

# [ RECHERCHE ]

Groupe d'Études Scientifiques et Techniques

## PROPULSION ÉLECTRIQUE ET NUCLÉAIRE SPATIALE



Par Victoire Leglaive

Sous la supervision d'Antoine Hallez, chef du projet Espace du Groupe d'études scientifiques et techniques

# À PROPOS DE LA RECHERCHE

Cet article est publié par le Groupe d'études scientifiques et techniques des Jeunes de l'IHEDN. Créé début 2025, il vise à fédérer et développer les activités scientifiques et techniques de l'association. L'objectif est de rendre accessible à un public intéressé les enjeux technologiques du milieu de la défense.

Les enjeux de la propulsion dans l'espace deviennent de plus en plus importants à mesure que les ambitions d'exploration interplanétaire se précisent et que la multiplication des satellites nécessite des systèmes de propulsion plus efficaces, durables et compacts. Qu'il s'agisse d'envoyer des sondes au-delà de Mars ou de maintenir une constellation en orbite, les technologies de propulsion jouent un rôle stratégique pour l'autonomie et la performance des missions spatiales. Afin de mieux comprendre les systèmes propulsifs utilisés aujourd'hui et ceux envisagés pour demain, cette publication a pour but de vulgariser les grands principes de la propulsion spatiale. Nous cherchons ici à expliquer en détail les concepts physiques et les missions associées à la propulsion électrique et à la propulsion nucléaire.

# À PROPOS DES AUTEURS



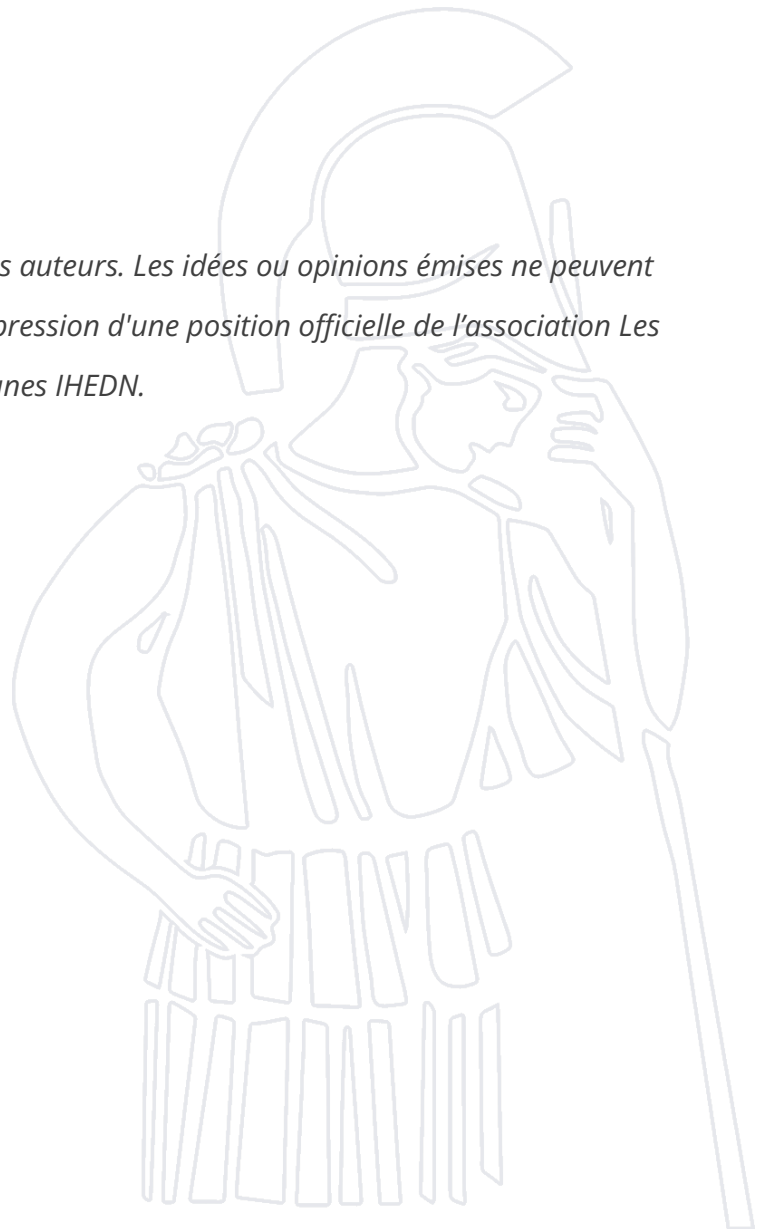
**Victoire Leglaive** est étudiante ingénieure à l'IMT Mines Albi. Elle va réaliser un double diplôme à Cranfield University pour se spécialiser en propulsion spatiale.



**Antoine Hallez** est étudiant ingénieur à l'ISAE-SUPAERO, spécialisé en observation de la Terre et en conception-opérations des systèmes spatiaux. Il a aussi réalisé un double-diplôme à Sciences Po Paris.



*Ce texte n'engage que la responsabilité des auteurs. Les idées ou opinions émises ne peuvent en aucun cas être considérées comme l'expression d'une position officielle de l'association Les Jeunes IHEDN.*



Parmi les solutions envisagées pour améliorer l'efficacité et la portée des missions spatiales, **la propulsion nucléaire** apparaît comme une technologie prometteuse. Exploitant la chaleur générée par une réaction nucléaire pour accélérer un fluide propulsif, ce type de propulsion offre une poussée plus importante et une meilleure efficacité énergétique que les moteurs chimiques conventionnels. L'avantage majeur des moteurs nucléaires est qu'ils pourraient réduire significativement la durée des voyages interplanétaires, facilitant ainsi des missions habitées vers Mars et au-delà. Toutefois, leur développement pose des défis techniques et réglementaires liés à la sûreté et à la gestion des matériaux radioactifs.

Parallèlement, **la propulsion électrique** spatiale s'est imposée comme une alternative performante pour les missions de longue durée et le maintien en orbite des satellites. La propulsion électrique optimise la consommation de carburant, offrant ainsi un atout majeur pour les missions scientifiques et commerciales. Toutefois, sa faible poussée limite son utilisation aux missions longues durées non habitées, ce qui en fait une solution complémentaire plutôt qu'un remplaçant des autres modes de propulsion.

Enfin, avant de rentrer dans le vif du sujet, il est important de définir un concept fondamental lorsqu'on compare différents systèmes de propulsion : **l'impulsion spécifique**. Il s'agit d'une mesure de l'efficacité avec laquelle un moteur utilise son carburant — une analogie possible serait les « kilomètres par litre d'essence consommée » pour une voiture. Plus l'impulsion spécifique est élevée, plus le moteur produit de poussée par unité de propergol - carburant spatial - consommée, ce qui est essentiel pour les missions spatiales de longue durée.

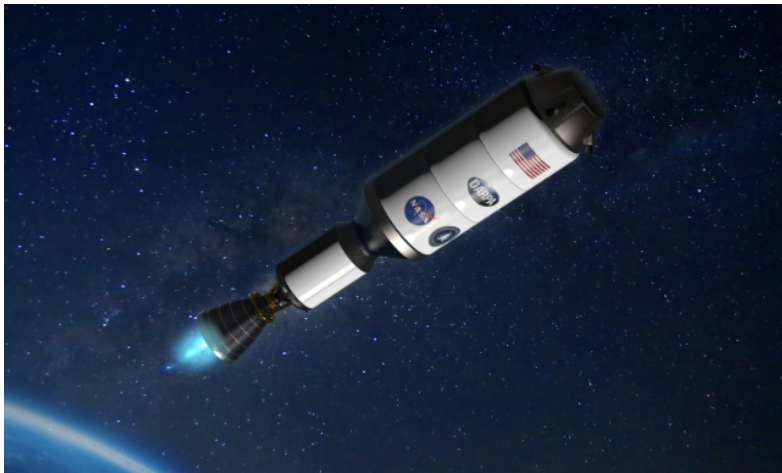
## Propulsion nucléaire spatiale

### Propulsion nucléaire thermique

La propulsion nucléaire thermique (NTP) a été développée en premier lieu au cours des années 1950 et 1960 dans le cadre de la recherche spatiale menée par la NASA et l'armée américaine. Son ancêtre, le *Gas-Turbine Reactor* (GTR), fonctionnait sur le principe d'un moteur hybride avec une turbine à gaz et un réacteur nucléaire, mais les coûts et la difficulté technique ont mis fin au projet.

L'objectif initial de la NTP était de créer une technologie permettant d'envoyer des humains et du matériel sur des missions interplanétaires, en particulier vers Mars. Le

**programme NERVA<sup>1</sup>** (*Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application*), lancé par la NASA dans les années 1960, fut le plus célèbre des projets NTP. Ce programme a conduit au développement de moteurs nucléaires thermiques capables d'atteindre des impulsions spécifiques beaucoup plus élevées que celles des moteurs chimiques : **800-1000 s contre 250-450 s**. Cependant, après de nombreuses années de tests réussis au sol, le programme a été annulé en 1972, en raison de la réduction des budgets et des priorités changeantes dans la politique spatiale. Malgré cela, les recherches sur la propulsion nucléaire thermique sont toujours considérées comme une avenue prometteuse pour les missions spatiales futures. Notamment, en 2027 la NASA, en partenariat avec la DARPA, devrait tester le premier moteur nucléaire : DRACO.



Vue d'artiste du projet Draco

## Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la propulsion nucléaire thermique repose sur l'utilisation de l'énergie thermique générée par un réacteur nucléaire pour chauffer un fluide, généralement de l'hydrogène. Ce fluide, en étant chauffé, se dilate puis accélère dans une tuyère ce qui lui permet d'être éjecté à grande vitesse à travers une buse pour générer une poussée. La chaleur nécessaire à ce processus provient de la fission nucléaire, qui se produit à l'intérieur du réacteur. Contrairement aux moteurs chimiques, qui brûlent un carburant et un oxydant pour produire une réaction chimique, la propulsion nucléaire thermique utilise l'énergie produite par la fission des noyaux atomiques, une source d'énergie beaucoup plus dense et plus efficace.

<sup>1</sup> TAUB, J.M. « A Review of Fuel Element Development for Nuclear Rocket Engines ». *Los Alamos Scientific Laboratory*, 1975.

Le réacteur nucléaire produit de la chaleur via la fission des noyaux d'atomes, souvent de l'uranium ou du plutonium, et cette chaleur est transférée à un échangeur de chaleur qui chauffe le fluide de travail. Une fois chauffé, le fluide est expulsé à haute vitesse, générant une poussée via la conservation de la quantité de mouvement (3<sup>e</sup> loi de Newton).

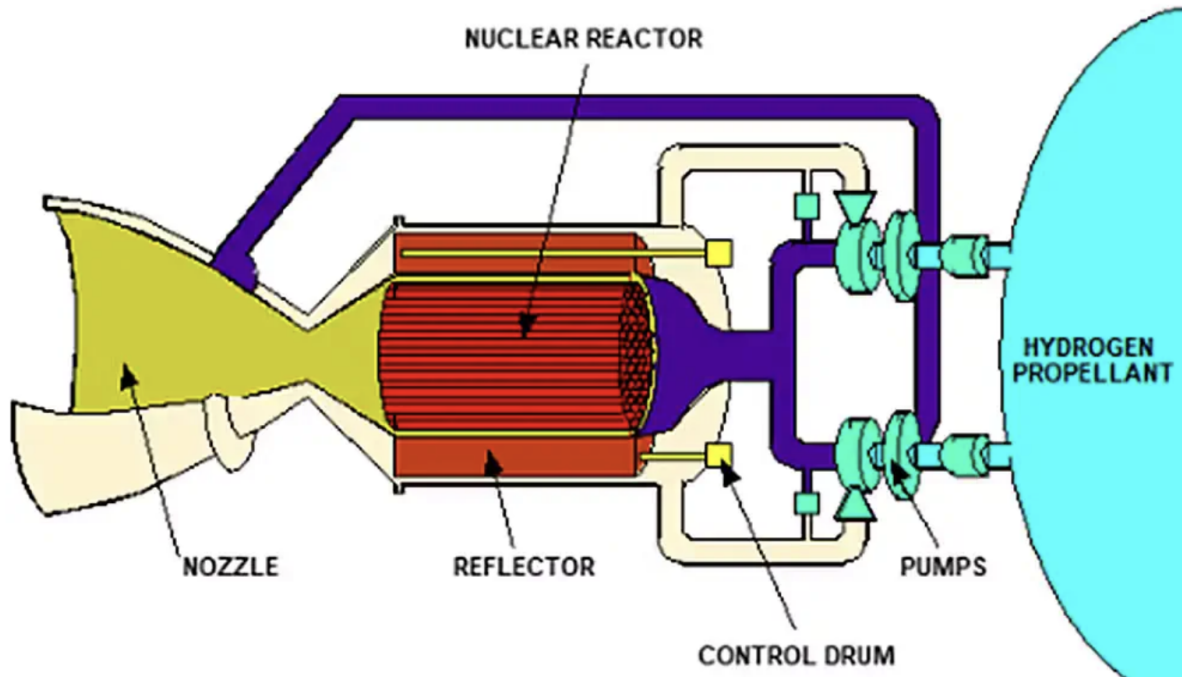


Schéma d'un propulseur NTP<sup>2</sup>

## Avantages et inconvénients

### Avantages :

- Haute impulsion spécifique : Le NTP offre une impulsion spécifique nettement plus élevée que les moteurs chimiques, ce qui permet de réduire la durée des voyages interplanétaires : 800-1000s contre 250-450s ;
- Autonomie et efficacité : Grâce à l'utilisation de l'énergie nucléaire, le NTP est capable de fournir une puissance constante pendant de longues périodes sans la nécessité de réapprovisionner en carburant ;

<sup>2</sup> KOTLYAR, D. « Propulsion nucléaire : le nouveau défi des ingénieurs pour atteindre Mars », *Energine* [en ligne], 11 octobre 2024. Disponible sur : <https://www.energine.com/propulsion-nucleaire-le-nouveau-defi-des-ingenieurs-pour-atteindre-mars/147009-2024-10>.

- Système mature : Le programme NERVA a montré que la technologie était réalisable, avec de nombreux tests au sol réussis, ce qui rend cette solution relativement proche d'une application opérationnelle.

#### Inconvénients :

- Complexité de gestion : Les réacteurs nucléaires présentent une grande complexité en termes de gestion thermique et de sécurité. Leur conception pour une utilisation dans l'espace nécessite des avancées technologiques significatives ;
- Coût élevé : Le développement, la mise en œuvre et la maintenance des réacteurs nucléaires représentent un coût élevé, ce qui limite leur adoption à grande échelle ;
- Problèmes de sécurité et de déchets nucléaires : L'utilisation de réacteurs nucléaires dans l'espace pose des risques de sécurité associés aux matériaux radioactifs et aux déchets nucléaires, en particulier en cas d'échec du lancement.

## Propulsion nucléaire électrique

La propulsion électrique nucléaire (NEP) est une technologie qui combine **l'énergie nucléaire pour alimenter un moteur électrique** permettant de propulser un satellite ou une sonde dans l'espace. L'idée de la NEP a émergé dans les années 1960 en tant qu'évolution des systèmes de propulsion électrique, qui utilisent traditionnellement des batteries ou des panneaux solaires pour alimenter des moteurs à ions. La NEP repose sur l'utilisation d'un réacteur nucléaire pour fournir une source d'énergie stable et dense pour ces moteurs électriques. Contrairement aux moteurs chimiques, la propulsion électrique nucléaire peut produire des impulsions spécifiques beaucoup plus élevées, permettant de réaliser des missions spatiales de longue durée avec des économies substantielles en carburant. Bien que des projets tels que le programme *Kilopower* (NASA) aient démontré des réacteurs nucléaires de faible puissance dans l'espace, la NEP reste une technologie en développement, nécessitant encore de nombreuses avancées avant de pouvoir être pleinement déployée dans des missions interplanétaires.

## Principe de fonctionnement

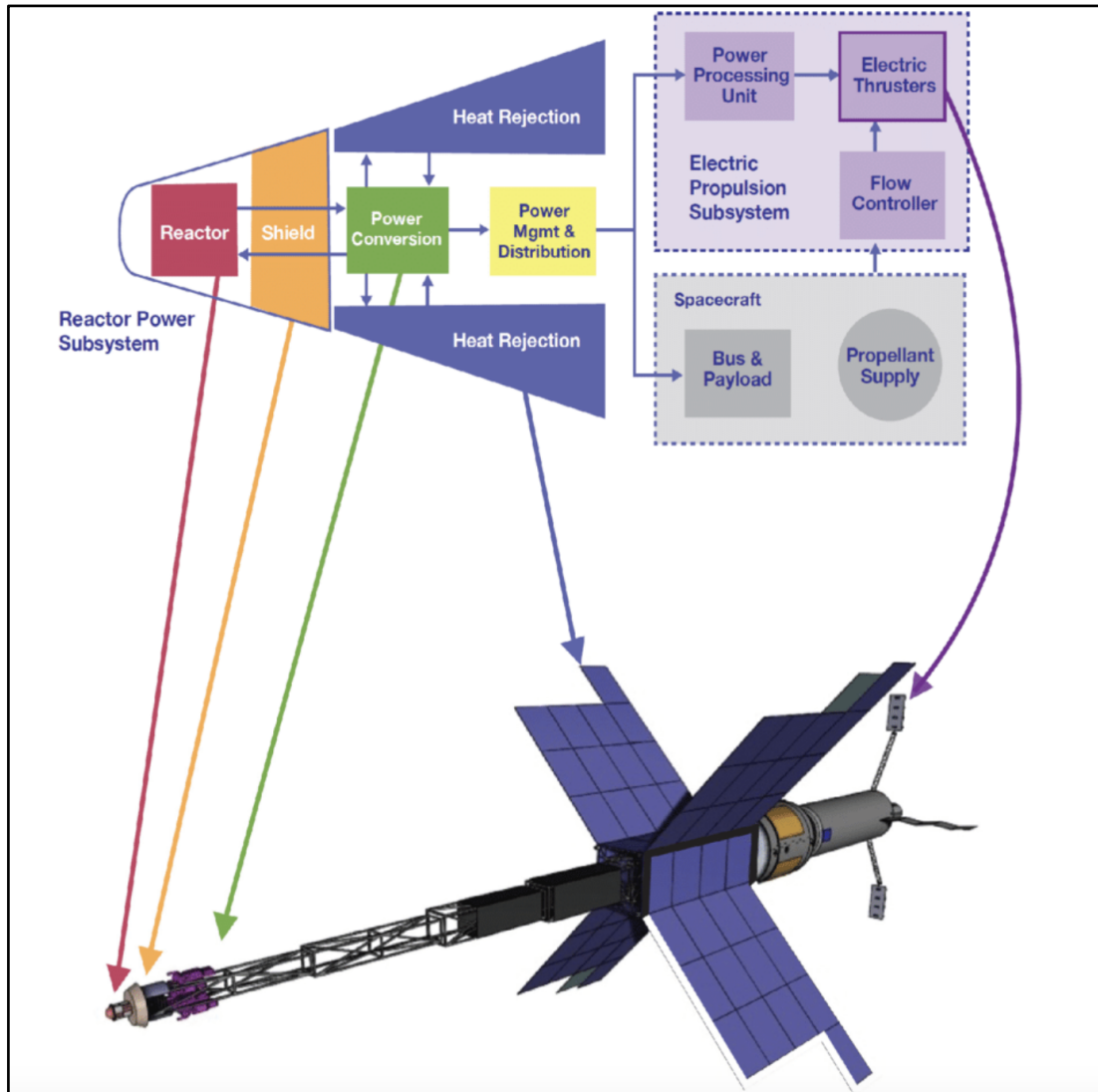


Schéma du fonctionnement d'un propulseur électrique nucléaire

La propulsion électrique nucléaire<sup>3</sup> (NEP) fonctionne en couplant un réacteur nucléaire avec un moteur électrique, généralement un moteur à ions - petites particules- ou un propulseur à plasma. Le réacteur nucléaire génère de l'électricité à travers la fission nucléaire, qui est ensuite utilisée pour ioniser un gaz (souvent du xénon) et accélérer ces ions à des vitesses très élevées à l'aide de champs électriques. Ces ions sont ensuite expulsés à grande vitesse par une buse, générant une poussée en vertu de la troisième

<sup>3</sup> BUDEN, David *Space Nuclear Fission Electric Power Systems: Book 3: Space Nuclear Propulsion and Power*. 2011.

loi de Newton (action et réaction). L'utilisation de l'énergie nucléaire permet à la NEP de fournir une puissance continue sur de longues périodes, ce qui est essentiel pour les missions d'exploration lointaine, notamment vers Mars ou les astéroïdes.

## Avantages et inconvénients

### Avantages :

- Impulsion spécifique élevée : Comme les autres systèmes de propulsion électrique, la NEP peut atteindre des impulsions spécifiques très élevées, permettant des missions longues avec une faible consommation de carburant : **10000-20000s contre 2000-8000s pour de la propulsion électrique normale** ;
- Efficacité énergétique : La NEP permet d'exploiter l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité, offrant ainsi une autonomie prolongée et une performance énergétique accrue pour des missions de plusieurs années ;
- Capacité à fonctionner sur de longues distances : La propulsion nucléaire permet de maintenir un fonctionnement sur de longues périodes, ce qui est essentiel pour les missions interplanétaires et interstellaires.

### Inconvénients :

- Coût élevé et complexité : Le développement et le lancement de réacteurs nucléaires dans l'espace nécessitent des coûts significatifs, et la technologie reste complexe à mettre en œuvre ;
- Problèmes de sécurité : L'utilisation de réacteurs nucléaires en environnement spatial présente des défis liés à la sûreté nucléaire, notamment en cas d'échec du lancement ou de débris spatiaux ;
- Défis techniques : La technologie des moteurs à ion et à plasma nécessite des améliorations pour rendre leurs performances compatibles avec les besoins d'une propulsion nucléaire à grande échelle, notamment en termes de durabilité et de gestion thermique.

## Propulsion électrique spatiale

### Propulsion électrique avec effet Hall

La propulsion électrique avec effet Hall<sup>4</sup> (HET) est une technologie **de propulsion ionique** qui a été développée dans les années 1960 et 1970, principalement par l'Union Soviétique et les États-Unis. L'effet Hall, qui est à la base de cette technologie, a été découvert dans les années 1870 par le physicien américain Edwin Hall, mais ce n'est que dans les années 1970 que les chercheurs ont commencé à appliquer ce phénomène pour l'ionisation des gaz et leur accélération dans le but de créer de la poussée pour des vaisseaux spatiaux. La technologie HET a été adoptée dans les années 2000 pour des missions spatiales, en particulier pour des applications telles que les manœuvres de stationnement, les changements d'orbite et le contrôle de la position des satellites. Elle est aujourd'hui l'une des technologies de propulsion électrique les plus utilisées dans l'industrie spatiale, en raison de son efficacité et de sa fiabilité prouvée dans des conditions de vol.

#### **Principe de fonctionnement**

Le principe de la propulsion à effet Hall repose sur l'utilisation de l'effet Hall pour ioniser un gaz de propulseur (généralement du xénon car c'est un gaz stable) et l'accélérer à grande vitesse afin de produire de la poussée. Le moteur HET est composé de plusieurs composants clés : une anode, une cathode, un champ magnétique et un gaz propulseur. Le fonctionnement débute lorsque du gaz est injecté dans une chambre de combustion, où il est ionisé grâce à un champ électrique généré par l'anode et la cathode. Un champ magnétique, créé par des bobines magnétiques autour de la chambre de combustion, permet de confiner les électrons par effet Hall et de les empêcher de s'échapper du système. Ce phénomène crée un plasma dense où les ions de xénon sont accélérés par le champ électrique.

Les ions ainsi générés sont ensuite dirigés vers la sortie du moteur, où ils sont accélérés à des vitesses très élevées par un champ électrique supplémentaire, ce qui génère une poussée. Cette poussée, bien que faible, est continue et peut être maintenue pendant de longues périodes, ce qui est idéal pour des missions spatiales à long terme. L'efficacité du

---

<sup>4</sup> Boniface, Claude. « Modélisation et diagnostic d'un propulseur à effet Hall pour satellites ». *Archives-ouvertes*, 19 juillet 2007.

moteur HET repose sur sa capacité à ioniser efficacement le gaz de propulseur et à accélérer les ions à des vitesses élevées tout en minimisant la consommation d'énergie.

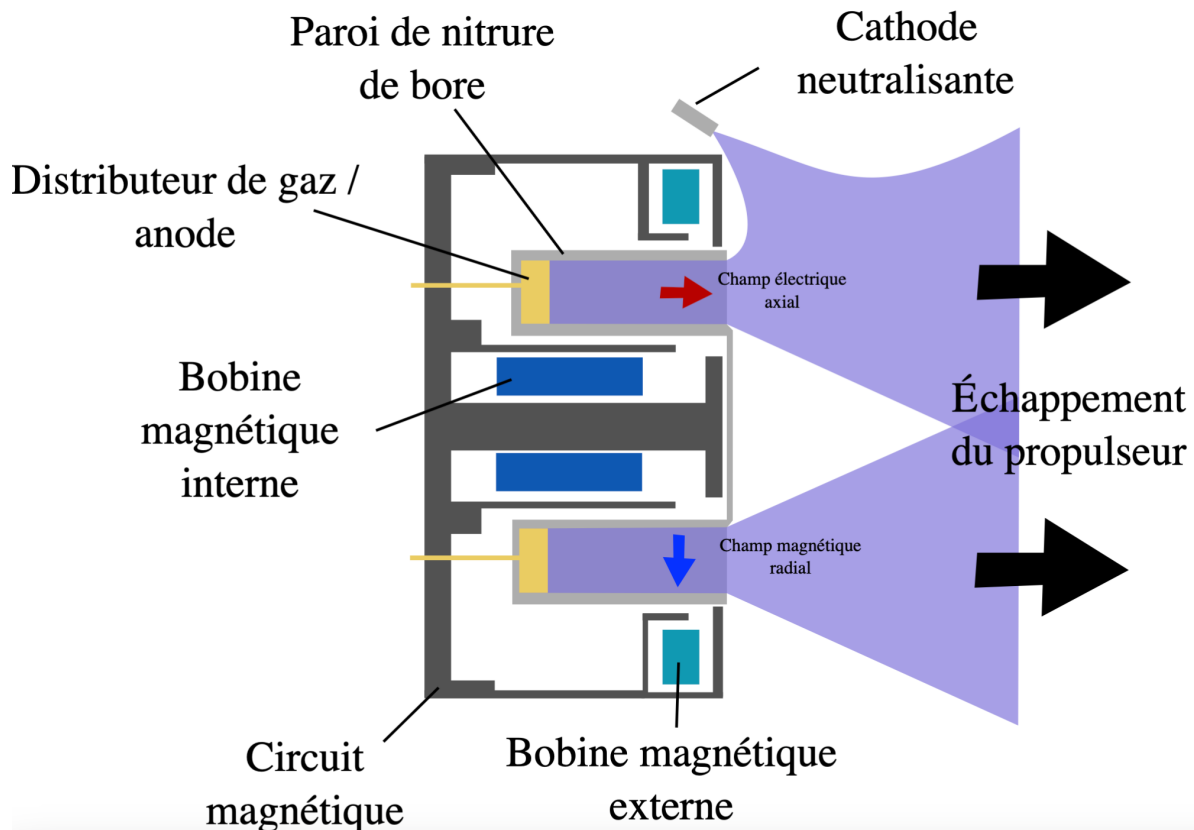


Schéma de fonctionnement d'un propulseur HET

### Avantages et inconvénients

#### Avantages :

- Haute impulsion spécifique : Les moteurs à effet Hall offrent une impulsion spécifique élevée, bien plus grande que celle des moteurs chimiques : **entre 1000s et 2500s** ;
- Efficacité énergétique : Les HET sont extrêmement efficaces en termes d'utilisation de l'énergie, ce qui permet une gestion optimale de la consommation de carburant sur des périodes prolongées ;
- Système compact et robuste : Le HET est relativement léger et compact, ce qui le rend **adapté à une large gamme de missions**, y compris celles nécessitant des ajustements de position ou des corrections de trajectoire ;

- Maturité technologique : Le HET est une technologie déjà largement testée et éprouvée, avec de nombreuses missions spatiales réussies utilisant cette propulsion pour le contrôle de position de satellites.

### **Inconvénients :**

- Poussée faible : Bien que l'impulsion spécifique soit élevée, la poussée générée par les HET est relativement faible comparée aux moteurs chimiques ;
- Dépendance au carburant : Les moteurs à effet Hall dépendent d'un gaz propulseur, qui est coûteux et difficile à stocker. Les missions nécessitant une grande quantité de carburant peuvent rencontrer des limitations logistiques ;
- Complexité technique : Bien que relativement mature, la technologie HET reste complexe en raison de la gestion du plasma, des champs magnétiques et de l'électronique de commande, ce qui ajoute des coûts et des défis techniques.

## **Propulsion électrique par grill d'ions**

La propulsion électrique par grill d'ions est une technologie qui a été développée dans les années 1960 et 1970 comme alternative aux moteurs chimiques pour les missions spatiales de longue durée. Cette technologie repose sur **l'accélération d'ions à travers un champ électrique pour générer une poussée**. Le concept de grill d'ions a émergé dans le cadre des recherches sur les moteurs à ions, qui étaient limités par la capacité à produire des accélérations suffisantes pour des missions lointaines. Cette technologie est utilisée dans plusieurs systèmes de propulsion pour des missions spatiales à faible poussée mais longue durée, et elle a été mise en œuvre avec succès dans des applications comme le contrôle de position des satellites et les missions d'exploration interplanétaires.

### **Principe de fonctionnement**

La propulsion par grill d'ions fonctionne en ionisant un gaz propulseur (généralement du xénon) et en accélérant les ions à travers une série de grilles métalliques. Le gaz ionisé est d'abord généré à l'intérieur de la chambre d'ionisation, où un champ électrique intense ionise le gaz. Ensuite, un champ électrique supplémentaire accélère les ions à travers une grille à haute tension, créant un jet d'ions à grande vitesse qui est expulsé par la buse du moteur. La poussée est générée par la réaction de cette expulsion d'ions, selon la troisième loi de Newton.

Le moteur est constitué de deux grilles métalliques avec des tensions opposées, une grille d'extraction et une grille de rétroaction. Ces grilles sont conçues pour extraire les ions du plasma et les accélérer à des vitesses très élevées, généralement entre 10 et 30 km/s. La grille d'extraction est généralement chargée positivement, tandis que la grille de rétroaction est chargée négativement, ce qui crée un champ électrique à travers lequel les ions sont attirés et accélérés. La précision et l'efficacité de cette méthode permettent de produire une impulsion spécifique élevée, ce qui est idéal pour les missions spatiales nécessitant une propulsion légère mais continue.

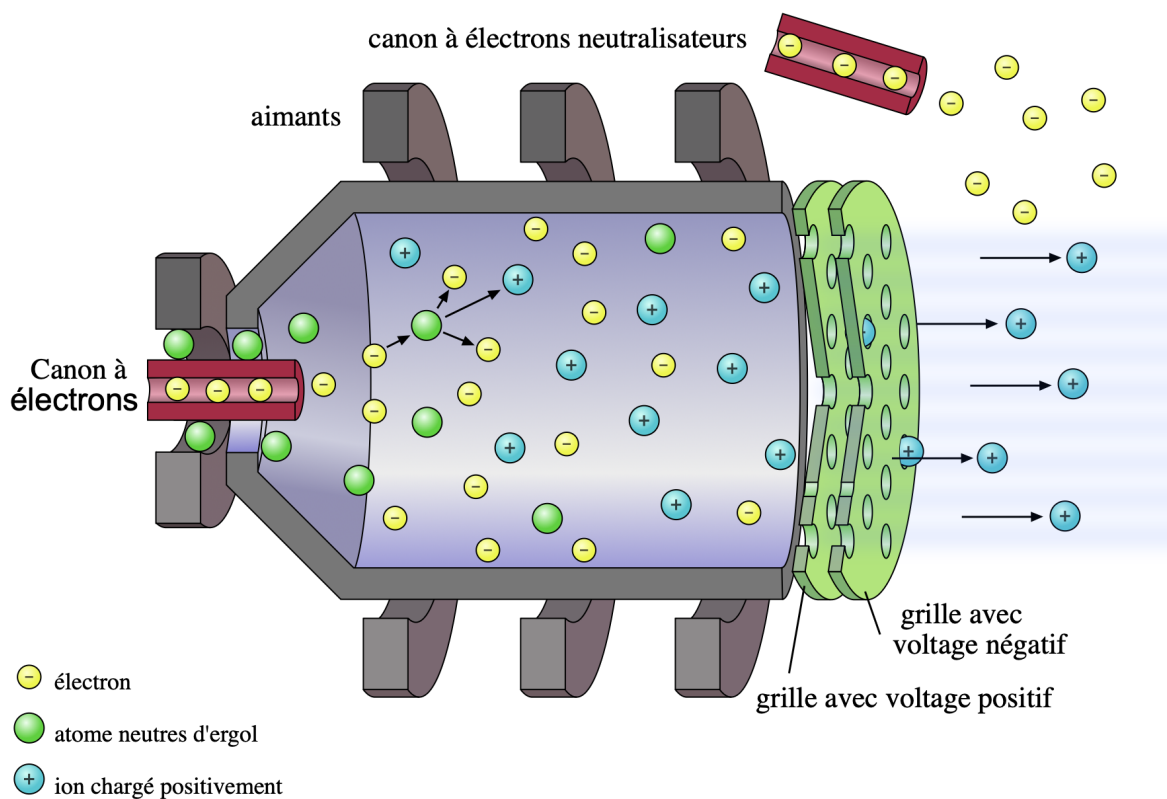


Schéma de fonctionnement d'un propulseur à grille d'ions

### Avantages et inconvénients

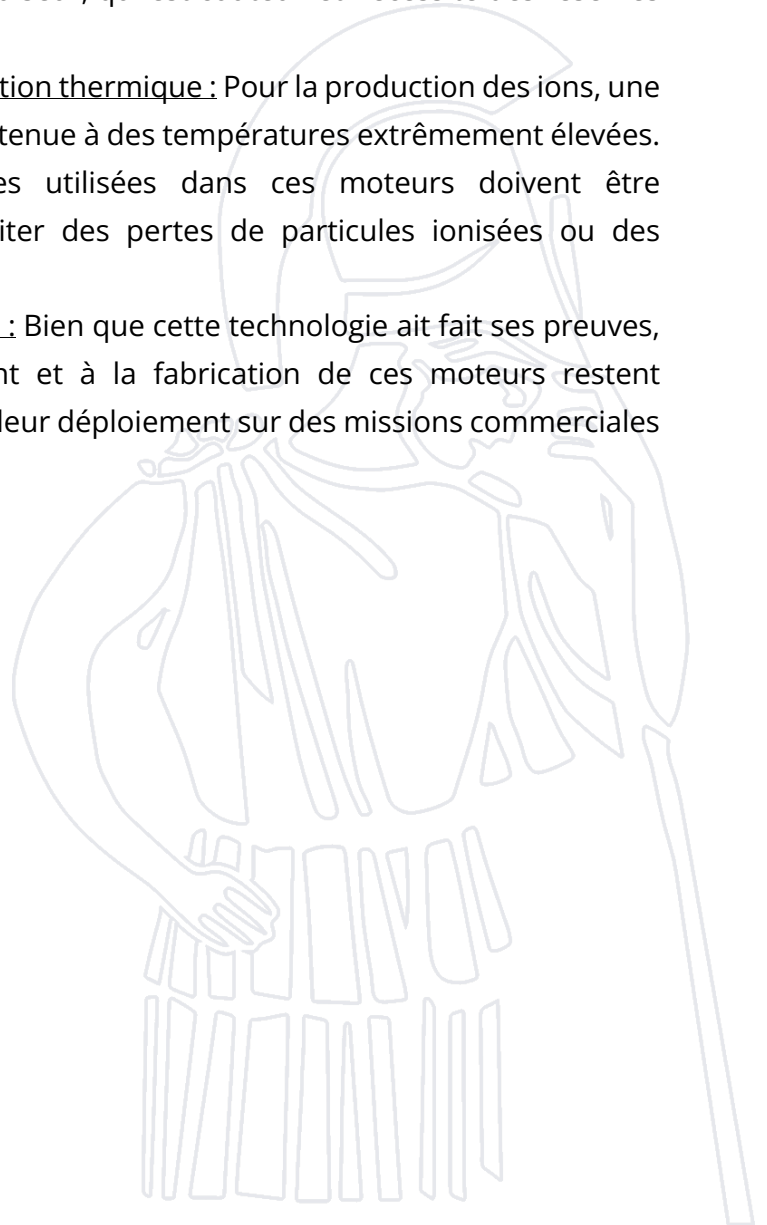
#### Avantages :

- Impulsion spécifique élevée : Le système de grille d'ions permet une impulsion spécifique beaucoup plus élevée que celle des moteurs chimiques : **entre 2000s et 8000s** ;

- Haute efficacité énergétique : La propulsion par grill d'ions est très efficace sur le plan énergétique, permettant une gestion optimale du carburant pour des missions longues ;
- Flexibilité pour les petites poussées : Les moteurs à grill d'ions sont parfaits pour des missions nécessitant de faibles poussées mais une grande autonomie, telles que le contrôle de la position des satellites.

### **Inconvénients :**

- Poussée faible : Bien que l'impulsion spécifique soit élevée, la poussée générée par les moteurs à grill d'ions est relativement faible ;
- Dépendance au carburant : Comme pour d'autres moteurs à ion, la propulsion par grill d'ions dépend d'un gaz propulseur, qui est coûteux et nécessite des réserves limitées ;
- Complexité des grilles et de la gestion thermique : Pour la production des ions, une surface métallique doit être maintenue à des températures extrêmement élevées. De plus, les grilles métalliques utilisées dans ces moteurs doivent être parfaitement intégrées pour éviter des pertes de particules ionisées ou des défaillances du système ;
- Coût et durée de développement : Bien que cette technologie ait fait ses preuves, les coûts liés au développement et à la fabrication de ces moteurs restent relativement élevés, ce qui limite leur déploiement sur des missions commerciales à grande échelle.



## Conclusion

Dans les années à venir, la propulsion électrique classique ne risque pas de disparaître. Elle continuera même sûrement à jouer un rôle central dans de nombreuses missions spatiales, notamment pour les missions orbitales ou pour des trajets interplanétaires à faible poussée. Néanmoins, **une transition progressive vers la propulsion nucléaire pourrait s'opérer**, à condition que cette technologie fasse ses preuves en matière de fiabilité et de sécurité.

Les projets en cours, portés aussi bien par des organismes gouvernementaux que par des acteurs privés, laissent entrevoir des perspectives prometteuses. Nous ne sommes pas à l'abri de voir, dans la décennie à venir, le premier système de propulsion nucléaire spatial entièrement fonctionnel.

Types de propulsion	Avantages	Inconvénients
<b>NTP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute ISP</li> <li>- Système mature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problématique de sécurité à cause du réacteur nucléaire</li> <li>- Complexité technique</li> </ul>
<b>NEP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute ISP</li> <li>- Efficacité énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Défis technique</li> <li>- Coût de R&amp;D élevé</li> </ul>
<b>Effet Hall</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute ISP</li> <li>- Système compact et robuste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poussée faible</li> <li>- Dépendance au carburant</li> </ul>
<b>Grille d'ions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute ISP</li> <li>- Haute efficacité énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poussée faible</li> <li>- Complexité des grilles et gestions thermiques</li> </ul>

Tableau de synthèse des différents types de propulsion satellitaires abordés



**LES JEUNES  
IHEDN**

[publication@jeunes-ihedn.org](mailto:publication@jeunes-ihedn.org)