

## **Sunsat Energy Council**

# **PRESENTATION DE L'ETAT DES RECHERCHES SUR LES CENTRALES SOLAIRES SPATIALES**

**Présentation aux Groupes Parlementaires "Energie"  
Paris, Palais du Luxembourg, le vendredi 21 mars 2003**

- page 02** \* **Accueil par M. Claude Gatignol (Parlement)**
- page 04** \* **Intégration des CSS dans les scénarios du futur,  
par Leopold Summerer (Agence Spatiale Européenne)**
- page 14** \* **Technologies des Centrales Solaires Spatiales,  
par John Mankins (National Air and Space Administration)**
- page 30** \* **Impact des CSS sur l'effet de serre,  
par Nobuyuki Kaya (Université de Kobé)**
- page 44** \* **Etapas pour le développement des CSS,  
par Alain Celeste (Université de La Réunion)**
- page 57** \* **Incidences industrielles du développement des CSS,  
par Guy Pignolet (Sunsat Energy Council)**
- page 65** \* **Démonstrations fonctionnelles de CSS (Unesco)**

## **OUVERTURE DU COLLOQUE**

**par Claude Gatignol,**

Député de la Manche

Président du Groupe d'Etudes sur l'Energie à l'Assemblée Nationale

Vice-Président de l'Office Parlementaire pour l'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques

Membre du Groupe Parlementaire "Espace"

=====

De prime abord, je tiens à remercier les organisateurs de ce colloque et à vous dire tout le plaisir que j'ai à ouvrir les travaux de cette matinée. Je suis député, élu de la Manche, en Normandie, mais c'est aussi dans mes fonctions de Président du Groupe Energies de l'Assemblée Nationale que j'interviens plus particulièrement.

On se doit de suivre tout particulièrement sa curiosité lorsque vous êtes sollicité par telle ou telle évocation de sources énergétiques. C'est ce qu'a réussi à faire monsieur Pignolet lorsqu'il est venu me voir pour me parler des Centrales Solaires Spatiales. Tout ceci fait que je me retrouve ici aujourd'hui dans cette salle, car est-il de plus grande originalité que le sujet évoqué qui se place dans le vaste problème des sources énergétiques. Ces études réunissent à la fois l'attractivité du domaine spatial, et elle est grande, le challenge de la captation de l'énergie solaire, çà c'est un beau sujet aussi de recherche et de laboratoire encore à ce jour, et bien entendu, l'autre mystère qui est celui du transfert de cette énergie de l'espace vers la surface de notre globe terrestre.

De plus ce colloque se place, vous le savez, après le 18 mars, qui a été le jour choisi par le Gouvernement pour lancer le débat public sur l'énergie. C'était donc mardi, à la Cité des Sciences, monsieur le Premier Ministre, madame le Ministre de l'Industrie, madame le Ministre de la Recherche, étaient là pour lancer ce grand débat national, qui se prolongera en Province par quatre grandes réunions, à Rennes, à Bordeaux, à Nice et à Strasbourg, et au mois de mai, reviendra se terminer, en conclusion, de nouveau à Paris à la Cité des Sciences.

Donc je crois que ce colloque d'aujourd'hui s'inscrit parfaitement dans les questions que l'on doit se poser, c'est-à-dire celles qui touchent la demande en énergie, d'un pays bien sûr, mais d'un continent ou des continents au sens large, les conséquences de l'utilisation de l'énergie selon son origine, et bien entendu, c'est le côté politique des choses, il y a aussi la nécessité de prévoir pour les années à venir, pour les décennies à venir, et vous avez parlé, monsieur Vassaux, de moyen terme, sinon de long terme. C'est la question qu'on doit se poser sur le plan politique: qu'est-ce qui peut être prévu pour les énergies du futur, sachant que trois caractéristiques là aussi sont obligatoirement présentes dans la réflexion, 1) la disponibilité car on sait bien que la croissance de tous les pays suit une courbe parallèle à la consommation d'énergie, donc disponibilité, 2) bien entendu, il faut ne pas oublier la compétitivité de toutes ces sources d'énergie, il y en a plusieurs, mais il faut, à la fois pour l'industrie, à la fois pour le domestique, arriver à des coûts convenables dans cette utilisation, et puis surtout, une troisième caractéristique qui fait que notre société, maintenant, englobe dans cet usage de l'énergie les connotations environnementales qu'on résume

dans la fameuse notion d'effet de serre. Cet effet de serre dont nous savons maintenant tous la réalité, se mesure par l'élévation de la température moyenne d'une part, mais aussi par sa cause : le taux de CO2 dans l'atmosphère qui est passé de 280 ppm au XIX<sup>e</sup> siècle à 340 ppm actuellement. Il faut donc impérativement regarder vers les techniques de l'avenir qui évitent de produire du CO2.

Donc aujourd'hui, que peuvent nous proposer nos amis qui sont là et qui auront le micro dans quelques instants? Toute cette immense énergie, qui vient de notre étoile solaire, et qui est créée, ne l'oublions pas par fusion thermonucléaire, on revient toujours aux sources finalement même si nous utilisons actuellement la fission, cette énergie se transmet à nous sous forme de lumière. Comment est-elle utilisable, canalisable, proposable sous forme d'électricité, qui est une forme facile d'utilisation amenée aux consommateurs? Alors où en sont les recherches dans ce domaine, où en sont les espoirs que nous pouvons tous avoir, et qui répondent à la fois à des rêves mais aussi à des besoins? C'est ce que nous allons apprendre au cours de cette matinée, et je voudrais féliciter les uns et les autres d'avoir fait ce déplacement, quelquefois du Japon, de Kobé, monsieur Kaya, quelquefois des lointaines terres américaines, n'est-ce pas monsieur Mankins, et bien sûr, venant du sud aussi, le grand sud pour nous, ceux qui viennent de La Réunion, de cette belle île, ou bien de Hollande, n'est-ce pas monsieur Summerer de l'ESA.

Je remarque non seulement l'internationalité et la qualité des intervenants, mais il y a en particulier, monsieur Pignolet, dans la salle, qui ont participé à ce début d'aventure, des lycéens et tout particulièrement les lycéens du Lycée Professionnel Jean Perrin, de Saint-André à La Réunion, et je veux les féliciter de s'être intéressés à l'énergie solaire et d'avoir vraiment réalisé, avec vous monsieur Pignolet, un certain nombre d'éléments de démonstration qui sont là et dont vous nous parlerez sûrement tout à l'heure, bravo de vous être lancés dans cette magnifique opération.

Voilà, je crois avoir fait oeuvre utile en remplaçant ce débat, en ouvrant donc la discussion, je redonne la direction des opérations à monsieur Didier Vassaux, et bien sûr le micro à tous les intervenants de cette matinée. Je vous remercie de votre attention et je vous conseille de la prolonger tout au long de cette matinée.

Merci.



# INTEGRATION DES CSS DANS LES FUTURS SCENARIOS ENERGETIQUES

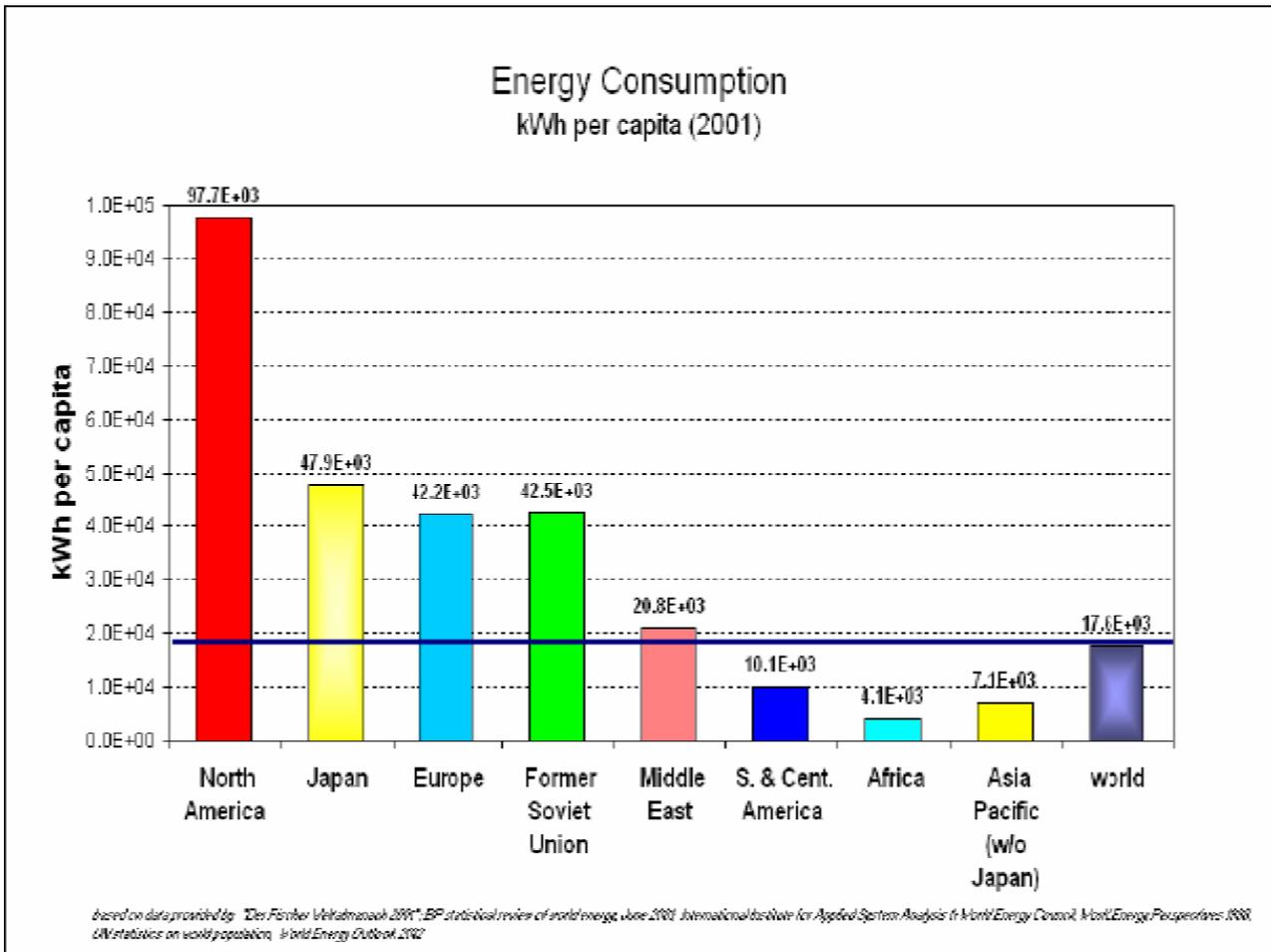
par Leopold Summerer

Advanced Concepts Team, ESA

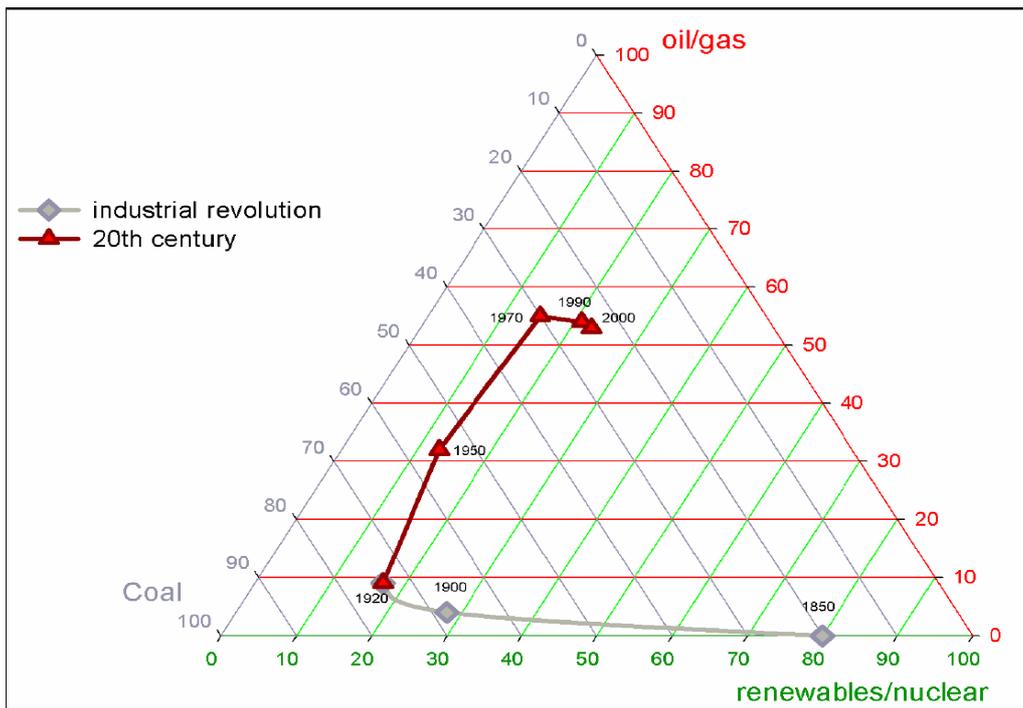
- I. Paysage des Sources Energétiques
- II. Scénarios Energétiques Durables
- III. Rôle potentiel des CSS

## I.1 Energie – Développement

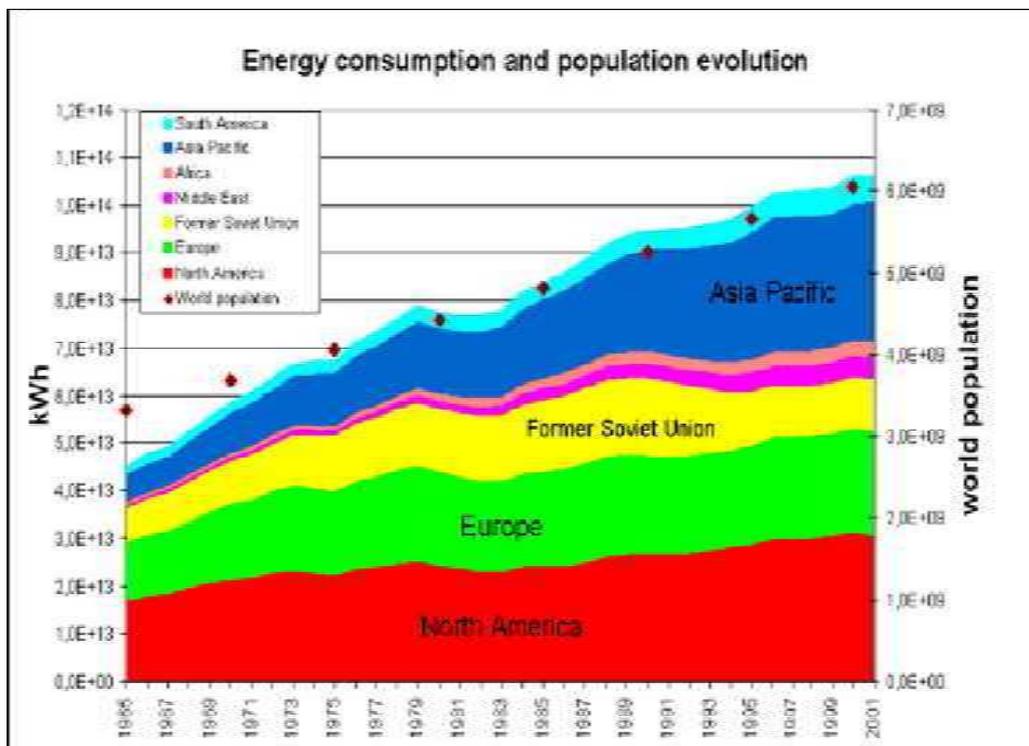
Rapports directs entre disponibilités énergétiques et niveau/potential de développement

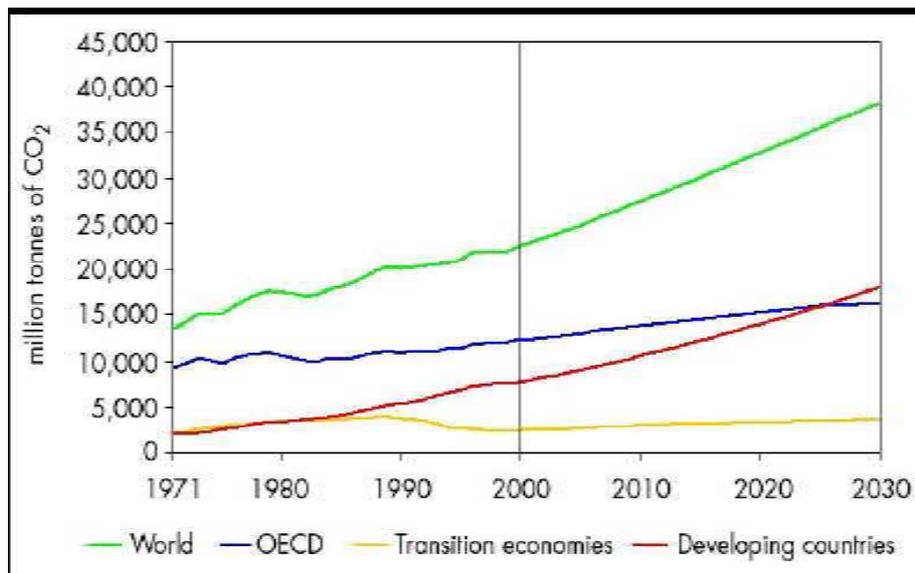


## I.2 Energie – Évolution des Sources d’Energie



## I.3 Energie – Paramètres Majeurs





### Augmentation des besoins énergétiques globaux

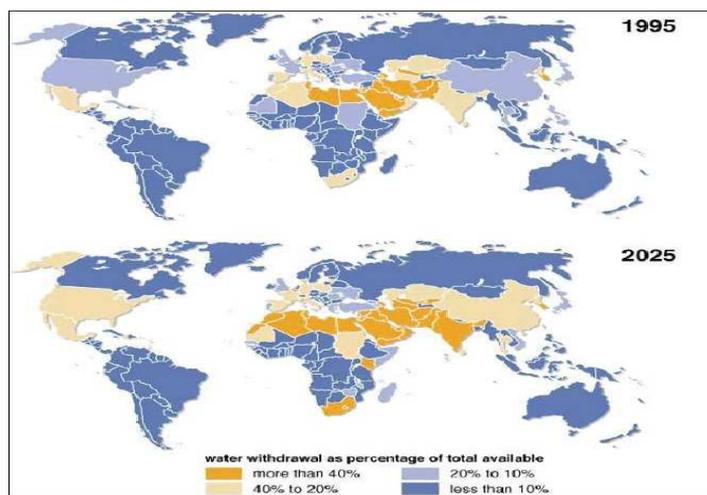
- \* Croissance dans les pays en voie de développement
- \* Chine: dédoublement des kWh/hab.

### Emission des gaz à effet de serre (CO2)

- \* 2000: 22 Gtons → 2030: 38 Gtons (+70%)
- \* 2000: 3.8 tons/hab (global)
- \* OECD: 13 tons/hab
- \* Chine: 2000: 2.4 → 2030: 4.4 tons/hab

### Pénurie d'eau potable

- \* Augmentation de l'utilisation deux fois plus rapide que population
- \* 2025: 2/3 de la population en manque d'eau potable



### Problèmes de santé à cause de la pollution de l'air

### Dépendance énergétique stratégique de quelques pays/régions

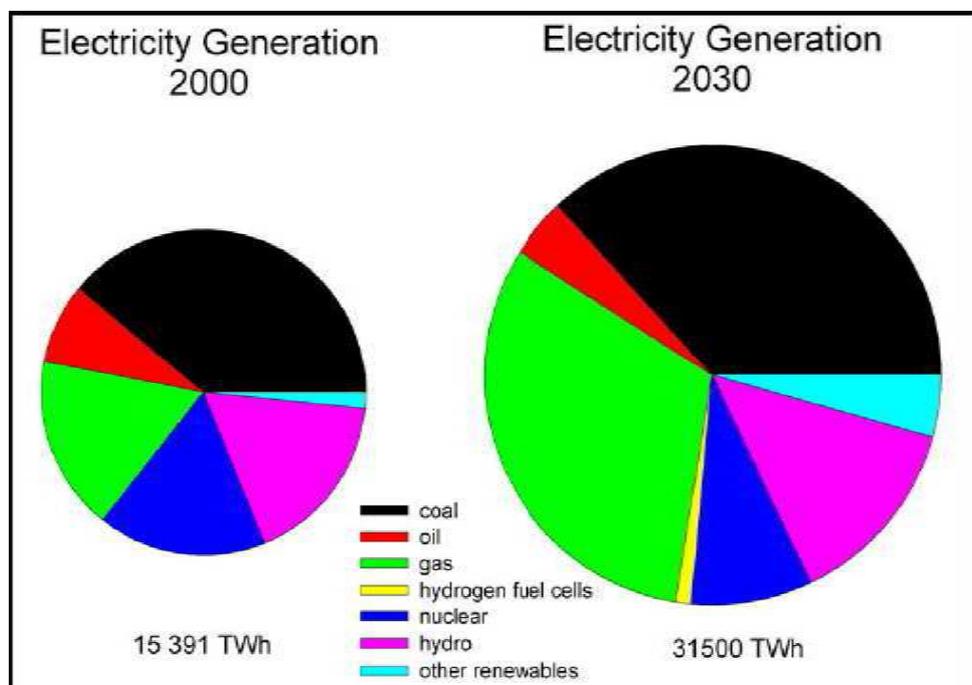
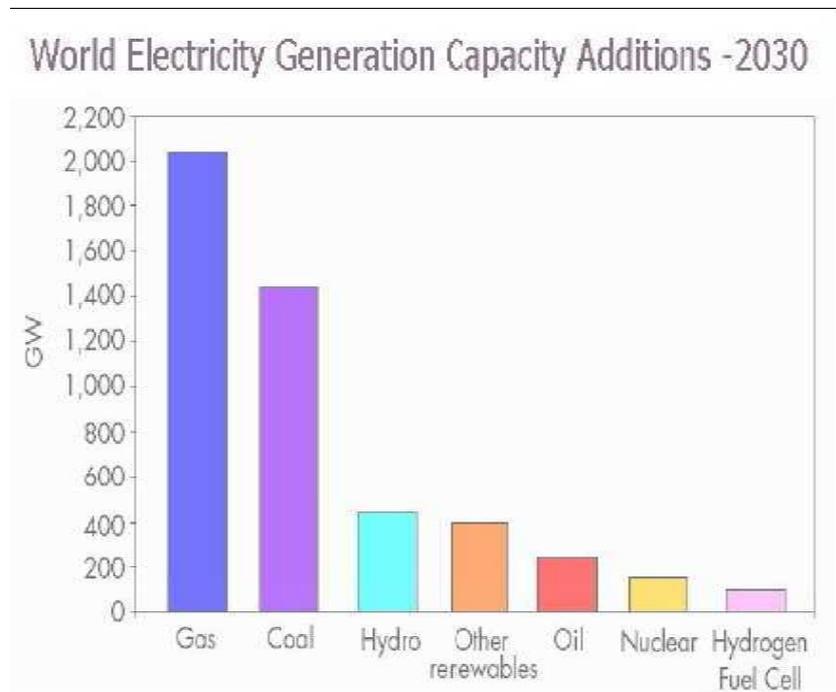
## II.1 Energie – Tendances

Diminution graduelle du pétrole au profit du gaz

\* réduction du pourcentage du contenu en carbone (charbon → pétrole → gaz)

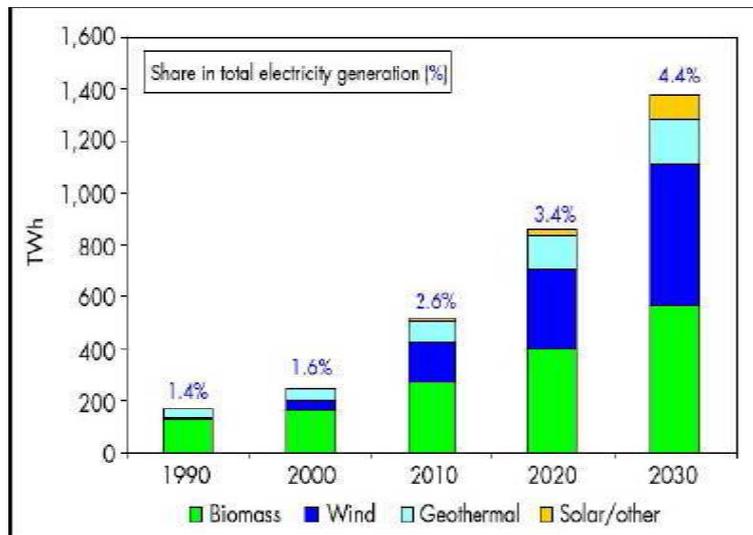
Forte augmentation des besoins électriques

\* 2000: 15,391 TWh → 2030: 31,500 TWh



## Augmentation disproportionnée des sources renouvelables

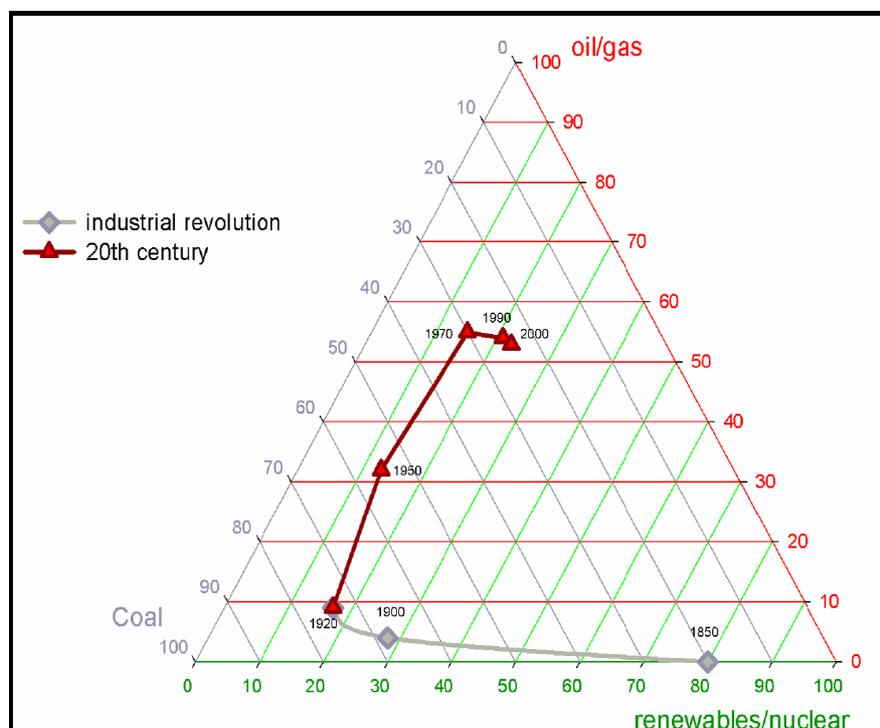
- \* Doublement tous les 10 ans
- \* Essentiellement en Europe (éoliennes)
- \* Faible niveau total : 2000: 250 Twh → 2030: 1400 TWh



## II.2 Energie – But à long terme

Paramètres d'un système énergétique « idéal »:

- \* Sources renouvelables ou inépuisables
- \* Sans déchets et nuisances écologiques majeures
- \* Sources d'énergie ≠ Vecteurs d'énergie



## Vecteurs d'énergie

- \* Cycles sans déchets
- \* Transportables
- \* Stockables
- \* Sûrs et faciles au niveau de l'utilisation
- \* Adaptés aux besoins de l'industrie des transports
- \* Sans (grande) perte d'énergie

### ➔ **Électricité et Hydrogène**

## II.3 Energie – Les Options

### 1. Continuation du statu quo avec extraction du CO2

- \* Passage graduel vers des hydrocarbures moins polluants  
(charbon → pétrole → gaz naturel)
- \* Augmentation des inégalités
- \* Augmentation des effets environnementaux
- \* Augmentation des problèmes de santé liés à la pollution
- \* Scénario non durable à moyen terme

### 2. Recours mondial massif au nucléaire

- \* Dissémination massive de technologies nucléaires
- \* Substitution du charbon en 2030: ~2000 centrales nucléaires
- \* Risques majeurs en cas de conflits
- \* Transport d'importantes quantités de substances radioactives

### 3. Recours massif aux sources renouvelables

- \* Augmentation du solaire terrestre et éolienne jusqu'à ~25%
- \* Utilisation de la biomasse industrielle
- \* Introduction graduelle du solaire spatial
- \* Augmentation du potentiel du solaire terrestre par le solaire spatial

### Scénario probable:

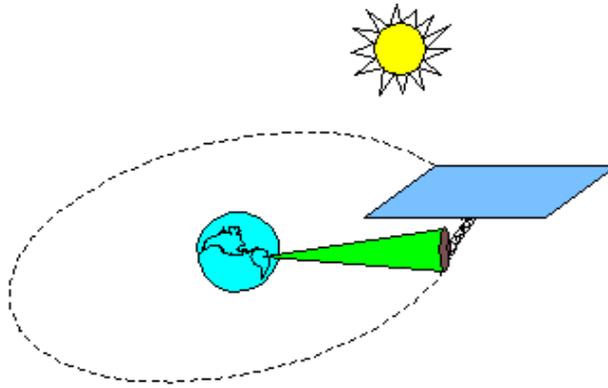
- \* combinaison des trois options → **importance des priorités**

## III.1 CSS – Le concept

### Caractéristique des concepts CSS:

- \* Capturer l'énergie solaire en orbite (GEO) : photovoltaïque
- \* Transmission sans fil sur terre :  $\mu$ -ondes ou laser
- \* Réception sur terre

Rectennas ou PV/solaire-thermique  
Production d'électricité ou d'hydrogène



Représentation symbolique (échelles non respectées)

Avantages:

- \* 11 800 kWh/m<sup>2</sup>a (~1000-2600 kWh/m<sup>2</sup>a sur terre)
- \* Production 24h/24 (en GEO) ( ~8 heures sur terre)
- \* Pas d'influence de la météo
- \* Réception près des agglomérations (bonnes régions terrestres loin des villes)

Options alternatives:

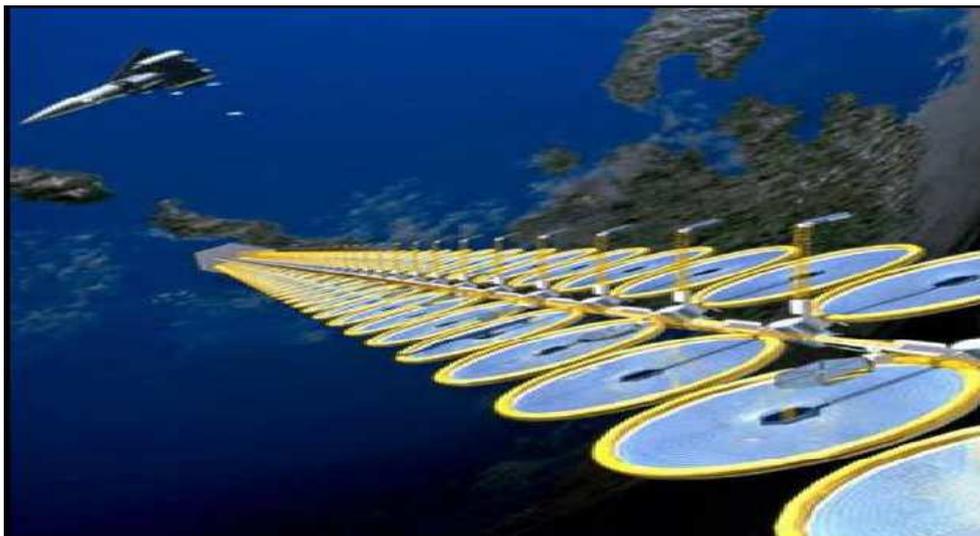
- \* Réflecteurs orbitaux  
rayonnement solaire direct ou  $\mu$ -ondes (surface-orbite-surface)

### III.2 CSS – L'état actuel

État actuel des concepts

- \* Faisabilité technique
- \* Pas de « concept vainqueur »

Plusieurs variantes techniques  
Importantes améliorations



\* Conditions:

Réduction des coûts du transport en orbite  
Continuation des progrès techniques

\* Grandeurs de référence actuelles:

Europe: EuroSPS

275 GW

450/275 MW par satellite

18 CSS , 5 GW par récepteur

\* Coûts de construction min. ~4500-5900 €/kW

(~1300 €/kW pour centrales nucléaires)

Prix de l'électricité  $\geq$  ~15 €cts/kWh

### III.3 CSS – travaux accomplis

1925 idée de Konstantin Tsiolkovski Russie

1968 Proposition des CSS par Peter Glaser USA

'68-'72 NASA (+DoE, ETA, NRC, NAS) CSS études d'évaluation USA

1975 JPL Goldstone WPT, Mojave désert USA

'78-'80 "Concept Development and Evaluation Programme" (CDEP) par ERDA USA

1979 DoE/NASA étude de référence USA

1979 ESA "European Aspects of SPS" ESA

1986 SPS86 Symposium à Paris/Gif sur Yvette F/int.

1987 Étude « Stationary High Altitude Relay Platform » WPT Ca

fin 80s Lunar soil utilisation studies incluant CSS USA

1991 SPS91 Symposium à Paris F/int.

1992 SPS92 Symposium à Rio de Janeiro BR/int.

1992 ISU SSP'92 Design Project on SPS J/int.

1993 Project ISY-METS, WPT space plasma exp. Japon

1993 WPT93 Conférence, San Antonio USA

1993 UNESCO World Solar Summit, Paris F/int.

1994 KEPCO et Kobe Univ. Study applic. WPT Japon

1995 WPT95 Conférence, Kobe J/int.

'95-'97 NASA "Fresh Look Study" USA

1997 SPS97/WPT97 Symposium, Montréal Ca

'97-'98 The Canadian Space Power Initiative Ca

1998 NASA "Space Solar Power Concept Definition Study" USA

1998 WPT démonstration à La Réunion F

1999 Étude ESA "Space Exploration & Utilisation" ESA

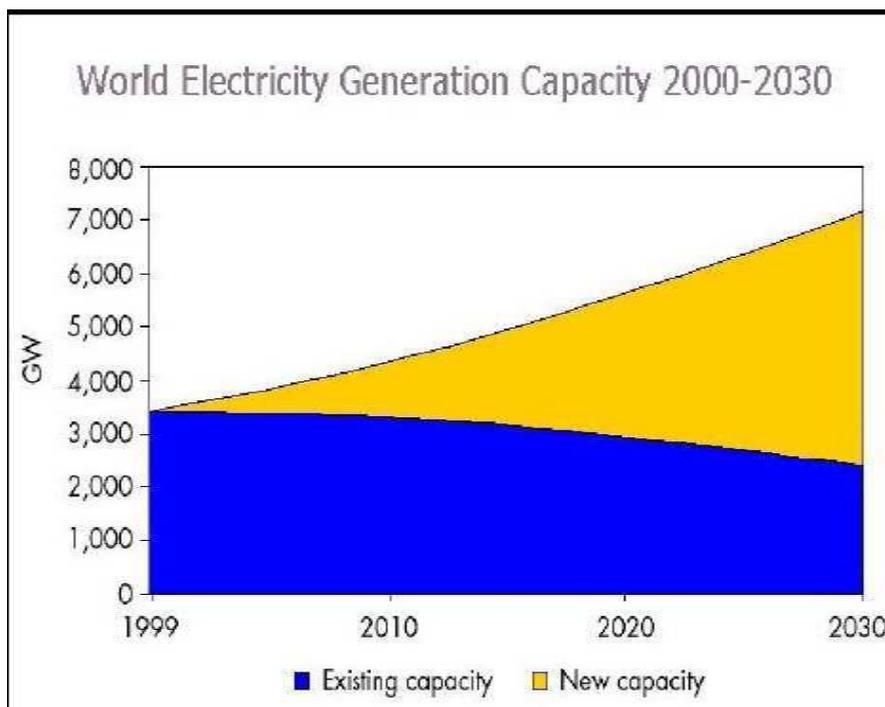
'99-'01 NASA "Space Solar Power Exploration Research and Technology Programme" NASA

2001 WPT01 Conférence, La Réunion F

#### **'03-'05 ESA SPS Programme**

*«Solar Power from Space – European Strategy in the light of Global Sustainable Development» ESA*

### III.4 Situation électrique – 2000 à 2030



Augmentation des capacités

\* Installation de 5000 GW

EU: 658 GW

US+CA: 853 GW

Chine: 800 GW

\* Coût global: ~ 4000 Mrd €

EU: 531 Mrd €

US+CA: 646 Mrd €

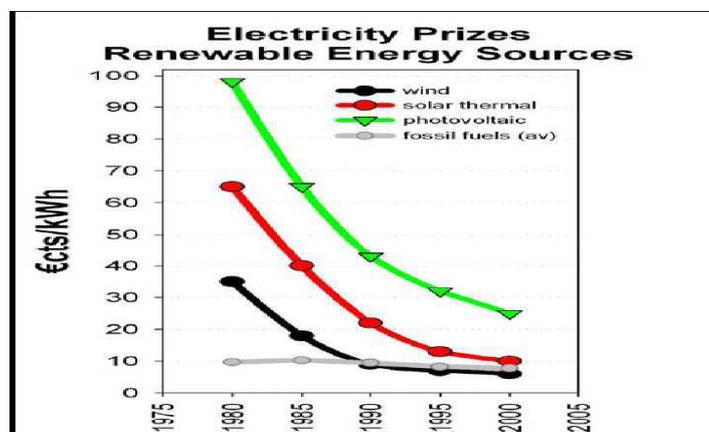
Chine: 827 Mrd €

\* Coût des dernières centrales européennes:

Nucléaire: 1349 €/kW

Charbon: 1140 €/kW

Gaz: 550 €/kW



### III.3 CSS – Les intérêts actuels

#### Intérêts

- \* Concepts durables parmi les plus prometteurs à long terme
  - Capacités énergétiques importantes
  - Pas d'émission de CO2
- \* Intégration dans une économie basée sur l'électricité et l'hydrogène
- \* Compatibilité avec des centrales solaires terrestres
  - Programme technologique et systèmes avancés ESA

#### Les recherches actuelles

- \* Structures et matériaux ultra-légers
- \* Effets sur biosphère et ionosphère
- \* Aspects légaux
- \* Développement de simulations système
- \* Cellules PV légères et efficaces
- \* Transmission d'énergie sans fil
  - augmentation de l'efficacité, transmission par laser
- \* Mission démonstrateur

### Conclusions

CSS: une des options prometteuses pour les 50 ans à venir

- \* Alternatives:
  - Nucléaire (avec retraitement) et fusion prolifération, déchets
  - Dé-carbonisation des hydrocarbures classiques non durable
  - Centrales solaires terrestres et éoliennes limités à ~25%
- \* Peu d'influence sur le paysage énergétique jusqu'à ~2020
- \* Influence significative sur les options à considérer à partir de 2020
- \* Capacité de remplacer la majorité des centrales électriques à base de charbon autour de 2030/2050.
- \* Amélioration rapide des concepts depuis 20 ans –  
réduction importante des coûts.

=====

# **RÉSULTAT DES ACTIVITÉS RÉCENTES DE LA NASA**

## **DANS LE DOMAINE DES CENTRALES SOLAIRES SPATIALES**

**par John C. MANKINS**

Bureau des Vols Spatiaux - Siège de la NASA

---

### **Résumé**

Les Centrales Solaires Spatiales (CSS ou SSP Space Solar Power) sont des éléments qui s'intègrent dans nombre des systèmes et des infrastructures envisagés pour un futur spatial ambitieux. Depuis 1995, la NASA a réalisé des études conceptuelles et des analyses des systèmes et des technologies CSS. L'étude la plus récente, la "SERT" (SSP Exploratory Research and Technology), a fait appel à une équipe couvrant l'ensemble des domaines de l'agence spatiale américaine, avec une participation des industries aérospatiales, du secteur de l'énergie, d'autres agences gouvernementales, des Universités et de groupes bénévoles. Les résultats de l'étude SERT comprennent un portefeuille d'investissement dans les technologies pour les CSS, des filières de développement des technologies, des analyses et des schémas conceptuels, des prototypes technologiques, et des démonstrations au sol.

Ce document présente un certain nombre de ces résultats et montre comment les CSS vont ouvrir la voie aux grandes activités spatiales du futur.

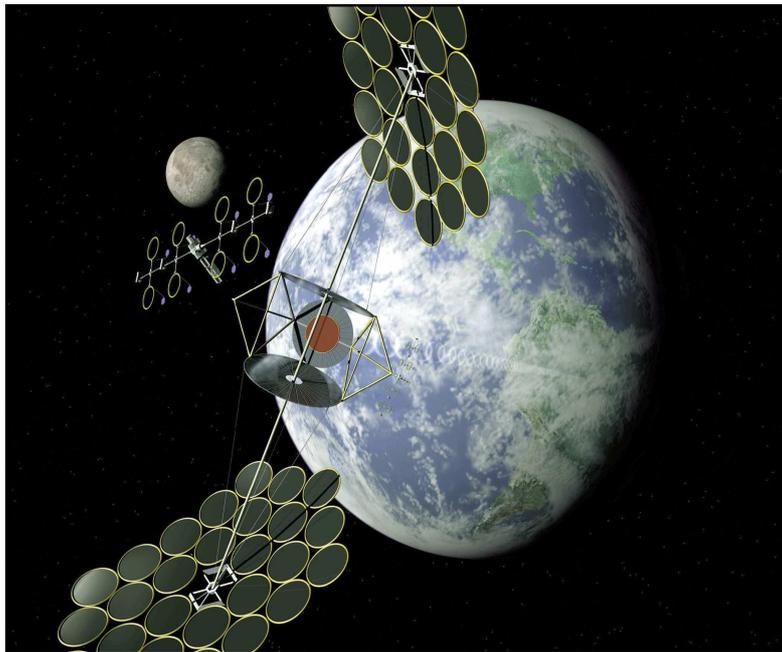
### **Introduction**

Les études récentes conduites par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) sur les Centrales Solaires Spatiales (CSS) comprennent :

- une étude "Fresh Look" de 1995 à 1997
- une étude de définition de concepts en 1998
- l'étude SERT (SSP Exploratory Research and Technology) de 1999 à 2001.

Près de trente concepts différents ont été analysés pendant l'étude "Fresh Look". Dans cet ensemble, le concept le plus intéressant apparaît être celui de la Tour Solaire (Sun Tower), ne configuration de quinze kilomètres de haut stabilisée par gradient de gravité, avec une concentration de l'énergie solaire par des lentilles de Fresnel gonflables. Diverses variantes de la Tour Solaire et d'autres idées ont été analysées au cours de l'étude de définition des concepts, et l'équipe coordinatrice CSS a incorporé plusieurs autres concepts technologiques en cours de développement au sein de l'agence. En 1999, l'étude SERT a démarré une recherche technologique ciblée et un programme de développement, elle a mené des analyses système et des études d'intégration, et développé des démonstrations système.

Ce document décrit quelques-uns des concepts système et des prototypes technologiques, ainsi qu'une filière de développement pour les CSS. De plus, ce document développe les applications potentielles des concepts et des technologies CSS dans le cadre d'une industrialisation de l'espace.



*Figure 1 : Le concentrateur symétrique intégré et le "clipper" solaire*

La figure 1 montre deux exemples de concepts CSS : le "concentrateur symétrique intégré" (Integrated Symmetrical Concentrator ou ISC) et le "clipper solaire" (Solar Clipper). Le concept ISC est un système de 1,2 Gigawatt pour la fourniture d'électricité à des réseaux de distribution terrestres ou à diverses installations orbitales. Le "clipper solaire" est un concept dérivé de la Tour Solaire, pour la propulsion électrique solaire d'une navette martienne. Une fois en orbite autour de Mars, le clipper martien enverrait son énergie vers la surface de la planète pour alimenter des colonies humaines.

## **Approche**

Sur une période de 24 mois, une équipe équilibrée, aux compétences transverses, a mené des études et des analyses système; fait des recherches, des développements technologiques et des démonstrations sol. Au niveau programmatique, la répartition des lots de travail s'est faite comme suit :

- A.0 Centrales solaires spatiales
- B.1 Générateurs solaires (GS)
- B.2 Transport d'Énergie Sans Fil (TESF)
- B.3 Conditionnement et distribution de l'énergie (CDE)
- B.4 Structures, matériaux et contrôle
- B.5 Matériaux et contrôle thermique
- B.6 Assemblage robotique, entretien et service
- B.7 Systèmes plate-forme
- B.8 Segment énergie sol
- B.9 Infrastructure et transport sol-orbite

- B.10 Infrastructure et transport dans l'espace
- B.11 Environnement et sécurité
- B.12 Intégration système (analyse, ingénierie, modélisation)
- B.13 Applications (sciences / exploration / commerce)
- B.14 Etudes économiques et études de marché indépendantes

Les sections qui suivent vont traiter des approches de l'analyse système, identifier les technologies requises par tous les systèmes CSS et décrire les prototypes technologiques pour les éléments B.1 à B.6 .

### **Intégration système, analyse et modélisation**

Les programmes de développement technologique ont besoin des concepts système pour que les équipes d'ingénierie puissent analyser les interactions entre les diverses technologies. Cependant si tout un programme est dépendant d'un point de passage unique, il en résulte que tout défaut de conception sur ce point particulier peut mettre en échec la totalité du programme. Pour éviter le talon d'Achille d'un point unique, l'étude SERT a analysé une variété de concepts en définissant le cahier des charges. Les concepts système ont été organisés en Catégories de Systèmes Modèles (Model System Categories ou MSC) se répartissant sur des puissances allant de 100 kilowatt à plus d'un gigawatt. Ces catégories ont permis d'imaginer des filières technologiques de haut niveau en évitant d'avoir des points de passage uniques. Le tableau 1 donne une description rapide des catégories, des niveaux de puissance et des objectifs :

*Table 1 Catégories de Systèmes Modèles (MSC)*

<b>Catégorie</b>	<b>Puissance</b>	<b>Mission ou Objectif</b>
MSC 1	~ 100 kW	Plate-forme autonome; TESF, GS et SPES; démonstration à échelle réduite;
MSC 2	~ 100 kW	Option spatiale commerciale
MSC 3	~ 10 MW	Système pour surface planétaire, démonstration à échelle réduite, Option pour l'exploration spatiale
MSC 4	~ 1 GW	Plate-forme autonome; TESF, GS et CDE, SPES; grande démonstration; Plate-forme autonome; Centrale solaire spatiale complète Option spatiale commerciale
MSC 5	~ 10-100 GW	Centrale interstellaire opérationnelle
MSC 6	~ à définir	"Autres concepts"

Les modèles MSC 1, 3, et 4 ont été examinés dans le détail par une grande partie de l'équipe SERT à partir de concepts système spécifiques. Les équipes en charge des applications et des démonstrations ont étudié les modèles MSC 2 et 5 au cas pas cas. Chaque modèle a considéré un ou plusieurs points d'entrée (Point of Departure ou "POD"). Les missions associées avec les points d'entrée allaient de la validation de technologies jusqu'à des centrales opérationnelles. Pour décrire le niveau de maturité d'une technologie, la NASA utilise une échelle dite TRL de "Technology Readiness Level" à neuf niveaux. TRL 1 veut dire que les principes fondamentaux ont été observés et compris. Au niveau TRL 4, des composants ou des montages d'étude ont pu fonctionner avec succès en laboratoire. Pour atteindre le niveau TRL 7, il faut réussir une démonstration avec un prototype dans l'environnement spatial. Le niveau TRL 9 veut dire que la technologie est mûre pour un système pleinement opérationnel.

Les concepts du modèle MSC 1 ont des niveaux de puissance d'environ 100 kilowatt. Des versions prototype de concepts de Tour Solaire et de Clipper Solaire ont servi de points d'entrée pour ce modèle MSC 1. La figure 2 décrit une mission pour une démonstration à court terme de transport d'énergie par hyperfréquences et par laser. Les objectifs de la mission sont entre autres de prouver que les technologies des composants et des sous-systèmes ont atteint le niveau TRL 7.

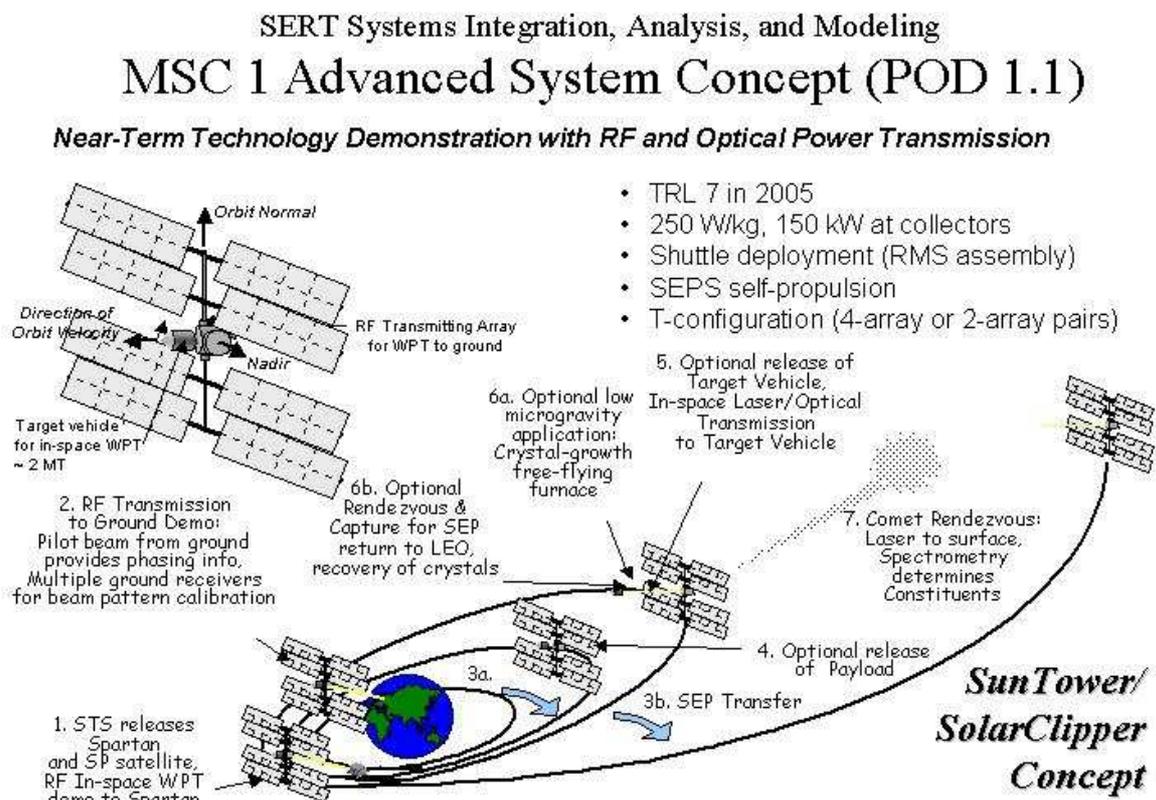
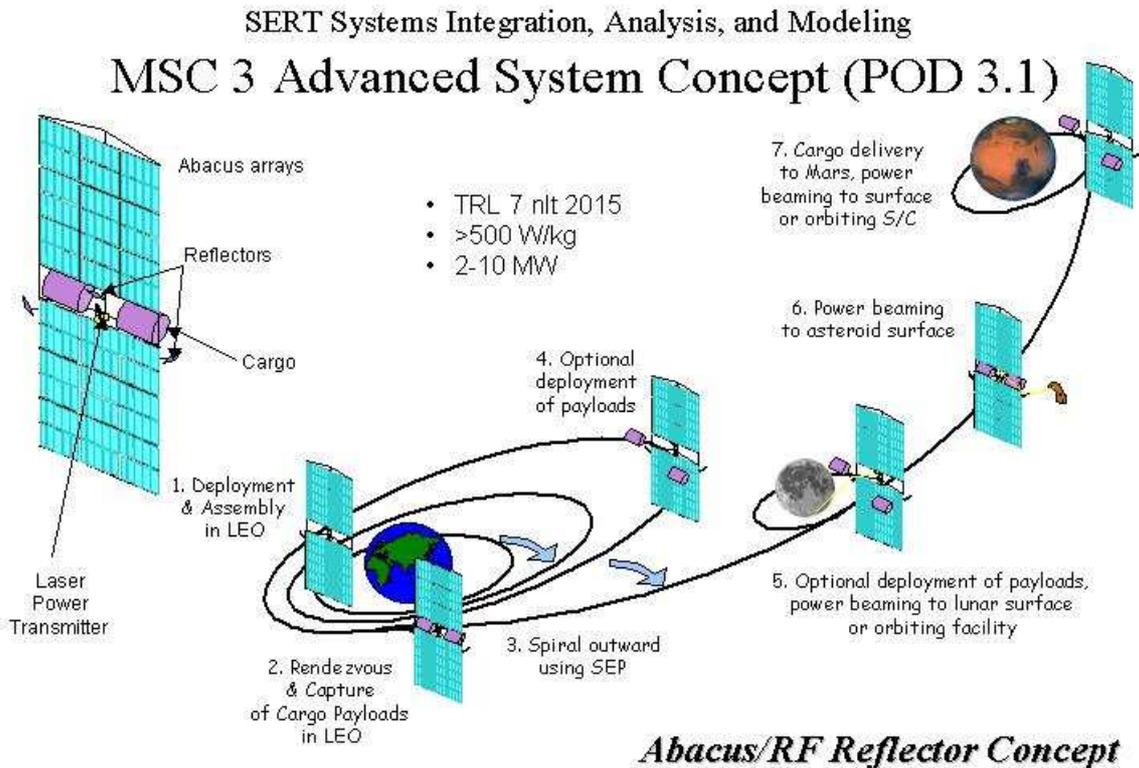


Figure 2 : Point d'entrée 1 pour une Catégorie de Système Modèle MSC 1

Les notes 6a et 6b de la figure 2 montrent un four de croissance cristalline autonome en micro-gravité comme exemple d'application. Même pour des démonstrations technologiques à court terme comme le point d'entrée POD 1.1, les programmes de développement des technologies CSS peuvent offrir des bonnes occasions de démontrer la faisabilité d'une industrialisation de l'espace.

Les concepts pour les systèmes modèles MSC 3 fourniraient une puissance d'environ 10 mégawatt. La figure 3 décrit une démonstration en vol avec une option exploration de l'espace. En raison de son aspect, cette configuration est appelée le concept "Abaque". Les objectifs du POD 3.1 comprennent une démonstration des composants et des sous-systèmes à un niveau TRL 7 avec le déploiement de charges utiles en orbite autour de la Terre, de la Lune ou de Mars.



*Figure 3 : Le concept "Abaque" pour le soutien aux missions d'exploration*

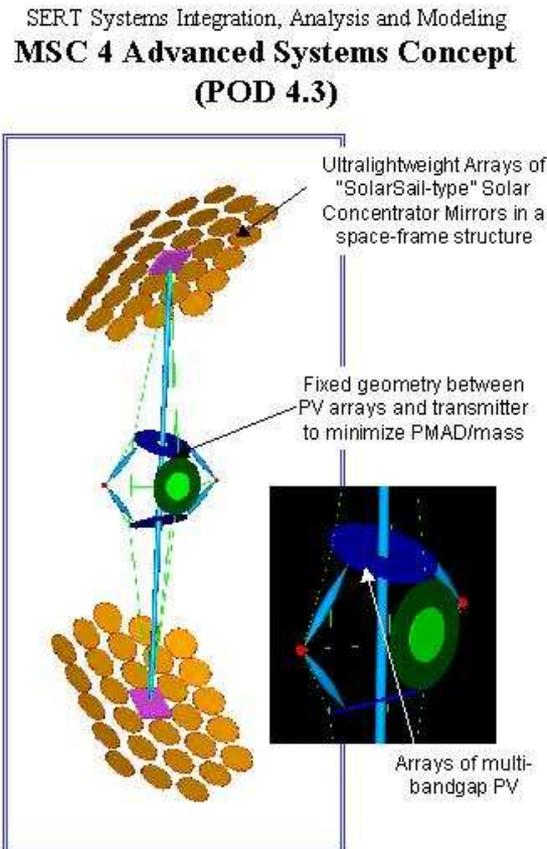
La note 1, sur la figure 3, indique que le système serait déployé et assemblé en orbite basse (Low Earth Orbit ou LEO). Des équipes robotiques pourraient assembler le système, ce qui prouverait la faisabilité d'une construction automatisée de futures grandes installations industrielles dans l'espace.

Les notes 5 et 7 décrivent l'envoi de charges utiles et d'approvisionnements et l'utilisation de faisceaux d'énergie vers la Lune et vers Mars. Les charges utiles pourraient inclure des robots pour la construction ou l'exploration. Les approvisionnements serviraient entre autres les futures missions d'exploration habitées.

La note 6 de la figure 3 montre une possibilité d'envoi d'un faisceau d'énergie vers la surface d'un astéroïde. Les résultats d'une telle expérience aideraient la conception et le développement de futures catapultes électromagnétiques pour le déplacement d'astéroïdes.

Dans l'avenir, les pays en voie de développement, les colonies de l'espace et les grandes installations industrielles vont demander des quantités énormes d'énergie. Pour faire face à cette demande, les concepts des modèles de niveau MSC 4 devraient fournir une puissance d'environ un gigawatt. Les concepts du MSC 4 seraient les centrales spatiales. Une constellation de CSS en orbite géostationnaire (Geosynchro-nous Earth Orbit ou GEO) fournirait en électricité les consommateurs sur Terre et dans l'espace.

La figure 4 montre un concept de Concentrateur Symétrique Inté-gré (ISC). Ce concept a déjà été décrit dans la figure 1.



*Figure 4 : le Concentrateur Symétrique Intégré*

Les technologies utilisées dans l'ISC comprennent des réseaux de tores gonflés et de miroirs sur film mince pour concentrer la lumière du Soleil sur des panneaux de cellules photovoltaïques (PV) multispectrales. Les capteurs solaires font constamment face au Soleil, et ne sont que très rarement ou jamais dans l'ombre. La disposition géométrique figée entre les panneaux PV et le projecteur rend minimales les masses nécessaires pour réaliser le sous-système CDE de conditionnement et de distribution de l'énergie. Cette configuration permet un rejet continu de la chaleur parce que la face arrière des panneaux PV est toujours orientée vers l'espace lointain. Considérant que les réflecteurs et les structures peuvent être beaucoup moins massives que de grands panneaux PV, cette configuration réduit la masse en rotation.

## Technologies communes

Tous les concepts, sur tout l'éventail des modèles MSC, comprennent des sous-systèmes pour la génération d'électricité solaire, le conditionnement de l'énergie, son transport vers un point d'utilisation et les collecteurs d'énergie. Tous les systèmes spatiaux devront aussi comporter une structure, des systèmes de contrôle thermique, des systèmes de propulsion et de contrôle. Pour envoyer ces systèmes dans l'espace, il faut des moyens de transport entre la Terre et l'Espace (Earth To Orbit ou ETO). Des analyses de sensibilité comparée entre plusieurs concepts pour les sous-systèmes communs ont permis au groupe de travail Intégration Système de définir des objectifs programmatiques et un cahier des charges pour le développement technologique des CSS. Ils comprennent :

- Conditionnement et distribution de l'énergie
  - Masse réduite pour les convertisseurs de courants continus DC-DC
  - Câblage et commutation haute tension
  - Systèmes anti-arc légers et compacts pour les lignes haute tension
- Générateurs Solaires (PV) -
  - Panneaux solaires à 1 kg/kW
  - Rendement de 40-50%
  - Systèmes anti-arc pour les PV haute tension (applications hors orbite basse)
  - Panneaux à faible coût, environ 1 à 5 \$ par watt
- Systèmes pour les générateurs solaires
  - Concentrateurs gonflables rigidifiables
  - Capteurs haute température et caloducs perfectionnés
  - Matériaux haute température pour des générateurs Brayton
  - Radiateurs gonflables à circulation de fluides haute température
- Transport d'Énergie Sans Fil (TESF)
  - Convertisseurs continu-hyperfréquences DC-RF efficaces à 85-90%
  - Peu de lobes de diffraction et de lobes latéraux
  - Durée de vie étendue
  - Fonctionnement à haute température
- Contrôle thermique
  - Caloducs à haute capacité thermique, supérieure à deux kilowatt
  - Radiateurs à faible masse, haute température
  - Radiateurs à géométrie efficace pour projecteurs hyperfréquences de puissance
- Contrôle et Fonctionnement
  - Options conceptuelles pour le contrôle d'attitude et d'orbite
  - Dimensionnement des propulseurs électriques et positionnement sur la structure
  - Ravitaillement en fluides propulsifs
  - Logistique des systèmes consommables pour les transports dans l'espace
- Propulsion
  - Propulsion solaire électrique modulaire, plomberie, convertisseurs, propulseurs
- Assemblage automatisé
  - Décomposition en modules, et options de conditionnement
  - Options et séquences d'assemblage
  - Robotique d'assemblage et de maintenance

Amarrage automatique des conditionnements

Installations logistiques en orbite pour la construction et l'entretien

- Terre - orbite (ETO)

Compatibilité masses et volumes des charges utiles avec les conditionnements

Nombre et temps de rotation des véhicules pour un lancement et plus par jour

Coûts de lancement inférieurs à 400 \$/kg en orbite basse (LEO)

- Transport dans l'espace

Transfert par Systèmes de Propulsion Electrique Solaire (SPES) de LEO à GEO

Concepts de remorqueurs ou réutilisation des SPES pour le contrôle des CSS

Fluides propulsifs à faible coût et haute disponibilité

Comme déjà indiqué, une constellation de CSS en orbite géostationnaire (GEO) pourrait alimenter en énergie des colonies de l'espace et des usines orbitales de grande importance. A l'exception peut-être des générateurs solaires et du TESF, les colonies de l'espace et les usines orbitales auraient vraisemblablement besoin des mêmes technologies que celles décrites ici.

### Technologies de base pour les différents concepts

Souvent, les concepteurs système doivent faire face à des problèmes d'échelle avec les technologies des composants et des sous-systèmes. Ces problèmes viennent d'un paradigme qui dit qu'un système grandeur nature devrait ressembler au prototype de démonstration technologique. Une planification stratégique peut limiter les risques associés aux problèmes d'échelle en passant par une diversité de concepts optimisés pour des missions spécifiques et en identifiant les supports mutuels entre les concepts.

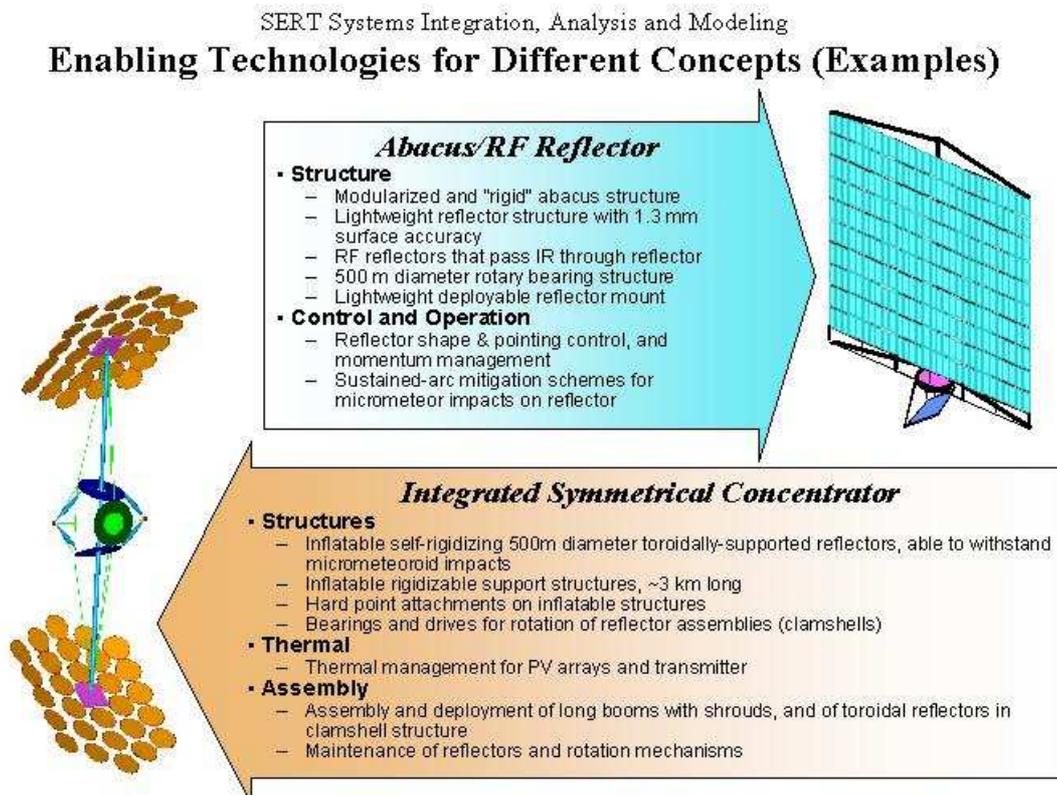


Figure 5 : Des technologies de base validables dans différentes configurations

Etant donné que les technologies peuvent venir supporter une variété de concepts, les démonstrations en orbite réalisables à court terme des modèles MSC 1 et 2 peuvent valider des technologies utilisées pour les modèles MSC 3, 4 et 5, même si les configurations ont des aspects complètement différents. La figure 5 montre par exemple comment les technologies du concept MSC 3 "Abaque" facilitent le développement du concept ISC du modèle MSC 4. Les technologies des structures, de l'assemblage automatisé, du contrôle et du fonctionnement développées pour le système "Abaque" vont permettre le développement du système ISC.

## Filières stratégiques

L'un des premiers résultats des études CSS est la constitution d'un portefeuille solide d'investissements en matière de recherche et de technologies. Les éléments de ce portefeuille de technologies comprennent :

- des descriptions des technologies
- des évaluations des niveaux de maturité technologique
- des évaluations du degré des difficultés pour passer au niveau suivant.
- des points d'entrée conceptuels pour les MSC
- des rapports techniques présentant les résultats des modèles analytiques
- des approches pour les actions de recherche technologique
- des filières technologiques pour les différents lots de travail
- des prototypes de matériel pour un certain nombre de lots de travail

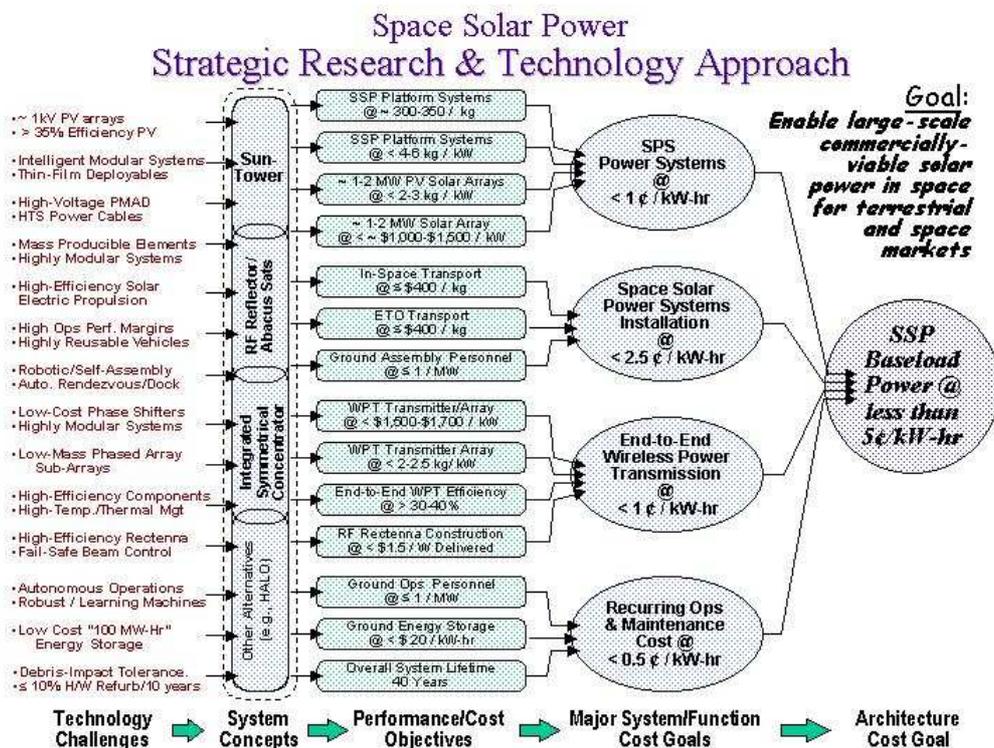
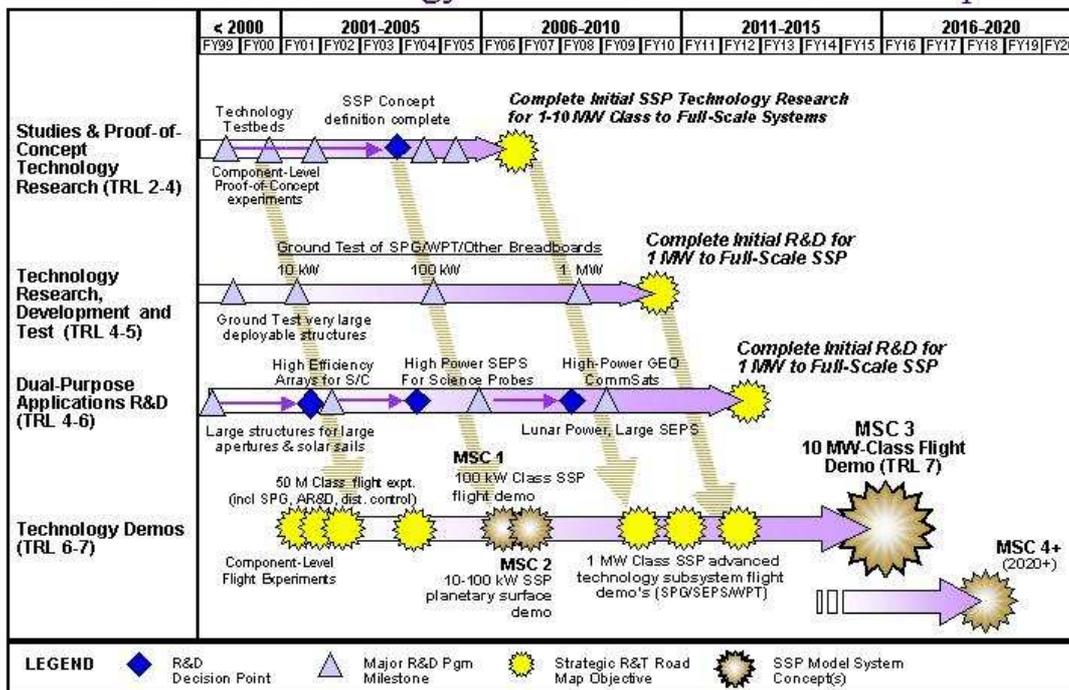


Figure 6 : approches Recherche et Technologie pour les CSS

La figure 6 montre une approche R&T pour une CSS (niveau A.0). Pour satisfaire les objectifs qui permettront d'arriver à des systèmes commercialement viables de CSS pour les marchés terrestres et spatiaux, l'équipe SERT a fixé l'objectif d'une structure de prix globale à cinq cents de dollar par kilowatt-heure. Ces objectifs de prix ont été distribués sur les différentes grandes fonctions du système telles que la génération d'énergie, la construction, le TESP point-à-point, les coûts de fonctionnement et d'entretien. Ces objectifs de coût ont continué à être répartis sur les sous-systèmes. La liste à gauche de la figure 6 indique les technologies, concurrentes et complémentaires, qui sous-tendent les différents concepts système.

### Space Solar Power Strategic R&T Investment Strategy Level A Technology Schedule/Milestone Roadmap



*Figure 7 : calendrier technologique et filières principales*

La figure 7 montre les calendriers pour les démonstrations technologiques aux niveaux composants, sous-systèmes et système, et les relations entre les démonstrations et les modèles MSC. Les développements technologiques à court terme feront avancer les technologies des composants jusqu'au niveau de maturité TRL 4. Ces technologies servent les essais sol des principaux sous-systèmes et des démonstrations complètes. En 2010, les études R&D seront achevées pour un système CSS grandeur nature de la classe du mégawatt. Les démonstrations en orbite feront avancer les technologies CSS jusqu'au niveau de maturité TRL 7, pour parvenir finalement au déploiement à grande échelle d'une constellation de CSS à partir de 2020.

Il faut remarquer qu'il y aura en cours de route plusieurs applications qui viseront un double objectif. Dans les exemples cités dans la figure 7, on trouve des satellites de communication de grande puissance, des centrales électriques pour la Lune, des voiles solaires et la propulsion électrique solaire. Ceux qui travaillent sur des concepts de colonies spatiales et d'usines orbitales trouveront les produits de l'étude SERT utiles pour le développement de leurs propres filières

stratégiques. Par exemple, un plan stratégique pour des usines orbitales pourrait définir comme point d'entrée POD 1.1 la fabrication commerciale de cristaux. Un deuxième exemple de filière et de point d'entrée POD 3.1 pourrait être un prototype d'usine lunaire robotisée. Egalement, une catapulte électromagnétique pourrait être dérivée du point d'entrée POD 3.1 à partir des données récoltées par la mission décrite dans la figure 3.

## **Technologies**

Cette section présente des activités de R&D pour les technologies CSS essentielles. Les objectifs de performance pour ces technologies ont été tirés des allocations d'objectifs dérivées des approches globales de la R&T système.

### **Générateurs solaires**

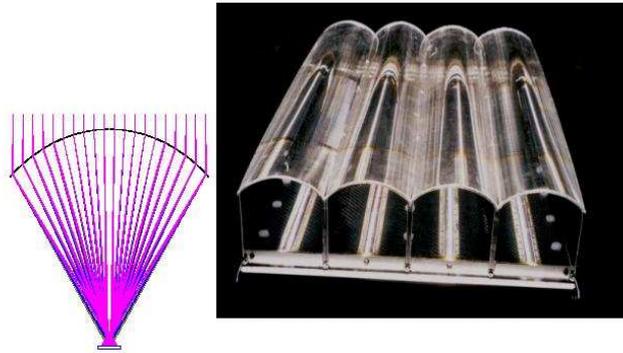
Les avancées remarquables dans le domaine des générateurs solaires vont permettre le développement de systèmes CSS à grande échelle. Les défis auxquels ceux qui travaillent dans le domaine des générateurs solaires comprennent :

- des systèmes hautement efficaces, à faibles coûts, susceptibles d'une production de masse, avec des hauts niveaux de puissance et des faibles masses spécifiques. Idéalement, des systèmes modulaires de générateurs solaires vont permettre le développement de systèmes CSS allant d'un mégawatt à un gigawatt.
- des panneaux PV de faible masse, fournissant des tensions élevées, tolérants aux décharges par arcs électriques dans l'environnement spatial.

Les études SERT dans le domaine des générateurs solaires ont inclus un affinement des concepts, l'examen des technologies pour les panneaux PV haute tension, une recherche de concepts qui conduisent vers des démonstrations de générateurs solaires avec une augmentation du rendement de conversion tout en diminuant la masse spécifique. Les technologies spécifiques comprennent :

- des panneaux solaires sur films minces
- des panneaux solaires multibandes avec concentrateurs, comme par exemple le concept "Arc-en-ciel" (Rainbow) et les concentrateurs ultralégers avec les lentilles de Fresnel.
- des principes de base pour la conception de panneaux solaires haute tension, de l'ordre du kilovolt
- l'effet des impacts "hypervéloces" sur les panneaux solaires haute tension

La figure 8 montre un produit test fabriqué par ENTECH, Inc. dans le cadre de l'étude SERT. Il s'agit d'un concentrateur à lentilles de Fresnel cylindriques (Stretched Lens Array ou SLA) qui a été démontré en lumière solaire en chambre d'essais avec un rendement de conversion de 30%, (soit environ 375 watts/m<sup>2</sup>) et une puissance massique supérieure à 375 watt/kilogramme.



*Figure 8 : panneaux concentrateurs à lentilles cylindriques*

Le schéma à gauche de la figure 8 montre la concentration du rayonnement, à travers la lentille de Fresnel, sur une bande de cellules solaires. Les supports de la lentille en film mince peuvent se replier à plat, et la totalité et l'ensemble du système se replie au milieu. Le cahier des charges pour des générateurs efficaces adresse à la fois le niveau composant et le niveau sous-système. Des spécialistes des structures, des cellules solaires et des films minces ont travaillé ensemble pour concevoir le concentrateur SLA. Ce prototype est un excellent exemple de l'importance du développement technologique avec un cahier des charges défini à partir du niveau système.

### **Transport d'Energie Sans Fil**

Diverses approches ont été étudiées en vue d'un Transport d'Energie Sans Fil (TESF) (en anglais, Wireless Power Transmission ou WPT) efficace et sans risques. Elles comprennent les réseaux de projecteurs phasés alimentés par des magnétrons ou des générateurs à semi-conducteurs, aussi bien que les transmissions en lumière visible avec des lasers semi-conducteurs et les optiques associées. Pour assurer la sécurité dans les faisceaux, les densités de puissance au centre du faisceau ont été limitées à 100-200 watt/m<sup>2</sup> pendant les études du programme SERT, aussi bien pour les micro-ondes que pour les transmissions en lumière visible (ce qui correspond à 10 ou 20% de la densité de puissance normale reçue en plein soleil en été à midi).

Plusieurs études R&D ont été lancées dans les domaines techniques essentiels pour le TESP :

- des concepts de réseaux phasés de projecteurs de faible masse
- des générateurs hyperfréquences GaN de classe E, à haut rendement et haute température
- des radiopiles hyperfréquences planes à polarisation circulaire

Le programme d'études SERT a réalisé une première importante en chambre d'essai avec l'utilisation d'un faisceau de micro-ondes pour la propulsion d'une " voile " innovante en tissu de filaments de carbone. Des applications potentielles de cette technologie peuvent concerner les sondes robotisées pour l'exploration de l'espace lointain, ou les remorqueurs pour la capture d'astéroïdes. La figure 9 montre l'expérience avec les micro-ondes et la voile réalisée par l'entreprise Microwave Sciences, Inc.



*Figure 9 : essais d'un tissu carbone-carbone sous vide et sous illumination micro-ondes*

### **Conditionnement et distribution de l'énergie (CDE ou PMAD)**

Le conditionnement et la distribution efficace de l'énergie sont des technologies essentielles pour toute installation spatiale à grande échelle – particulièrement avec des ambitions croissantes en matière de niveau de puissance et de masse spécifique. La haute tension conduit à considérer un certain nombre de défis :

- une réduction drastique de la masse spécifique des systèmes CDE
- une montée vers les hautes tensions et les hautes températures en environnement spatial pour les options hors supraconducteurs
- des concepts viables de câbles supraconducteurs de faible masse en environnement spatial

Plusieurs études du SERT concernent la définition et l'affinement des concepts CDE. Des technologies innovantes ont été considérées pour les composants, comme les supraconducteurs à haute température. Les technologies essentielles ont été testées en laboratoire. Ces études ont sélectionné un ensemble de caractéristique pour les systèmes CDE à grande échelle en environnement spatial. Ces activités de R&D comprennent par exemple :

- des convertisseurs modulaires de puissance continu-continu (DC-DC) à haut rendement et faible masse
- des commutateurs de puissance SiC à haute tension et haute température
- une analyse intégrée des systèmes CDE prototypes pour un module CSS de 25 kW (avec ou sans câbles supraconducteurs) en termes de haut rendement, faible masse et modularité

### **Concepts, matériaux et contrôles structuraux**

La construction d'installations spatiales à grande échelle comme une constellation de CSS, une colonie spatiale ou de grandes usines orbitales nécessitera toute une panoplie de structures, de matériaux et de moyens de contrôle. Parmi les défis à relever, on trouve :

- des concepts structuraux mixtes ultralégers de grandes dimensions
- des structures gonflables et des structures de films minces pour les réflecteurs,
- des structures de films minces déployées dynamiquement
- des systèmes modulaires intégrés par des moyens robotiques
- des très grandes structures auto-déployables assemblées par moyens robotiques

Les études SERT en matière de structures s'adressent aux concepts structuraux, à la modélisation structurelle, à la validation en laboratoire des technologies essentielles pour les composants, et aux démonstrations au sol. Dans le panorama des activités R&D, on trouve :

- la mécanique structurelle des matériaux rigidifiables pour optimiser la résistance et la rigidité
- des outils d'analyse pour prédire la performance des structures gonflables
- le développement probatoire de grands mâts et treillis gonflables pour les voiles solaires, les antennes et les panneaux solaires gonflables
- les essais probatoires de mâts gonflables d'environ 15 mètres de long pour caractériser la résistance au flambage, la rigidité, et les dynamiques structurelles en fonction des propriétés des matériaux et des rapports longueur/diamètre

### Matériaux et contrôle thermique

Les grandes installations spatiales nécessiteront de matériaux et un contrôle thermique capables de gérer des hauts niveaux de puissance et de densité d'énergie. Comme pour les autres éléments, une faible masse est un facteur important. Les défis auxquels les études thermiques doivent faire face comprennent :

- des systèmes de contrôle thermique pour hautes températures et très grandes charges totales
- des très grands systèmes déployables pour le contrôle thermique
- des systèmes à longue durée de vie, modulaires et pouvant être entretenus dans l'espace

Les activités R&D dans le domaine de la thermique ont inclus l'analyse thermique et la modélisation de radiateurs déployables de faible masse fonctionnant à haute température. La figure 10 montre un concept de radiateur déployable développé par Lockheed Martin.



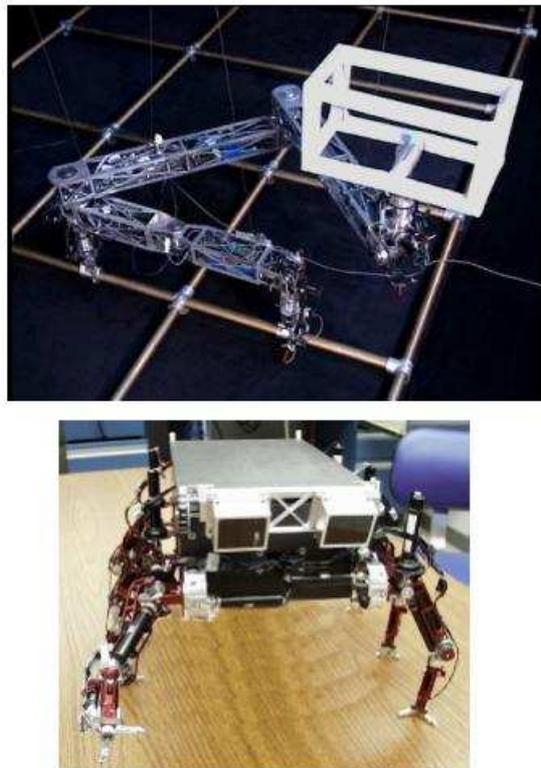
*Figure 10 : concept de radiateur déployable par gonflage*

## Robots pour l'assemblage, l'entretien et le service

L'assemblage automatisé de systèmes CSS à grande échelle éliminera les risques pour les humains et finalement réduira les coûts des opérations. Les robots d'assemblage, d'entretien et de service pourraient servir à la construction de colonies de l'espace et de grandes installations industrielles dans l'espace. Plusieurs programmes en cours à la NASA et dans d'autres agences ont fait des progrès au niveau des composants. Des études SERT dans le domaine de la robotique comportaient l'évaluation des demandes pour le besoin des autres éléments des CSS et des applications, le développement conceptuel de nouveaux systèmes, et la validation des technologies essentielles au niveau laboratoire. Les efforts essentiels de R&D comprennent :

- le système " Sky Worker " pour l'assemblage robotique et le transport local de matériaux sur site
- un petit robot " LEMURE " pour des inspections, des réparations, etc...
- un robot " Snake " pour inspections en espace confiné et récupération d'objets

La figure 11 montre le robot "Sky Worker" développé par l'Université Carnegie Mellon et le robot "LEMURE" développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL).



*Figure 11 : robots " Sky Worker " (en haut) et " LEMURE " (en bas)*

## **Conclusions :**

Un développement à grande échelle en direction des CSS peut ouvrir les portes d'un futur spatial riche en énergie, au profit des sciences, de l'exploration habitée, de l'industrialisation, de la colonisation de l'espace, et éventuellement des missions en dehors de notre système solaire. Les études SERT engendrent des produits comme un portefeuille d'investissements technologiques, des prototypes, des démonstrations, des concepts, des analyses, et des filières qui offrent toute une stratégie pour le développement des technologies et des systèmes CSS.

## **Sélection bibliographique**

Feingold, H., et al, "A Fresh Look at Space Solar Power," SAIC; 1997.

Mankins, J.C. and Howell, J.; "Preliminary Results from NASA's Space Solar Power Exploratory Research and Technology Program" IAF-00-R.1, 2-6 October 2000.

Mankins, J.C. and Howell, J.; "Overview of the Space Solar Power Exploratory Research and Technology Program -- AIAA 2000-3060 (35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference; Las Vegas, Nevada). 24-28 July 2000.

Mankins, J.C.; "Space Solar Power : A Prospective Future Energy Source ? " Space Studies Institute 12th Annual Conference on Space Manufacturing, May 1999.

National Research Council; "Laying the Foundation for Space Solar Power," 2001.

=====

# **IMPACT DES CENTRALES SOLAIRES SPATIALES SUR L'EFFET DE SERRE ET PRÉSENTATION DES RECHERCHES CSS AU JAPON**

**par Nobuyuki KAYA**

Université de Kobé (Japon)

=====

## **Remerciements**

L'auteur remercie l'auditoire et le lecteur de lui donner une excellente opportunité de présenter les recherches dans le domaine des Centrales Solaires Spatiales. Le thème général de la présentation est l'impact des CSS sur l'effet de serre, et la présentation se divise en deux parties : l'une est la présentation de l'impact des CSS sur l'environnement, l'autre décrit l'état des recherches CSS au Japon.

## **1 - Le concept des Centrales Solaires Spatiales est simple**

Des panneaux photovoltaïques, des projecteurs de micro-ondes et des grands réflecteurs sont lancés sur l'orbite géostationnaire. L'électricité générée par les panneaux photovoltaïques de la CSS est convertie en micro-ondes, qui sont envoyées vers une antenne de collecte où elles sont reconverties pour les utilisateurs au sol. Une CSS pourra fournir plus d'un gigawatt à la Terre, l'équivalent d'une tranche de centrale nucléaire.

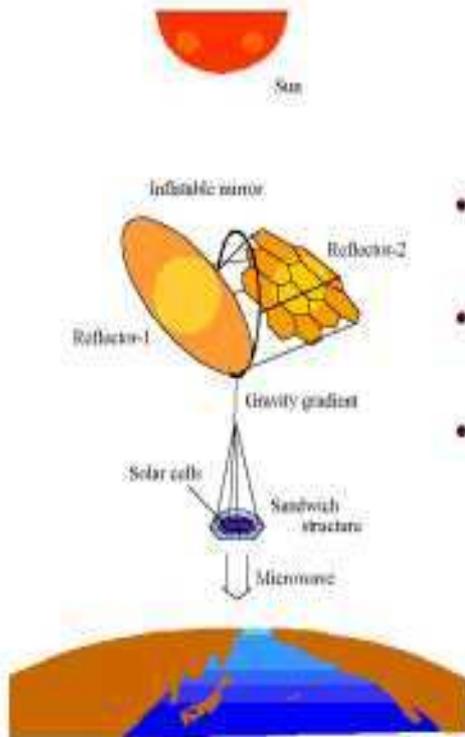
Il y a trois facteurs à considérer pour l'environnement :

\* Le premier est l'émission de CO<sup>2</sup> pendant la construction de la CSS, qui est un facteur important d'évaluation, car actuellement, il convient de réduire l'effet de serre pour protéger l'environnement terrestre.

\* le second est l'effet sur les corps humains des faisceaux puissants de micro-ondes qui sont rayonnés par la CSS. Tout le monde peut faire le lien entre le faisceau d'énergie micro-ondes et le four micro-ondes de cuisine. Chaque fois que je fais une présentation sur les CSS, tout le monde me demande si les oiseaux qui voleront dans le faisceau finiront en " Yakitori " (brochettes de poulets grillés) comme les poulets cuits dans les fours micro-ondes de cuisine. Il est bon de se souvenir que la densité d'énergie des faisceaux de micro-ondes du TESF (Transport d'Energie Sans Fil par micro-ondes) est beaucoup plus faible que celle qui règne dans les fours micro-ondes, et qu'elle est bien incapable de cuire les oiseaux qui les traversent.

\* Le troisième point est l'interférence du faisceau d'énergie micro-onde avec le plasma ionosphérique et les télécommunications.

# Solar Power Satellite



## Environmental Issues

- CO<sub>2</sub> Emission from SPS
- Biological effects by Microwave
- Interference to Telecommunications

### 1.1 - Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> dues à une Centrale Solaire Spatiale

L'émission de CO<sub>2</sub> due aux CSS a été estimée par le Professeur Yoshioka de l'Université de Keio par la procédure suivante:

\* premièrement, l'établissement d'une liste des matériaux nécessaires à la construction d'une CSS. Par exemple il y a la liste de tous les matériaux nécessaires à la production des lanceurs. Il faut aussi produire 470 tonnes d'aluminium pour les structures, etc...

\* ensuite, le calcul des émissions dues à l'ensemble de tous ces matériaux, en utilisant les tables établies au Japon en 1990 pour les entrées-sorties environnementales.

## Calculation of CO<sub>2</sub> Emission from SPS

### 1) Estimation of quantity of materials for SPS

#### Example: New Transportations

Aluminum :	470 tons
Titanium :	248 tons
Stainless steel :	232 tons
Ceramics :	103 tons
Copper :	17 tons
Miscellaneous material :	100 tons

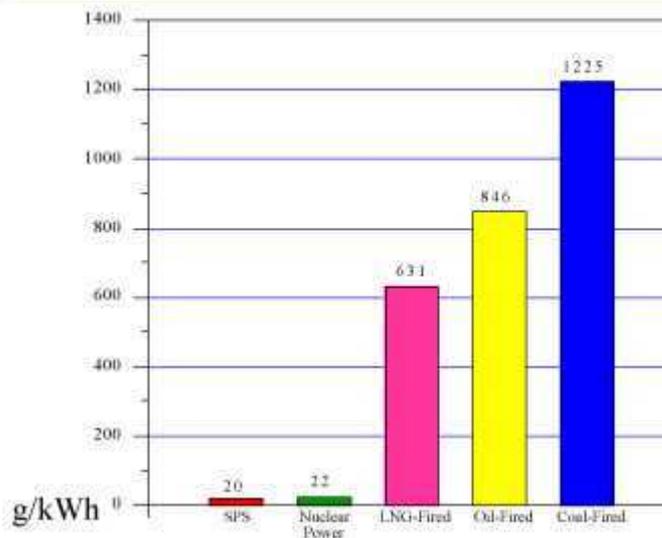
### 2) Calculation of CO<sub>2</sub> emission

#### with 1990 Japan's Input-Output Table

La table suivante donne les résultats comparés de ces calculs :

- une centrale à charbon => 1225 g de CO<sup>2</sup> par kWh
- une centrale au fuel => 846 g de CO<sup>2</sup> par kWh
- une centrale au gaz naturel => 631 g de CO<sup>2</sup> par kWh
- une centrale nucléaire => 22 g de CO<sup>2</sup> par kWh
- une Centrale Solaire Spatiale => 20 g de CO<sup>2</sup> par kWh

## CO<sub>2</sub> Emission from Solar Power Satellite



Les émissions de CO<sup>2</sup> dues à une CSS sont aussi faibles que celles d'une tranche de centrale nucléaire.

\* nous avons détaillé les émissions de CO<sup>2</sup> pour chaque composant du système CSS. Les émissions dues au transport spatial sont de l'ordre de 100 millions de tonnes. Mais on trouve que les émissions dues à la fabrication des cellules solaires et des radiopiles sont très importantes, de l'ordre de 1 300 millions de tonnes.

Le calcul indique que l'essentiel du CO<sup>2</sup> est produit par le processus de fabrication des semiconducteurs, qui réclame une grande quantité d'électricité initialement produite par des centrales nucléaires. Si l'on passe ensuite pour les fabrications à une fourniture d'électricité par les CSS précédemment construites, l'émission de CO<sup>2</sup> peut être réduite à seulement 300 millions de tonnes, ce qui correspond à peu près à 4 g par kWh. La première CSS aura donc émis 20 g/kWh, mais la seconde et les suivantes ne causeront qu'une émission de 4 g/kWh.

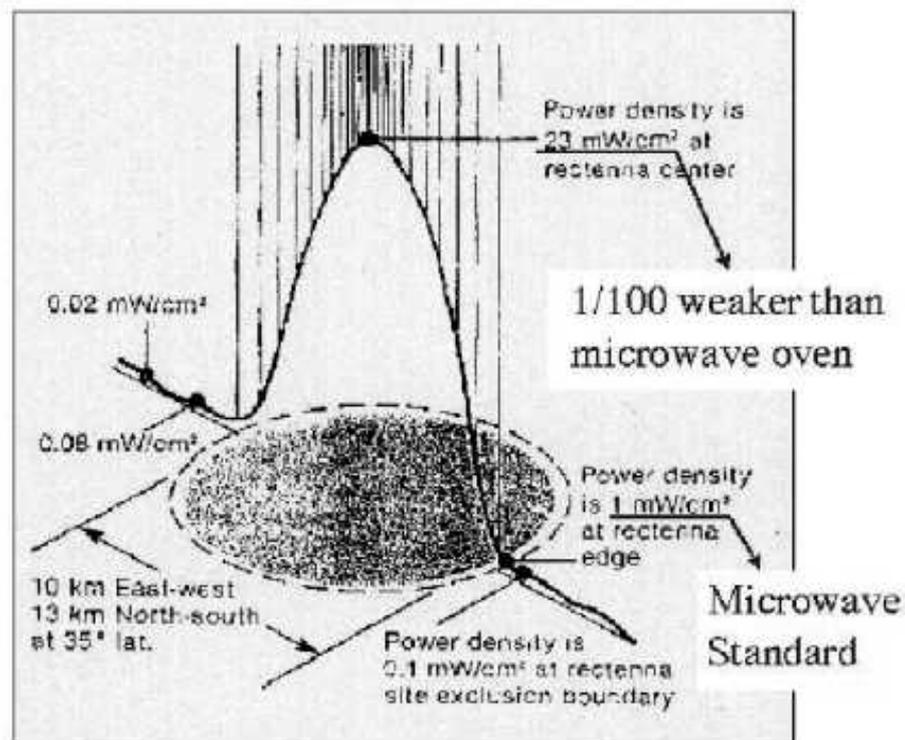
<b>CO<sub>2</sub> Emission from Solar Power Satellite</b>	
• <b>Space Transportation</b>	<b>96.2 Mt</b>
• <b>Fuel</b>	<b>143.9 Mt</b>
• <b>Microwave Transmitter</b>	<b>14.2 Mt</b>
• <b>Solar Cell</b>	<b>867.5 Mt</b>
• <b>Rectenna</b>	<b>468.5 Mt</b>
<b>Total</b>	<b>1590.3 Mt</b>
<b>CO<sub>2</sub> /kWh/Year for 30 years</b>	<b>20.2 g</b>
<b>CO<sub>2</sub> /Year in Japan</b>	<b>1200.0 Mt</b>

Les émissions totales d'une CSS sont estimées de l'ordre de 1 600 millions de tonnes, (ce qui est l'équivalent du total des émissions de CO<sup>2</sup> du Japon par an) et la durée de vie opérationnelle d'une CSS est estimée à 30 ans, ce qui conduit, ramené à l'année, à des émissions de 53 millions de tonnes par an, et donc à des émissions de 20 g de CO<sup>2</sup> par kWh dues aux CSS.

## 1.2 - Tout le monde a peur de l'énergie des micro-ondes

Tout le monde croit que les corps des humains et des animaux seront brûlés dans les faisceaux micro-ondes comme les poulets dans un four micro-ondes de cuisine.

Au centre d'un site de collecte de l'énergie d'un faisceau micro-ondes, où elle est la plus élevée, la densité de puissance est encore cent fois plus faible que dans un four micro-ondes et au bord du site de collecte, elle se situe au-dessous des normes de sécurité fixées à 1 mW/cm<sup>2</sup>.



Il est facile de comprendre que si l'on peut obtenir des puissances totales de l'ordre du gigawatt avec des densités de puissances aussi faibles, c'est parce que les dimensions des sites de collecte sont très grandes, avec un diamètre de l'ordre de la dizaine de kilomètres, pour récupérer la plus grande partie de l'énergie projetée depuis la CSS.

Il est cependant important d'étudier les effets des micro-ondes sur le corps humain :

L'Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organisation ou WHO) a organisé un projet international ("EMF" pour Electro-Magnetic Fields) pour étudier les effets des ondes radio et des champs électromagnétiques, particulièrement en ce qui concerne les téléphones portables. Le Sunsat Energy Council a rencontré à Paris le directeur du projet EMF, le Dr. Repacholi, et les échanges ont été excellents.

Le Dr. Repacholi nous a déclaré que les micro-ondes n'avaient que des effets thermiques sur le corps humain et que tant que la densité de puissance reste inférieure à la norme de 1 mW/cm<sup>2</sup> il n'y a pas de risques.



# International EMF Project

The International EMF Project was established by WHO in 1996.

For the Project, EMFs are defined as electro-magnetic fields with frequencies from 0 to 300 GHz.



Meeting with Dr. Repacholi

Cependant, nous avons besoin de caractériser les effets des micro-ondes, et nous avons au Japon une installation pour tester les effets d'un rayonnement micro-ondes sur les plantes. Nous n'avons à ce jour trouvé aucune influence anormale des micro-ondes sur la croissance des plantes.

## Microwave Effects to Plants

National Institute of Advanced Industrial Science & Technology

Without microwave radiation

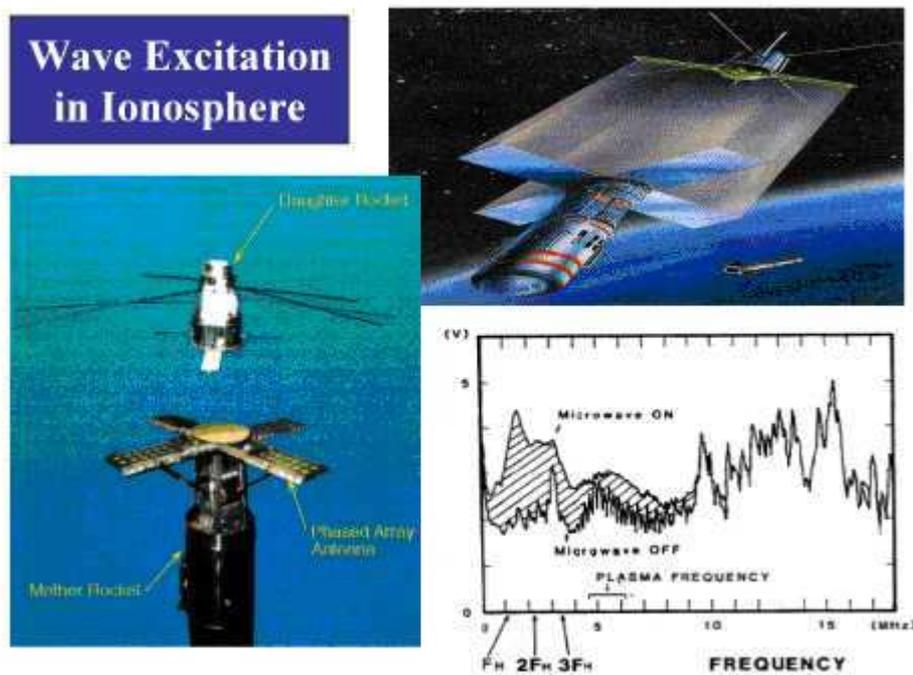
With microwave radiation

### 1.3 - Les effets sur le plasma ionosphérique.

On s'attend à voir le rayonnement de toutes sortes d'ondes radio à la suite d'interactions nonlinéaires avec le plasma ionosphérique. Si des ondes radio puissantes sont excitées en bande large elles peuvent interférer avec les télécommunications au sol.

Cette interaction non-linéaire entre les micro-ondes de puissance et le plasma ionosphérique a été étudiée au moyen de fusées sondes. L'illustration montre les instruments utilisés pour projeter le faisceau micro-ondes et les détecteurs de fréquences radio.

Les micro-ondes ont été projetées depuis la section "mère" de la fusée sonde vers la section "fille" où de nombreux détecteurs étaient disposés. L'illustration montre aussi les mesures typiques des excitations radio, avec une ligne de repère qui indique le niveau des ondes de plasma naturelles.



Pendant le rayonnement micro-ondes, le spectre s'est élargi, et une certaine excitation a été observée à une fréquence d'une fois et demie la gyrofréquence, ce qui est un phénomène intéressant dans la physique des plasmas. Toutefois il a été observé que ces ondes étaient stationnaires et qu'elles ne pouvaient pas se propager jusqu'au sol d'une part, et d'autre part que le niveau d'excitation n'était pas suffisant pour causer des interférences avec les télécommunications.

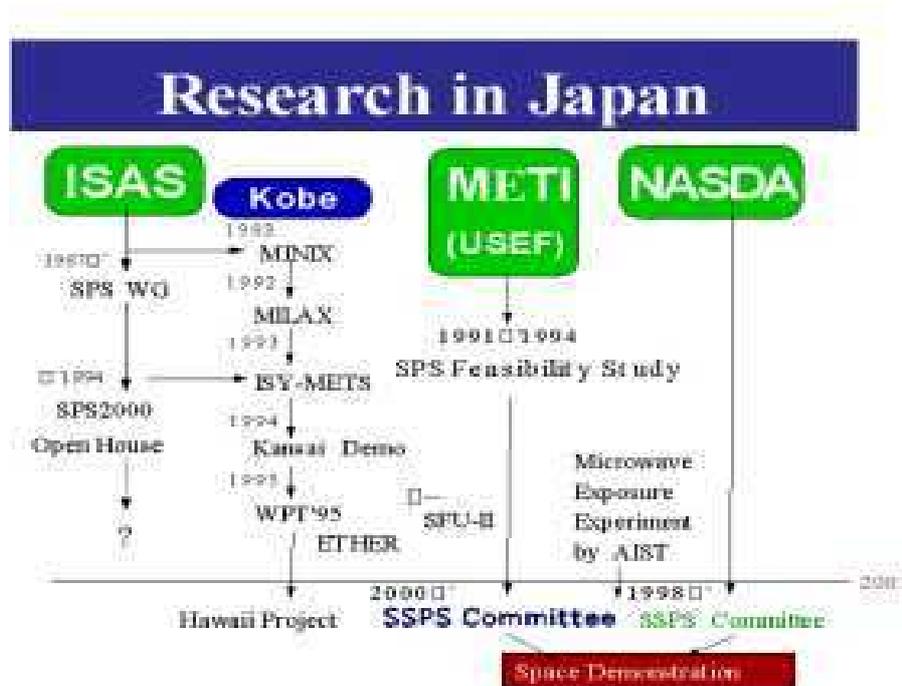
## 2 – Les activités de recherche au Japon

Nous avons trois agences spatiales au Japon, la NASDA, l'ISAS, qui dépendent du Ministère de l'Education et l'USEF (Unmanned Space Experiment Free Flyer), qui dépend du Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie (Ministry of Economy, Trade and Industry ou METI).

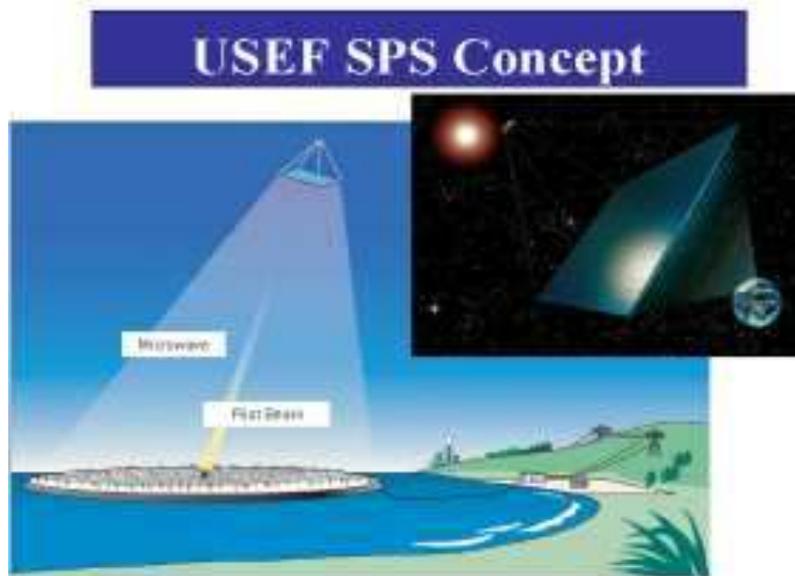
Il y a en ce moment deux études indépendantes sur les Centrales Solaires Spatiales, qui sont menées par l'USEF et la NASDA.

En ce qui concerne les projets de recherche, nous avons de nombreux concepts, des expérimentations avec des fusées que j'ai déjà mentionnées et des démonstrations de transport d'énergie par faisceaux micro-ondes, des évaluations des émissions CO<sup>2</sup> et des tests sur les effets biologiques des faisceaux micro-ondes.

Pour les concepts CSS, nous avons plusieurs projets, comme le projet de maquettage SPS-2000 conçu par l'ISAS, les concepts USEF et NASDA, et notre concept "sandwich" de l'Université de Kobé. Les études pour le développement des technologies sont très actives, de même que les études d'impact environnementales et économiques.

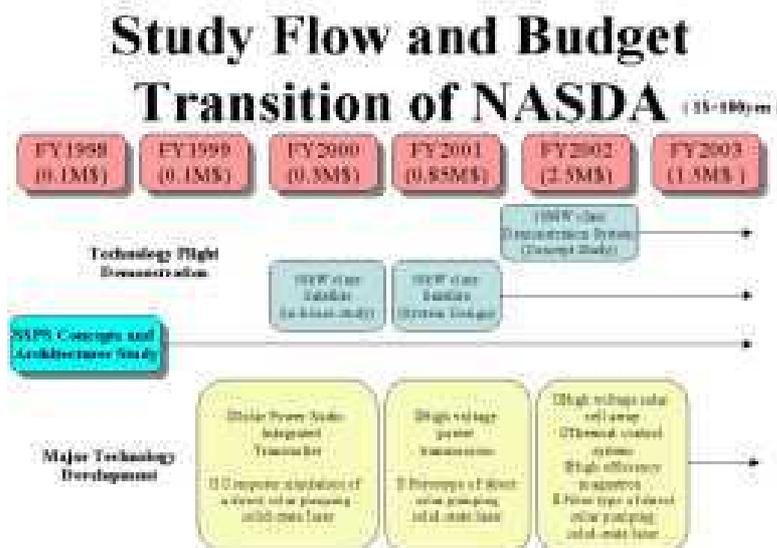


Sous le contrôle du METI, l'USEF a organisé un comité pour l'étude de faisabilité des CSS au cours des deux dernières années fiscales.



L'illustration montre le concept USEF avec une CSS fait de panneaux sandwich, avec des cellules solaires et des projecteurs micro-ondes. L'attitude du satellite est contrôlée par un système de câbles. Un signal pilote est envoyé au satellite depuis le sol. La phase du signal pilote sert à contrôler le phasage des projecteurs micro-ondes pour diriger le faisceau d'énergie vers l'antenne de collecte. La puissance projetée serait de l'ordre du gigawatt.

La NASDA développe aussi un concept et des technologies CSS depuis 1998. Les budgets ne sont pas importants, mais suffisants pour des études techniques de base pour un système dans la classe des 50 mégawatt avec une technologie de transport d'énergie par faisceau laser.



## A conceptual drawing of a hydrogen-generating systems by laser



- > Solar collector mirrors or lenses would be put into orbit to focus the sun's rays.
- > The concentrated solar energy would then be sent to laser generator that sends a laser beam directly to an Earth-based photo-catalyst device.
- > When light hits the photo-catalyst device, titanium dioxide separates the water into oxygen and hydrogen.
- > Furthermore, methanol-producing equipment, which uses hydrogen and carbon dioxide in the air, can be linked to the photo-catalyst device.

? Patent pending

L'illustration montre le concept CSS développé par la NASDA : l'énergie solaire est concentrée par des grands miroirs et directement convertie en faisceau laser. L'avantage d'un transport d'énergie par faisceau laser est une taille réduite des équipements par rapport aux micro-ondes.

Une CSS pourrait être utilisée pour la fabrication d'hydrogène dans un schéma complémentaire des deux formes d'énergie.

## Technology Development Schedule of milestones Roadmap



Le diagramme ci-dessus décrit une filière avec quatre phases de développement pour arriver à des CSS opérationnels à partir de 2020.

Les CSS sont d'excellents candidats d'avenir pour donner au Japon des sources d'énergie propres. Nous n'avons ni pétrole ni charbon, pas d'hydrocarbures, et des problèmes critiques en ce qui concerne les centrales nucléaires sujettes à des accidents, et pourtant il nous faut alimenter en énergie une population importante. Nous n'avons pas d'espaces terrestres disponibles pour les zones de collecte de l'énergie et nous en avons cherché en site marin, mais le coût des systèmes de collecte devient alors très élevé.

Nos objectifs sont de développer les CSS non seulement pour une utilisation domestique au Japon, mais aussi pour l'exportation et des utilisations internationales, en particulier en Chine où l'économie connaît une croissance rapide avec une demande d'énergie correspondante. La Chine construit de nombreuses centrales à charbon et des centrales nucléaires, et il faut se souvenir que le vent et les nuages vont de la Chine vers le Japon. L'illustration montre que de temps en temps nous avons des grandes tempêtes de sable jaune porté par des nuages venant de Chine, comme on peut le voir avec une voiture recouverte de ce sable.

## Air Pollution from China

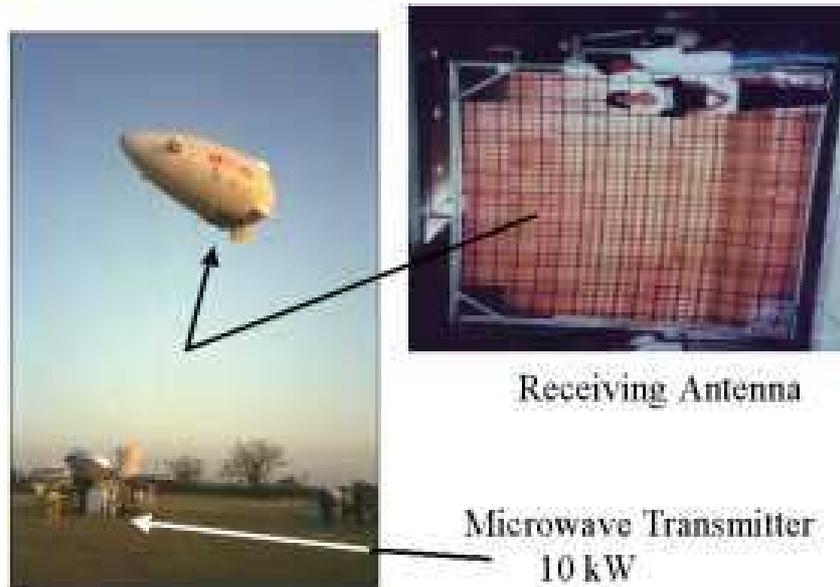


La pollution de l'air nous vient de Chine et nous devons aider à l'évolution des centrales chinoises vers une énergie propre. Le désert de Gobi pourrait faire une excellente zone de collecte pour l'alimentation énergétique de la Chine par des CSS.

Le Transport d'Energie Sans Fil par micro-ondes est l'une des technologies essentielles pour la réalisation de centrales solaires spatiales. Nous avons réalisé de nombreuses expériences et démonstrations pour développer cette technologie.

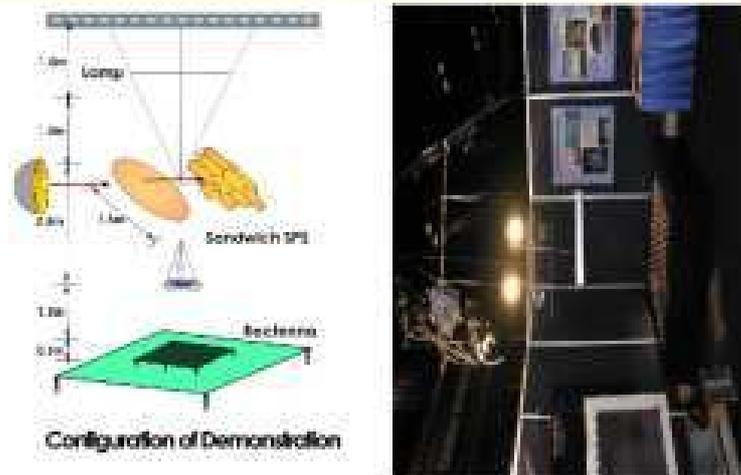
La première démonstration a été faite avec l'alimentation d'un avion modèle réduit au moyen d'un faisceau micro-ondes d'une puissance de 1 kW projeté depuis le toit d'une voiture qui suivait l'avion sous sa trajectoire. La direction du faisceau était pilotée en utilisant la technologie des réseaux phasés. L'avion a pu voler 20 secondes sur alimentation micro-onde

## Airship Demonstration



La démonstration suivante a consisté à envoyer un faisceau de micro-ondes de 10 kW depuis le sol vers un petit ballon dirigeable muni de deux blocs propulsifs qui lui permettaient de monter et de descendre ou de changer de direction. L'antenne de projection avait un diamètre de 3 mètres. Les illustrations montrent les antennes de collecte et le ballon en vol, alimenté par les micro-ondes.

## SPS Model for World Space Congress



Nous sommes actuellement en train de développer le TESF à l'Université de Kobé en même temps qu'un concept de centrale solaire spatiale avec des panneaux en sandwich comprenant d'un côté les cellules solaires et de l'autre les projecteurs micro-ondes, ce qui dispense d'un système massif de longs câbles de connexion.

## Sandwich Structure



L'illustration ci-dessus montre le panneau en sandwich avec les cellules solaires au-dessus et les projecteurs micro-ondes de l'autre côté.

Nous avons en projet une démonstration TESF à très longue distance dans l'île de Hawaii, où l'on trouve de grandes montagnes à Maui et dans les autres grandes îles. Nos plans sont de transporter de l'énergie par micro-ondes du Mont Haleakala vers Mauna Lea sur une distance de 120 kilomètres, ce qui est le quart de la distance entre une orbite basse et le sol. Nous pensons que cette expérience sera très utile pour les futures expériences de TESF depuis l'espace.



### 3 - En résumé

Nous pensons que les Centrales Solaires Spatiales sont l'une des sources les plus prometteuses d'énergie pour l'avenir, et c'est une recommandation qui a été adoptée à la conférence UNISPACE-III organisée en 1999 par les Nations Unies.

Les Centrales Solaires Spatiales peuvent fournir une électricité propre n'importe quand et n'importe où dans le monde, et nous pensons que des coopérations internationales sont essentielles et indispensables pour réaliser ces CSS. Nous encourageons les organisations concernées, dans le monde entier :

- a) à poursuivre les études techniques et économiques de faisabilité des CSS;
- b) à stimuler les coopérations internationales et les échanges concernant les CSS;
- c) à considérer sérieusement les centrales solaires spatiales pour nombre de sujets, par exemple en matière de santé, d'environnement, de gestion du spectre électromagnétique et d'allocation de fréquences, etc...

=====

# LES ETAPES VERS LES CENTRALES SOLAIRES SPATIALES

par **Alain CELESTE**

Maître de Conférences  
Laboratoire LGI-ACTES  
Université de La Réunion

=====

## Problématiques

Le déploiement d'un grand nombre de centrales solaires orbitales, en orbite géostationnaire ou géosynchrone, pour la fourniture à grande échelle d'énergie pour notre planète ou pour les activités industrielles spatiales, nécessite que soit élaborée une stratégie de recherche et de développement s'appuyant sur des étapes de démonstration et de mise en service de systèmes opérationnels intermédiaires.

L'énergie solaire spatiale est la première et certainement la plus importante des ressources extraterrestres qu'il est possible d'exploiter dans un avenir relativement proche. L'expérience acquise par l'Homme lors de la période de 40 années de programmes spatiaux qu'a connue notre espèce et qui autorise dorénavant la conquête de nouveaux espaces doit être mise à profit pour soutenir la mise en place de ces moyens d'exploitation.

Beaucoup d'innovations technologiques sont nécessaires à la réalisation, soit des centrales solaires spatiales elles-mêmes, soit des moyens de transport, de fabrication et d'exploitation qui concourent à leur réalisation. Nous citons à titre d'exemple et de façon non exhaustive les grands domaines technologiques concernés et représentant aujourd'hui les challenges auxquels les chercheurs et ingénieurs devront se confronter dans le cadre de ce déploiement :

- Transport spatial
- Transport d'Energie Sans Fil (TESF)
- Fabrication et déploiement de grandes structures (éléments structurels et fonctionnels)
- Collecte et conversion de l'énergie solaire à haut rendement
- Techniques de fabrication (matériaux, robotique)
- Gestion énergétique et thermique
- ...

Ces technologies nécessitent pour leur mise au point une recherche et des développements plus ou moins importants, mais toujours avec des tests en situation.

D'autre part, plusieurs options sont également possibles pour le déploiement des centrales solaires orbitales, certaines plus consommatrices d'énergie que d'autres (essentiellement en termes de transport de matériaux). Pour celles retenues, il est nécessaire de mesurer leur capacité à être mises en situation opérationnelle le plus rapidement possible.

Cette présentation s'attache à proposer une vision qui doit davantage être prise comme un exemple de stratégie, et dont le rôle est d'illustrer ou de faire la preuve que l'exploitation des ressources énergétiques spatiales est à notre portée, tout en permettant d'estimer le chemin et les efforts à accomplir pour y parvenir.

La période de référence s'étend de nos jours jusqu'à la mise en service opérationnelle de la première centrale solaire orbitale en orbite terrestre géostationnaire. La date de cette mise en service est estimée à 2040 ou 2050.

## **Expérimentations et démonstrations**

Cette présentation ne passe pas en revue l'ensemble des technologies qu'il est nécessaire de développer et tester, mais abordera le problème davantage sous l'angle des programmes de démonstrations technologiques dont on peut anticiper la nécessité de mise en place pour le test, la validation d'un concept, d'une ou plusieurs technologies. La stratégie décrite dans ce document, s'appuie sur la réalisation d'une suite étagée de démonstrations technologiques qui mènera à terme, à la fabrication d'une première centrale solaire orbitale en orbite géostationnaire.

Même si l'hypothèse retenue pour le déploiement à grande échelle de centrales solaires orbitales s'appuie sur des éléments et composants à faible coût (par effet d'échelle), les démonstrations intermédiaires ne peuvent pas bénéficier des mêmes processus, et il ne pourra pas être recherché, dans un premier temps, de critère de rentabilité dans le cadre de ces démonstrations. Seuls seront à retenir le caractère scientifique et la potentialité de tester et d'éprouver ou, tout simplement, de faire avancer un certain nombre de technologies importantes. Il sera nécessaire de veiller à ce que ces démonstrations soient raisonnablement dimensionnées du point de vue économique. Dans un deuxième temps, notamment lorsque se rapprochera la phase de développement opérationnel (établissement d'une industrie sur la Lune, par ex.), ce déploiement fera appel aux processus d'investissement identiques aux processus ayant cours sur Terre (investissement privé ou mixte, exploitation commerciale...).

La figure en annexe A résume le séquençage proposé des démonstrations dans le cadre de la période de référence.

## **Démonstrations terrestres**

Avant leur utilisation dans le cadre d'un système spatial, beaucoup de technologies peuvent être testées et améliorées dans le cadre de démonstrations terrestres. Il est également envisagé, et même souhaitable, que puissent émerger pour des marchés terrestres des utilisations des technologies développées dans le cadre de ces démonstrations, ce qui pourra avoir des effets bénéfiques sur les coûts et sur l'incitation à investir.

A titre d'exemple, le Transport d'Energie Sans Fil à l'aide d'un faisceau hyperfréquence, qui est l'une des technologies clés des centrales solaires orbitales, a déjà pu être démontré à maintes reprises aux USA, Canada, Russie, Japon, et France ( Réunion ). Ces démonstrations doivent continuer et permettre l'amélioration des rendements, des techniques de fabrication et la prise en compte et l'adaptation progressive et consciente des systèmes aux contraintes spatiales, dans un esprit de considération pour l'environnement.

Pour le TESH, on peut identifier quelques domaines directeurs pour lesquels des développements s'avèrent nécessaires :

- Intégration environnementale et technique de fabrication des surfaces de radiopiles.
- Sécurité de fonctionnement, vis à vis des êtres biologiques et systèmes électroniques
- Techniques sécurisées de pilotage électronique des faisceaux
- Coût et technique de fabrication des réseaux d'antenne de projection
- Amélioration des rendements de projection et de collecte.
- Gestion thermique des convertisseurs DC-RF (Energie électrique continue vers micro-ondes)
- Interface des convertisseurs DC-RF avec source primaire d'énergie (cellules photovoltaïques)

Si beaucoup de ces domaines peuvent être étudiés dans le cadre d'expériences en laboratoire, beaucoup nécessitent par contre la mise en situation sous forme de démonstrations à l'échelle, pour en permettre une meilleure analyse. Par exemple, l'intégration environnementale des grandes surfaces de radiopiles ne peut pas s'analyser en laboratoire.

En 1996, l'Université de La Réunion a réalisé une étude de cas visant à analyser tous les aspects relatifs à l'utilisation d'une liaison point à point terrestre de TESH, pour alimenter en électricité un village isolé de montagne appelé Grand-Bassin. En 2001, nous avons, en collaboration avec des entreprises de l'île de La Réunion, réalisé le premier démonstrateur opérationnel de TESH en Europe, permettant de fournir en sortie des radiopiles placés à une distance de 40 mètres des projecteurs, une puissance de 65 watts, avec une efficacité de 6%.

Actuellement, l'Université de La Réunion envisage d'accompagner le développement de ce projet jusqu'à son aboutissement avec l'installation sur site d'un système opéré économiquement pour l'horizon 2006-2007. L'existence d'un marché international, d'une niche dans le secteur de la fourniture d'énergie en périphérie de réseau électrique conventionnel, est actuellement analysée. Cette démarche pratique, progressive et appliquée, s'inscrit pleinement dans l'attitude préconisée dans cette présentation.

Il est aisé de comprendre également, à partir de cet exemple, le rôle important que ces démonstrations jouent dans le développement technologique. Ces démonstrations représentent également un intérêt pour la réflexion sociologique et législative. Toujours concernant l'exemple des systèmes de TESH, le développement d'applications terrestres de cette technologie nécessite que soient abordées les questions relatives à l'utilisation du spectre radiofréquence, parmi tant d'autres.

Ces démonstrations, enfin, ont également une valeur éducative et de communication, permettant de susciter des vocations et d'impliquer la réflexion du public.

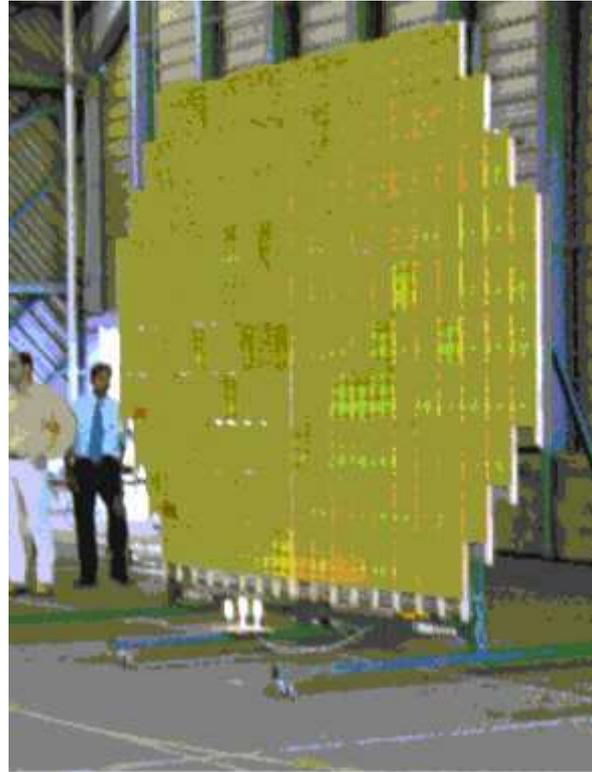
Proposons donc un séquençement possible des démonstrations :

\* Démonstration de pilotage électronique sécurisé (point à point terrestre sur une cible mouvante)

Comme nous l'avons déjà exprimé plus haut dans ce document, le TESH est une technologie clé des CSO. Quel que soit le concept retenu pour le déploiement des CSO à l'échelle globale, il est nécessaire de s'assurer que l'onde émise par le satellite, et véhiculant l'énergie vers la surface terrestre, sera pointée avec précision en direction de la surface de réception prévue au sol, dans des conditions maximales de sécurité. Pour ce faire, des solutions technologiques sont actuellement



a)



b)

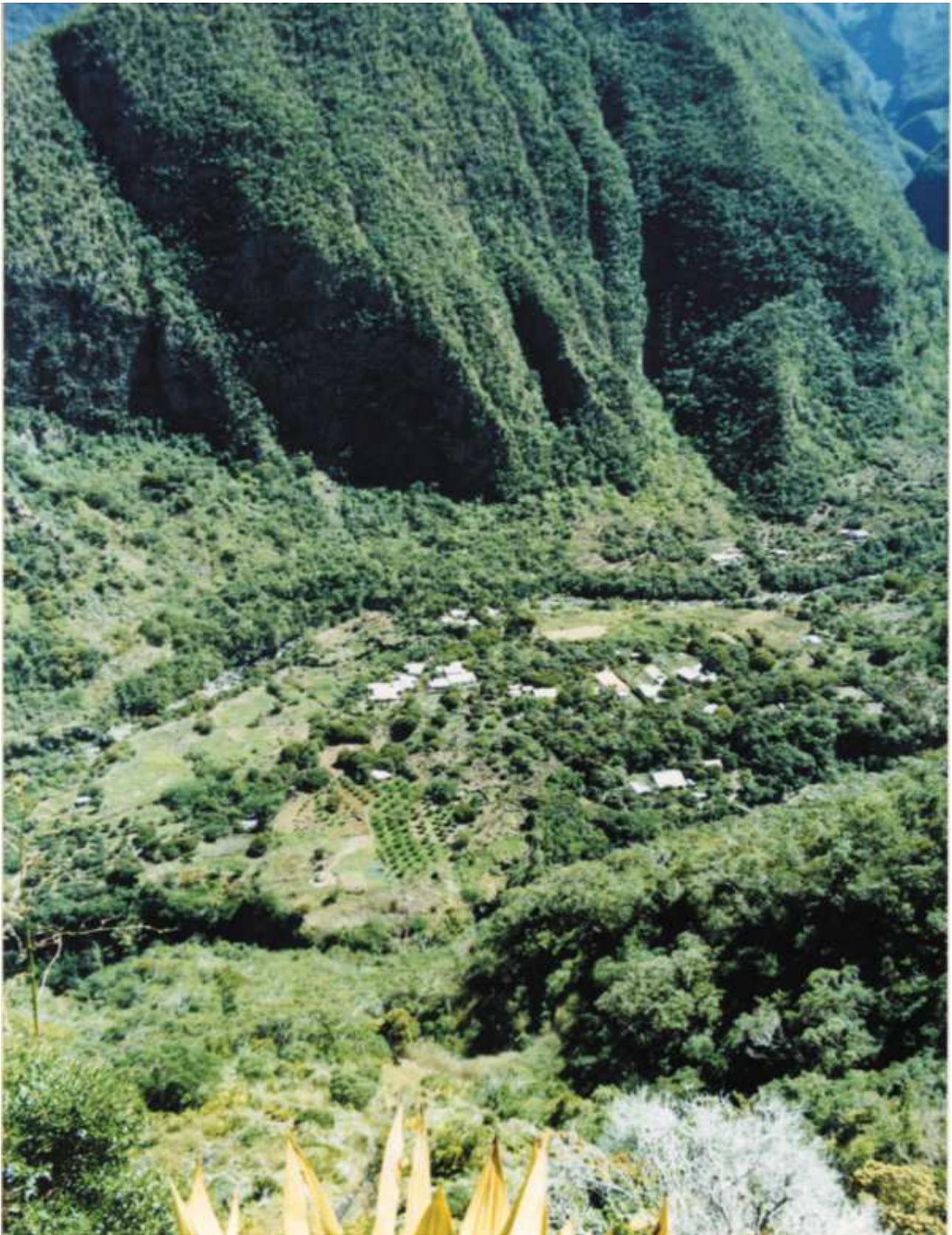
*Figure 1: Prototypé développé conjointement par l'Université de La Réunion et les partenaires industriels : - a) Projecteur micro-onde; - b) Panneau de radiopiles, montrant, à la base, les ampoules s'éclairant lors du fonctionnement. (Université de La Réunion – 2001)*

étudiées, soit utilisant des systèmes rétro-directifs, soit à l'aide de systèmes de positionnement global. Ces solutions doivent être testées en laboratoire et éprouvées en situation plus réaliste sur des distances plus importantes en champ ouvert où les réflexions multiples, les perturbations et autres conditions expérimentales sont plus proches des conditions opérationnelles.

\* Installation d'un système opérationnel de TESH à Grand-Bassin

Les études de cas et les récents développements réalisés à l'Université de La Réunion, ainsi que le soutien et l'engagement de partenaires privés et institutionnels, peuvent rendre possible la réalisation industrielle et l'installation d'un système opérationnel de TESH point à point terrestre.

Cette installation aura pour vocation la fourniture d'énergie électrique pour les gîtes touristiques du village et à ce titre, sera opérée commercialement. Elle aura également une vocation expérimentale, pour servir de base de test pour des composants ou des sous-systèmes en conditions opérationnelles. Une telle installation permettrait de tester la partie intégration environnementale et permettrait également d'observer et mesurer l'impact de cette technologie sur les éléments biologiques et végétaux, observation menée scientifiquement par des laboratoires spécialisés.



*Figure 2: Village de Grand-Bassin à l'île de La Réunion  
La photo est prise depuis le site considéré pour l'installation des projecteurs*

### *\* Collecteurs et convertisseurs solaires à haut rendement*

Les centrales solaires orbitales, visant des objectifs de puissance, vont nécessiter la collecte du rayonnement solaire sur une surface d'autant plus importante que le rendement des cellules de conversion en énergie électrique sera faible. Un rendement faible de ces éléments correspond également à des pertes sous forme de chaleur qu'il est difficile de dissiper dans l'espace, entraînant l'utilisation de systèmes imposants de radiateurs et l'utilisation de fluides toujours délicats à manipuler dans les conditions de micro-gravité. Il est donc impératif d'oeuvrer pour que ces cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs (actuellement le seul moyen dont on peut prévoir l'évolution technologique) atteignent les meilleurs rendements possibles. Beaucoup de pistes sont actuellement explorées et des rendements supérieurs à 40% ont pu être obtenus avec des systèmes à séparation ou transposition de spectre.

La démonstration de ces technologies sur Terre est primordiale pour assurer le succès de leur utilisation dans l'Espace. Le développement de ces démonstrations aura également des répercussions sur les technologies de conversion, même pour les systèmes terrestres.

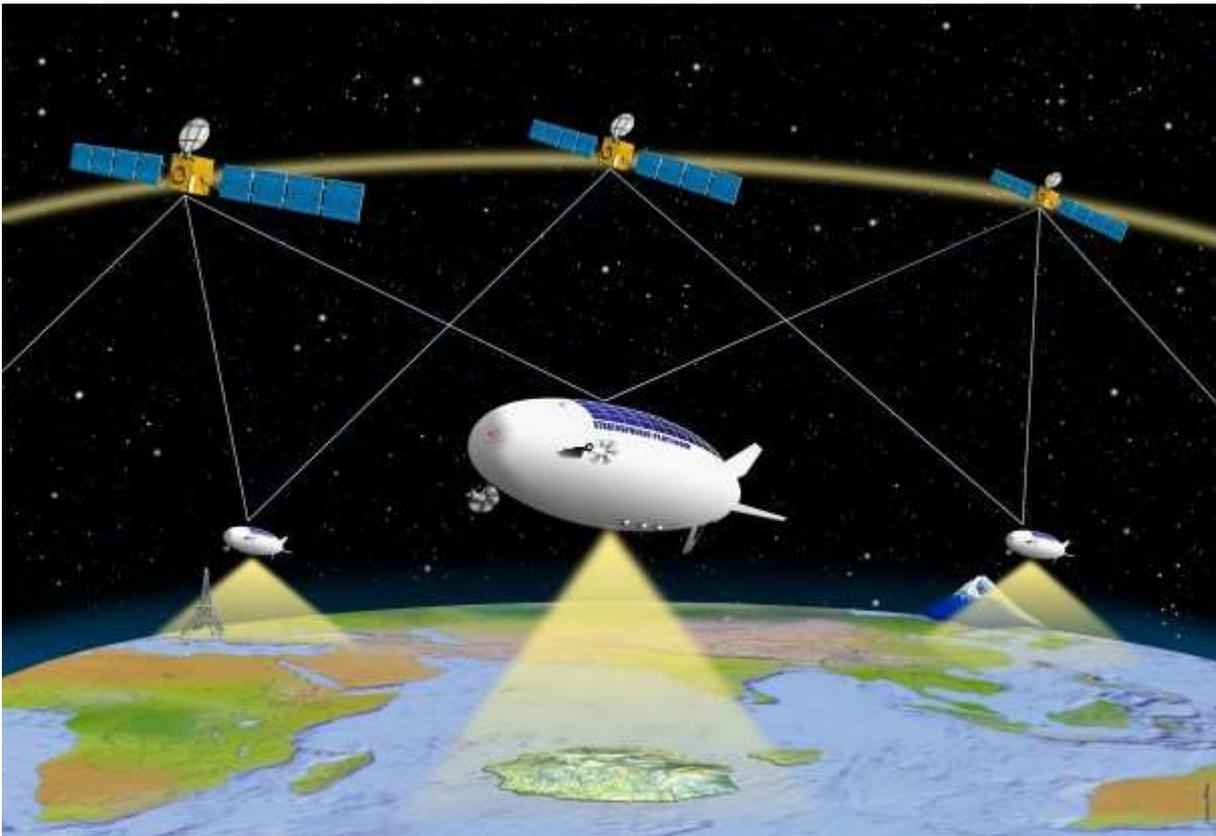
### *\* Robotique distribuée collaborative pour la fabrication semi-autonome de grandes structures.*

Pour assembler de très grandes surfaces de collecteurs solaires ou d'antenne de projection, il est envisagé l'utilisation de systèmes robotisés. En fait, la plate-forme de départ placée en orbite sert de support à une équipe de robots qui a pour mission l'assemblage des éléments du futur satellite, qui sont transportés depuis leurs usines de fabrication et conditionnement sur la Lune ou sur Terre. Il est également envisagé que les éléments eux-mêmes soient de véritables robots doués d'une intelligence ou du moins d'une autonomie leur permettant de s'insérer ou se positionner seuls sur la plate-forme pour l'assemblage. Un tel niveau de fabrication automatisée ne peut pas s'envisager dans une configuration conventionnelle de supervision et de centralisation. Ce qui est envisagé, c'est la capacité des robots à collaborer pour la réalisation de tâches complexes. C'est ici un pan entier de recherche sur l'intelligence artificielle, les systèmes distribués et la communication entre ces systèmes qui est sollicité. De nombreuses expériences sont en cours dans ce domaine également, mais il sera nécessaire de réaliser des démonstrations dans des conditions réalistes pour valider la capacité des robots à réaliser ces tâches complexes d'assemblage.

## **Démonstrations en haute altitude ou en orbite basse (2005-2015)**

### *\* Alimentation par TESF d'une plate-forme haute altitude (avec pilotage du faisceau)*

Plusieurs démonstrations ont déjà eu pour objet de tenter d'alimenter à distance des objets volants, essentiellement à basse altitude. Si certaines de ces démonstrations furent concluantes au point de vue conceptuel, validant la capacité de transmettre une énergie suffisante pour alimenter un drone ou un ballon dirigeable, aucune n'a permis d'aboutir à la validation des technologies de pointage électronique. D'autres points sont également à confirmer expérimentalement dans le cadre de ces démonstrations, notamment la capacité d'utiliser l'objet volant pour la transmission hertzienne de données tout en recevant de la puissance par un faisceau micro-onde, ainsi que la robustesse du système vis-à-vis d'un dépointage accidentel.



*Figure 3 : Alimentation d'une plate-forme stratosphérique par TESF*

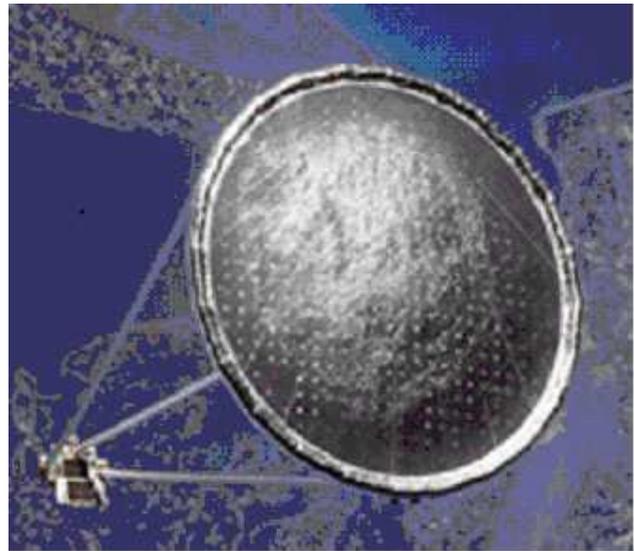
Il reste donc un vaste champ d'expérimentation et de démonstration possible dans ce domaine, d'autant que récemment, plusieurs firmes ont réalisé des avancées significatives dans la fabrication de plates-formes à haute altitude sous la forme de ballons stratosphériques qui seront capables de rester en vol stationnaire à une altitude de 20 km. Ces ballons peuvent aisément être conçus pour accueillir une surface importante de radiopiles chargée de récupérer l'énergie provenant du sol par micro-ondes.

*\* Démonstration de déploiement de structures légères (collecteurs solaires, éléments structurels, radiateurs)*

Les centrales solaires orbitales sont d'immenses structures dans l'Espace. Leur conception devra reposer sur l'emploi de matériaux extrêmement légers. Plusieurs pistes existent, notamment celles consistant à réaliser des éléments structurels sous la forme de tubes gonflables à durcissement provoqué par UV ou autre catalyseur. Ces tubes, réalisés à l'aide de matériaux extrêmement légers mais résistant aux tractions importantes, sont transportés dégonflés et pliés vers la plate-forme en orbite, où une capsule de gaz est libérée pour gonfler le tube et réaliser le déploiement. La structure, une fois gonflée, se rigidifie sous l'effet, par exemple, des ultraviolets. Le test unitaire d'un élément seul peut être réalisé en microgravité, mais l'assemblage d'une structure complète à partir de laquelle on peut bâtir une plate-forme doit être testé dans l'Espace. Cela peut se faire en s'appuyant sur les infrastructures de la Station Spatiale Internationale. Ce type de matériel ne représente pas une charge très importante et peut être aisément embarqué à bord d'un vol de ravitaillement.



a)



b)

*Figure 4 : - a) Miroir gonflable de 5 mètres de diamètre, déployé dans une chambre à vide (NASA – 2001) ; - b) Démonstration de déploiement dans l'Espace d'une antenne gonflable (Satellite Spartan – NASA – 1996)*

*\* Convertisseurs énergie solaire - énergie électrique à haut rendement.*

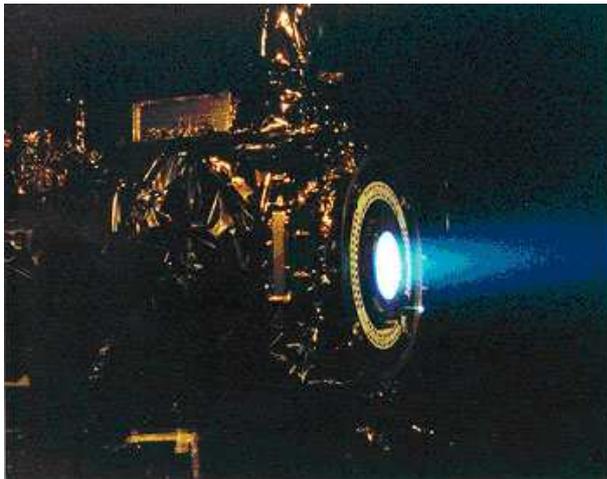
Comme mentionné plus haut, plus les systèmes de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique seront performants, notamment en terme de rendement de conversion, plus il sera possible de réaliser des économies substantielles sur la dimension des centrales solaires orbitales. Il apparaît donc primordial de fournir des efforts importants de recherche sur ces technologies. On peut déjà noter que les rendements ont été multipliés par 4, passant d'à peine 10% à la fin des années 1980, à plus de 40% de nos jours, pour les structures à bandes interdites multiples (séparation spectrale) ou pour les systèmes à transposition de spectre. Beaucoup reste à faire, notamment pour améliorer encore les rendements, mais également pour diminuer les coûts de fabrication de ces systèmes. Des points délicats persistent également en ce qui concerne l'interfaçage de ces cellules solaires avec des systèmes nécessitant des tensions de sortie élevées, ce qui peut être le cas pour les centrales solaires orbitales notamment. Il est nécessaire de s'assurer que des phénomènes de claquage et d'arcs électriques ne surviennent pas, ce qui peut amener la destruction de certaines parties des cellules photovoltaïques. Enfin, les concepts avancés pour l'utilisation de ces cellules photovoltaïques préconisent souvent l'emploi conjoint de collecteurs ou concentrateurs, sous la forme d'immenses miroirs déployés dans l'Espace. Tous ces points doivent être validés, soit dans le cadre de satellites de démonstration, soit dans le cadre de systèmes opérationnels auxquels ils seraient adjoints pour assurer l'alimentation énergétique.

*\* Démonstration de TESH entre l'espace et la surface terrestre (depuis la station spatiale ou depuis un satellite de démonstration).*

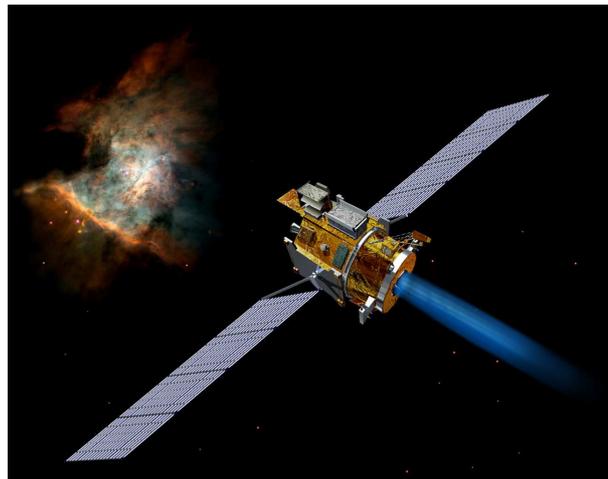
Cette ou ces démonstrations auraient pour vocation l'étude des systèmes de projection en environnement spatial, l'interaction du faisceau micro-onde avec les couches hautes ionisées de l'atmosphère, la propagation et le pilotage électronique du faisceau vers des stations de collecte et de test à la surface terrestre. Des relevés temporels de distributions de champs pourront être confrontés aux modèles et simulations pour correction ou validation.

### *\* Réacteurs ioniques pour transfert orbital*

Le déploiement de centrales solaires en orbite géostationnaire ou géosynchrone, ou les vols d'exploration vers la Lune, nécessitent le transfert depuis l'orbite basse terrestre, vers l'orbite lunaire ou les orbites géostationnaires ou géosynchrones. L'emploi de réacteurs chimiques pour ce type de transfert d'orbite nécessite que soit transporté depuis la surface terrestre, en même temps que la charge utile, la masse de propergol ou autre liquide propulseur nécessaire pour assurer ce transfert. Cela augmente considérablement les coûts de lancement.



a)



b)

*Figure 5 : - a) Réacteur ionique intégré dans la sonde Deep Space 1 (NASA);  
- b) Vue d'artiste de la sonde Deep Space 1.*

Les réacteurs ioniques ont pour but de permettre la réalisation de ce transfert avec une masse de gaz propulseur nettement moindre. Ces réacteurs transforment l'énergie solaire en énergie électrique qui est utilisée pour accélérer les charges électriques d'un gaz ionisé. Le volume de gaz propulsé est moindre, mais la vitesse de propulsion est jusqu'à 100 fois plus importante.

La capacité de ces réacteurs à propulser des masses sur des distances et des durées importantes a été démontrée lors du vol de la sonde Deep Space 1. D'autres vols sont nécessaires pour étudier des éléments tels que la maintenance et le ravitaillement de ces systèmes à partir de la station spatiale internationale si l'on souhaite pouvoir développer une flotte de remorqueurs de transfert orbital réutilisables.

### *\* Robotique spatiale distribuée et collaborative*

L'objectif est le déploiement d'un groupe de robots coopérant pour le montage dans l'Espace de structures simples. Scientifiquement, il sera possible d'analyser le comportement de groupe de ces robots et leur autonomie décisionnelle tout en prenant en compte de façon réaliste les problèmes inhérents à la communication entre robots, à l'adaptabilité à leur dynamique nouvelle en microgravité, à la supervision des tâches ou à la communication des ordres depuis le sol ou depuis la station spatiale internationale.

## Systèmes opérationnels ou probatoires en orbite basse (2010-2020)

*\* Système d'alimentation de satellite de communication (Satellites GEO, alimentés par TESF laser)*

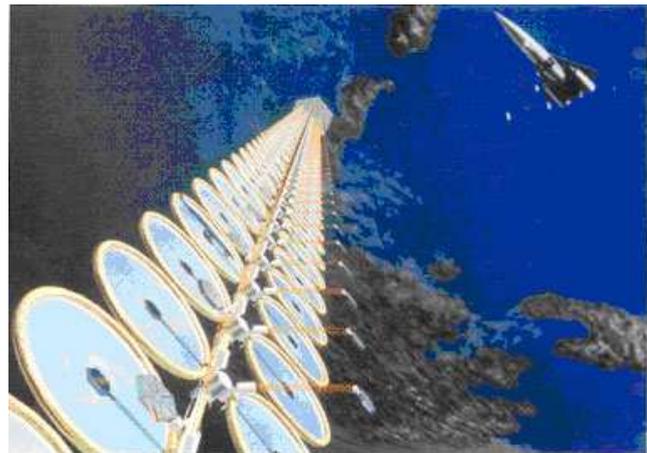
L'idée est ici de tester et de valider la mise en place d'un service de fourniture d'énergie à des satellites de télécommunication. Après validation, il peut être envisagé un développement commercial de ce type de service, permettant, avec quelques stations, d'alimenter un réseau de plusieurs satellites. L'intérêt réside dans la simplification de la conception des satellites de communication, qui ne doivent plus embarquer des grandes surfaces de cellules photovoltaïques, mais uniquement des collecteurs pour les faisceaux laser qui sont de dimension plus faibles et de rendements beaucoup plus importants. Toute l'ingénierie et la complexité sont regroupées dans une seule station, c'est une spécialisation vers le domaine de l'énergie spatiale.

*\* Systèmes LEO de classe 10 MW (SPS-2000, Sun Tower, ...)*

Le gouvernement japonais envisage la mise en orbite d'un satellite probatoire en orbite basse équatoriale. Ce satellite, dans sa conception actuelle, effectuerait une orbite complète en 100 minutes et survolerait plusieurs zones de collectes situées aux environs de l'équateur. Ce satellite fournirait à chaque station, pendant 200 seconde une puissance de 10 MW.



a)



b)

*Figure 6 : Systèmes probatoires de CSO en orbites basses terrestres :  
- a) SPS-2000 (Japon) ; - b) Système Sun Tower (USA).*

Dans le même ordre d'idée, la NASA a proposé le concept d'un système probatoire dans la classe des 10 MW, en orbite basse terrestre. Le système proposé a une architecture modulaire permettant une évolution progressive de puissances de 1 MW à plusieurs dizaines de mégawatts.

## Développement spatial à partir de la Lune (2015-2040)

La dimension des centrales solaires orbitales nécessite un nombre de lancements important afin de réunir autour d'une plate-forme initiale la surface de collecteurs et convertisseurs solaires, les convertisseurs micro-ondes et le réseau d'antenne de projection. La Lune fournit une alternative

intéressante pour la production et l'acheminement dans des conditions économiques plus favorables d'une grande quantité de matériaux vers la plate-forme d'assemblage d'une centrale solaire orbitale en orbite géostationnaire. La liste des phases de ce développement est la suivante :

\* *Remorqueur de transfert orbital (LEO – GEO & ISS – Orbite lunaire basse – ISS)* : Ces remorqueurs servent à assurer le transfert des charges utiles, des capsules d'équipage et des matériels depuis la station spatiale internationale, située en orbite basse terrestre, vers les orbites géostationnaires ou l'orbite basse lunaire.

\* *Exploration lunaire robotisée (recherche de l'hydrogène)* : Envoi de systèmes robotisés pour la recherche de sources possibles d'hydrogène au fond des cratères profonds de la Lune. L'hydrogène est l'un des éléments important pour l'installation d'une industrie d'exploitation des ressources lunaires pour la fabrication de matériaux.

\* *Implantation d'une station en orbite basse lunaire* : Réalisation d'une station en orbite basse lunaire pour les rendez-vous avec les remorqueurs de transfert orbital, la préparation des équipages et équipements, la maintenance et le ravitaillement des remorqueurs.

\* *Implantation robotisée d'une base lunaire habitable (+ production d'oxygène)* : Envoi de systèmes robotisés pour réaliser l'installation d'une base lunaire capable d'accueillir des spationautes.

\* *Vol habité pour le déploiement station production panneaux solaires* : Mise en place de systèmes de production industrielle de cellules photovoltaïques.

\* *Vols habités pour le déploiement systèmes de production matériaux et transformation* : Mise en place d'outils de production de composants pour les CSO.

\* *Mise en place de rampes de lancement électromagnétiques* : Réalisation de rampes de lancement horizontales permettant de réaliser un nombre important de lancements à partir de la Lune.



Figure 7 : Développement à partir de la Lune

**Et à plus long terme ...**

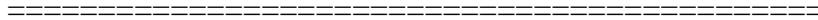
*\* Industrialisation des centrales solaires orbitales en orbite géostationnaire terrestre.*

*\* Centrales solaires orbitales à l'échelle planétaire à partir d'orbites géostationnaires ou géosynchrones*

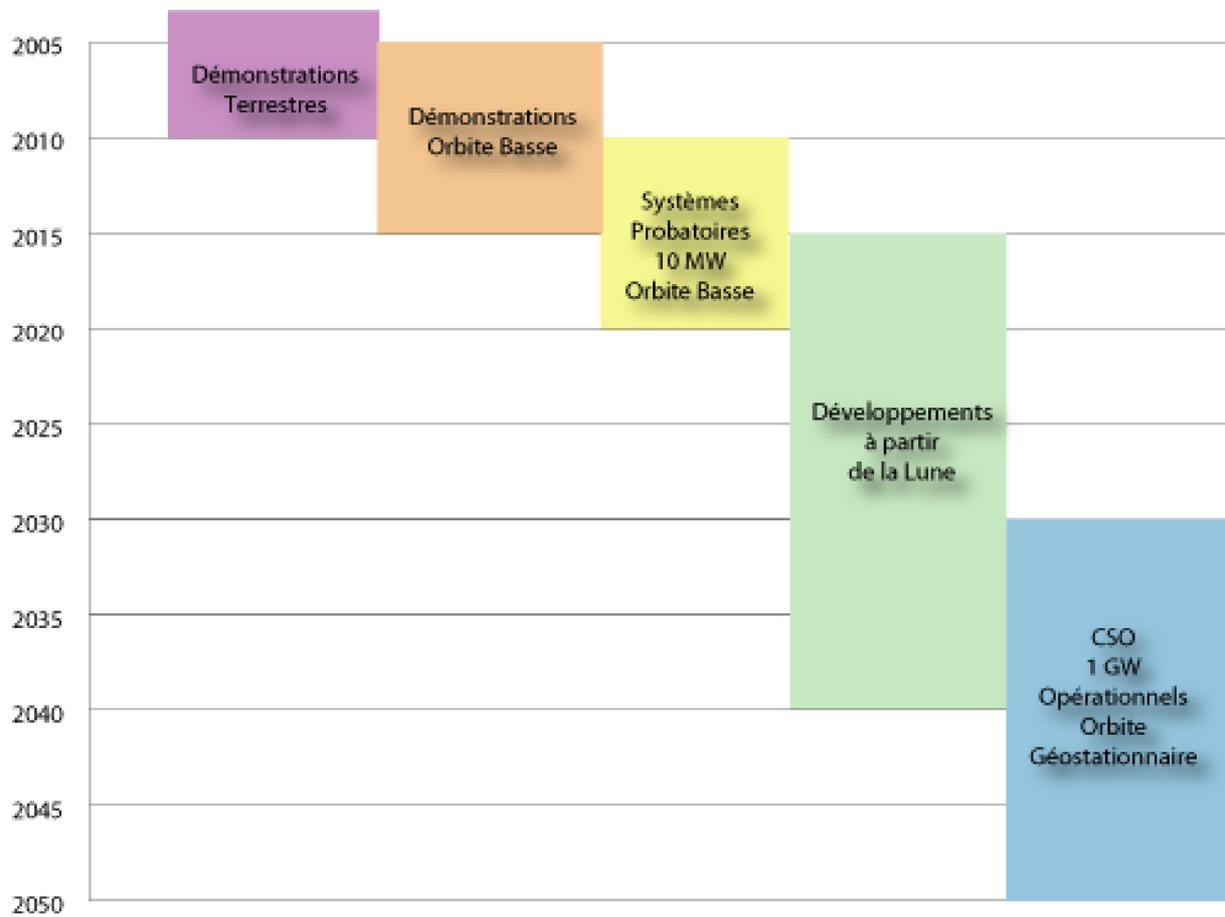
*\* Centrales solaires orbitales pour exploration spatiale ou industrialisation spatiale*

*\* Exploration et exploitation des ressources des astéroïdes*

*\* Etc.*



*Annexe A – étapes vers les CSS et séquençement des démonstrations*



=====

# INCIDENCES INDUSTRIELLES DU DEVELOPPEMENT

## DES CENTRALES SOLAIRES SPATIALES

par **Guy Pignolet de Sainte-Rose**

Ingénieur Cnes  
Membre du Bureau du Sunsat Energy Council

=====

### **Un rêve réaliste**

Aujourd'hui, les Centrales Solaires Spatiales ne sont encore qu'un rêve. Une Centrale Solaire Spatiale, des Centrales Solaires Spatiales au pluriel, sont des structures énormes, qui demandent la mise en oeuvre de moyens colossaux. Des systèmes opérationnels sont difficilement envisageables avant le milieu du siècle, donc à des échéances lointaines, beaucoup trop lointaines pour qu'aucun gouvernement ne puisse actuellement engager ne serait-ce que l'ombre d'un programme, beaucoup trop lointaines aussi pour qu'aucun industriel responsable ne puisse aujourd'hui s'impliquer techniquement ou économiquement dans un programme concret de Centrale Solaire Spatiale.

Cependant, le rêve des Centrales Solaires Spatiales est réaliste. Leopold Summerer a montré que les Centrales Solaires Spatiales s'inscrivaient remarquablement dans les recherches actuelles pour des sources d'énergie durables dans une problématique à l'échelle de l'humanité. John Mankins, en présentant les différentes composantes des systèmes de Centrales Solaires Spatiales, a montré que nous maîtrisons dès aujourd'hui l'ensemble des technologies nécessaires, et que le défi n'est pas au niveau des compétences fondamentales, mais plutôt dans l'industrialisation à grande échelle. Nobuyuki Kaya a montré comment les Centrales Solaires Spatiales représentaient une option énergétique compatible avec le problème des gaz à effet de serre et la question du réchauffement de la planète. Alain Celeste vient de montrer une succession graduée d'étapes technologiques et industrielles qui peuvent au fil des prochaines décennies constituer un cheminement plausible vers des systèmes de Centrales Solaires Spatiales opérationnels.

### **Le complexe industriel**

Donc le fossé entre les rêves futuristes d'aujourd'hui et les réalités opérationnelles de demain peut être comblé, et ce sont les industriels qui ont les moyens de le faire, essentiellement les industriels du secteur aéronautique et spatial. Les Centrales Solaires Spatiales répondent d'abord à une demande du secteur de l'énergie, mais les technologies du transport extraterrestre, du travail en

orbite, humain et robotique, et celles du matériel d'intervention interplanétaire sont entre les mains des grands groupes qui se consacrent au spatial, à l'aéronautique et à la défense : au spatial un peu, à l'aéronautique beaucoup, et en général aux activités de l'armement et de la défense principalement.

J'ai noté ce caractère militaire des industries concernées, car il me semble essentiel dans le processus. Je voudrais, avant de développer ce point, clarifier quelques notions qui restent encore trop souvent confondues dans l'imaginaire des peuples et des nations : il s'agit des relations entre le militaire, l'armement, la défense et la guerre.

\* Le *militaire* est celui qui marche au pas. C'est une forme d'organisation, efficace dans l'action, qui au niveau des industries du secteur traduit leur dépendance vis-à-vis des commandes gouvernementales.

\* L'*armement* consiste à concentrer des ressources et des énergies qui peuvent être déployées de manière ciblée quand besoin est. C'est dans ce sens d'ailleurs que les marins parlent de l'armement d'un navire, ou que l'on se dit être armé pour la vie. L'armement est un processus technologique et c'est un fond de commerce essentiel pour la grande industrie.

\* La *défense* est liée à l'assurance de vie et de survie d'une communauté. C'est un sujet vaste qui va depuis la capacité de résister victorieusement à une agression, jusqu'à tout un ensemble de dispositions qui permettent de surmonter les dangers du monde.

\* La *guerre* est un sujet moins attirant. Elle a peut-être été noble dans un passé médiéval, mais à l'heure de la globalisation planétaire, elle apparaît comme un désordre de l'esprit, et elle est de plus en plus mal supportée par l'opinion publique mondiale. A son crédit, la guerre a souvent été un facteur déclenchant pour les sauts industriels et technologiques et pour les grandes transformations de nos sociétés. Aujourd'hui, ce mode du passage est de moins en moins bien accepté, pour des raisons industrielles et commerciales qui ont été intelligemment développées par Alvin Toffler, l'auteur du "choc du futur", dans ses deux derniers ouvrages.

## **La défense de la planète Terre**

Si nous voulons bien lever les yeux au-dessus d'une actualité quelque peu désordonnée, et prendre un recul de quelques décennies, cohérent avec la réflexion sur les Centrales Solaires Spatiales, nous ne pouvons que constater que notre monde est en pleine évolution, rapide, sur des plans conceptuels, économiques, industriels, et écologiques.

L'écologie, c'est-à-dire la science des relations structurelles, était un sujet confidentiel jusqu'à ce que dans les années soixante, les sondes lunaires ne nous offrent les premières images de la "Planète Bleue", notre planète ! L'humanité était jusqu'alors une grande idée philosophique, ces images en ont fait une réalité concrète, mais elles nous ont aussi révélé la fragilité de notre condition.

Sur le plan économique, depuis une quarantaine d'années, nous sommes en train de passer, et de plus en plus vite, d'une société moderne dont le développement était fondé sur l'industrie, à une nouvelle société de l'information, ce qui n'est pas sans conséquences pour les industriels, et en particulier les industriels des grands groupes.

Les voies de l'économie se transforment sur la totalité de la planète, le communisme d'antan est mort et le capitalisme traditionnel vacille, tandis que les bases de données en temps réel et les modélisations complexes ouvrent des chemins vers de nouveaux modes de gestion. Nous sommes dans une période de crise, c'est-à-dire, comme le définit Edgar Morin, que l'écart se creuse entre la nouvelle réalité du monde et les anciens concepts opérants que nous gardons encore. Cette crise est particulièrement difficile à vivre pour les industriels, et en particulier pour les grands industriels du secteur aérospatial qui, comme nous l'avons vu, sont dans leur ensemble les industriels du secteur de la défense.

Dans ce panorama quelquefois un peu sombre, les Centrales Solaires Spatiales offrent quelques perspectives pour une transformation moralement acceptable et des opportunités de redéploiement d'activité à partir des infrastructures techniques existantes, dans les contextes économiques et politiques qui sont ceux d'aujourd'hui.

## **Un programme énergétique mondial**

La planète Terre est en danger, ou plus précisément ce sont la biosphère et l'humanité qui sont aujourd'hui en danger. L'énergie, sujet de nos propos, sujet de crise éminent et éminemment critique, n'est paradoxalement peut-être plus au coeur du fonctionnement des sociétés, même si elle l'a été pendant tout le vingtième siècle. La disponibilité de l'énergie reste néanmoins indispensable et elle le sera chaque jour un peu plus au cours des décennies à venir, sous des formes qui se doivent désormais d'être propres et durables. C'est un problème de survie, un problème de défense au niveau de la planète.

Arthur Clarke, le grand visionnaire du vingtième siècle, se déclarait cependant optimiste parce qu'il pensait, a-t-il dit récemment, que nous avons 51% de chances de survivre aux grandes crises actuelles. Je crois bien sûr que sa déclaration n'était qu'une boutade, et j'aurai tendance à être beaucoup plus optimiste que lui, parce que je crois qu'il existe, avec les ressources et les structures dont nous disposons aujourd'hui, une possibilité d'ouvrir des passages vers notre futur.

Je crois qu'avec l'énergie de l'espace, nous sommes en mesure d'apporter des éléments de solution à la crise, à la fois sur le fond, celui de l'accès aux ressources, et sur les modalités, en offrant des nouvelles filières d'évolution pour les processus industriels concernés.

Au cours des contacts que le Sunsat Energy Council entretient depuis plusieurs années avec le Programme Solaire Mondial de l'Unesco, il est apparu une possibilité de développement des Centrales Solaires Spatiales, au-delà des travaux actuels sur le TESH et des projets d'expérience depuis des petites plates-formes orbitales. Les prochaines étapes du développement, celles des grands systèmes probatoires de la classe de plusieurs mégawatts, pourraient être financées par une redirection de crédits militaires dans le cadre d'un programme de défense planétaire coordonné à l'échelle mondiale. Une telle perspective serait pleine d'opportunités pour les industriels concernés, en particulier dans le domaine du transport spatial, avec des incidences favorables pour l'ensemble de l'économie.

**Illustrations :**

- 1) Vision des Centrales Solaires Spatiales (document CNES)
- 2) Panorama des activités aérospatiales dans le monde
- 3) Image de la Planète Bleue (document NASA)
- 4) Démonstrateur fonctionnel de Centrale Solaire Spatiale



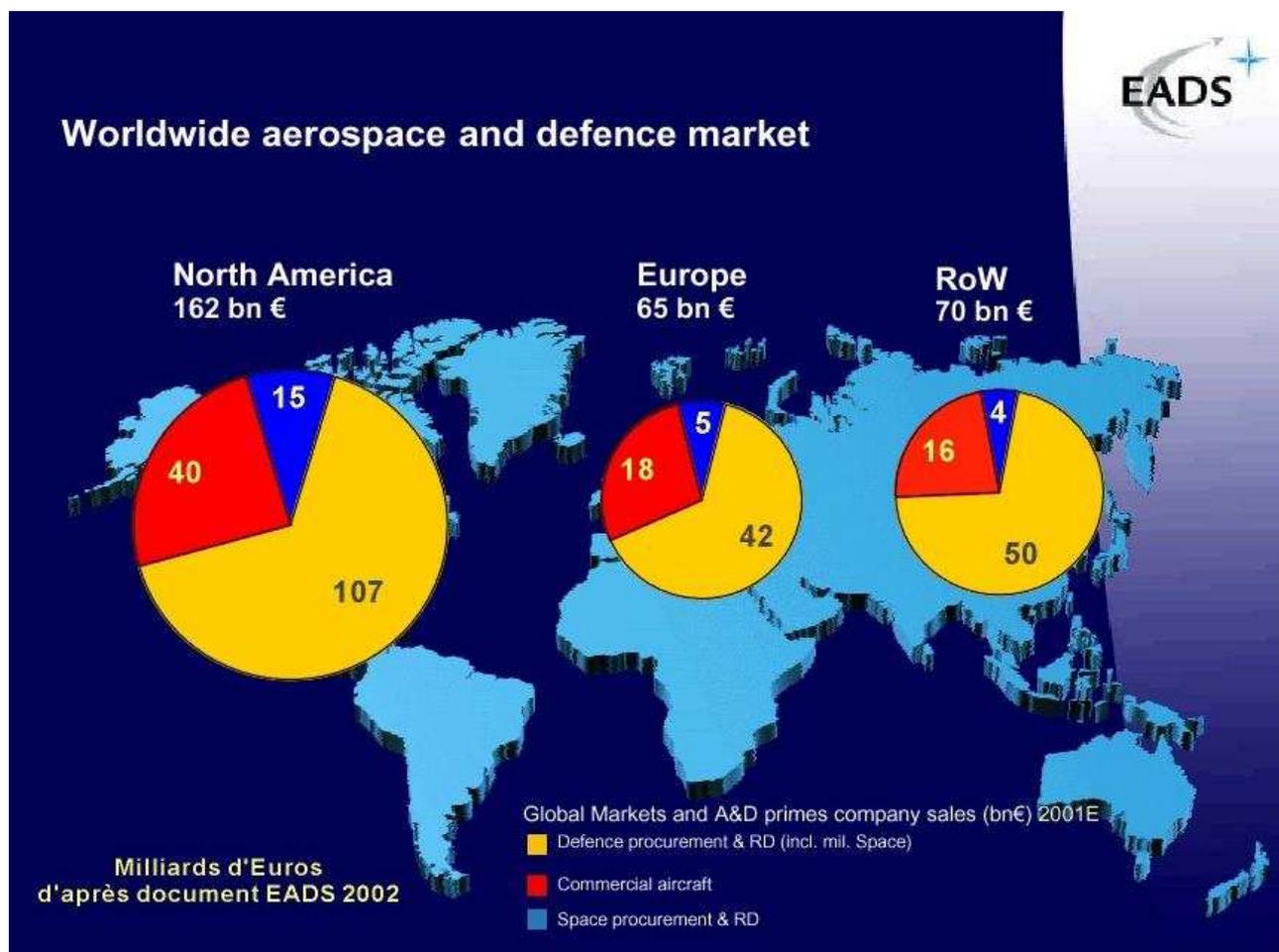
*Illustration N° 1 : un rêve réaliste*



*Centrales Solaires Spatiales et champs de radiopiles*

*"L'espace comment ça marche, à quoi ça sert " – Editions Ronald Hirlé*

*Illustration N° 2 – le complexe industriel*



*Répartition des budgets des industries aérospatiales :*

*en bleu : budgets spatiaux civils*

*en rouge : budgets aéronautique civile*

*en jaune : budgets de défense et d'armement*

*(d'après un document EADS 2002)*

*Illustration N° 3 – la défense de la Planète Terre*



*la biosphère est un espace fragile et limité*

*Document NASA (mission Apollo-17)*

*Illustration N° 4 – un programme énergétique mondial*



*Démonstrateur fonctionnel de Centrale Solaire Spatiale*

*Modèle du Programme Solaire Mondial de l'Unesco*

*( Atelier Nations Unies / IAF – Sao José dos Campos 2001 )*



**SPS 2000 – Pour la survie énergétique de la Planète Terre,  
un démonstrateur fonctionnel de Centrale Solaire Spatiale**



Pour faciliter la compréhension du concept de Centrales Spatiales Orbitales et pour présenter de A à Z les technologies utilisées pour le Transport d'Énergie Sans Fil, le CNES et l'agence japonaise ISAS ont développé un démonstrateur fonctionnel portable.

Contenu dans une petite valise, déployé et replié en moins de cinq minutes, le démonstrateur comprend un soleil artificiel, une maquette active de satellite SPS et une représentation de la planète Terre. Le Soleil produit de l'énergie lumineuse. Sur le satellite, la lumière est convertie en énergie électrique par des photopiles et cette énergie alimente un projecteur de micro-ondes dirigé vers la Terre. Sur la Terre, un réseau de radiopiles collecte l'énergie électromagnétique du faisceau et la re-transforme en énergie électrique, qui fait fonctionner des témoins lumineux, symboles d'une possibilité d'alimenter les grandes mégapoles de notre planète de manière propre et durable.

SPS 2000 est un système probatoire intermédiaire qui pourrait être mis en oeuvre dans les années 2010-2020, dans un cadre de développement des sources majeures d'énergies propres et durables pour la deuxième moitié du 21e siècle.

La mise en oeuvre du système SPS 2000, qui nécessiterait une dizaine de lancements par des fusées de type Ariane 5 ou une soixantaine de lancements par des fusées russes classiques, pourrait être financée par des accords entre les gouvernements et l'industrie dans le cadre de grands programmes de défense planétaire.

**Une valise de démonstration SPS 2000 a été mise à la disposition du Programme Solaire Mondial de l'UNESCO pour des présentations aux organismes industriels, académiques et gouvernementaux.**

Les présentations sont organisées sur demande par courrier électronique à l'adresse :

**[sps2000@grandbassin.net](mailto:sps2000@grandbassin.net)**