

Image Olivier Boisard

# PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



**01 CONCEPT**

**02 AVANTAGES /  
INCONVÉNIENTS**

**03 PROJETS**

**04 PERSPECTIVES**

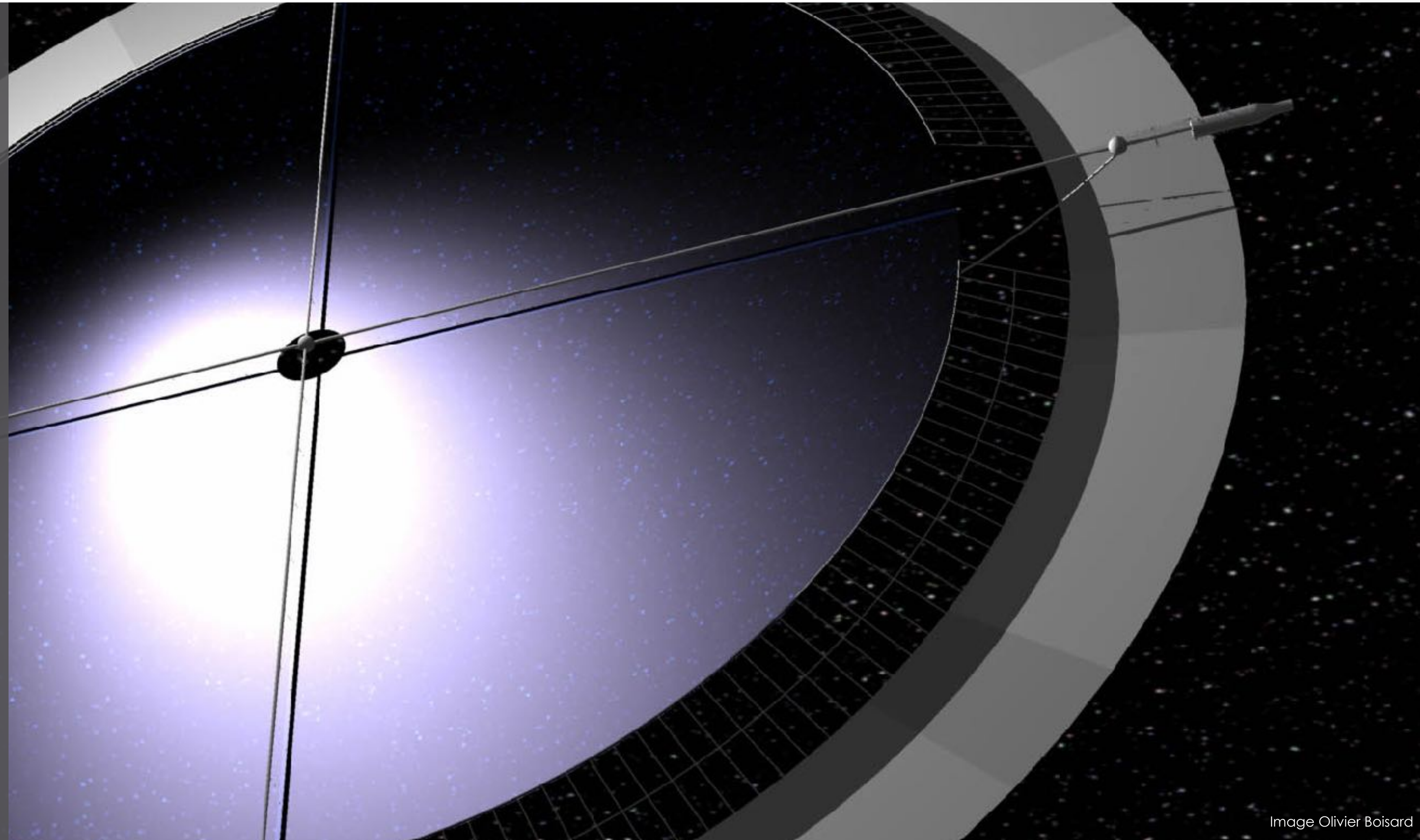


Image Olivier Boisard

# PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



# CONCEPT - QUELQUES REPÈRES HISTORIQUES

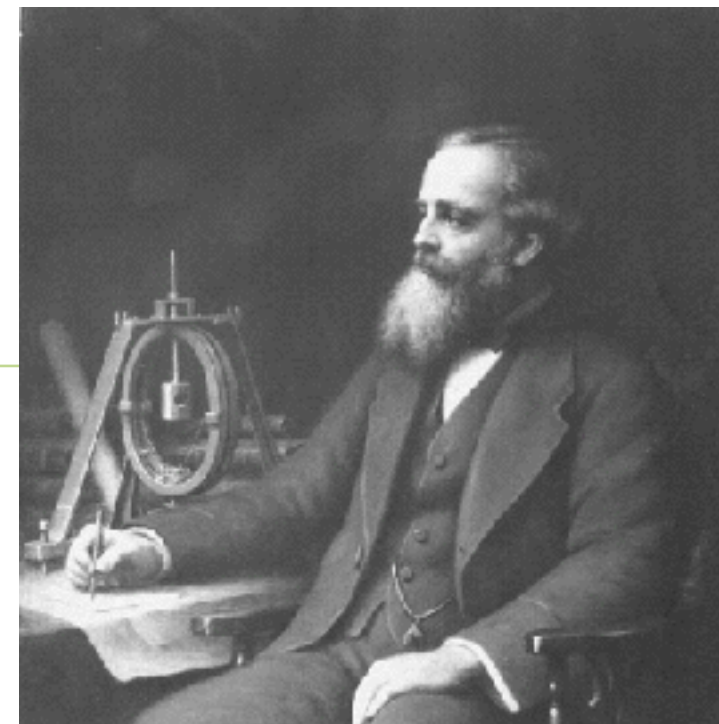
XVII<sup>e</sup> siècle



Johannes Kepler

Observation de l'orientation de la queue des comètes. En 1619, hypothèse d'une pression exercée par la lumière solaire.

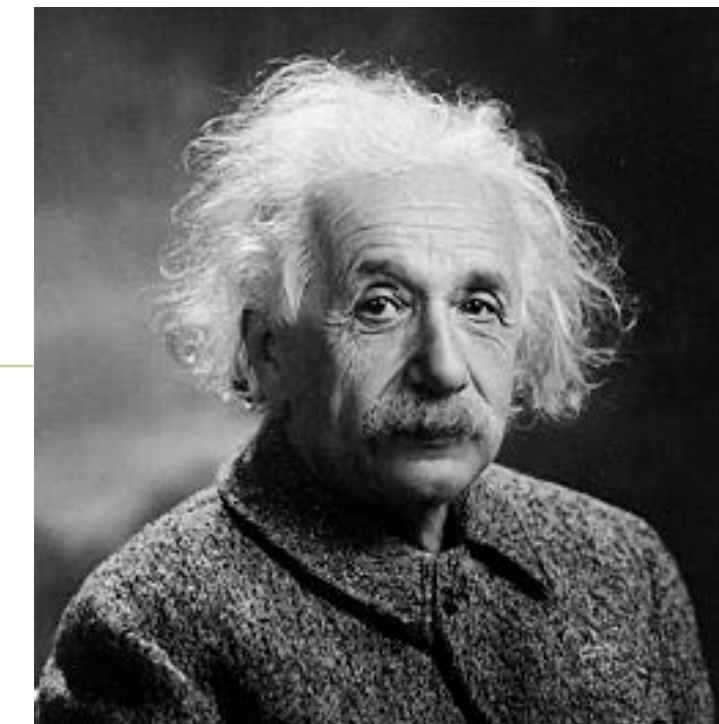
XIX<sup>e</sup> siècle



James Clerk Maxwell

Formulation en 1873 des équations de Maxwell formalisant les lois de l'électromagnétisme.

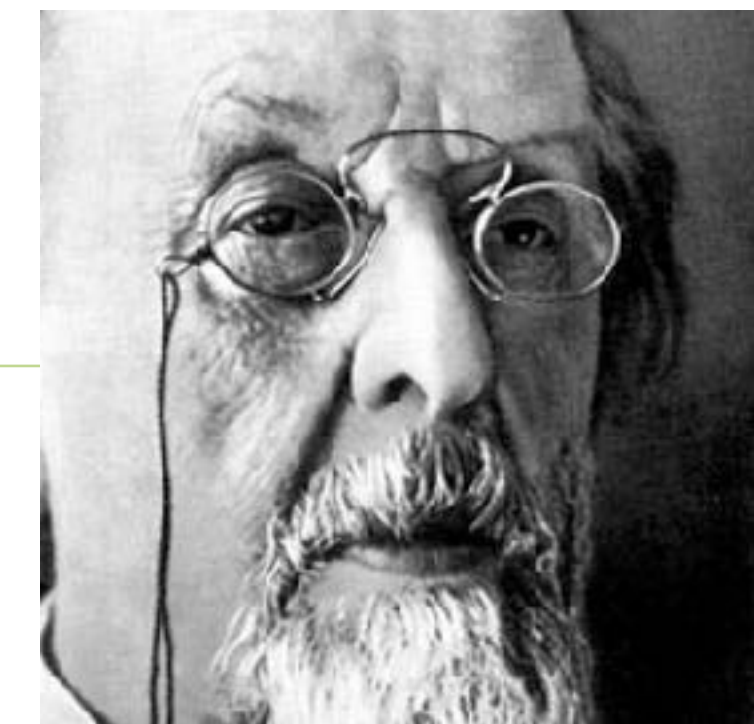
XX<sup>e</sup> siècle



Albert Einstein

En 1905, démonstration de la nature corpusculaire de la lumière, et de la loi d'équivalence masse/énergie  $E=mc^2$ .  
Quantité de mouvement du photon.

XX<sup>e</sup> siècle

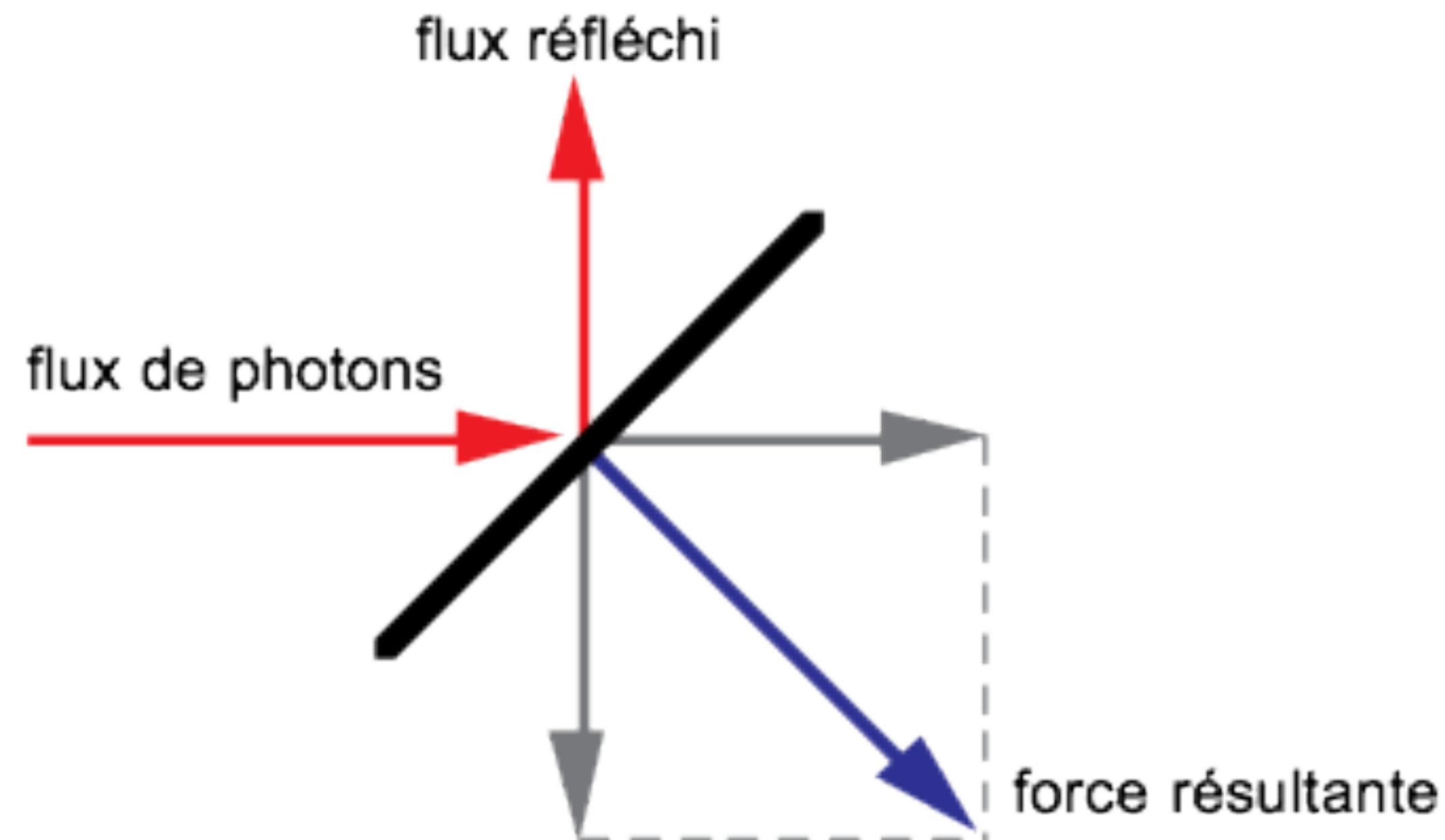


Constantin Tsiolkovski

Durant les années 1920, Tsiolkovski propose le concept de voile solaire, utilisant comme mode de propulsion la pression photonique.  
Idée qui sera par la suite développée par Yakov Perelman, Herman Oberth, Richard Garwin, ...

## PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

# CONCEPT - PRINCIPE DE LA PROPULSION PHOTONIQUE



- **LE PHOTON POSSÈDE UNE QUANTITÉ DE MOUVEMENT**

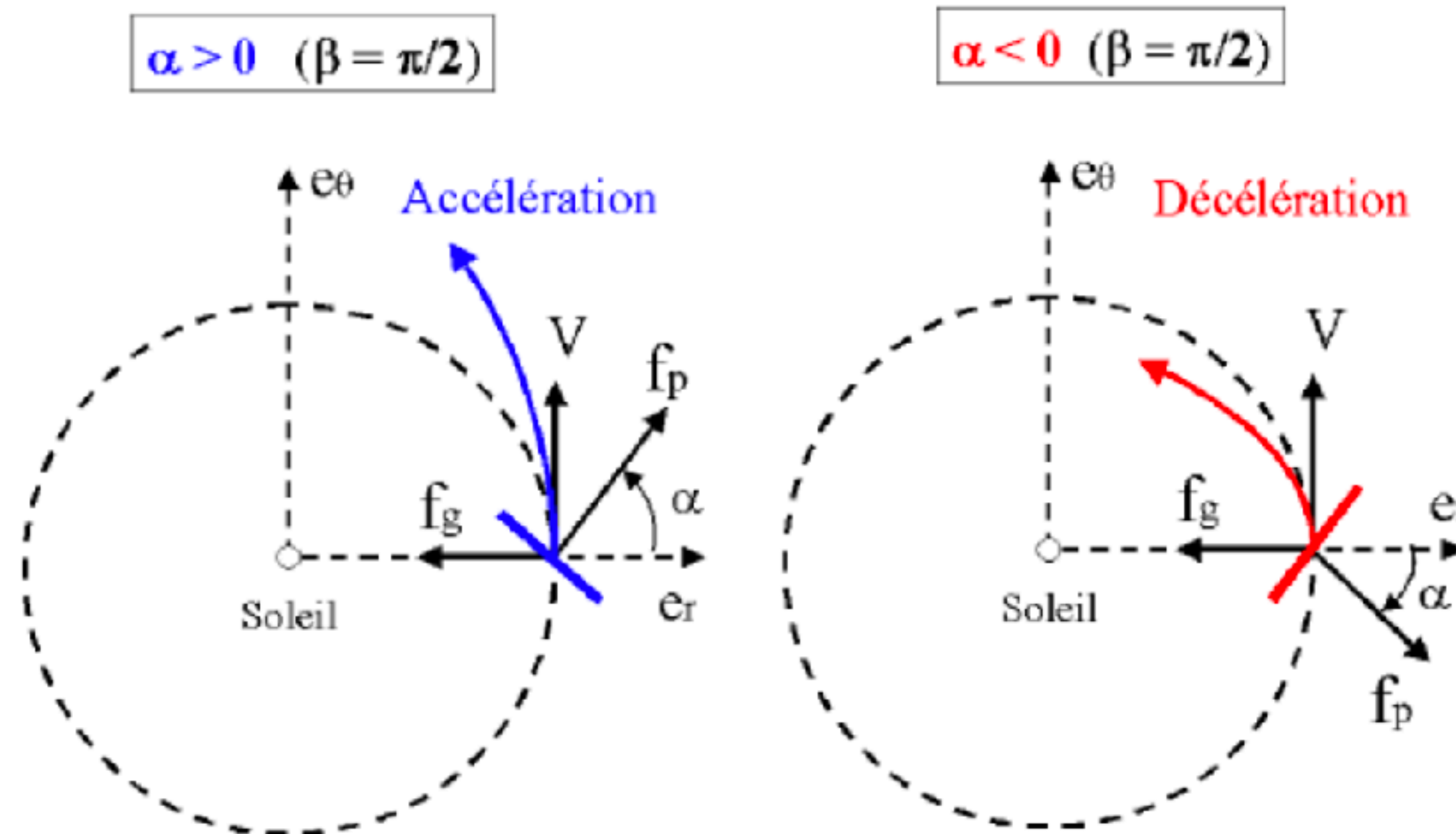
- **CETTE QUANTITÉ DE MOUVEMENT PEUT ÊTRE ÉCHANGÉE ENTRE LES PHOTONS ET UNE SURFACE RÉFLÉCHISSANTE**

- **UNE PRESSION FAIBLE MAIS PERMANENTE**

Ordre de grandeur de la force photonique du Soleil au niveau de la Terre :  $4.56 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$ .

*Pour une voile de la taille d'un terrain de football, une force comparable à celle du poids d'une pièce de monnaie.*

# CONCEPT - PRINCIPE DE LA PROPULSION PHOTONIQUE



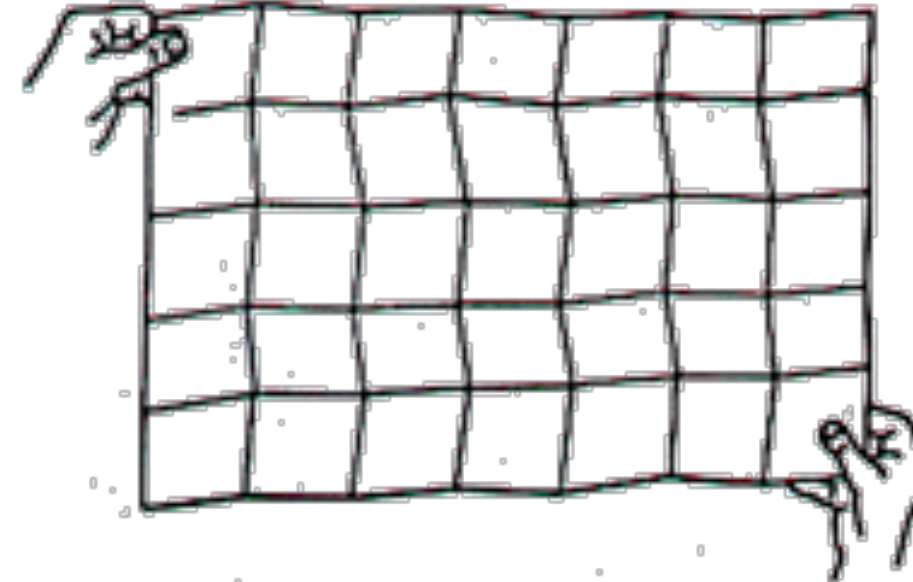
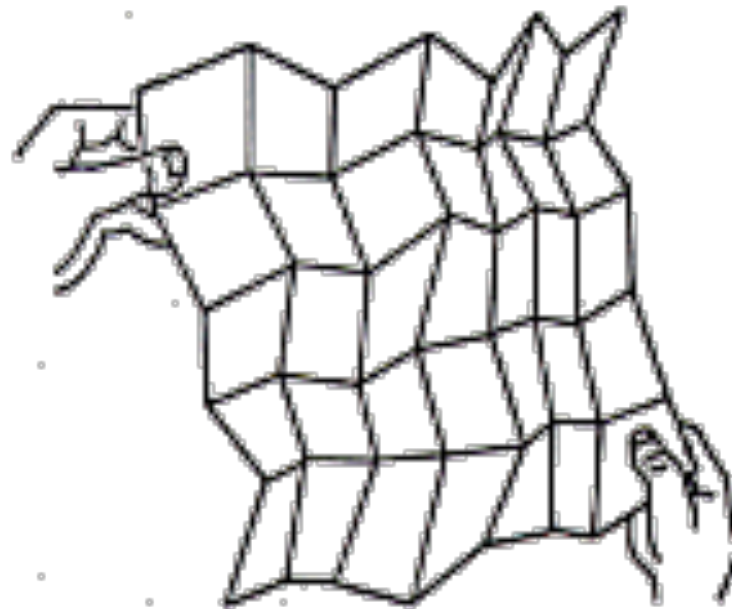
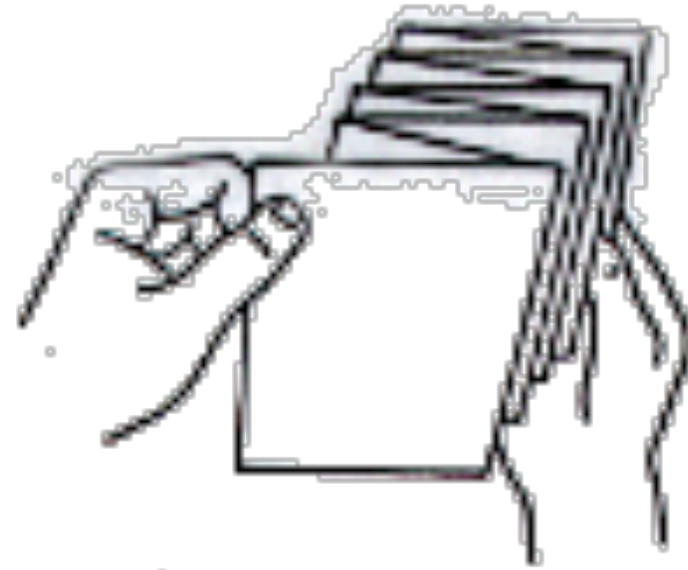
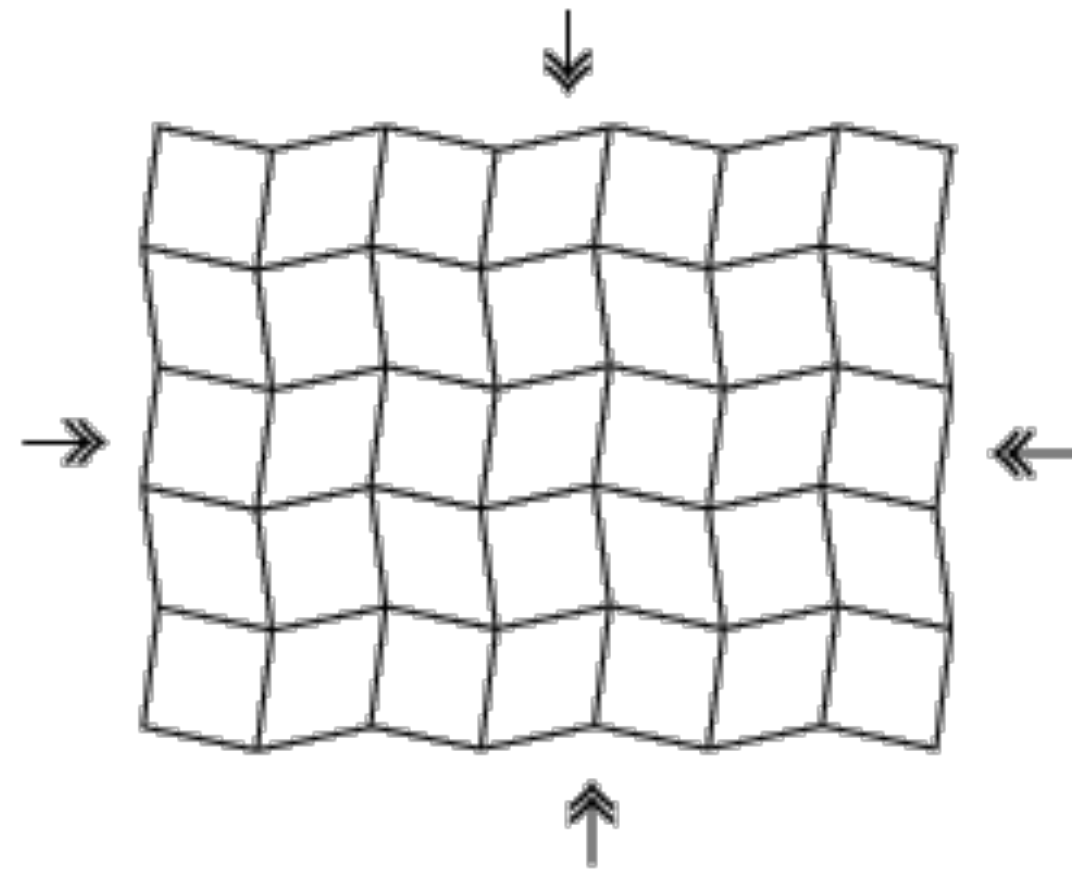
- **LA PRESSION PHOTONIQUE PERMET DE SE DÉPLACER POTENTIELLEMENT N'IMPORTE OÙ DANS LE SYSTÈME SOLAIRE,**

- **DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE NAVIGATION PEUVENT ÊTRE IMAGINÉES**

Exemple : naviguer en se rapprochant du Soleil, au niveau de l'orbite de Mercure par exemple, pour bénéficier d'une pression photonique solaire bien plus élevée, afin d'atteindre des vitesses permettant de rejoindre Jupiter, Saturne, ... ou Pluton.



# CONCEPT - CONTRAINTES



- **CONTRAINTES MÉCANIQUES**

Comment rigidifier une voile de (très) grande taille ?

- **CONTRAINTES THERMIQUES**

Le matériau de la voile doit résister aux contraintes thermiques spatiales (au niveau de l'orbite terrestre, variations de température de +150 à -160° C).

- **CONTRAINTES DE RAYONNEMENT**

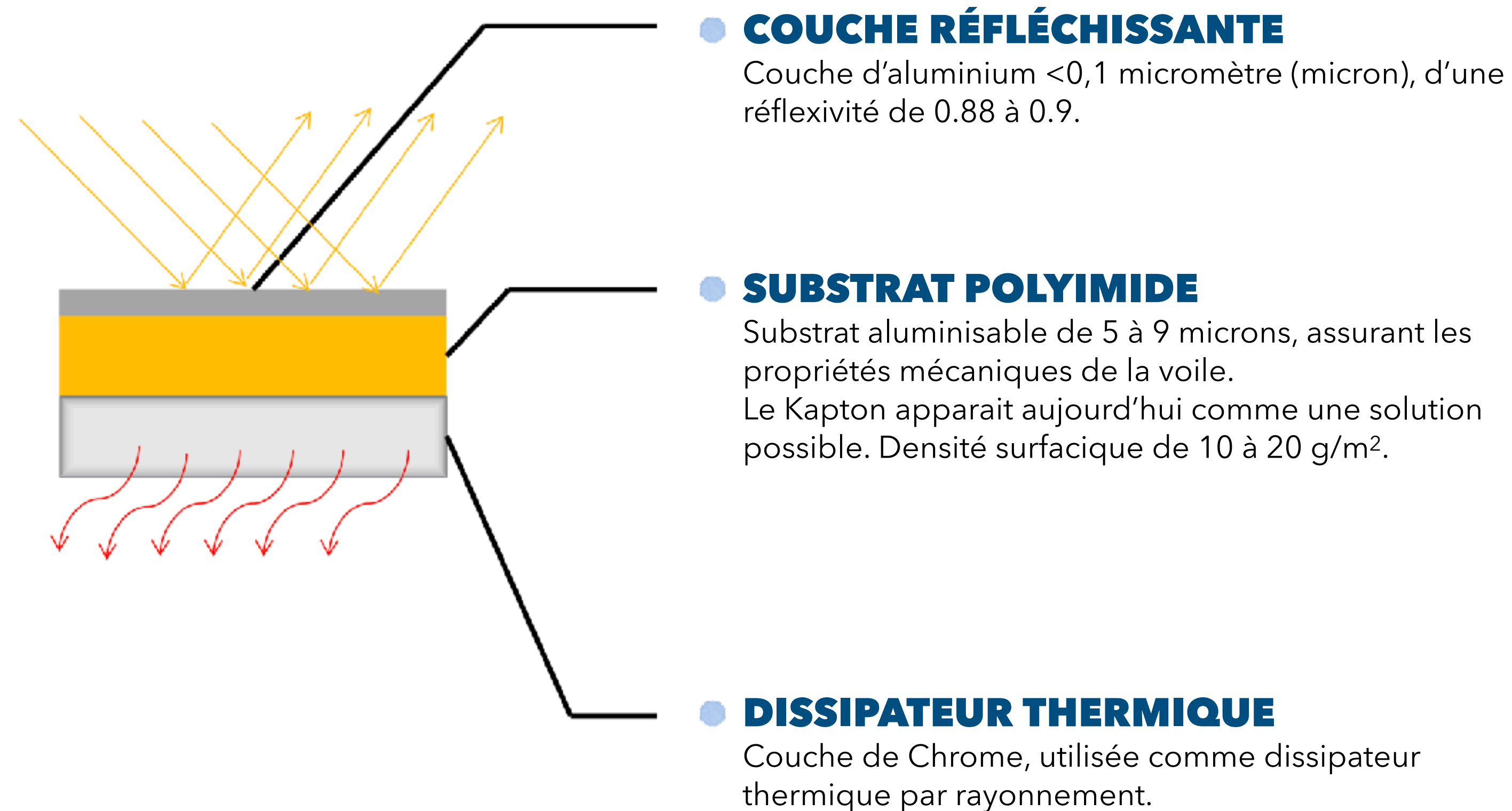
Le matériau de la voile doit résister aux rayonnement (pour des polymères, risque de cassure des macromolécules).

- **CONTRAINTES DE CONFINEMENT AU LANCEMENT**

La voile doit être pliée lors du lancement, puis déployée dans l'espace : une problématique d'origami !

# CONCEPT - CHOIX DU MATÉRIAU

## EXEMPLE DE SOLUTION :





# INCONVÉNIENTS DE LA PROPULSION PHOTONIQUE

- **FRAGILITÉ DE LA VOILE**

La performance d'une voile dépend de son rapport Surface/Masse.

- **FAIBLE CHARGE UTILE**

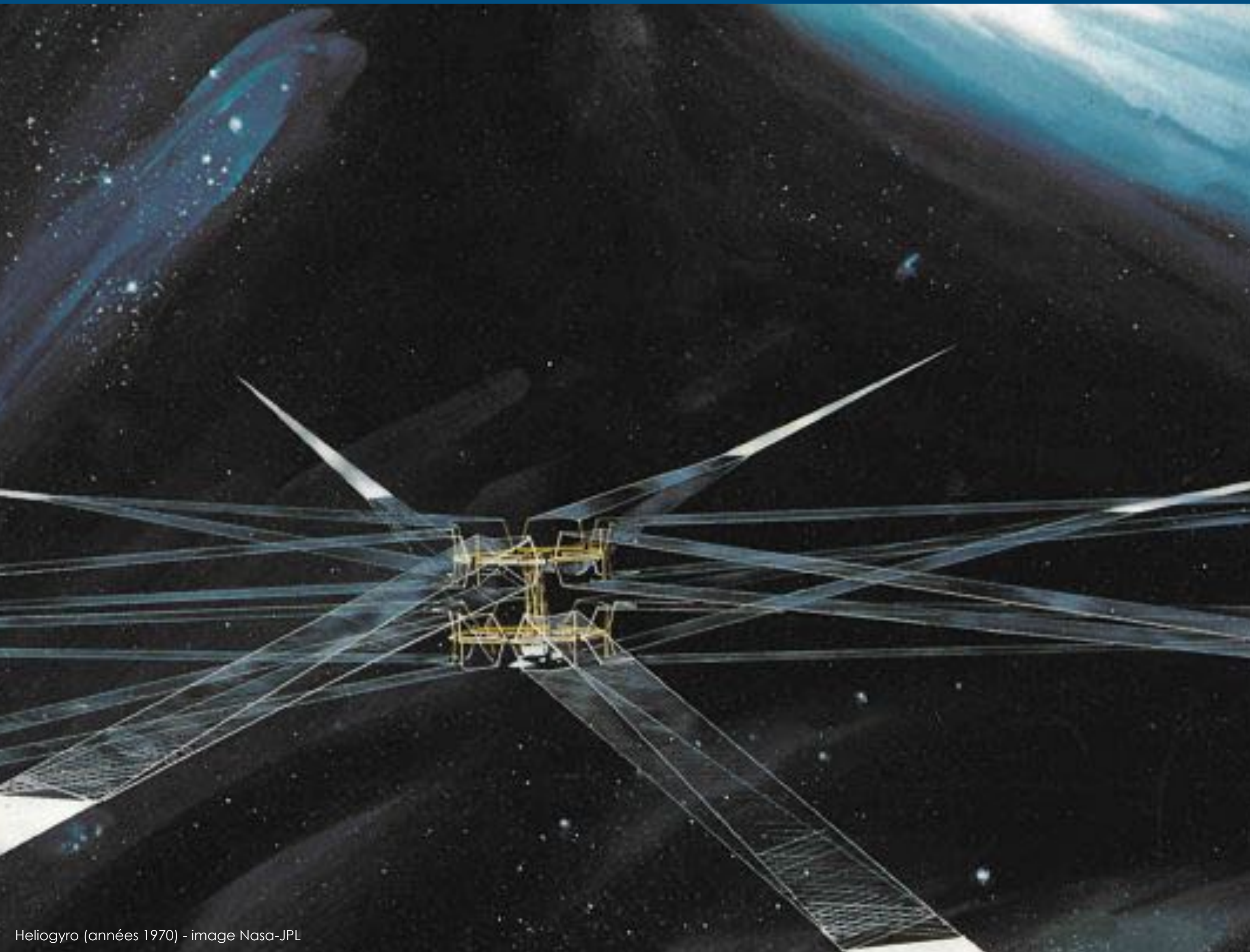
La propulsion photonique n'est pas le mode de propulsion le plus adapté pour des vols habités.

- **PROXIMITÉ DU SOLEIL**

L'intensité de la lumière solaire décroît comme le carré de la distance au Soleil (comme la gravité). Pression photonique faible au delà de l'orbite de Jupiter.

- **ACCÉLÉRATION DE FAIBLE INTENSITÉ**

La pression photonique ne peut pas être utilisée efficacement depuis la surface de la Terre.



Heliogyro (années 1970) - image Nasa-JPL



Voile test - image Nasa - Marshall Space Flight Center

# AVANTAGES DE LA PROPULSION PHOTONIQUE

- **UNE IMPULSION SPÉCIFIQUE INFINIE ...**

L'impulsion spécifique mesure l'efficacité d'un système de propulsion. Elle indique la durée pendant laquelle un kilogramme de propergol produit la poussée nécessaire pour soulever une masse d'un kilogramme dans le champ gravitationnel terrestre. 450 s pour LOX-LH2, jusqu'à 2000 s pour une propulsion électrique.

- **UNE DURÉE DE VIE LONGUE**

L'autonomie d'un voilier solaire ne dépendant pas d'une quantité d'ergols embarqués.

- **BAS COÛT**

- **PERFORMANCES DANS CERTAINES CONDITIONS**

Pour de petites charges utiles, la propulsion photonique peut être très performante. Exemple : envoyer en quelques mois une charge utile de 1kg vers Jupiter.

## PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

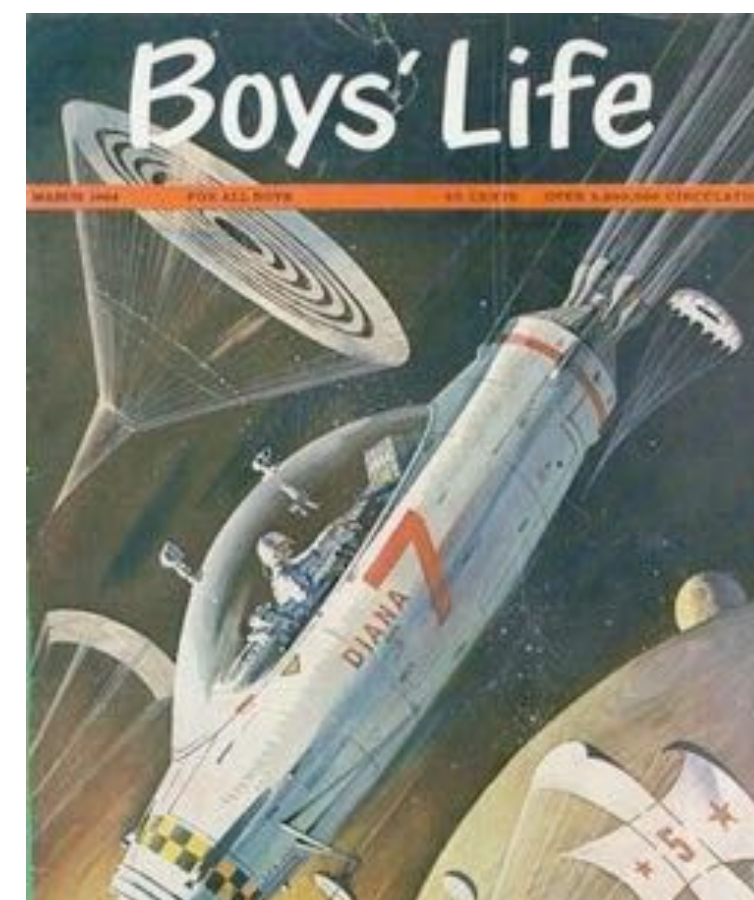


# PROJETS : DANS LA SCIENCE FICTION



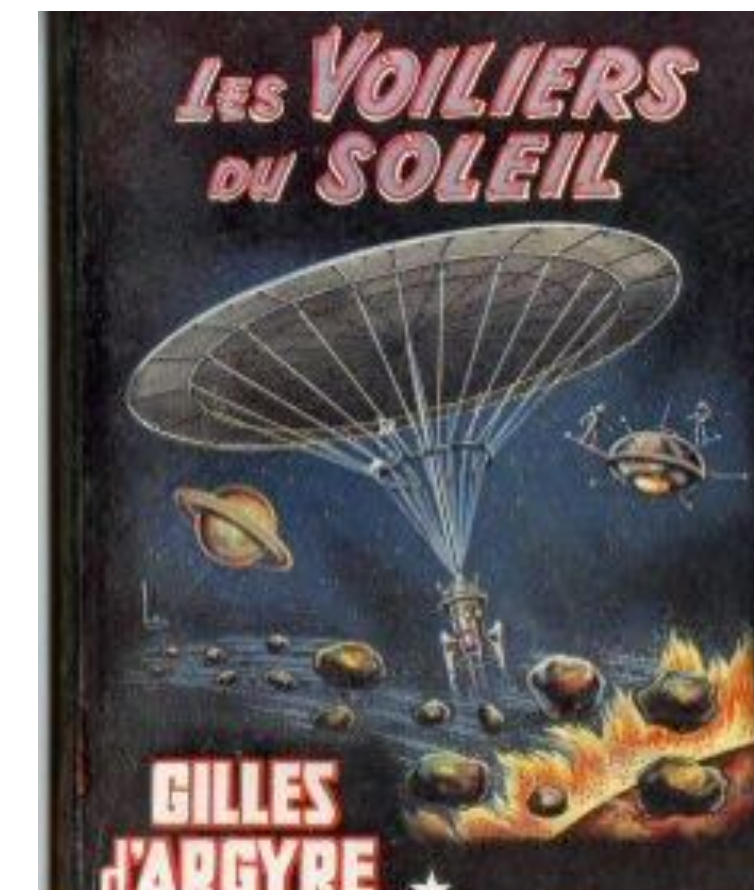
GATEWAY TO STRANGENESS

Amazing Stories, Gateway to Strangeness, Jack Vance, 1962.



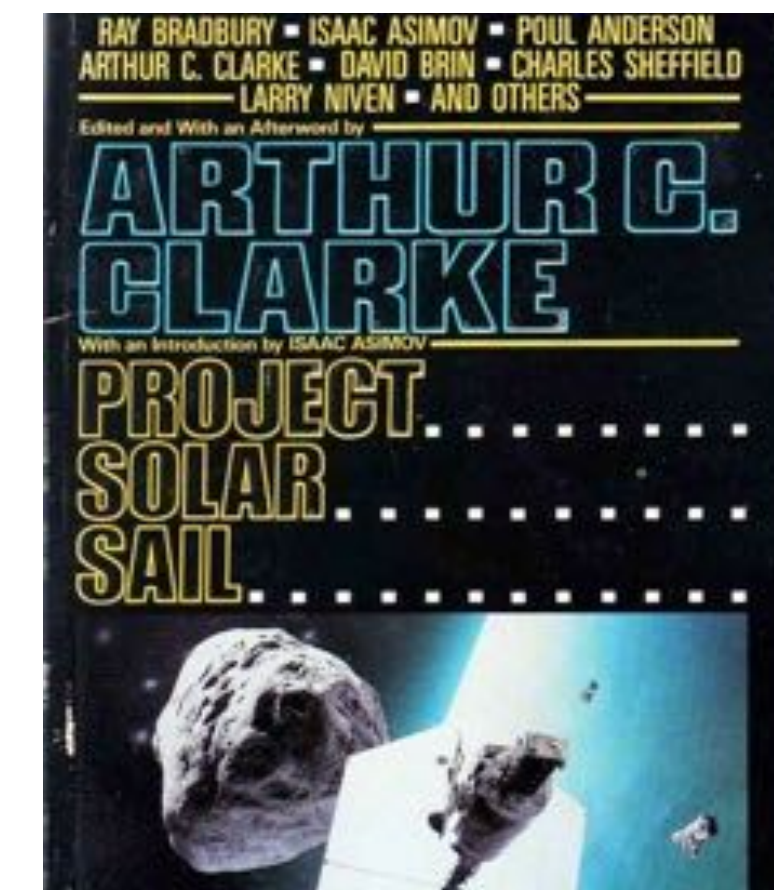
SUNJAMMER

Première publication de la nouvelle d'A.C. Clarke *Sunjammer* dans *Boy's Life*, 1963.



LES VOILIERS DU SOLEIL

Les voiliers du Soleil, Gérard Klein alias Gilles d'Argyre, 1961.



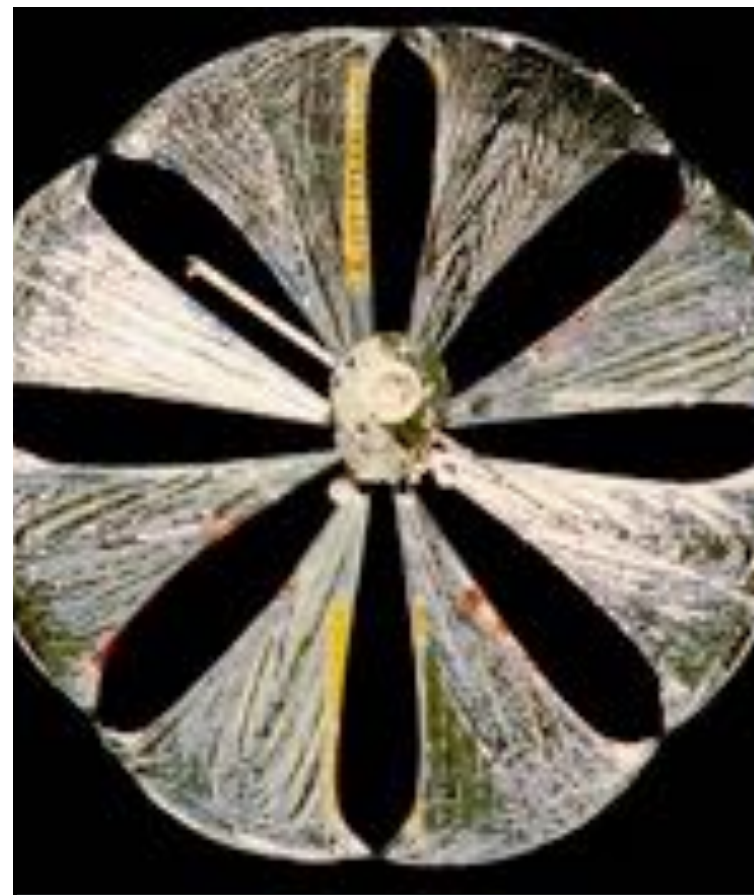
PROJECT SOLAR SAIL

Project Solar Sail, Arthur C. Clarke, 1990.

## PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



# PROJETS : PREMIÈRES EXPÉRIMENTATIONS



ZNAMYA 2

Miroir solaire Znamya 2. Test de déploiement depuis la station MIR en 1993.



ANTENNE SPATAN

Antenne gonflable Spatan. Test de déploiement depuis la navette spatiale en 1996.



TEST BALISTIQUE JAXA

Premier test de déploiement en vol balistique, par la JAXA (agence spatiale japonaise) en 2004.



NANOSAIL D2

Micro-voile solaire Nanosail D2, lancée par la NASA fin 2010 (après le vol d'Ikaros).



Image JAXA

# PROJETS : IKAROS, PREMIÈRE VOILE SOLAIRE

- **20 MAI 2010, IKAROS PREMIER DÉMONSTRATEUR DE VOILE SOLAIRE,**
- **UN VOILIER DE 315 KG DONT 15 KG POUR LA VOILE; 14 M DE COTÉ (20 M DE DIAGONALE),**
- **UN SYSTÈME DE CONTRÔLE D'ATTITUDE SANS PIÈCES MÉCANIQUES (SYSTÈME PAR BANDES DE CRISTAUX LIQUIDES),**
- **UN PROJET CONÇU EN QUELQUES MOIS SEULEMENT EN MARGE DE LA MISSION VÉNUSIENNE AKATSUKI.**



## PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES





# PROJETS :

## LIGHTSAIL 2, PREMIÈRE VOILE CONÇUE DANS UN CADRE ASSOCIATIF

- **UN PREMIER DÉMONSTRATEUR, CONÇU PAR LA PLANETARY SOCIETY, LIGHTSAIL 1, EST LANCÉ DANS L'ESPACE EN 2015.**

Lightsail 1 est un nano-satellite (cellule conçue dans un triple cubsat de 3x10 cm de côté). L'objectif - réussi - de la mission est de tester le déploiement d'une petite voile de 32 m<sup>2</sup> (5.6 m de côté), en orbite basse.

- **LIGHTSAIL 2 EST LANCÉ EN JUIN 2019**

Lightsail 2 est lancé depuis une fusée Space X Flacon Heavy vers une orbite plus élevée, de 720 km d'apogée. L'objectif est de tester le contrôle d'attitude du voilier, et de mesurer l'effet de la pression photonique (qui reste faible compte tenu de la petite taille de la voile) sur la déformation de l'orbite. La mission est une réussite.

# PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



Images : Olivier Boisard - U3P

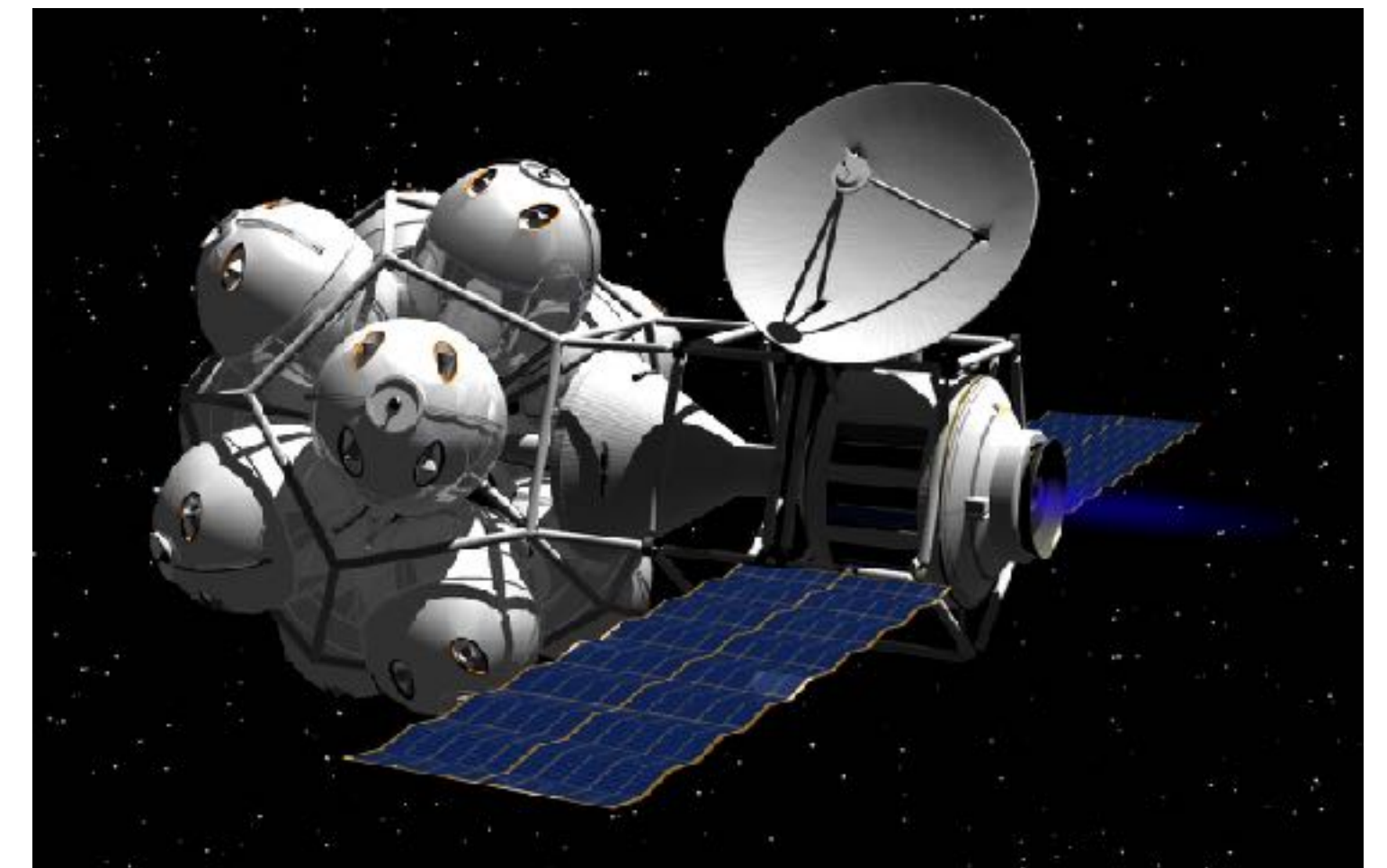
# **PERSPECTIVES :**

## **EXEMPLE DE MISSION POUR UN VOILIER SOLAIRE : LE PROJET SHADOW**

- **MISSION SHADOW : PROTÉGER LA TERRE  
DES GÉOCROISEURS ...**

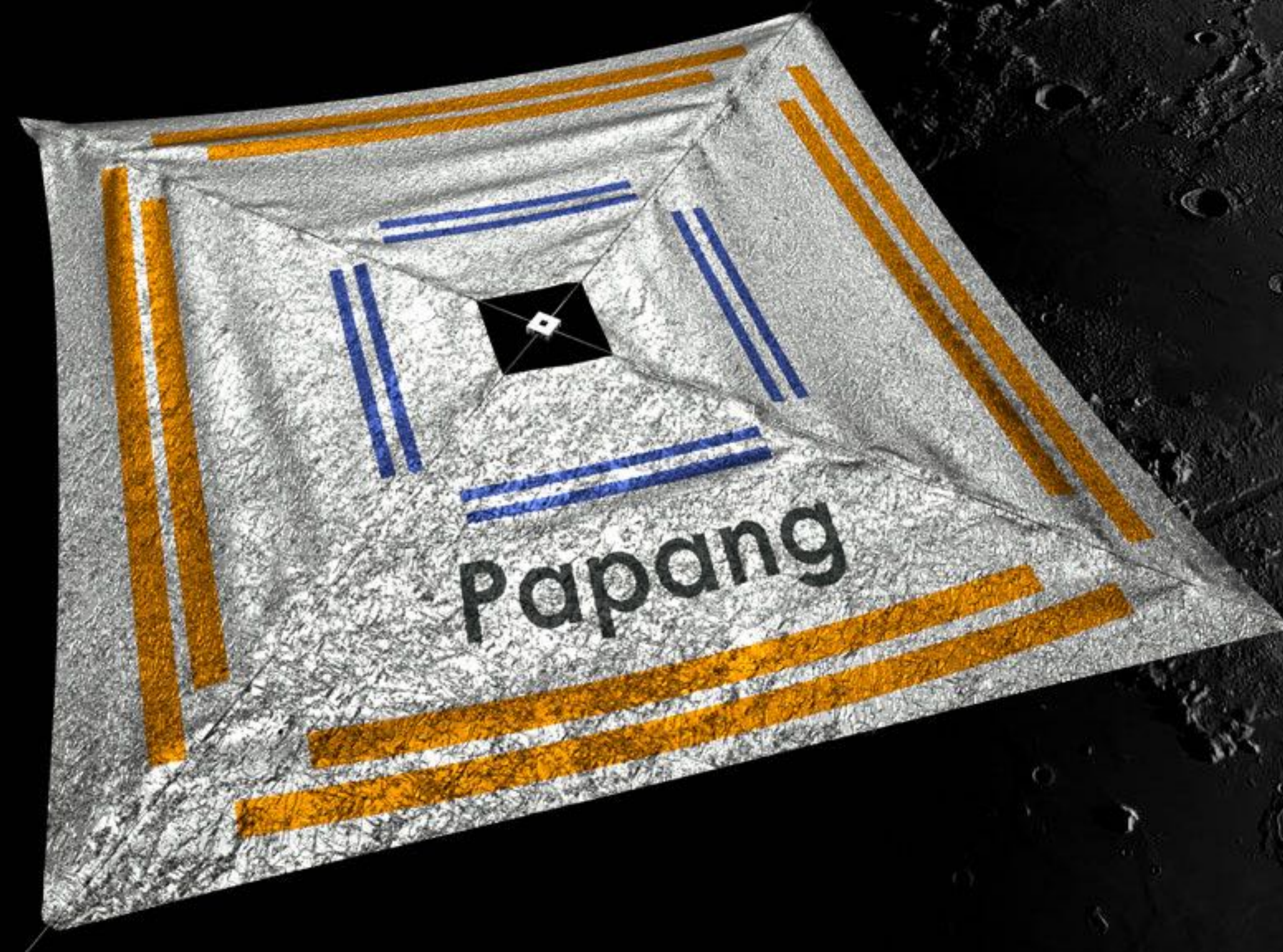
Une mission imaginée par Jean-Yves Prado (CNES / U3P).

- **DÉVIER UN ASTÉROÏDE AVEC UN VOILIER EN  
ANNULANT L' «EFFET YARKOVSKY» ...**



# **PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES**





**PERSPECTIVES :**  
**LE PROJET DE COURSE TERRE-LUNE DE L'U3P**

**PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES**



Images : Olivier Boisard - U3P

# **PERSPECTIVES :**

## **LE PROJET BREAKTHROUGH STARSHOT**

- **PROJET PROPOSÉ EN 2016, DÉFENDU NOTAMMENT PAR STEPHEN HAWKING OU FREEMAN DYSON,**
- **DES VOILES PHOTONIQUES PROPULSÉES PAR UN RAYON LASER ...**
- **...ENVOYÉES PAR MILLIERS AU DELÀ DU SYSTÈME SOLAIRE, À 20 % DE LA VITESSE DE LA LUMIÈRE.**
- **UN PROJET QUI SOULÈVE DE NOMBREUSES QUESTIONS DE FAISABILITÉ (POINTAGE DU LASER, DURÉE DE LA MISSION, CHOIX DES MATÉRIAUX, TÉLÉCOMMUNICATIONS ) ...**
- **... MAIS QUI DÉMONTRE LE POTENTIEL DE RÊVE ASSOCIÉ AUX VOILES SOLAIRES !**

# **PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES**





**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**

Image Olivier Boisard

**PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES**