



PROJET DE PHYSIQUE

APPROFONDIE

HATIFI MOHAMED

MEDINA JULIEN

LICENCE 2 PC

ANNEE 2012-2013

VOYAGE INTERPLANETAIRE A

BORD D'UN VOILIER SOLAIRE

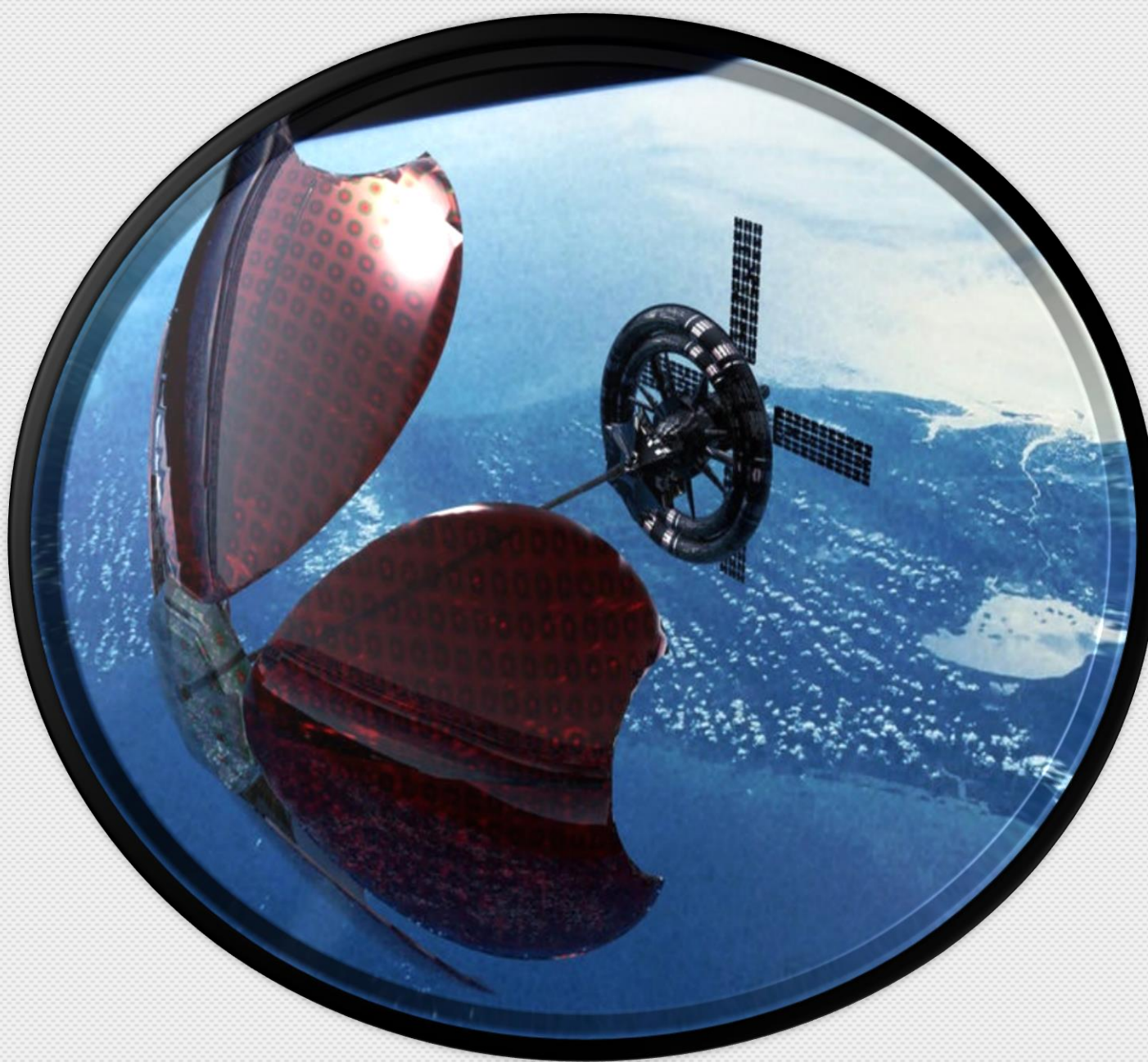


Table des matières

INTRODUCTION	4
I. FONCTIONNEMENT D'UN VOILIER SOLAIRE.....	6
<i>i) Origine de la pression de radiation</i>	<i>6</i>
<i>ii) Aspect théorique de la pression de radiation</i>	<i>8</i>
<i>iii) Mise en évidence expérimentale, radiomètre de Crookes</i>	<i>11</i>
II. EXPLOITATION DE LA FORCE RADIATIVE PAR LA VOILE SOLAIRE	13
<i>i) Caractéristiques d'une photo-voile</i>	<i>13</i>
<i>ii) Différents projets imaginés à ce jour</i>	<i>15</i>
<i>iii) Avantages et inconvénients</i>	<i>17</i>
III. VOYAGES INTERPLANETAIRES	19
<i>i) Equation de la trajectoire.....</i>	<i>19</i>
<i>ii) Etude sur la trajectoire et simulation numérique</i>	<i>20</i>
ANNEXE.....	23
BIBLIOGRAPHIE.....	27

Introduction

*« Tel est le pouvoir, telle est l'inhérente beauté du
vol à voile solaire. Nous n'avons besoin d'aucun carburant
pour nous propulser la nature se charge de nous le procurer. »*

Louis Friedman

De tout temps, les Hommes ont été intrigués et fascinés par l'espace, par ce spectacle nocturne et périodique. Bien que nous ne pouvons savoir exactement ce à quoi pensaient nos ancêtres, il est difficile de croire qu'ils soient restés indifférents face à tant de mystères et de beautés offerts quotidiennement, et ce, à la portée de tous.

Pendant une très longue période, l'humanité ne pouvait que contempler ce spectacle. Mais le 4 octobre 1957, pour la première fois un objet fabriqué par l'homme sortait de l'atmosphère terrestre. Qui aurait pu penser que l'homme, autrefois simple spectateur face au ciel, puisse un jour traverser la frontière de l'imagination vers celle du concret ? Spoutnik 1 fut donc le premier satellite artificiel lancé dans l'espace. Cet événement lança donc le début de l'ère spatiale, une période de l'histoire extrêmement prolifique au niveau des avancées technologiques. Cependant chaque avancée apporte avec elle ses inconvénients, avec notamment le coût. L'emploi de matières premières, la construction du satellite ainsi que la mise en orbite nécessitent plusieurs millions de dollars. Celles-ci, ne sont donc à la portée que des pays les plus riches. Il existe aussi le problème de la propulsion, le type de propulsion privilégié a toujours été la combustion, qui permet un gros rendement à moindre coût.

Aujourd'hui encore, chaque engin spatial envoyé hors atmosphère utilise exclusivement des moteurs exploitant l'énergie dégagée par la combustion d'un carburant (généralement du dihydrogène) avec un comburant (souvent du dioxygène). Si ce type de propulsion convient parfaitement à des voyages se limitant à l'orbite terrestre, il pose problème dès lors que la distance à parcourir devient plus importante. L'orbite terrestre, et y compris la Lune, sont donc aujourd'hui à notre portée grâce à la puissance du moteur à combustion. Cependant, à cette distance, la limite de ce type de propulsion est quasiment atteinte. En effet, la combustion seule fournit une importante poussée mais un long trajet nécessiterait d'énormes réservoirs ce qui en pratique, est impossible. C'est donc dans ce contexte que naquit le concept de voile solaire.

Le principe est extrêmement simple et peut être compris de manière intuitive. Le voilier solaire utilise uniquement l'énergie du Soleil pour se mouvoir dans l'espace. Plus précisément, chaque photon, émit par le Soleil, possède une certaine quantité de mouvement. Lorsque le photon entre en contact avec la voile solaire, il est dans un premier temps absorbé par celle-ci, faisant avancer la voile dans la direction opposée. Puis, un court instant plus tard le photon est réémis vers l'extérieur du voilier, lui conférant de nouveau sa quantité de mouvement. Au final, chaque photon reçu induit un déplacement de la voile dans le sens opposé.

Dans une première partie, nous étudierons le principe de fonctionnement d'une voile solaire en introduisant la pression radiative. Nous verrons tout d'abord comment mettre en évidence la pression radiative, puis nous établirons l'expression de celle-ci dans une étude plus théorique.

Dans une seconde partie, nous verrons comment la pression radiative peut être exploitée de façon concrète par une voile solaire et les différents projets imaginés à ce jour, avec leurs avantages et leurs inconvénients. Finalement, dans une dernière partie, nous établirons l'équation de la trajectoire d'un voilier solaire que nous modéliserons autour de différentes planètes, et nous finirons par une étude de la trajectoire et ceci numériquement grâce à un logiciel.

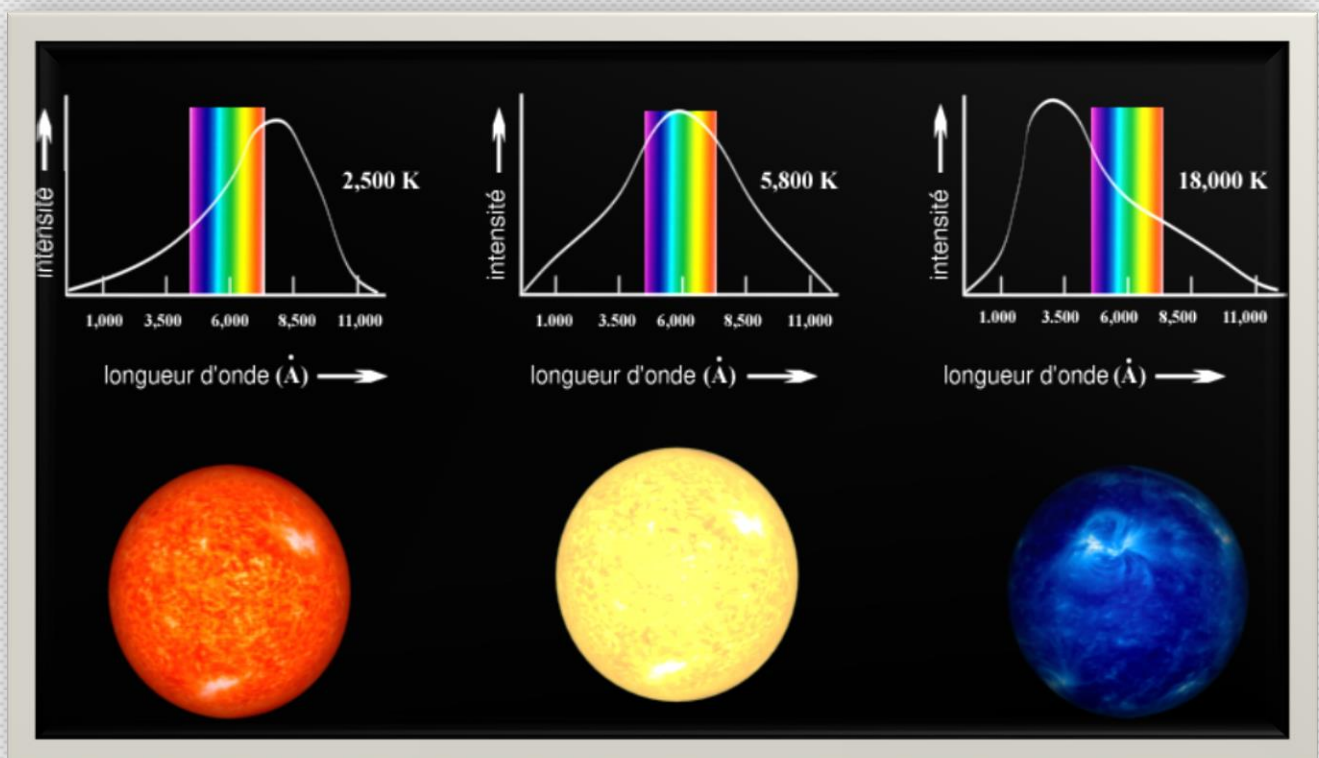
I. Fonctionnement d'un voilier solaire

i) Origine de la pression de radiation

Le Soleil, témoin de la création de la Terre, joue un rôle essentiel au monde du vivant. Il est dans un premier temps l'un des acteurs principaux de la vie sur Terre. Mais son rôle ne se limite pas qu'à cela, il joue un rôle très important en physique. En termes un peu plus scientifiques, on le décrit comme une étoile du type naine jaune que l'on peut modéliser par un corps noir.

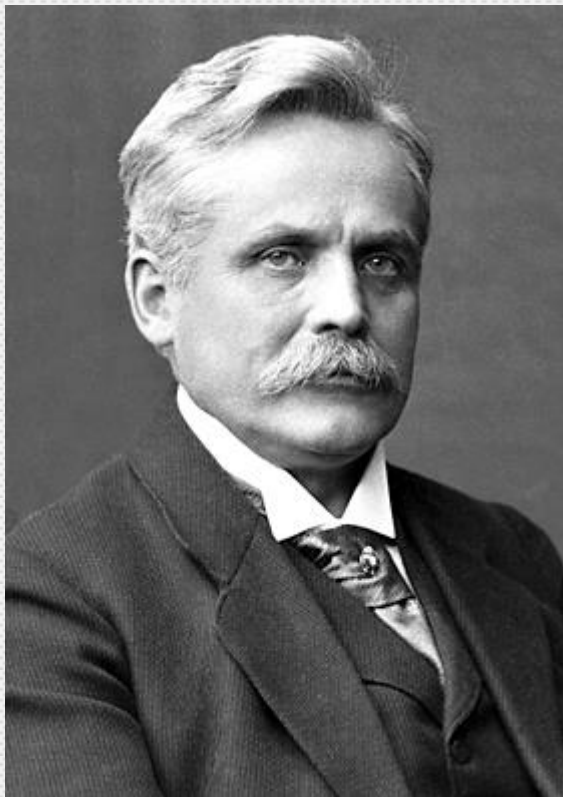
La fréquence des ondes électromagnétiques qu'il émet sont extrêmement variées, des rayons gammas aux ondes radios, tout le spectre électromagnétique y est présent. Tout comme les autres étoiles, le Soleil possède un pic d'émission qui lui est propre, de cette manière il se différencie de ses consœurs. Ce pic d'émission permet encore aujourd'hui, d'obtenir un grand nombre d'information sur des étoiles proches ou lointaines. On peut en effet obtenir quelques ordres de grandeurs sur les caractéristiques d'une étoile avec notamment la température de surface ou encore l'énergie émise par seconde. Une fois ces informations obtenues, nous pourrions déduire une valeur de la pression radiative provoquée par notre Soleil.

Figure 1 : Spectre de rayonnement de corps noir



Sur le graphique ci-dessus, nous avons un aperçu de ce qui a été dit précédemment.

Notre Soleil est une naine jaune, il possède un pic d'émission dans le jaune. En effet, le maximum d'émission se situe vers **500.10^{-9} mètres**.



Wilhelm WIEN (1864 - 1928) durant une période de sa vie a analysé des spectres de corps noirs pour différentes températures. C'est en 1893 qu'il découvre que la distribution des émissions passe par un maximum. Il trouve que ce maximum était inversement proportionnel à la température et que par conséquent le produit des deux est une constante. Cette constante porte son nom et est à peu près égale à **$2,898.10^{-3}$ m.K**. La relation s'écrit simplement :

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898.10^{-3} \text{ m.K}$$

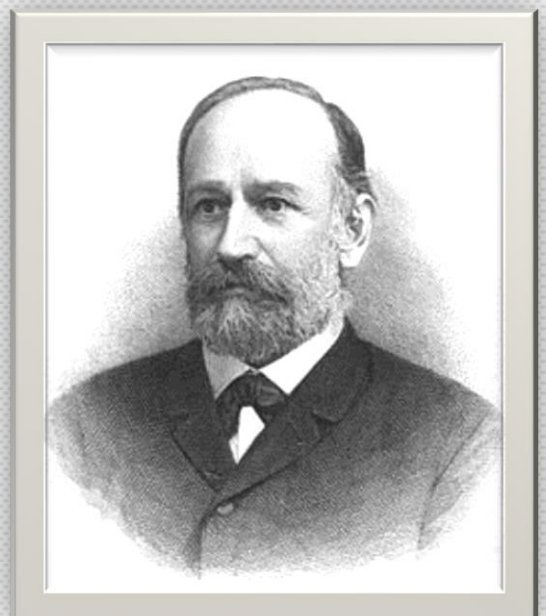
Avec :

- λ_{max} longueur d'onde maximum du spectre en m.
- T la température de surface du corps noir en Kelvin.

En utilisant cette expression, nous trouvons pour le Soleil, une température de surface égale à **5796 K**. Cette température semble effectivement importante à notre échelle, cependant elle est complètement négligeable face aux températures qu'il existe en son centre (des millions de Kelvin !).

Afin de continuer sur notre lancée, supposant maintenant que le Soleil émet uniquement dans cette longueur d'onde (**500.10^{-9} m**) afin d'effectuer quelques calculs supplémentaires.

Josef STEFAN (1838 - 1893) découvre vers 1879, une loi empirique à partir de résultats expérimentaux. Il découle de cette loi, que l'énergie totale E émise par seconde et par unité de surface S d'un corps noir, est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température T :



$$E_{\sigma} = \sigma ST^4$$

Avec σ la constante de Stefan, elle vaut: $5,67.10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Pour le Soleil, $S = 4\pi r^2 = 6,0877.10^{18} \text{ m}^2$

Soit une Energie $E_{\sigma} \approx 3.899. 10^{26} \text{ W}$. Cette valeur nous permettra par la suite, dans une étude un peu plus théorique d'établir l'expression de la pression radiative reçue par la voile solaire. Elle sera aussi utilisée dans les modélisations numériques.

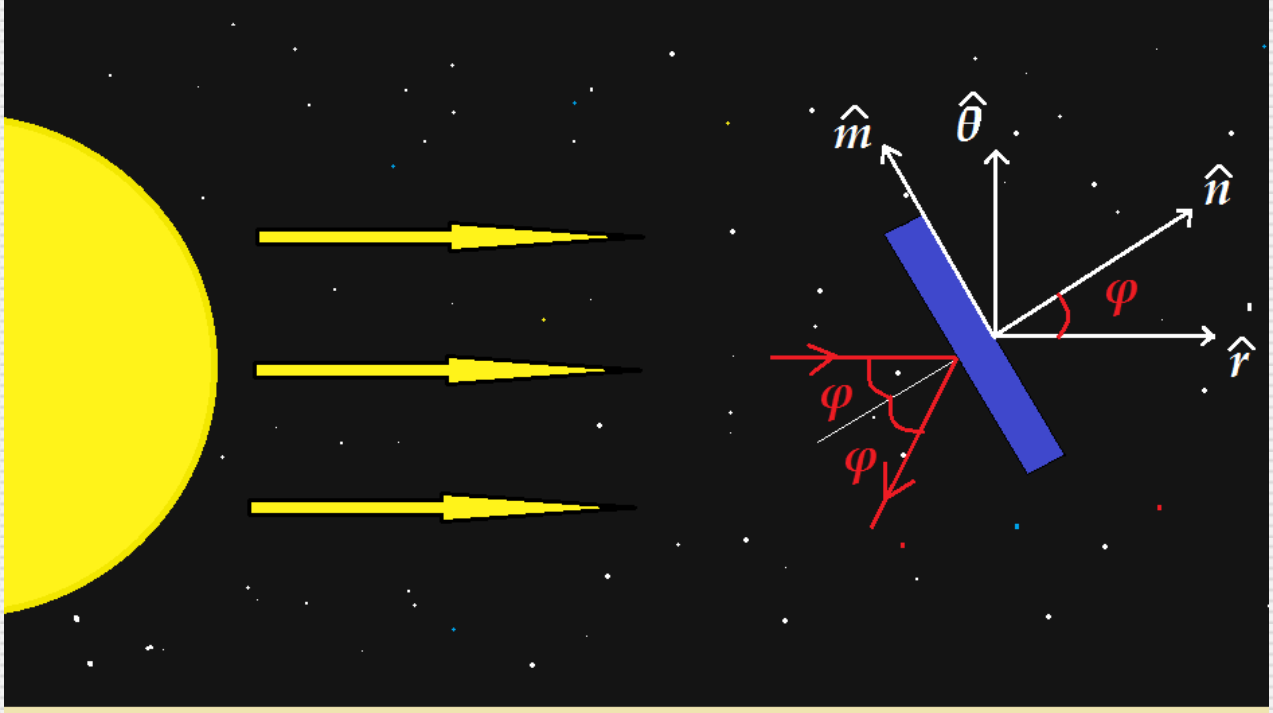
Ainsi, avec cette énergie qui se propage dans le vide, et qui se dilue dans de grandes distances nait la pression de radiation. Elle est le résultat d'échanges de quantités de mouvements et s'explique par le principe de conservation de celles-ci. Nous verrons par la suite comment établir l'équation appliquée à notre voile.

ii) Aspect théorique de la pression de radiation

Après avoir réalisé cette petite ouverture sur l'origine de la pression radiative, nous nous intéresserons maintenant, à une partie un peu plus physique, qui consiste à décrire quantitativement cette dernière. Dans le but de bien expliquer ce phénomène, appliquons directement l'étude théorique sur notre voile Solaire. Faisons simple, les photons émis par le Soleil, ont une certaine longueur d'onde λ à laquelle on associe une quantité de mouvement $\mathbf{p} = \frac{h}{\lambda}$. Lorsque ces photons arrivent sur notre voile, ils sont réfléchis du fait que le matériel utilisé est optimisé dans ce but. Chacun des photons cède une partie de sa quantité de mouvement. Cela crée une force $\mathbf{F}_p$, et donc une pression correspondante, c'est cette fameuse pression radiative $\mathbf{P}_r$. Avant de se lancer dans des calculs, introduisons une grandeur réaliste qui prendra en compte le fait que notre voile n'est pas parfaite. En effet, il n'existe pas à ce jour de matériau capable de refléter entièrement les photons reçus sans en absorber une certaine quantité. Cette grandeur caractérisant le pouvoir de réflecteur se nomme la réflectivité. On notera cette grandeur $\mathbf{R}$, avec $\mathbf{R} \in [0 ; 1]$, si $\mathbf{R}$ est égal à 1 alors 100% des photons sont réfléchis.

Dernière étape avant de commencer les calculs, faisons un schéma résumant la situation, on se servira de celui-ci pour justifier certaines étapes de notre parcours :

Figure 2 : Schéma résumant la situation



- Considérons dans un premier temps les calculs pour un seul photon puis, nous généraliserons pour N photons.

Bilan sur les quantités de mouvement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{p}_i = \cos(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{n} - \sin(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{m} \\ \vec{p}_f = -R \cdot \cos(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{n} - R \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{m} \end{array} \right.$$

Par conséquent :

- $\Delta \vec{p} = \vec{p}_i - \vec{p}_f = (1 + R)\cos(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{n} + (R - 1)\sin(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{m}$
- **Remarque :** Pour une voile solaire $R \approx 0.9$ le pouvoir de réflexion est très important, elle n'absorbe donc qu'une petite quantité d'énergie.

Cette remarque a de grandes conséquences dans la suite du calcul. En effet, en considérant le cas où l'on a N photons, la partie $(R - 1)$ sera négligée devant celle en $(1 + R)$.

Autrement dit pour chaque photon individuel :

$$\Delta \vec{p} \approx (1 + R) \cos(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{n}$$

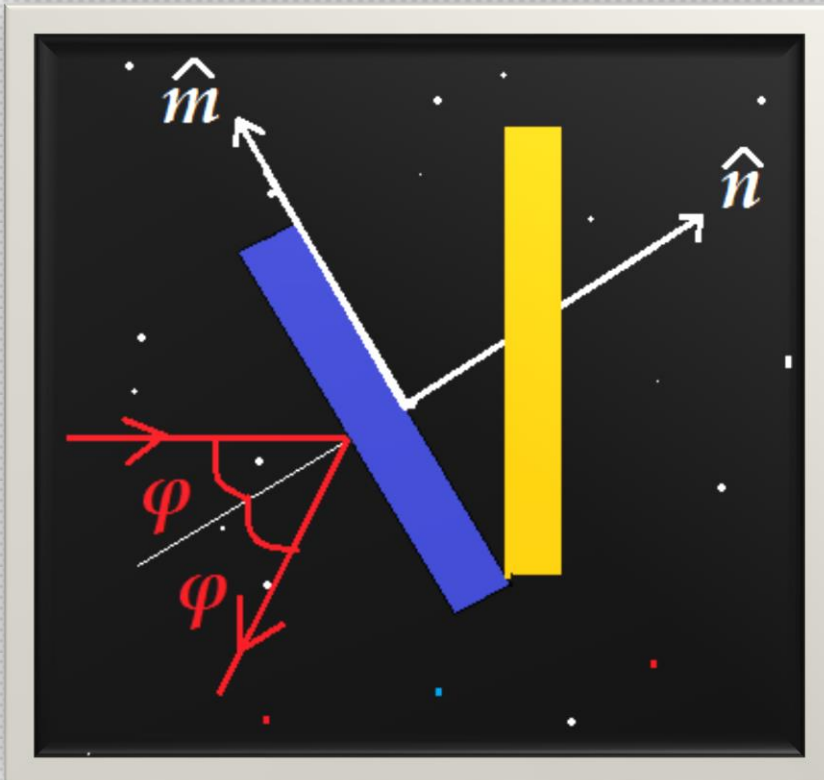
- C'est essentiellement cette quantité de mouvement qui va être transmise à notre système, dans la direction normale à la voile.
- Pour N photons, la voile reçoit une énergie $E = \frac{N \cdot h \cdot c}{\lambda}$ soit une puissance $P_s = \frac{E}{t} = \frac{N \cdot h \cdot c}{\lambda \cdot t}$.

Soit une quantité de mouvement $\vec{P} \approx N \cdot (1 + R) \cos(\varphi) \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \hat{n} = (1 + R) \cos(\varphi) \cdot \frac{P_s \cdot t}{c} \cdot \hat{n}$

- D'après le principe fondamental de la dynamique $\vec{F}_r = \frac{d\vec{P}}{dt} = (1 + R) \cos(\varphi) \cdot \frac{P_s}{c} \cdot \hat{n}$

Exprimons maintenant l'expression de P_s , qui, attention se dilue en fonction de la distance au Soleil !

Figure 3 : Inclinaison et surface



- Comme nous pouvons le voir sur la figure ci-contre, les photons tapent sur la voile (bleu) de surface $S'_{voile} = S \cdot \cos(\varphi)$ avec S la surface de la voile solaire (orange).

- Utilisons maintenant l'énergie trouvée précédemment par la Loi de Stefan

$$E_\sigma \approx 3.899 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Par conservation de l'énergie on a

$$\frac{P_s}{E_\sigma} = \frac{S'_{voile}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Soit finalement :

$$P_s = \frac{S'_{voile}}{4.\pi.r^2} . E_\sigma$$

- **Remarque :** la puissance décroît en $\frac{1}{r^2}$!
- Revenons maintenant à l'expression de la force radiative précédemment introduite en remplaçant par l'expression de la puissance ainsi trouvée :

$$\vec{F}_r = (1 + R)\cos(\varphi) . \frac{S'_{voile}}{4.\pi.r^2 c} . E_\sigma . \hat{n}$$

$$\Leftrightarrow \vec{F}_r = (1 + R)\cos(\varphi)^2 . \frac{S}{4.\pi.r^2 c} . E_\sigma . \hat{n}$$

La force $\vec{F}_r$ étant normal à la voile on peut donc écrire $\|\vec{F}_r\| = P_r . S$, avec P_r la pression radiative.

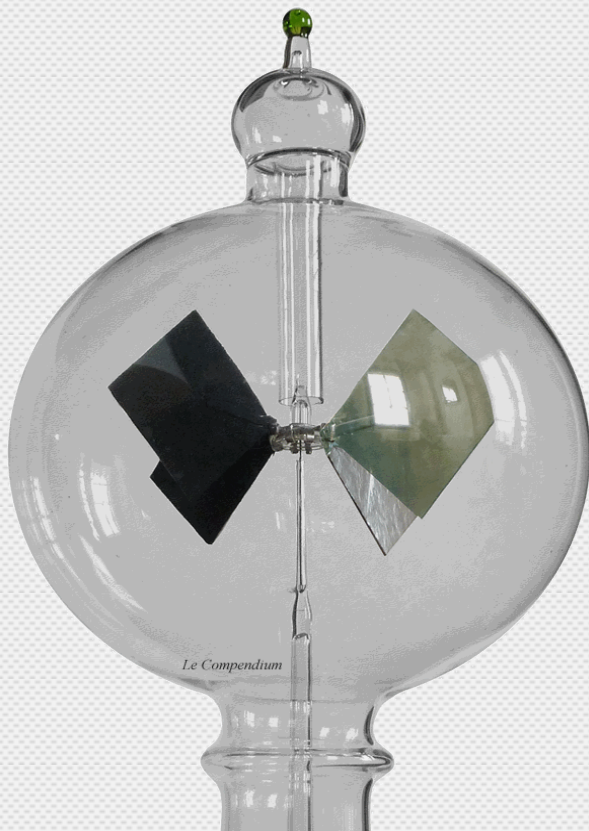
Autrement dit,

$$P_r = (1 + R)\cos(\varphi)^2 . \frac{E_\sigma}{4.\pi.r^2 c}$$

iii) Mise en évidence expérimentale, radiomètre de Crookes

Nous allons maintenant tenter de présenter une expérience rendue célèbre par le physicien, **Sir William Crookes** (1832 - 1919), qui dans un premier élan, a tenté de mesurer les radiations magnétiques à l'aide d'un radiomètre mis au point par ses soins. Ce dispositif expérimental est constitué d'une ampoule, dans laquelle on impose un vide **poussé** où des petites pales, réfléchives sur une face et noircies sur une autre, tournent autour d'un axe central. Chaque pale est très légère, ce qui a pour conséquence de rendre le dispositif plus sensible.

Photographie d'un radiomètre de Crookes



Principes :

Comme vous l'aurez compris chaque face à un rôle important dans ce dispositif. Des rôles certes différents mais qui permettent de mettre en évidence un grand nombre de phénomènes physiques.

Rôle des pales dans cette expérience :

- **Pales brillantes** : les photons qui tapent dessus sont réfléchis en transmettent à peu près deux fois leur quantité de mouvement, de manière similaire que pour notre voilier solaire, (c'est ce que nous avons établi précédemment dans l'étude théorique de la pression de radiation).

- **Pales noires** : qui contrairement à leur homologue, ne réfléchissent pas les photons mais les absorbent. Les photons absorbés ont pour effet d'augmenter légèrement la température à l'intérieur de l'ampoule. Les photons ne transmettent donc qu'une seule fois leur quantité de mouvement.

C'est cet échange de quantité de mouvement qui est responsable de la rotation des pales autour de l'axe.

- **Remarque :** *Il est utile de préciser que le radiomètre n'entre pas en rotation uniquement sous l'effet de la lumière, le simple fait de poser ses mains sur l'ampoule, est suffisant pour que tourne le dispositif. Ceci est provoqué par l'augmentation de la température dans le milieu qui provoque l'agitation des molécules dans l'ampoule.*

Pour mettre en évidence la pression de radiation il suffit de prendre un laser suffisamment énergétique, et de le « pointer » en direction des faces réfléchives.

Ceci aura pour effet de mettre en rotation le dispositif. Par conséquent, il existe une force radiative qui s'exerce sur la surface des pales, autrement dit une pression. C'est la fameuse pression de radiation.

Il existe d'autres expériences pour mettre en évidence la pression de radiation, nous avons préféré citer celle-ci pour l'aspect historique.

II. *Exploitation de la force radiative par la voile solaire*

i) Caractéristiques d'une photo-voile

Maintenant que nous connaissons précisément comment la pression radiative peut agir sur une surface pour lui conférer de la quantité de mouvement, nous pouvons voir comment cette force peut être exploitée par un voilier solaire. Cette pression radiative étant extrêmement faible comparée à d'autres moyens de propulsion, de très nombreux facteurs sont à prendre en compte. Premièrement, nous avons vu tout à l'heure que la pression radiative dépendait beaucoup de la **surface de la voile**. Une des caractéristiques principales du voilier sera donc une voile la plus grande possible. Cependant plus la voile sera grande et plus **la masse** augmentera inexorablement en conséquence.

Comme souvent dans le domaine du spatial, la masse sera donc un facteur déterminant. Le problème est donc de trouver le bon compromis entre la taille de la voile pour obtenir le plus de photons possible, et sa masse.

Pour pallier à ce problème on peut bien sûr penser sans se tromper que les matériaux utilisés dans la conception de la voile seront extrêmement importants. Cependant trouver le matériau adéquat n'est pas une mince affaire. Il doit bien évidemment être le plus léger et résistant possible, mais aussi le plus réfléchissant possible.



Film de Kapton de 50 microns d'épaisseur

Il existe aujourd'hui des matériaux réunissant plus ou moins toutes ces caractéristiques, ce sont bien évidemment pour la plupart des matériaux totalement synthétiques :

- Le **kapton**, par exemple a la capacité de rester stable sur une large plage de température allant d'environ -260°C à près de 400°C .

Il résiste aussi aux rayonnements ultraviolets ce qui empêche sa dégradation par les rayons solaires et possède de bonnes caractéristiques d'isolant électrique. Et il est en plus assez facilement produit par

une vaste variété de techniques. Il a été utilisé en abondance notamment dans le programme Apollo en tant qu'isolant thermique pour le module lunaire. Malgré tout cela, le problème est que son épaisseur minimale est d'environ 8 micromètres et qu'il est relativement lourd pour être utilisé en tant que voile solaire, 1 mètre carré sur 8 microns d'épaisseur pèse déjà près de 12 grammes.

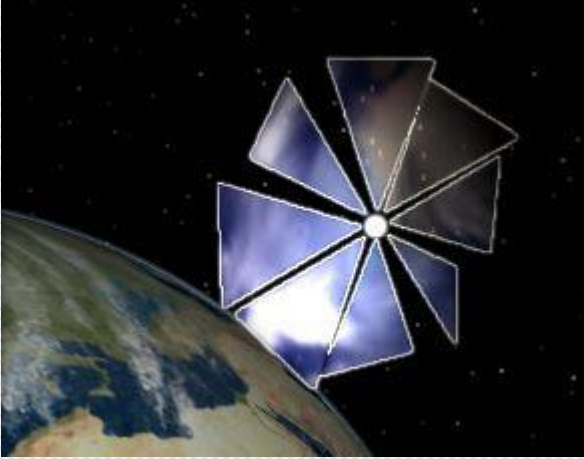
- Le **mylar**, par contre, permet lui de concevoir des voiles très fines de l'ordre du micromètre. Il possède une masse volumique d'environ 1.36 g.cm^{-3} . Un mètre carré de voile d'une épaisseur d'un micron pèserait donc 1.36 g. Pour une voile entre $200 \times 200 \text{ m}^2$ et $400 \times 400 \text{ m}^2$ elle pèserait environ une centaine de kilos. Il peut résister à des températures jusqu'à plus de 200°C . Cependant le problème cette fois ci est qu'il résiste mal aux rayons ultra-violets et qu'il est donc rapidement dégradé par ceux-ci. Un voyage dans le système solaire serait donc problématique car il s'étend sur une longue durée.
- Le **maillage en fibre de carbone**. Une fibre de carbone a un diamètre d'environ 5 microns et un maillage de ce type est extrêmement léger. Elle est utilisée dans de nombreux matériaux composites hauts de gammes et est très appréciée dans les domaines de l'aéronautique et de l'aérospatiale. Elle est aussi adaptée aux conditions extrêmes puisqu'elle peut résister aux radiations solaires et à des températures avoisinant les 2200°C . Sa production coûte cependant très chère, mais son défaut majeur dans une utilisation pour voile solaire est sa grande rigidité.

En général, ces matériaux ne sont pas très réfléchissants de nature. On a donc la possibilité de les **aluminiser** pour les rendre réfléchissants. Ceci s'effectue en appliquant une très fine couche d'aluminium sur la surface, généralement d'une épaisseur inférieure à 30 nm.

En plus de sa voile, un voilier solaire devra bien évidemment être équipé d'**instruments électroniques**, comme par exemple un système de communication ou des appareils d'imagerie, qui prendront une part importante dans la masse totale du vaisseau.

La **forme de la voile** est aussi un facteur déterminant. Celle-ci varie en fonction de l'objectif fixé au vol du voilier solaire. Il n'y a donc pas de « meilleure forme » pour une voile. C'est donc pour cela que chaque mission et projet utilisent des formes différentes. En général lorsque qu'une forme innovante est créée pour une mission, cette forme prend le nom de la mission.

ii) Projets de voile solaire imaginés

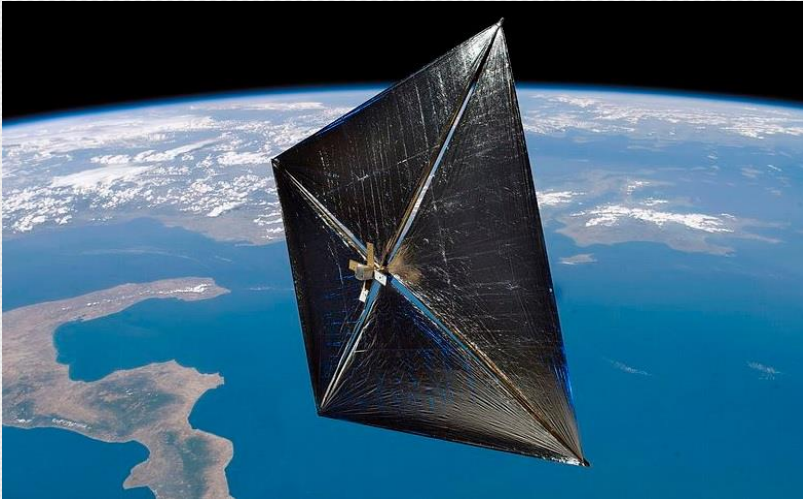


Vue d'artiste de Cosmos 1 avec le design Heliogyro

Comme nous avons pu le voir, la construction d'un voilier solaire nécessite de pallier à de nombreuses contraintes. Une technologie avancée est donc demandée, c'est pour cela que le voilier solaire est resté très longtemps sous la forme d'un simple « projet ». En effet l'idée d'une voile propulsée uniquement par le soleil existe depuis le début du XXe siècle.

- Ce n'est qu'en 1973 que le principe de pression de radiation est utilisé concrètement lors d'une mission spatiale. Le programme **Mariner** lancé par la NASA avait pour but d'envoyer des sondes spatiales afin d'étudier les planètes Mars, Venus et Mercure. De Mariner 1 à Mariner 10 ces sondes sont lancées entre 1962 et 1973. Cependant au cours de la mission de Mariner 10, une défaillance du système survint, plus précisément du contrôle d'altitude, qui sert habituellement à orienter la sonde. Pour pallier à ce problème, les scientifiques eurent l'idée d'utiliser la pression de radiation sur les panneaux solaires pour maintenir l'orientation du vaisseau. Ceci permit de limiter la quantité de carburant perdue nécessaire aux propulseurs pour corriger l'orientation de la sonde.
- De plus en plus enthousiastes, l'ESA et la NASA débutèrent un projet de recherche sur les voiliers solaires en 1973 pour tenter de rejoindre la comète Halley en 1986. Si le projet était ambitieux, il fut abandonné 4 ans plus tard en 1977 car la technologie à cette époque n'était pas encore au point. C'est lors de cette période que le design de voile de type « **Heliogyro** » fut imaginé.
- Pendant une longue période le projet de voile solaire ne fut plus parler de lui. Il fallut donc attendre plus de 30 ans pour que le 21 juin 2005, « The Planetary Society », (une organisation à but non lucrative fondée en 1980 notamment par Carl Sagan) lance la première voile solaire dans l'espace « **Cosmos 1** » de type Heliogyro. Cependant quelques minutes après le décollage,

le lanceur censé amener la voile en orbite eut une défaillance. A la 83^e seconde après le décollage, le moteur de la fusée s'arrêta et la communication fut coupée. On ne sait d'ailleurs



Vue d'artiste de la voile solaire NanoSail-D2 en orbite autour de la Terre

toujours pas précisément si Cosmos 1 a été tout de même mis sur orbite et flotte encore aujourd'hui autour de la Terre, ou bien s'il s'est écrasé.

- Le projet ne coûta « que » 4 millions de dollars ce qui est très peu pour un projet de ce type. S'il avait été réalisé par la NASA, il aurait bien pu coûter 15 fois plus cher, mais ce surcoût aurait été expliqué par de nombreux tests préalables et des matériaux de

meilleures qualités. Cela explique donc peut être l'échec de la mission Cosmos 1.

- En 2008, la NASA a pour projet de lancer **NanoSail-D**, une voile solaire miniature, de 4 kilogrammes seulement, et ayant plutôt une forme parallélépipédique (30 cm par 10 cm par 10 cm). Ceci dans l'unique but de tester le déploiement d'une voile dans l'espace. Mais à cause d'un problème au niveau des propulseurs 2 minutes et 40 secondes après le décollage, NanoSail-D et son lanceur s'écrasèrent dans l'océan Pacifique.

- En 2007, la JAXA (l'agence d'exploration aérospatiale japonaise), envisage un projet de sonde propulsée par voile solaire.

Et c'est enfin le 20 Mai 2010 que la sonde propulsée par la voile solaire **IKAROS** est lancée avec succès dans l'espace. Le 10 juin le déploiement de la voile est effectué avec succès. Et le 16 juillet 2010, le vaisseau commence à avancer significativement grâce à la pression de radiation. La force exercée sur le voilier d'une masse de 315 kilos lui permet d'atteindre une vitesse de quelques dizaines de mètres par seconde au bout d'un mois, avec une voile carrée de 14 mètres de côté environ.

- Le 19 novembre 2010, la voile **NanoSail-D2**, le successeur de NanoSail-D, est lancée avec succès dans l'espace par la NASA. La voile devait se détacher du lanceur le 6 décembre puis se déployer 3 jours plus tard. Cependant bien que les portes d'éjection étaient ouvertes, la voile ne put se déployer.

- La NASA pensait la mission échouée mais contre toute attente le 19 janvier 2011 le déploiement de la voile fut effectué avec succès. La mission qui était simplement de tester le déploiement d'une voile dans l'espace fut donc accomplie.

iii) Avantages et inconvénients

Si la technologie du voilier solaire en est encore à ses débuts, on peut déjà imaginer les nombreux avantages d'un tel moyen de propulsion.

Avantages :

- Premièrement, l'absence de ressources épuisables est un atout énorme pour effectuer de longs trajets dans le système solaire, cela veut dire que le voilier pourrait potentiellement avec une durée de vie opérationnelle quasiment infinie.
- La pression photonique est très faible, la vitesse du voilier est donc faible au début mais plus le voyage sera long et plus elle augmentera en l'absence de frottements.
- Un voilier solaire est relativement léger, car il est constitué uniquement d'une voile extrêmement fine et de quelques appareils électroniques comme par exemple des appareils d'imagerie ou un système de communication.

En comparaison, IKAROS pèse 315 kg dont 15 kg pour la voile de 200 m² tandis que la sonde Cassini (de la mission Cassini-Huygens) pèse 2150 kilos à vide. Ou encore, la sonde Venus Express, qui elle pesait 1270 kilos.

Au final, cela revient donc moins cher lors de l'envoi dans l'espace quand on sait que le lancement d'un kilogramme de matière en orbite basse revient déjà à environ 20 000\$.

- La propulsion par voile solaire peut être associée à des moyens de propulsions classiques pour permettre au vaisseau d'avoir une période opérationnelle extrêmement longue.

Inconvénients :

- Le voilier solaire n'est utile que pour les longs trajets. En effet pour les voyages dans l'orbite de la Terre, les moyens de propulsions classiques sont l'idéal. Une voile solaire mettrait beaucoup trop de temps à se mettre en mouvement.
- La difficulté du déploiement de la voile est aussi un problème majeur, puisque c'est une phase très complexe avec une espérance de réussite parfois aléatoire. Toute une mission peut donc se jouer à ce moment précis.
- La peur d'investir dans ce type de propulsion nouveau. On préfère continuer d'utiliser les moteurs actuels qui sont des valeurs sûres et qui ont déjà fait leurs preuves depuis longtemps. En effet, le fait d'utiliser une voile solaire comporte encore beaucoup de risques d'échecs.

III. Voyages interplanétaires

i) Equation de la trajectoire

Après avoir défini le fonctionnement et les principes d'une voile solaire, nous allons maintenant, dans cette dernière partie, modéliser le parcours de la photo-voile à travers notre système solaire.

Pour cela, il nous faut au préalable, établir les équations qui décrivent ce mouvement.

- D'après le principe fondamental de la dynamique : $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m \cdot \vec{a}$

Dans le référentiel tournant l'accélération s'exprime selon l'expression :

$$\vec{a} = \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \cdot \dot{\theta}^2 \right) \cdot \hat{r} + \left(r \cdot \ddot{\theta} + 2 \frac{dr}{dt} \cdot \dot{\theta} \right) \cdot \hat{\theta}$$

Bilan des forces :

Les forces, que nous considérons dans notre étude, s'exerçant sur la voile sont :

- La **force radiative** que nous avons démontrée plus haut :

$$\overrightarrow{F_r} = (1 + R) \cos(\varphi)^3 \cdot \frac{S}{4 \cdot \pi \cdot r^2 c} \cdot E_\sigma \cdot \hat{r} + (1 + R) \cos(\varphi)^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{S}{4 \cdot \pi \cdot r^2 c} \cdot E_\sigma \cdot \hat{\theta}$$

- La **force de gravitation** exercée par le Soleil :

$$\overrightarrow{F_G} = - \frac{G \cdot M_s \cdot m}{r^2} \cdot \hat{r} , \text{ Avec: } M_s \text{ la masse du Soleil et } m \text{ la masse de notre voilier.}$$

D'où,

$$m. \vec{a} = \vec{F}_r + \vec{F}_G$$

Finalement, on obtient le système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 r}{dt^2} - r. \dot{\theta}^2 = \frac{1}{r^2} [(1 + R) \cos(\varphi)^3 . \frac{S}{4. \pi. c. m} . E_{\sigma} - G. M_s] \\ r. \ddot{\theta} + 2 \frac{dr}{dt} . \dot{\theta} = (1 + R) \cos(\varphi)^2 . \sin(\varphi) . \frac{S}{4. \pi. r^2 c. m} . E_{\sigma} \end{array} \right.$$

ii) Etude sur la trajectoire

Le but de cette sous partie, est d'étudier le comportement de la voile solaire, pour certaines valeurs des paramètres caractéristiques de celle-ci, dans le potentiel gravitationnel du Soleil.

D'après le calcul effectué ci-dessus, on s'aperçoit que la vitesse orthoradiale est intrinsèquement liée à l'angle φ . Etudions la façon dont la force radiative varie en fonction de φ :

$$\vec{F}_{r\theta} = (1 + R) \cos(\varphi)^2 . \sin(\varphi) . \frac{S}{4. \pi. r^2 c} . E_{\sigma} . \hat{\theta}$$

$$\bullet \quad \frac{\partial F_{r\theta}}{\partial \varphi} = (1 + R) . \frac{S}{4. \pi. r^2 c} . E_{\sigma} . [\cos(\varphi)^3 - 2. \cos(\varphi) . \sin(\varphi)^2]$$

Elle s'annule pour ses valeurs extrêmes, c'est-à-dire si :

$$\cos(\varphi)^3 - 2. \cos(\varphi) . \sin(\varphi)^2 = 0$$

$$\Leftrightarrow \cos(\varphi)^2 = 2 \sin(\varphi)^2$$

$$\Leftrightarrow \tan(\varphi)^2 = \frac{1}{2}$$

$$\Leftrightarrow \tan(\varphi) = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$$

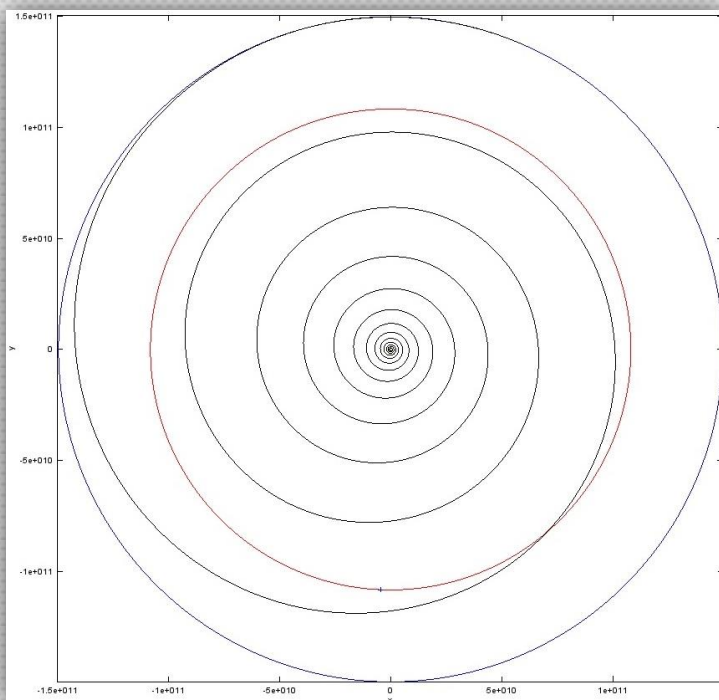
$$\varphi = \pm 35.26^\circ$$

On observe numériquement que cette vitesse, est soit positive, soit négative selon la valeur de φ . Ce phénomène est d'autant plus marqué pour $\varphi = \pm 35.26^\circ$. Cela se traduit physiquement par le fait que :

- Pour $\varphi = 35.26^\circ$, $\frac{\partial^2 F_{r\theta}}{\partial^2 \varphi} > 0$, la force est minimale, le voilier se rapproche du Soleil.
- Pour $\varphi = -35.26^\circ$, $\frac{\partial^2 F_{r\theta}}{\partial^2 \varphi} < 0$, la force est maximale, le voilier s'éloigne du Soleil.

Cette donnée est très importante, c'est en faisant varier l'angle φ , que l'on peut donc diriger le voilier solaire.

Grace à notre programme crée sur le logiciel Octave. Nous pouvons maintenant modéliser la trajectoire d'un voilier dans le système solaire, en faisant varier différents paramètres.



Ici nous avons testé avec les paramètres suivants :

Venus

$$\varphi = 35^\circ$$

Masse = 300 kg

Surface = 200*200 m²

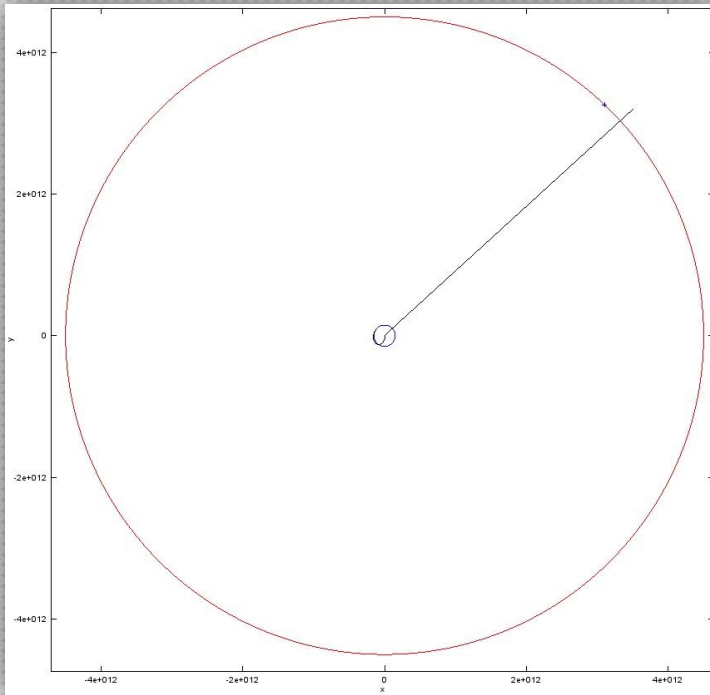
Orbite rouge : Venus

Orbite bleue : la Terre

En noir : la trajectoire.

Au centre : le Soleil

Nous voyons donc qu'avec ces paramètres le voilier termine sa course dans le Soleil.



Ici, nous avons essayé avec l'angle théorique où la force est maximale.

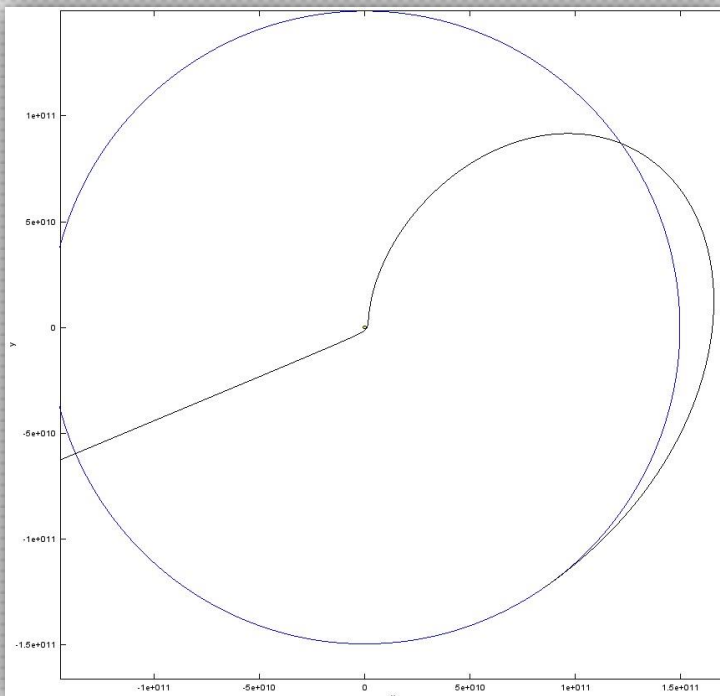
$$\varphi = -35.26^\circ$$

Masse = **100 kg**

Surface = **200*200 m²**

Orbite Rouge : Neptune

Sur une échelle de temps d'environ 1 an, on voit que le voilier part très vite dans une direction opposée au Soleil.



Si on regarde de plus près, on s'aperçoit que la voile tombe vers le Soleil, puis par effet de fronde gravitationnelle, elle acquiert énormément d'énergie, ce qui au final l'a propulse à pleine vitesse dans la direction opposée.

Cependant le voilier passe ici à environ 300 000 km de la surface du Soleil.

On peut penser qu'à cette distance le voilier serait complètement désintégré même si notre programme ne modélise pas ceci.

Annexe :

Logiciel utilisé : *Octave*

Fonction :

```
function y=fonctionr(X)

global A
global B
global S
global alpha
global Z
global Rsoleil
global d
Y(1)=X(2);
Y(2)=(X(1))*(X(4))^2+1/(X(1))^2*(A*S*(cos(alpha))^3-B);
Y(3)=X(4);
Y(4)=(A*S*(cos(alpha)^2)*sin(alpha))./((X(1))^3 - (2*X(2).*X(4))./(X(1)));

y=[Y(1) Y(2) Y(3) Y(4)];

if(X(1)<Rsoleil)
    y=[0 0 0 0];
    Z=42;

end
```

Programme Principal :

<pre>clear all clear all figure clf %valeur des differentes constantes: global A global B global S global alpha global Z global d global Rsoleil Ms=1.9891*10^(30); c=299792458 ; Ps=3.826*10^(26); G=6.67384*10^(-11); r0=149597870700; angle=0:pi/180:2*pi; B=G*Ms; %A=Ps/(2*pi*c*m); w0=(2*pi)/(365.25*24*3600); v0=0; theta0=2*pi*rand(1); Rsoleil=696342000; X0=[r0 v0 theta0 w0]';</pre>	<pre>%Caracteristiques des planetes : dmercure=57910000000; rmercure=2439000; dvenus=108200000000; rvenus=6052000; dterre=r0; rterre=6378000; dmars=227936637000; rmars=3397000; djupiter=778330000000; rjupiter=71400000; dsaturne=1429400000000; rsaturne=60000000; duranus=2870990000000; ruranus=25560000; dneptune=4504300000000; rneptune=24764000;</pre>
--	--

```

% Generation des variables aleatoire

if rand(1)>0.5
    aleat1=1;
else
    aleat1=-1;
end

aleat2=aleat1*rand(1);

% Menu principal

i=input("\n\n\n\nQuelle planete voulez vous atteindre ? Veuillez entre le bon
numero:\n\n 1 : Mercure\n 2 : Venus\n 3 : Terre\n 4 : Mars\n 5 : Jupiter\n 6 :
Saturne\n 7 : Uranus\n 8 : Neptune\n 9 : pas de destination precise\n\n");

while i>9
i=input("\n\n\n\nQuelle planete voulez vous atteindre ? CHOISISSEZ ENTRE 1 ET
9 !!!\n\n1 : Mercure\n 2 : Venus\n 3 : Terre\n 4 : Mars\n 5 : Jupiter\n 6 : Saturne\n
7 : Uranus\n 8 : Neptune\n 9 : pas de destination precise\n\n");

endwhile
hold on

if i==1
    d=dmercure;
    xi=d*cos(angle);
    yi=d*sin(angle);
    plot(xi,yi,'r')
    px=d*aleat2;
    py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1;
    plot(px,py,'+')

elseif i==2
    d=dvenus;
    xi=d*cos(angle);
    yi=d*sin(angle);
    plot(xi,yi,'r')
    px=d*aleat2;
    py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1;
    plot(px,py,'+')

elseif i==3
    d=r0;
    xi=d*cos(angle);
    yi=d*sin(angle);
    plot(xi,yi,'r')
    px=d*aleat2;
    py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1;
    plot(px,py,'+')

elseif i==4
    d=dmars;
    r=rmars;
    xi=d*cos(angle);
    yi=d*sin(angle);
    px=d*aleat2;
    py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1;
    plot(xi,yi,'r')
    plot(px,py,'+')

```

<pre> elseif i==5 d=djupiter; xi=d*cos(angle); yi=d*sin(angle); plot(xi,yi,'r') px=d*aleat2; py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1; plot(px,py,'+') elseif i==6 d=dsaturne; xi=d*cos(angle); yi=d*sin(angle); plot(xi,yi,'r') px=d*aleat2; py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1; plot(px,py,'+') elseif i==7 d=duranus; xi=d*cos(angle); yi=d*sin(angle); plot(xi,yi,'r') px=d*aleat2; py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1; plot(px,py,'+') elseif i==8 d=dneptune; xi=d*cos(angle); yi=d*sin(angle); plot(xi,yi,'r') px=d*aleat2; py=sqrt(d^2-px^2)*aleat1; plot(px,py,'+') elseif i==9 else printf("\n\nCHOISISSEZ UN BON NUMERO !!!\n\n") break; end </pre>	<pre> alphadeg=input("\nChoisissez l'angle alpha de la voile en degres, par exemple 65 degres:\n"); alpha=alphadeg*pi/180; m=input("\nEntrez la masse du voilier en kilos, par exemple 100 kg :\n"); A=Ps/(2*pi*c*m); S=input("\nEntrez la surface de la voile en metre carre, par exemple 200*200 metre carre :\n"); tfin=input("\nChoisissez pendant combien d'annee le voilier va voyager:\n"); xsoleil=Rsoleil*cos(angle); ysoleil=Rsoleil*sin(angle); plot(xsoleil,ysoleil,'y'); fill(xsoleil,ysoleil,'y'); t=[0:3600*24:31557600*tfin]; xt=r0*cos(angle); </pre>
---	--

```

yt=r0*sin(angle);
plot(xt,yt)

Tr=lsode("fonctionr",X0,t);

xx=Tr(:,1).*cos(Tr(:,3));
yy=Tr(:,1).*sin(Tr(:,3));
plot(xx,yy,'bk')

if(Z==42)
    printf("\n\nHAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA\n\n\n");
end

xlabel('x')
ylabel('y')
axis equal
title("Trajectoire du voilier dans le systeme solaire");
legend("Orbite de la planete","Position de la planete","Soleil","", "Orbite
Terrestre")

```

```

figure(2)
hold on
plot(t,Tr(:,1),'r')
plot(t,d+Tr(:,1)*0)
xlabel('t')
ylabel('d')
title("Distance au Soleil");
legend("distance du voilier","distance de la planete");

taille=size(Tr(:,1));
N=taille(1);
for i=1:1:N
    D(i)=d;
end

if (Tr(:,1)>D' || Tr(:,1)<D')
    temps_secondes=intersections(t,Tr(:,1),t,d+Tr(:,1)*0);
    temps_jours=temps_secondes/(24*3600);
    printf("\n\nLe voilier n'as pas atteint l'orbite de la planete\n\n")
elseif
    temps_secondes=intersections(t,Tr(:,1),t,d+Tr(:,1)*0)
    temps_secondes
    temps_jours=temps_secondes/(24*3600)
    temps_mois=temps_jours/30.4375

end

```

Bibliographie

- [http://webtice.ac-guyane.fr/lgdamascpgge/IMG/pdf/ADS-BUP 16291 voilier solaire.pdf](http://webtice.ac-guyane.fr/lgdamascpgge/IMG/pdf/ADS-BUP_16291_voilier_solaire.pdf)
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar sail](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail)
- [http://www.u3p.net/u3p fr/Accueil U3P.html](http://www.u3p.net/u3p_fr/Accueil_U3P.html)
- <http://240plan.ovh.net/~upngmmxw/prop/seizp/illust/seizepages.pdf>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Wien%27s displacement law](https://en.wikipedia.org/wiki/Wien%27s_displacement_law)
- <http://ngst.gsfc.nasa.gov/sunshield.html>
- [http://www.nasa.gov/mission_pages/tm/solarsail/solarsail overview.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/tm/solarsail/solarsail_overview.html)
- <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html>
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117710007982>
- <http://www.flyingcorsica.fr/index.php/anecdotes/95-astro-notes-jc-aveni>
- <http://www.youtube.com/watch?v=CNuuDoq7DE0>
- [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Sun Flyby via Motion Reversal of Fast Sailcraft.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Sun_Flyby_via_Motion_Reversal_of_Fast_Sailcraft.png)
- <http://www.isas.jaxa.jp/e/forefront/2011/tsuda/index.shtml>
- <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet98/LEIPOLD.pdf>
- http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html