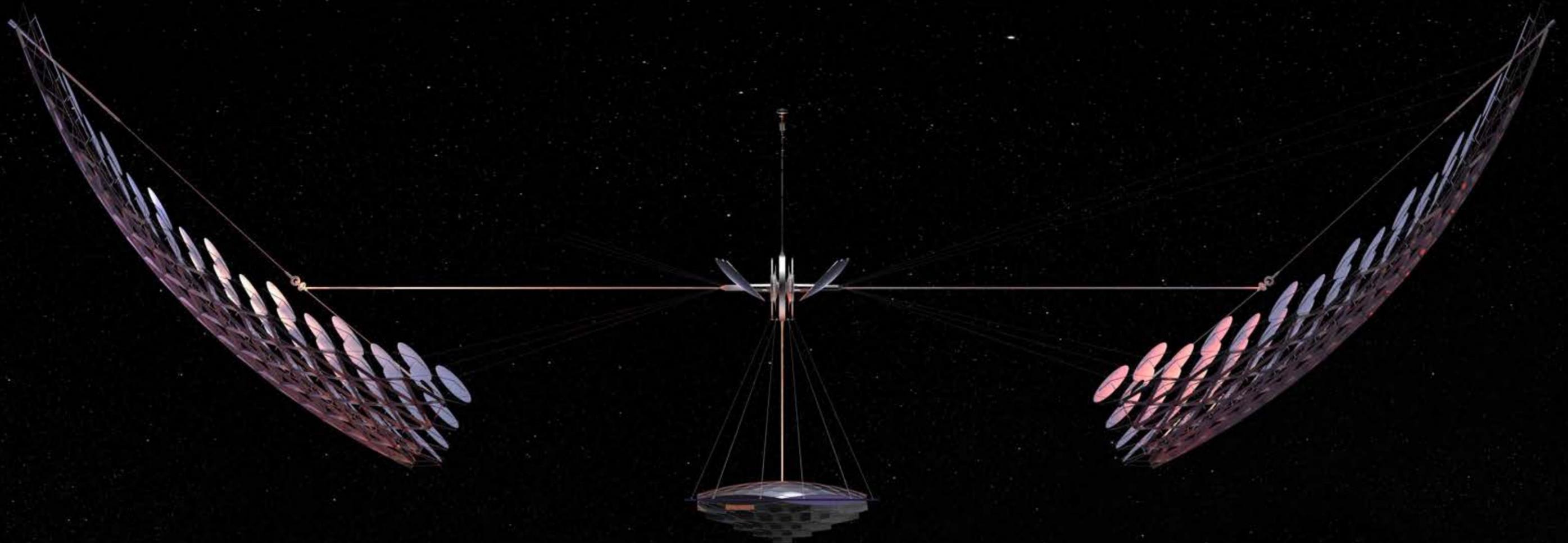


SUN ARROW

Une centrale solaire spatiale

« Chaque époque rêve de la suivante ».

Jules Michelet



Centrales Solaires Spatiales

Energies

Plus de 70 % de l'énergie primaire produite aujourd'hui dans le monde est encore d'origine fossile, puisée dans les profondeurs de la Terre sous forme de pétrole, de gaz naturel ou de charbon.

Alors que l'accès à ces ressources a été une des questions clefs du XXème siècle, cause directe ou indirecte d'une grande majorité des tensions et conflits géopolitiques mondiaux, la maîtrise d'une **énergie durable** sera - et est déjà - un enjeu technologique et sociétal majeur du XXIème siècle.

La question a toutefois changé de nature : il ne s'agit plus seulement de disposer de ressources permettant aux communautés humaines de vivre et prospérer, mais de ménager une planète dont on connaît désormais la fragilité, et sur laquelle les effets de la surexploitation industrielle ne peuvent plus être ignorés.

Se tourner vers l'espace ...

Paradoxalement, l'énergie est partout abondante : tout milieu naturel est, en définitive, un vaste système dans lequel opèrent en permanence de puissants échanges thermiques, mécaniques, chimiques, électromagnétiques, ...

Le véritable enjeu, ici, est d'accéder à une source disponible au bon endroit, au bon moment, à un coût raisonnable, sous une forme facilement utilisable, et dont la production n'aura qu'un impact minimal sur l'environnement.

Les panneaux photovoltaïques répondent à certaines de ces conditions, mais ont un inconvénient majeur : leur puissance est modulée par les cycles des jours et des saisons - sans compter l'aléa des conditions météorologiques. Sous nos latitudes par exemple, leur production sera minimale les soirs d'hiver pluvieux, précisément lorsque la demande a de grandes chances d'être la plus forte ...

Stocker l'énergie serait la solution, mais on sait que d'importants progrès restent à faire dans ce domaine. Les batteries électrochimiques ont des capacités, des durées de vie, et des rendements relativement limités - par ailleurs leur fabrication elle-même a un coût énergétique non négligeable, et fait appel à des composés chimiques polluants; d'autres solutions innovantes, telles que le stockage par hydrogène, bien que prometteuses, soulèvent encore des questions technologiques et économiques ardues, et peinent aujourd'hui à s'imposer.

Pourquoi ne pas plutôt contourner la difficulté, en exploitant une source continue, quels que soient le mois de l'année ou l'heure de la journée ?

Ces cycles sont terrestres, c'est donc vers l'espace qu'il faut se tourner...

Les *Centrales Solaires Spatiales* - qu'on désignera aussi par l'acronyme anglo-saxon usuel SPS, pour *Solar Power Satellite* - sont une réponse élégante à cette question : en orbite autour de la Terre, leurs immenses réflecteurs collectent le rayonnement solaire avec une parfaite régularité - perturbée qu'en de rares occasions lors de brèves traversées du cône d'ombre de la Terre - et transmettent un flux quasi-continu d'énergie vers une station réceptrice terrestre, par le support immatériel d'un faisceau de micro-ondes ou d'un rayon Laser.

... et tourner dans l'espace

Quel que soit son concept, la structure d'un SPS doit donc toujours répondre à la même question mécanique : assurer en permanence un double pointage vers le soleil d'une part, et vers une station réceptrice au sol d'autre part.

En d'autres termes, il s'agit de composer avec deux rotations : celle liée à la révolution effectuée en orbite terrestre, d'une période de 24 heures afin de maintenir le même positionnement vis-à-vis de la station réceptrice; et celle nécessaire pour constamment orienter des panneaux face au rayonnement solaire, soit une rotation beaucoup plus lente de 1 tour par an.

Concepts de SPS

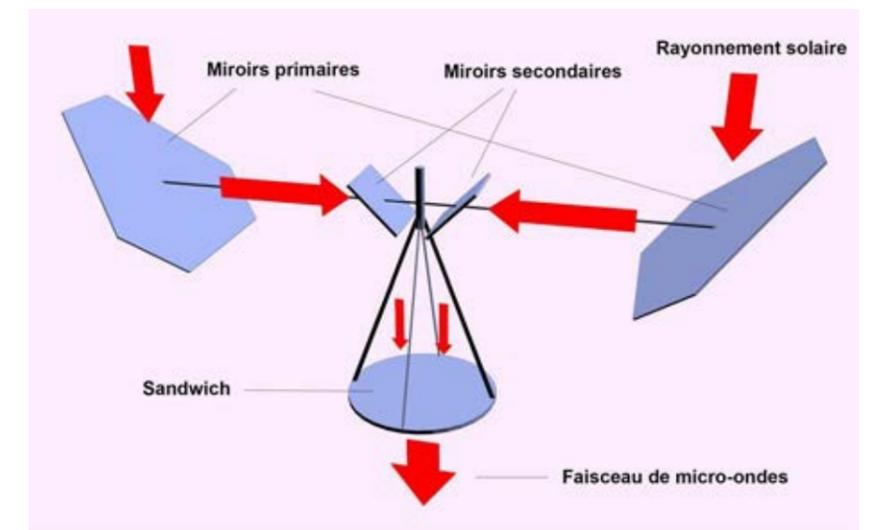
La première communication scientifique décrivant le principe des SPS a été publiée voici à peine un demi-siècle, en 1968, par l'ingénieur et scientifique américain Peter Glaser.

Depuis, différents concepts ont vu le jour : celui dit « de référence » dans les années 1970, composé d'un immense écran de capteurs photovoltaïques qui produit l'énergie électrique alimentant un émetteur de micro-ondes pivotant ; celui de la « tour spatiale », dont la structure verticale de plus d'une dizaine de kilomètres de long est constamment pointée vers le sol par l'effet du gradient de gravité; ou encore, proposé beaucoup plus récemment, le concept « Alpha » se référant au biomimétisme, avec ses capteurs solaires disposés en corolle afin d'optimiser leur ensoleillement, à la façon des pétales d'une fleur ...

Le SPS « Sun Arrow »

Sur le plan théorique, notre projet se réfère au concept proposé par la NASA à la fin des années 1990, appelé « *Integrated Symmetrical Concentrator* » (ISC).

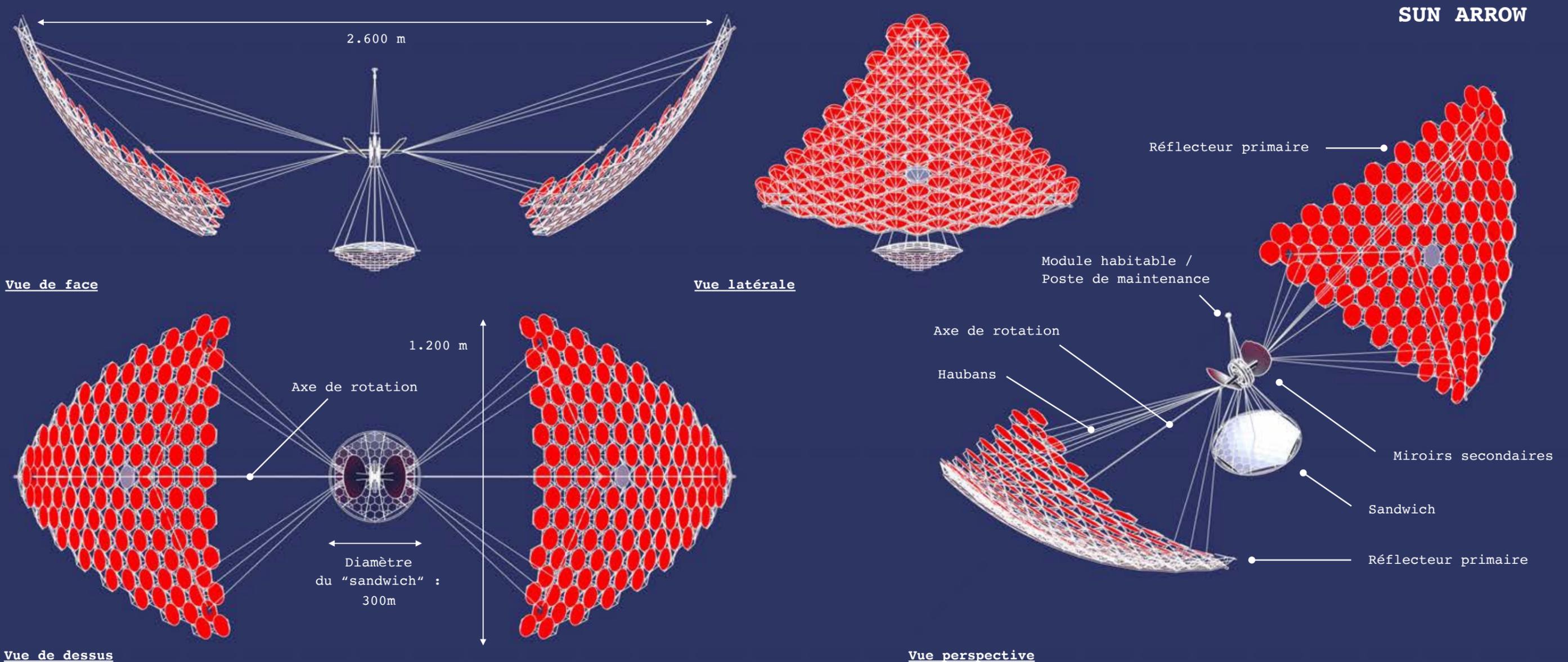
L'ISC est une centrale positionnée en orbite géostationnaire. Son principe consiste à concentrer dans un premier temps le rayonnement solaire grâce à deux réflecteurs pivotants symétriques composés de miroirs circulaires (miroirs primaires); puis le faisceau lumineux résultant est réfléchi par des miroirs secondaires situés près de l'axe central de la structure, afin d'être orientés vers un disque appelé le "sandwich", composé de deux "tranches" : sur une face des capteurs photovoltaïques convertissant en électricité la lumière récoltée par les réflecteurs; et sur l'autre face, pointant en permanence vers la station réceptrice terrestre, des émetteurs micro-ondes.



Avec ce projet, notre objectif est d'aborder les questions architecturales soulevées par ce concept. Quelle sera la structure de la Centrale Solaire Spatiale ? Quelles seront ses dimensions ? Comportera-t-elle des modules habités ? Comment construire ses immenses réflecteurs pivotants ? ...

Parce que ce SPS se présente comme un arc géant puisant son énergie du Soleil, et semblant pointer ses flèches vers la Terre, nous l'avons nommé « *SUN ARROW* ».

Plan d'ensemble



Sun Arrow est composé, selon le principe de l'ISC, de deux parties mobiles pivotantes :

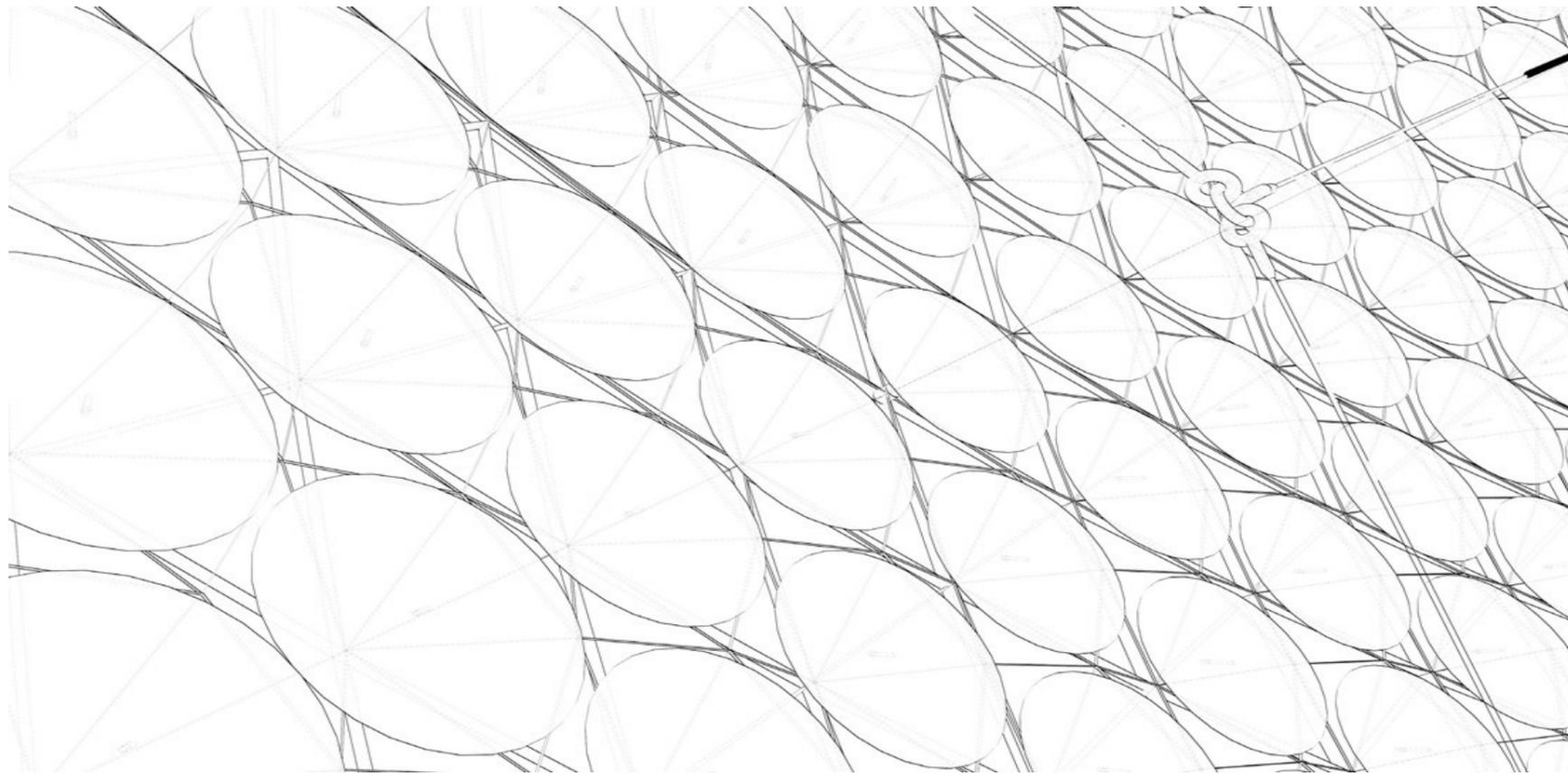
- Les réflecteurs primaires formant les deux "ailes" du SPS, orientés face au soleil; chaque réflecteur comprend 125 miroirs circulaires répartis sur une structure porteuse réticulée en nid d'abeille.
- Un noyau central solidaire des miroirs secondaires réfléchissant le faisceau lumineux vers le disque "sandwich"; et à l'extrémité d'un mat de 300 m de long, un poste de maintenance comprenant un module habitable, ainsi que les équipements assurant le pilotage et l'entretien du SPS.

L'ensemble est dimensionné pour une puissance totale recueillie au sol d'un ordre de grandeur de 80 à 100 Mw. L'envergure totale de la structure est de 2.600 m, pour une largeur de 1.200 m; le noyau, de la base du "sandwich" au module habitable positionné à l'extrémité du mat central, a une longueur de 750m.

Ce dimensionnement, relativement modeste pour un SPS, pourrait être revu à la hausse dans des versions ultérieures. A titre de comparaison, le "concept de référence" des années 1970 devait délivrer une puissance de 5 GW, avec une surface exposée au soleil de 50 km², environ 50 fois supérieure à celle de SUN ARROW.

Mais à terme, la construction de plusieurs SPS de taille moyenne nous apparaît préférable à celle d'une seule gigantesque centrale. Le bon fonctionnement d'un ISC repose en effet sur l'articulation mécanique entre son noyau et la structure porteuse des réflecteurs, et pour des questions de fiabilité, de maintenance et de sécurité, un système de production complet serait donc plutôt composé d'un essaim de centrales solaires indépendantes, pointant toutes néanmoins leurs faisceaux de micro-ondes vers une même station de réception au sol.

Réflecteurs



Miroirs primaires

Les deux grands réflecteurs primaires de SUN ARROW totalisent une surface éclairée de près d'un kilomètre carré. Il s'agit, en définitive, de "simples" miroirs - les cellules photovoltaïques étant concentrées dans le sandwich central - et l'enjeu ici est d'assurer un pointage précis de la lumière réfléchi vers les réflecteurs secondaires.

La solution retenue consiste à utiliser une multitude de miroirs circulaires indépendants - 125 exactement par réflecteur - fixés sur une armature rigide. **Chaque miroir est une surface plane ultra-légère de 80 mètres de diamètre, dotée de son propre système de pointage selon 2 axes**, assurant en permanence le contrôle du faisceau lumineux.

La surface réfléchissante est un film polyimide de type Kapton recouvert d'une fine couche d'aluminium, d'une épaisseur totale de 20 à 25 microns, ayant une bonne tenue aux variations thermiques et aux rayonnements. L'ensemble est rigidifié par des nervures circulaires et radiales "gonflées", au moment de l'installation du miroir, par l'expansion d'un polymère.

Dans le temps, la perte de performance des surfaces réfléchissantes - liée en particulier aux perforations de micro-météorites - nécessitera le remplacement de certains miroirs. En prévision de ces opérations de maintenance, de nouvelles unités seront stockées, en configuration repliée, dans des petits containers cubiques n'excédant pas 60 cm de côté.

Vers des systèmes de tenségrité

Sur le plan mécanique, la principale caractéristique des réflecteurs doit être leur capacité d'absorber les tensions résultant de déformations locales, principalement d'origine thermique. Celles-ci sont particulièrement fortes lors de la traversée du cône d'ombre de la Terre qui, bien qu'occasionnelle, est susceptible de se produire, en orbite géostationnaire, au voisinage des périodes d'équinoxes - aussi appelées pour cette raison les « saisons des éclipses » ... La variation thermique résultante provoque alors, sur l'ensemble de la structure, des compressions/dilatations très supérieures au mètre.

Pour aborder cette question, nous nous sommes intéressé, à l'origine de ce projet, aux **systèmes de tenségrité** tels que les grilles de Tensarch, permettant de concevoir des structures à la fois rigides et élastiques. Ces systèmes comportent « un ensemble discontinu de composants comprimés au sein d'un continuum de composants tendus » [R. Motro, *Tensegrity: structural systems for the future*, 2003], autrement dit une combinaison de barres rigides comprimées reliées, à leurs extrémités, par des câbles en tension.

De tels systèmes ouvrent la voie à de nombreuses applications dans le domaine spatial, et **c'est à nos yeux un objectif à atteindre pour la conception de grandes structures telles que SUN ARROW**. Cela nécessiterait bien entendu une analyse approfondie, ainsi qu'une modélisation mécanique impliquant des ressources dont nous ne disposons pas à ce stade de notre projet. Toutefois, la

solution que nous proposons se réfère à ce principe, avec un treillis rigide composé d'un maillage réticulé en nid d'abeille (qui en tant que tel n'est pas à proprement parler un système de tenségrité), de forme globale triangulaire, légèrement incurvée dans sa partie centrale, comprimée à chacun de ses sommets par trois « câbles de tension » conférant à l'ensemble de la structure sa rigidité, sa stabilité, et son élasticité.

Géodes

La géométrie d'un réflecteur renvoie à celle du ballon de football, ou plus exactement à l'icosaèdre tronqué formé à partir de 20 hexagones et 12 pentagones.

La version "développée" du ballon de football est une géode, dont on démontre qu'elle ne peut être recouverte par un maillage de triangles équilatéraux, à moins de conserver également 12 pentagones (cf. illustrations ci-dessous).



Icosaèdre tronqué du ballon de football : 20 hexagones, et 12 pentagones.



Section de géode : surface composée de triangles équilatéraux, entre 3 des 12 "sommets" pentagonaux

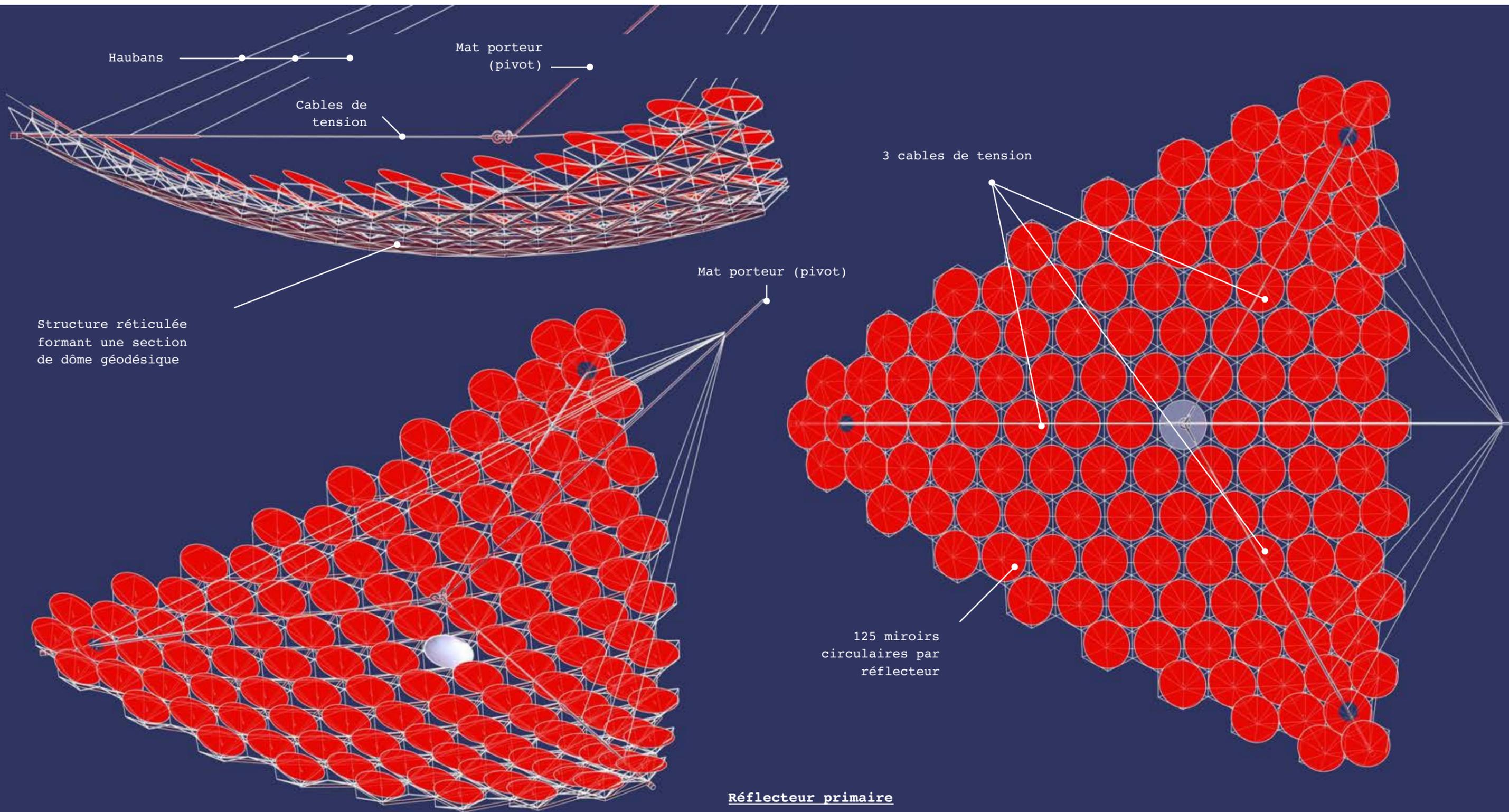


Vue de côté d'un réflecteur primaire : 125 hexagones supportant chacun un miroir circulaire.

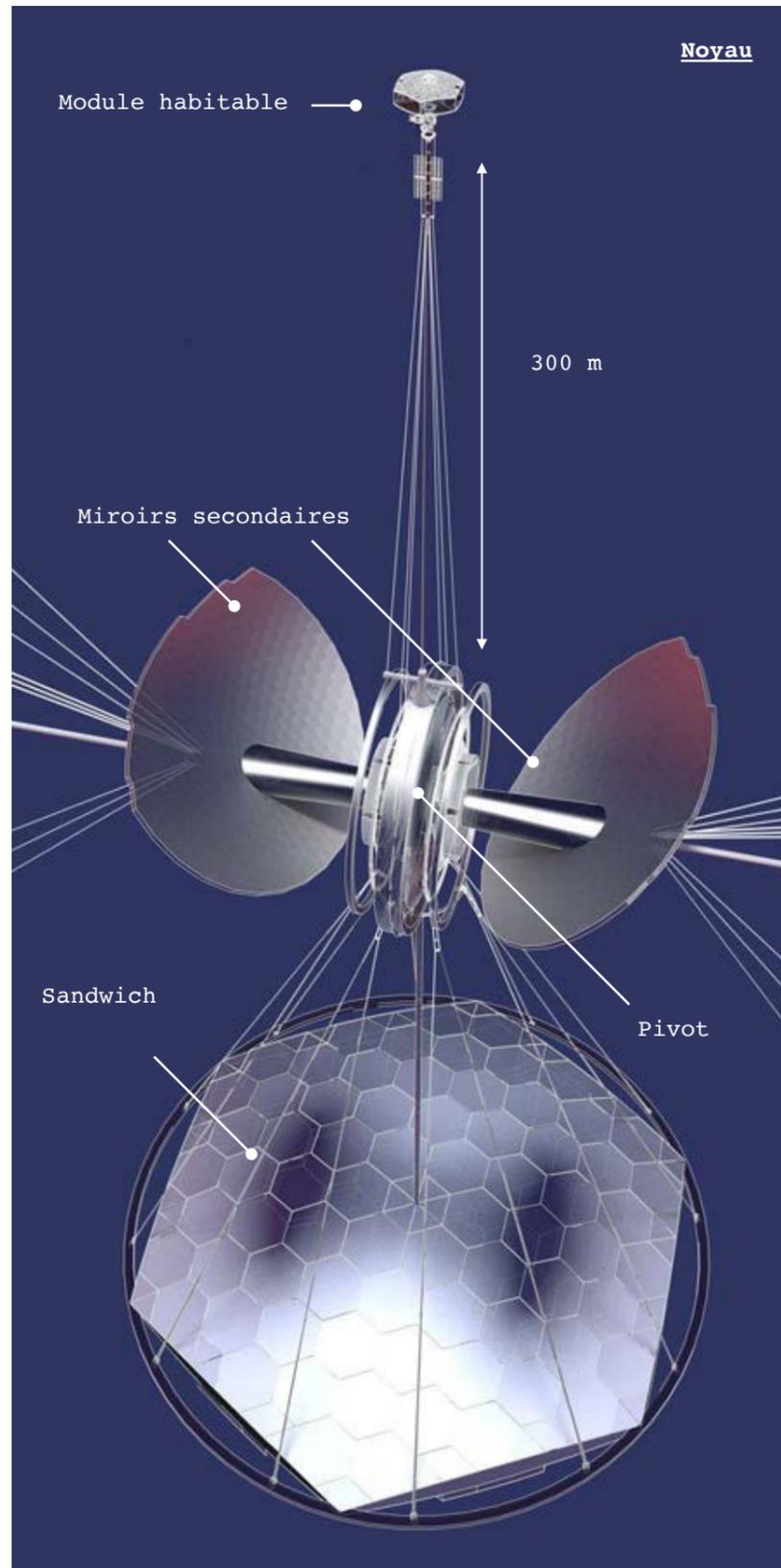
La structure rigide d'un réflecteur est une section de géode formée entre trois "sommets" pentagonaux voisins, exclusivement composée de triangles réguliers équilatéraux. 6 de ces triangles forment un hexagone; au total, un réflecteur comprend 125 hexagones (structure en nid d'abeille), chacun supportant 1 miroir circulaire. L'ensemble est fixé à l'axe pivot du SPS au niveau du point de jonction central des trois câbles de tension; des haubans maintiennent par ailleurs l'inclinaison et le positionnement des réflecteurs.

Le système d'orientation 2 axes équipant chaque miroir sera en mesure de corriger, à tout moment, le pointage du faisceau lumineux réfléchi en cas de déformation locale du réflecteur, ou lors de la variation d'incidence du rayonnement solaire.

Réflecteurs



Noyau



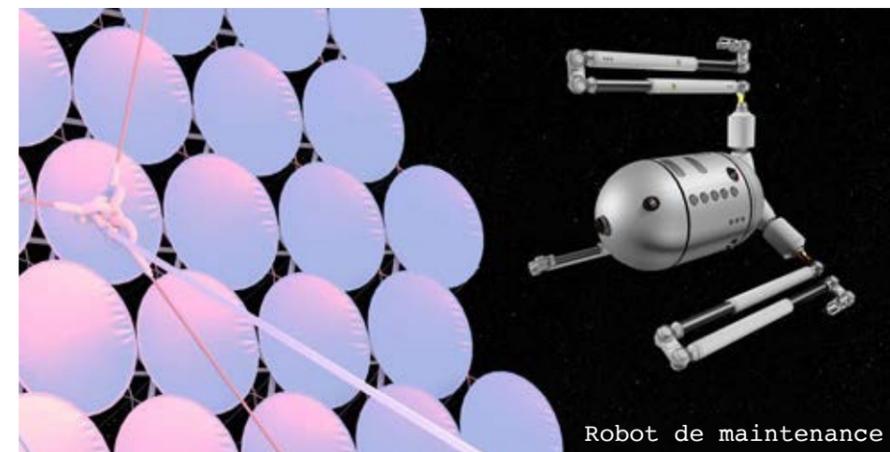
Le noyau central de *SUN ARROW* est constamment orienté de telle sorte que la base du sandwich, émettant le faisceau de micro-ondes, pointe vers la station réceptrice terrestre.

La conception de ce noyau soulève deux questions technologiques majeures :

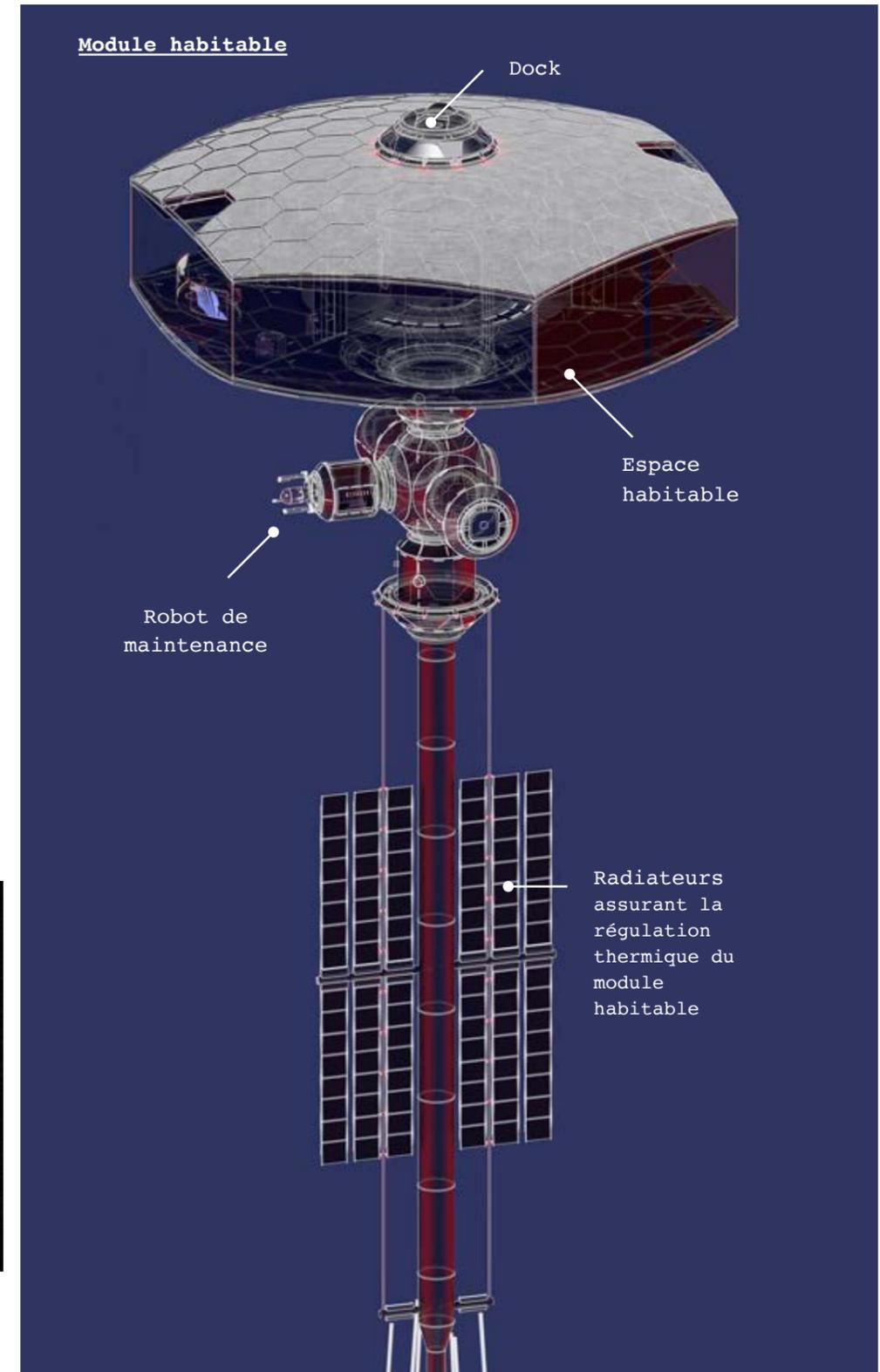
- **Question mécanique** : assurer la rotation (1 tour tous les 24 h) entre le noyau et le mat transversal portant les réflecteurs;
- **Question thermique** : assurer l'équilibre thermique du sandwich, dont la face supérieure est soumise à l'intense rayonnement solaire concentré par les réflecteurs.

Sans prétendre apporter des réponses à ces deux questions clés, communes à la majorité des concepts de SPS, nous nous sommes référés ici, s'agissant du dimensionnement du disque-sandwich, à des études de faisabilité de l'ISC réalisées par la NASA à la fin des années 90; il est possible/probable cependant qu'un bilan thermique précis fasse apparaître la nécessité de compléter le sandwich par une couronne radiante (radiateur en anneau, dissipant par rayonnement l'excès de chaleur emmagasiné par le sandwich), dont la taille serait à préciser.

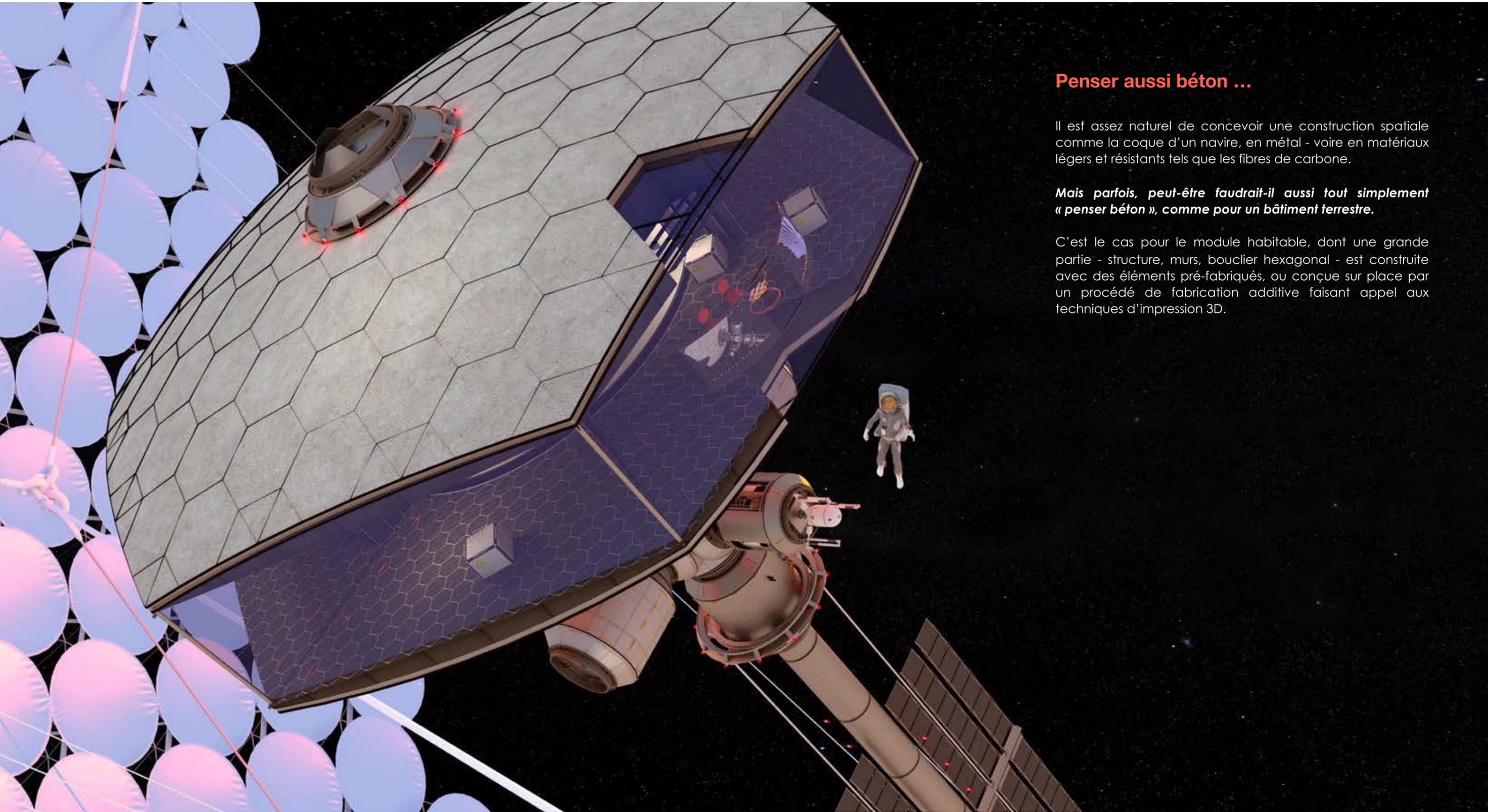
Bien que *SUN ARROW* ait vocation à fonctionner de façon totalement automatique, il nous apparaît important de le doter d'un module habitable, susceptible d'accueillir, pour des durées limitées, les équipages humains assurant régulièrement la maintenance de la centrale. Ce module est positionné à l'extrémité d'un mat l'éloignant autant que possible du sandwich ainsi que de l'axe pivot central.



Près de ce module se trouvent également tous les équipements chargés de superviser le fonctionnement courant du SPS. En particulier les petits **robots de surveillance et d'entretien** de la structure - capables notamment de remplacer les miroirs défectueux ou usagés.



Module habitable



Penser aussi béton ...

Il est assez naturel de concevoir une construction spatiale comme la coque d'un navire, en métal - voire en matériaux légers et résistants tels que les fibres de carbone.

Mais parfois, peut-être faudrait-il aussi tout simplement « penser béton », comme pour un bâtiment terrestre.

C'est le cas pour le module habitable, dont une grande partie - structure, murs, bouclier hexagonal - est construite avec des éléments pré-fabriqués, ou conçue sur place par un procédé de fabrication additive faisant appel aux techniques d'impression 3D.

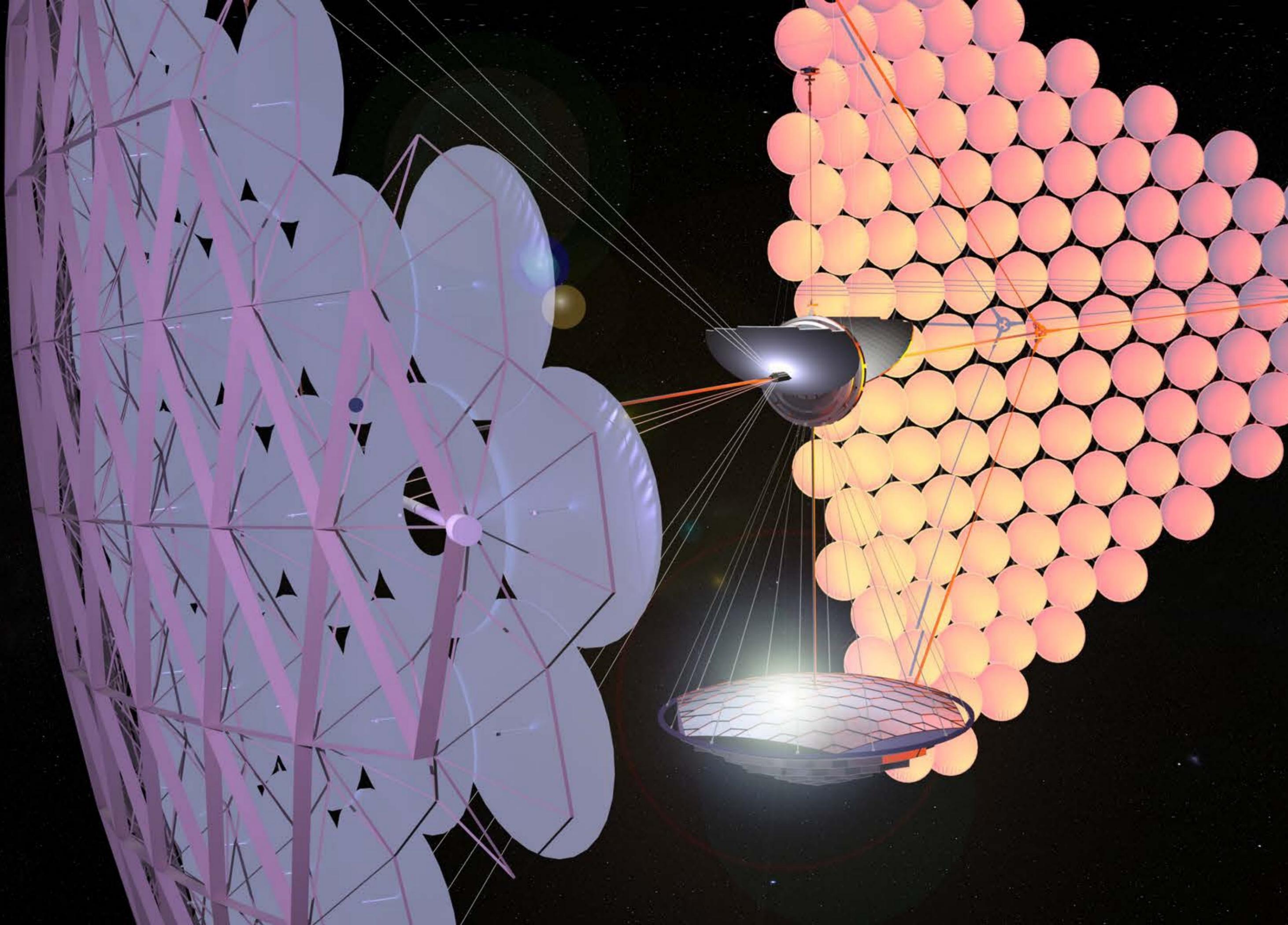
Station de réception



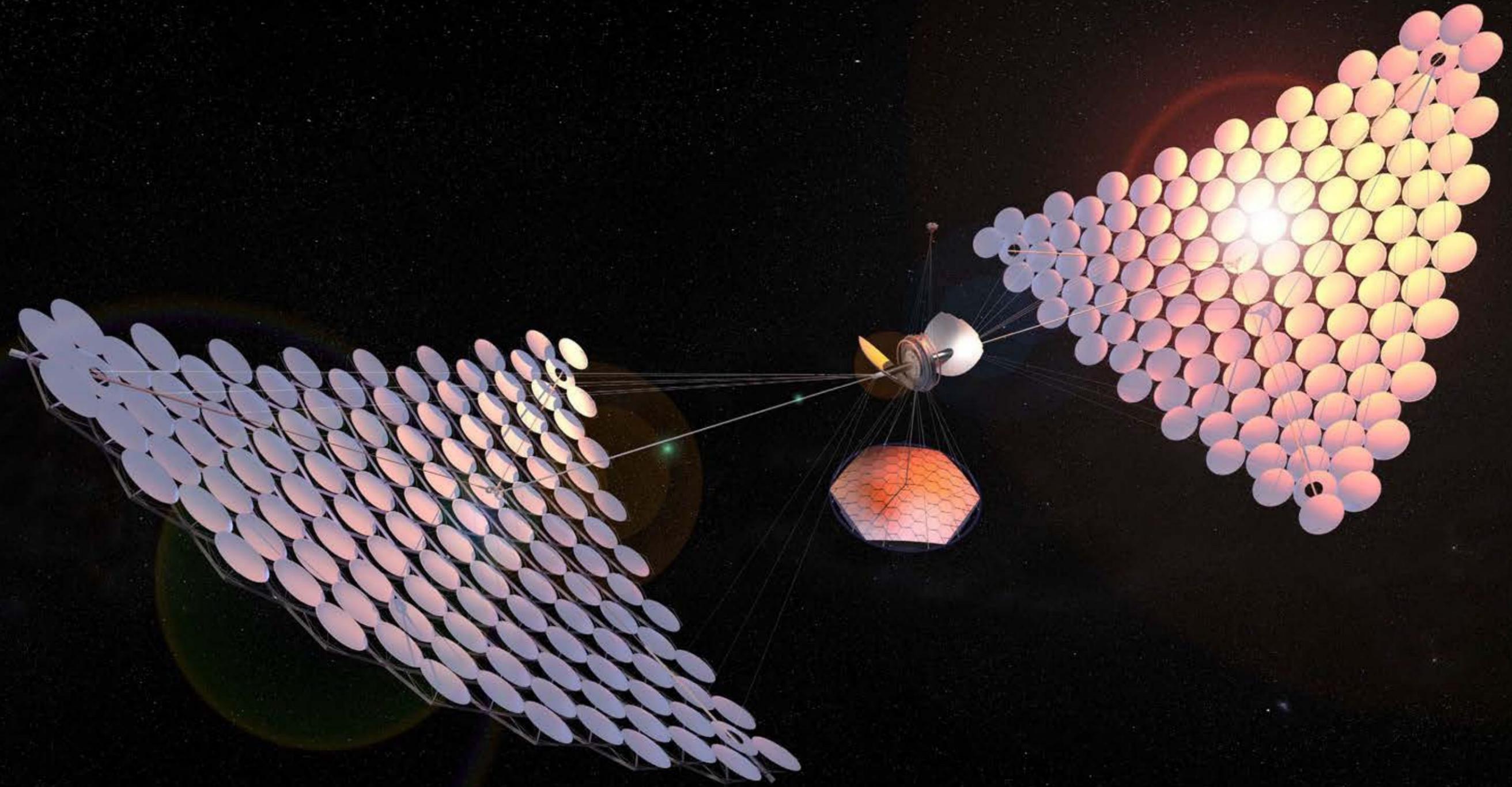
Les faisceaux de micro-ondes transfèrent l'énergie récoltée depuis la centrale solaire spatiale vers une station terrestre de réception composée d'*antennes redresseuses* - les *rectennas* - couvrant une surface de plusieurs kilomètres carrés. Celles-ci sont semblables à des grillages horizontaux dont les mailles de quelques centimètres

de côté (fonction de la longueur d'onde du faisceau capté), absorbent près de 90 % du rayonnement micro-ondes, tout en laissant largement passer la lumière solaire. Il n'est donc pas inconcevable d'imaginer, sous ces immenses antennes, un champ cultivé, ou du moins une couverture végétale naturelle.

Outre la parfaite régularité de cette source d'énergie - non soumise aux cycles des journées et des saisons - l'emprise au sol de ces antennes est généralement estimée de 8 à 10 fois inférieure - pour une même quantité d'énergie délivrée sur le réseau - à celle d'un champ de panneaux photovoltaïques traditionnels.



Vers une industrialisation de l'espace ...



Mais pour construire ces centrales solaires, il faut acheminer en orbite géostationnaire des milliers de tonnes de charge utile ... Quelle que soit la puissance des lanceurs actuels ou futurs, s'affranchir de la gravité terrestre reste particulièrement coûteux, et le sera sans doute encore longtemps. *Ne serait-il pas préférable, demain, de construire entièrement les centrales solaires spatiales à partir de matériaux extra-terrestres ?*

Ce serait un juste retour des choses, alors que le concept de SPS a vu le jour à peine une année avant le vol d'Apollo 11 et qu'aujourd'hui les réflexions prospectives sur le développement du "Village Lunaire" redeviennent d'actualité, que **la construction de SPS soit identifiée comme un des objectifs prioritaires d'une industrialisation de l'espace prenant son essor à la surface de notre satellite naturel.**

Ces centrales solaires deviendraient une des composantes clés du système terrestre de production d'énergie durable. Puis, tout naturellement, peut-être se tourneraient-elles ailleurs, au delà de la Terre, vers de futures cités spatiales ...