



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



PROPULSION SPATIALE

NOUVEL ENJEU D'INNOVATION

mai / 2018

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
LA FOIRE AUX INNOVATIONS	4
▪ DANS L'ESPACE AUSSI LE «TOUT ÉLECTRIQUE» FAIT SON CHEMIN	4
▪ PROPULSION CHIMIQUE : MÉTHANE À TOUS LES ÉTAGES	6
▪ PROPULSION SPATIALE : LA GRANDE FOIRE AUX IDÉES !	9
POUR ALLER PLUS LOIN	12
▪ QUELS PLANS DE VOL POUR ALLER SUR MARS ?	12
▪ ESPACE ET ÉNERGIE : LA FUSION PLUS QUE JAMAIS DANS LES TUYAUX	14
▪ PARIS AIR LAB : LES VÉHICULES VOLANTS DU FUTUR !	16
▪ L'ESPACE : UN MARCHÉ PORTEUR POUR L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE	17

INTRODUCTION

Le domaine spatial est depuis quelques années au cœur d'enjeux énormes : tout d'abord en ce qui concerne la mise en orbite des satellites, qui fait l'objet d'une concurrence nouvelle et effrénée. La propulsion est également la pierre angulaire de tous les projets de conquêtes spatiales, à commencer par les ambitions martiennes. La rédaction vous propose de découvrir les différentes technologies de propulsion développées par les industriels pour relever ces défis. En matière de propulsion spatiale, il y a ce qui marche et ce qui pourrait marcher. Dans la deuxième catégorie, toutes les idées, tous les concepts, tous les projets sont les bienvenus. L'imagination des ingénieurs, milliardaires amateurs ou physiciens rêveurs est sans limite. Les lasers focalisent toujours beaucoup d'attention et sont à l'origine de plusieurs concepts de propulsion spatiale. Cependant, leur utilisation concrète est encore assez limitée. Les premières théories et essais de propulsion laser ont vu le jour dans les années 1970. Mais pendant plus de 25 ans, la technologie laser n'était pas encore assez mûre pour que les concepts inventés puissent être réellement testés. Au départ, la propulsion par ablation laser s'appuyait sur une source laser émise depuis la Terre ou un satellite, qui, concentrée par un miroir fixé sur le véhicule spatial, était envoyée soit dans une chambre de combustion contenant un ergol (l'air), soit sur un matériau. Dans les deux cas, il y a apparition d'un plasma qui est ensuite éjecté par une tuyère pour créer la poussée. Très vite, on comprend qu'il est préférable d'embarquer directement le laser dans le véhicule. Selon les périodes, l'activité de recherche dans ce domaine est plus ou moins abondante. Depuis, l'apparition des laser pulsés micro et maintenant femtosecondes, les recherches ont repris et portent notamment sur un couplage d'une impulsion laser et des méthodes utilisées en propulsion électrique pour optimiser les plasmas et la poussée. Des systèmes de micro-propulsion ont vu le jour et peuvent permettre par exemple de contrôler l'altitude ou l'orientation d'un satellite. Le laser a aussi été à la base de concepts plus ou moins réussis. Parmi eux, le Lightcraft. Un véhicule spatial ou aérien propulsé par un faisceau laser via la création d'un plasma et de détonations à l'extérieur du véhicule. La source d'énergie de propulsion est externe. Conceptualisé en 1976, quelques prototypes seront construits dans les années 1980 au sein de laboratoires de défenses américains mais il faudra attendre les années 1990 pour voir un véritable projet prendre forme. Le record atteint par un tel engin restera en octobre 2000, 71m et 10,5 secondes de vol via un laser au CO₂ de 10kW basé au sol. L'engin emportait alors un carburant d'ablation sous forme de plastique et le corps du véhicule tournait autour de son axe (10000 tr/mn) pour se stabiliser par effet gyroscopique. Le concept a ensuite évolué et le laser remplacé par un maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation), dispositif permettant d'émettre un faisceau cohérent de micro-ondes. La propulsion est alors fournie aussi par des détonations mais en plus, des antennes redresseuses récupèrent une partie de l'énergie micro-ondes et la convertissent en électricité pour alimenter un propulseur MHD. Une partie du faisceau est aussi concentré en pointe sur l'avant du véhicule pour former une torche à plasma qui atténue l'onde de choc à l'avant quand le véhicule atteint des vitesses supersoniques. Mais avec le départ en retraite de son inventeur et développeur, Leik Myrabo, en 2011, Lightcraft Technologies Inc a disparu.

LA FOIRE AUX INNOVATIONS

DANS L'ESPACE AUSSI LE «TOUT ÉLECTRIQUE» FAIT SON CHEMIN

Parmi les alternatives aux carburants chimiques, les solutions de propulsions dites électriques connaissent un essor sans précédent autant pour de très petites poussées, permettant d'ajuster l'orientation d'un satellite, que pour assurer le voyage de sondes ou de véhicules interplanétaires.

Utilisées depuis plus de 20 ans, les **technologies de propulsion électrique** ont fait des progrès en matière d'autonomie, de miniaturisation, de performances qui les destinent à des projets toujours plus grands. La première sonde équipée d'un tel système de propulsion était Deep Space 1 en 1998. D'autres sondes marquantes ont suivi : Dawn, Smart 1 et Hayabusa. Permettant non seulement aux Américains mais aussi aux Européens et aux Japonais de maîtriser cette technologie issue de la recherche russe des années 1960. Le principe de fonctionnement de cette propulsion électrique est de créer un plasma (gaz de particules électriquement chargées) puis de l'accélérer via des champs électriques ou magnétiques. L'accélération des ions entraîne une réaction de sens opposé qui constitue la propulsion. Juste avant la sortie, les ions récupèrent leurs électrons afin de recréer la neutralité électrique tant du véhicule que du carburant éjecté. Aujourd'hui le carburant le plus couramment utilisé est le **xénon**. Pour effectuer l'ionisation, il faut tout de même disposer d'énergie électrique. Elle est pour l'instant obtenue via des panneaux solaires mais des systèmes à base de réactions nucléaires sont envisagées comme alternative : soit avec des générateurs thermoélectriques – l'alimentation en chaleur est assurée par la désintégration d'un isotope radioactif, soit avec des réacteurs nucléaires à fission.

Deux technologies majoritaires

On distingue couramment deux options technologiques principales dans la propulsion électrique. D'une part les

moteurs ioniques à grilles et d'autre part les moteurs à effet Hall. Dans le premier cas, le champ électrique est créé par deux grilles polarisées. Dans le second, la poussée est plus importante et le champ électrique est issu à la fois d'un champ magnétique induit par deux bobines placées au centre et à l'extérieur d'une cavité cylindrique et d'une différence de potentiel entre une anode et une cathode. L'option ionique à grille est très économe en carburant mais la poussée y est inférieure et plus longue à être amorcée. Elle est donc plutôt préférée pour les longues missions interplanétaires. D'autres variantes sont à l'étude, dont la plus puissante est le propulseur magnétoplasmodynamique (MPD). Il vise à supprimer les collisions entre électrons, atomes et ions qui sont générées dans un moteur à effet Hall du fait de la forme circulaire du courant en créant un courant aligné avec le champ électrique. Le fonctionnement est basé sur la combinaison de deux champs (électrique et magnétique) pour fournir une force de Lorentz axiale. Ce propulseur possède plusieurs avantages : la poussée peut être ajustée par la variation du courant électrique ou la quantité de gaz injecté et les poussées sont 100 fois plus importantes qu'un moteur ionique de base. Les inconvénients ? Il nécessite des courants électriques de plusieurs centaines de kilowatts et doit donc faire appel à une source nucléaire et il érode les éléments du moteur comme les électrodes beaucoup trop vite.

Toujours plus grand !

L'un des projets les plus avancés en matière de propulsion MPD est celui de la société Ad Astra Rocket en contrat avec la Nasa dans le cadre du programme NextSTEP (Next Space Technologies for Exploration Partnerships) pour le développement d'un propulseur MPD baptisé VASIMR VX200. En 2017, l'étape des 10h de fonctionnement à 100kW a été validée. Les tests de 2018 doivent valider un fonctionnement de 100h continues.

Mais des records de poussées ont aussi été enregistrés pour un propulseur à effet Hall. Le propulseur X3 étudié par une équipe de l'Université du Michigan en partenariat avec Aerojet Rocketdyne pour le compte de la Nasa (là aussi dans le cadre du programme Next), a réussi ses essais en 2017 avec 10h à 100kW pour une poussée de l'ordre de 5,5 Newtons. Cette année sera aussi pour ce moteur l'année du test des 100h. Reste que les moteurs actuellement utilisés sont encore modestes même si déjà bien plus performants que celui de la sonde Dawn ou Smart 1. Ainsi, le nouveau moteur ionique d'Aerojet Rocketdyne's qui était prêt pour les tests en vol et qui devait équiper la mission DART (Double Asteroid Redirection Test) en 2021 de la Nasa – annulée fin 2017 - présente pour l'instant une puissance maximale de 7kW.

Toujours plus petits !

Si d'un côté on recherche des poussées toujours plus grandes, on recherche aussi à rendre cette technologie vraiment plus compacte et encore plus économe pour pouvoir équiper des satellites de très petites tailles : du Cube-sat aux microsattelites en passant par les nanosatellites.

Cela passe par des évolutions comme celle proposée par le laboratoire Icare du CNRS avec un propulseur de Hall « sans parois » : les ions sont produits et accélérés hors du réacteur afin d'éviter le contact entre plasma et parois du moteur pour éviter l'usure des composants. Une technologie qui permettrait aussi d'alimenter le moteur en électricité en courant continu directement depuis les panneaux solaires sans dispositif de conversion du courant. Les recherches s'orientent aussi vers d'autres carburants que le xénon et sur des nanotechnologies.

Ainsi, de son côté, la société américaine Accion Systems a dévoilé un moteur basé sur une puce de propulsion de la taille d'une pièce de moins de 2cm munie d'une centaine de micropropulseurs. Assemblées en tuile, 36 puces forment le TILE (Tiled Ionic Liquid Electrospray) qui peut servir de base de propulsion pour des micro-satellites (200kg max). Le carburant est un sel liquide non toxique qui n'a pas besoin d'être stocké dans des chambres pressurisées et

qui évite de nombreux autres éléments comme une grande chambre d'ionisation ou des cathodes externes. L'alimentation se fait directement via une batterie alimentée par les panneaux solaires du satellite. A l'été 2017, Accion Systems a trouvé un partenaire dans le fabricant de plateformes satellitaires York Space Systems pour pouvoir fournir dès qu'il est prêt son moteur lors de missions spatiales réelles. « Et pourquoi pas dans 15 ans, faire du TILE le support à véhicule voyageant vers Mars... » se prend à rêver Natalya Bailey, PDG et co-fondatrice d'Accion Systems.

Toutes ces avancées montrent que, si en matière de propulsion ionique, les propulseurs de Hall sont encore majoritaires aujourd'hui, les progrès de la micropropulsion pourraient bien marquer l'avènement d'une nouvelle ère spatiale où sondes d'explorations et satellites seraient beaucoup plus petits mais beaucoup plus nombreux, moins chers à la fabrication, plus facilement remplaçables et voleraient en flotte.

Sophie Huguin

30/05/2018

PROPULSION CHIMIQUE : MÉTHANE À TOUS LES ÉTAGES

On a beau chercher tous azimuts, on n'a pas encore fait mieux que la propulsion chimique pour envoyer des charges conséquentes dans l'espace. Les technologies à présent matures, s'orientent désormais vers un changement de carburant pour migrer vers le méthane et cherchent l'optimisation tant pour la fabrication que pour le fonctionnement avec des moteurs réutilisables.

C'est le grand dada du moment : utiliser du méthane comme **ergol** pour les **futurs moteurs chimiques des lanceurs**. Pourquoi le méthane ? Car même s'il est moins puissant que **l'hydrogène**, il est beaucoup moins coûteux et facile à manipuler – il est liquide à -161°C contre -253°C pour l'hydrogène. Cette température, proche de l'oxygène liquide (183°C), permet des simplifications dans l'architecture du moteur pour le stockage des deux ergols. En effet, il peut par exemple être utilisé pour pressuriser les réservoirs d'ergols (pressurisation autogène), ce qui élimine le besoin de systèmes de pressurisation complexes et coûteux à base d'hélium par exemple. En outre, le méthane est six fois plus dense que l'hydrogène, il prend donc six fois moins de place. Les étages de fusées pourront être plus compacts et potentiellement plus faciles à récupérer pour être réutiliser.

L'Europe mise sur Prometheus

Pour les lanceurs européens, dont Ariane 6, le moteur phare sera Prometheus (pour Precursor Reusable Oxygen METHane cost Effective propUlsion System) qui, comme son acronyme anglais l'indique, est un moteur qui fonctionne à l'oxygène et au méthane et qui doit être réutilisable. Il vise bien sûr aussi une réduction des coûts ! Prometheus disposera d'une poussée variable d'un maximum de 100t et Ariane 6 décollera équipée de 7 d'entre eux. Les premiers essais d'allumage ne sont prévus qu'en 2020 et

l'intégration sur les lanceurs à l'horizon 2030. La série des moteurs actuels, Vulcain, a donc encore de beaux jours devant elle.

Prometheus est en début de fabrication dans l'usine d'ArianeGroup à Vernon (Eure) où les premières pièces fabriquées par fabrication additive sont sorties l'été dernier (générateur de gaz). L'utilisation de la fabrication additive et un dispositif industriel conçu pour la production de 50 moteurs par an doit permettre de diviser par 10 le coût de production par rapport à Vulcain 2. Portant le tarif d'un moteur à « seulement » 1M€.

Les Américains aussi carburgeront au méthane

L'Europe n'est pas la seule à opter pour le méthane. Blue Origin et son moteur BE4 avance aussi. La société fondée par Jeff Bezos, le PDG d'Amazon, a en effet annoncé en janvier 2018, qu'un nouveau test au feu du moteur BE-4 a été effectué avec succès après celui déjà annoncé en octobre 2017.

Ce moteur doit notamment équiper le lanceur lourd New Glenn dont le premier vol est prévu en 2020. Il est toujours en compétition pour équiper la future fusée réutilisable Vulcan de United Launch Alliance (ULA). La décision devrait être prise dans les prochains mois. Le test, réalisé à pleine puissance, a montré que les objectifs d'impulsions spécifiques étaient même dépassés. Cet essai avait notamment pour but de vérifier la réutilisation des pompes hydrostatiques et la stabilité des processus de marche/arrêt. Une variante de ce moteur le BE-4U doit en effet pouvoir équiper l'étage supérieur de la New Glenn et permettre ainsi la mise en orbite de plusieurs charges utiles différentes. La New Glenn, qui doit être disponible en version deux ou trois

étages, dont le premier réutilisable sera propulsée par une poussée de l'ordre de 176 tonnes (3,85 millions de livres) grâce à 7 BE-4 et devrait pouvoir mettre en orbite basse un peu moins de 50t.

De son côté, Space X travaille à son Raptor. De multiples versions de ce moteur fonctionnant au méthane ont été présentées depuis les débuts du projet en 2009. La version en cours, dont les tests d'allumage sur banc d'essais ont commencé, est finalement la plus petite et doit servir de base à la propulsion de la BFR (Big Fucking Rocket), un lanceur très lourd destiné aux lancement nécessaires aux voyages interplanétaires qui serait pourvu d'une trentaine de Raptors.

Plusieurs autres projets sont aussi en cours ailleurs dans les grandes nations spatiales comme en Russie ou en Chine.

Plus efficace et moins chère

Pour rendre la propulsion chimique plus efficace et attractive, la tendance est à l'optimisation. Du côté d'Ariane, il s'agit par exemple du moteur Vinci pour l'étage supérieur des lanceurs moyens/lourds de l'ESA qui doit apporter plus de polyvalence à Ariane 6. Fonctionnant à base d'ergols liquides (hydrogène et oxygène), il aura par exemple une capacité d'allumages multiples : il pourra se ré-allumer en vol autant de fois que nécessaire pour placer plusieurs charges utiles en orbite à différents endroits, selon les besoins. Une propriété essentielle à l'heure du développement des constellations de satellites. Vinci subit actuellement ses derniers tests avant essais en vol et la fabrication des premières pièces des moteurs de vol sont déjà sorties des usines.

Pour la Nasa, la future « Méga » fusée SLS qui doit être capable d'emporter une capsule Orion avec des passagers pour 2020 sera équipée de moteurs RS25 d'Aerojet Rocketdyne un peu revisités.

Le dernier test effectué en décembre 2017 visait ainsi à valider l'un des quatre contrôleurs du moteur qui optimise

son fonctionnement avec les données des ordinateurs de vols et les paramètres mesurés dans le moteur. L'essai visait aussi à valider la plus grande pièce de moteur de fusée imprimée en 3D par la Nasa : un système amortisseur d'effet POGO (vibrations provoquées par les fluctuations de poussée du moteur qui peuvent entrer en résonance avec la structure et détruire le lanceur). La fabrication additive doit permettre de réduire les coûts de fabrication du moteur RS-25 de l'ordre de 30 %. Rien que pour l'amortisseur POGO, imprimée en deux parties par fusion laser, le nombre de pièces est passée de 28 à 6 et le nombre de soudures originelles de 123 à 27.

Le chimique fait aussi dans le petit

Les innovations en matière de propulsion chimique ne sont pas réservées aux très gros moteurs. Des solutions voient aussi le jour pour les nanosatellites. Notamment via des systèmes de propulsion par gaz froid miniaturisés. Ainsi, le GomX-4B de l'ESA, lancé en février 2018, est muni de deux paires de petits propulseurs qui ressemblent à des briquets de cigarettes.

La mission GomX-4 vise à tester cette propulsion et la communication par radio entre plusieurs satellites (dans ce cas GomX-4B et GomX-4A). Les propulseurs fabriqués par le suédois NanoSpace doivent permettre d'ajuster les mouvements du satellite à des vitesses de l'ordre de 15m/s. Deux réservoirs de butane liquide pressurisés sont reliés aux deux paires de propulseurs. Il n'y a pas de combustion, la poussée est assurée lorsque le liquide pressurisé relâché à l'extérieur se détend pour devenir un gaz. Le butane liquide, 1000 fois plus dense que son gaz, peut être stocké dans un très petit volume. Chaque propulseur fournit une poussée de 1 millinewton, ce qui reste suffisant pour faire bouger le satellite de 8 kg. L'ensemble, chambre, capteurs et tuyères tient sur dans un élément de 1x2 cm et d'1mm d'épaisseur. Avec le vol de GomX-4B, NanoSpace vise à démontrer les différentes variantes de poussées possibles : longues, courtes, par impulsion, dirigées vers le haut, le bas et ce dans de réelles conditions spatiales.

Sophie Hoguin

30/05/2018

PROPULSION SPATIALE : LA GRANDE FOIRE AUX IDÉES !

En matière de propulsion spatiale, il y a ce qui marche et ce qui pourrait marcher. Dans la deuxième catégorie, toutes les idées, tous les concepts, tous les projets sont les bienvenus. L'imagination des ingénieurs, milliardaires amateurs ou physiciens rêveurs est sans limite. Et cet article est très loin d'en faire un tour exhaustif...

Les lasers focalisent toujours beaucoup d'attention et sont à l'origine de plusieurs concepts de propulsion spatiale. Cependant, leur utilisation concrète est encore assez limitée. Les premières théories et essais de propulsion laser ont vu le jour dans les années 1970. Mais pendant plus de 25 ans, la technologie laser n'était pas encore assez mûre pour que les concepts inventés puissent être réellement testés.

La propulsion par ablation laser

Au départ, la [propulsion par ablation laser](#) s'appuyait sur une source laser émise depuis la Terre ou un satellite, qui, concentrée par un miroir fixé sur le véhicule spatial, était envoyée soit dans une chambre de combustion contenant un ergol (l'air), soit sur un matériau. Dans les deux cas, il y a apparition d'un plasma qui est ensuite éjecté par une tuyère pour créer la poussée. Très vite, on comprend qu'il est préférable d'embarquer directement le laser dans le véhicule. Selon les périodes, l'activité de recherche dans ce domaine est plus ou moins abondante. Depuis, l'apparition des [laser pulsés micro et maintenant femtosecondes](#), les recherches ont repris et portent notamment sur un couplage d'une impulsion laser et des méthodes utilisées en [propulsion électrique](#) pour optimiser les plasmas et la poussée. Des systèmes de micro-propulsion ont vu le jour et peuvent permettre par exemple de contrôler l'altitude ou l'orientation d'un satellite.

Le Lightcraft, un véhicule détonnant !

Le laser a aussi été à la base de concepts plus ou moins réussis. Parmi eux, le Lightcraft. Un véhicule spatial ou aérien propulsé par un faisceau laser via la création d'un plasma et de détonations à l'extérieur du véhicule. La source d'énergie de propulsion est externe. Conceptualisé en 1976, quelques prototypes seront construits dans les années 1980 au sein de laboratoires de défenses américains mais il faudra attendre les années 1990 pour voir un véritable projet prendre forme. Le record atteint par un tel engin restera en octobre 2000, 71m et 10,5 secondes de vol via un laser au CO2 de 10kW basé au sol. L'engin emportait alors un carburant d'ablation sous forme de plastique et le corps du véhicule tournait autour de son axe (10000 tr/mn) pour se stabiliser par effet gyroscopique. Le concept a ensuite évolué et le laser remplacé par un maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation), dispositif permettant d'émettre un faisceau cohérent de micro-ondes. La propulsion est alors fournie aussi par des détonations mais en plus, des antennes redresseuses récupèrent une partie de l'énergie micro-ondes et la convertissent en électricité pour alimenter un propulseur MHD (LIEN à faire sur article propulsion électrique). Une partie du faisceau est aussi concentré en pointe sur l'avant du véhicule pour former une torche à plasma qui atténue l'onde de choc à l'avant quand le véhicule atteint des vitesses supersoniques. Mais avec le départ en retraite de son inventeur et développeur, Leik Myrabo, en 2011, Lightcraft Technologies Inc a disparu. De leur côté les Japonais se sont emparés de l'idée du Lightcraft pour concevoir un lanceur constitué d'un tube rempli d'un gaz dans lequel on placerait le véhicule qui serait propulsé par un faisceau laser. Avantages : on peut contrôler tous les paramètres physiques du lancement. Inconvénients : il faut construire un tube de plusieurs centaines de mètres, donc le lieu de lancement sera fixe. Et surtout on est encore loin du démonstrateur

opérationnel. Les essais menés au début des années 2000 sont restés confinés en laboratoire sur des tubes raccourcis avec un projectile de quelques grammes.

Le laser, clé de l'antimatière ?

La propulsion par création d'antimatière est une espèce de Graal. Les obstacles technologiques tombent petit à petit mais il reste encore à résoudre le problème de la source d'énergie, du confinement de l'antimatière et des éventuels rayons gammas produits. Les lasers pourraient faire partie de la solution pour produire de l'antimatière « facilement » depuis qu'on s'est aperçu que certains rayons laser projeté sur des feuilles d'or par exemple produisait en grand nombre de positrons. Un programme de recherche de la Nasa s'est penché sur le sujet de la propulsion antimatière entre 2000 et 2010 mais sans aller jusqu'à une phase de démonstrateur. La création et la manipulation de l'antimatière restant un domaine de recherche constant, cette solution technologique reste toujours prête à sortir des cartons.

La propulsion photonique

Des lasers pour remplacer les radiations du soleil et des étoiles. Une vieille histoire, remise au goût du jour par Philip Lubin et le projet Deep In (Directed Propulsion for interstellar exploration) qui affirme que l'on pourrait atteindre Mars en 3 jours avec un vaisseau de 100kg munis de voiles laser. La feuille de route du projet lancée en 2015-2016 a reçu des soutiens financiers de la Nasa. Depuis mi-2016, le projet est entré dans la phase II des recherches. Mais il reste de très nombreux défis technologiques : de la source du laser, de sa position, de sa puissance à la conformation des voiles.

Voiles solaires : un déploiement très lent

Le concept de voile solaire utilisant les particules éjectées par les étoiles pour pousser des voiles spatiales est né il y a plus d'un siècle dans l'imagination tant des scientifiques que des romanciers mais ce n'est que très récemment, depuis 2010 que l'on a réussi les premiers déploiements de voiles solaires sur des sondes ou des petits satellites.

Les principales difficultés résultent de la complexité à trouver une forme et une taille idéale pour capter le maximum de radiations et en même temps que cette forme et taille soient aptes à réussir le déploiement de la voile une fois en orbite tout en assurant un minimum de manoeuvrabilité. Ce sont les Japonais qui ont réussi à déployer et utiliser la première voile solaire sur leur sonde Ikaros (interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation of the Sun). La mission d'une durée initiale de 6 mois a finalement été poursuivie et l'agence spatiale japonaise (Jaxa) continue de récolter les données de la sonde qui orbite autour du Soleil en 10 mois. Cette mission a confirmé que la propulsion basée sur une voile solaire est envisageable.

La voile d'Ikaros d'une superficie de 173m² a permis d'augmenter la vitesse de la sonde – qui pèse 315kg - d'une dizaine de m/s au bout d'un mois via une poussée mesurée à 1,12 milliNewton. Depuis d'autres démonstrateurs et projets ont vu le jour et les technologies se déploient doucement. L'ESA et le projet européen Graphene Flagship ont par exemple récemment testé l'[utilisation du graphène pour des voiles solaires](#). Le prochain lancement notable devrait être celui de la [Planetary Society et sa LightSail 2](#) en octobre 2018. Le cubesat et sa voile seront lancés en même temps qu'une série de petits satellites des programmes de recherches de l'US Air Force via le premier lancement commercial de la Falcon Heavy de Space X.

L'Em-Drive, l'impossible concept qui défie la chronique

En 2001, un ingénieur britannique, Roger Shawyer, imagine un concept de propulsion spatiale qui générerait une poussée sans éjecter ou absorber de matière. Fonctionnant donc sans carburant. Dans l'EM-Drive (pour Electromagnetic Drive), la force de poussée serait produite par une onde à haute fréquence qui circulerait dans une cavité résonante de forme conique. Le problème : ce concept ne respecte pas l'une des lois piliers de la physique newtonienne, la conservation de la quantité de mouvement. Pour beaucoup de scientifiques c'est une supercherie et ils attendent une explication physique plausible avant de pouvoir y croire.

Les résultats du groupe de travail Eagleworks de la Nasa, même parus dans une revue à relecture, restent difficiles à vérifier et à reproduire et pourraient être le résultat d'erreurs de mesure ou d'artefacts. Pour le moment, seuls les Chinois corroborent de telles données. En décembre 2016, lors d'une conférence de presse, les Chinois ont d'ailleurs annoncé qu'ils avaient réussi à mettre en évidence le phénomène en laboratoire et en orbite sur la station spatiale Tiangong 2 et qu'ils s'attaquaient désormais à intégrer cette technologie sur des satellites. Des annonces, accompagnées de fréquents papiers fournissant des tentatives d'explications, bien souvent fondées sur des phénomènes quantiques invérifiables, relancent régulièrement la controverse. Faisant couler beaucoup d'encre et amenant croyants et sceptiques à s'affronter durement sur les réseaux sociaux.

Par Sophie Hoguein

30/05/2018

POUR ALLER PLUS LOIN

QUELS PLANS DE VOL POUR ALLER SUR MARS ?

Choisir sa trajectoire, la durée du voyage et du séjour sur place, choisir son type de véhicule et la manière dont on quitte la Terre. Autant d'options stratégiques préalables à réfléchir et financer avant même de penser aux défis du voyage et de l'arrivée.

La première contrainte du voyage vers Mars, c'est celle de la fenêtre de départ : avec les technologies actuelles de voyage dans l'espace, le départ n'est possible que tous les deux ans. En effet, la distance entre Mars et la Terre varie entre 56 et 400 millions de kilomètres selon leurs positions sur leurs orbites respectives. Et la bonne conjonction, qui permet un voyage le plus court, c'est-à-dire environ 7 mois, se situe quand Mars et la Terre sont en opposition, soit à peu près tous les deux ans. Du coup pour le retour cette contrainte impose de choisir entre deux versions : soit on reste un à deux mois maximum avant de repartir, soit on est obligé d'attendre plus d'un an et demi sur place.

Quels lanceurs lourds pour quitter la Terre ?

Décoller de la Terre pour aller dans l'espace est presque devenu un exercice de routine aujourd'hui, mais... c'est pour de petites charges utiles comme des satellites ou des sondes. Pour aller sur Mars, il faut propulser hors de l'attraction terrestre entre 300 et 500 tonnes. Deux options sont à l'étude actuellement, soit le lancement de plusieurs modules de l'ordre de 50-100t que l'on assemble dans l'espace ou qui voyagent séparément, soit un vaisseau géant que l'on fait décoller directement depuis la Terre.

La Nasa mise sur le multimodulaire

La première version est celle envisagée par la Nasa. Elle s'appuie sur la mise au point d'un nouveau lanceur lourd, le SLS (Space Launch System) dont les premiers vols avec la capsule de transport de passagers Orion sont planifiés pour fin 2018. Il doit être capable de mettre en orbite basse

terrestre quelques 130t et de lancer vers Mars un module de 50t. La conquête de Mars par la Nasa a été beaucoup revue à la baisse et les derniers objectifs affichés prévoit d'abord la validation de toutes les étapes du voyage spatial via de petites missions (autour de la Lune, en contact avec un astéroïde etc.) avant d'envoyer des hommes vers Mars, un jour. La date de 2030 initialement prévue ayant été repoussée à une date inconnue. Et pour le moment, il n'est pas envisagé de s'installer sur Mars mais seulement de rester en orbite. La Nasa a construit différents projets pour Mars, tablant à chaque fois sur l'envoi de plusieurs modules. Par exemple, l'envoi d'un module autonome qui atterrit et prépare le terrain pour l'arrivée des astronautes, un module de voyage spatial qui reste en orbite et qui sert de base orbitale pour les astronautes. Un troisième module servant à faire la navette entre la planète rouge et ce vaisseau. Le nombre d'astronautes restant restreint à un équipage de 4 à 6 personnes.

Space X et son cargo géant

D'un autre côté, on trouve Space X dont le concept est celui d'un vaisseau unique qui décolle de la Terre, se pose sur Mars et revient. Bref, il reprend le concept de sa fusée réutilisable Falcon 9 et de sa capsule dragon mais à une toute autre échelle. Cet ambitieux projet, présenté fin septembre 2017, même s'il a été revu à la baisse par rapport à l'ITS (Interplanetary Transport System) annoncé en 2016, reste pharaonique.

Le système, baptisé BFR (pour Big Falcon Rocket ou Big Fucking Rocket), est constitué de trois entités : un lanceur lourd (31 moteurs Raptors) capable de mettre en orbite basse 150t, un vaisseau spatial qui peut servir de cargo de marchandises ou de transports de passagers avec 40 cabines de 2-3 places et un système de tanker pour éta-

blir des réservoirs de carburant en orbite et ravitailler le vaisseau hors de l'atmosphère terrestre. Le tout étant récupérable et réutilisable. L'objectif pour la petite firme américaine : remplacer la gamme de fusées et de capsules par un seul système. Et pour rendre cela rentable, la BFR servirait donc à la fois de lanceurs de satellites, de lanceurs et vaisseau pour des missions cislunaires ou dans l'espace proche, de ravitaillement pour la (les) stations spatiales internationales et pourquoi pas de nouveau type de transport terrestre permettant de relier Bangkok-Dubaï en 27mn. Pour ce qui est du calendrier, tout le monde s'accorde à dire qu'il est intenable : le BFR vers 2020, les deux premières missions inhabitées sur Mars en 2022 pour préparer de manière automatisée l'arrivée des premiers voyageurs stellaires en 2024 ! Sachant que le premier pas à franchir pour SpaceX est la validation du lanceur Falcon Heavy (capacité de 30t en orbite basse) dont le premier vol est annoncé en novembre 2017 et la validation d'un vol avec un équipage pour la capsule Dragon.

25/10/2017

D'autres candidats ?

Parmi les autres puissances spatiales, personne n'envisage de s'attaquer au vol habité vers Mars avec la construction d'un lanceur lourd. Car outre les défis technologiques, le coût est un frein indéniable. C'est d'ailleurs pourquoi cet été, la Nasa a annoncé que le vol habité vers Mars avec colonisation était remis aux calendes grecques. Et si le SLS et la capsule Orion ont été maintenu malgré leur coût annoncé de 2 Md\$ de conception et d'un milliard de dollars pour chaque lancement c'est parce qu'ils doivent servir au nouvel objectif américain d'installation sur la Lune. L'outsider Mars One, une entreprise privée fondée par le néerlandais Bas Lansdorp, dont la mission prévoit une installation sur Mars sans retour sur Terre, prévoit quant à elle d'utiliser le lanceur SpaceX Falcon Heavy pour sortir ses différents modules de l'atmosphère terrestre et le projet de Lockheed Martin de camp martien s'appuie sur le SLS et la capsule Orion – capsule dont la conception est d'ailleurs assurée par Lockheed Martin.

Sophie Hoguin

ESPACE ET ÉNERGIE : LA FUSION PLUS QUE JAMAIS DANS LES TUYAUX

A l'occasion de The Dawn of Private Space Science Symposium qui s'est tenu à New York début juin, Michael Paluszek, président de Princeton Satellite Systems, est venu présenter l'avancée de ses travaux en matière de propulsion par fusion nucléaire.

Une idée née dès les années 1960 mais qui a dû attendre la fin de la première décennie des années 2000 pour espérer réellement pouvoir aboutir. Alors que l'étude de la fusion comme nouvelle source d'énergie prend la forme en Europe d'un projet titanesque et extrêmement coûteux à travers ITER, qui vise la production de plusieurs centaines de mégawatts, aux Etats-Unis certains se penchent sur des dispositifs beaucoup plus petits et du coup beaucoup moins chers. C'est le cas par exemple de Helion Energy qui s'appuie sur une technologie basée sur la fusion Deutérium / Helium-3 et qui espère installer un pilote de 50MW vers 2019 et sa première usine opérationnelle vers 2022. C'est aussi le cas de Tri Alpha Energy qui étudie la fusion de protons sur des noyaux de bores et qui dispose de nombreux fonds privés lui ayant permis de construire une des plus grandes installations du monde équipée d'un confinement magnétique pour les plasmas.

La Nasa croit dans la fusion

La Nasa s'est toujours intéressée à l'avancée de la fusion. Elle a ainsi participé en 2014 au lancement d'Helion Energy et suit de près l'avancée des travaux de Princeton Satellite Systems petite entreprise spécialisée dans le contrôle et la simulation pour l'aérospatiale. Elle lui a déjà attribué trois subventions d plusieurs centaines de milliers de dollars via différents programmes de soutien à l'innovation ou de transfert de technologies (Small Business Technology Transfer (STTR) programs et NIAC -Nasa Innovative

Advanced Concepts). Mais comme le précise Michael Paluszek, la Nasa ne finance que certaines parties du développement du système et non la totalité si bien que l'avancée des travaux est toujours dépendante d'une levée de fonds qui reste aléatoire. Ainsi, si le projet avance bien et que les chercheurs sont confiants, pensant pouvoir passer à la phase 3 sur les 4 nécessaires à démontrer la faisabilité réelle de la fusion, il faudra encore 5-6 ans de travail et 50 millions de dollars pour arriver à un premier démonstrateur et au moins autant de temps pour que la technologie soit intégrée à une mission spatiale.

Des minis réacteurs de quelques mégawatts

Michael Paluszech met en avant les avantages des petits réacteurs à fusion : en ne visant la production que d'une dizaine de mégawatts par réacteur, ceux-ci deviennent tout de suite beaucoup plus petits, légers et faciles à construire et à lancer dans l'espace autant pour de futures missions habitées que pour des robots et des sondes. La propulsion par fusion vise à produire 1 kW par kilo de matériel, aussi un tel réacteur pèserait 10-11 tonnes et occuperait à peu près 4-8 mètres de long sur 1,5 m de diamètre. Bien sûr, précise-t-il pour des engins spatiaux plus grands, il faudrait combiner plusieurs réacteurs, mais, dit-il, cela a un avantage certain en terme de fiabilité, si un réacteur est endommagé, les autres peuvent permettre d'assurer tout de même la mission.

Le rôle des ondes radio basses fréquences

Un des obstacles rencontrés jusqu'alors pour le développement de la fusion est qu'elle nécessite des très hautes températures et pressions pour l'initier si bien que les technologies utilisent plus d'énergie qu'elles n'en produisent.

Princeton Satellites Systems utilise des ondes radio ultra basses fréquences pour chauffer un mélange de deutérium (atome d'hydrogène muni d'un neutron en trop) et d'Hélium-3 (atome d'hélium auquel il manque un neutron) qui est confiné par des champs magnétiques sous forme de plasma dans un anneau. Ce plasma est en rotation et une partie peut être dirigé vers une tuyère pour assurer la poussée. Les vitesses pourraient atteindre 25 000 km/s selon les concepteurs. Ce qui aurait par exemple réduit la durée du voyage de New Horizon vers Pluton de 9 à 4 ans en lui laissant encore de la puissance pour envoyer 100 000 fois plus de données par seconde que ce que la sonde a pu faire. Cela ouvre aussi la possibilité de concevoir une fusée capable de dévier un astéroïde.

19/06/2017

Encore des inconvénients majeurs

Il reste encore plusieurs inconvénients à cette technologie. D'une part, il faut se procurer de l'hélium-3 qui est extrêmement rare sur Terre (alors qu'il est courant sur la Lune et que son exploitation est d'ailleurs envisagée) et que l'on produit surtout dans des réactions nucléaires et dont les réserves aujourd'hui sont gérées de manière très confidentielles par les Etats-Unis et la Russie. Un obstacle pourtant en grande partie levé sur le système développé par Helion Energy qui a mis au point sur ses prototypes un cycle de l'hélium permettant d'en auto-produire lui-même. Ensuite, les ondes basses fréquences utilisées ont un faible pouvoir de pénétration dans le plasma ce qui limite le diamètre du réacteur autour d'un mètre. Enfin, la réaction produit encore des radiations ionisantes (neutrons et rayons X), nécessitant un bouclier de protection. Cependant, Princeton Satellite Systems a prévu d'utiliser en partie ces rejets pour alimenter un circuit thermodynamique secondaire intégré directement dans le bouclier. Si bien que le bouclier ne constitue plus un élément supplémentaire.

La vidéo de présentation des recherches de Princeton Satellites :

https://www.youtube.com/watch?v=51_jUx3WiTM

Sophie Hoguin

PARIS AIR LAB : LES VÉHICULES VOLANTS DU FUTUR !

Cette année, le hall Concorde accueillera la première édition du Paris Air Lab dans le cadre du salon du Bourget. Un espace de 3000 m² qui mettra en avant la recherche, l'innovation et la prospective de l'aéronautique. Notamment, plus de 70 start-ups se succéderont du 19 au 25 juin.

Paris Air Lab est une vitrine de l'innovation aéronautique, spatiale et numérique. Plus de 70 startups se relaieront toute la semaine, aux côtés d'une douzaine de groupements industriels, agences spatiales et centres de recherche qui présenteront leurs programmes d'innovation collaborative.

Chaque jour, 10 start-ups seront mises en avant. Elles parleront de véhicules du futur, d'intelligence artificielle, de **big data**, de **drones** et de satellites... Mais aussi de transfert, d'agrégation et d'analyse de données en temps réel. L'industrie 4.0 sera aussi au cœur de ces innovations.

Zoom sur quelques véhicules volants du futur !

La société slovaque Aeromobil présentera son nouveau modèle de voiture volante le lundi 19 juin. Une voiture de deux places qui roule sur route avec ses ailes pliées et se transforme en véhicule volant en moins de trois minutes. Dans les airs, elle atteint une vitesse maximale de 360 km/h grâce à son moteur à essence de 100 chevaux. Son autonomie en vol prévue est d'environ 700 km. L'Aeromobil nécessite une piste de 250 mètres pour décoller et de 50 mètres pour atterrir. Elle sera commercialisée en 2020 à plus d'un million d'euros.

Le 21 juin, XTI Aircraft exposera son TriFan 600. Il s'agit d'un aéronef innovant de six places. Le TriFan 600 décolle et atterrit verticalement comme un hélicoptère. Ses concepteurs promettent une autonomie, une vitesse et un confort

comparable à un jet d'affaires. Avec son système de **propulsion hybride-électrique**, il atteindra une vitesse maximale de 625 km/h. Il pourra s'élever à une altitude de plus de 10.000 mètres en seulement 11 minutes.

Vendredi 23 et samedi 24 juin, viendra le tour de Flike. Il s'agit d'un trichoptère, semblable à une moto volante. Ce véhicule est capable de transporter une personne. La vitesse du Flyke a été limitée à 100 km/h et son altitude maximale à 30 mètres. Avec un moteur hybride, le Flike dispose d'une autonomie de 60 minutes en vol et peut transporter une charge de 100 kg.

Par **Matthieu Combe**, journaliste scientifique

12/06/2017

L'ESPACE : UN MARCHÉ PORTEUR POUR L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

Les ambitions retrouvées de la Nasa, l'agence américaine de l'espace, offrent de nouvelles perspectives à l'industrie nucléaire mondiale. Les missions d'exploration spatiale, de plus en plus lointaines, ont des besoins en énergie auxquels la filière nucléaire est aujourd'hui seule à pouvoir répondre.

Le **Département américain à l'Énergie** (DOE) a annoncé en grande pompe fin décembre la production de 50 grammes (l'équivalent d'une balle de golf) de **plutonium 238**, destiné à la **Nasa**. Cette annonce marque une nouvelle étape dans la recrudescence des projets de la communauté scientifique américaine liés à l'exploration spatiale.

Plutonium 238

Le premier robot propulsé au plutonium s'est posé sur la planète Mars lundi 6 août 2012. *Curiosity*, c'est son nom, est un véhicule de la taille d'une petite voiture, qui prélève sur Mars des échantillons de roche et en étudie la surface. Tous ces systèmes sont alimentés en énergie et en chaleur par un générateur thermique à radio-isotope, contenant 4,8 kg de Plutonium 238, et fournissant 110-115 W de courant continu, produisant 2,7 kWh par jour. Cet isotope développe des propriétés qui lui ont permis d'obtenir rapidement les faveurs des experts. Avec une « demi-vie » de 87,7 ans - la demi-vie d'une substance radioactive est la période durant laquelle elle perd la moitié de sa radioactivité - le ²³⁸Pu libère suffisamment d'énergie et de chaleur pour alimenter les sondes d'exploration pendant plus d'un siècle. C'est ainsi que *Voyager1*, la sonde spatiale lancée en 1977 continue d'envoyer des données alors qu'elle s'enfonce toujours plus dans l'espace. « *Le ²³⁸Pu a démontré qu'il était une source d'énergie efficace là où l'utilisation de l'énergie solaire s'avère impossible. Son utilisation comme*

source d'énergie pour les engins spatiaux a été développée par les États-Unis et la Russie qui ont consacré plusieurs centaines de millions de dollars à son développement et sa production », rappelle la Société française de l'énergie nucléaire (SFEN).

Risques

L'utilisation de plutonium par la Nasa ne fait pas que des heureux. D'aucuns dénoncent le risque de propulser des engins équipés de tels isotopes. C'est le cas du réseau *Sortir du nucléaire* qui explique : « *Le problème est celui d'accidents impliquant des vaisseaux spatiaux nucléaires, avec des relâchements de radioactivité touchant les humains et les autres formes de vie sur Terre* ». Ce que craint avant tout l'ONG, c'est le risque d'accident sur le pas de tir : « *La NASA, avant le lancement de Curiosity en novembre 2011, reconnaissait que si la fusée le transportant explosait lors du lancement à Cap Kennedy, du plutonium serait relâché, affectant une zone d'un rayon de 100 km, et si la fusée, échouant à échapper à la gravité de la Terre, retombait dans l'atmosphère avec Curiosity et se désintégrait, du plutonium serait alors dispersé sur une grande partie de la Terre entre environ 28 degrés de latitude nord et 28 degrés de latitude sud. Ceci comprend l'Amérique Centrale, la plus grande partie de l'Amérique du Sud, l'Asie, l'Afrique et l'Australie* ». Pour rappel, dans sa déclaration d'impact environnemental consacrée à *Curiosity*, la NASA évaluait que les chances étaient de moins de 1 sur 220 pour que du plutonium soit dispersé durant sa mission.

Risque de pénurie

Les risques liés à l'utilisation du Plutonium 238 pourrait être drastiquement réduit pour une raison inattendue : sa pénurie. En effet, la production du ²³⁸Pu reste compliquée et coûteuse comme le rappelle la SFEN : « *D'abord, vous avez besoin d'un réacteur avec le bon flux neutronique et*

de suffisamment de neptunium 237, matière première du plutonium. Vous avez ensuite besoin d'une petite usine de retraitement nucléaire pour séparer chimiquement le plutonium du combustible hautement radioactif. Au fil des ans, cet isotope a été produit par un certain nombre de pays, dont les États-Unis, la Russie et le Royaume-Uni ». Or, les stocks s'amenuisent et c'est pourquoi le DOE a décidé de relancer la production. Pour autant, de nombreux observateurs estiment qu'elle ne sera pas suffisante pour couvrir les besoins des différents projets en cours de développement.

L'alternative Américium 241

L'Europe s'intéresse de près à un autre isotope qui pourrait se substituer avantageusement au 238Pu : l'américium 241. Il est notamment présent en infime quantité (de l'ordre d'1 microcurie) dans les détecteurs de fumées installés dans les immeubles pour son rayonnement ionisant alpha. En grande quantité la production de chaleur est comparable à celle du 238Pu. L'Américium 241 peut être trouvé dans les déchets générés par les réacteurs nucléaires, mais son extraction est compliquée et coûteuse. Une autre piste consiste à exploiter la désintégration bêta du 241Pu. Lorsqu'un combustible nucléaire est usé, il est retraité pour séparer le plutonium, de l'uranium et des produits de fission. La France s'est faite une spécialité de ces opérations, et réutilise le plutonium pour fabriquer un nouveau combustible : le MOX. Le stockage à long terme de plutonium civil retraité pourrait permettre de produire de l'américium 241 isotopiquement pur, via la désintégration bêta. Cet américium a l'avantage d'être récupéré dans le plutonium stocké grâce à un procédé chimique relativement simple et rentable, sans travailler à partir du combustible usé hautement radioactif. Au Royaume-Uni, ce sont pas moins de 100 tonnes de plutonium recyclé qui pourraient être ainsi valorisées.

Adaptation

L'américium 241 se distingue du 238Pu par une demi-vie plus longue (432 ans) mais une puissance thermique plus faible 0,1 W/g (contre 0,4 W/g). Cela signifie qu'en cas de

recours à l'²⁴¹Am, les caractéristiques techniques des appareils devront être adaptées en fonction de cet état de fait. En 2009, l'Agence spatiale européenne (ESA) a financé un programme qui a établi la faisabilité de la production d'²⁴¹Am, réalisé des pastilles-tests, développé et testé de nouveaux générateurs thermoélectriques adaptés à la température de l'américium 241. Actuellement, le programme européen met l'accent sur le développement de générateurs thermoélectriques à radio-isotopes évolutifs d'une puissance électrique de 10 à 50 W. Des niveaux encore insuffisants pour alimenter des robots comme *Curiosity*, mais déjà aptes à sustenter de petits engins spatiaux. En attendant mieux...

Romain Chicheportiche

21/01/2016