

Où capter l'énergie solaire ? Comparaison des concepts spatiaux et terrestres

Mots clés

Énergie solaire,
Espace,
Transmission d'énergie sans fil,
Centrales solaires spatiales

■ Par Leopold SUMMERER, Franco ONGARO
Advanced Concepts Team, Agence Spatiale Européenne

Pourquoi aller dans l'espace pour couvrir nos besoins énergétiques ?

1. Introduction

L'énergie solaire compte parmi les sources d'énergie les plus prometteuses pour couvrir nos besoins énergétiques en constante augmentation. Le rôle encore quasi négligeable de l'énergie solaire dans le système énergétique actuel est dû à plusieurs facteurs, exposés dans cet article. Ces inconvénients sont en partie liés au lieu de sa conversion : la surface de la Terre.

Cet article compare les avantages des centrales solaires spatiales (par ex. illumination permanente, pas d'effets liés aux latitudes, au climat ou aux intempéries) et leurs inconvénients (transport de masses énormes en orbite, pertes dans les conversions et la transmission de l'énergie sans fil) à ceux des grandes centrales solaires terrestres.

Les travaux présentés ont été menés par l'équipe des études avancées de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ainsi que par deux consortiums industriels européens, chacun dirigé par un consultant indépendant en systèmes énergétiques [8][9].

2. L'enjeu

Dans les 10 à 15 ans à venir, une partie importante des centrales énergétiques européennes seront définitivement mises hors service. Outre leur remplacement, de nouvelles

devront être construites pour couvrir nos besoins énergétiques en croissance constante. La consommation d'énergie électrique de l'Union Européenne est actuellement de 2 851 TWh par an (année 2000), correspondant à 330 GWe pic en hiver et 280 GWe pic en été. Selon les estimations de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) et de la Commission européenne elle sera d'environ 515 GWe pic en 2020, dont deux tiers seront produits dans des centrales à construire. Dans le cadre d'un scénario *business as usual*, 531 milliards d'euros d'investissement sont actuellement prévus à cette fin [14] [7].

Le système énergétique actuel en Europe date des choix stratégiques faits dans les années 1960 et 1970.

Au plan mondial, le marché énergétique le plus dynamique se situe dans les pays en voie de développement. La Chine à elle seule prévoit de doubler sa consommation d'énergie dans les 15 ans à venir.

De nouveaux besoins vont augmenter davantage la consommation mondiale. Ainsi, l'ONU prévoit une aggravation importante de la pénurie d'eau potable due aux abaissements du niveau des nappes d'eau souterraines. En 2025, elle pronostique que deux tiers de la population mondiale seront touchés par une pénurie importante d'eau potable, nécessitant un recours à des moyens de traitement d'eau (par exemple : des centrales de désalinisation d'eau de mer) très coûteux en énergie [5][21].

L'ESSENTIEL

Le 21^e siècle nécessitera des sources d'énergie abondantes, accessibles et propres. L'option de capter l'énergie solaire dans l'espace compte parmi les plus intéressantes. Bien qu'elle soit techniquement possible, le coût de mise en orbite rend actuellement ces projets peu compétitifs. La comparaison avec des centrales solaires terrestres de taille équivalente permettrait de déduire les coûts de lancement nécessaires pour les rendre compétitifs.

SYNOPSIS

The 21st century will require abundant, accessible and environmentally neutral energy sources. Solar power satellites, transforming solar energy in space and transmitting it to Earth constitute an interesting long-term option. Although technically feasible, these concepts are not competitive with current launch costs. The present comparison with comparable terrestrial solar plants allowed to determine the required launch costs to make solar power from space an economically competitive option.

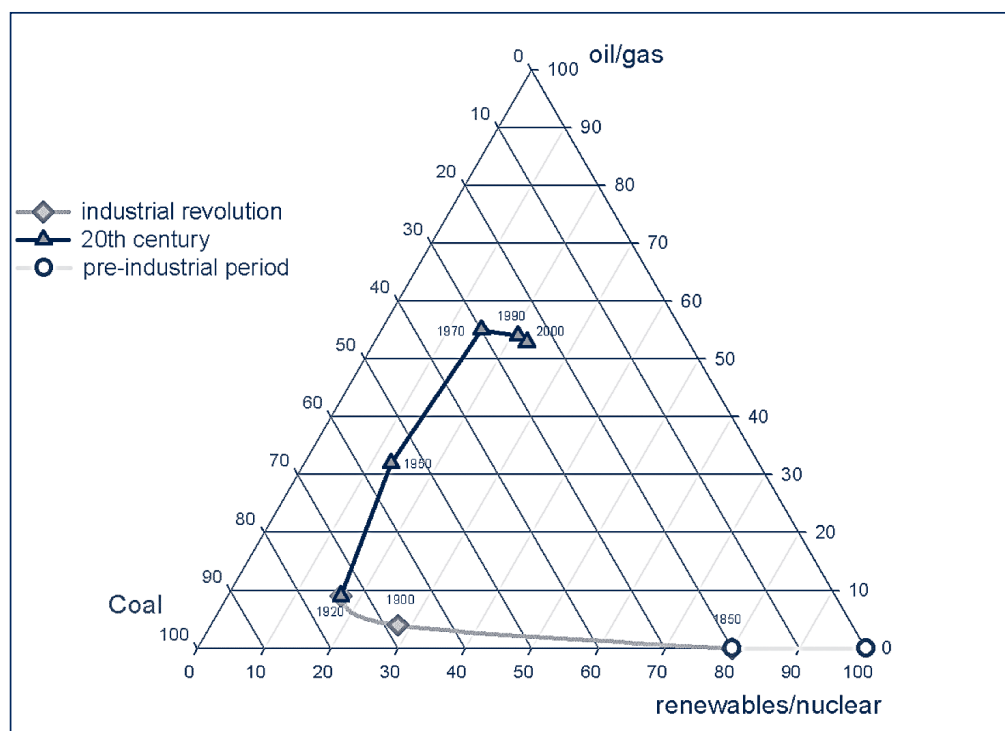


Figure 1. Triangle énergétique montrant l'évolution proportionnelle des sources d'énergie.

• Dépendance et effets écologiques

Déjà à l'heure actuelle, l'Europe est le plus grand importateur d'énergies (tout type d'énergies confondu) et surtout d'hydrocarbures. La Commission européenne prévoit une augmentation de cette dépendance (de 50 % aujourd'hui à 70 % en 2030). Nous importerons alors 92 % de nos besoins pétroliers et 81 % de nos besoins en gaz [7].

80 % de notre énergie provient d'hydrocarbures non renouvelables, dont les réserves seraient suffisantes pour quelques décennies encore, mais leur utilisation implique des émissions de CO₂.

Nous en émettons à l'heure actuelle 22 Gt (3,8 t par habitant par an), qui passeraient à 38 Gt en 2030 (soit une augmentation de 70 %). Tandis que l'émission des pays industrialisés est prévue de rester à un niveau élevé mais stable (OCDE : 13 t/hab), les émissions des pays en voie de développement vont fortement augmenter sans toutefois atteindre (de loin) le niveau moyen par habitant des pays OCDE (la Chine doublera ses émissions par habitant de 2,2 à 4,4 t par an.)

3. La perspective historique

L'importance toute primordiale de la disponibilité d'énergie abondante et bon marché pour le développement des sociétés incite à placer la situation actuelle dans un contexte historique plus large, pour en déduire les grandes lignes et les options à long terme.

Depuis la nuit des temps jusqu'au début des révolutions industrielles au milieu du 19^e siècle, toute notre énergie primaire provenait des sources entièrement renouvelables : de la biomasse, du vent et de l'eau (figure 1).

Au début de la révolution industrielle, autour de 1850, 80 % de nos besoins dérivait des sources renouvelables et environ 20 % du charbon. Les révolutions industrielles, basées sur la combustion du charbon, ont inversé cette relation. Après la 1^{re} guerre mondiale, la combustion du charbon livrait presque 80 % de nos besoins énergétiques.

L'avènement du transport individuel (avec les moteurs à combustion interne) et la découverte de gisements de pétrole et gaz en quantités considérables ont totalement changé, en l'espace de quelques années, les données : ainsi le pourcentage du charbon a petit à petit diminué au profit du pétrole et du gaz, qui alimentaient le développement du 20^e siècle.

L'augmentation du pourcentage du pétrole et du gaz fut soudainement stoppée par les chocs pétroliers des années 70 d'environ 60 %. Le nucléaire entra en jeu dans la production d'électricité, alors que la part du charbon continuait à diminuer.

Le choc pétrolier a constitué l'événement marquant qui a fait prendre conscience au monde occidental non seulement de sa dépendance stratégique face au pétrole, mais aussi des autres options énergétiques en général.

Il est alors peu étonnant que ce fut justement dans les années 70 que les alternatives aux hydrocarbures recevaient l'attention des chercheurs. En 1968, l'ingénieur américain d'origine austro-tchèque Peter Glaser propose, pour la première fois, des concepts techniques de centrales solaires spatiales [1].

Depuis, le pourcentage de l'ensemble pétrole et gaz est resté stable, avec une légère poussée du nucléaire et, dans une moindre mesure, des sources renouvelables (surtout hydro-électrique) et une diminution continue du charbon.

Lors de l'analyse de cette évolution proportionnelle, il ne faut pas oublier l'augmentation forte de la demande énergétique globale. Ainsi assiste-t-on à une diminution proportionnelle du charbon depuis presque 90 ans quoique la quantité brûlée ait augmenté constamment.

L'augmentation des besoins énergétiques globaux, en termes absolus, est impressionnante : elle suit le développement de la population mondiale mais elle est plus rapide. Alors que l'humanité (environ 3,3 milliards d'hommes) consommait 45 millions de GWh en 1965 (45 000 TWh) par an, les 6 milliards d'êtres humains consomment à l'heure actuelle 106 millions de GWh (106 000 TWh) : cette augmentation de 80 % de la population mondiale correspond à une augmentation de 135 % des besoins énergétiques.

4. Les tendances majeures

4.1. Vers des sources moins polluantes

En examinant le développement énergétique de plus près, on pourrait en déduire des cycles d'environ 50 à 70 ans. Dans cette logique, on assiste maintenant à la transition de la prédominance du pétrole à une augmentation massive de l'utilisation du gaz naturel comme source d'énergie.

Cette évolution s'inscrit dans une logique de transition vers des vecteurs d'énergie de moins en moins polluants en termes de CO_2 : du bois au charbon, du charbon au pétrole, et du pétrole au gaz naturel qui devrait être remplacé par l'hydrogène. (proportion entre carbone et hydrogène : bois ~ 10 à 1, charbon ~ 2 à 1, pétrole ~ 1 à 2, gaz ~ 1 à 4).

Ce phénomène est observable au niveau des prévisions pour les nouvelles centrales électriques : la majorité des centrales électriques actuellement en cours de construction ou en projet fonctionneront au gaz naturel, et vont couvrir en 2030 environ 31 % de nos besoins.

4.2. Séparation : sources et vecteurs énergétiques

La deuxième tendance incontestée est la séparation entre vecteurs et sources énergétiques, incarnée par

l'augmentation sur-proportionnelle des besoins électriques, qui vont, dans une optique minimale, doubler d'ici 2030 (de 15 000 TWh à plus que 31 000 TWh). L'introduction prévue de l'hydrogène (qui n'est pas source d'énergie) comme deuxième vecteur d'énergie va encore augmenter cette tendance [22][35].

4.3. Vers des sources renouvelables et nucléaires

Au plan mondial environ 40 % de l'électricité actuelle provient des centrales à charbon. Le gaz, le nucléaire et l'hydro-électrique produisent chacun autour de 17 %, le pétrole 8 %, ce qui laisse moins de 2 % aux sources renouvelables (non hydro-électriques).

Les prévisions de l'Agence Internationale pour l'Énergie prédisent qu'en 2030 la majorité de l'électricité sera encore produite avec du charbon – surtout par des pays en voie de développement.

Néanmoins tous les analystes prévoient également le développement le plus rapide pour les sources d'énergie renouvelables, avec un doublement tous les 10 ans.

La visualisation de ces tendances dans le triangle énergétique de la figure 1 conduirait à une évolution de cette ligne vers le coin « sources renouvelables et nucléaires », la seule région à pouvoir être qualifiée de durable.

5. Le rôle de l'espace

L'hydro-électrique est déjà largement utilisé, et ne présente dans la plupart des pays développés qu'un potentiel d'accroissement mineur. Toutes les autres sources renouvelables ont l'inconvénient de présenter une faible puissance surfacique (W/m^2). La biomasse représente un potentiel considérable d'une source neutre en carbone ; cependant avec seulement environ $0,6 \text{ W/m}^2$ la photosynthèse nécessiterait des surfaces considérables. L'énergie éolienne et solaire offre une puissance surfacique plus importante ($15 \text{ W}_e/\text{m}^2$) et en pleine expansion qui pourrait atteindre jusqu'à 15 % de la demande en énergie primaire d'ici 2020 en Europe.

Les centrales solaires spatiales ont le potentiel d'augmenter presque d'un ordre de grandeur la densité d'énergie solaire récupérée à la surface terrestre. Le flux solaire de $1\,365 \text{ W/m}^2$ dans l'espace est environ huit fois supérieur à sa moyenne terrestre (sur le long terme) à cause des cycles jour-nuit, des nuages et de l'absorption atmosphérique.

S'étant basée sur ces données fondamentales, l'Agence Spatiale Européenne a mené des études visant,

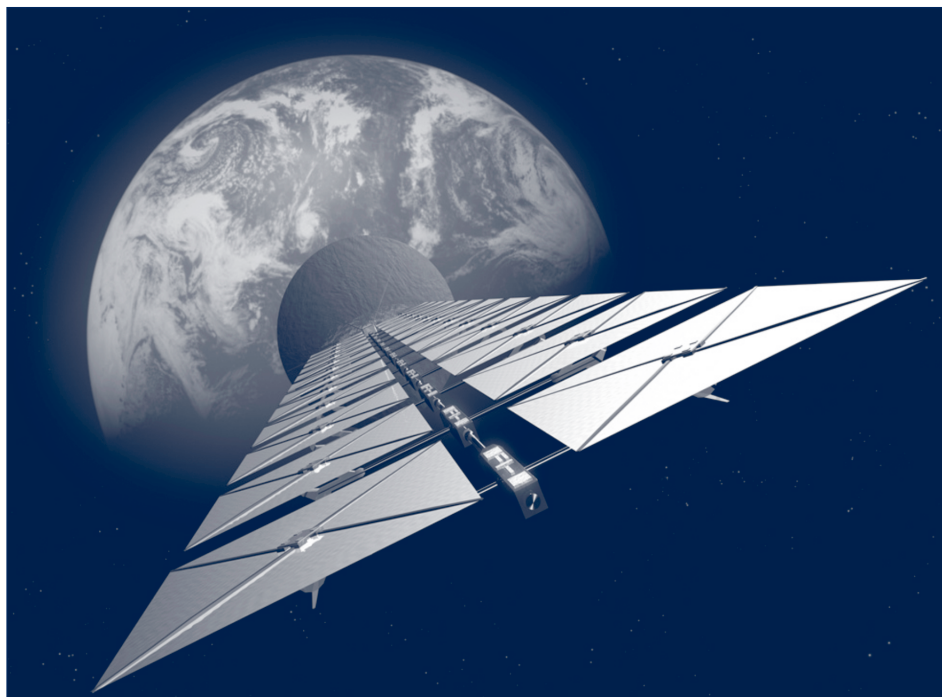


Figure 2. Vue d'artiste du "European Sail Tower concept".

pour la première fois, à comparer de façon objective et sur des bases techniques, les centrales solaires spatiales avec les concepts des centrales solaires terrestres à grande échelle [10][2][34][38].

6. Le concept des centrales spatiales solaires

Les centrales solaires spatiales captent l'énergie solaire avec de vastes panneaux photovoltaïques dans l'espace (différentes orbites possibles, dont l'orbite géostationnaire qui est la plus avantageuse pour les concepts actuels). De l'orbite, l'énergie est transmise sous forme de micro-onde vers une radiopile (« rectenna » en anglais) terrestre, qui est chargée de la reconversion en électricité.

Différents concepts de centrales spatiales solaires ont été proposés depuis l'article initiateur de Peter Glaser dans la revue américaine « Science » en 1968. [1] La masse et la taille de ces différents concepts de centrales sont de quelques ordres de grandeur plus importants que tout ce qui a été mis en orbite les derniers cinquante ans [29].

La station spatiale internationale (ISS), l'objet le plus grand et le plus massif jamais lancé, aura une masse de 450 t, ses panneaux solaires produiront 100 kW_e et elle couvrira l'équivalent d'un terrain de foot. Le *European sail tower concept* pour les centrales solaires spatiales prévoit une masse totale de 2140 t, dont 1600 t pour la seule antenne émettrice, et une longueur de 15 km avec une largeur de 300 m [8] ; elles sont composées de

modules de 9 t transportés individuellement dans l'espace. Les interventions humaines prévues dans les concepts des années 1970 sont désormais remplacées par la construction automatique et robotique en orbite.

Les dernières améliorations apportées par des chercheurs japonais réduisent les masses des éléments les plus lourds : l'antenne et la distribution d'énergie dans la centrale spatial [26][25]. Cette réduction a été rendue possible par l'introduction de miroirs déployables (transmission d'énergie sous forme de lumière au lieu de câbles) et des antennes de type « sandwich » intégrant des couches photovoltaïques d'une côté et la génération de micro ondes par semi-conducteurs au lieu de magnétrons de l'autre côté.

Contrairement aux éléments spatiaux, les techniques terrestres de réception et de reconversion des micro-ondes en électricité n'ont guère changé depuis les expériences pionnières de Bill Brown des années 1960 [16]. La figure 3 montre l'aspect schématique d'une radiopile. Deux fréquences sont retenues le plus fréquemment : 2,45 et

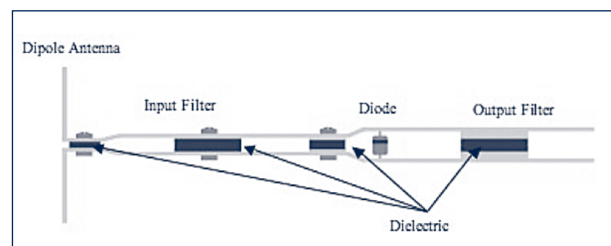


Figure 3. Aspect schématique d'une radiopile

Taille des centrales GW _e	Concept	Coût de l'électricité €/kWh	Coûts de lancement permis (€/kg) ¹
0,5	terrestre espace	0,090 (0,059) 0,280 (0,280)	-
5	terrestre espace	0,082 (0,053) 0,044 (0,044)	750 (200)
10	terrestre espace	0,080 (0,051) 0,047 (0,046)	620 (90)
50	terrestre espace	0,076 (0,049) 0,035 (0,034)	770 (270)
100	terrestre espace	0,075 (0,047) 0,034 (0,033)	770 (250)
500	terrestre espace	0,076 (0,050) 0,039 (0,039)	670 (210)

Tableau 1 : Comparaison des coûts des centrales spatiales - terrestres fournissant la puissance de base avec stockage par hydrogène et par des bassins d'eau (entre parenthèses).

5,8 GHz à cause de leur attribution aux applications « ISM » (industrielles, scientifiques et médicales) et leur non-absorption par l'atmosphère terrestre. Des rendements de conversion micro-ondes -> électrique de plus de 80 % ont été atteints, conduisant à des attentes concernant le rendement total de la transmission espace – réseau électrique terrestre de 50 à 60 %. [5][29]

7. La comparaison avec les centrales solaires terrestres

Les centrales spatiales ont été comparées à des centrales solaires terrestres opérant à partir de conversions solaire-thermique et photovoltaïque. Plusieurs centrales de ce type existent déjà aux Etats-Unis et en Europe du sud, et quelques autres (solaire-thermiques) sont en cours de construction. [11][12]

Tout en tenant compte de leurs différents stades de maturité, cette comparaison se base sur les mêmes avancées technologiques.

Différents niveaux de puissance ont été comparés, de 0,5 GWe jusqu'à 500 GWe, le besoin intégral d'électricité en Europe en 2020. Les comparaisons ont fait la différence entre des centrales fournissant la puissance de base et celle des demandes de pointe. Les comparaisons se sont limitées à l'Europe continentale, incluant l'Afrique du Nord.

Les différentes options terrestres retenues sont : les centrales solaires-thermiques à base de collecteurs linéaires paraboliques (*parabolic through concepts*), les centrales solaires-thermiques à base de tours solaires (*solar tower concepts*), ainsi que les unités photovoltaïques distribuées.

Les centrales terrestres nécessitent des systèmes importants de stockage d'énergie. La comparaison s'est basée sur deux systèmes : le stockage par hydrogène (production par piles à combustible et stockage sous forme de gaz dans des sphères sous pression) et le stockage dans des bassins d'eau élevés (*pumped hydro storage*) lorsque la physionomie du terrain le permet. [33]

8. Les résultats de l'étude technico-économique

Le coût de la mise en orbite

Le paramètre singulier le plus important pour la comparaison des coûts des deux concepts est le coût de lancement, normalement donné sous forme de € par kg mis en orbite basse. Contrairement aux prévisions, le coût de lancement en orbite n'a guère changé depuis les années 1960 (entre 10 000 et 20 000 €/kg, selon le lanceur). En plus de l'absence de développements technologiques majeurs dans le secteur des lanceurs, le manque d'un marché dynamique de lancement est un facteur de cette

[1] Coûts de mise en orbite permis pour être compétitifs avec les coûts des scénarios terrestres.

Taille des centrales GW _e	Concept	Coût de l'électricité €/kWh	Coûts de lancement permis (€/kg)
0,5	terrestre espace	10,6 (10,2) 441	-
5	terrestre espace	7,6 (6,6) 36	-
10	terrestre espace	5,3 (4,0) 19	-
50	terrestre espace	1,09 (0,7) 0,871	155 (-)
100	terrestre espace	0,673 (0,48) 0,246 (0,245)	958 (540)
150	terrestre espace	0,532 (0,280) 0,131 (0,130)	1615 (605)

Tableau 2 : Comparaison des coûts des concepts spatiales - terrestres fournissant la puissance de pointe avec stockage par hydrogène et par des bassins d'eau (entre parenthèses).

stagnation. La construction des centrales solaires spatiales nécessitant des lancements extrêmement fréquents, les études sont souvent basées sur une réduction du coût de lancement similaire à la réduction des coûts du transport aérien avec l'augmentation des vols.

Dans le cadre de cette comparaison, cette approche a été considérée trop aléatoire. Le coût de la mise en orbite a alors été traité comme paramètre libre avec le coût des ergols (une fraction infime des coûts actuels) comme limite inférieure et le coût actuel comme limite supérieure. La réduction des coûts de la mise en orbite a été supposée de 20 %, avec chaque doublement des masses mise en orbite. La même learning curve a été pris comme base pour prévoir le coût futur des cellules photovoltaïques.

Les tableaux 1 et 2 montrent les résultats de cette comparaison en termes de coût final de production d'électricité.

Les hypothèses prises permettent de tirer quelques conclusions générales :

1. Sur une durée de vie de 30 ans, les concepts spatiaux et terrestres obtiennent de fournir de l'électricité à des coûts comparables.
2. L'option terrestre offre la possibilité d'une large décentralisation tandis que les stations de réception terrestres des centrales spatiales seraient d'une taille minimale de quelques GW.
3. Le choix du système de stockage a une grande influence sur le coût de l'électricité produit par les

centrales terrestres destinées à fournir de l'électricité de base (*base load power supply*).

4. Les concepts spatiaux ne sont pas compétitifs pour des centrales de taille relativement petite, même avec la mise en orbite gratuite.
5. Plus les centrales sont grandes, plus l'option spatiale devient intéressante.

Références

- [1] P. Glaser. "Power from the Sun: Its Future". Science 162, 3856, 1968.
- [2] L. Summerer, F. Ongaro, M. Vasile, and A. Gálvez. "Prospects for space solar power work in Europe". Acta Astronautica, 53:571-575, 2003.
- [3] "Débat national sur les énergies". web, 2003. <http://www.debat-energie.gouv.fr> (acc. Sept 03)
- [4] T. Wirth, C. B. Gray, and J. Podesta. "An energy strategy for the future". Foreign Affairs, 82(4):132- 155, July/August 2003.
- [5] UNEP. "Global Environment Outlook, Past Present and Future Perspectives", Earthscan Publications, London, 2002.
- [6] Hoffert & al. "Advanced technology path to global climate stability: Energy for a greenhouse planet". Science, 298:981ff, Nov. 2002.
- [7] "Energy" - "Towards a European strategy for the security of energy supply". Green Paper ISBN 92-894-0319-5, European Commission, 2001.
- [8] V. Bladow and al. "Earth and Space-based power generation systems - A comparison study". SPS'04, Granada, June 2004 (in press).
- [9] V. Quaschnig et al. "Comparison of Solar Terrestrial and Space Power Generation for Europe". SPS'04, Granada, June 2004 (in press).
- [10] L. Summerer, F. Ongaro, and A. Gálvez. "Solar Power from

- Space – Assessment of Potentials for Europe*". SPS'04, Granada, June 2004 (in press).
- [11] R. Manuel, D. Martinez, and Z. Eduardo. "Terrestrial Solar Thermal Power Plants On the Verge of Commercialization". SPS'04, Granada, June 2004 (in press).
- [12] F. Trieb, S. Kronshage. "Concentrating on Solar Power in the Trans-Mediterranean Renewable Energy". SPS'04, Granada, June 2004 (in press).
- [13] W. Seboldt. "Space and Earth based solar power for the growing energy needs of future generations". Acta Astronautica, (55) 389-399, 2004
- [14] IEA/OECD. "World Energy Outlook 2002. Technical report", International Energy Agency, 2002
- [15] W. Seboldt, M. Klimke, M. Leipold, and N. Hanowski. "European sail tower SPS concept". Acta Astronautica, 48(5-12):785-792, 2001.
- [16] R. Dickinson. "Wireless power transmission technology state of the art the first Bill Brown lecture". Acta Astronautica, 53(4), 561-570(10), 2003.
- [17] L. Summerer, M. Vasile, R. Biesbroek, F. Ongaro. "Space and Ground Based Large Scale Solar Power Plants – A European Perspective", IAC-03/R.1.09, 2003.
- [18] G. Czisch, S. Kronshage, and F. Trieb. "Interkontinentale Stromverbünde - Perspektiven für eine regenerative Stromversorgung". In AEWVA Conference 2001, FVS Themen 2001 AWEA conference 2001.
- [19] G. Glatzmaier, D. Blake, and S. Showalter. "Assessment of methods for hydrogen production using concentrated solar energy. Technical Report" NREL/TP-570-23629, (US) National Renewable Energy Laboratory, January 1998.
- [20] L. Summerer. "Space and Terrestrial Solar Power Sources for Large-scale Hydrogen Production". Hypothesis V, Sardinia (I), p.233-258, 2003
- [21] P. Jagannathan, R. Gopalaswami. "An India-Centred Global Mission for Seawater Desalination Using Energy from Space". SPS'04, Granada, June 2004 (in press)
- [22] T. Nejat Veziroglu and F. Barbis. "Hydrogen energy technologies. Emerging Technology Series", UNIDO, Vienna (A), 1998.
- [23] J. Strickland. "Advantages of geosynchronous solar power satellites for terrestrial base-load electrical supply compared to other renewable energy sources or Why civilisation needs solar power satellites". In P Glaser, F. Davidson, and K Csigi, editors, Solar Power Satellites - A space energy system for Earth. John Wiley & Sons, 1998.
- [24] J. Mankins, H. Feingold, M. Strancati, A. Friedlander, M. Jacobs, D. Cornstock, C. Christensen, G. Maryniak, and S. Rix. "Space solar power - a fresh look at the feasibility of generating solar power in space for use on Earth". Technical Report SIAC-97/1005, NASA, SAIC, Futron Corp., April 1997.
- [25] N. Takeichi, O. Ueno, M. Oda. "Solar Power Satellite System Configured by Formation Flying". SPS'04, Granada, June 2004 (in press).
- [26] N. Kaya. "A new concept of SPS with a power generator/transmitter of a sandwich structure and a large solar collector. Space Energy and Transportation", 1(3):205, 1996.
- [27] L. Summerer, G. Pignolet. "SPS European Views: Environment and Health", URSI 2004, Pisa (I), in press, 2004.
- [28] L. Summerer, F. Ongaro, T. Pipoli. "Space and Terrestrial Solar Power Sources for Large-scale Hydrogen Production – A Comparison", HyForum 2004, Beijing (Ch), Mai 2004.
- [29] P. Glaser, F. Davidson, and K. Csigi. "Solar Power Satellites". John Wiley & Sons, 1998
- [30] L. Metzroth. "Renewables information 2003". IEA Statistics, International Energy Agency, Paris, 2003
- [31] "Le barometre du photovoltaïque 2002". EurObserv'ER, 154:41, April 2003.
- [32] S. Rahman. "Green Power: What is it and where can we find it ?" IEEE Power and Energy Magazine, ISSN 1540-7977/03, January/February 2003.
- [33] V. Quaschnig and M. B. Muriel. "Solar power - photovoltaics or solar thermal power plants ?" In Proceeding VGB Congress, Brussels, Oct. 2001.
- [34] K. Kato and K. Kurokawa. "Very Large Scale Photovoltaic Power Generation - VLS-PV". Technical report, International Energy Agency, Vienna, Austria, 2001.
- [35] J. Maddy, S. Cherryman, F.R. Hawkes, D.L. Hawkes, R.M. Dinsdale, A.J. Guwy, G.C. Premier, and S. Cole. "Hydrogen 2003. ERDF report", University of Glamorgan, Pontypridd (UK), 2003.
- [36] A.I. Miller and R. B. Duffey. "Sustainable and economic hydrogen co-generation from nuclear energy in competitive power markets". In International Energy Workshop, IIASA, Laxenburg, Austria, June 24-26 2003.
- [37] C.B. Christensen. "The economics of space solar power". In SPACE V, Proceedings of Space 96 conference, pages 260-268. 1996.
- [38] ESA - Advanced Concepts Team. Advanced Power Systems. website. <http://www.esa.int/act> (acc. Sept.04).

Les auteurs

Leopold Summerer a obtenu son doctorat en physique de l'Institut atomique de Vienne, Autriche (Université technique) et un master en sciences spatiales de l'*International Space University*, Strasbourg. Il a ensuite effectué un post-doctorat au sein de l'Agence Spatiale Européenne ; il y est actuellement chargé de recherche (*advanced space power systems*) dans le *Advanced Concepts Team*.

Franco Ongaro a reçu son degré de docteur-ingénieur en aéronautique et espace du Polytechnique de Milan. Il travaille à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) depuis 1987. Il est depuis 1998 en charge du bureau d'études et concepts avancés.