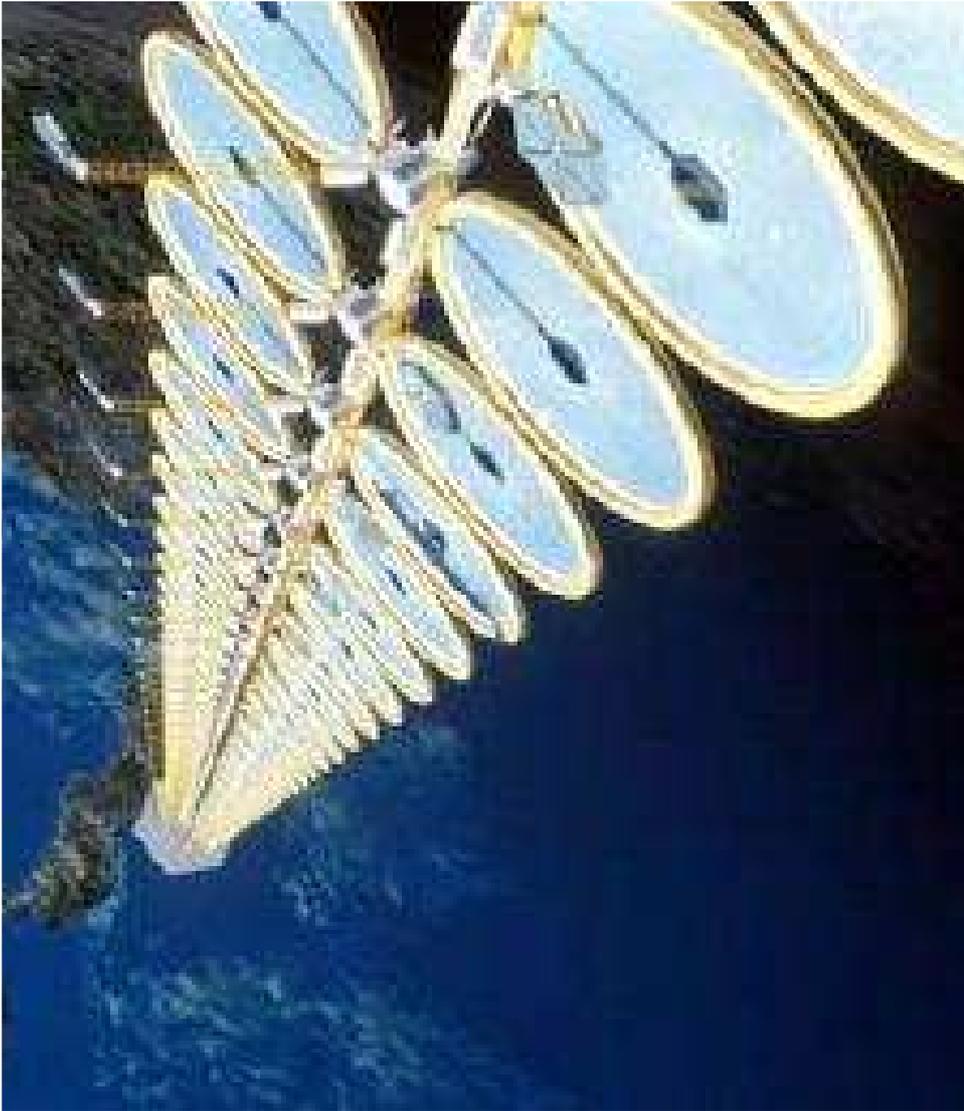
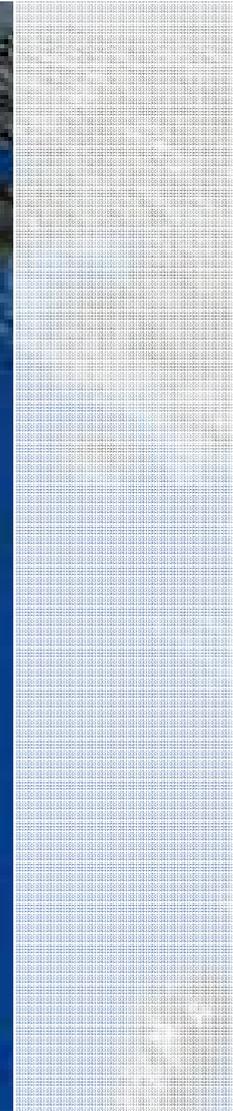
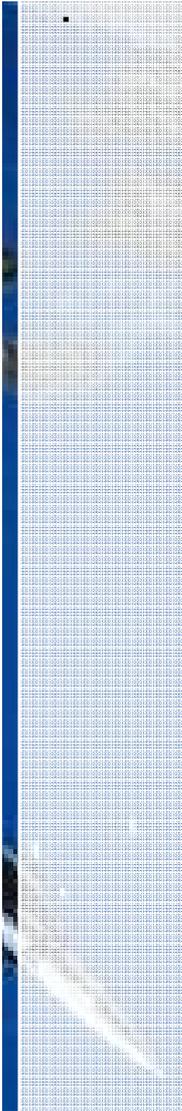


Centrales Solaires Orbitales



Energies Renouvelables

ENSTA 2009

Damien Becq

Géraldine Gonfard

Le soleil, déterminant pour la vie sur terre, a toujours fasciné nos ancêtres, en Egypte, en Amérique du Sud et même à la cour des rois de France. C'est maintenant de plus en plus une fascination énergétique, dans la perspective de se défaire de la nécessité de consommer des énergies fossiles. Les panneaux solaires gagnent peu à peu en rendement, mais pourquoi ne pas se rapprocher de la source lumineuse elle-même ?

C'est en 1968 qu'apparaît pour la première fois l'idée d'envoyer des panneaux solaires dans l'espace (Space Based Solar Panel). A l'époque, le projet de Peter Glaser, ingénieur chez Arthur D. Little, intéresse mais est rapidement abandonné pour infaisabilité économique. En effet, avec le niveau technologique de la fin des années 60, la NASA évaluait le déploiement d'un tel dispositif à 1 trillion (mille milliards) de dollars, avec un besoin de plusieurs centaines d'astronautes pour l'assembler dans l'espace.

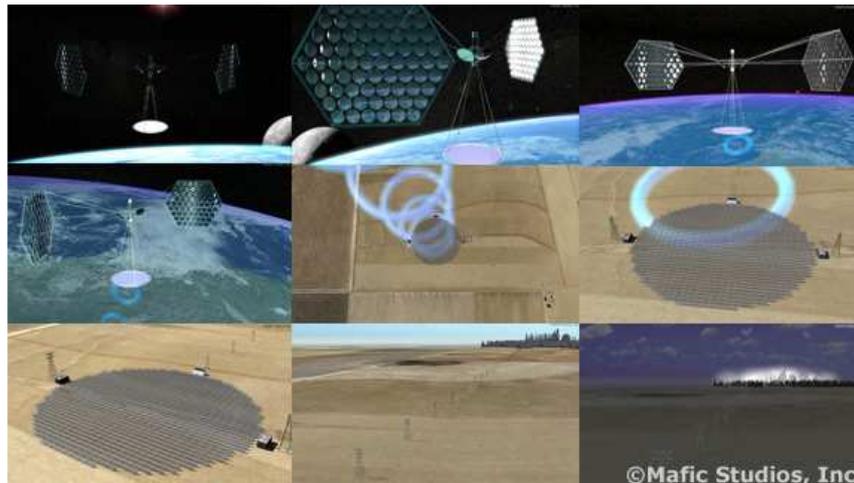
Et comment justifier une telle dépense quand on sait que le coût de l'électricité ne dépassait déjà plus les 0.05€/kWh et que le prix du baril de pétrole était en dessous de 20€ avant les années 2000 ?

Pourtant, depuis 2 ans, l'étude du projet de ferme solaire dans l'espace a été relancée activement dans les centres de recherches américains et japonais. En effet, l'avancée technologique dans le secteur de la robotique est désormais telle que l'assemblage en orbite du satellite ne nécessite plus de main d'œuvre humaine. Par ailleurs, la technologie du photovoltaïque est aujourd'hui bien maîtrisée, avec une majeure partie des satellites géostationnaires qui s'alimente par énergie solaire. Le coût des cellules a chuté avec l'avancée la récente industrialisation de la technique et parallèlement, ce sont les performances des cellules qui augmentent de plus en plus rapidement.

Si le projet a été déclaré économiquement viable par la NASSO, bien des contraintes financières et technologiques restent encore à franchir. Ces incertitudes seront présentées par la suite.

1. Concept et Technologie

Le concept de centrale solaire orbitale est très simple. Placer un satellite géant équipé de panneaux solaires sur orbite géostationnaire terrestre, c'est à dire à environ 36 000 km au dessus du sol (35 786 km au dessus de l'Equateur). Le doter d'un système émetteur afin de transmettre l'énergie captée, via micro ondes ou laser, à destination d'une antenne réceptrice située à la surface de la terre. L'énergie ainsi captée sera ensuite retransformée sous forme d'électricité et acheminée par lignes hautes tension vers la zone à desservir.



Evidemment, un tel dispositif ne peut être qu'imposant de par sa taille et son poids. Pour comparaison, la Station Spatiale Internationale (ISS), dotée de la plus grande structure d'alimentation par panneaux solaires jamais construite intègre environ 64 tonnes de matériel de fourniture d'électricité photovoltaïque, pour une puissance de 110 kW en continu. On retrouve 8 panneaux solaires de 34m de long et 12 m de large, pour une surface totale de 6 528 m². Ainsi, la puissance disponible est par calcul et en moyenne d'environ 28 W/m². Il faut savoir que la station se trouve 40% du temps dans l'ombre de la terre, à 340 km de distance de la terre, dans la thermosphère. Bien plus imposant que l'ISS, un dispositif satellitaire générateur d'énergie solaire est prévu pour peser environ 3 000 Tonnes et fournir une puissance énergétique de 1 à 10 GW.



La superficie des panneaux solaires nécessaire au fonctionnement d'une telle structure se comptera ainsi en km². Plus précisément, si l'on souhaite produire la totalité des besoins terrestres en énergie, et en considérant des rendements de panneaux proche de 50 % et un rendement de transmission vers la terre proche de 85%, il faudrait couvrir la totalité de l'orbite géostationnaire (de périmètre 265 000 km) sur une largeur de 1 km. Les publications n'évoquent pas précisément le type de cellules photovoltaïques qui seront utilisées pour cette ferme spatiale. Néanmoins, la communauté scientifique espère voir apparaître d'ici peu une technologie de cellules dont l'efficacité approcherait les 50%.

Le renvoi de l'énergie captée sur Terre peut potentiellement se faire via un émetteur de micro-ondes, avec des puissances d'émission envisagées de 1 à 10 GW. Afin de parcourir de longues distances, l'énergie doit être transmise sous forme d'ondes hautes fréquences c'est-à-dire dans le visible ou l'infrarouge. A ces fréquences, l'absorption de l'énergie transmise par l'atmosphère est d'ailleurs très faible. Toutefois, la transmission par basse radio fréquence comme les micro-ondes s'avère plus efficace en termes de taux de conversion à l'émission et à la réception.

Deux technologies sont donc proposées pour le renvoi de l'énergie sur Terre : la transmission par micro-ondes et l'utilisation de rayon laser.

La société EADS travaille actuellement sur un système émetteur sous forme laser. Les structures orbitales nécessaires sont cinquante fois plus petites que dans le cas d'un émetteur micro-ondes, ce qui permettrait d'alléger grandement le poids du dispositif total. Ensuite, le faisceau laser assure une meilleure concentration de l'énergie et évite, sur de très longues distances, des dispersions latérales souvent incontrôlables. D'autre part, il n'affecte pas les systèmes électroniques de communication ou de navigation dans le voisinage. Mais un laser n'est pas facile à manipuler. Le faisceau doit pointer vers les récepteurs au sol avec une extrême précision. Pour cela, le laser transmet des informations de reconnaissance de position en même temps que l'énergie. Des capteurs sur les récepteurs mesurent ainsi en permanence sa position, et orientent le rayon en fonction

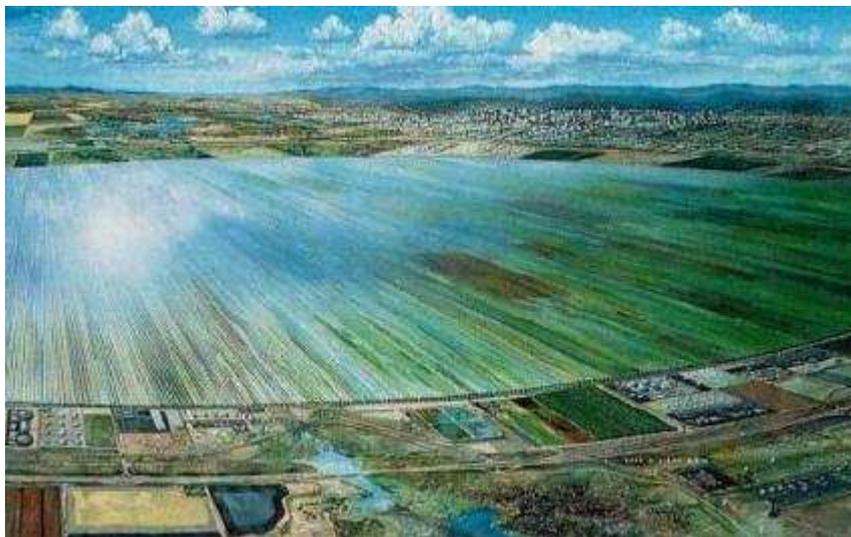
D'autres obstacles doivent également encore être surmontés. D'abord, améliorer la puissance du laser. On en est aujourd'hui à quelques watts, alors qu'on va devoir compter en mégawatts. Par ailleurs, contrairement aux micro-ondes, le laser ne passe pas à travers les nuages. Le faisceau devra donc être transmis par des stations relais dans la haute atmosphère par micro-ondes.

Enfin, actuellement il faut savoir qu'un laser de 400 watts pèse 12 tonnes. Or le dispositif devra supporter un dispositif laser d'une puissance de 10 gigawatts. Le réflecteur devrait lui-même mesurer 78,5 km de diamètre. Un peu encombrant et coûteux à envoyer en orbite.

L'alternative actuellement à l'étude aux Etats Unis est donc la transmission de l'énergie par micro-ondes. L'émetteur étant une antenne émettrice pour des fréquences de 2.4 GHz ou 5.8 GHz. Si les micro-ondes peuvent assurer la transmission de l'énergie sur de longues distances et avec un taux de perte très faible à la traversée de l'atmosphère, de l'ordre de 2%, la difficulté majeure de ce mode de transmission réside dans l'ouverture angulaire importante du faisceau sur une grande distance. Ce système nécessite donc des infrastructures imposantes autant à l'émission qu'à la réception. On estime déjà qu'à de telles fréquences et distance, l'antenne émettrice pourrait atteindre plusieurs centaines de mètres de diamètre (car un rayon plus faible favoriserait la dispersion des rayons dans l'atmosphère), ce qui induit facilement un diamètre de plus de 1 km pour l'antenne réceptrice.

L'antenne réceptrice est appelée une antenne rectificatrice (Rectenna). Constituée d'une antenne radiofréquence et d'une diode de démodulation, ce système permet de convertir les micro-ondes captées en courant continu, avec une efficacité de 90%. Du fait de cette absorption quasi-total des ondes énergétiques captées, certaines publications évoquent d'ailleurs aujourd'hui, la possibilité d'utiliser des matériaux transparents à la lumière du jour à 90% pour la construction du dispositif récepteur. Ce qui permettrait l'utilisation des terres sou jacentes au dispositif récepteur pour des cultures agricoles.

Si la chaleur dissipée au niveau du récepteur est donc théoriquement moindre que pour des panneaux solaires terrestres classiques, l'impact sur l'environnement en termes de réchauffement de l'atmosphère d'un tel dispositif reste cependant très mal connu. De récentes publications assurent que l'impact en termes de réchauffement se résume à l'effet induit par un certain nombre de fours à micro-ondes en fonctionnement. Néanmoins, des résultats précis restent encore attendus.



Modèle d'un dispositif récepteur de micro-ondes

Bien entendu, la première question qui vient à l'esprit lorsque l'on évoque le projet est de savoir pourquoi installer une ferme solaire en orbite géostationnaire alors qu'il est tout à fait possible de réaliser, et à moindre coût, ce type d'installation sur terre ?

Les scientifiques avancent plusieurs raisons à cela. D'une part, contrairement aux panneaux terrestres, soumis à la variabilité du jour et de la nuit, le satellite placé en orbite géostationnaire pourra être ensoleillé quasiment en permanence. Son rendement énergétique s'en trouvant alors doublé puisque, à une altitude suffisante pour, ne pas tomber dans l'ombre de la terre, on évite désormais les arrêts de fonctionnement la nuit.

Par ailleurs, si dans l'espace la puissance reçue par unité de surface est de $1\,366\text{ W/m}^2$ en moyenne journalière, cette puissance solaire n'est plus que de 250 W/m^2 environ à son arrivée sur terre. En effet, la présence de nuage et autres intempéries en haute atmosphère réduit grandement l'énergie solaire réceptionnée par la terre. Lorsque le rayonnement solaire traverse notre atmosphère, 30 % est directement réfléchi vers l'espace, puis par les nuages (20%), les diverses couches de l'atmosphère (6%), et la surface de la terre (4%). En termes de moyenne annuelle, un panneau solaire situé dans l'espace reçoit entre 8 à 10 fois plus d'énergie qu'un panneau terrestre.

Enfin, il est évident que ce dispositif présente un véritable impact environnemental en termes de minimisation de production de CO_2 . En effet, sur l'ensemble du cycle de vie de la centrale, seule la fabrication est source d'émission de CO_2 . En terme de construction d'infrastructures d'abord puisque l'émission liée à la fabrication des cellules photovoltaïques, ainsi que des émetteur et récepteur de micro-ondes génère près de 1200 Mtonnes de CO_2 . A cela s'ajoute l'émission d'environ 250 Mtonnes de CO_2 , dû au processus de lancements en plusieurs étapes, du module dans l'espace. Néanmoins, si

l'on considère l'exploitation d'une telle centrale sur 30 ans, on peut ramener cette production de gaz à effet de serre à une valeur de 20g/kWh/an. Ce qui correspond au taux d'émission d'une centrale nucléaire classique.

Suite à ce descriptif, il est certain que cette nouvelle technologie s'affiche comme une alternative intéressante en termes de production d'énergie. Et ce, malgré la présence résiduelle d'une multitude de défis encore à résoudre.

2. Enjeux financiers

Si le concept s'affiche désormais comme révolutionnaire, il ne faut pas oublier que de nombreux défis restent encore à résoudre. Notamment en termes financiers. En effet, selon les designs actuels de satellites proposés par différentes agences, le dispositif dans sa totalité pourrait peser près de 3 000 Tonnes, soit 10 fois le poids de la station spatiale internationale.

Or, de nos jours, une fusée de la NASA ne peut emporter avec elle qu'un poids maximal de 15 Tonnes et une fusée Ariane 10 tonnes seulement. L'envoi dans l'espace d'un tel dispositif nécessiterai donc pas moins de 120 lancements. Sachant que l'an passé, la NASA a effectuée un total annuel de 15 lancements seulement ... Il faudrait donc coupler à l'internationale les efforts pour gagner en temps.

Un véritable défi en termes de réduction des coûts de lancement dans l'espace se pose également. A date, l'envoi dans l'espace de 10 Tonne s'évalue à environ 150 M€. L'envoi d'un engin de 3 000 Tonnes nécessiterai alors près de 45 Milliards d'euros.

Face à un volume d'information conséquent, nous avons voulu mener notre propre évaluation, en considérant un projet de centrale solaire orbitale pouvant générer la même énergie annuelle qu'un réacteur nucléaire EPR standard. Pourquoi ramener notre étude aux caractéristiques d'une centrale nucléaire ? Parce que le nucléaire est aujourd'hui une source d'énergie clé dans notre société, et fourni une part importante de notre consommation quotidienne. Ce qui n'est pas encore le cas du photovoltaïque terrestre. Car, si l'énergie solaire spatiale est vouée à devenir une source majeure d'énergie pour la planète, elle devra pouvoir rivaliser en termes de performances, avec l'élément central qu'est le nucléaire.

Comparaison de coût d'un générateur solaire géostationnaire comparable en puissance a un réacteur nucléaire de type EPR

Puissance Réacteur nucléaire (EPR) : 1.6 GW,

Production énergétique maximale annuelle : $90\% \times 1.6\text{GW} \times 24 \times 365 = 12\,614\text{ GWh}$

Coût d'installation (EPR livre clés en main): environ 5 MdEur [8]

Coût de fonctionnement : 35 a 55EUR/MWh produit =>693 M Eur/production maximale annuelle

Sur 20 ans, la centrale coûte environ 19 Md Eur.

Générateur solaire géostationnaire :

Hypothèses :

Caractéristiques des panneaux : rendement 50 %, disponibilité de 98% du temps

Amélioration des masses par unité de transformation de 25% d'ici à 2020, étant donné que c'est ce qui est visé par les constructeurs japonais sur leurs panneaux solaires.

Dimensionnement :

Puissance installée nécessaire : $12\ 614\text{GWh}/98\%/24/365 = 1,47\ \text{GWc}$

(le calcul proposé par wikipedia donne un résultat proche, à 1,41 GWc, cf annexe)

Puissance reçue nécessaire : $1,47\ \text{GW}/50\% = 2,94\ \text{GW}$

Surface de panneaux nécessaires éclairés à une puissance de $1366\ \text{W}/\text{m}^2$:

$$2,94 \cdot 10^9 / 1366 = 2,15 \times 10^6\ \text{m}^2 = 2.15\ \text{km}^2$$

Masse surfacique des panneaux solaires (source [10]) : $3 \cdot (1-25\%)\ \text{kg}/\text{m}^2 = 2,25\ \text{kg}/\text{m}^2$

Masse totale des panneaux solaires : 4 837 tonnes

Masse par unité de puissance des onduleurs : de $2,5\ (1-25\%)\ \text{kg}/\text{kW} = 1,875\ \text{kg}/\text{kW}$ [15]

Masse totale des onduleurs : 2750 tonnes

Masse de l'émetteur de micro ondes (arbitraire): 3000 tonnes

Coût des panneaux par unité de puissance : $0,45\ \text{€}/\text{Wc}$ (hypothèse objectif japonais 2020, 75 Yen/Wc)

Coût des onduleurs unité de puissance : $0,22\ \text{€}/\text{kWc}$ ($0,4\ \$ / 1,35^* (1-25\%)$))

Soit un total de $0,67\ \text{€}/\text{Wc} \times 1,47 \cdot 10^9\ \text{Wc} = 0,985\ \text{Md}\ \text{€}$

Coût de l'émetteur (arbitraire) : 1,5 Md€

Coût du récepteur (arbitraire) : 1,5 Md€

Coût du déploiement aérien automatique unité de puissance : $2\ \text{€}/\text{kWc}$

Soit un total de $2\ \text{€}/\text{Wc} \times 1,47 \cdot 10^9\ \text{Wc} = 2,94\ \text{Md}\ \text{€}$

Coût d'installation au sol : 0,8 Md€

Synthèse masse :

Masse du matériel envoyé en orbite : 10 580 tonnes

Synthèse coûts :

Coût des fournitures : $0,985 + 1,5 + 1,5 = 3,985$ Md€

Coût du déploiement et installation au sol : 3,74 Md€

Coût de transport par tonne du matériel : 6 M€/ tonne (via Soyouz)

Coût total de transport : $(4837 + 2750 + 3000) \times 6 = 63,5$ Md€

Coût de fonctionnement annuel estimé : 20% des coûts des structures

Montant annuel correspondant : 0,797 Md€

Coût global sur 20 ans : $(15,94 + 63,5) = 79,4$ Md€

Ratio coût EPR/ coût Solaire = $19/79,5 = 24\%$

Cette énergie produite directement à partir du soleil, est 4 fois plus chère que l'énergie produite par un réacteur nucléaire sur terre. De plus, il faut remarquer que des rendements de conversion parfaits au niveau des onduleurs, et du couple émetteur-récepteur ont été considéré pour simplifier, faute de données disponibles. Il ne serait pas surprenant de perdre encore 30% de l'énergie via ces insuffisances.

On se rend compte, de manière évidente, que c'est principalement le coût d'envoi vers l'orbite géostationnaire qui est critique dans ce projet. Bien sûr, les caractéristiques de légèreté, résistance, performance de tous les autres éléments sont aussi extrêmement porteuses de défis technologiques.

Cela nécessiterait, avec les fusées Ariane actuelles, seules capable avec Soyouz d'envoyer des éléments en orbite géostationnaire, pas moins de 645 lances. Au rythme actuel, cela ne représente pas moins de 64 années de tirs (environ 10 tirs/an), pour un coût d'environ 80 Md€ avec Ariane, 60 Md€ avec Soyouz.

En réduisant d'un facteur 10 le coût des lancements ou la masse du matériel envoyé, on arriverait à un coût de lancement de 6 Md€, pour un coût total sur 20 ans de 23 Md€ seulement, c'est-à-dire environ 20% plus élevé que ce que l'on sait faire avec un EPR.

Si les enjeux économiques sont de taille, ils le sont d'autant plus que les risques d'endommagement du matériel en stationnement géostationnaire par collision avec des débris ou des astéroïdes, est loin d'être faible de destruction ou dommage.

Pourtant, selon le rapport transmis par le NSSO au gouvernement américain, ce système pourrait s'avérer rentable dès la deuxième année d'exploitation. En effet, indépendamment des coûts très lourds de développement que représente le programme, une estimation des coûts d'exploitation du dispositif semble avoir permis d'estimer le prix de l'électricité entre 1 à 2 Dollars le Wh. Ce qui reste bien évidemment supérieur au marché actuel de l'électricité. Néanmoins, ce tarif est largement inférieur au coût de revient final de l'énergie pour l'armée américaine. Le gouvernement espère donc pouvoir exploiter dans les premières années ce dispositif grâce à l'utilisation des armées comme premier client. Par la suite, des initiatives publiques devrait être lancées, afin d'inciter ce nouveau marché de l'énergie à se développer et de devenir rapidement compétitif.

Conclusion

Au cours des trente dernières années, ce qui semblait être un projet issu de la plus pure science fiction a fait l'objet de nombreuses études. Parmi lesquelles on peut citer le projet de panneaux solaire sur la lune développé et actuellement à l'étude au Japon, le travail de recherche sur la transmission d'énergie par technologie laser actuellement mené au sein des laboratoires Suisse de l'entreprise EADS Atrium. Et bien sûr le projet de défense américaine lancée par la NSSO dans le but de développer une nouvelle source d'énergie moins coûteuse et plus facile à approvisionner pour ses troupes sur le champ de bataille.

Quelques soit les motivations de chaque entités, il est important de bien réaliser que le gouvernement américain a déjà investi plus de 80 millions de Dollars sur ce projet. Soit près de quatre fois plus que les fonds que le gouvernement a investi dans les programmes de recherche nucléaire au cours des 50 dernières années. Aujourd'hui le NSSO demande encore le soutien de la Maison Blanche avec un besoin de 10 milliards de Dollars pour réaliser et lancer les premiers satellites test.

Difficile de croire encore à un projet parfaitement inimaginable lorsque l'on sait jusqu'où les nations et les entreprises privées se sont déjà investies en termes de fonds et de niveau de recherche. Se pourrait qu'un jour brille effectivement au dessus de nos têtes de gigantesques centrales à énergie solaire, alimentant la totalité de la planète ?

Pourtant, si pour certains l'avenir énergétique de la planète se trouve effectivement dans l'exploitation de l'énergie solaire, leur place reste sur terre. Certaines études affirmant que seulement 1% de la surface du Sahara recouverte de panneaux solaires permettrait de subvenir au besoin total mondial en électricité. Nouvelle étude à approfondir...

Quoiqu'il en soit, que ce soit sur terre ou dans les airs, l'avenir des panneaux solaires se jouera à la lumière du soleil !

Bibliographie

[1] **“Space-Based Solar Power as an opportunity for strategic security”**

Rapport du NSSO américain – Octobre 2007.

[2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Orbite_g%C3%A9ostationnaire

[3] Dimension des panneaux ISS

<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=10274>

[4] Caractéristiques panneau terrestre (16kg, 1,31m², 162Wc, 12,37%)

<http://sol-arcadia.com/fiches-pdf-materiel-photovoltaique/phx160.pdf>

[5] Agence spatiale canadienne, éclairage d’ISS

http://www.asc-csa.gc.ca/fra/missions/sts-097/alimentation_iss.asp

[6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Station_spatiale_internationale

[7] <http://www.science-sainte-rose.net/livres/Centrales%20Solaires%20Spatiales%20-%20La%20presentation%20au%20Senat.pdf>

[8] Coût EPR

<http://www.france24.com/fr/20090204-areva-contrat-inde-epr-nucleaire-jaitapur-deux-six-centrales-nuclear-power-corp-india>

[9] <http://ecoplexproject.org/2009/01/29/iss-solar-mass-production/>

[10] forum sur Ad Astra Rocket Company, Moteur Plasmique VASIMR

<http://astronautique.actifforum.com/propulsions-et-lanceurs-f18/vasimr-nouvelles-du-moteur-plasmique-vasimr-developpe-par-ad-astra-rocket-t3405-30.htm>

[11] Solar Energy Material Solar Cells (2001). Ruiz JM., Martin N.

[12] Sistemas Fotovoltaicos (2005). Abella

[13] http://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_solaire_photovolta%C3%AFque

[14] Nedo Japon : quelques objectifs que l'industrie japonaise s'est donnés:

Thème	Cible 2010	Cible 2020	Cible 2030
Coût de production	100 Yen/watt	75 Yen/watt	<50 Yen/watt
Durée de vie	-	+30 ans	-
Consommation de matière première	-	-	1 g/watt
Coût du convertisseur	-	-	15.000 Yen/KW
Coût de la batterie	-	10 Yen/Wh	-
Efficacité cellule cristalline	20 %	25 %	25 %
Efficacité cellule couche mince	15 %	18 %	20 %
Efficacité cellule CIS	19 %	25 %	25 %
Efficacité cellule III-V	40 %	45 %	50 %
Efficacité cellule "Dye Sensitized"	10 %	15 %	18 %
Source Nedo (Japon)	165 Yen=1€	Déc. 2007	

[15] Documentation SMA p31, modèle Sunny Central SC 350*

<http://www.dahlmann-solar.de/datenblatt/SUNCENT-30-AE2305.pdf>

Annexe

Puissance installée nécessaire : le calcul de wikipedia donne un résultat de 1,41 GWc

$$P^* = E_{AC} / ((G_{def} / G^*) * FO * PR) = 1,41 GW$$

P^* : Puissance nominale produite en conditions STC (W).

G_{def} = 1366 x 24 x 365: Irradiation annuelle effective incidente sur le module (kWh/m2).

G^* : Irradiance STC (1000 W/m2).

FO = 1 : Facteur prenant en compte les pertes par ombrage.

PR = 75% en moyenne, afin d'intégrer les pertes suivantes :

- *Pertes par "poussière ou saletés"* : Leur dépôt occasionne une réduction du courant et de la tension produite par le générateur photovoltaïque : ~3-6% [11]
 - *Pertes par dispersion de puissance nominale* : les modules photovoltaïques issus du processus de fabrication industrielle ne sont pas tous identiques. Les fabricants garantissent des déviations inférieures de 3% à 10% autour de la puissance nominale.
 - *Pertes de connexions* : La connexion entre modules de puissance légèrement différentes occasionne un fonctionnement à puissance légèrement réduite : ~3%
 - *Pertes angulaires ou spectrales* : Les modules photovoltaïques sont spectralement sélectifs, la variation du spectre solaire affecte le courant généré par ceux-ci.
 - *Pertes par chutes ohmiques*
 - *Pertes par température* : 5% a 14% (0,4% / °C)
 - *Pertes par rendement DC/AC de l'onduleur* : 6% [12]
 - *Pertes par suivi du point de puissance maximum dans l'onduleur* : 3%
-