

La pression photonique

I. Le radiomètre de Crookes

- 1) Origine de la force
- 2) Présentation du radiomètre
- 3) Expérience
- 4) Résultats expérimentaux

II. Les voiliers solaires

- 1) Modélisation
- 2) Simulations
- 3) Avantages et inconvénients

III. Autres applications

- 1) La courbure de la queue des comètes
- 2) L'effet Yarkovsky

La pression photonique

Lorsque les photons frappent une paroi, ils lui cèdent une partie de leur quantité de mouvement. Ces nombreux chocs conduisent à une force exercée par la lumière sur la matière : **la force de pression photonique**. Sur Terre cette force est imperceptible car elle est masquée par d'autres actions beaucoup plus fortes tels que les frottements de l'air. Par contre dans l'espace la pression de radiation agit comme une force perturbatrice. En offrant une accélération constante elle peut, sur de longues durées, influencer le mouvement des corps légers. Des voiliers solaires pourraient ainsi dans l'avenir favoriser les voyages interplanétaires.

A travers **le radiomètre de Crookes**, petit moulin tournant sous l'action de la lumière, nous allons essayer de mettre en évidence la pression de radiation puis nous nous intéresserons à la modélisation de différentes trajectoires que pourraient emprunter des **voiliers solaires**, enfin nous verrons deux autres applications de la pression photonique : **la courbure de la queue des comètes** et **l'effet Yarkovsky**.



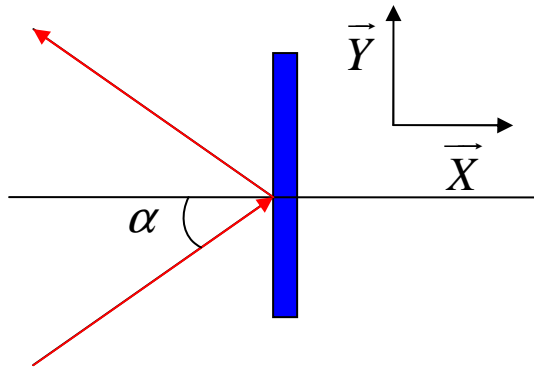
Crédits : Jet Propulsion Laboratory

I. Le radiomètre de Crookes

1) Origine de la force

Lorsque des photons sont réfléchis sur une paroi, ils lui cèdent une partie de leur quantité de mouvement. Cela crée une force, la pression photonique. Nous allons essayer de trouver son expression.

Pour un photon arrivant avec un angle α sur une paroi de surface S et étant réfléchi :

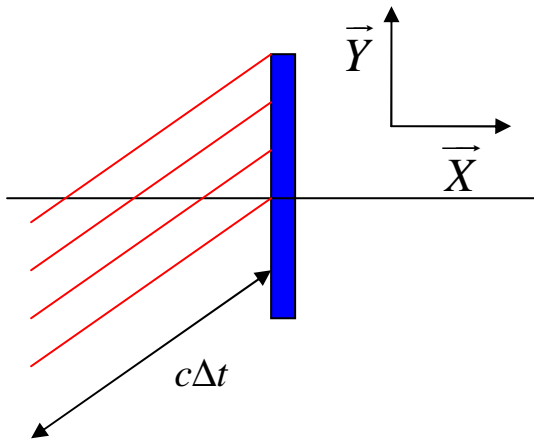


$$\vec{p}_{initial} = \frac{h\nu}{c} \cos \alpha \vec{X} + \frac{h\nu}{c} \sin \alpha \vec{Y}$$

$$\vec{p}_{final} = -\frac{h\nu}{c} \cos \alpha \vec{X} + \frac{h\nu}{c} \sin \alpha \vec{Y}$$

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_{final} - \vec{p}_{initial} = -2 \frac{h\nu}{c} \cos \alpha \vec{X}$$

La paroi reçoit donc une quantité de mouvement de $2 \frac{h\nu}{c} \cos \alpha \vec{X}$ à chaque fois qu'un photon la rencontre.



Le nombre de photons frappant la paroi pendant dt est $n \times S \times c \times dt$

D'où :

$$d\vec{p}_{paroi} = 2 \frac{(n \times S \times c \times dt) \times h\nu}{c} \cos^2 \alpha \times dt \vec{X}$$

$$\frac{d\vec{p}_{paroi}}{dt} = 2S \frac{P_s}{c} \cos^2 \alpha \vec{X}$$

n : nombre de photons par unité de volume

P_s : Puissance surfacique reçue par la paroi

D'où l'expression de la pression photonique : $\vec{F}_p = 2S \frac{P_s \cos^2 \alpha}{c} \vec{X}$

2) Présentation du radiomètre

Le radiomètre de Crookes est un petit moulin tournant sous l'action de la lumière. Ses faces sont peintes en noir d'un côté, en blanc de l'autre. La pression photonique devrait pousser les faces blanches mais, lorsqu'on le soumet à la lumière solaire, le radiomètre ne tourne pas dans le bon sens...



Côté noir : les photons sont absorbés, ils transmettent une fois leur quantité de mouvement.

Côté brillant : les photons sont réfléchis, ils transmettent deux fois leur quantité de mouvement.

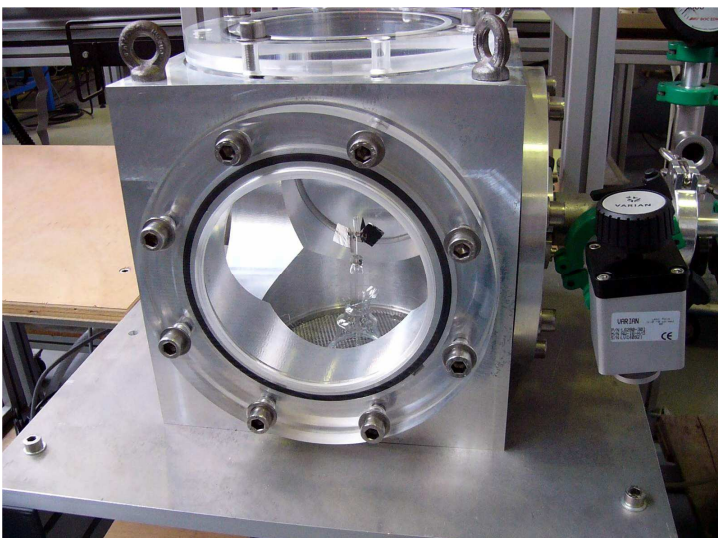
Théoriquement : les faces blanches devraient être poussées

Pratiquement : sous l'action directe du soleil, ce sont les faces noires qui semblent poussées

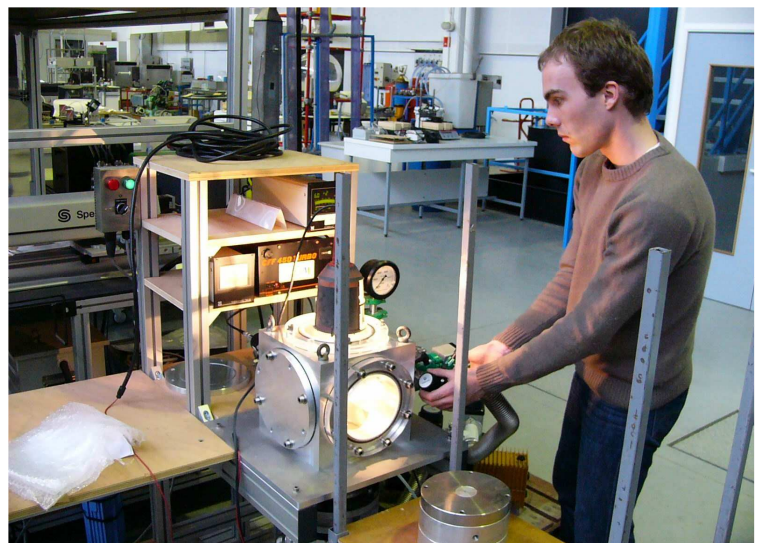
Radiomètre de Crookes, modèle de chez Pierron

3) Expérience

Je me suis rendu à l'Ecole des Mines de Nantes où, avec l'aide du technicien Eric Chevrel, j'ai placé le radiomètre de Crookes dans une enceinte à vide pouvant atteindre une pression de 2×10^{-6} bars. J'ai ainsi pu analyser l'influence de la pression sur le sens de rotation du radiomètre.



Radiomètre de Crookes dans son enceinte à vide



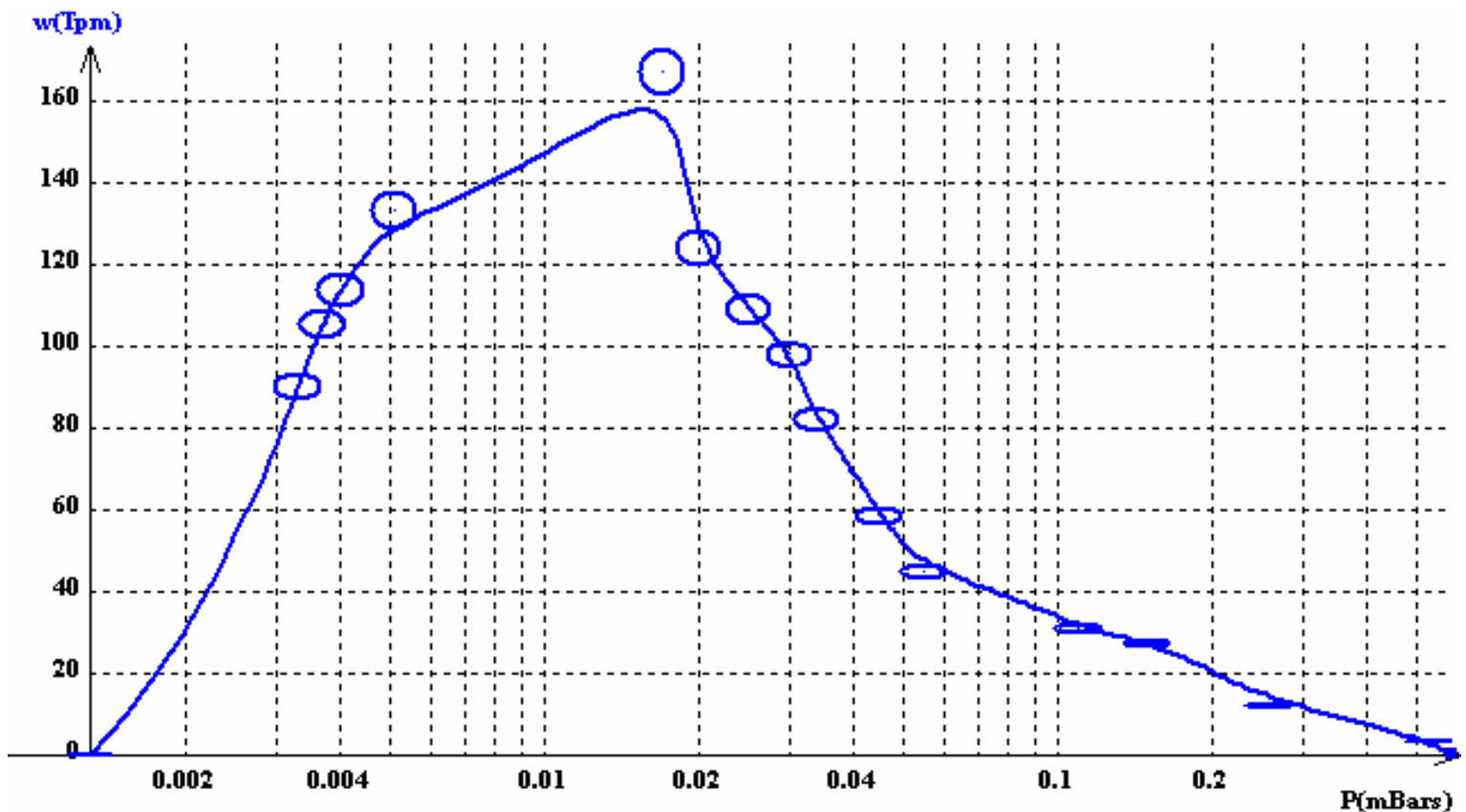
Eric Chevrel m'aidant à manipuler

4) Résultats expérimentaux

Quatre forces agissant sur le radiomètre sont en concurrence:

- **Les forces radiométriques** provoquées par la présence de gaz dans l'enceinte. Ce sont celles que j'ai mises en évidence.
- **Les frottements fluides** de l'air.
- **Les frottements solides** entre l'axe et le tourniquet.
- **La pression photonique** qui s'est révélée trop faible pour être mise en évidence.

L'étude des forces radiométriques fait intervenir des outils compliqués de mécanique des fluides, je ne m'y suis pas intéressé davantage.



Vitesse angulaire de rotation du radiomètre en fonction de la pression

La courbe expérimentale comporte trois zones :

- A faible pression ($P < 0.002$ mBars) le radiomètre ne tourne pas, les frottements solides entre l'axe et le tourniquet sont trop forts pour être contrebalancés par la pression photonique.
- Lorsque la pression augmente (de 0,002 mBars à 0.015 mBars), la vitesse de rotation du radiomètre augmente, les faces noires sont poussées. Les forces radiométriques sont prépondérantes.
- Une fois dépassés les 0.02 mBars, le radiomètre ralentit progressivement : les forces de frottement fluide de l'air augmentent et l'empêchent de tourner.

II. Les voiliers solaires

1) Modélisation

Les voiliers solaires sont des engins de grande taille (environ 200m×200m) poussés dans l'espace par la pression de radiation. Deux essais de déploiement d'une voile dans l'espace ont déjà eut lieu : les missions Cosmos 1 et Znamia. Je propose ici différentes simulations numériques réalisées sur Maple modélisant des trajectoires de voiliers solaires.

On imagine une voile solaire (en bleu) initialement en orbite terrestre autour du soleil (figure 1). Cette voile est orientable à volonté (figure 2).

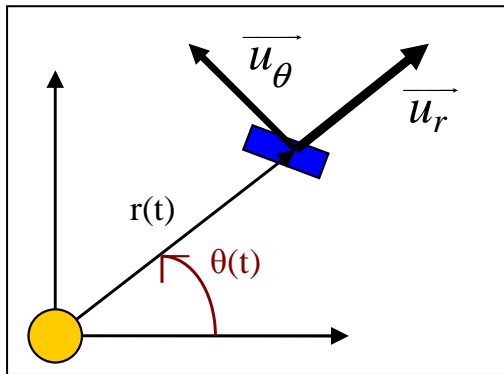


Figure 1

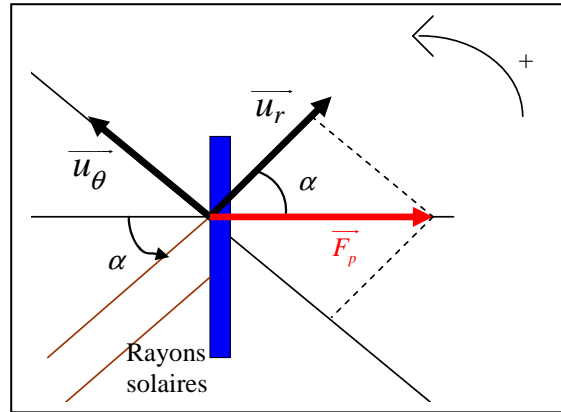


Figure 2

Deux forces s'exercent sur la voile :

- **La force de gravitation** : $\vec{F}_G = -\frac{GMm}{r^2} \vec{u}_r$
- **La pression photonique** $\vec{F}_p = \|\vec{F}_p\| (\cos(\alpha) \vec{u}_r - \sin(\alpha) \vec{u}_\theta)$ avec $\|\vec{F}_p\| = \frac{SP \cos^2(\alpha)}{2\pi cr^2}$
où P est la puissance émise par le soleil et P/2πr² la puissance surfacique reçue à la distance r du soleil.

En appliquant le théorème du centre d'inertie on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \left(\frac{SP}{2\pi c} \cos^3(\alpha) - GM \right) \frac{1}{r^2} & \text{selon } \vec{u}_r \\ 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{SP}{2\pi c} \frac{\cos^2(\alpha) \times \sin(\alpha)}{r^2} & \text{selon } \vec{u}_\theta \end{cases}$$

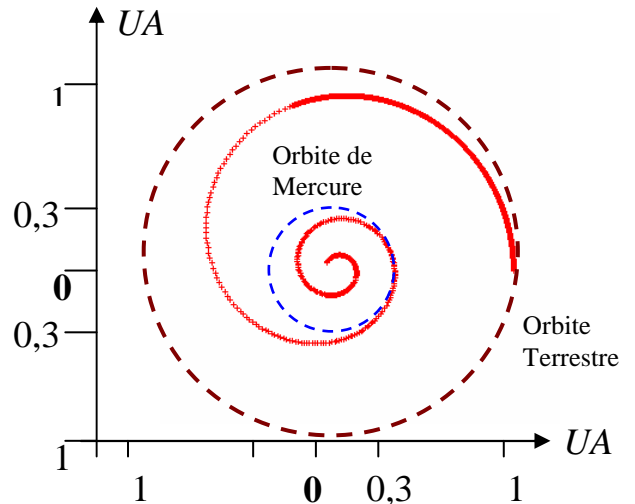
On remarque que l'angle alpha, c'est-à-dire l'orientation de la voile joue un rôle prépondérant :

- Pour $\alpha = -\arctan\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \approx -35^\circ$ la force est maximum selon \vec{u}_θ , donc selon \vec{V}_0 : le vaisseau est accéléré
- Pour $\alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \approx 35^\circ$ la force est maximum selon $-\vec{u}_\theta$, donc selon $-\vec{V}_0$, le vaisseau est ralenti

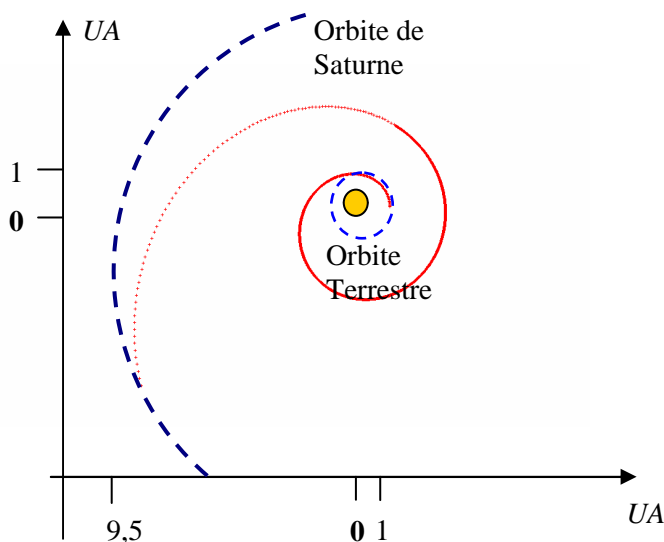
2) Simulations

Voyage vers Mercure

En orientant la voile selon $\alpha \approx -35^\circ$, le vaisseau est ralenti. Il perd alors de l'énergie cinétique et se rapproche du soleil. Ces résultats sont obtenus pour une voile de 200m*200m transportant une charge utile de 100kg. L'orbite de Mercure est atteinte en huit mois et demi.



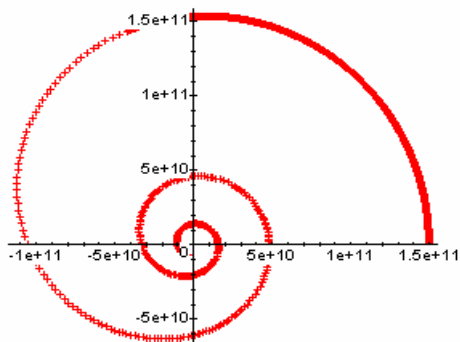
Voyage vers Saturne



En orientant la voile selon $\alpha \approx +35^\circ$, le vaisseau est accéléré. Il gagne de l'énergie cinétique et s'éloigne du soleil. L'orbite de Saturne est alors atteinte en onze ans, celle de Pluton en 90ans. Ces résultats sont obtenus pour le même voile que précédemment.

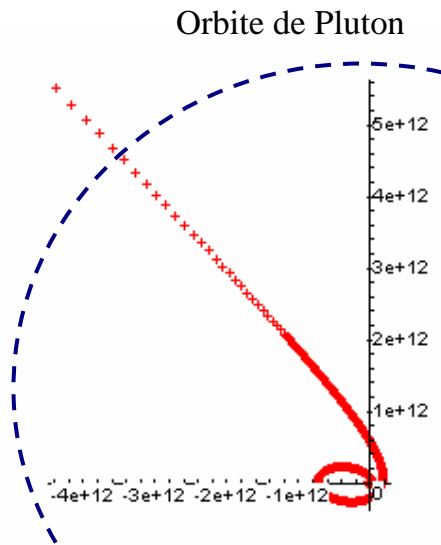
Voyage vers Pluton

Afin d'atteindre Pluton en des temps raisonnables il est possible de combiner les deux méthodes



1^{er} phase : freinage pendant 10mois jusqu'à une distance de 8 millions de kilomètres du soleil (ce qui est très peu réaliste...) afin d'obtenir une vitesse maximale : 128km/s.

Intérêt : Avoir une force plus forte et une vitesse plus grande afin d'acquérir une grande puissance $P=F \cdot V$



2^{ème} phase : accélération.
 L'orbite de Pluton est atteinte en 15ans
 Vitesse finale : 16Km/s

3) Avantages et inconvénients

Avantages :

- *Diminution de la masse due au carburant* : le carburant représente plus de la moitié de la masse des sondes actuelles. La propulsion photonique n'en a pas besoins, c'est autant de masse gagnée au décollage
- *Faible poids de la voile* : une voile de
- *Diminution du coût d'envoi* qui est proportionnel à la masse de l'engin.
- *De grandes vitesses restent atteignables* : notre voile solaire peut atteindre Pluton à la vitesse de 16km/s, ce qui est presque aussi rapide que la sonde New-Horizon (20,8Km/s)
- *Energie non polluante et inépuisable* : en effet l'énergie provient entièrement du Soleil

Inconvénients :

- *Grande difficulté à déplier la voile* : échec des mission Cosmos 1 et de la mission Znamia
- *Nécessité d'avoir des matériaux fins, légers et très résistants* : Le Kapton® est utilisable pour la voile et les nano tubes de carbones le pourront servir aux armatures.

Les avantages sont grands et les inconvénients sont surtout techniques et voués à être dépassés.

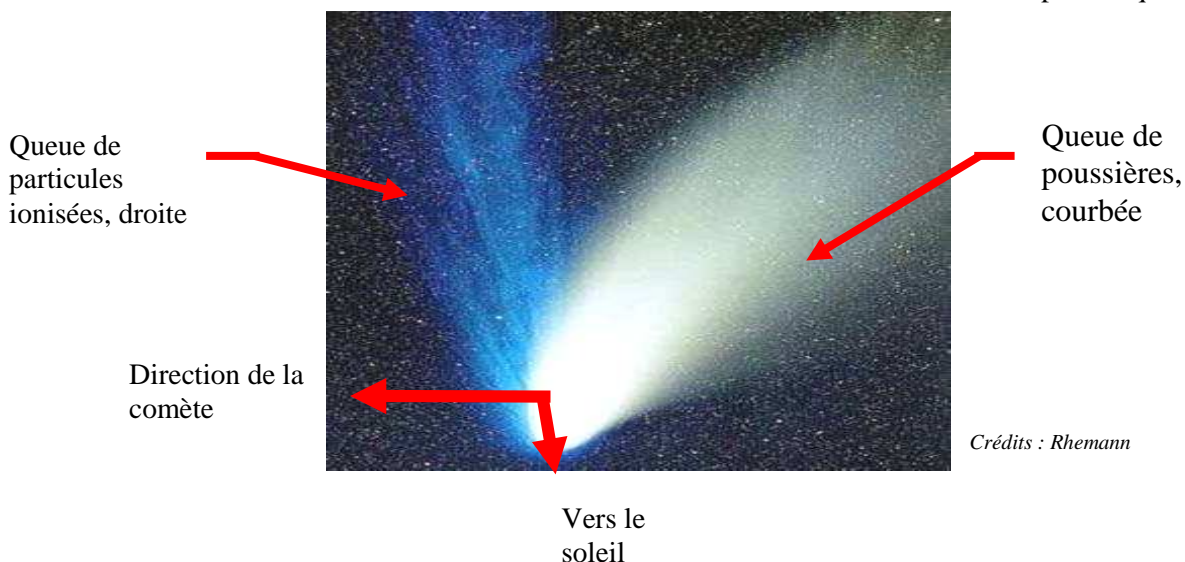
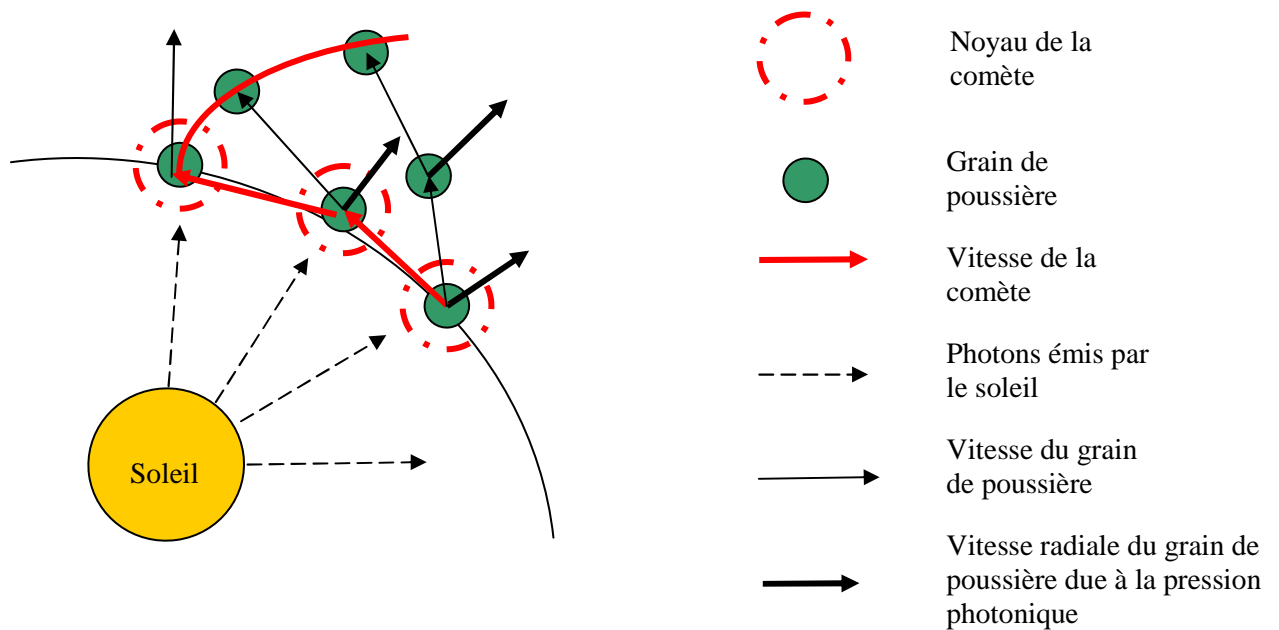
III. Autres applications

1) La courbure de la queue des comètes

Les comètes possèdent deux queues :

- La première est constituée de **grains de poussière**, brillants et d'un diamètre inférieur au centième de millimètre. Ils sont éjectés par la comète et la suivent donc le long de son orbite. Mais ils sont aussi poussés radialement par la pression de radiation. Un phénomène analogue à celui du « filet de fluide » apparaît : **la queue est courbée**.
- La deuxième queue est bleutée. Elle se compose de **particules ionisées** par les radiations solaires : principalement CO^+ (responsable de la couleur bleu) mais aussi H_2O^+ , CO_2^+ ou bien OH^+ . Ces ions interagissent avec le vent solaire, un flux de particules ionisées émis par le soleil. Ils sont ainsi poussés beaucoup plus fortement que les grains de poussière : la deuxième queue est **droite et pointe vers le soleil**.

Trajet d'un grain de poussière pendant dt : $d(OM) = Vdt$



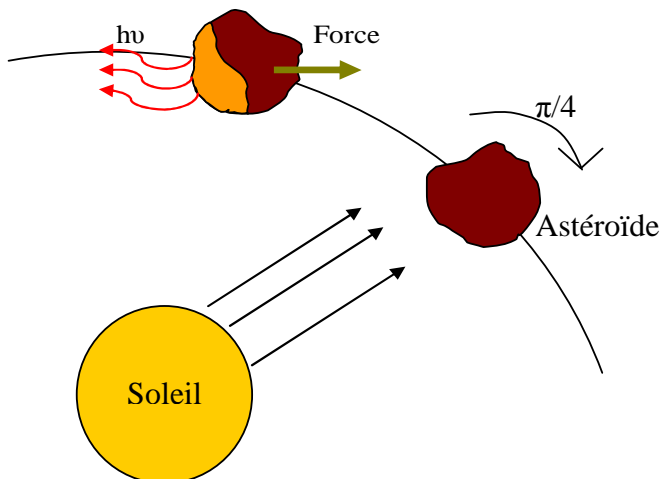
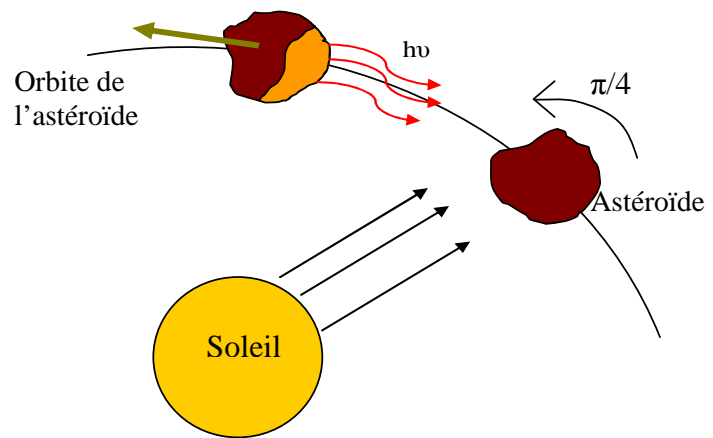
2) L'effet Yarkovsky

L'effet Yarkovsky est la variation de la période de révolution d'un astéroïde due à la pression photonique. Il est non négligeable pour un corps répondant à ces critères :

- Il doit tourner sur lui-même bien plus vite qu'il ne tourne autour du soleil.
- Il doit être assez gros pour que la convection interne ne puisse rendre sa température de surface homogène.
- Il doit être assez petit pour que le rapport $\frac{\text{surface}}{\text{masse}}$ soit grand.

Considérons astéroïde répondant à ces critères. La face éclairée de l'astéroïde chauffe à cause du soleil puis l'astéroïde fait un quart de tour sur lui-même. La face chauffée va alors se refroidir en émettant des Infrarouges qui vont pousser l'astéroïde.

1er cas : L'astéroïde tourne sur lui-même dans le même sens qu'autour du soleil : il est accéléré et s'éloigne du soleil.



2ème cas : L'astéroïde ne tourne pas sur lui-même dans le même sens qu'autour du soleil : il est freiné et tombe vers le soleil.

Dans les deux cas la trajectoire de l'astéroïde est modifiée. Cela explique en partie pourquoi certains astéroïdes ont été éjectés de la ceinture d'astéroïdes et amenés sur une orbite croisant l'orbite terrestre. Un astéroïde menaçant la Terre pourrait ainsi être « peint » afin d'écarter tout danger de collision : en modifiant son albédo, la manière dont il réfléchit la lumière, on peut modifier l'effet Yarkovsky et donc changer sa trajectoire.

La pression photonique est difficile à mettre en évidence sur Terre. Dans l'espace elle peut pourtant avoir des effets non négligeables et mêmes très utiles. Peut-être qu'un jour des voiliers solaires feront l'aller retour entre Mars et la Terre. L'étude d'un phénomène difficile à mettre en évidence a montré les limites de l'expérimentation scientifique.

Bibliographie

GIBBS, Philip. *How does a light-mill work ?* Université de Californie. 1997. En ligne : <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html>, consulté le 15/12/2005.

SCANDURRA Marco. *Enhanced radiometric forces*, arXiv:physics/0402011. éd. électronique. Février 2004. En ligne : <http://arxiv.org/abs/physics/0402011>, consulté le 10/01/2006.

BOISSARD Olivier. *Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique*. En ligne : <http://www.u3p.net>, consulté le 15/12/2005.

Wikipédia, l'encyclopédie libre, version anglaise. *Yarkovsky effect*. En ligne : http://en.wikipedia.org/wiki/Yarkovsky_effect, consulté le 20/12/2005.

Jet Propulsion Laboratory. *Solar Sail Technology Development*. En ligne : <http://solarsail.jpl.nasa.gov/index.html>, consulté le 18/05/2006.

Contacts

-**Eric Chevrel**, *technicien à l'Ecole des Mines de Nantes* : a encadré les expérimentations.

-**Jean-Marie Laugier**, professeur à l'université de Provence : m'a donné des conseils pour l'expérience.

-**Olivier Boissard**, *directeur de l'Union pour la Promotion de la Propulsion Photonique* : m'a fourni des renseignements sur les voiliers solaires.

-**Hervé De Feraudy**, directeur du Centre d'étude des Environnements Terrestres et Planétaires de Vélizy-Villacoublay (CETP) : m'a donné des informations sur l'effet Yarkovsky.