

Image Olivier Boisard

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

01 CONCEPT

**02 AVANTAGES /
INCONVÉNIENTS**

03 PROJETS

04 PERSPECTIVES

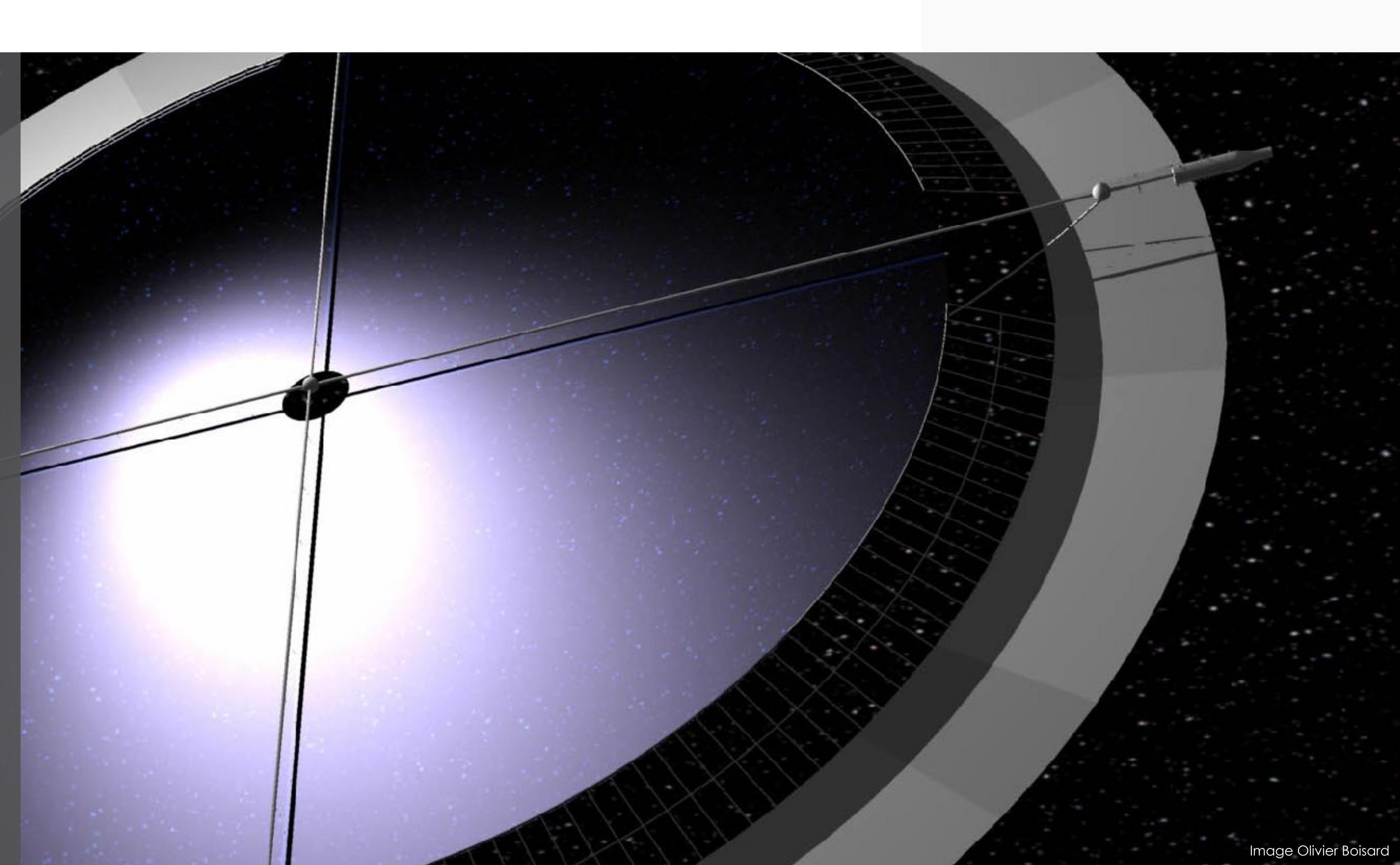


Image Olivier Boisard

PROPELLSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

CONCEPT - QUELQUES REPÈRES HISTORIQUES

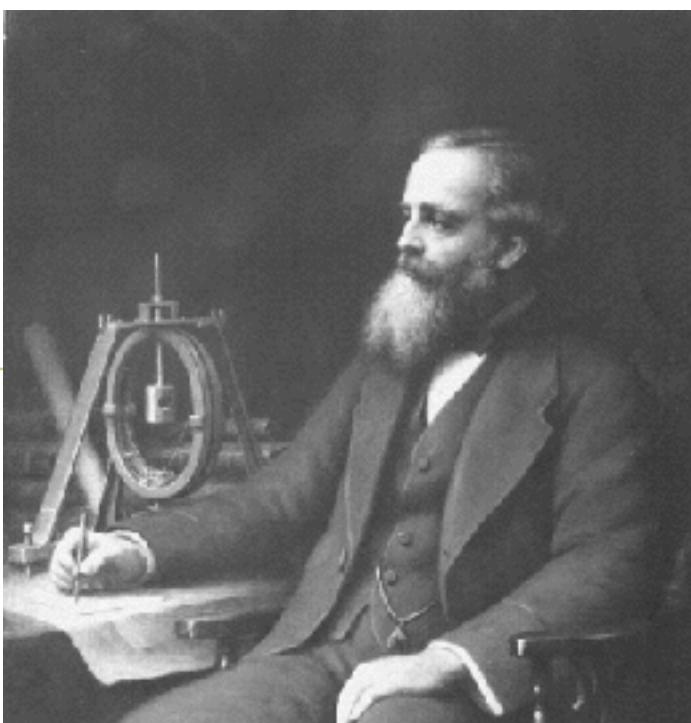
XVII^e siècle



Johannes Kepler

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

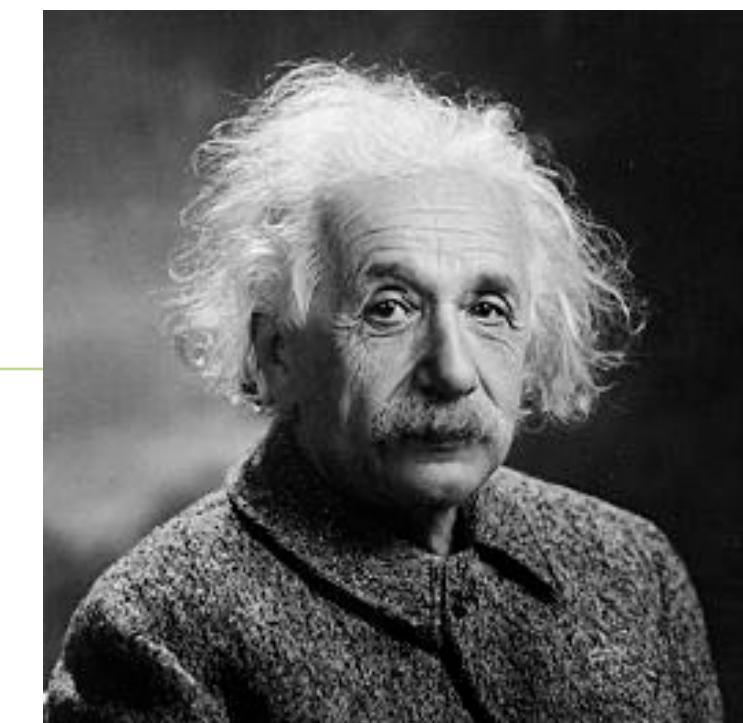
XIX^e siècle



James Clerk Maxwell

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

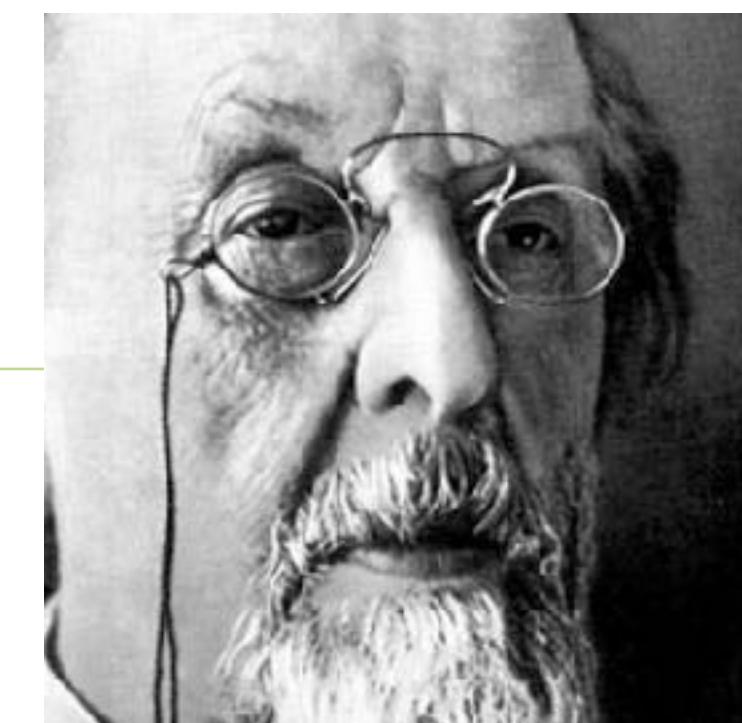
XX^e siècle



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^e siècle

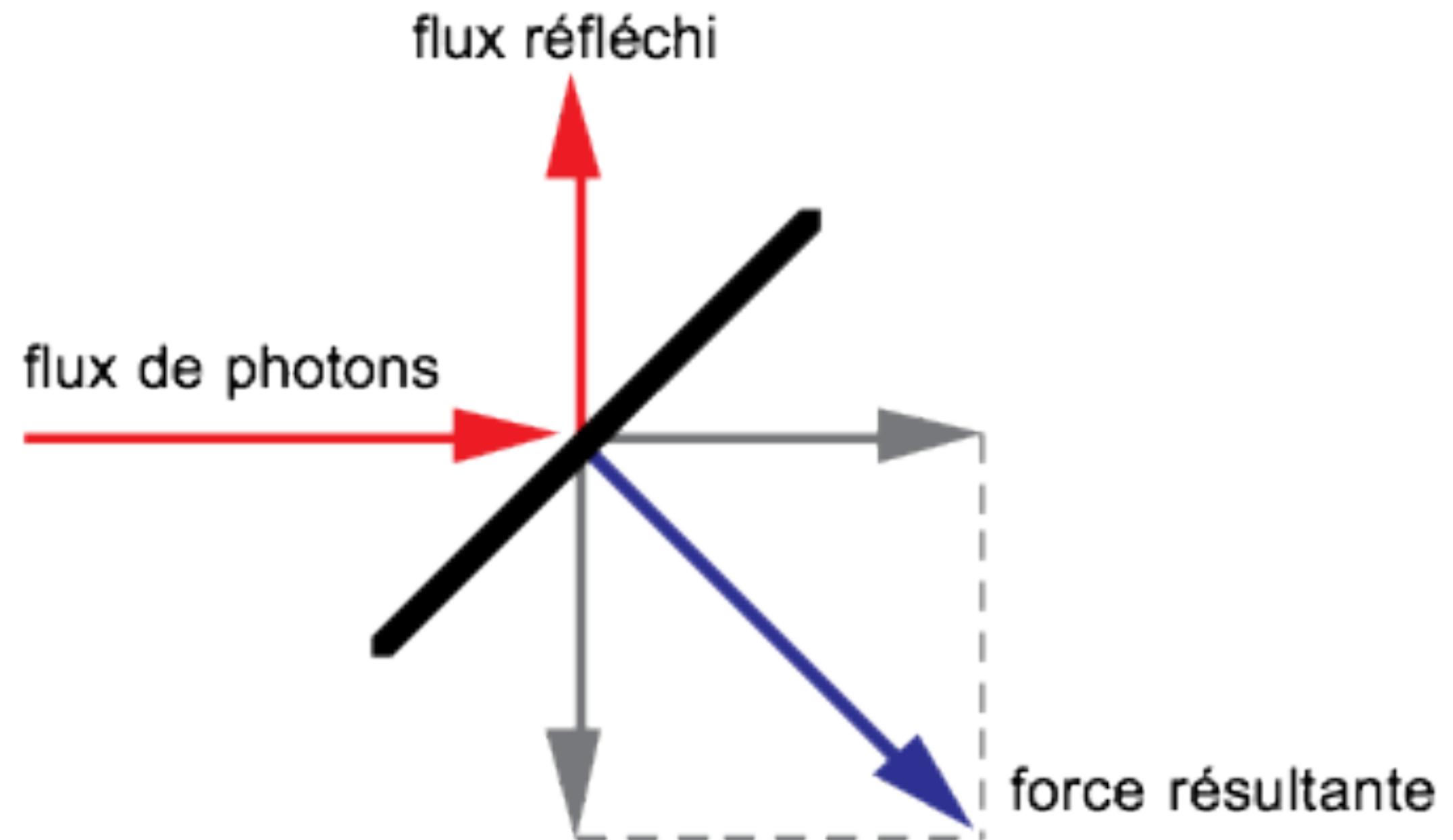


Constantin Tsiolkovski

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, ...

PROPELLSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

CONCEPT - PRINCIPE DE LA PROPULSION PHOTONIQUE



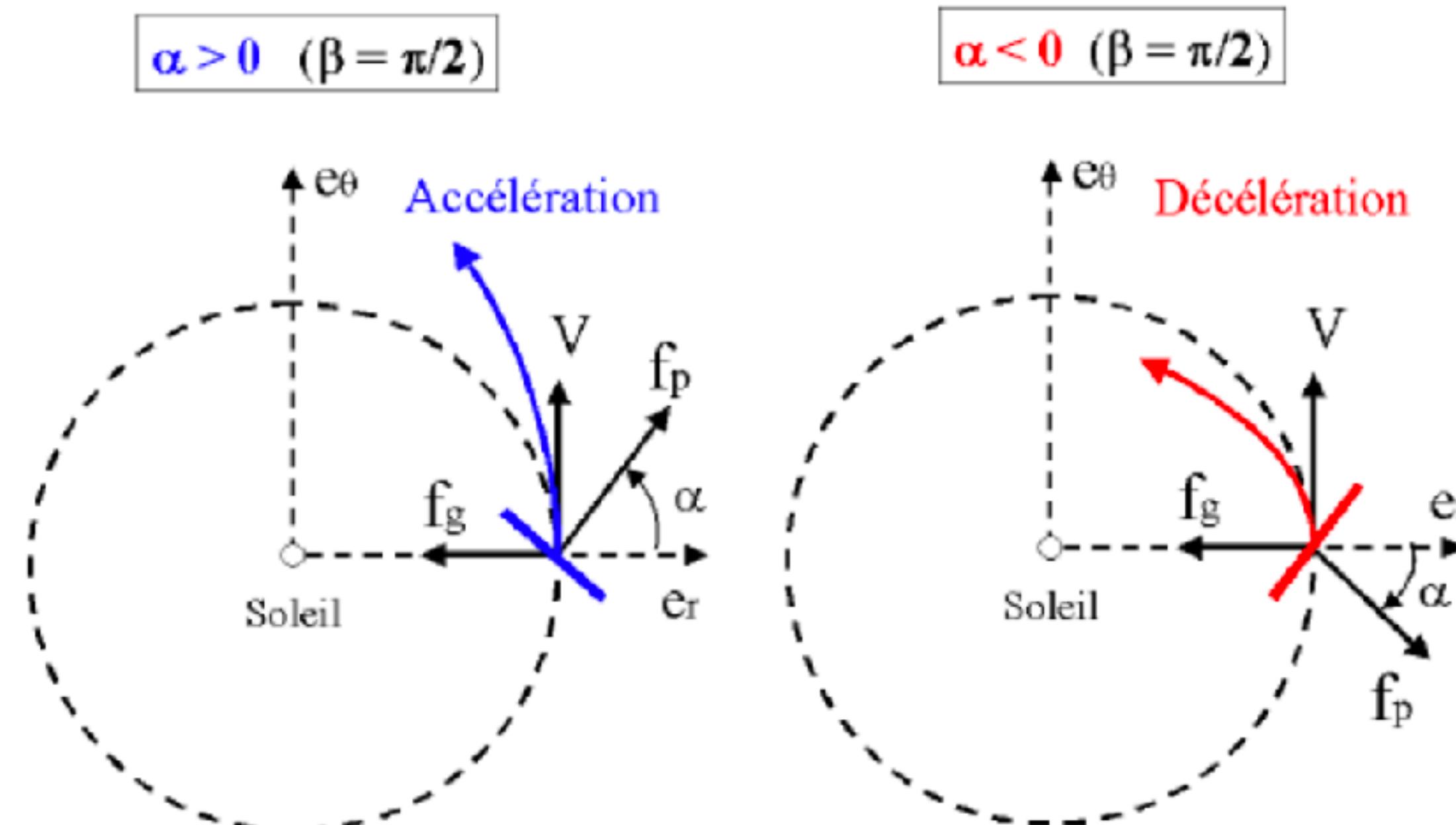
- **LE PHOTON POSSÈDE UNE QUANTITÉ DE MOUVEMENT**
- **CETTE QUANTITÉ DE MOUVEMENT PEUT ÊTRE ÉCHANGÉE ENTRE LES PHOTONS ET UNE SURFACE RÉFLÉCHISSANTE**
- **UNE PRESSION FAIBLE MAIS PERMANENTE**

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.

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

CONCEPT - PRINCIPE DE LA PROPULSION PHOTONIQUE

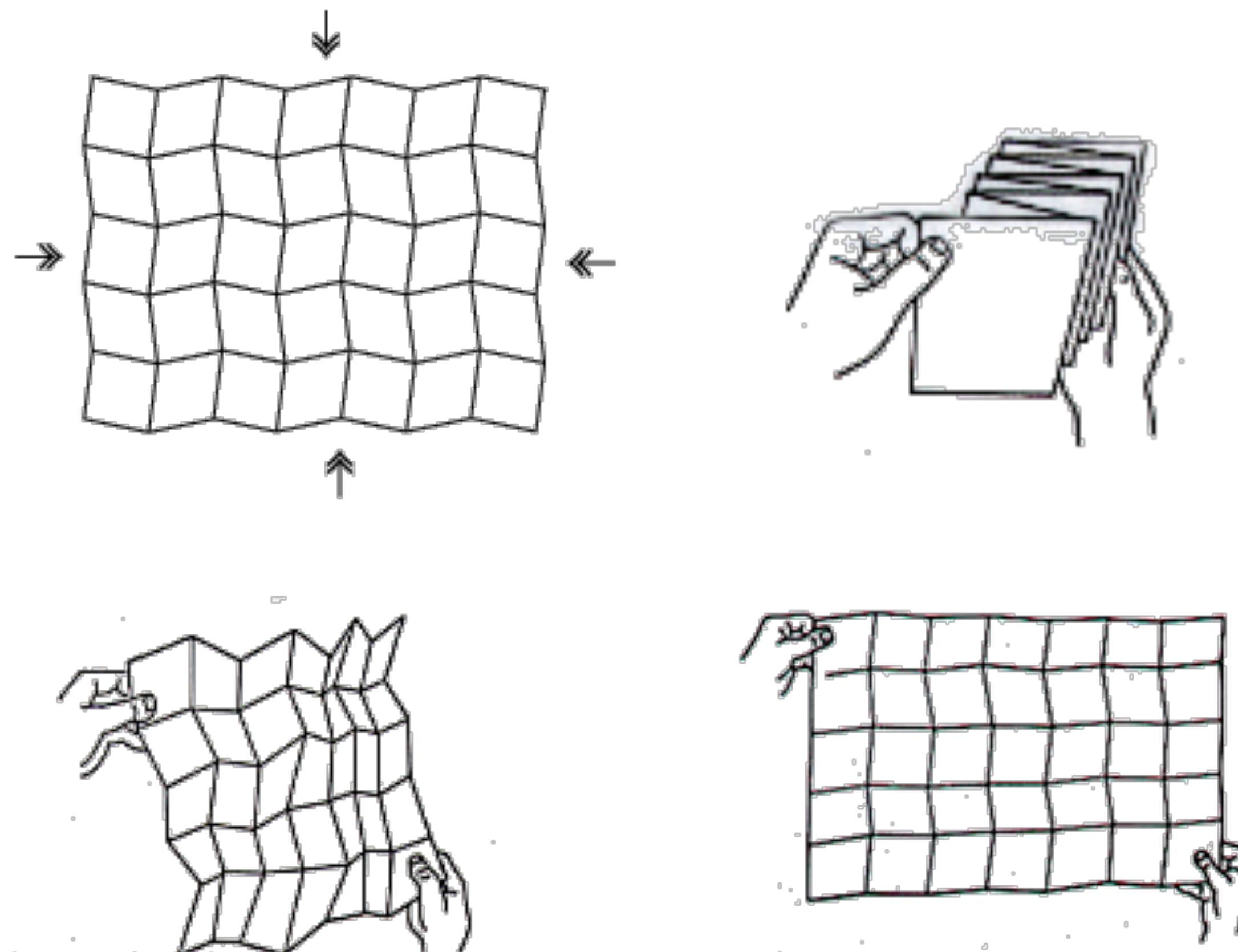


- **LA PRESSION PHOTONIQUE PERMET DE SE DÉPLACER POTENTIELLEMENT N'IMPORTE OÙ DANS LE SYSTÈME SOLAIRE,**

- **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

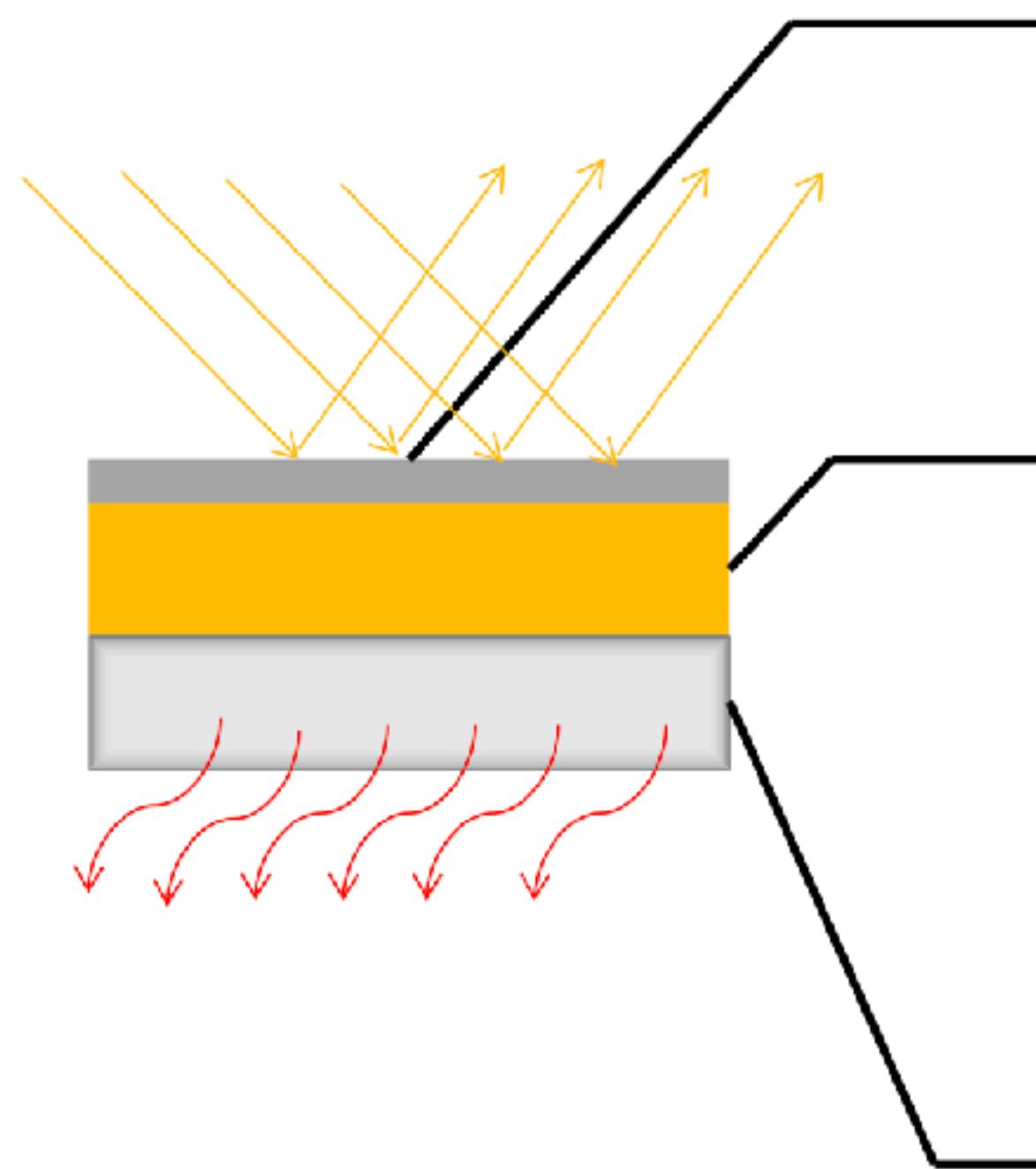
Le matériau de la voile doit résister aux rayonnements (pour des polymères, risque de cassure des macromolécules).

● 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 MATERIAU

EXEMPLE DE SOLUTION :



● COUCHE RÉFLÉCHISSANTE

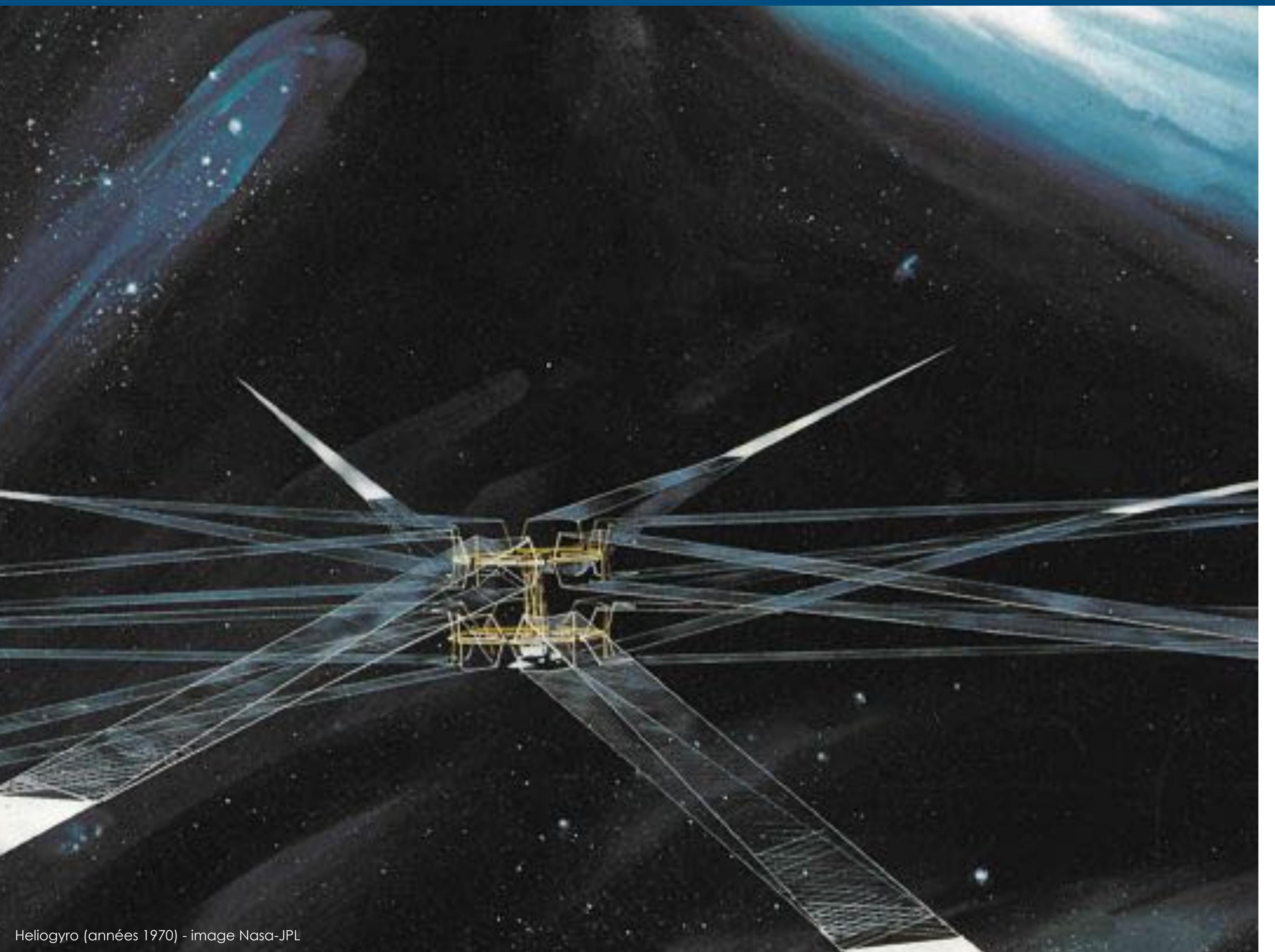
Couche d'aluminium <0,1 micromètre (micron), d'une réflexivité de 0.88 à 0.9.

● SUBSTRAT POLYIMIDE

Substrat aluminisable de 5 à 9 microns, assurant les propriétés mécaniques de la voile.
Le Kapton apparaît aujourd'hui comme une solution possible. Densité surfacique de 10 à 20 g/m².

● DISSIPATEUR THERMIQUE

Couche de Chrome, utilisée comme dissipateur thermique par rayonnement.

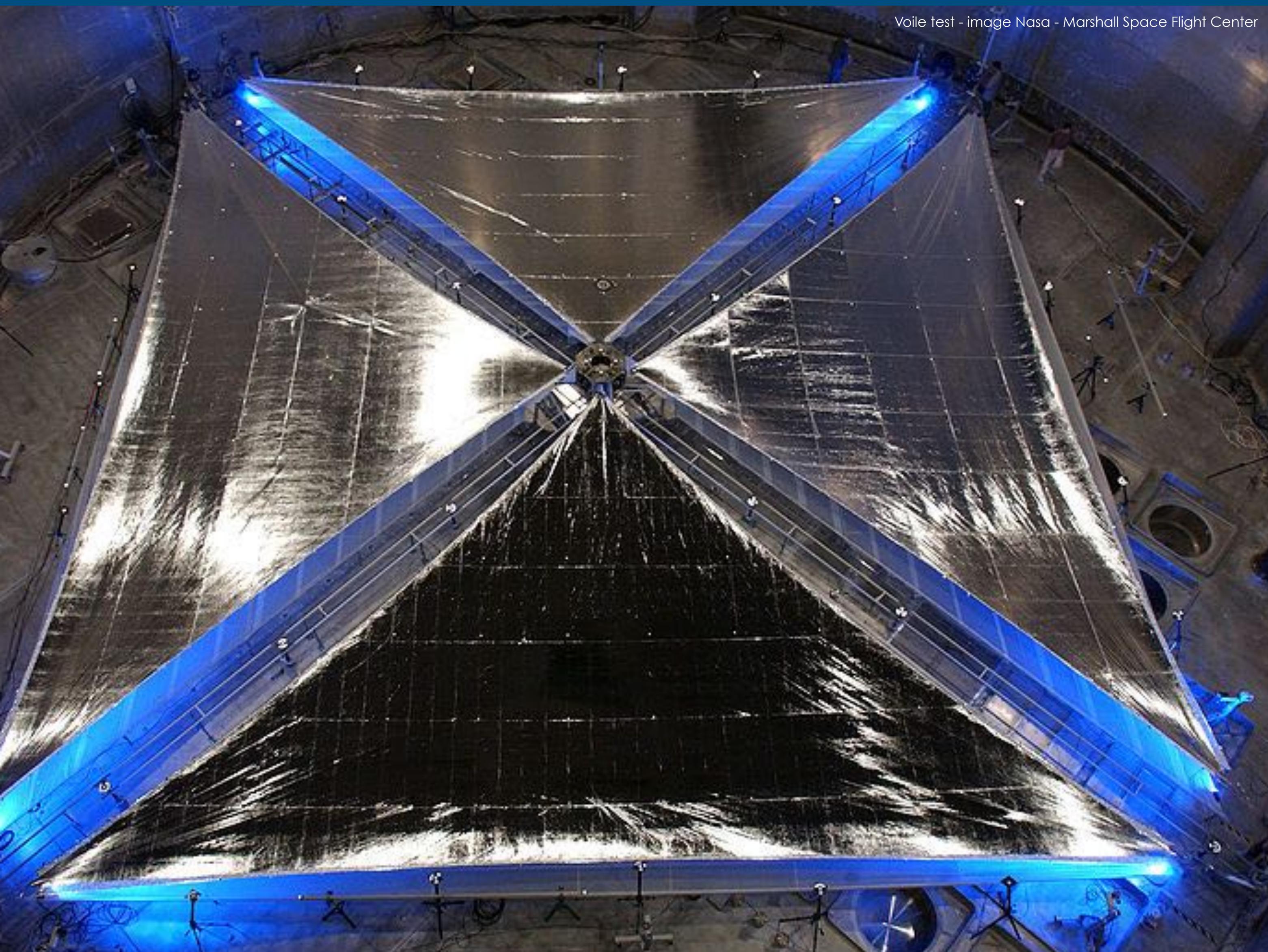


INCONVÉNIENTS DE LA PROPULSION PHOTONIQUE

- **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.

Helios (années 1970) - image Nasa-JPL

PROPULSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



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.

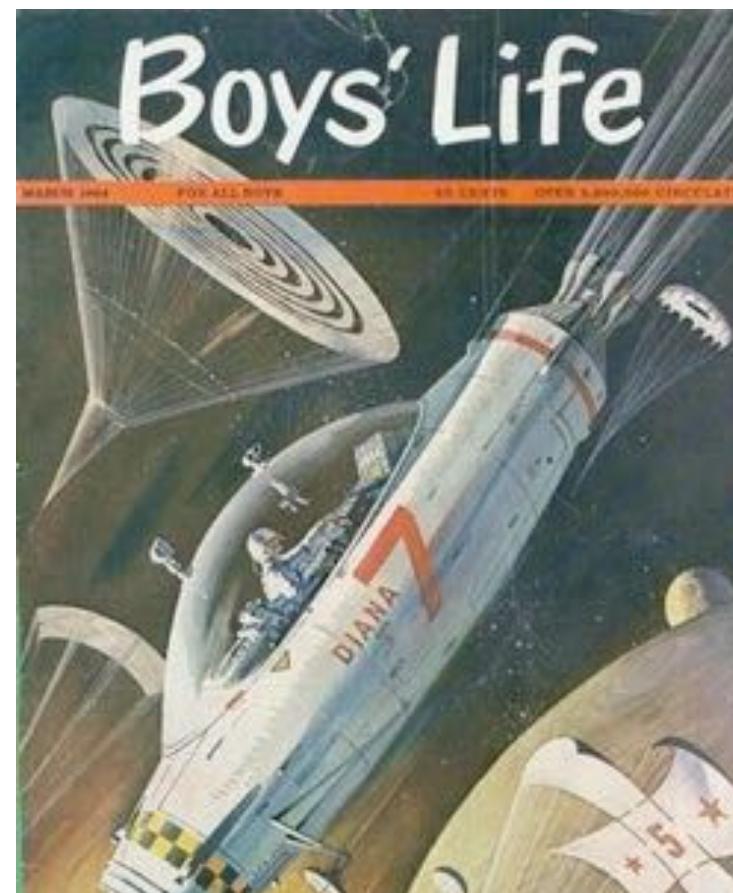
PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

PROJETS : DANS LA SCIENCE FICTION



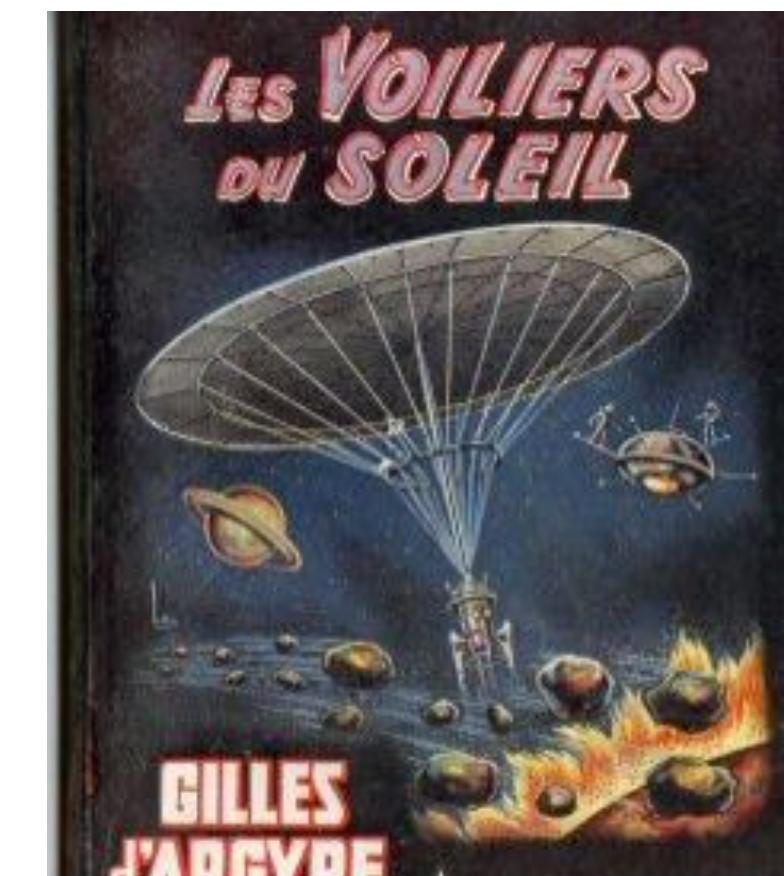
GATEWAY TO STRANGENESS

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



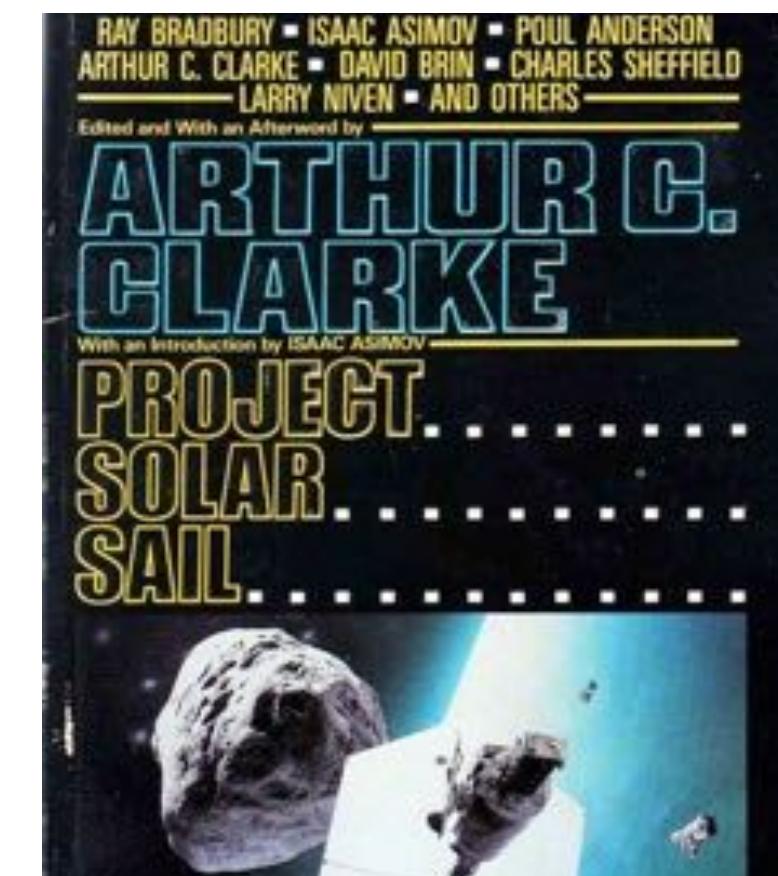
SUNJAMMER

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'Agyre, 1961.



PROJECT SOLAR SAIL

Project Solar Sail, Arthur C.Clarke, 1990.

PROPELLSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

PROJETS : PREMIÈRES EXPÉRIMENTATIONS



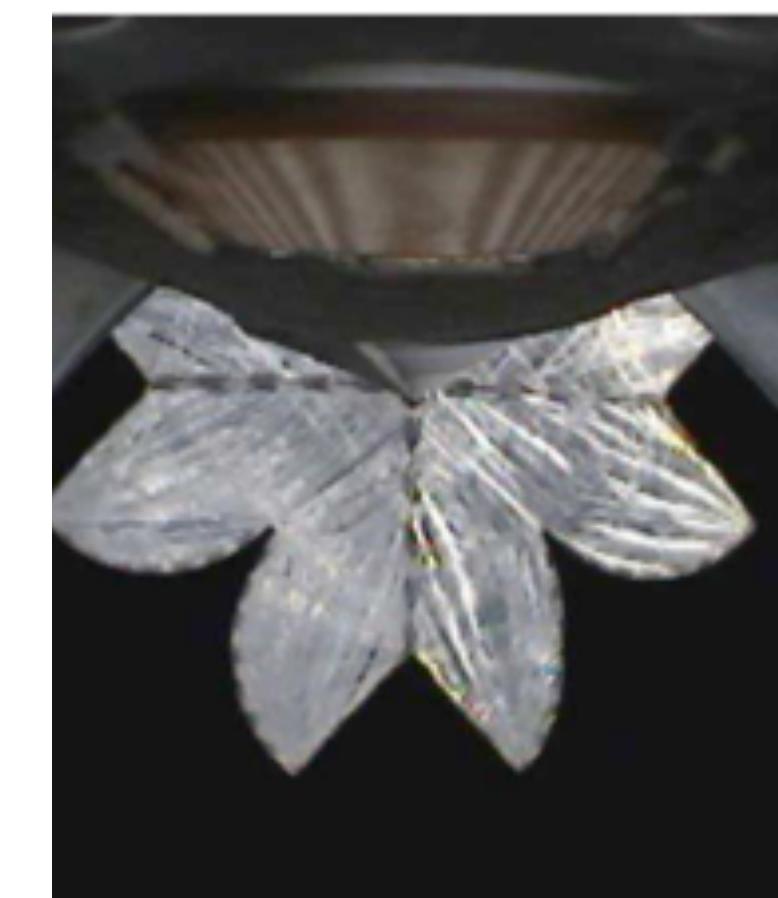
ZNAMYA 2

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



ANTENNE SPATAN

Antenne gonflable Spatran. 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).

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

Image JAXA



IKAROS IKARos

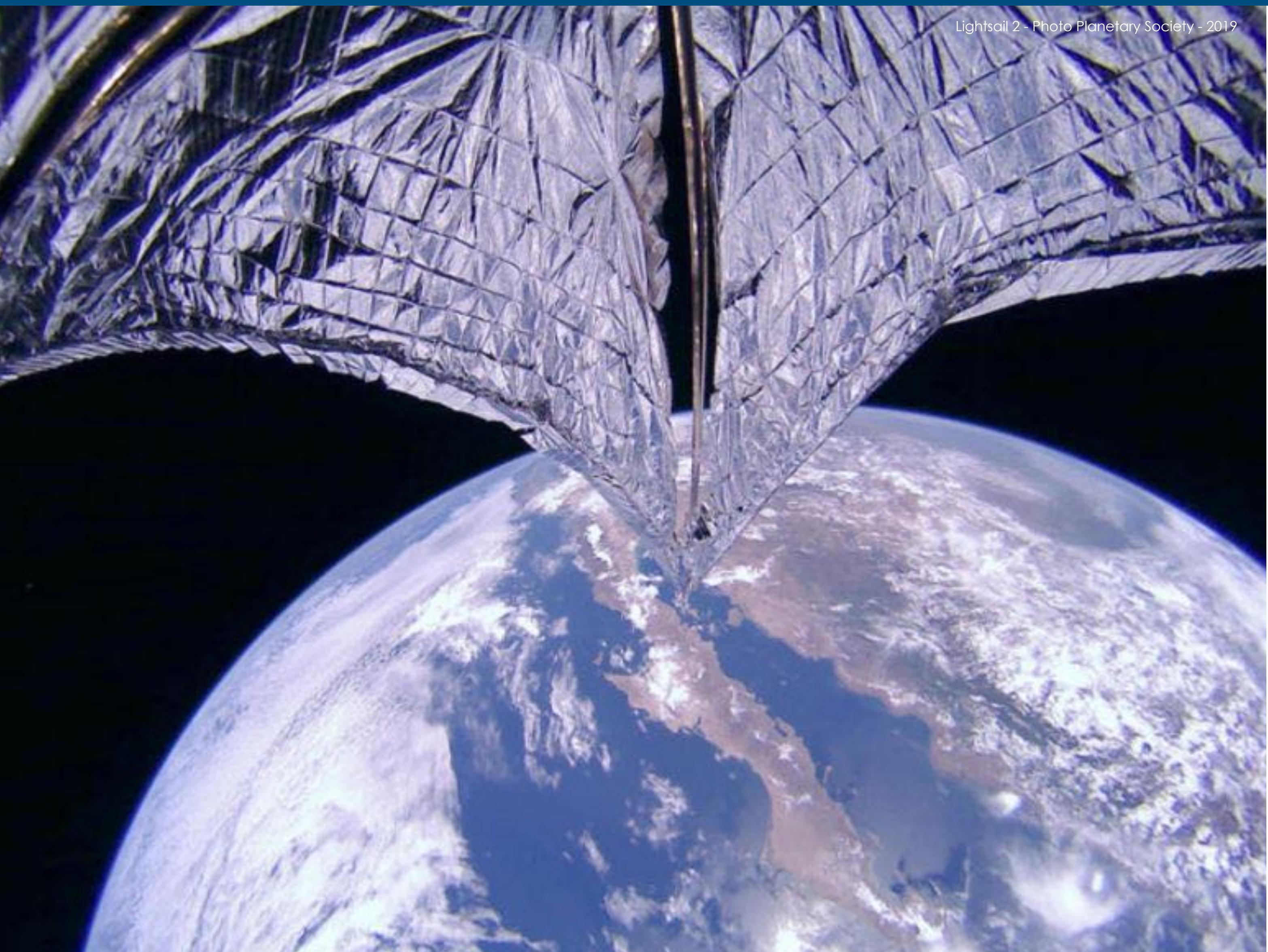
Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun



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.**

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



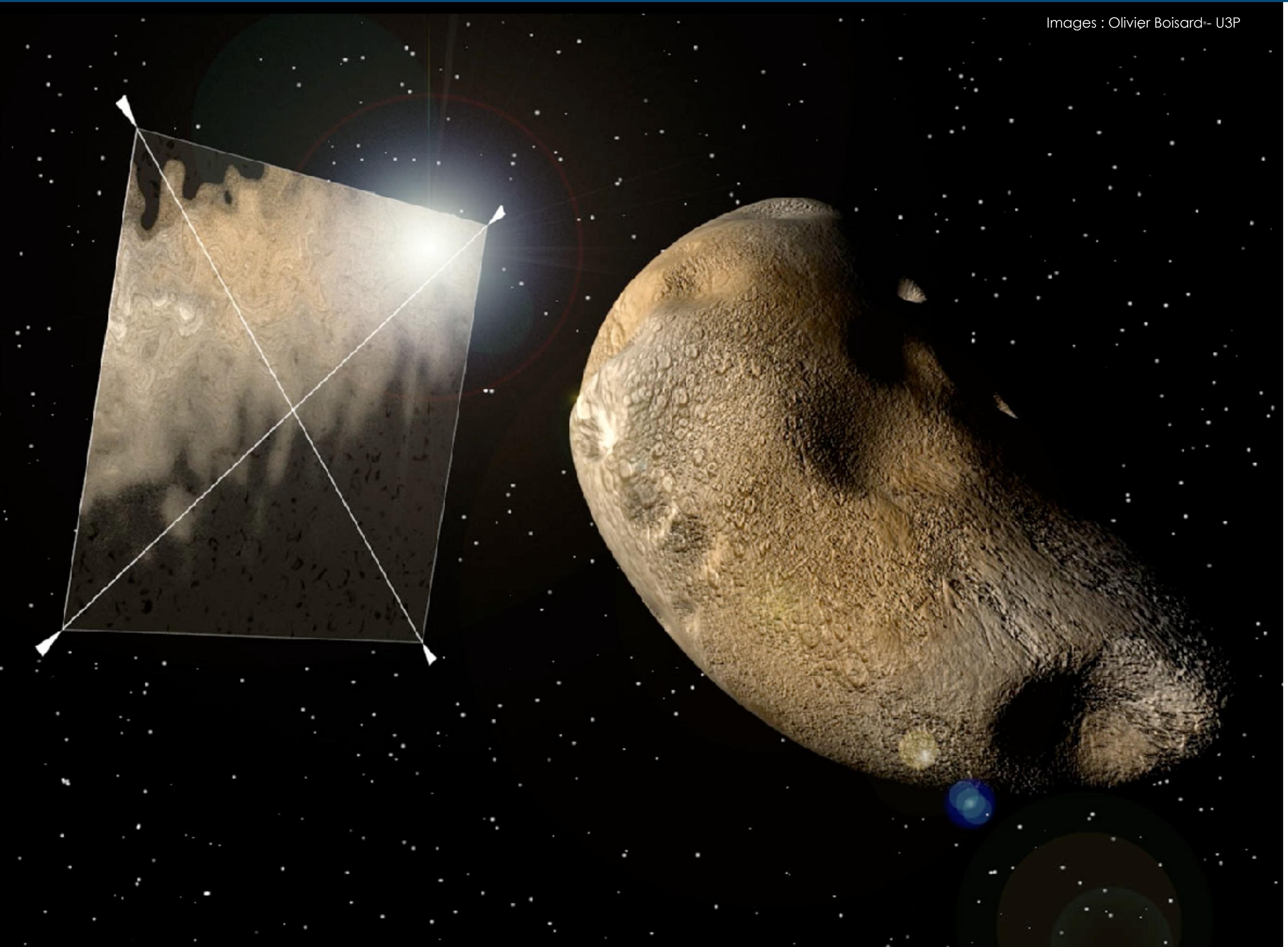
PROJETS :

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 m² (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.

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

Images : Olivier Boisard - U3P

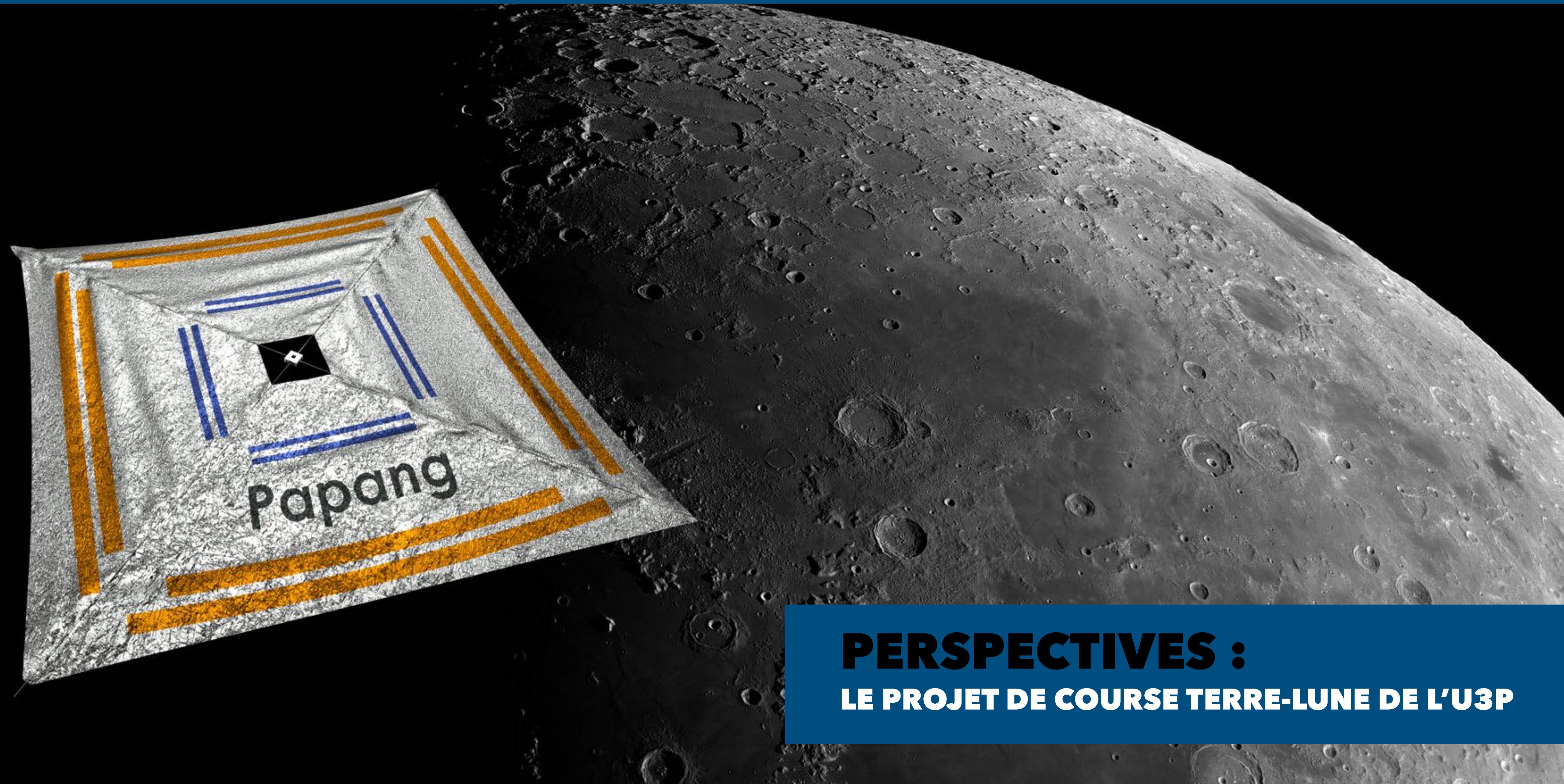


PERSPECTIVES : EXEMPLE DE MISSION POUR UN VOILIER SOLAIRE : LE PROJET SHADOW

- **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» ...**



PROPELLSION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES



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

Image Olivier Boisard

PROPELLSION 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 MATERIAUX, TÉLÉCOMMUNICATIONS) ...**
- **... MAIS QUI DÉMONTRE LE POTENTIEL DE RÊVE ASSOCIÉ AUX VOILES SOLAIRES !**

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES

**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**

Image Olivier Boisard

PROPELLION PHOTONIQUE & VOILES SOLAIRES