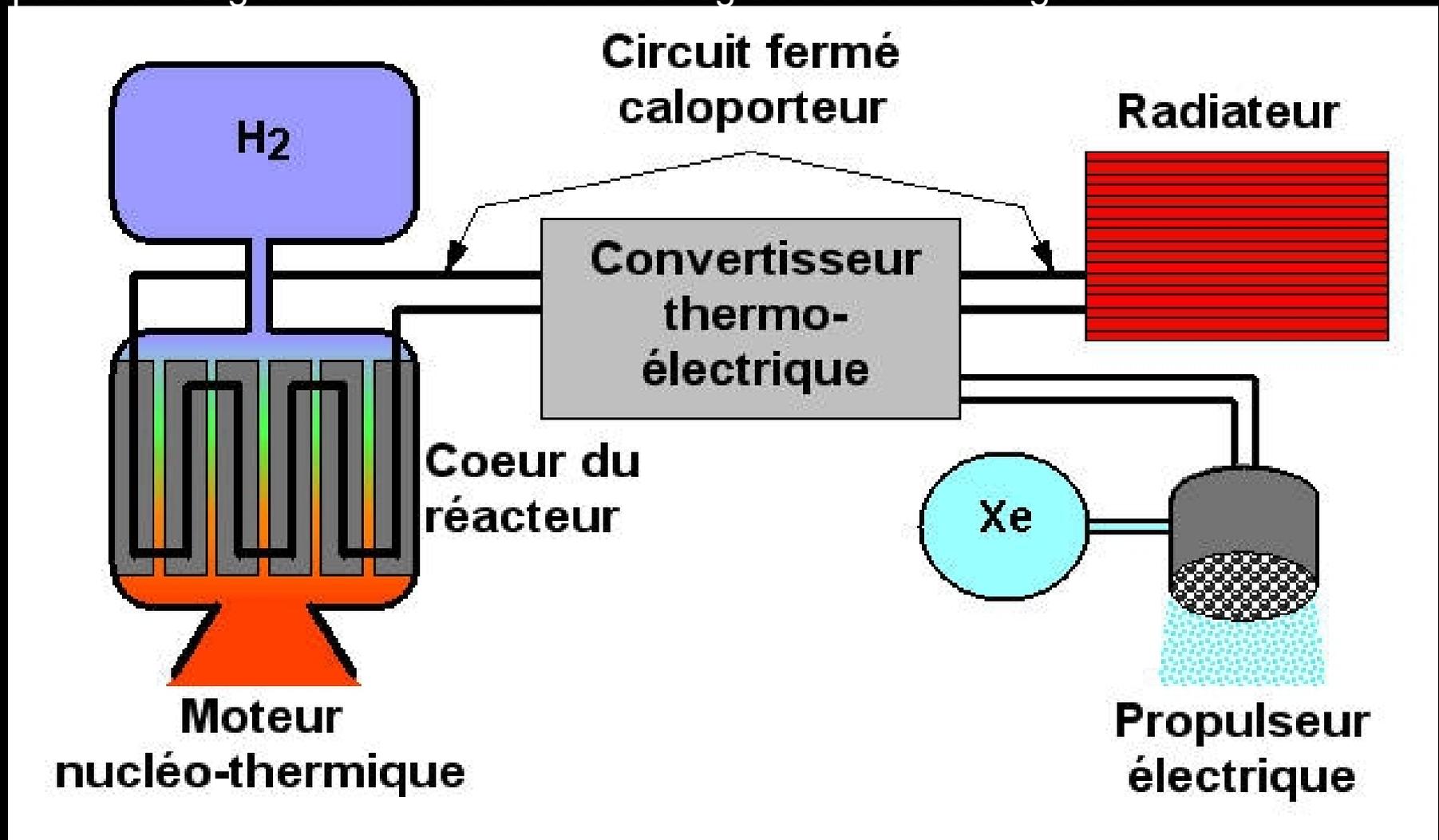
- Dans les systèmes de propulsion nucléaire électrique, le réacteur nucléaire peut être mobilisé pour alimenter indirectement un propulseur ionique via un convertisseur thermo-électrique.



- Ci-contre, une pastille de $^{238}\text{PuO}_2$ telle qu'utilisée dans les générateurs RTG des sonde Cassini et Galileo. Le rougeoiement est lié à la désintégration radioactive Alpha. La puissance initiale est de 62 watts. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les technologies de propulsion spatiale en développement ou en projet

- Un système de propulsion bimodale alliant système de propulsion thermique nucléaire (NTP) et système de propulsion électrique nucléaire (NEP) apparaît intéressant car il permet les fortes poussées requises dans les régions de relativement forte gravité et l'impulsion spécifique élevée pour capitaliser des grandes vitesses dans les régions dénuées de gravité.

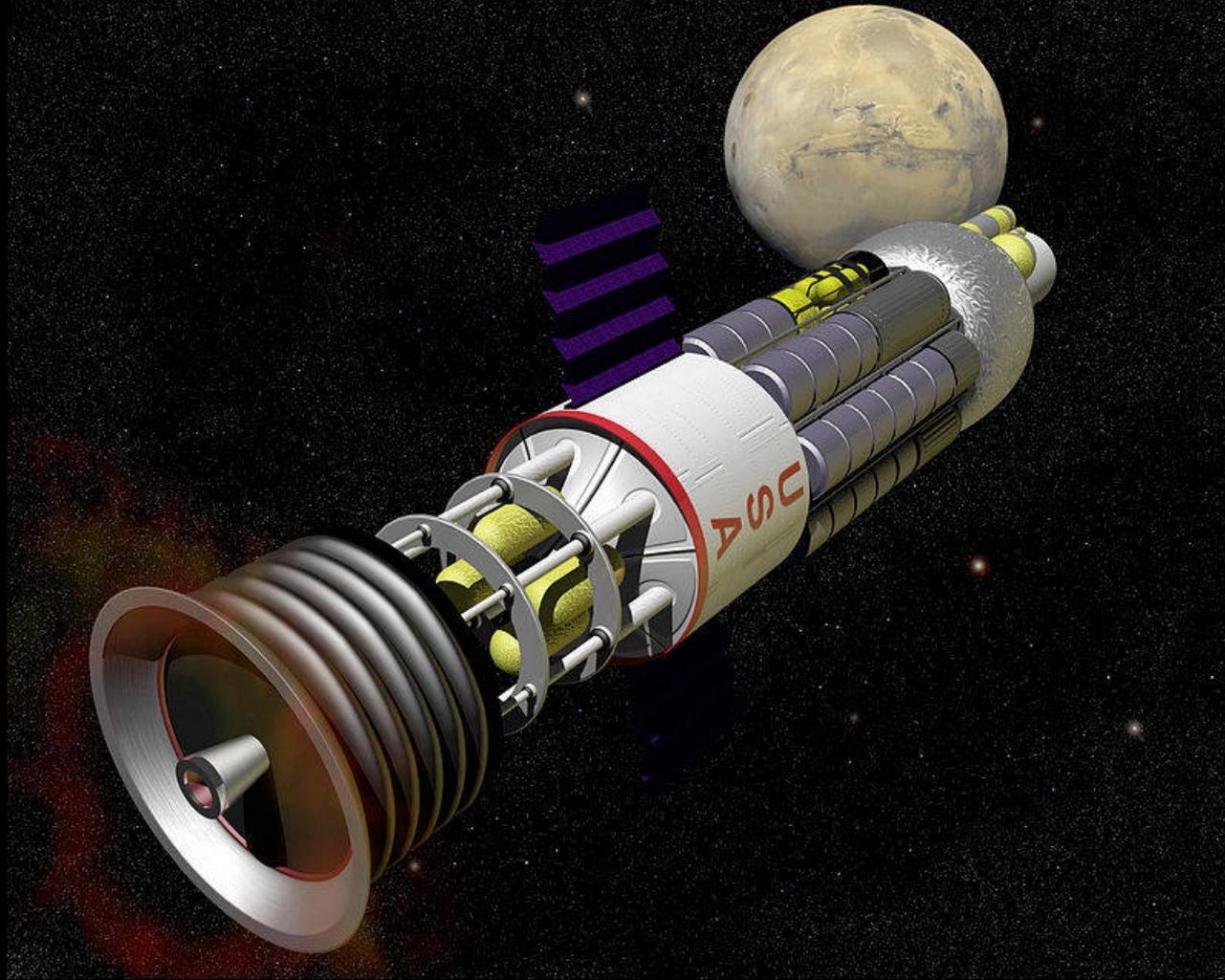


- Ci-dessus, un système de propulsion combinant NTP et NEP et mobilisant les molécules d'hydrogène pour la propulsion thermique et le xénon pour la propulsion électrique de type propulsion ionique. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les concepts futuristes

Les concepts futuristes

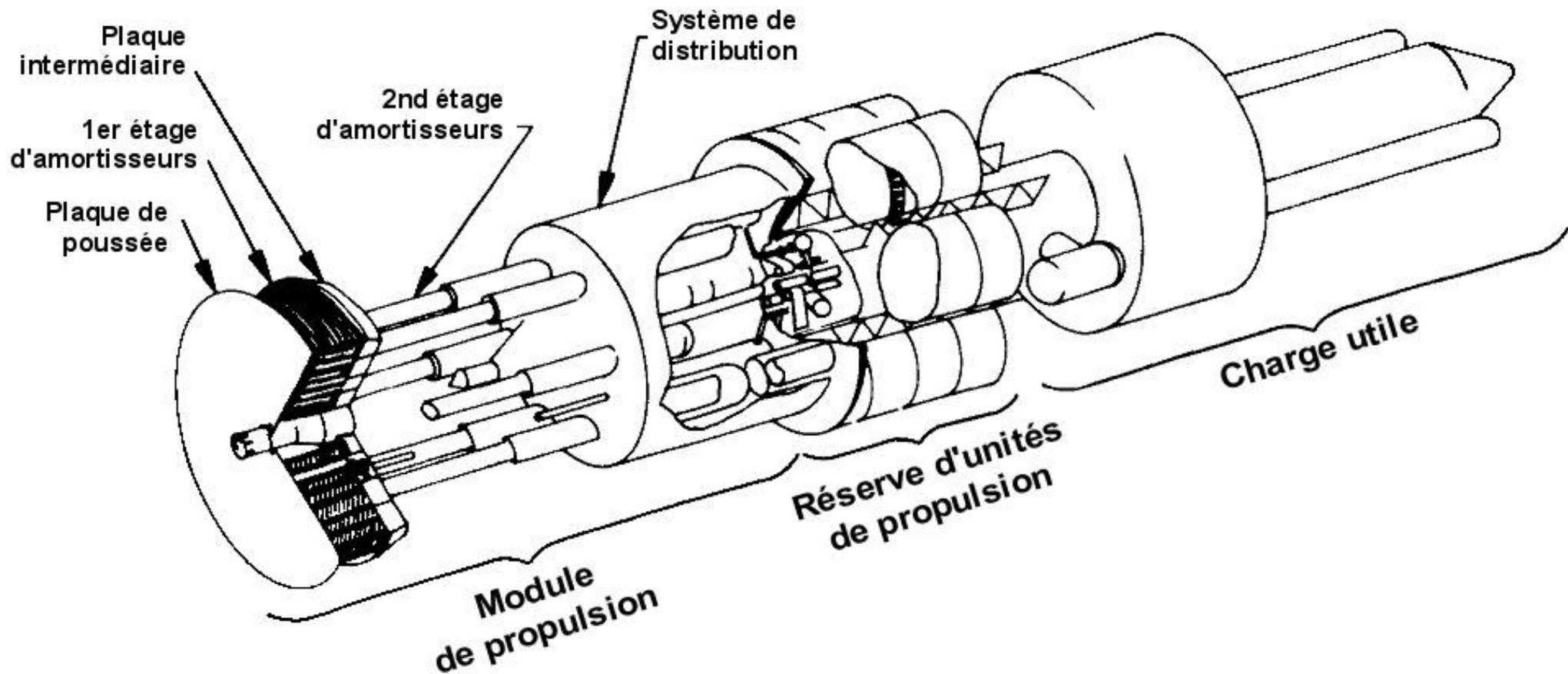
- Des concepts de propulsion spatiale ambitieux ou novateurs ont été imaginés pour l'exploration du Système Solaire Externe ou des systèmes stellaires voisins.
- L'on peut citer tout d'abord la propulsion nucléaire pulsée.
- Le projet Orion (1950-1963) consistait à déclencher des explosions nucléaires répétées pour générer une poussée et permettre une augmentation régulière de la vitesse de l'engin spatial.



- Ci-contre, une représentation artistique d'un système de propulsion spatiale pulsée par fission nucléaire de type vaisseau Orion. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

Les concepts futuristes

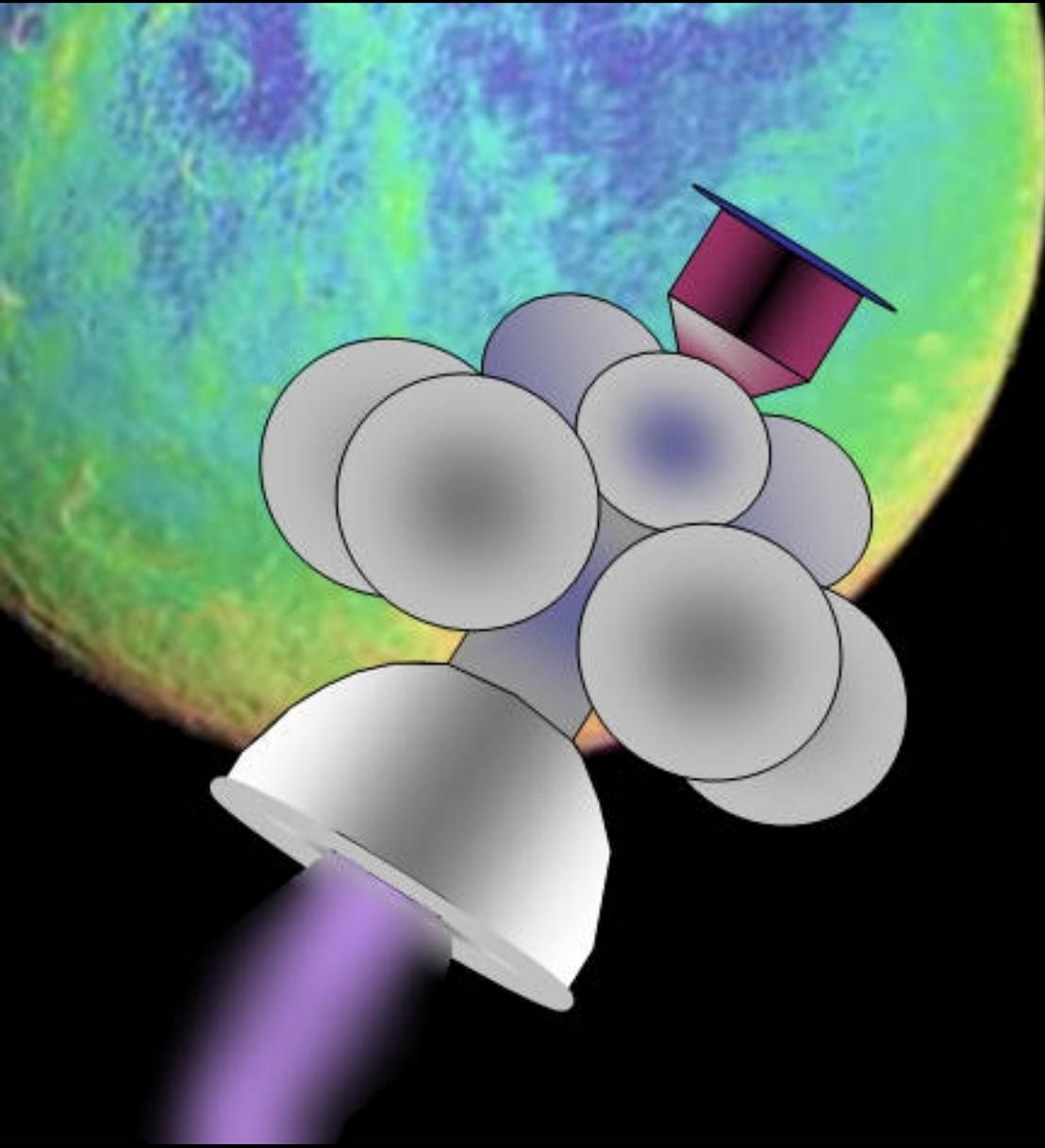
- Le projet Orion envisageait l'explosion de charges à fission à environ 60 mètres de l'arrière du véhicule pour entraîner un souffle sur la plaque de poussée à base d'acier et d'aluminium.



- Ci-dessus, le schéma de conception globale du véhicule Orion. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les concepts futuristes

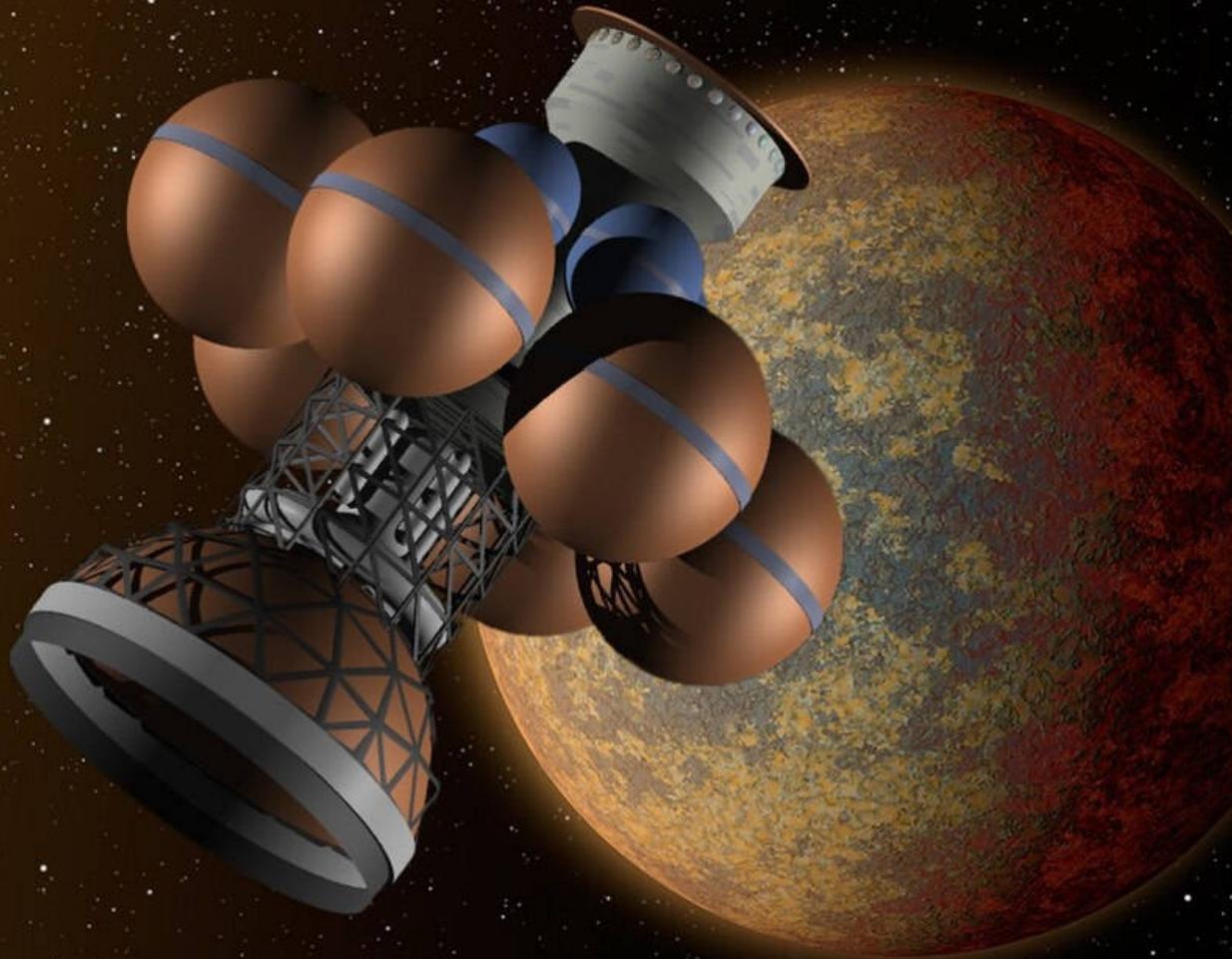
- Le projet Daedalus proposé par la British Interplanetary Society et développé de 1973 à 1978 visait la conception d'une sonde interstellaire pouvant atteindre l'Etoile de Barnard dans l'intervalle d'une vie humaine.



- Ci-contre, représentation artistique du vaisseau du projet Daedalus. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les concepts futuristes

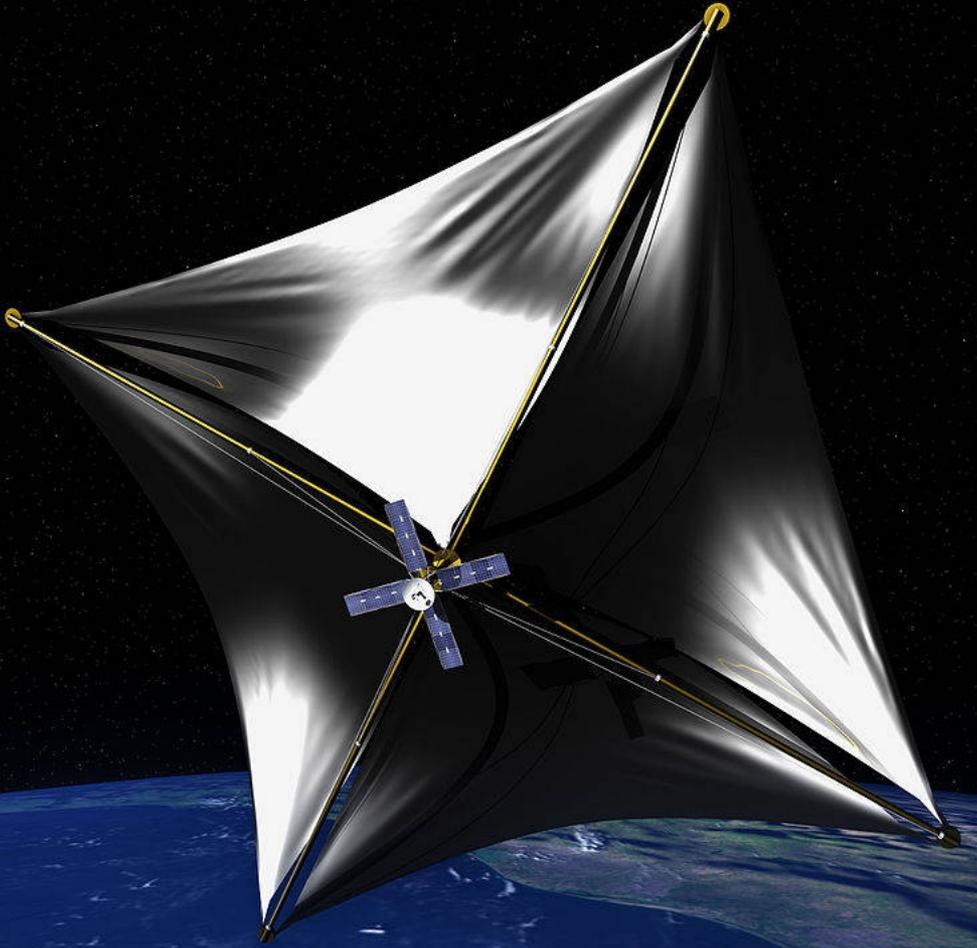
- La propulsion du vaisseau du projet Daedalus était basée sur une propulsion thermonucléaire pulsée mobilisant des pastilles de mélange deutérium/hélium 3 portées à fusion par confinement inertiel à base de faisceaux d'électrons.
- Une fréquence de tir de 250 pastilles par seconde était programmée et le plasma qui découle du processus aurait été canalisé vers une tuyère magnétique.



- Ci-contre, représentation artistique 3D de l'engin spatial Daedalus. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les concepts futuristes

- Le projet Breakthrough Starshot lancé en 2016 par l'Université de Stanford vise le développement de sondes capables d'atteindre le système Alpha Centauri en quelques décennies grâce à la force de lasers.
- L'idée est de développer des sondes ultra-légères munies de voiles solaires vers lesquelles seront dirigés des lasers envoyés depuis la Terre ou l'espace.



- Ci-contre, représentation artistique d'une sonde spatiale comprenant une voile solaire propulsant le système sous l'effet du vent solaire. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#). **Crédit de l'image d'origine:** [Kevin Gill](#).

Les concepts futuristes

- Les sondes spatiales du projet Breakthrough Starshot dont la masse serait de l'ordre du gramme comprendraient une voile solaire d'environ 4 m² ayant également une masse de l'ordre du gramme.
- L'émetteur laser aurait une puissance de l'ordre de 100 GW et l'impulsion laser durerait environ 10 minutes pour capitaliser une vitesse autour de 20% de la vitesse de la lumière.



- Ci-contre, photo du ciel nocturne avec les étoiles du système Alpha du Centaure, Alpha Centauri à gauche, Beta Centauri à droite et l'étoile Proxima Centauri dans le cercle rouge. [Source de l'image d'origine: Wikipedia.](#)

Les limites

Les limites

- La téléportation n'existe pas et la limite de vitesse possible est celle correspondant à la vitesse de la lumière c'est-à-dire la vitesse des photons ou des ondes électromagnétiques dans le vide spatial.
- La technologie du projet Breakthrough Starshot rend possible l'accélération de la sonde via des lasers mais il faut aussi pouvoir faire décélérer la sonde spatiale au niveau du point de destination ou de survol.
- Dans la technologie du projet Breakthrough Starshot, l'albédo de la voile solaire doit être le plus élevé possible car la puissance du laser est de nature à dégrader ou détruire la cible du fait des températures atteintes au point d'impact.



- Ci-contre, Albert Einstein en 1896. Il aura montré que la vitesse de la lumière représente la vitesse limite et donc qu'aucun objet ne peut dépasser la vitesse de la lumière. **Source de l'image d'origine:** [Wikipedia](#).

Conclusion

Conclusion

- La civilisation moderne est parvenue à développer les technologies qui nous permettent de nous arracher à la gravité terrestre et d'explorer d'autres planètes en atteignant des vitesses considérables.
- Il est dit que si la gravité de la Terre avait été seulement 10% plus élevée, nous n'aurions pas pu nous arracher à la gravité terrestre pour atteindre d'autres destinations planétaires sur la base de la technologie de la propulsion chimique.
- La technologie de la propulsion ionique en développement est prometteuse pour l'exploration planétaire.
- Les technologies de propulsion nucléaire offrent un potentiel certain pour le voyage interplanétaire voire interstellaire mais il faudra probablement envisager leur développement sur des plateformes orbitales ou sur la Lune du fait des dangers inhérents à l'énergie atomique.
- Les technologies de propulsion spatiale via la force des lasers, du rayonnement solaire ou du vent solaire offrent également un potentiel intéressant à moyen ou long terme.
- Il semble évident que le potentiel en matière de propulsion spatiale est très loin d'avoir été pleinement exploité !

Crédit

- Exposé réalisé et présenté par Marc Lafferre le vendredi 19 avril 2024 au Gapra à l'école Guillaume Musso de Juan-Les-Pins.