

La propulsion électrique : de la propulsion classique à la micro- propulsion

Ane Aanesland est directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), au Laboratoire de physique des plasmas de l'École Polytechnique. Elle est cofondatrice et de la start-up ThrustMe¹, qui développe des systèmes de propulsion spatiale de nouvelle génération.

Comme tous les secteurs industriels et économiques de nombreux domaines, celui du spatial est en train de vivre une révolution. Il y a une dizaine d'années au Laboratoire de Physique des Plasma de l'École Polytechnique (**Figure 1**) a

été créé une équipe de chercheurs qui a eu pour mission de combiner recherche fondamentale et sciences appliquées ; l'une des applications fut la propulsion dans l'espace. Comme on peut le voir dans le **Chapitre de J. Louet** de cet ouvrage *Chimie, aéronautique et espace* (EDP Sciences, 2018),

1. thrustme.fr

Figure 1

Le Campus de l'École Polytechnique.



la propulsion électrique² joue un rôle important dans la révolution du secteur spatial (**Figure 2**).

Dans le secteur spatial, la transition de recherche dans un organisme public à l'entrepreneuriat est une pratique encore récente mais qui se multiplie. Les métiers de demain reposent sur les

innovations d'aujourd'hui et celles-ci ne sont possibles qu'en s'appuyant sur de la recherche fondamentale.

1 Le défi d'un monde entièrement connecté à Internet

Tout le monde est aujourd'hui connecté à Internet (**Figure 3**), on ne peut plus vraiment vivre sans ce réseau, sans lequel on n'a pas accès à tous les services financiers, médicaux, à l'éducation du futur et aux informations. Ainsi les

Figure 2

La propulsion électrique joue un rôle important dans la révolution spatiale.

2. Propulsion électrique : type de propulsion à réaction dans lequel l'électricité est utilisée comme source d'énergie pour accélérer le fluide.

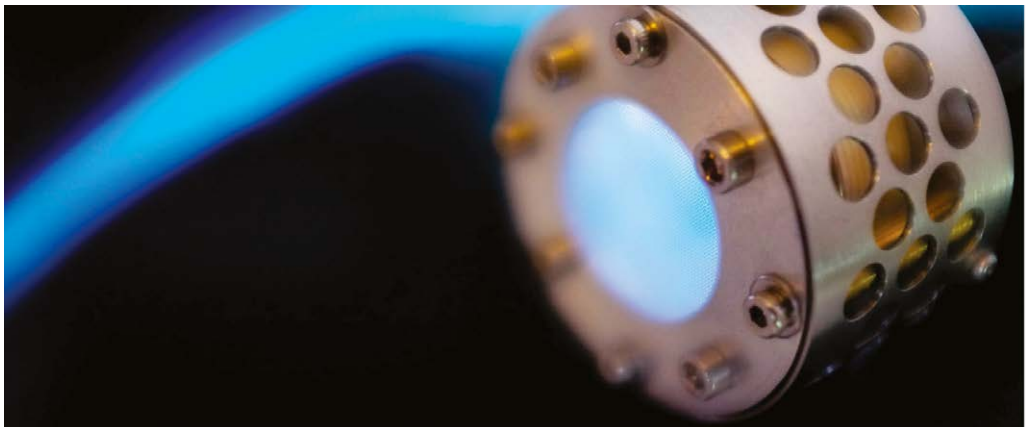




Figure 3

Internet est devenu indispensable pour nous aujourd'hui, cependant la moitié de la planète n'y a toujours pas accès.

Nations Unies ont déclaré il y a quelques années que l'accès à Internet constituait un droit fondamental pour l'Homme.

Pourtant, la moitié de la planète, soit environ 4 milliards de personnes, ne sont pas en capacité d'avoir accès à Internet. Face à ce problème, de nombreux nouveaux acteurs du spatial ont émergé avec pour mission de fournir un accès Internet par satellite à tous. Pour réussir cela, il faudra déployer des constellations représentant des dizaines de milliers de satellites qui tourneront autour de la Terre.

Ces nouveaux acteurs ont également compris que des satellites miniaturisés et dédiés à des tâches d'observation spécifiques pourraient générer des données dans plusieurs domaines qui permettraient d'améliorer la qualité de vie partout dans le monde. Par exemple la surveillance des zones à risques pourrait être améliorée par une imagerie globale quasi instantanée de la Terre plusieurs fois par jour, ce qui est impossible

aujourd'hui. Cela aurait aussi des retombées importantes sur les plans environnementaux et économiques. Cela permettrait par exemple de mieux comprendre le changement climatique, d'optimiser l'utilisation de l'eau et des fertilisateurs pour l'agriculture (**Figure 4**), ou encore d'améliorer la précision des prévisions météorologiques, ce qui dans les transport aériens peut permettre d'économiser

Figure 4

Les données satellites pourraient permettre l'optimisation de l'utilisation de l'eau et des fertilisateurs.



Figure 5

Plus de 10 000 satellites seront potentiellement lancés d'ici dix ans.



jusqu'à 20 % de carburant sur un vol transatlantique.

2 La propulsion dans la révolution spatiale

Aujourd'hui, 1 400 satellites sont en opération autour de la Terre, et l'on prévoit d'en lancer plus de 10 000 dans les dix prochaines années (Figure 5). C'est une révolution car on ne lance actuellement que 40 satellites par an

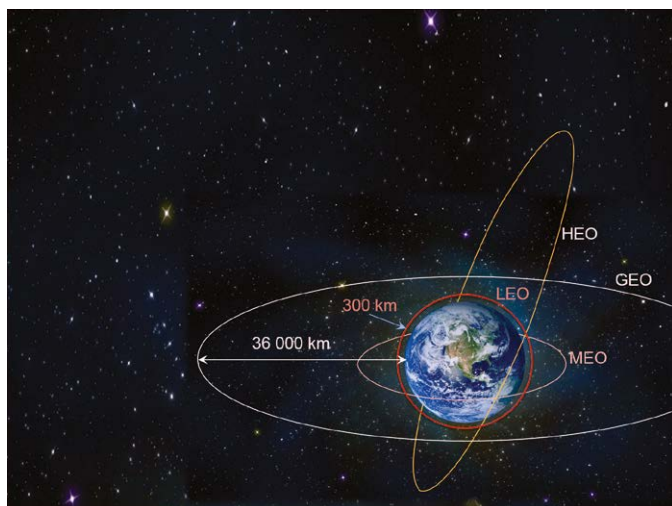
en moyenne, donc en lancer 10 000 d'ici dix ans entraîne nécessairement un changement de paradigme qui impose de revoir tous les différents sous-systèmes de ce nouveau type de satellites.

L'enjeu majeur de la propulsion est de pouvoir contrôler la trajectoire du satellite quand il est dans l'espace (voir le **Chapitre de J. Louet**) (Figure 6), non seulement pour ajuster son orbite mais également pour éviter toute collision ou encore gérer leur durée de vie.

Par exemple, lorsqu'un satellite est en orbite basse (LEO³ ou MEO⁴), sa durée de

Figure 6

Le contrôle de la trajectoire du satellite est fondamental pour éviter les collisions et éliminer les satellites obsolètes.



3. Orbite basse (LEO) : zone de l'orbite terrestre allant jusqu'à 2 000 kilomètres d'altitude. On y retrouve des satellites de télé-détection, des satellites de télé-communication ainsi que quelques stations spatiales, dont la Station spatiale internationale (ISS).

4. MEO (orbite terrestre moyenne) : orbite autour de la Terre située entre 2 000 et 35 786 kilomètres d'altitude, soit au-dessus de l'orbite terrestre basse et en dessous de l'orbite géostationnaire.

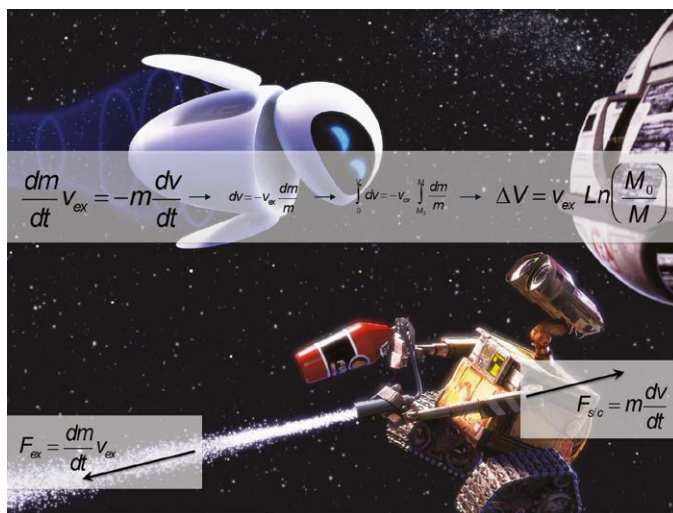


Figure 7

Le principe d'action-réaction à l'origine de la propulsion chimique : « Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B ».

Source : Wall-E Pixar 2008.

vie naturelle n'est que de quelques mois. En revanche si on le pousse vers des orbites plus élevées (HEO⁵ et GEO⁶), sa durée de vie peut atteindre des centaines d'années.

En lançant 10 000 satellites on risque donc de créer à terme une poubelle spatiale jonchée de débris satellitaires. Il faut donc prévoir de ramener les satellites obsolètes vers la Terre ou de les envoyer beaucoup plus loin dans l'espace afin qu'ils ne polluent pas notre entourage et ne créent pas de risques de collision.

Dans l'espace, comme il n'y a pas de frottement, il faut utiliser le principe de l'action/

réaction⁷ pour se déplacer, donc créer une force d'action et une force de réaction. Pour mieux comprendre, prenons le joli exemple de ces deux petits robots d'un dessin animé de Pixar (**Figure 7**).

Le Robot jaune Wall-E vient de la Terre et utilise pour se déplacer les lois de la physique, c'est-à-dire le principe d'action-réaction. Il émet pour cela beaucoup de poudre et cette poudre génère une force qui est donnée par le débit de poudre sortant de son tuyau et sa vitesse de sortie. Le résultat est que Wall-E est soumis à une force de réaction qui est donnée par sa masse et son changement de vitesse. Les deux forces d'action et de réaction sont égales.

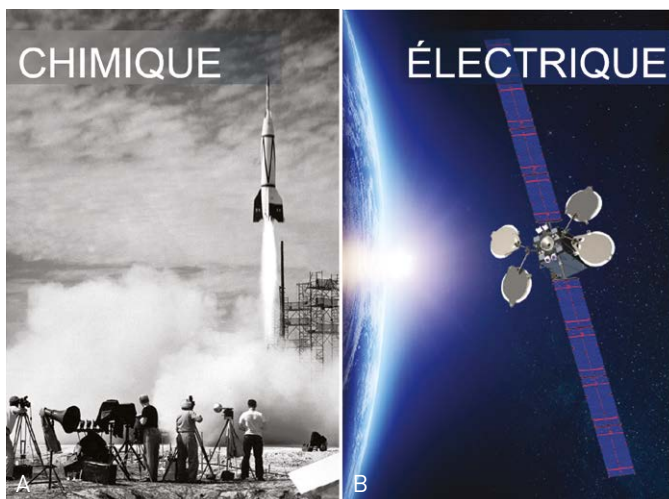
5. HEO (orbite terrestre haute) : orbite terrestre dont l'apogée est située à environ 35 786 kilomètres.

6. GEO (orbite géostationnaire) : orbite autour de la Terre qui se situe à une altitude de 35 860 km. Un objet placé sur une orbite géostationnaire reste en permanence au-dessus du même point de l'équateur.

7. Action/Réaction : troisième loi de Newton aussi connue sous le nom de principe des actions réciproques. Elle s'énonce ainsi : « Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B ».

Figure 8

A) La propulsion chimique, utilisée historiquement, présente de nombreux inconvénients dont un risque élevé d'explosion ; B) la propulsion électrique, de plus en plus utilisée, présente également des inconvénients : lenteur, besoin d'une source externe d'énergie, électronique complexe.



Mais pour se déplacer, Wall-E éjecte de la matière, et quand il n'y a plus de matière, il ne peut plus se déplacer ! Ce type de propulsion, la propulsion chimique, a été décrit dans d'autres chapitres de cet ouvrage (voir le [Chapitre de P. Crespi](#)) (Figure 8A). Au-delà des contraintes de stockage de ce type de propulsion, il présente des risques d'explosion qui le rendent inadapté aux petits satellites.

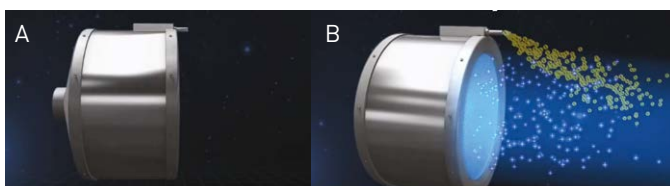
Heureusement, comme le petit robot blanc Eve (Figure 7), on peut utiliser un autre type de propulsion : la propulsion électrique (Figure 8B). L'utilisation de propulsion électrique se généralise actuellement (voir le [Chapitre de J. Louet](#)), pour les petits et les gros satellites. Elle a l'avantage de prendre moins de place que la propulsion chimique, cependant

elle est plus lente et plus complexe. La source d'énergie externe est complexe : d'une part l'énergie solaire, d'autre part un carburant dont nous allons parler et qui représente l'un des défis à résoudre...

Le principe de la propulsion électrique consiste à éjecter des ions à très grande vitesse (Figure 9B) pour que la poussée (m.v) soit significative ; la vitesse d'éjection est aux alentours de 10 à 30 km/s et la poussée qui en résulte de l'ordre 100 μN à 1 N. On utilise principalement les ions du xénon (Xe) pour avoir des ions relativement lourds et faciles à manipuler au niveau de l'éjection par une cathode. La tension électrique nécessaire est quant à elle fournie par les panneaux solaires du satellite. La Figure 9, extraite d'une vidéo de la NASA, est un exemple de

Figure 9

A) Moteur électrique de la NASA ; B) principe de la propulsion électrique : un plasma génère des ions positifs (propulseur) dont la charge est compensée par celle des électrons envoyés par le neutraliseur pour garantir la neutralité du système global.



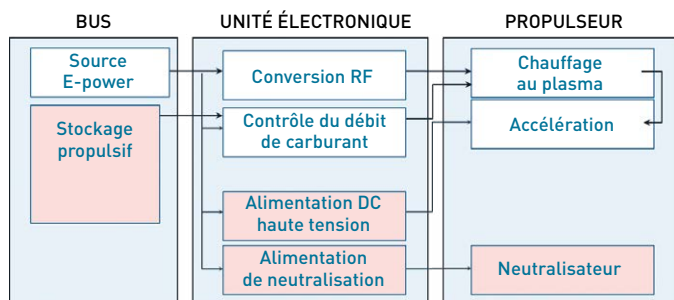


Figure 10

Les défis soulevés par la miniaturisation : miniaturiser les différents composants du système (électronique et propulseur) pour pouvoir miniaturiser tout le système.

ce type de moteur (**Figure 9A**). Le faisceau bleu d'ions positifs éjectés par le propulseur (**Figure 9B**) est neutralisé par l'envoi d'électrons (en jaune) par un neutralisateur. Cet élément est nécessaire car si seules les charges positives partaient dans l'espace, le satellite se chargerait négativement et les ions reviendraient vers le moteur, annulant ainsi toute poussée. Ici le moteur mesure 20 cm de diamètre et pèse environ 25 kg.

des moteurs électriques sont récentes, elles datent de 5 à 10 ans.

3.2. Le neutralisateur

Les technologies d'accélération d'ions interviennent dans d'autres domaines que le spatial. Le couplage de la recherche fondamentale avec les différentes technologies a permis de poser d'autres types de questions. Nous avons vu que dans le spatial il faut accélérer les ions pour sortir du satellite, mais dans d'autres domaines (la micro-électronique et les microcomposants), par exemple celui des semi-conducteurs pour les gravures (**Figure 11**), on

3 Les satellites de demain

3.1. Les enjeux de la miniaturisation

Les satellites de demain pèseront entre 10 kg et 300 kg. Les moteurs électriques actuels sont trop gros, il faut les miniaturiser, ce qui représente de nombreux défis (en fond rose sur la **Figure 10**). Le neutralisateur de la **Figure 9** ne peut pas être très petit, il est très complexe et très cher à fabriquer. Tout le système électronique qui récupère l'énergie du panneau solaire vers le moteur est lui aussi très compliqué.

Le stockage du carburant représente également un gros défi. Les recherches industrielles sur la miniaturisation

Figure 11

Il est fondamental de coupler recherche fondamentale et technologies pour innover dans l'aérospatial.

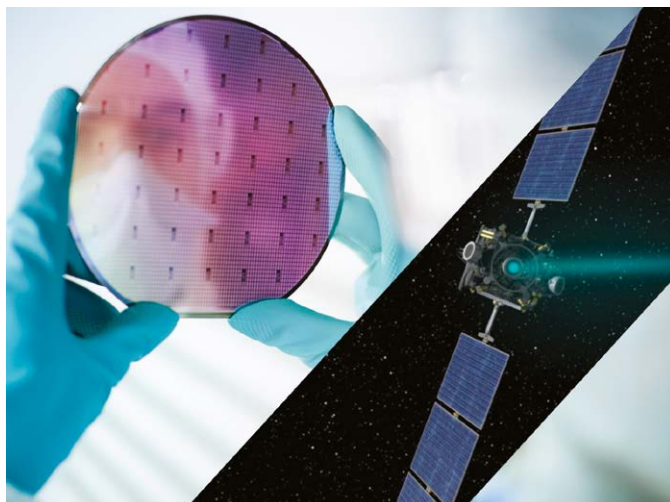
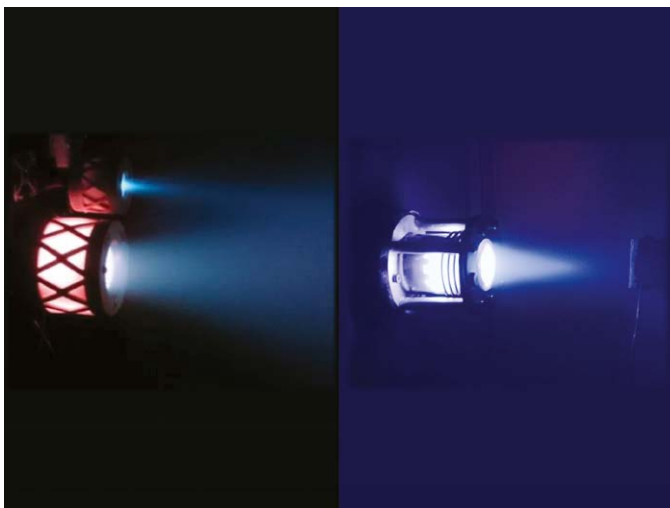


Figure 12

Miniaturisation d'un moteur classique avec un neutralisateur.



accélère les ions vers une surface afin de la bombarder et la graver. Le couplage des avancées technologiques de ces deux domaines a été fructueux et a permis d'éliminer tout le système de neutralisation externe.

La **Figure 12** montre la miniaturisation d'un moteur classique dans lequel on voit le faisceau d'ions sortant du propulseur, et le neutralisateur qui fait approximativement la même taille que le

système propulseur des ions. Dans le nouveau système, la même source est utilisée pour accélérer et neutraliser les ions. Grâce à cela on peut se passer du neutralisateur et d'une grande partie de son électronique encombrante et difficile à miniaturiser.

Figure 13

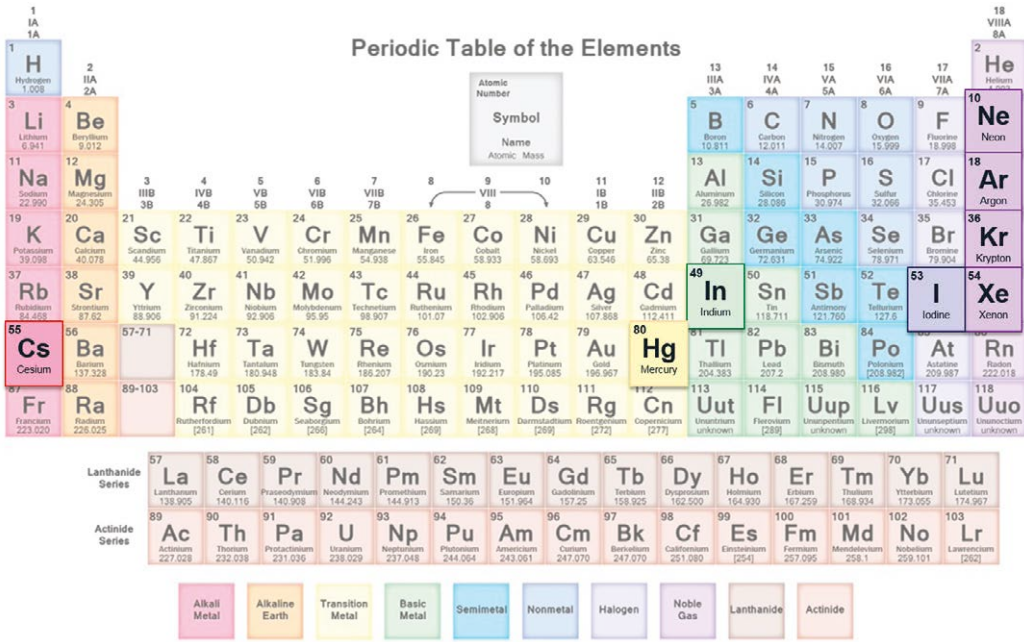
Les quatre états de la matière : du solide vers le plasma.



3.3. Le carburant

Le but ultime de la propulsion électrique dans l'espace est de créer un plasma pour accélérer les ions. Un plasma est le quatrième état de la matière : on commence avec un solide, qui, chauffé, devient un liquide, puis un gaz, et quand on chauffe encore plus, un plasma (**Figure 13**). Dans les systèmes classiques, on part du gaz qui est stocké et on crée le plasma *via* le gaz. Mais il est beaucoup plus avantageux du point de vue du rapport volume/poids de stocker un solide plutôt qu'un gaz, et de sublimer le solide.

Quand on examine le tableau périodique (**Figure 14**) pour choisir le bon élément



propulseur, les critères du choix sont les suivants : il faut que le plasma soit facile à créer, donc il faut pouvoir ioniser le gaz avec le moins d'énergie possible : c'est le cas pour tous les gaz nobles. Il faut aussi que les ions soient lourds afin de fournir le plus de poussée possible. C'est pourquoi les moteurs électriques aujourd'hui utilisent le xénon comme carburant favori.

Dans le passé, pour les gros satellites, les métaux comme l'iridium, le mercure et le césium ont été utilisés pour éviter le stockage sous haute pression. Mais ils ont été abandonnés car ils réagissent chimiquement et contaminent tout le système. Un autre problème pour le xénon est son prix très élevé, c'est un gaz noble, un gaz rare, et il est donc peu accessible. On cherche maintenant à le remplacer par un carburant moins cher et plus accessible,

qui peut se stocker sans être pressurisé. L'un des gaz idéaux sur lequel nous avons commencé à travailler est l'iode, mais l'iode est corrosif et délicat à utiliser (Figure 15). Les russes avaient proposé d'utiliser l'iode dans

Figure 14
Le tableau périodique des éléments : les gaz rares (éléments de la dernière colonne) présentent plusieurs avantages pour être utilisés comme carburants, ils sont lourds et faciles à ioniser. Ils posent cependant des problèmes de stockage et de coût.

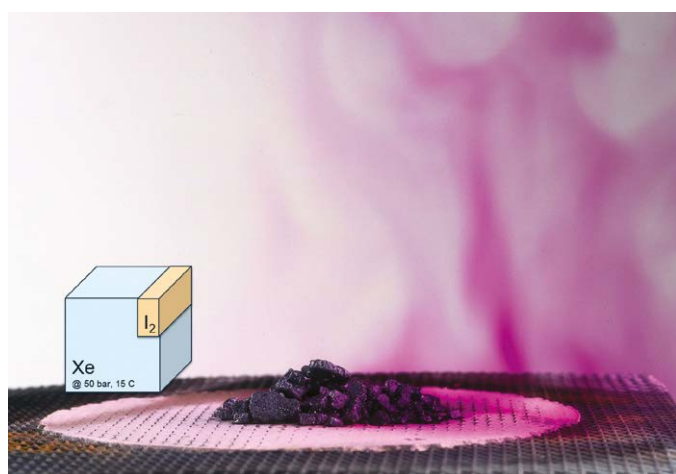
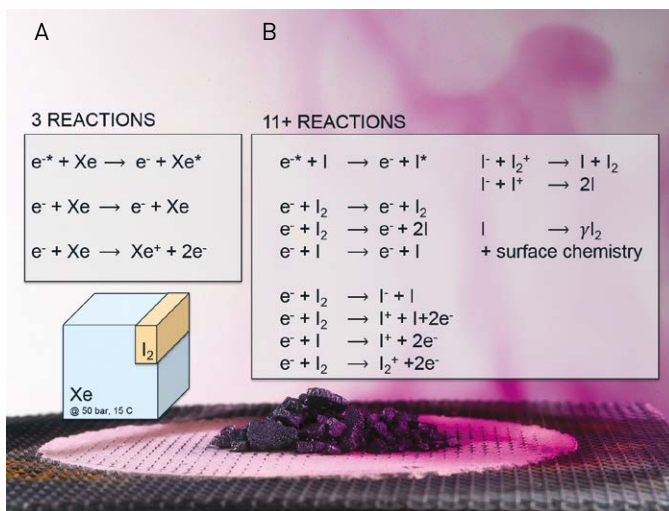


Figure 15
L'iode, candidat idéal pour le carburant du futur.

Figure 16

A) Seules trois réactions sont possibles entre du xénon et un électron : excitation, collision inélastique ou ionisation ; B) dans le cas de l'iode, il y a plus de onze réactions possibles, il faut donc des chimistes pour comprendre ces réactions.



les années 1960, ils avaient cependant abandonné à cause des problèmes de corrosion du système. Aujourd'hui la chimie des matériaux a réalisé beaucoup de progrès et on peut éviter leur corrosion. L'iode est un solide qui se sublime directement en gaz, sans passer par l'état liquide. On peut intégrer le système de stockage de l'iode en le reliant directement au moteur où l'iode se sublime, devient

gazeux, est ionisé puis accéléré.

Alors que la chimie du xénon est assez simple et se limite à trois réactions dans le plasma (Figure 16A), celle de l'iode est beaucoup plus compliquée avec de nombreuses réactions (Figure 16B) non seulement dans le plasma mais également à la surface du réacteur. Il faut donc non seulement maîtriser la chimie dans le plasma, mais aussi les réactions de surface avec l'iode à l'état gazeux.

Le laboratoire de ThrustMe travaille sur ce sujet (Figure 17) et utilise déjà l'iode dans ses moteurs. Il reste néanmoins toujours des problèmes de corrosion sur lesquels les recherches se poursuivent.

Figure 17

Test réalisé sur l'iode dans les laboratoires de ThrustMe : les problèmes de corrosion ne sont toujours pas résolus.



Le futur de la propulsion électrique miniaturisée dans l'espace

Malgré ces problèmes de corrosion qui restent encore à résoudre, notre moteur fonctionne et représente une grosse innovation dans le domaine de la propulsion électrique spatiale car il est 40 % plus petit que les moteurs miniaturisés classiques.

On voit sur la **Figure 18** un satellite miniaturisé qui est intégré dans un cube de 1 kg et de 10X10 cm, à l'intérieur duquel se trouve l'ensemble de l'électronique, la fluidique, le carburant et le moteur lui-même.

La mise au point de cette innovation a nécessité dix ans de recherche financée pour la plus grande partie par l'État français dans le cadre d'une coopération entre le CNRS et le centre de recherche d'accueil pour la technique (**Figure 19**). Une start-up a été créée en février 2017 dans le cadre d'un cofinancement public et privé, dans le but de mettre cette technologie sur le marché industriel.

L'équipe, composée actuellement de quinze personnes, est pluridisciplinaire (**Figure 20**), avec un mécanicien, un électronicien, un

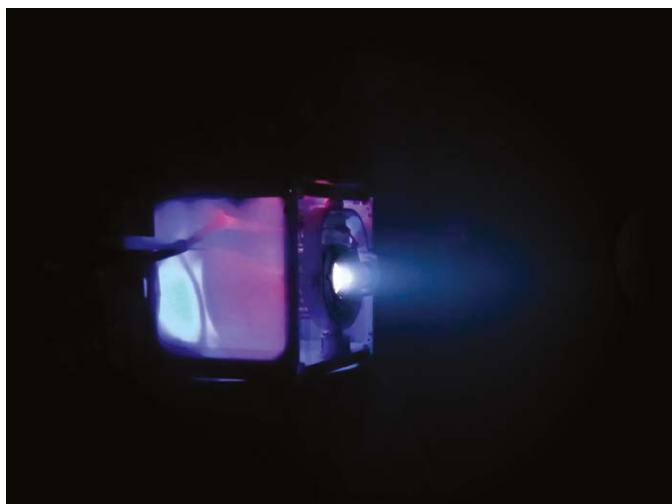


Figure 18

Le satellite miniaturisé : il tient dans un cube de 10 par 10 cm.

Figure 19

Passer de la recherche publique à la recherche privée : un changement de statut qui amène à travailler avec de nouveaux acteurs.



Figure 20

L'équipe pluridisciplinaire a toujours besoin d'un chimiste pour être au complet.



physicien, des experts, des docteurs en sciences, des « business developers », mais il manque un chimiste !

Le marché industriel est en développement, de nouveaux projets sont en cours pour développer les constellations de satellites destinées à améliorer la vie sur Terre. Mais il y a aussi de nouveaux acteurs qui rêvent beaucoup plus loin et envisagent d'ouvrir l'espace au tourisme.

En somme, l'espace de demain est beaucoup plus proche qu'avant : l'ISS pour le tourisme,

puis peut-être une base lunaire, puis plus tard Mars, et un jour une habitation sur Mars (**Figure 21**) ?



Figure 21

L'espace est plus proche que jamais, il sera peut-être même bientôt une destination touristique.