

# Etude des principes physiques et de la mécanique des voiliers solaires

Travail effectué par  
Thomas GUYET  
dans le cadre des TIPE

## Introduction

Les voiles solaires sont des vaisseaux spatiaux qui se composent essentiellement d'une voile de métal réfléchissant de faible épaisseur et de très grande dimension. Cette configuration afin de profiter au maximum de la pression solaire, comme alternative aux propulseurs chimiques.

Dans les années 80, l'U3P (Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique) a lancé le projet d'une course de voiliers solaires dont l'objectif est de prendre une photo de la face cachée de la lune. Quelque pays ont relevé le défi et des associations dont l'U3P qui avait son propre projet.

C'est celui-ci que nous allons étudier en voyant dans un premier temps la résultante de la force due à la pression solaire qu'utilisent ces vaisseaux particuliers, afin d'établir des trajectoires permettant de s'approcher de la lune, et enfin nous verrons pour finir si les phénomènes négligés ne perturbent pas trop notre modélisation.

## Introduction

### I- Pression de radiation

#### a- Explication succincte de l'origine

Par les deux aspects de la lumière

- corpusculaire
- ondulatoire

#### b- La formule

- les notations
- composante normale / composante tangentielle

#### c- Valeurs numériques

- force surfacique
- accélération

### II- Les trajectoires

#### a- Les hypothèses

- schématisation du système
- utilisation de la résolution numérique

#### b- Début de trajectoire réelle

- commentaire de transition

#### c- Trajectoires x10, x100

- transparents
- commentaires

### III- Les phénomènes négligés

#### a- Forces négligées

- force de Foucault
- force de frottement aérodynamique
- force de gravitation diverses

#### b- Cône d'ombre

- le cône d'ombre

#### c- Modélisation en 2D

- mouvement plan

## Conclusion

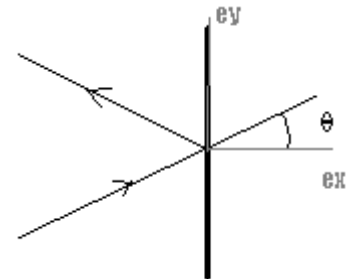
# I Pression de radiation

## a) Explication succincte de l'origine

Les voiliers solaires ont la particularité d'utiliser une force directement fournie par le soleil : c'est la **pression de radiation**, c'est la lumière rayonné par celui ci qui en est l'origine. On peut alors expliciter la force à partir des deux aspects de la lumière.

⇒ Tout d'abord *l'aspect corpusculaire* : Les photons qui frappent la voile fournissent une partie (réflexion imparfaite) de leur quantité de mouvement à celle-ci.

⇒ *L'aspect électromagnétique* par la pression de radiation, il y a une onde réfléchi sur le métal et une onde transmise laissant apparaître le caractère imparfait de la réflexion.



## b) La formule

La forme idéale de la force serait  $\vec{F} = 2 \frac{AS}{r^2} \cos^2 \theta \vec{e}_x$ , mais du fait de la réflexion imparfaite. On calcule son expression avec l'un ou l'autre des raisonnements précédemment cités et on modélise le force ainsi :

$$\vec{F} = (1 + R_s) \frac{AS}{r^2} \cos^2 \theta \vec{e}_x + (1 - R_s) \frac{AS}{r^2} \sin \theta \cos \theta \vec{e}_y$$

⇒ On explicite *les termes* :

R : coefficient de réflexion (0 à 1)

s : correctif pour l'aplanitude de la voile (0 à 1)

S : surface de la voile

$A = \frac{P_{source}}{4\pi c}$  : terme constant dépendant de la puissance de la source lumineuse.

c : célérité de la lumière dans le vide ( $3 \cdot 10^8$ )

r : distance à la source lumineuse (Soleil)

$\theta$  : angle entre la normale à la voile et les rayons incidents (en radian)

⇒ La *composante tangentielle* est généralement très inférieure (matériaux très réfléchissants) à la *composante normale* à la voile, mais ne sera jamais négligé dans la suite.

## c) Valeurs numériques

La force surfacique ne dépasse pas  $9 \mu\text{N}/\text{m}^2$  au niveau de la terre (équivalent à deux pièces de 5 francs sur un stade de foot).

Si on prend  $a = 2 \frac{A}{m \cdot r^2} S$  (accélération maximale), on a :

Surface en $\text{m}^2$	10 000	40 000	90 000	1 600 000
Accélération en $\text{mm}/\text{s}^2$	0.25	0.5	0.75	1.0

Pourtant on peut atteindre des vitesses de l'ordre du dixième de la vitesse de la lumière (en trois ans).

## II Les trajectoires

### a) Hypothèses

⇒ On étudie le système **Voile** dans un système solaire simplifié composé de la **terre, la lune et le soleil**.

⇒ On fait les *approximations* suivantes :

- Les **rayons solaires sont parallèles** (grande distance terre - soleil).
- Les rayons solaires arrivent toujours **sous un même angle** ( ' ' ).
- La **distance terre – lune est négligeable devant la distance terre – soleil**.

alors la force n'est fonction que de  $\theta$ .

⇒ Les *forces appliquées* au système sont :

- La **gravitation** de la lune, de la terre.
- La **pression de radiation** que l'on sépare en une force tangentielle et une force normale à la voile.

On a donc le système différentiel :

$$\begin{cases} \frac{d^2r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{F_n}{m} \cdot \cos(\theta - \alpha) + \frac{F_t}{m} \cdot \sin(\theta - \alpha) - \frac{G_l}{m} \cdot \cos\alpha - \frac{G_t}{m} \\ 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r \frac{d^2\theta}{dt^2} = - \frac{F_n}{m} \cdot \sin(\theta - \alpha) + \frac{F_t}{m} \cdot \cos(\theta - \alpha) + \frac{G_l}{m} \cdot \sin\alpha \end{cases}$$

⇒ Comme le problème contient un grand nombre de paramètres et de la forme du système différentiel, on utilise une *résolution numérique* pour obtenir les trajectoires (à l'aide de Maple).

### b) Début des trajectoires réelles

⇒ Les courbes obtenues ne sont pas significatives et *non exploitables*, en effet la pression de radiation étant très faible, les déviations le sont aussi.

### c) Trajectoires x10, x100

⇒ On multiplie la force de pression de radiation par 10 ou 100 afin de mieux comprendre les trajectoires.

⇒ On établit une *stratégie de vol* pour profiter au maximum de la pression de radiation :

- La remontée face aux rayons se fait en plaçant la voile parallèle à ceux-ci.
- Déplacement dans le sens des rayons est effectué la voile perpendiculaire aux rayons.

On part d'une orbite géosynchrone, on observe une première partie de la trajectoire où le rayon diminue (x10), elle consiste à gagner de la vitesse, alors dans une deuxième partie il y a un gain d'altitude (x100).

On peut comparer les trajectoires calculées avec d'autres documents, l'allure en ellipse grandissante est la même et les ordres de grandeurs des altitudes atteintes aussi.

### III Phénomènes négligés

⇒ Mais ceci n'est qu'une **modélisation** ne prenant pas en compte tous les paramètres c'est pourquoi il faut voir si nos trajectoires sont envisageables pratiquement. Il faut remarquer aussi que certaines approximations signalées précédemment ont été justifiées et donc ne pose pas de problème.

#### a) Forces négligées

⇒ Dans le champ magnétique terrestre, permanent, les **courants induits** dans la voile métallique ont un effet freinant d'après la loi de Lenz mais dont la norme est 100x inférieur à la pression de radiation : On n'a pas fait là une grosse approximation.

⇒ Les forces dues au **frottement aérodynamique** de la voile dans la haute atmosphère sont pratiquement inexistantes au-delà de 1000 km d'altitude donc sont aussi négligeables.

⇒ Dans notre système solaire, il a été négligé toutes les attractions gravitationnelles autres que celles de la terre et la lune. Comme on reste dans cette seule région de l'espace l'approximation est bonne.

#### b) Cônes d'ombres

⇒ Le programme de calcul ne prend pas en compte les **cônes d'ombres** : ces zones de l'espace où les rayons du soleil ne parviennent pas, arrêtés par la terre ou la lune. Privé d'une force la voile ne suit pas la trajectoire calculée.

#### c) modélisation 2D

⇒ Toute l'étude précédemment effectuée a été faite **dans le plan**. Pratiquement nous pourrions imaginer ne pas rester dans le plan mais il ne faut pas oublier notre **objectif** qui est de passer derrière la lune. Il semble alors plus évident de rester dans le plan de rotation de celle-ci pour effectuer les éventuelles corrections de trajectoire.

Corrections éventuelles qui serait dues à l'un des paramètres négligés qui prendraient pratiquement plus d'importance que prévu.

### Conclusion

La pression de radiation permet pourtant d'obtenir une énergie utilisable par les voiliers solaires dans tout le système solaire et si le projet de l'U3P de prendre une photo de la face cachée de la lune, a plus un but symbolique que scientifique, il permet surtout une grande avancée technologique dans ce nouveau type de transport qui semble plutôt destiné pour les voyages de dimension interplanétaire.

On retrouve ainsi les voiles solaires dans divers projets comme l'anticipation des orages magnétiques (Vigiwind) ou les transports vers mars. Mais cela impose, pour la rentabilité du voyage, de déployer une voile de très grande dimension (afin de garder un rapport S/M suffisant) ce qui n'est pas sans poser de nombreux problèmes technologiques, prenant pour exemple l'échec de Znamia 2.5. Znamia qui reste malheureusement le seul projet ayant pris une part de réalité.

Les efforts entrepris par de nombreux ingénieurs permettront, sans doute, un jour de voir au travers de l'espace flotter une voile solaire.