

LES VOILIERS SOLAIRES



PLAN :

Introduction

I). LES OBJECTIFS

- 1) Présentation du Vent venu du Soleil.
- 2) Notre projet

II). UNE FORCE ORIGINALE

- 1) Principe.
- 2) Calcul de cette force.

III). SKIPPEUR DES ÉTOILES

- 1) Analyse de la concurrence.
- 2) dimensions, matériaux, structure.

IV). 3,2,1.. PARTEZ !

- 1) Hypothèses simplificatrices.
- 2) Équations et stratégie de vol.
- 3) Les étapes de la course.

Conclusion

Introduction

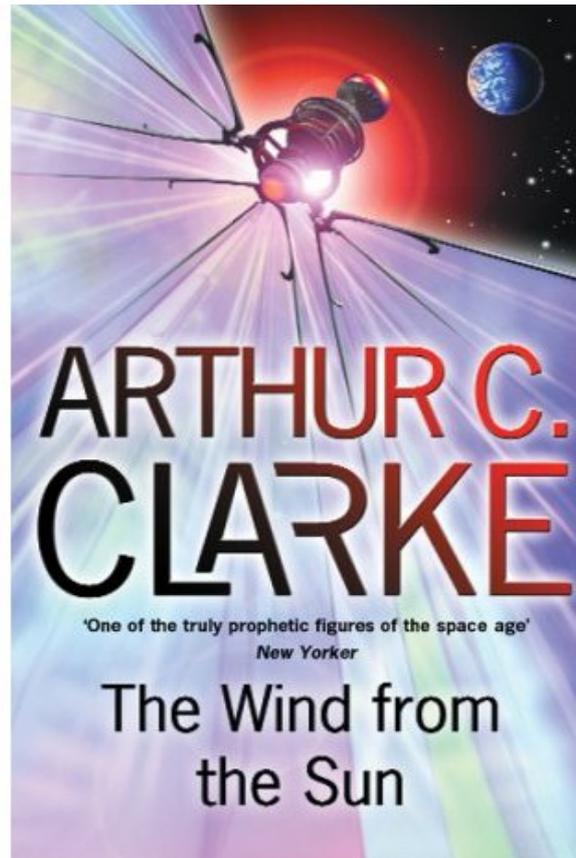
A l'instar de la Santa-Maria brisant les flots en direction du Nouveau Monde, imaginez le scintillement de la voile réfléchissante d'un navire solaire voguant entre les étoiles. Poussé par la pression photonique, il dispose d'une source d'énergie illimitée. Tel est le pouvoir, «telle est l'inhérente beauté du vol à la voile solaire. Nous n'avons besoin d'aucun carburant pour nous propulser ; la nature se charge de nous le procurer».

Les voiliers solaires sont donc des satellites d'un genre particulier. Ils n'utilisent pas de moyen de propulsion chimique, seulement cette force de pression photonique.

Le fil conducteur de ce TIPE sera le roman « Le vent venu du Soleil » d'Arthur C. Clarke. Il y décrit une palpitante course de voiliers solaires entre la Terre et la Lune. Nous allons tout au long de cette étude essayer de comprendre le principe de fonctionnement de ces satellites, puis élaborer brièvement un voilier capable de prendre part à cette course, pour enfin modéliser cette aventure grâce au logiciel MAPLE.

I). LES OBJECTIFS

1) PRÉSENTATION DU VENT VENU DU SOLEIL



- Publication en 1963
- Arthur C. Clarke (1917 – 2008) : auteur de science fiction britannique, nous lui devons notamment *L'Odyssée de l'espace*

2) NOTRE PROJET

Objectif :

Nous allons virtuellement prendre le départ de la course de yachts solaires décrite avec autant de rigueur scientifique que de poésie par Arthur Clarke dans *Le vent du Soleil*.

Le départ est imminent... Destination : la Lune « *vaincra celui qui traversera le premier l'orbite de la Lune* ». Notre cher voilier parviendra-t-il à prendre la pôle position de la course?

Démarche :

- Étude du moyen de propulsion
- Réalisation de notre voilier, en tenant compte des matériaux utilisés
- Modélisation de la course entre notre voilier et le Diane, vaisseau du personnage principal de la nouvelle.

Course :

- Départ : orbite géosynchrone
- Arrivée : Dépasser l'orbite de la Lune

II). UNE FORCE ORIGINALE

1) PRINCIPE.

Description :

«Tendez les mains vers le Soleil, que ressentez vous ? De la chaleur, bien sûr. Mais il y a aussi de la pression, bien que vous ne l'ayez jamais remarquée tant elle est ténue. Sur toute la surface de vos mains, elle ne représente seulement une vingtaine de micro-grammes. Mais dans l'espace ...»

(Le vent venu du Soleil)

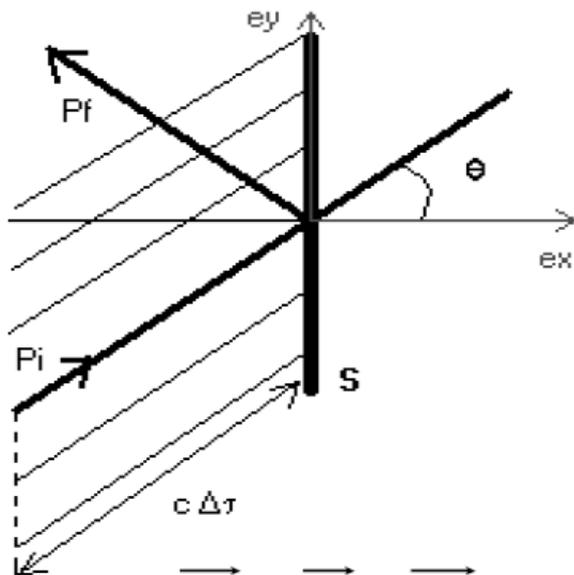
Principe :

Le principe des voiliers solaires sera donc d'utiliser en continue cette force infime. Les photons permettent le déplacement du satellite en se réfléchissant sur la voile, qui est en réalité un miroir qui l'on voudra le plus léger possible.

Remarque :

Contrairement à une idée reçue, le vent solaire ne joue pratiquement aucun rôle dans la manœuvre du voilier. En effet, le vent solaire est un flux de protons et d'électrons qui se déplace à une vitesse très inférieure à celle des photons. La force engendrée par le vent solaire est de 100 à 1 000 fois inférieure à celle résultant de la pression photonique. Fort de ces informations, nous considérerons comme négligeable les effets du vent solaire sur la voile.

2) CALCUL ET VALEURS.



$$\vec{F} = -\frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\langle \vec{F} \rangle = \frac{-1}{\Delta\tau} \int_t^{t+\Delta\tau} d\vec{p}$$

$$-\Delta\vec{p} = \vec{p}_i - \vec{p}_f$$

$$-\Delta\vec{p} = (1+R)p \cos\theta \vec{e}_x + (1-R)p \sin\theta \vec{e}_y$$

Comme on a $c.\Delta t.\cos\theta$ photons qui frappent la voile en un temps Δt ,

$$\langle \vec{F} \rangle = p.c.d.S.\cos\theta \vec{A}$$

$$\langle \vec{F} \rangle = h.v.d.S.\cos\theta \vec{A}$$

Soit P_s la puissance surfacique délivrée par le soleil,

$$P_s = \frac{P_{sol}}{4\pi r^2} = d.c.h.v$$

$$\langle \vec{F} \rangle = (1+R) \frac{P_{sol}}{4\pi r^2 c} S \cos^2\theta \vec{e}_x + (1-R) \frac{P_{sol}}{4\pi r^2 c} S \cos\theta \sin\theta \vec{e}_y$$

III). SKIPPEUR DES ÉTOILES

1) ANALYSE DE LA CONCURRENCE.

Examinons brièvement nos concurrents... Comment construire un vaisseau pouvant rivaliser avec les leurs ?

Notre principal adversaire sera l'intrépide Merton, skippeur du Diane, dont « *la voile semblait couvrir tout le ciel. Rien d'étonnant car ses cinquante millions de pieds carrés étaient reliés à la capsule par une centaine de milles de cordages. Quand au poids, la voile gigantesque contenant à peine plus de matière qu'une bulle de savon : ces deux milles carrés de plastique aluminisé n'avaient que quelques millièmes de pouces d'épaisseur.* ».

Ce vaisseau a donc une voile circulaire d'une surface **S de 4,65 km²**, soit un diamètre de 2,4 km.

Il est dit plus tard que ce voilier possède une accélération maximale due à la pression photonique a_0 telle que :

$$a_0 = 0,001.g$$

Calcul de la masse m du Diane :

Soit P^* la poussée maximale de la pression photonique.

On a la relation :
$$P^* = 2 \cdot \frac{P_{sol}}{4\pi r^2 c} \cdot S = 2 \cdot p \cdot S$$

Alors $m \cdot a_0 = P^*$
D'où $m = 2 \cdot p \cdot S / a_0$

Soit numériquement :

$$m = 4\,730 \text{ kg}$$

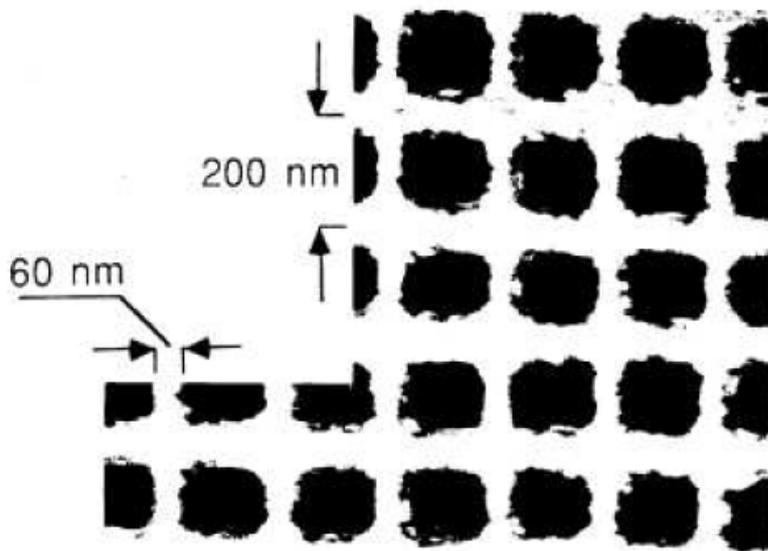
2) DIMENSIONS, MATÉRIAUX, STRUCTURE.

a) Matériaux :

- Les voiles sont constituées de **Kapton®** :
 - polymère très résistant
 - supporte des températures variant entre -269°C et 400°C
 - masse volumique $\underline{m_{vk} = 1,42\text{g/cm}^3}$

Épaisseur de Kapton utilisée : $\underline{e_k = 1,0\ \mu\text{m}}$

De plus, il existe des procédés permettant de perforer la voile de trous microscopiques, de dimensions inférieures à la longueur d'onde. Ceci permet d'alléger encore la voile tout en gardant le caractère réfléchissant :



- Voiles recouvertes de $e_a = 20\ \text{nm}$ d'aluminium
La masse volumique de l'aluminium est :
 $\underline{m_{va} = 2,69\text{g/cm}^3}$

b) Dimensions :

Pour notre voilier :

$$\mathbf{S = 1,00 \text{ km}^2}$$

Calcul de la masse m de notre vaisseau :

- $\text{MasseKapton} = S \cdot e_k \cdot m_{vk} \cdot (1 - 0,33)$
Soit une masse totale de : 951,40 kg de Kapton.
- $\text{MasseAlu} = S \cdot e_a \cdot m_{va}$
Soit une masse totale de : 40,35 kg d'Aluminium.

On obtient une masse pour la voile :

$$\mathbf{\underline{\text{MasseVoile} = 991,75 \text{ kg}}}$$

- $\text{MasseEquiperment} = 0,1 \cdot \text{MasseVoile}$
- Masse totale : $m = \text{MasseVoile} + \text{MasseEquiperment}$,

Soit :

$$\mathbf{m = 1090,92 \text{ kg}}$$

IV). 3,2,1.. PARTEZ !

Notre voilier est fin prêt pour fendre l'espace interstellaire.

« Il ne restait plus que trois minutes avant le départ. L'immense voile était tendue à craquer, sa surface polie étincelait et jouait au Soleil. »

1) HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES.

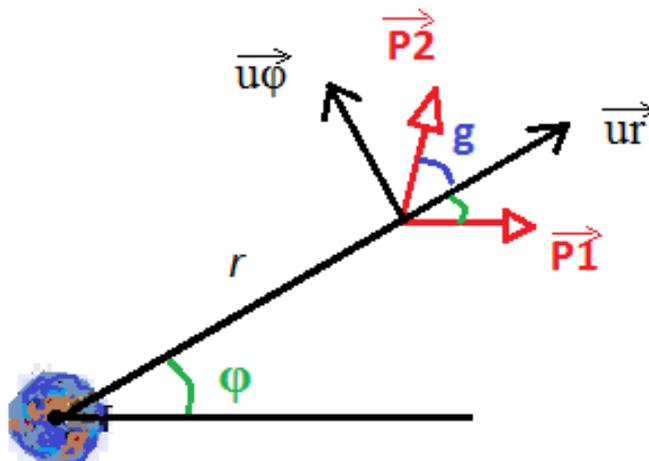
Hypothèses :

- Terre fixe par rapport au Soleil
- Rayon lumineux parallèle à l'axe Terre-Soleil
- Réflexion totale selon la loi de Descartes
- Ombre de la Terre négligée

Référentiel : Référentiel géocentrique.

Bilan des forces :

- Force d'attraction gravitationnelle de la Terre sur le voilier
- Force de pression photonique



Conditions initiales :

Examinons maintenant les conditions lors du départ de la course. Cela nous permettra par la suite d'établir les solutions des équations du mouvement. Pour cela, analysons les précieuses informations données par le texte.

« On comptait moins d'une vingtaine d'hommes capables de maîtriser le yacht solaire, et ces hommes étaient tous là, à la ligne de départ ou à bord des vaisseaux d'accompagnement, orbitant ensemble à vingt-deux mille milles au-dessus de l'équateur. »

Cette orbite de départ est une orbite synchrone ; aussi les voiliers ont ils une période de révolution autour de la Terre égal à la vitesse de rotation de la Terre sur elle même. Sachant que l'orbite circulaire synchrone correspond à $r = 42\ 190$ km et que le rayon de la Terre $R_t = 6370$ km, on obtient la hauteur de la position de départ : $35\ 820$ km au dessus de la surface du globe, soit $22\ 260$ milles. Ce qui correspond approximative aux $22\ 000$ milles décrits par l'auteur. Nous prendrons donc cette valeur - tout à fait plausible – comme donnée initiale.

$$\mathbf{r_0 = 42\ 190\ km}$$

La vitesse initiale sera prise égale à :

$$\mathbf{V_0 = 3093\ km/h}$$

L'accélération initiale différera pour les deux vaisseaux. Nous reprenons les valeurs calculées dans la partie II :

Pour le Diane :

$$\mathbf{a_0 = 0,00981}$$

Pour notre voilier :

$$\mathbf{a_1 = 0,00915}$$

2) ÉQUATIONS ET STRATÉGIE DE VOL.

Équation 1 : RFD projeté sur (O, \mathbf{ur})

$$\frac{d^2}{dt^2} r(t) - \left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right)^2 r(t) = -\frac{GM}{r(t)^2} + \frac{P (\cos(g(t)) + \cos(\phi(t)))}{m}$$

Équation 2 : RFD projeté sur $(O, \mathbf{u}\phi)$

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} \phi(t) \right) r(t) + 2 \left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right) \left(\frac{d}{dt} r(t) \right) = \frac{P (\sin(g(t)) - \sin(\phi(t)))}{m}$$

Nous souhaitons orienter la voile – et donc $g(t)$ de manière à ce que l'énergie mécanique soit maximale :

$$Em = \frac{1}{2} m \left(\left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right)^2 r(t)^2 + \left(\frac{d}{dt} r(t) \right)^2 \right) - \frac{GM}{r(t)}$$

En dérivant et en réinjectant eq1 et eq2 :

$$\frac{d}{dt} Em(t) = P \left(\frac{d}{dt} r(t) \cos(g) + \left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right) r(t) \sin(g) + \left(\frac{d}{dt} r(t) \right) \cos(\phi(t)) - \left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right) r(t) \sin(\phi(t)) \right)$$

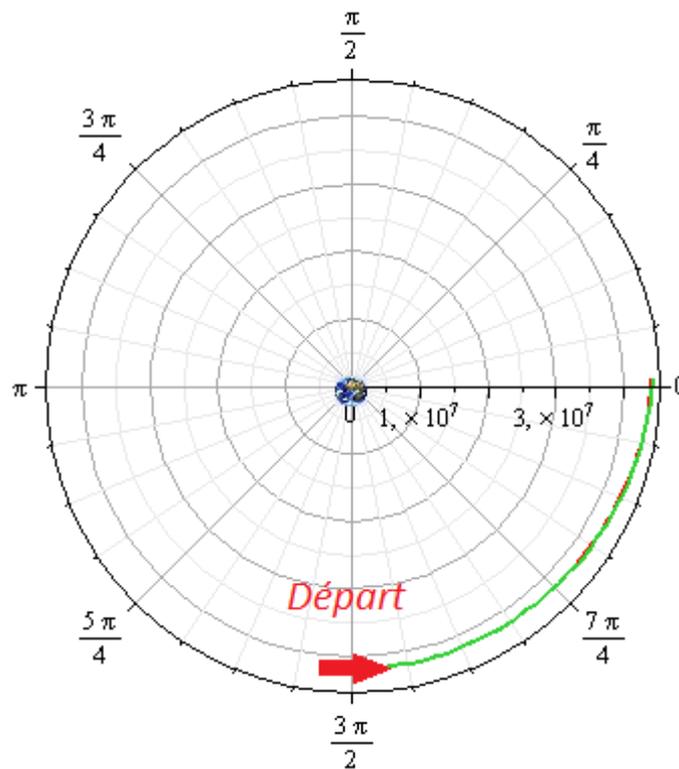
On trouve finalement le maximum de cette fonction pour :

$$\cos(g(t)) = \frac{\frac{d}{dt} r(t)}{\sqrt{\left(\frac{d}{dt} r(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right) r(t)^2}} \quad \sin(g(t)) = \frac{\left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right) r(t)}{\sqrt{\left(\frac{d}{dt} r(t) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} \phi(t) \right) r(t)^2}}$$

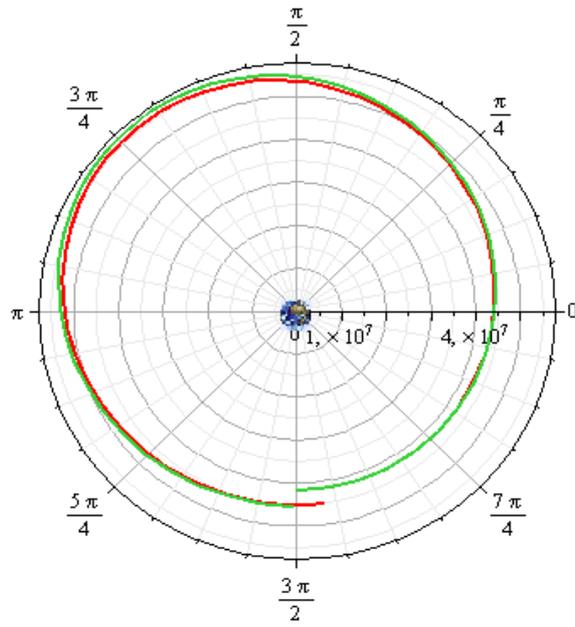
3) LES ÉTAPES DE LA COURSE

Légende :

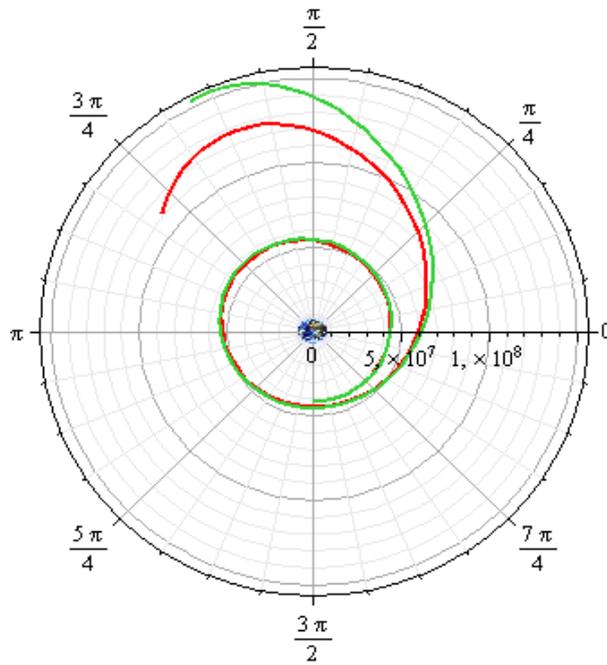
- Soleil à gauche, Terre au centre
- Notre voilier : trajectoire en vert
- Le Diane : trajectoire en rouge



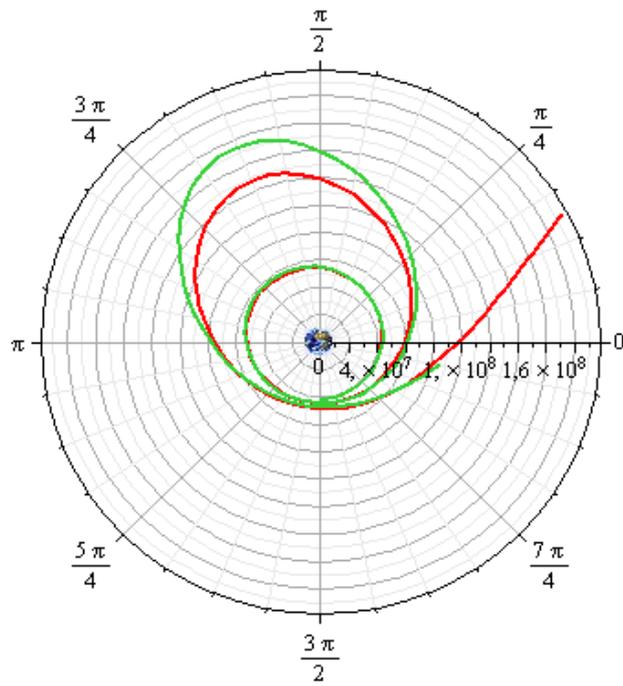
Après 6h de course



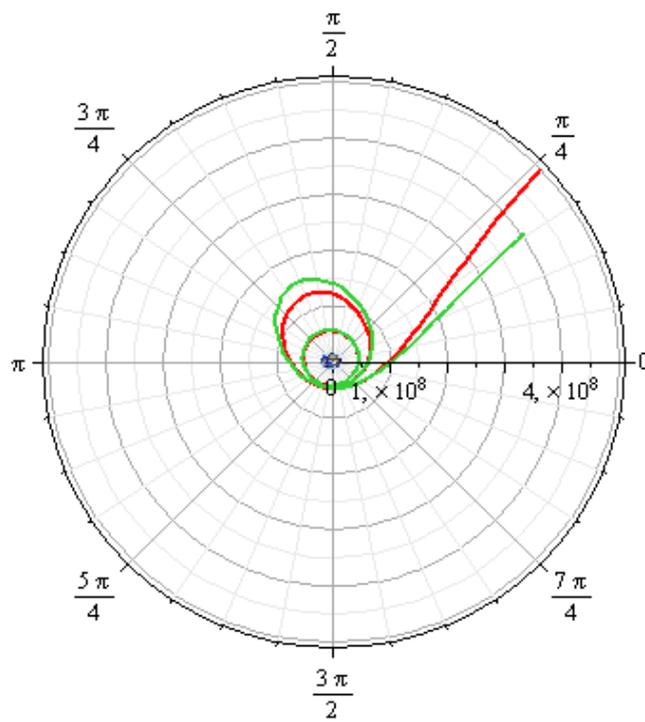
Après 30h de course



Après 80h de course



Après 120h de course



Après 155h de course

Conclusion

Nous n'avons donc pas réussi à vaincre le vigoureux skippeur Merton. Nous prendrons notre revanche lorsque les matériaux se perfectionneront, et alors ...

Tout au long de cet exposé, nous avons appréhendé le fonctionnement de base des voiliers solaires d'une manière ludique. Néanmoins, il est temps de « revenir sur Terre ». Le vol à la voile est au cœur de missions réelles. Citons le succès du lancement du **voilier japonais IKAROS** le 21 mai 2010.

... Pour que le rêve continue.

ANNEXES

Pliage de la voile

- Réalisé à la main
- Étape délicate



Déploiement de la voile

- S'effectue en gonflant les boudins
- Cause de nombreux échecs



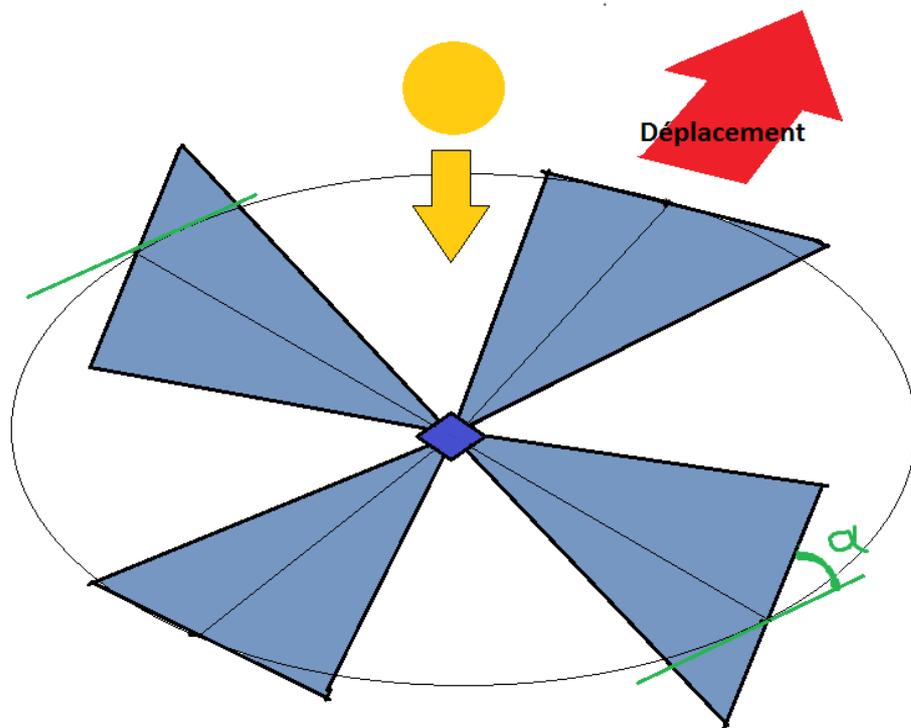
Manœuvres

Principe général :

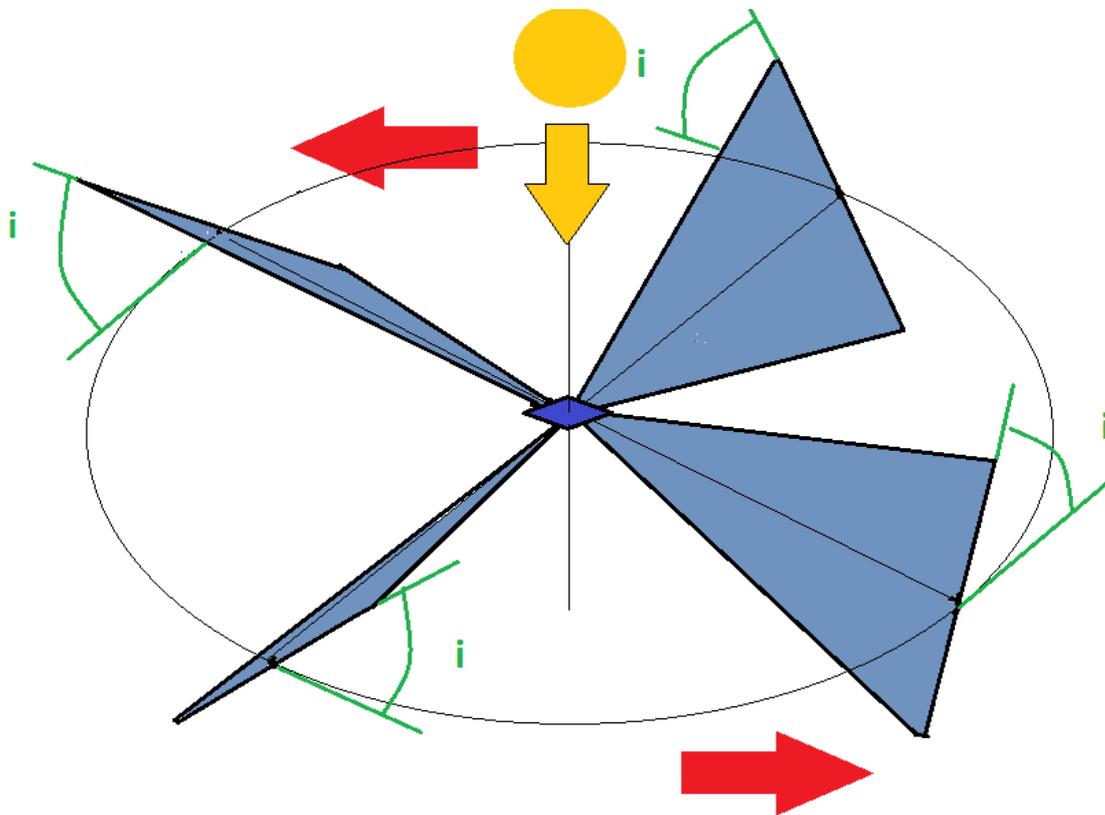
En combinant la force de gravitation et la pression photonique, un voilier solaire peut se déplacer presque librement dans le système solaire. C'est l'inclinaison de la normale à la voile par rapport aux rayons lumineux qui est déterminante.

Manœuvres spécifiques :

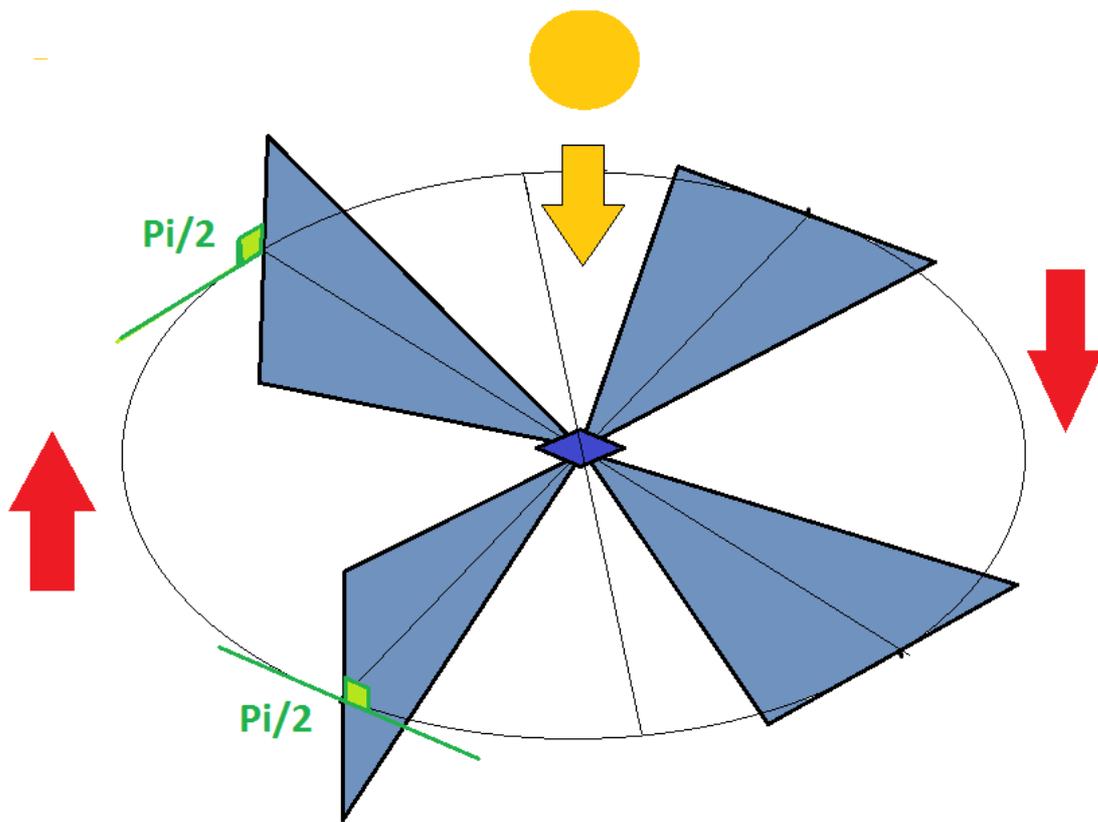
- Translation : Seulement deux pales opposées sont orientées d'un même angle α par rapport au plan du voilier. Il s'exerce sur ces deux pales une force possédant une composante horizontale, se qui permet un mouvement de translation.



- Rotation simple : Cette fois si, il faut orienter les pales opposées avec un même angle i . Ainsi, on crée un couple au niveau de l'axe central, ce qui engendre un mouvement de rotation.



- Bascule : En orientant deux pales successives perpendiculaires au plan du voilier et les deux autres dans ce plan, on parvient à faire basculer le satellite sur lui même.



Notre voilier



FIN

Remarques Supplémentaires :

- Ce TIPE a été réalisé l'année scolaire 2009-2010 par les trois étudiants de classe préparatoire Farah Gasmi, Alexandre Guevezov et Cédric Rouch.
- La présentation ci dessus est une version étoffée des transparents que j'ai présenté le jour de l'oral (« je » représente ici Cédric). Ce TIPE a été sanctionné par une note de 16,25/20 .
- Expériences : Nous avons tenté l'expérience suivante : sous une cloche à vide, nous avons suspendu une fine feuille d'or et d'aluminium, que nous avons par la suite éclairé avec une lumière condensée. Résultat : aucune déviation observable, c'est pourquoi je n'en fais pas mention dans cet exposé.
- Enfin, je remercie vivement Olivier Boisard , président de l'U3P (dont le site, magnifique, est accessible ici : <http://www.u3p.net/>) pour ses conseils précieux et son soutien.

Dans l'espoir que de pouvoir continuer à prendre part à l'aventure des voiliers solaires...

Cédric ROUCH
cedric.rouch@hotmail.fr