ÉPREUVE ORALE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES 2026

FILIÈRE PT

DOSSIER n°01

Ce dossier comporte deux documents. Le premier document est un texte intitulé "Mettez de l'iode dans votre moteur" paru en mars 2024 dans la revue *Pour la Science*. Il est complété par un extrait de billet de blog sur la propulsion ionique partiellement reproduit de `https://couleur-science.eu/?d=1b20d2--comment-fonctionne-la-propulsion-ionique`.

Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes et qui synthétisera le contenu des documents fournis, vous chercherez à montrer comment vos connaissances en physique vous permettent de comprendre et d'expliquer les éléments présentés dans le dossier.

On veillera lorsque cela est possible à justifier les résultats numériques ou théoriques annoncés et à ne pas se contenter de répéter ou de paraphraser le texte.

A toutes fins utiles on donne les valeurs numériques suivantes :

Elément	Symbole	Numéro atomique Z	Masse atomique (u)
Hélium	He	2	4,0026
Azote	N	7	14,007
Iode	I	53	126,90
Xénon	Xe	54	131,29

et l'on rappelle que l'unité de masse atomique

$$1\,\mathrm{u} = 1,6605 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

Remarques :

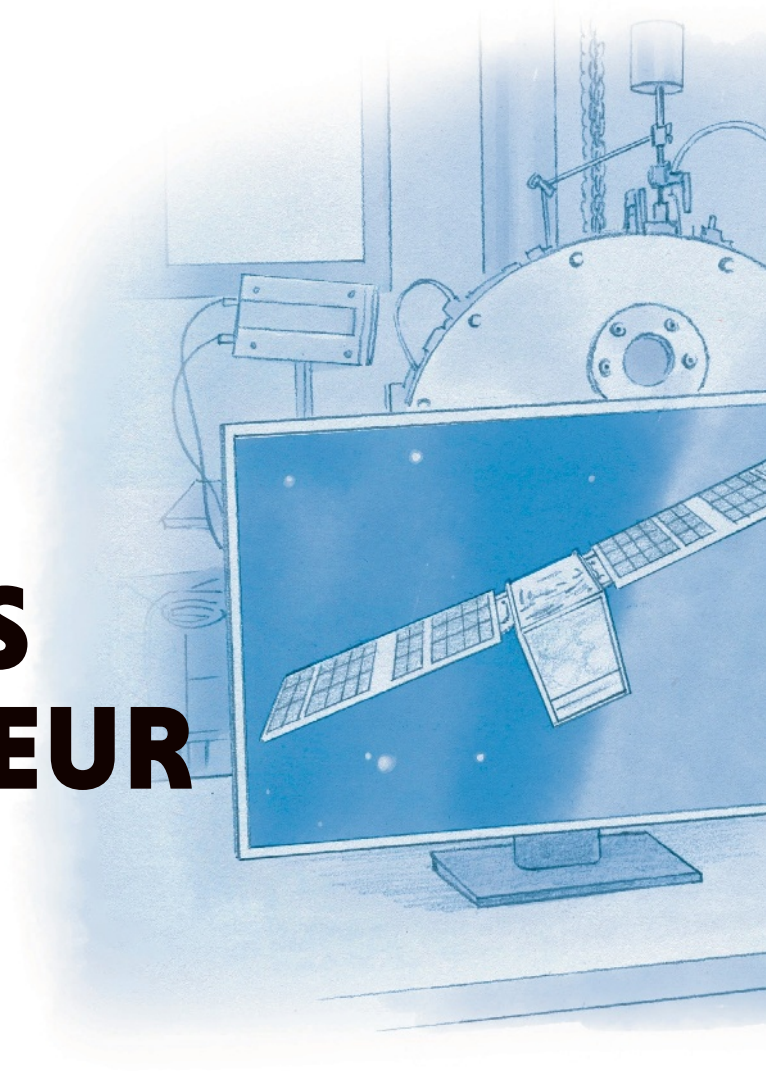
- L'usage de la calculatrice est interdit pendant la phase de préparation.
- Les textes peuvent être annotés pendant la période de préparation. Mais, à l'issue de l'épreuve, tous les documents (brouillons, transparents, et textes) doivent être impérativement remis à l'examinateur.
- Les candidates et candidats sont invités à éviter d'écrire leur présentation en tout petits caractères, peu lisibles lors de la présentation devant l'examinateur.
- Le dossier proposé est constitué de reproductions de textes ou d'extraits de textes scientifiques d'origines variées. Ces documents, comme tout document scientifique, peuvent être critiqués, voire contenir des erreurs. Si tel est le cas, cela ne doit pas gêner le/la candidat(e) au cours de sa préparation. Au contraire, il/elle pourra le mentionner au cours de l'exposé ou de la discussion avec l'examinateur.
- Si des compléments de connaissances hors du programme sont nécessaires pour la compréhension des documents à analyser, ils sont fournis dans ces documents sous forme de parties séparées ("encadrés") ou par le texte accompagnant les documents. Il n'est pas attendu que les candidats développent ces points.

— Certains textes ont subi des coupes partielles ; avant l'établissement stable de l'image sur la tablette, le texte coupé peut apparaître brièvement : ce phénomène parasite est à ignorer. De même, l'élimination de pages complètes peut introduire une discontinuité dans la numérotation des pages du document final.

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY ET ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris



METTEZ DE L'IODE DANS VOTRE MOTEUR

Pour de petits satellites, et si l'on a un peu de temps devant soi, les moteurs à plasma sont une excellente source de propulsion. Quels sont leurs secrets?

Un exemple pris dans un carnet de commandes bien rempli: NPT30-I2-1U équipera le *DROID.002* de l'entreprise Turion Space, le premier maillon d'une constellation de satellites destinée à surveiller les débris spatiaux. NPT30-I2-1U? C'est le nom d'un moteur électrique affecté à des nanosatellites afin qu'ils puissent corriger leur trajectoire. Conçu par la start-up française ThrustMe, il pèse 1 kilogramme, a la forme d'un cube de 10 centimètres de côté (*voir la figure ci-dessus*) et délivre une poussée d'environ 1 millinewton (mN), c'est-à-dire quatre fois le poids… d'un grain de riz! Comment fonctionne donc ce propulseur, comment des forces aussi faibles peuvent-elles être utiles dans l'espace et pourquoi, depuis leurs premiers succès au début des années 2000 avec les missions *Smart-1* ou *Deep Space 1*, ces moteurs jouent-ils un rôle croissant dans les missions spatiales? La physique apporte quelques éléments de réponse.

DES MOTEURS UTILES… APRÈS LE DÉCOLLAGE

La première image qui nous vient à l'esprit lorsqu'on pense *moteur* et *exploration spatiale* est celle de flammes et d'un nuage de fumées s'échappant du réacteur d'une fusée lors du décollage. Il s'agit des gaz très chauds issus d'une combustion et expulsés à haute vitesse vers l'arrière par des tuyères. En vertu du principe de l'action et de la réaction, il s'ensuit une force vers l'avant qui fait avancer la fusée. Cette poussée est égale au débit de masse (la masse éjectée par seconde) multiplié par la vitesse d'éjection des gaz. Pour décoller depuis la Terre, elle doit être supérieure au poids de la fusée. Aujourd'hui, seuls les moteurs thermiques sont capables de satisfaire cette condition. Le lanceur *Saturne V*, par exemple, produisait une poussée initiale de 34 méganewtons pour une masse de 3000 tonnes.

Il n'est donc pas question de s'en passer. Pourtant, ils ont de nombreuses limitations. La masse éjectée et l'énergie fournie à cette dernière ont une même origine – les ergols (des mélanges homogènes de comburants et de carburants) – et ne sont donc pas contrôlables indépendamment. La vitesse d'éjection des gaz produits par la combustion des ergols ne peut pas dépasser la vitesse d'agitation thermique correspondant à la température atteinte lors de la combustion. Elle est au mieux de 5 kilomètres par seconde (km/s). Par conséquent, l'embarquement de beaucoup d'ergols est indispensable pour exercer les accélérations ou décélérations (ou incréments de vitesse) nécessaires aux manœuvres orbitales ou aux missions spatiales!

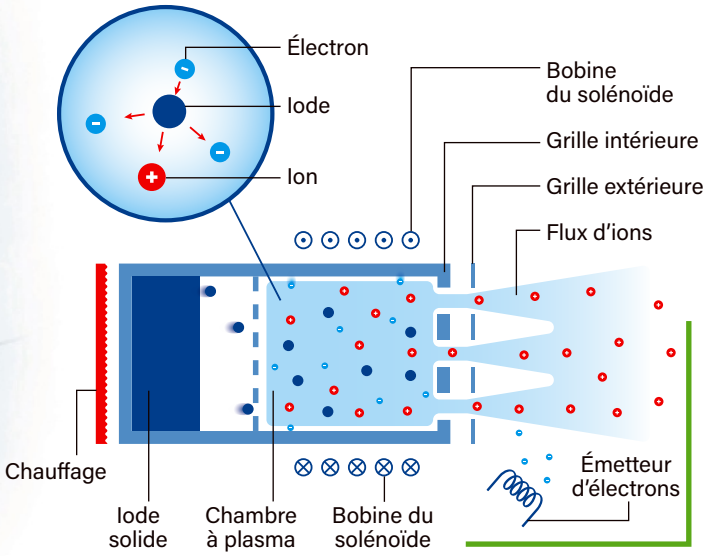
© Illustrations de Bruno Vacaro



Ane Aanesland, cofondatrice de ThrustMe, a conçu le NPT30-I2-1U, un moteur électrique de nouvelle génération qui équipe des microsatellites, comme les CubeSat.

UN MOTEUR À PLASMA

Chauffé, un réservoir solide libère des molécules d'iode *(en bleu foncé)*. L'iode I_2 est alors dissocié et/ou ionisé. Les ions *(en rouge)* passent ensuite au milieu de deux grilles, entre lesquelles est appliquée une tension, et sont expulsés, ce qui entraîne la propulsion. Une fois à l'extérieur, ces ions sont neutralisés par des électrons *(en bleu clair)* : l'engin spatial reste neutre !



C'est le russe Constantin Tsiolkovski qui établit la méthode de calcul de la masse à embarquer dès 1903 avec une équation à la base des calculs astronautiques. Une fois dans l'espace, la masse nécessaire pour obtenir un incrément de vitesse donné augmente comme l'exponentielle du rapport entre cet incrément et la vitesse d'éjection. Ainsi, il faut 1,7 tonne d'ergol pour faire gagner 3 km/s à une charge utile de 1 tonne avec une vitesse d'éjection de 3 km/s et 19 tonnes pour un gain de 9 km/s. Lorsque la vitesse d'éjection est de 30 km/s, il suffit respectivement de 105 et 350 kilogrammes.

SE FAIRE POUSSER PAR DES IONS

Obtenir une vitesse d'éjection de 30 km/s est impossible avec une réaction chimique, mais devient très facile si l'on s'autorise à accélérer des particules chargées avec un champ électrique intense. C'est ce que l'on fait dans ces fameux moteurs électriques. Prenons le cas de l'iode qui est utilisé dans NPT30-I2-1U. Avec une tension de 1 kilovolt, on accélère un ion iode I^+ jusqu'à 39 km/s. Le courant électrique et le débit de masse étant reliés, si ce qu'éjecte le moteur consiste en ces ions, on peut en déduire la poussée en fonction du courant et de la tension. Avec 1 ampère et 1 kilovolt, on obtient une poussée théorique de 50 mN avec un débit de masse de 1,3 milligramme par seconde et une puissance électrique de 1 kW. Dans le NPT30-I2, on n'a pas la puissance nécessaire pour un tel courant. Avec une puissance totale disponible d'environ 50 W, y compris pour alimenter la partie du moteur qui crée les ions et pour compenser les pertes, la poussée obtenue est plus faible : typiquement 1 mN pour un débit de 0,08 milligramme par seconde.

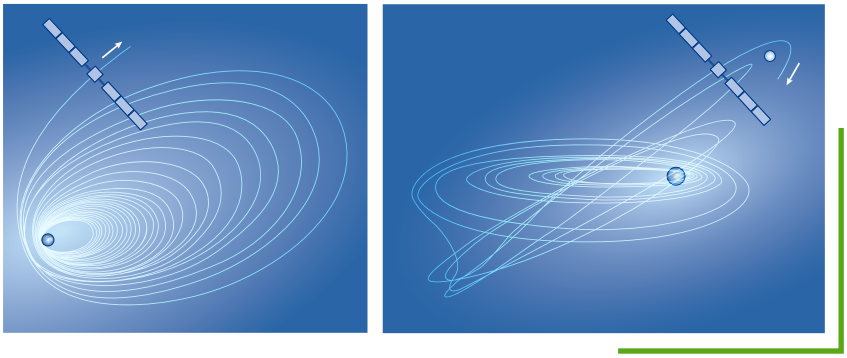
Que faire avec une poussée aussi faible ? Permettre aux satellites de rester plus longtemps en orbite ! Le NPT30-I2 a été monté récemment sur un nanosatellite d'environ 20 kilogrammes qui orbite à près de 500 kilomètres autour de la Terre à plus de 7 km/s. Ce satellite subit une force de frottement aérodynamique dans l'atmosphère résiduelle qui lui fait perdre de l'altitude. Pour l'éviter, il lui faut un «boost» de vitesse de quelques dizaines de mètres par seconde par an. Dans ce but, on doit allumer par intermittence le moteur de l'ordre de la centaine d'heures par an. Pas de problème pour cet engin qui a de quoi fonctionner environ 1500 heures. On peut donc contrôler assez finement pendant plusieurs années la trajectoire du nanosatellite, y compris pour des procédures d'évitement, en jouant sur la durée d'allumage du moteur et sa poussée (modulable d'un facteur 3). On y retrouve par ailleurs

les caractéristiques des moteurs électriques spatiaux : peu gourmand en ergol, il permet d'avoir une charge utile accrue ; sa puissance électrique peut être fournie par une source extérieure, le Soleil en l'occurrence, dont la lumière est captée par des panneaux photovoltaïques.

Ces moteurs peuvent aussi servir pour des missions plus ambitieuses avec des incréments de vitesse beaucoup plus importants. La mission *Smart-1*, qui a débuté en 2003, a utilisé un moteur électrique de 70 mN de poussée et de 1,8 kW de puissance électrique pour amener une sonde de 366 kilogrammes de la Terre à la Lune. Ici, ce sont plus de 80 kilogrammes de xénon, ionisé et expulsé à 16 km/s qui ont pu fournir l'incrément de vitesse de 4 km/s nécessaire aux manœuvres orbitales. À cause de la faiblesse de la poussée, il aura fallu plus d'un an pour que la sonde quitte l'orbite terrestre pour celle de la Lune (trois jours pour les missions *Apollo*) : cela s'est traduit par une trajectoire spiralaire caractéristique de l'usage de ces moteurs (*voir la figure ci-contre*).

QUI VEUT ALLER LOIN…

Poussé par un moteur à plasma qui lui offre une longue autonomie, un satellite (de petite taille) peut rejoindre sa cible, par exemple la Lune, en quelques années en suivant une trajectoire soit régulière *(à gauche, l'objet s'éloigne progressivement en faisant de multiples tours)*, soit plus complexe *(à droite, le parcours de* Smart-1 *dans sa mission vers la Lune de 2003 à… 2006)*.



DU PLASMA AU CŒUR DU MOTEUR

Si le principe des moteurs électriques est bien établi, la recherche actuelle se concentre sur l'optimisation des performances. Il y a déjà plusieurs façons d'accélérer les charges : en appliquant une tension entre deux grilles par exemple, comme dans le NPT30-I2-1U. Simple ?

En apparence seulement. L'accélération a uniquement lieu entre les deux grilles et ne concerne donc qu'un seul type de charge, par exemple des ions positifs si le potentiel de la grille extérieure est inférieur à celui de la grille intérieure. Pour que ces ions, créés dans une chambre à plasma (*voir la figure page précédente*), puissent franchir la grille intérieure, il faut que le potentiel soit le même sur toutes les parois de la chambre, y compris sur la grille intérieure. Pour qu'une fois dépassée la grille extérieure ils ne soient pas réattirés vers elle, on les neutralise en les arrosant avec des électrons produits par un canon à électrons situé en dehors du moteur. Cela assure aussi la neutralité électrique du dispositif qui, sinon, se chargerait en éjectant en permanence des charges du même signe. Et comme les électrons sont bien plus « légers » que les ions, cela n'affecte pas la poussée.

Dans le moteur de chez ThrustMe, la grande originalité consiste à remplacer le xénon, rare et cher, par de l'iode. S'il a l'avantage d'être chimiquement inerte et assez facile à ioniser, le xénon doit cependant être stocké dans des réservoirs sous haute pression (plus de 100 bars). L'iode, encore plus facile à ioniser, n'est quant à lui pas onéreux et se présente sous une forme solide qui se sublime avec peu d'énergie (on obtient le débit précité avec 0,02 W). Hélas, il est hautement corrosif, ce qui nécessite l'emploi de matériaux spécifiques, comme des céramiques.

Il est aussi assez friable : pour qu'il ne se brise pas en mille morceaux au moment du décollage, on le coule dans une matrice poreuse qui le maintient fermement en place. Une fois vaporisé, il est alors bombardé par des électrons accélérés par un champ électrique dont l'origine est un champ magnétique variable créé par un solénoïde. Les ions, plus lourds, sont insensibles à ce champ qui fait tourner les électrons autour de l'axe du solénoïde et évite, donc, de les envoyer endommager la paroi de la chambre à plasma.

Il n'empêche que cette chambre contient un plasma très agité, mélange d'ions (ici I_2^+, I^+, I^{2+}, I^-, e^-) et d'espèces neutres (I_2, I) qui l'abîment au cours du temps. Un des enjeux des moteurs électriques spatiaux est, par conséquent, de garantir leur fiabilité sur de longues périodes de fonctionnement, plusieurs années pour des missions interplanétaires, comme ce fut le cas pour la mission *Dawn* (partie explorer Vesta et Cérès dans la ceinture d'astéroïdes) ou actuellement pour la mission *BepiColombo*, en route depuis 2018 pour se placer sur l'orbite de Mercure en 2025. ■

Les auteurs ont notamment publié : En avant la physique !, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

BIBLIOGRAPHIE

D. Rafalskyi *et al.*, In-orbit demonstration of an iodine electric propulsion system, *Nature*, 2021.

S. Mazouffre, Electric propulsion for satellites and spacecraft : Established technologies and novel approaches, *Plasma Sources Science and Technology*, 2016.

D. Goebel et I. Katz, Fundamentals of electric propulsion : Ion and hall thrusters, *JPL Space Science and Technology Series*, 2008.

Comment fonctionne la propulsion ionique ?

Plutôt connue dans le domaine de la science fiction, la propulsion ionique est un concept bien réel, et est un système utilisé depuis une vingtaine d'années par la NASA pour propulser certaines sondes spatiales, comme la sonde Dawn.

Le principe est plutôt simple, et bien qu'il existe plusieurs façons de les faire, je vais m'attarder ici sur le moteur ionique électrostatique, qui est le plus simple à comprendre.

Tous les moteurs à réaction fonctionnent en propulsant quelque chose vers l'arrière de façon à obtenir une poussée vers l'avant. C'est de l'eau pour les bateaux à moteur, de l'air pour les avions, des gaz pour les fusées et donc des ions pour les sondes à propulsion ionique.

Ici, plutôt que d'utiliser une réaction chimique, brûler des gaz et expulser ces derniers, **on utilise un champ électrique pour accélérer des ions** (particules chargées) dans un sens, toujours pour obtenir une poussée dans l'autre sens. Le résultat est le même, mais les applications sont un peu différentes.

Le moteur ionique

L'idée est simple à comprendre, donc, mais sa mise en place fait appel à un peu de physique.

Tout d'abord, on commence par construire un canon à électrons. Ils sont obtenus en mettant une aiguille métallique sous très haute tension. L'accumulation de charges sur la pointe va pousser des électrons à s'en échapper à très haute vitesse. On obtient alors **un faisceau d'électrons**.

Ces électrons sont bombardés sur du xénon, un gaz, dans le but d'en arracher leurs électrons. Le gaz, ionisé sous la forme d'ions Xe^+, est ensuite envoyé entre une grille positivement chargée et une grille négativement chargée.

L'ion étant chargée positivement (ayant perdu une charge négative), il est repoussé par la grille positive et est attiré par la grille négative et est donc accéléré en direction de la grille négative. C'est cette accélération qui nous intéresse, car c'est elle qui constitue la poussée du moteur à propulsion ionique :

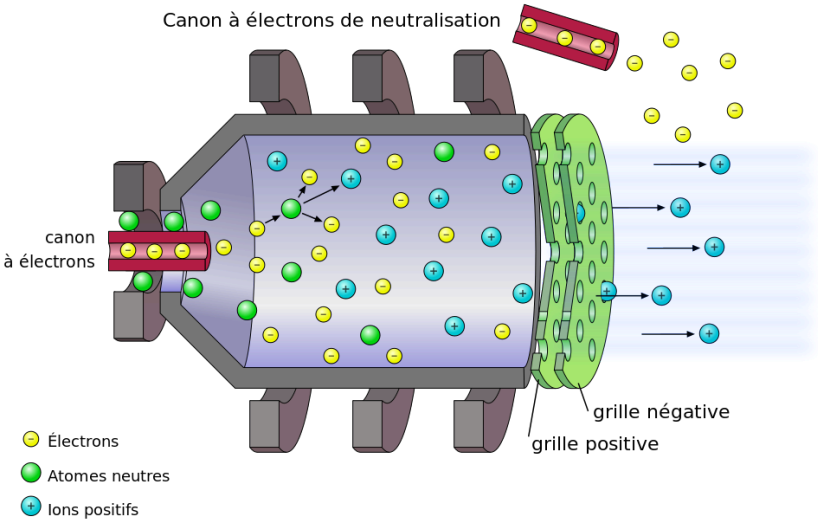


FIGURE 1 – Schéma d'un moteur ionique

Quand l'ion Xe^+ passe la grille négative, on lui envoie un électron, celui qu'on lui a arraché un peu plus

tôt lors de l'ionisation. L'électron se recombine avec son ion et l'atome de xénon est alors neutralisé. Il conserve cependant son inertie et sa vitesse : il est expulsé du moteur.

C'est le passage de l'ion dans la région où règne un fort champ électrique qui lui confère une importante accélération. L'ion atteint alors une vitesse colossale de l'ordre de 20 à 50 km/s, soit de 72 000 à 180 000 km/h. Le xénon étant ainsi éjecté à l'arrière, c'est toute la sonde spatiale qui est poussée vers l'avant.

Pourquoi ce principe de fonctionnement ?

L'un des gros problèmes avec les fusées, ce n'est pas le fonctionnement, mais leur utilité : on veut envoyer des sondes loin de la Terre, et pour cela il faut d'abord réussir à quitter son attraction gravitationnelle. Si on utilise du carburant pour produire la poussée, il faut également que ce carburant quitte l'attraction de la Terre, et donc, en quelque sorte, utiliser d'autre carburant pour propulser le carburant lui-même. **Aujourd'hui, le carburant représente près de 90% de la masse de la fusée**. Le reste est partagé entre la masse de la fusée et la charge utile, qui ne représente qu'une petite fraction de la masse d'une fusée.

Si on veut envoyer plus de choses plus loin, il faut également envoyer beaucoup plus de carburant. Avec ce raisonnement, il arrive un stade où ce n'est plus viable économiquement. Il faut donc trouver un moyen de propulser les sondes avec des moteurs plus légers, et surtout aussi loin avec une masse de carburant plus faible.

Avec la propulsion ionique, il n'y a ni combustion, ni réaction chimique. Il n'y a pas non plus de pièces mobiles, ni besoin de palier à des contraintes thermique et mécanique comme un moteur de fusée classique. Un moteur ionique est donc très efficace et rentable.

En revanche, la quantité d'ions expulsé est très faible, et la force obtenue également : pas plus d'une centaine de grammes de poussée, soit environ autant qu'un souffle sur votre main tendue. En revanche, cette poussée est constante, très étalée dans le temps et très précisément dirigée.

Dans l'espace, où il n'y a pas d'air pour nous freiner, cette faible force suffit pour accélérer la sonde. L'accélération est lente, mais constante et très longue. Après plusieurs mois, la sonde permet d'augmenter sa vitesse de 5 à 10 km par secondes, ce qui est loin d'être négligeable sur des voyages interplanétaires. Si elle était utilisée à son plein potentiel, il est estimé que de telles moteurs peuvent, à force d'une propulsion faible mais durable, atteindre des vitesses de l'ordre de 10% de celle de la lumière. C'est donc clairement intéressant.

Pourquoi du xénon ?

Le choix du xénon, qui est un gaz noble, est important ici.

Déjà, pour que la poussée soit maximale, **il faut que la masse de ce qu'on éjecte soit la plus grande possible**. Or parmi les carburants dont on dispose et qui sont facilement ionisables, **le xénon est de loin le plus massif** (40 fois plus dense que l'hélium, 4,5 fois plus que l'air, etc.). Il est bien plus efficace que l'azote ou l'hélium, donc.

Ensuite, **ce gaz est également inerte chimiquement** : il n'attaque pas son réservoir ni le moteur. Le césium ou du sodium, qui étaient également des carburants potentiels pour les moteurs ioniques, n'ont pas cet avantage. S'ils étaient considérés au départ, c'est parce qu'ils sont très simplement ionisables.

Dans l'ensemble, **un moteur ionique comme celui de la sonde Dawn qui embarque 425 kg de xénon** sera aussi efficace qu'un moteur de fusée classique qui embarque environ 10 tonnes de carburant classique (qui coûterait donc beaucoup plus cher à envoyer dans l'espace).

Un des inconvénients que ce moteur ne résout pas, est la nécessité d'un carburant. Sans le xénon, il n'y a rien à ioniser et le moteur ne fonctionne pas : sans matière à pousser vers l'arrière, la fusée ne peut pas avancer. Ce problème n'est pas spécifique au moteur ionique, mais c'est un problème que ce moteur ne résout pas par rapport aux autres moteurs à réaction.

Pour le résoudre, on peut utiliser des voiles solaires, qui utilisent le vent solaire et la pression radiative (la pression de la lumière) pour avancer, lentement mais sûrement à travers l'espace. Avec ça, plus besoin de source de carburant du tout, mais il faut être proche du Soleil.

Exemple de sujets - Epreuve d'ADS Physique, Filière PT

Ce dossier comporte deux documents. Le premier document est un texte intitulé « Mettez de l'iode dans votre moteur » paru en mars 2024 dans la revue Pour la Science. Il est complété par un extrait de billet de blog sur la propulsion ionique, partiellement reproduit de https://couleur-science.eu/?d=1b20d2--comment-fonctionne-la-propulsion-ionique.

Ce dossier porte sur la propulsion ionique utilisée pour les satellites. Le document de blog explique le principe physique général : un gaz est ionisé, puis les ions sont accélérés par un champ électrique entre des grilles, avant d'être neutralisés et éjectés, produisant une poussée très économe en carburant. L'article de Pour la Science se concentre sur une innovation française portée par la start-up ThrustMe (issue de l'École polytechnique et du CNRS) : remplacer le xénon, gaz rare coûteux et difficile à stocker, par de l'iode, un solide facile à conserver, moins cher et tout aussi efficace comme propergol. Le sujet invite donc à comprendre les principes physiques de la propulsion électrique et à analyser les avantages techniques et économiques de cette rupture technologique testée avec succès en orbite dès 2020.

Le sujet donné aux candidats était le suivant : « Dans votre exposé, qui durera environ 15 minutes et qui synthétisera le contenu des documents fournis, vous chercherez à montrer comment vos connaissances en physique vous permettent de comprendre et d'expliquer les éléments présentés dans le dossier. »

Le dossier proposé couvrait une partie non négligeable du programme de physique de la filière PT, tant du point de vue théorique que technique. Il pouvait donc donner lieu à des commentaires riches et variés dans de nombreux domaines de la physique. Comme dans la plupart des cas dans cette épreuve, le dossier apportait de très nombreuses informations et le jury attendait des explications.

Les candidats pouvaient par exemple aborder les points suivants (la liste n'est pas exhaustive) :

- appliquer la conservation de la quantité de mouvement pour établir la relation fondamentale de la propulsion (poussée = débit massique × vitesse d'éjection) ;
- exploiter la conservation de l'énergie mécanique pour calculer la vitesse de libération et discuter l'influence des frottements atmosphériques ;
- comparer les stratégies « canon » et « fusée » (impulsion brève contre poussée continue) pour quitter le champ gravitationnel terrestre ;
- relier la vitesse d'éjection des gaz de combustion à la vitesse d'agitation thermique via le théorème d'équipartition de l'énergie ;
- établir et commenter l'équation de Tsiolkovski et la croissance exponentielle de la masse d'ergol nécessaire ;

- calculer l'énergie cinétique acquise par un ion accéléré dans un champ électrique et en déduire sa vitesse d'éjection ;
- relier poussée, débit de masse, tension et puissance électrique d'un propulseur ionique, et discuter le rendement énergétique ;
- appliquer les lois de la mécanique des orbites pour déterminer la vitesse d'un satellite en orbite basse ;
- mener un bilan énergétique complet sur un cas réel de mission spatiale (Smart-1) ;
- calculer la pression de radiation solaire et estimer la surface nécessaire pour une voile solaire ;
- comparer les énergies d'ionisation du xénon et de l'iode à partir de leur structure électronique ;
- comparer les deux propergols (iode et xénon) en termes de stockage, coût, toxicité et performances.