

TIPE de sciences industrielles

Table des matières

<i>Table des matières</i>	2
<i>Introduction</i>	3
<i>Présentation</i>	4
Historique	4
La propulsion photonique	5
Pratique.....	5
Théorie.....	6
Les intérêts	7
Stabilisation des satellites et des sondes	7
Prévention des vents solaires.....	7
Interception de comètes et de météorites	8
<i>Fonctionnement</i>	9
Les différentes structures de voiles	9
Stabilisation selon trois axes	9
Stabilisation par rotation	11
Les techniques de pilotage	13
<i>Conclusion</i>	16
<i>Annexe</i>	17
Bibliographie	17

Introduction

C'est en surfant sur le WEB que nous sommes arrivés sur un site dont le sujet portait apparemment sur des vaisseaux de science fiction. Après avoir approfondi notre recherche, nous nous sommes aperçus que ces engins, qui s'appelaient voiliers solaires n'étaient pas si futuriste que cela pouvait laisser paraître au premier abord. Nous avons donc décidé de faire profiter de notre découverte à travers notre TIPE et en élaborant un site WEB.

Nous avons donc rassemblé toutes les informations que nous avons pu trouver à travers le WEB où nous avons réussi à prendre contact avec certaines personnes compétentes qui nous ont fait parvenir par la poste des documents écrits.

Le dossier qui va suivre est donc un rassemblement des informations concernant les voiliers solaires. Malheureusement, vous n'y retrouverez que peu d'information sur des réalisations, le seul projet ayant une réelle existence, Znamya, est assez avare en renseignement.

Nous espérons tout de même vous faire rêver par le côté tout à fait réalisable de ses vaisseaux spatiaux.

It is while surfing on the WEB that we arrived on a site whose subject related apparently to vessels of science fiction. After having looked further into our search, we realized that these machines, which were called solar sail were not so futuristic that that could let appear with the first access.

We thus decided to make benefit from our discovery through our TIPE and by working out a Web site. We thus gathered all information which we could find through the WEB where we succeeded in contacting some qualified people who sent us by the post office written documents.

The file which will follow is thus a gathering of information concerning the solar sails. Unfortunately, you will find there only little information on achievements, the only project having a real existence, Znamya, is rather sparing of information.

All the same, we hope to make you dream by the completely realizable side of those spaceships.

Présentation

Historique

En 1616 **Kepler** observe que les traînées de poussières produites par les météorites ne suivent pas la trajectoire de ces dernières mais sont légèrement décalées. Il en tire la conclusion que les rayons lumineux sont susceptibles de produire une force sur les corps célestes.

Mais, il faut attendre 1873 pour que les travaux de **Maxwell** sur l'électromagnétisme permettent d'expliquer ce phénomène.

Puis en 1889, deux romanciers de science-fiction français (**Faure** et **Grafini**) ont l'idée d'un vaisseau spatial utilisant un immense miroir pour se déplacer.

La suite des travaux se passe principalement en Russie :

- En 1901, **Pietr Lebedev** met en évidence la pression des radiations lumineuses.
- Ces travaux sont repris en 1915 par **Yakov Pereelman**.



J.C. Maxwell

Les véritables travaux scientifiques sur les voiles solaires commencent dès 1924 avec **Fridrikh Tsander** qui annonce déjà :

« Pour les vols dans l'espace interplanétaire, je travaille sur l'idée d'utiliser de formidables miroirs faits de feuilles extrêmement minces et capables d'obtenir des résultats intéressants ».

Puis viennent les travaux de **Konstantin Tsiolkovski** (fondateur de la recherche aérospatiale soviétique puis mondiale à partir de 1924) :

« La Terre est le berceau de l'Humanité, l'Homme n'est pas fait pour vivre dans un berceau »

Et c'est seulement en 1951 qu'est publié le premier article scientifique traitant des voiles solaires : « *Clipper Ships of Space* » de **Carl Wiley**, dans la revue *Astounding Science Fiction*.

C'est en 1958 qu'apparaît pour la première fois le terme *Voile solaires* (*solar sail*) inventé par l'ingénieur américain **Garwin** dans une étude détaillée sur le sujet publiée dans « *Jet Propulsion* ».

Et cet événement marque le début d'une folle course dans ce domaine entre l'URSS, les Etats Unis et l'Europe.

En 1963, paraît la nouvelle d'Arthur Clarke « *The wind from the sun* » contant une course de voiliers solaires entre la Terre et la Lune.

Durant la même année Pierre Boule publie «*La planète des singes*», roman dans lequel il met en scène des voiliers solaires. Mais malheureusement, ils seront absents du film du même nom.

En 1970 les voiles solaires deviennent réalité avec la sonde Mariner 10 qui utilise la propulsion photonique pour se stabiliser durant son vol vers Mercure.

En 1973, la NASA et ESA engagent des travaux sur les voiliers solaires afin de rejoindre la comète de Halley en 1986. Ce projet sera abandonné en 1977.



Pierre Boule

Depuis de nombreuses associations sont créées et ont pour but de construire un voilier afin de participer à la course Terre Lune appelée la Luna Cup.

- WSF (World Space Foundation) en 1979
- En France création en 1981 de l' U3P (Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique)
- Au Japon la SSUJ (Solar Sail Union of Japan) en 1982
- En 1990 en Espagne la CVS (Comicion Vela Solar) qui s'associe à l'U3P
- Toujours en 1990 création du SRC (Space Regatta Consortium)
- En 1992 création du VSE (le Voilier Solaire européen) chargé de concevoir le voilier solaire européen

Enfin le 4 février 1992 déploiement par les Russes du miroir solaire Znamia, qui préfigure les futures voiles solaires.

La propulsion photonique

Pratique

Le Soleil émet des photons, c' est-à-dire une onde électromagnétique assimilable à des grains de lumière; il émet aussi entre autres éléments, des noyaux lourds, des électrons et des protons, qui constituent le vent solaire.

Une erreur courante est d' associer vent solaire et propulsion photonique. Ils n' ont aucun lien. Ce sont les photons qui, par leur réflexion sur la surface d' une voile, lui communiquent une partie, faible mais constante, de leur énergie. Les noyaux lourds du vent solaire se propagent à des vitesses de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres par seconde le long des lignes des champs magnétiques interplanétaires alors que les photons solaires se déplacent, eux, en ligne directe à la vitesse de 300.000 km par seconde.

Dans l'ensemble de notre système solaire, un véhicule spatial est soumis à l' attraction gravitationnelle du Soleil et des planètes. S' il est à proximité d' une planète, c' est l' attraction gravitationnelle de cette planète qui sera prépondérante. Qu' elle soit en orbite autour du Soleil

(comme le sont les planètes elles mêmes) ou autour d'une planète, une voile solaire est un véhicule spatial qui possède une caractéristique originale par rapport aux satellites habituels : aux différentes forces d'attraction qui s'exercent sur elle et qui déterminent sa trajectoire vient s'ajouter en permanence une force d'origine photonique qui peut être utilisée pour modifier la trajectoire initiale.

Une voile solaire est un miroir qui réfléchit le faisceau lumineux incident. L'action engendre la réaction. La pression photonique exercée par la lumière solaire s'exerce dans une direction perpendiculaire à la surface de la voile. En orientant cette voile, il est donc possible de choisir la direction dans laquelle l'accélération va agir et donc de quelle manière l'orbite sera modifiée.

Théorie

Le soleil, source infinie, rayonne son énergie dans tout l'espace grâce à sa symétrie sphérique.

Malheureusement, son énergie rayonnée est ainsi proportionnelle au carré de la distance qui sépare le point émetteur du récepteur.

Ce qui nous donne la formule :

$$S=3*10^{25}/R^2$$

- S est la puissance rayonnée par unité de surface en W/m²
- R est la distance au soleil (en mètre)

La terre est située à une distance de $R=1.5*10^{11}$ m, ce qui nous donne $S=1358$ W/m².

Si nous utilisons une voile solaire pour aller sur Mars qui est a une distance d'environ 1.5 fois celle de la Terre, la puissance passe a 43% de celle au départ de la Terre. Et si nous décidons de prolonger le voyage jusqu'à Jupiter, qui est, elle, située 5.2 fois plus loin que nous du soleil, nous ne recevrons plus que 3.7% de l'énergie initiale.

Donc cela explique en partie pourquoi l'exploration à l'aide de voiliers solaire ne se fera que dans notre système solaire : plus l'on va loin moins l'énergie reçue est importante.

Nous pouvons calculer, grâce a la formule qui suit la force exercée sur le voilier solaire :

$$F_{voile}=P_{radiation} * A_{voile}$$

- F_{voile} est la force exercée sur la voile (en N)
- $P_{radiation}$ est la pression de radiation qui dépend de S (en N/m²)
- A_{voile} est la surface de la voile

On en déduit par le principe fondamental de la dynamique :

$$M*a=P_{radiation} * A_{voile}$$

$$a=(P_{radiation} * A_{voile})/M$$

Ou «a » est l'accélération du voilier solaire.

On en déduit que si l'on désire une accélération importante il faut :

- Une grande surface d'exposition (voile),
- Une masse embarquée faible,
- Une grande pression de radiation.

Cela fut un problème pour la conception pendant longtemps, mais, de nos jours, les matériaux employés permettent de réaliser des voiles très légères (données de l'U3P) :

- 30 kg pour une voile de 2000 mètres carrés
- voile métallique ultra-fine de type Aurora de 200 000 mètres carrés pour les mêmes 30 kg

Les intérêts

Stabilisation des satellites et des sondes

Actuellement, la technologie impose des rectifications de trajectoires limitées sur les satellites et sondes et cela uniquement à cause de la nécessité de consommer le minimum d'énergie.

Cette énergie est pourtant nécessaire pour, par exemple, l'optimisation des trajectoire des satellites géostationnaires.

Et l'énergie revient cher dans l'espace. En effet, plus un satellite est lourd et grand, plus son coût de lancement est important.

Pour palier à cela, les satellites sont conçus avec les réservoirs les plus légers et petits possibles, ils ont donc une énergie embarquée faible permettant uniquement de petites corrections de trajectoires et limitant la durée de vie de ces satellites.

Mais cela pourra être résolu grâce à l'utilisation de la propulsion photonique. Celle-ci utilise l'énergie délivrée par le soleil, qui est intarissable. La seule modification à effectuer sur les satellites est l'ajout d'une voile capable de transformer cette énergie en moyen de propulsion.

Cette technologie a été étudiée par la NASA pour modifier la trajectoire de la sonde Mariner 10 et utilisée en 1970 durant son vol vers la planète Mercure.

Prévention des vents solaires

Le soleil émet régulièrement des rayons tels que les rayons lumineux, rayons X et rayons gamma mais aussi des jets de protons, ions et électrons. Ce sont ces derniers qui forment ce que l'on appelle couramment les vents solaires. Ils se déplacent à grande vitesse : 400 km par seconde et interagissent avec la magnétosphère de la Terre, à la manière d'un générateur qui convertit l'énergie cinétique du vent solaire en énergie électromagnétique, transmise ensuite à la magnétosphère. Ce transfert d'énergie peut aller jusqu' à une puissance de 10^{13} watts, soit la consommation mondiale d'énergie.

L'effet le plus connu du grand public est l'aurore boréale mais de nombreux autres phénomènes existent comme :

- La perturbation du transport d'électricité (ils provoquent des surcharges d'énergie),
- La perturbation des transmissions des satellites (notamment pour le système GPS),
- La destruction de l'ADN.

Ces effets, heureusement, sont faibles sur Terre car la magnétosphère nous protège.

Mais, dans l'espace, cette barrière naturelle n'existe pas et les vaisseaux et stations spatiales sont énormément exposés ainsi que les spationautes embarqués.

Il n'y a aucun moyen de protéger de manière permanente les vaisseaux contre ces vents solaires.

La seule action possible est l'observation des vents solaires et l'émission de contre-mesures.

Ce principe est simple mais le problème réside dans sa réalisation.

En effet, il faut d'abord effectuer les mesures nécessaires avec un temps d'avance sur leur arrivée sur les vaisseaux. Etant donné la vitesse de ces vents, une mesure de quelques minutes d'avance nécessite une mesure au point L1 de libration, situé à une distance de 1,5 millions de kilomètres entre la Terre et le soleil, orbite déjà utilisée de nos jours (par le satellite SOHO) .

Mais ce délai pourrait être amélioré en plaçant un satellite plus proche du soleil.

Malheureusement, d'après les lois de Kepler, ces orbites donneraient au satellite des vitesses angulaires trop importantes pour le maintenir entre la Terre et nous.

La solution pour réaliser cela est de fournir à ce dernier une force compensatrice constante mais cela est irréalisable avec des satellites classiques. Cela nécessiterait de remplacer ce dernier de manière régulière. Sa consommation d'énergie serait trop grande. Enfin ce projet serait irréalisable car trop coûteux.

Et c'est à ce niveau que les voiliers solaires interviennent : la voile serait alors située près du soleil et permettrait de fournir cette force. De plus, les coûts de production des voiliers sont moins importants et la voile solaire pourrait faire double emploi : elle permettrait le maintien de l'orbite voulue mais aussi pourrait être utilisée pour placer le véhicule sur cette orbite.

Ce projet est actuellement étudié par le Jet Propulsion Laboratory, la NOAA et la USAF.

Interception de comètes et de météorites

Les voiliers solaires, libérés des contraintes de trajectoires rencontrées par les sondes classiques, peuvent prendre les mêmes trajectoires que celles empruntées par les comètes, les suivre et ainsi pourraient permettre d'étudier leurs différents composants, données qui sont nécessaires à certains chercheurs et qui ne sont accessibles que par une observation de proximité.

Les voiliers solaires pourraient très bien remplir cette tâche et même permettre d'étudier la nature des poussières présentes derrière les météorites fournissant ainsi de grandes informations sur les différents astres croisés par une comète.

Un autre objectif réalisable est le dépôt sur cette comète d'un robot qui pourrait ainsi effectuer des prélèvements intéressants pour la science.

Cette idée n'est pas nouvelle. Elle a déjà été étudiée par les chercheurs de la NASA pour s'approcher de la comète de Halley en 1986. A l'époque, le projet a été jugé trop complexe. Cela aurait pu être la première mission effectuée par un voilier solaire.

Fonctionnement

Les différentes structures de voiles

Les voiles solaires, quelles qu'elles soient, consistent en une large et très mince voile et en un chargement constitué de divers matériel comme des antennes, des ordinateurs des panneau solaires, des détecteurs pour le guidage, des instruments scientifiques, des containers et même, éventuellement une cabine d'équipage. Pour la majeure partie des voiles solaires, ceci se ramène à une petite masse dense attachée au milieu d'une immense voile extrêmement légère.

Stabilisation selon trois axes

Beaucoup de conceptions de voiles solaires utilisent une structure rigide, tout comme un cerf-volant, pour maintenir la voile dans la direction souhaitée afin de capter la lumière solaire. Cette technique s'appelle stabilisation selon trois axes car la structure supporte la voile dans chacune des trois dimensions, ou trois axes, sans mouvement de rotation. Les trois dimensions proviennent des deux dimensions qui constituent la surface de la voile et la troisième est celle perpendiculaire à la voile.

Les extrémités de la voile sont fixées à des baumes rigides qui se réunissent au centre de la voile, ce qui permet d'empêcher l'effondrement de la voile dans son plan. Le second problème est d'empêcher ces baumes de s'effondrer dans la troisième dimension, comme un parapluie qui se replierait.

Les deux techniques suivantes permettent de réaliser ceci :

- Baumes
- Baumes, mâts et haubans

Mais n'importe quelle autre structure qui empêcherait la voile de s'effondrer pourrait fonctionner tout aussi bien.

Baumes

Si seules les baumes doivent supporter une voile solaire, elles doivent agir en tant que colonnes et comme barrots. Comme colonnes, les baumes empêchent la voile de s'effondrer vers l'intérieur, vers le centre. Comme barrots, les baumes sont rigides et fixées au centre, comme un plongeur, pour empêcher la voile de se replier comme un parapluie.

Voici quelques exemples de voiles solaires stabilisées de cette manière.

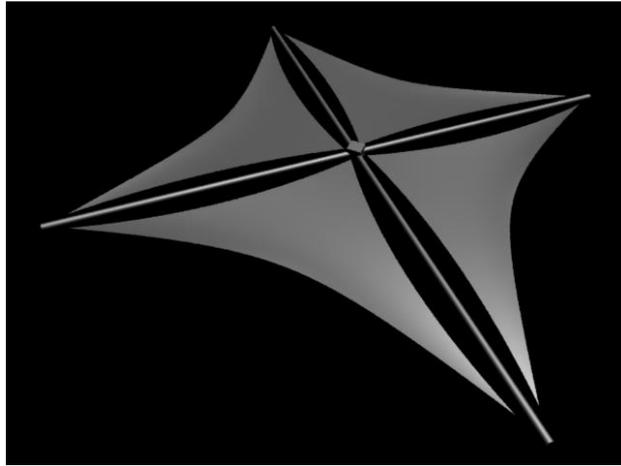


Image 1

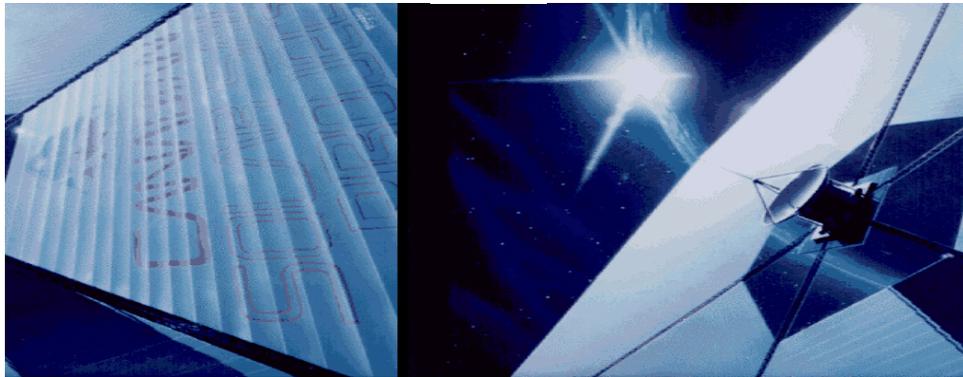


Image 2

L'image 1 est une voile carrée simple qui utilise quatre baumes fixées au centre pour supporter les quatre sections triangulaires de la voile.

L'image 2 est la conception initiale du projet canadien de voile : Canadian Solar Sail Project, qu'ils proposaient pour la course à la lune de 1992 en l'honneur du 500^{ième} anniversaire de la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb. Cette voile a six sections et s'oriente en inclinant les segments de la voile comme store vénitien afin de changer la direction de la poussée de la lumière du soleil sur la voile. Cette image est de Paul Fjeld, un artiste/ingénieur qui fait beaucoup d'illustrations pour la Canadian Space Agency.

Baumes, mâts et haubans

En utilisant une combinaison de baumes, mâts et haubans, une voile solaire stabilisée triaxialement peut être réalisée afin de gagner du poids, au prix d'une complexité accrue. En supportant les baumes avec des mâts et des haubans, elles ne doivent seulement agir en tant que colonnes et non plus en tant que barrots. Les mâts sont placés perpendiculairement aux baumes et les haubans relient les baumes entre elles et aux mâts. Les baumes peuvent être rendues beaucoup plus légères car les haubans et les mâts empêchent la voile de se plier. Ce genre de structure est semblable à une antenne radio très grande supportée par des câbles. Les images suivantes donnent quelques exemples de voiles solaires de ce types.

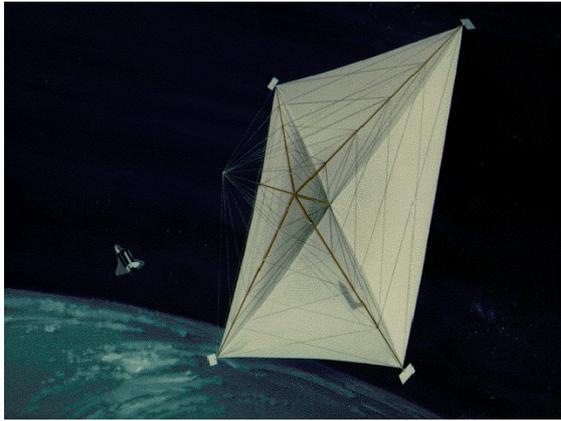


Image 3

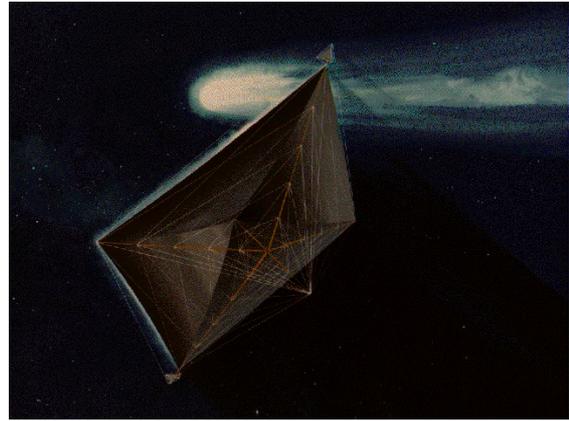


Image 4

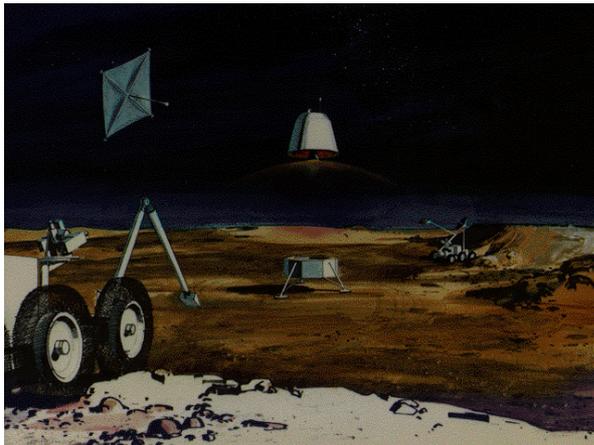


Image 5



Image 6

L'image 3 est une voile solaire carré en orbite autour de la Terre. Des voiles utilisant à la fois la propulsion ionique et la propulsion photonique ont été beaucoup étudiées pour le projet « rendez-vous to Halley's Comet » des années 70 parce que ces méthodes de propulsion étaient le seul moyen de faire aboutir le projet en un temps restreint. Malheureusement, les fonds furent retirés aussi bien pour les voiles solaires que pour la recherche sur la propulsion ionique. Cette voile utilise des palettes à chaque coin de la voile qui peuvent être tournées afin de guider le vaisseau spatial et réorienter la lumière du soleil.

L'image 4 dépeint une autre voile carrée rencontrant une comète. Cette conception a seulement deux palettes aux coins opposés, mais permet aussi de fournir un contrôle total de l'engin.

L'image 5 montre une mission robotique dont le retour des échantillons de Mars sur Terre se ferait grâce à une voile solaire, alors que l'image 6 montre une mission d'humain sur Mars supporté par les voiles solaires. Utilisant une voile semblable à celle conçu pour la mission de la Comète de Halley, une unique voile solaire pourrait transporter une grande charge utile de la Terre vers Mars en 4 à 6 mois tous les deux ans.

Stabilisation par rotation

La rotation tire sur la voile rigidifiant et aplanissant la voile ce qui permet à la voile de ne pas s'effondrer lorsque la lumière solaire pousse dessus. Ceci s'appelle l'accélération centripète, qui est la même force qui empêche l'eau de sortir d'un seau que l'on fait tourner. Puisque la matière de la voile est très légère, il est utile de la renforcer avec quelques lignes de tensions pour supporter les tensions dues à la rotation. Un des avantages de cette solution

technique est que la structure lourde de la voile sera réduite puisque les lignes de tensions sont beaucoup plus légères que les baumes utilisées dans la stabilisation sur trois axes. Ainsi, les voiles à stabilisation par rotation offrent des possibilités intéressantes afin d'obtenir un gain de poids et une vitesse accrue.

Voiles circulaires

Les voiles circulaires sont de grands disques en rotation supportés uniquement par de légères lignes de tension, excepté au centre de la structure où on a besoin de soutenir la charge utile, le système de contrôle à la voile.

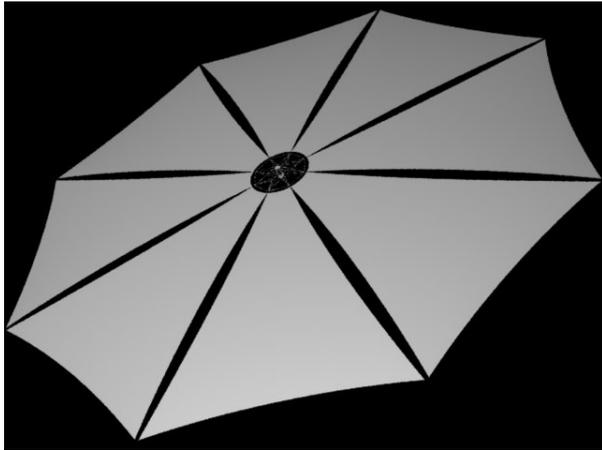


Image 9

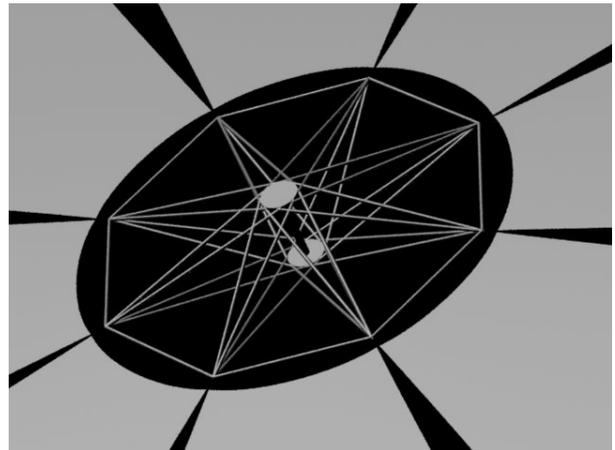


Image 10

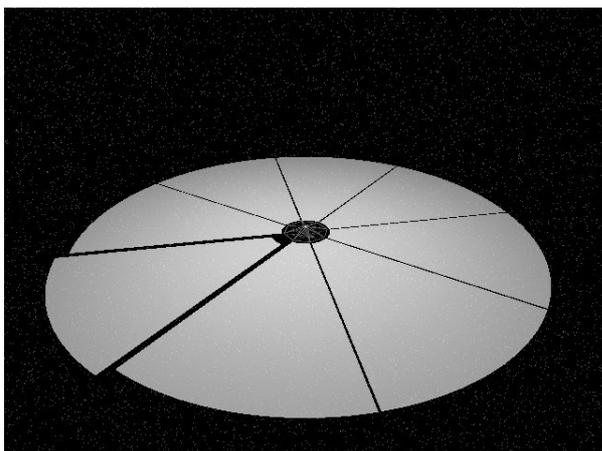


Image 11

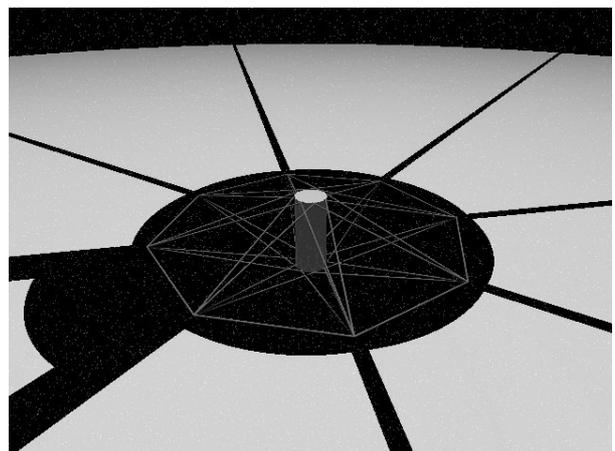


Image 12

L'héliogyro

L'héliogyro fut imaginé par le Jet Propulsion Laboratory pour la mission de la Comète de Halley. La voile est en fait constituée de plusieurs bandes très longue (12 bandes de 7 km de long dans le projet de JPL) se rejoignant en un moyeu central. Les bandes sont déployées à partir de rouleau par rotation du vaisseau. La force centripète tire les voiles vers l'extérieur et les déroule. L'engin continue sa rotation pour maintenir les bandes tendues. Le voilier se dirige en inclinant les bandes, qui redirige la pression photonique.

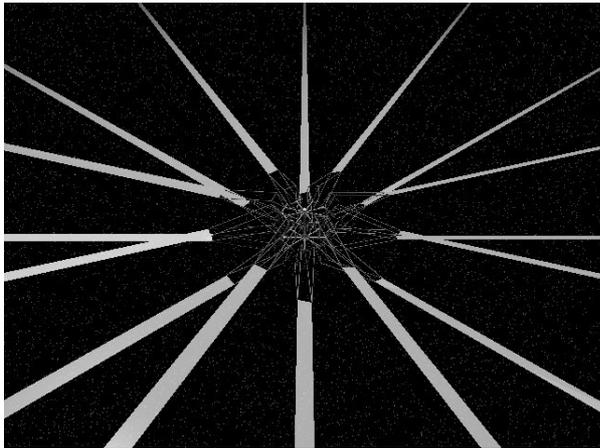


Image 13

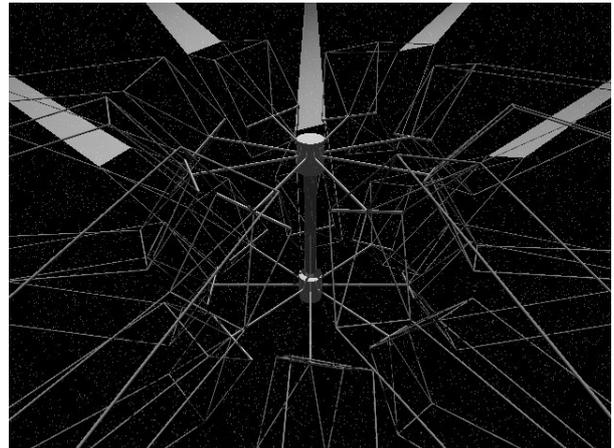


Image 14

Les techniques de pilotage

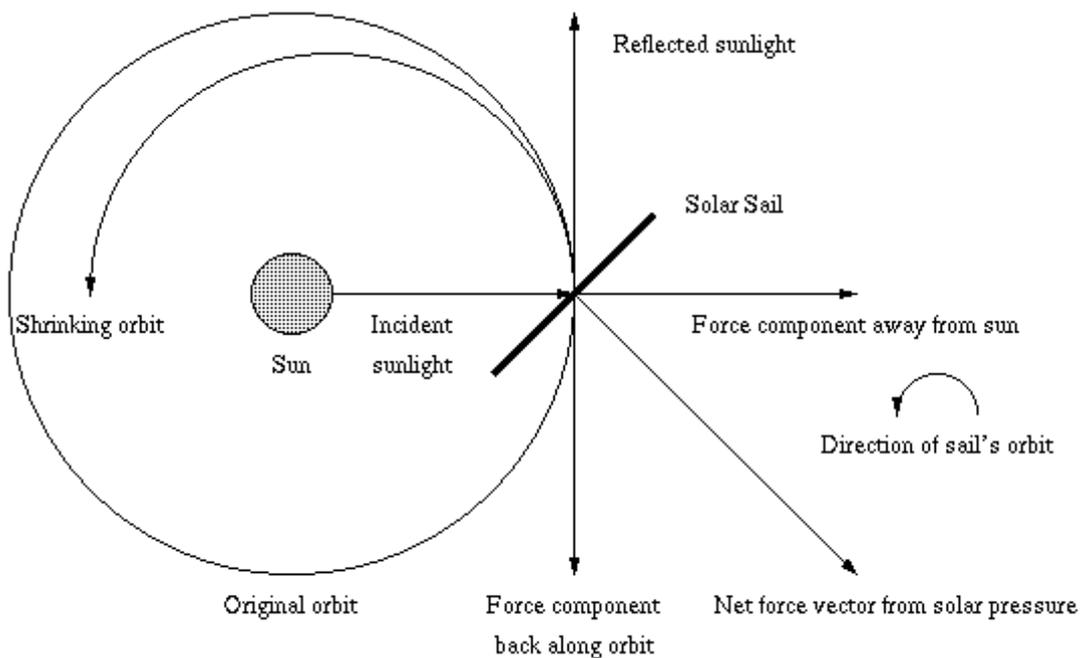
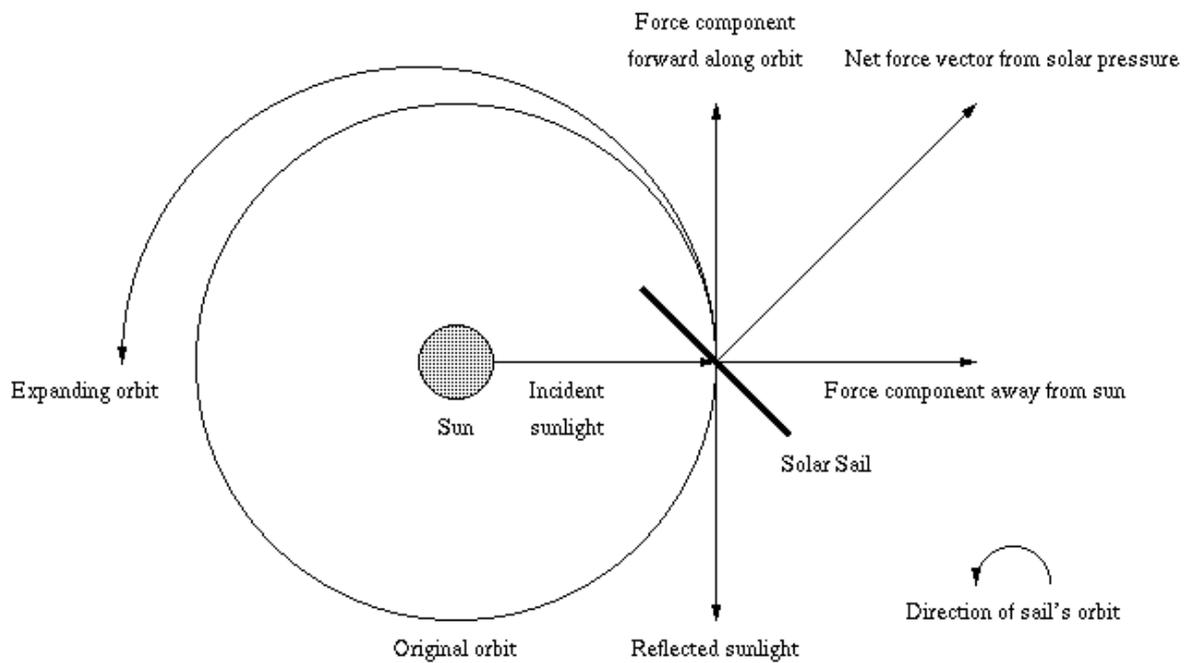
Comme tout marin sait, piloter un bateau c' est mettre dans la bonne position les voiles et le bateau pour optimiser la vitesse et la trajectoire en fonction des différentes contraintes extérieures telles que le vent, le courant et les récifs.

Le pilotage d' une voile solaire bien que différent comporte les même contraintes, il faut orienter la voile en fonction de la position du soleil, de la trajectoire désirée et des autres forces comme celle de gravitation.

Les voiles solaires se déplacent, tout comme les autres vaisseaux spatiaux, suivant des orbites autour du soleil.

Un vaisseau spatial classique peut à tout moment modifier son orbite pour se rapprocher du soleil ou, au contraire, s' en éloigner. En rétrécissant ou en élargissant son orbite, simplement en poussant le vaisseau dans la direction opposée.

Les voiliers solaires eux aussi peuvent faire de même mais avec quelques contraintes supplémentaires car la force qui propulse la voile est toujours selon la même direction c' est-à-dire qu' elle est dirigée dans la direction opposée au soleil et elle est quasiment toujours selon un angle droit par rapport a la voile. Une telle force à tendance à éloigner la voile du soleil si elle est avant la normale à la voile, ou à la rapprocher si elle est derrière comme le montre les schéma suivants.



La force est dirigée vers l'arrière
le rayon de l'orbite diminue

Mais cela est une vision simpliste car les voiles solaires sont soumise à plusieurs forces, la force produite par le soleil principalement mais aussi la force produite par les rayons réfléchis, les forces d'attraction crée par les astres environnants et les forces que créent les vents solaires.

Tout d'abord celle ci est lancée depuis la Terre et commence par décrire des ellipses autour de celle-ci de manière à acquérir de la vitesse. Ces ellipses étant de plus en plus larges

une fois la vitesse limite acquise la voile se sert de la force de gravitation de la lune pour décrocher de celle de la Terre et grâce à sa vitesse elle se libère ensuite de celle de la lune.

Ainsi lancée elle décrit plusieurs orbites autour du soleil pour se rapprocher de Mercure et ainsi pour ce placer à proximité de son champ de gravitation.

Une fois celui-ci atteint elle l'utilise pour jouer entre la force de propulsion que fournit le soleil et la force de gravitation de manière à se placer sur l'orbite désirée .

Conclusion

Les voiliers solaires sont actuellement peu utilisés mais sont voué à jouer un rôle important dans notre futur. Déjà les scientifiques promettent une exploitation de cette technologie pour intervenir dans les programmes spatiaux à venir. D'ici un siècle, grâce à ces vaisseaux spatiaux, nous connaissons beaucoup mieux notre système solaire et nous seront capable de nous rendre sur d'autres planètes quatre à cinq fois plus vite qu'avec les moyens actuels.

Mais ce n'est pas tout, les voiliers solaires sont peu coûteux et surtout ne consomment pas de carburant. Ils pourraient permettre ainsi d'effectuer des navettes entre deux planètes pour transporter du matériel et des hommes à moindre coût.

Une autre utilisation possible serait la transmission de l'énergie photonique sur Terre grâce à un miroir solaire tel que Znamya afin de récupérer l'énergie sur des panneaux solaires et de la transformer en énergie électrique.

Annexe

Bibliographie

Comme nous l'avons dit lors de l'introduction la majeure partie de notre recherche c'est effectuée sur Internet voilà les principaux liens qui nous ont permis d'effectuer ce travail.

Une liste plus complète est disponible à l'adresse suivante :

<http://perso.cybercable.fr/flf/les.htm>

Page ou notre TIPE est en ligne d'ailleurs.

Liens du cyberespace :

Le site de l'U3P

<http://www.u3p.net>

Les sites de Znamya

<http://www.energialtd.com/znamya.htm>

Un des projets de la NASA

http://umbra.nascom.nasa.gov/spd/solar_probe.html

La pages des voiles solaires en Allemagne

<http://www.kp.dlr.de/solarsail/Welcome.html>

Un site Anglais

<http://www.astro.keele.ac.uk/~aa/pages/sails.html>

Le site d'un étudiant français

<http://subway.resj.insa-lyon.fr/~lsimon/chiade/voiles/index.html>

Les documents écrits que nous avons obtenus sont des rapports provenant des différentes conférences et études effectuées par l'U3P et l'ONERA

Les contacts que nous avons eu dans ce domaine sont principalement :

- L'Union pour la Propulsion Photonique (U3P), avec M. Olivier Boisard et M. Guy Pignolet.
- L'ONERA
- L'ESA