

Transmission d'énergie sans fil

État de l'art et perspectives d'applications

■ Par Lucien DESCHAMPS
Secrétaire Général Prospective 2100

Mots clés

Électricité,
 Transport,
 Micro-ondes,
 Laser,
 Espace

1. Rappel historique

Le concept de transmission de l'énergie électrique dans l'espace libre sans guide matériel n'est pas nouveau ; il fut étudié dès la fin du XIX^{ème} siècle par Henry Hertz qui réalisa en 1888 des expérimentations de transmission d'énergie pulsée à 0,5 GHz [1] puis par Nicolas Tesla [2] qui imagina la perspective de distribution d'énergie sans fil.

La première véritable transmission d'énergie sans fil « TESF » avec recherche d'un certain rendement fut effectuée aux Etats-Unis par le « Spencer Laboratory » de la Société Raythéon à Burlington en 1963 [3]. Les caractéristiques de cette première liaison étaient : 400 W transmis à 7 m 40 à la fréquence de 2,45 GHz avec un rendement de transmission courant continu émission/courant continu réception de 13 %.

Depuis cette première démonstration trois faits marquants historiques méritent d'être soulignés [4] [5] :

- a. Alimentation en énergie d'un hélicoptère miniature par un faisceau micro-ondes : 270 W à 2,45 GHz – masse de l'hélicoptère : 2,3 kg – altitude du vol : 15 m. Cette expérimentation, largement médiatisée par le « Spencer Laboratory » en 1964 avait le double objectif

de montrer à la fois, la faisabilité et une perspective d'application [6].

- b. Expérimentation en 1975 par le « Jet Propulsion Laboratory » (JPL) (USA) d'une liaison 2,388 GHz de 1,55 km de longueur sur le site de Goldstone dans le désert de Mojave délivrant au niveau de la réception une puissance courant continu (CC) de 3 kW.
- c. Le record, toujours d'actualité, de rendement de transmission en bande S - ISM (2,4 - 2,5 GHz - Domaine Industriel, Scientifique et Médical), obtenu également en 1975 avec les technologies mises en œuvre dans le cadre de l'expérimentation précédente du JPL, est de 54 % (courant continu émission / courant continu réception). Ce résultat fut obtenu en 1975 pour une puissance CC réception de 495,6 W, une distance entre les antennes de 1,7 m et une fréquence de 2,4469 GHz [7] [8]. Le rendement micro-ondes / CC de 72 % du magnétron utilisé à l'époque constituait le point faible de la chaîne de conversion.

Les technologies d'aujourd'hui, par exemple les nouveaux magnétrons développés en Russie dont le rendement atteint 83 %, pourraient permettre un rendement global de 64 %. Un tel niveau de rendement ouvre d'intéressantes perspectives d'applications qu'il convient d'évaluer.

L'ESSENTIEL

Le concept de transmission de l'énergie électrique dans l'espace libre sans guide matériel fut étudié dès la fin du XIX^{ème} siècle par Heinrich Hertz. Après un rappel historique du développement des techniques de Transmission d'Énergie sans Fil (TESF) cette publication présente les caractéristiques actuelles et les perspectives des techniques micro-ondes et lasers. Le rendement global de transmission micro-ondes dépasse aujourd'hui 50%, tandis que le rendement de transmission par faisceau laser reste encore faible de quelques %. Les perspectives d'applications des techniques TESF sont variées et s'étendent depuis la résolution de problèmes particuliers terrestres : faible puissance-faible distance, jusqu'à des applications concernant des liaisons « multi-gigawatts » sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Une approche de développement étape par étape est recommandée.

SYNOPSIS

Heinrich Hertz, as soon as the end of the XIXth century, studied the concept of electric power transmission in free space without any material guide. After a short historical reminder on development of Wireless Power Transmission techniques (WPT), this communication describes the present characteristics and the prospects of microwaves and lasers techniques. Today, the global efficiency of microwaves transmission goes beyond 50% as the efficiency of the transmission per laser beam still remains of a few %. The prospects of applications of the WPT techniques are various and range from specific terrestrial short links of low power to applications concerning multi-gigawatts links with distances of several thousands of kilometres. A step-by-step approach is recommended.

2. Les techniques de transmission d'énergie sans fil

Une liaison de transmission d'énergie sans fil (TESF) comprend :

Côté émission, un générateur d'ondes électromagnétiques généralement alimenté en courant continu (CC). Ce convertisseur peut être soit un tube (magnétron,...) soit un dispositif semi-conducteur (transistor à effet de champ,...) soit encore un laser dans le cas d'une transmission laser. Après conversion, l'énergie est rayonnée par une antenne.

Côté réception, une antenne de type rectenna (rectifier antenna) constituée par exemple, de doublets demi-ondes et de diodes Schottky collecte le faisceau et délivre du CC. Dans une autre configuration une antenne alimente des tubes convertisseurs « ondes électromagnétiques / CC ». Dans le cas d'une transmission laser, l'énergie serait collectée par cellule photovoltaïque.

Le rendement global d'une transmission comprend trois composantes fondamentales :

2.1. Le rendement de conversion courant continu / ondes électromagnétiques (convertisseur et antenne d'émission)

La production de micro-ondes est faite actuellement de façon courante pour diverses applications, au nombre desquelles on citera : les communications spatiales, les utilisations du radar et différentes applications industrielles, médicales ou scientifiques. La génération peut se faire par utilisation de tubes : tubes à ondes progressives (TOP), klystrons, gyrotrons, magnétrons (rendement atteignant 83 % à 2,45 GHz), ... ou par des dispositifs à semi-conducteurs : transistors à effet de champ (rendement atteignant aujourd'hui 40 %),...

Le coût de la conversion par tubes est de l'ordre de 1€ / W pour les applications autres que pour les fours et moins de 0,02 € / W, en raison de l'importance du marché, pour les applications aux fours à micro-ondes.

Le coût de la conversion par dispositifs à transistors à effet de champ est passé de 30 € / W en 1995 à 17 € / W en 1999 pour des unités de 60 W continu en bande C - ISM (5,725 - 5,875 GHz) [9].

L'utilisation de dispositifs à semi-conducteurs permet d'envisager des antennes de type « sandwich » associant cellules solaires et génération micro-ondes avec une réduction sensible des masses par rapport aux solutions à tubes [10].

Pour ce qui concerne la production de faisceaux laser : lasers chimiques, lasers à électrons libres ou lasers

semi-conducteurs les rendements de conversion sont encore très inférieurs (< 40 %) aux valeurs obtenues avec les techniques micro-ondes. Une technique apparaît toutefois aujourd'hui prometteuse : les lasers pompés par le soleil qui permettent d'éviter l'étape de conversion énergie solaire / courant continu (rendement énergie laser produite / énergie solaire incidente 20 % [11]). Le coût de la conversion laser varie suivant les techniques de 20 à 50 € / W.

2.2. Le rendement de transmission entre l'émetteur et le récepteur mettant en jeu en particulier la diffraction et l'atténuation dans l'atmosphère et l'humidité éventuelles

Le rendement de transmission entre les antennes d'émission et de réception tient compte de règles de diffraction qui mettent en jeu : l'étendue des antennes d'émission et de réception, la fréquence et la distance entre les antennes. Ainsi, un rendement de transmission de 84% peut être obtenu si ces paramètres satisfont la relation :

$$D_E D_R = 2,44 \lambda L$$

D_E : diamètre de l'antenne d'émission en m
 D_R : diamètre de l'antenne de réception en m
 L : distance entre les antennes en m
 λ : longueur d'onde en m

Domaine des micro-ondes :

Le tableau suivant permet de situer quelques ordres de grandeur sur les perspectives de transmission à distance de la TESH dans le domaine des longueurs d'onde centimétriques et millimétriques pour des antennes de 30 mètres de diamètre. Il met en évidence l'avantage d'une transmission en longueur d'onde très courte.

| Cas d'une transmission avec 84 % de rendement et $D_E = D_R = 30$ m | | |
|--|-----------|-----------------------------|
| F GHz | λ | Distance entre antennes = L |
| 2,45 | 12,24 cm | 3 km |
| 5,8 | 5,17 cm | 7 km |
| 24 | 1,25 cm | 30 km |
| 35 | 0,86 cm | 43 km |
| Laser | 1000 nm | 368 000 km |

Le même rendement de transmission de 84 % peut être obtenu à 2,45 GHz entre l'orbite géostationnaire et le sol avec une antenne d'émission en orbite de diamètre $D_E = 1000$ m et une antenne de réception au sol de diamètre $D_R = 10 000$ m.

L'atténuation des micro-ondes dans l'atmosphère et l'humidité est pratiquement négligeable jusqu'à 3 GHz. Au-delà de cette fréquence, l'atténuation croît avec la fréquence.

Domaine de l'optique :

La relation précédente donne une portée de transmission de 368 000 km pour un rendement de 84 % avec un faisceau laser de 1000 nm de longueur d'onde et des antennes d'émission et de réception de 30 m de diamètre. Mais une telle portée n'a un sens qu'à la condition que la transmission ait lieu hors de l'atmosphère, car la transmission des faisceaux lasers à travers l'atmosphère s'effectue avec un assez mauvais rendement en raison de différentes bandes d'absorption liées à la vapeur d'eau, au CO₂, à l'O₃ et à différentes autres composantes atmosphériques, même entre 840 et 890 nm où il existe des fenêtres d'absorption minimale [12].

Ces quelques exemples soulignent les perspectives et aussi les limitations des micro-ondes (fréquence de 1 à quelques centaines de GHz) et des lasers (longueur d'onde de l'ordre de 1 000 nm).

Parmi les critères de choix de la fréquence et de dimensionnement des systèmes spatiaux il convient également de souligner les contraintes de masse et de température qui nécessitent des compromis puisque l'augmentation de température conduit à une réduction de la durée de vie du système.

2.3. Le rendement de conversion ondes électromagnétiques / courant continu (antenne et convertisseur de réception)

La reconversion de l'énergie d'un faisceau de micro-ondes en énergie électrique est un problème qui a reçu sa solution depuis plusieurs années déjà. L'utilisation de doublets demi-ondes associés à des détecteurs Schottky constitue une technique qui a fait ses preuves dès 1977 avec un rendement atteint de 91,4 % à 2,45 GHz [13] tandis qu'en 1997, un rendement de 82 % était obtenu à 5,8 GHz [14]. Le coût de conversion reste, en l'absence de grands développements, de l'ordre de 25 €/W à 2,45 GHz pour des unités de quelques dizaines de W au maximum.

Une solution alternative pour la conversion des ondes électromagnétiques en courant continu est l'utilisation de tubes : magnétrons, klystrons ou CWC (cyclotron wave converters) développés en Russie [15]. C'est ce dernier dispositif qui présente le meilleur rendement : 83 % pour des puissances unitaires de l'ordre de 10 kW. Le meilleur rendement obtenu avec des magnétrons inverses n'est que de 41 %.

En ce qui concerne la reconversion de faisceaux lasers en électricité la voie qui paraît la plus prometteuse est

celle de la reconversion photovoltaïque. Un rendement de 59 % a été obtenu avec des cellules à base d'Arséniure de Gallium : Al Ga As - 1,7 W - 826 nm [16].

2.4. Micro-ondes ou lasers

- En ce qui concerne les micro-ondes, les techniques d'émission et de réception sont aujourd'hui assez bien maîtrisées. A titre d'exemple, on peut souligner les magnétrons utilisés dans les fours à micro-ondes ou ceux qui sont utilisés pour le chauffage industriel, capables de fournir jusqu'à 6 kW de puissance à une fréquence de 2,45 GHz et avec une efficacité supérieure à 70 % et pouvant dépasser aujourd'hui 80 %. Pour la réception, des antennes détectrices permettent dès à présent des rendements de conversion supérieurs à 90 %. L'ensemble de ces éléments montre que si les dimensions des antennes d'émission et de réception sont optimisées, le rendement global d'une transmission micro-ondes devrait pouvoir dépasser 60 %.

Les performances des tubes et des semi-conducteurs devront toutefois encore évoluer, afin d'en améliorer la fiabilité et la durée de vie, en particulier pour l'environnement spatial.

- L'avantage d'une transmission à longueur d'onde très courte telle qu'envisageable dans le cas de la transmission laser a été mentionné précédemment. La technique laser se développe aujourd'hui rapidement et de façon très favorable, mais n'en demeure pas moins confrontée à une série de difficultés pratiques concernant le développement de sources, le pointage des faisceaux et la reconversion de l'énergie émise en électricité.

Si aujourd'hui les rendements de transmission par faisceau laser ne dépassent pas 2,5 % à 3 %, des études montrent dès à présent qu'un rendement global de l'ordre de 20 % devrait pouvoir être atteint à plus ou moins long terme : conversion par laser à électrons libres 40 %, transmission 90 % et reconversion par cellules adaptées 60 %.

3. Panorama de perspectives d'applications

L'absence de liaison matérielle entre un générateur d'énergie et le récepteur utilisateur peut présenter un grand intérêt pour diverses applications : sol-sol, sol-air, sol-espace-sol, espace-espace et espace-sol. Ces applications peuvent également être classées par distances de transmission : courtes distances (< 1km), moyennes distances (jusqu'à quelques centaines de km) et grandes distances (plusieurs milliers de km). Les niveaux de puissance envisagés et les fréquences dépendent beaucoup des applications.

3.1. Liaisons point-à-point sol-sol

- recherche de séparation matérielle entre un générateur et un récepteur,
- sites inaccessibles,
- environnements hostiles,
- autres contraintes spécifiques interdisant les câbles.

3.2. Alimentation énergétique de mobiles

- véhicules pour sites irradiés ou autres environnements hostiles,
- alimentation en énergie d'avions ou de lanceurs,
- véhicules lunaires ou martiens.

3.3. Alimentation de plates-formes stratosphériques ou de ballons

- télécommunications,
- téléphonie (par exemple relais pour téléphonie sans fil)
- surveillance (incendie,...), cartographie, recherche,...,
- relais d'énergie entre sol et plates-formes ou centrales spatiales.

3.4. Liaisons espace-espace

- alimentation en énergie de plates-formes ou véhicules spatiaux à partir de centrales orbitales d'énergie,
- réseau d'énergie spatial,
- alimentation en énergie d'un véhicule spatial pour sa propulsion,
- liaison d'énergie entre une base martienne et une centrale d'énergie orbitale.

3.5. Liaisons sol-espace

- alimentation de satellites de télécommunications pendant les périodes d'ombre (laser),
- renforcement du flux d'énergie incident sur des satellites en orbite géostationnaire (GEO),
- recharge des batteries de satellites GEO,
- propulsion laser pour transferts d'orbites vers l'orbite géostationnaire ou des orbites lunaires,
- régénération de la couche d'ozone [17],
- alimentation de bases lunaires.

3.6. Liaisons sol-espace-sol

- transmissions à très grandes distances ou intercontinentales d'énergie via relais spatiaux.

3.7. Liaisons espace-sol

- illumination de villes proches des pôles [18],
- centrales solaires spatiales,
- alimentation en énergie à partir d'une centrale spatiale de lanceurs depuis leur décollage du sol terrestre,
- centrales d'énergie lunaires.

La mise en oeuvre de liaisons TESF pourrait entraîner des perturbations nouvelles sur les systèmes de communication d'autres applications du domaine ISM. Les harmoniques générés à l'émission et à la réception devront être ramenés, par filtrage, à un niveau acceptable [19]. Ces effets sont actuellement à l'étude [20].

Certaines applications terrestres nécessiteront également la prise en compte de contraintes d'environnement liées en particulier à l'interaction possible des micro-ondes avec des êtres vivants (niveau d'énergie limite adopté dans le cadre du projet « centrale solaire spatiale » DOE NASA : 230 W / m^2 à 2,45 GHz).

Les fréquences envisagées pour les liaisons TESF sont aujourd'hui choisies dans les bandes ISM telles par exemple :

- 2,45 GHz (liaisons à moyennes et grandes distances) : l'absence de pertes lors de la traversée de l'atmosphère et l'insensibilité à l'humidité font de cette fréquence un bon choix pour les liaisons à grandes distances.
- 5,8 GHz (liaisons à moyennes et grandes distances) : tout en étant moins favorable que 2,45 GHz pour la traversée de l'atmosphère et l'humidité, cette fréquence peut constituer un bon optimum si l'on tient compte de la taille des antennes.
- 35 GHz, 94 GHz et 245 GHz (liaisons courtes (air) et à grandes distances (espace)) : fréquences envisageables pour des applications où des pertes atmosphériques sont acceptables.
- Visible (laser) (liaisons courtes et à grandes distances) : envisageable pour des applications où des interruptions dues aux conditions atmosphériques sont acceptables.

4. Quelques applications spatiales [21] [22]

Après le panorama présenté dans le paragraphe précédent nous nous limiterons ici à souligner trois perspectives d'applications dans l'espace.

4.1. Centrales orbitales d'énergie [23] [24]

Tous les satellites ont aujourd'hui leur propre source d'énergie à bord : en général quelques kW au maximum. L'augmentation des puissances unitaires envisagées dans l'avenir (quelques dizaines à la centaine de kW) va entraîner des dimensions importantes des sources (panneaux photovoltaïques, radiateurs de plusieurs centaines à milliers de m^2) et engendrer ainsi des problèmes de conduite et d'exploitation des engins spatiaux.

Une solution consiste à séparer la source de production d'énergie de la plate-forme utilisatrice et de trans-

mettre l'énergie à l'utilisateur par faisceau micro-ondes ou laser.

De premières études technico-économiques de ce concept ont montré des perspectives intéressantes pour des puissances dépassant la centaine de kW. Les avantages seraient :

- Réduction de la taille et du coût du satellite utilisateur.
- Avantages opérationnels pour l'utilisateur.
- Possibilité de réseau électrique spatial.
- Réduction du coût de l'énergie (actuellement de 600 à 800 € / kWh en orbite c'est-à-dire près de 10000 fois le coût sur Terre).

4.2. Transmission d'énergie par relais spatiaux [25] [26]

L'importance potentielle de certains gisements d'énergie hydraulique par exemple dans le massif de l'Himalaya, en Amérique du Sud, ou au Canada et l'éloignement de ceux-ci des sites de consommation pose un important problème de transport d'énergie à grande distance ou intercontinental.

Kraft Ehrlicke (USA) a suggéré en 1972 d'utiliser pour de telles transmissions point-à-point terrestres un faisceau micro-ondes avec réflexion en orbite géostationnaire.

Les progrès réalisés aujourd'hui dans le domaine des micro-ondes pourraient permettre une telle transmission à 2,45 GHz avec un rendement supérieur à 50 % [27]. Des études récentes soulignent l'intérêt économique de telles solutions. Une transmission entre le Canada et le Japon pourrait ainsi, selon l'auteur d'une étude canadienne [28], présenter un coût de l'ordre de 10 cents canadiens par kWh pour une liaison d'une puissance de la gamme du GW et rendre l'énergie électrique canadienne compétitive au Japon.

4.3. Centrales solaires spatiales [29] [30] [31] [32]

Les importants besoins énergétiques prévisibles au XXI^{ème} siècle - 12 milliards d'habitants en 2100 - nécessiteront la mise en oeuvre d'une politique énergétique à la fois d'économie et de développement d'énergies nouvelles utilisant des ressources renouvelables ou effectivement inépuisables. L'utilisation de l'énergie solaire est gênée sur terre par les fluctuations de l'énergie reçue. Aux variations périodiques dues à l'alternance des jours, des nuits et des saisons s'ajoutent les évolutions de la nébulosité. La mise en oeuvre de centrales solaires en orbite géostationnaire permettrait par contre d'exploiter le Soleil pratiquement en permanence et de fournir ainsi une source d'énergie de base.

Le concept de centrale solaire spatiale (SPS - Solar Power Satellite) fut proposé par Peter Glaser en 1968. Depuis cette date, le concept a fait l'objet d'un grand

nombre d'études et les variantes sont très nombreuses. Les premiers projets envisagés par le DOE et la NASA en 1980 proposaient l'installation dans l'espace en orbite géostationnaire d'une soixantaine de centrales de puissance unitaire de 5 GW. Les satellites présentaient une surface de cellules photovoltaïque d'une cinquantaine de km² et transmettaient l'énergie à une antenne au sol par un faisceau micro-ondes à la fréquence de 2,45 GHz : antenne d'émission 1 km², antenne au sol 85 km².

Une étude récente menée par la NASA : « Fresh Look at the concept of space solar power » présente des solutions nouvelles permettant diverses gammes de puissance susceptibles de répondre à une large variété de besoins allant de quelques MW jusqu'à des puissances de plusieurs GW [33] [34] :

- 1) Constellation de satellites en orbites basses (LEO)
- 2) Constellation de satellites en orbites moyennes (MEO)
- 3) Satellites en orbite géostationnaire (GEO)

Les architectures mises en oeuvre présentent d'importantes innovations permettant notamment des solutions modulables comme par exemple l'architecture « Suntower » qui met en jeu une structure stabilisée par gradient de gravité faisant appel à des technologies d'entraves et de structures gonflables.

Les transmissions d'énergie entre les satellites et le sol sont prévues suivant les solutions à 2,45 GHz ou à 5,8 GHz.

Ces nouvelles architectures mieux adaptées aux besoins futurs conduisent de plus à des performances économiques améliorées par rapport aux premiers projets de 1980 qu'il convient aujourd'hui d'examiner. De nouveaux projets sont à l'étude [35] [36] [37].

5. Perspectives - Stratégie pour l'avenir

Les paragraphes précédents ont souligné diverses perspectives des transmissions d'énergie sans fil. Ces applications sont variées et s'étendent depuis la résolution de problèmes particuliers terrestres : faible puissance - faible distance, jusqu'à des applications concernant des liaisons « multigigawatts » sur des distances de plusieurs milliers de km.

Face à ces perspectives, une approche étape par étape est recommandée parallèlement à l'approfondissement d'un diagnostic technico-économique des applications envisagées, tenant compte des exigences d'environnement [38].

Les étapes de développement pourraient être :

- L'amélioration des performances des technologies actuelles (rendement, durée de vie, masse, fiabilité,

| TESF = État de l'art en 2002 : les meilleures performances obtenues [9] | | |
|---|-------------|-------------------|
| | Micro-ondes | Lasers |
| 1 – Rendement conversion CC / ondes E.M. | 83 % | 56 % |
| 2 – Conv. CC / ondes E.M. puiss. unit. max. | 500 kW | 1080 W |
| 3 – Rendement conversion ondes E.M / CC. | 91,4 % | 59 % |
| 4 – Conv. ondes E.M. / CC. puiss. unit. max. | 10 kW | 1,7 W |
| 5 – Rendement total CC / CC. | 54 % | Inconnu, < 1 % ? |
| 6 – Puissance CC. max. délivrée (réception) | 34 kW | Inconnue, < 1 W ? |
| 7 – Distance max. de transmission | 1,55 km | inconnue |
| 8 – Coût conversion CC / ondes E.M. | 0,02 € / W | 20 € / W |
| 9 – Coût conversion ondes E.M. / CC. | 25 € / W | 10 € / W |
| 10 – Coût système TESH en € / MW x km | 10 M€* | inconnu |

* Coût du système prototype de Goldstone en 1975 ramené en coût 2002.

coût,...) et les expérimentations associées (au sol et dans l'espace).

- L'expérimentation et le développement de premiers prototypes sur Terre et dans l'espace.
- Réalisation de premières liaisons point-à-point terrestres.
- Réalisation de liaisons espace-espace d'évacuation d'énergie de centrales orbitales.
- Le développement de liaisons de grandes puissances sur de grandes distances : transmission d'énergie par relais spatiaux et centrales solaires spatiales.

Références

- [1] H. HERTZ - "Electric Waves", Mac Millan and Co, New York, 1893.
- [2] N. TESLA - "The transmission of electric energy without wires" - The 30th anniversary number of electrical world and Engineer March 5, 1904.
- [3] W.C. BROWN "Experiments in the transportation of energy by microwave beam" 1964 IEEE Int. Rec. Vol XII Pt2 pp8 - 18.
- [4] W.C. BROWN "The Early History of WPT" SPS 97 Montreal proceedings - communication A61 - p 177.
- [5] H. MATSUMOTO "Microwave power transmission from space and related non linear plasma effects" The radio science Bulletin n° 273 - June, 1995 pp 11 - 35.
- [6] W.C. BROWN "Microwave Powered Aerospace vehicles" - OKRESS - Microwave Power Engineering Vol II Academic Press 1968 pp 268 - 285.
- [7] R.M. DICKINSON and W.C. BROWN "radiated Microwave Power Transmission system efficiency measurements" Tech memo 33 -727 JPL Cal. inst. Tech march 15, 1975.
- [8] R.M. DICKINSON "Evaluation of a microwave high power reception / conversion array for WPT" Tech memo 33 - 741 JPL Cal Inst Tech, Sept 1, 1975.
- [9] R.M. DICKINSON "Wireless power transmission technology - state of the art" IAF Houston, Octobre 2002, communication IAC - 02 - R.2.01, 2002.
- [10] 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), p 205, 1996
- [11] A. YOGEV "Conversion efficiency of solar pumped lasers" IEEE Spectrum, PP 30 , May 1998.
- [12] H. BRANHORST "In-Space and terrestrial solar array technologies for beamed laser power" IAF Houston, Octobre 2002, communication IAC - 02 - R.2.08, 2002.
- [13] W.C. BROWN "Electronic and Mechanical Improvement of a free-space Microwave power transmission System" - NASA Report N° CR - 135 194, NASA Contract N° NAS 3 - 19 722, pp. 66, Aug. 1977.
- [14] J. McSPADDEN, L. FAN, and K. CHANG "A high conversion efficiency 5,8 GHz Rectenna" 1997 IEEE MTT - S Digest, pp 547 - 550. 1997.
- [15] V. VANKE et. al. "High Power Converter of Microwaves into DC", Journal of Radioelectronics, N° 9, 1999.
- [16] F. D'AMATO et. al. "Fabrication and test of an Efficient Photovoltaic Cell for Laser Optical Power Transmission". IEEE Photonics Technology letters, Vol. 4,N°3, pp 258 - 260, March 1992.
- [17] Y. KRZHILIN "Laser prospects for SPS and restoration of ozone layer" SPS RIO 92, Proceedings - paper 9 - PP 55 - 76, Rio de Janeiro, Brésil, 1992.
- [18] V.F. SEMYONOV "System for illumination of near-pole towns from orbit". Solar power satellites - WILEY - PRAXIS - ch 3.4 - pp 335 - 340 - 2^{ème} édition - 1997.
- [19] R.M. DICKINSON "Wireless power transmission technology - Basics, Frequency Choices and Issues" 52nd IAF Congress - Toulouse - France - IAA 01 - IAA.7.1.02, 2001.

- [20] J.C. MANKINS "The international spectrum management process and selected technical background for space solar power". 52nd IAF Congress - Toulouse - France - IAA 01 - IAA.7.1.01, 2001.
- [21] L. DESCHAMPS "Energie électrique et espace". L'onde électrique Nov/déc, 1992 Vol 72 n°6 pp 72 - 77.
- [22] M. TOUSSAINT "Transmission d'énergie dans l'espace". L'onde électrique Nov/Déc, 1992 Vol 72 n°6 pp 97 - 103
- [23] L. DESCHAMPS et M. TOUSSAINT "Remote electrical power plants for spacecrafts". 40th IAF Congress - Torremolinos - Spain - IAF 89 - 258 - 1989.
- [24] SPS 97 - Energy ans space for humanity - Montreal 24 -28 August, 1997 Proceedings - 941 pages - papers B1.2 p155, B1.4 p169, B1.5 p175.
- [25] K.A. EHRLICKE - "The power relay satellites : A means of global Energy Transmission Through space" - Internal Document - Rockwell International El Segundo California, 1973.
- [26] A. ANGELINI "Proposal for a programme of study and research into the possibility of intercontinental power transmission by satellites". SPS 86 - Paris - June, 1986 - Proceedings - paper A1 pp 23 - 38.
- [27] P. GLASER "The Power Relay Satellites". Plenary Lecture (First « Peter Glaser Lecture ») 44th IAF congress - GRAZ - Austria, 1993.
- [28] R. BOUDREAU "Space power generation and transport - A feasibility study for Hydro Quebec". SPS 97 - Montreal - 24 -28 August, 1997 - paper A4 -4.
- [29] P. GLASER - "Power from the sun : Its future". Science - Vol 1 pp 67 -77 22 November, 1968.
- [30] SPS 91 Power from space - 27 -30 August, 1991. Proceedings 641 pages (SEE).
- [31] L. DESCHAMPS et A. DUPAS "Les centrales solaires spatiales". RGE mai 1985 n°5 pages 374 à 387, 1985
- [32] L. DESCHAMPS "Les centrales solaires spatiales des années 1900 à demain". Bulletin AHEF, Juin 2000, N° 35, Pages 79 à 100, 2000.
- [33] J.C. MANKINS "A fresh look at the concept of space solar power" SPS 97 - Montreal 24 - 28, August 1997 - Paper A4.1.
- [34] J.C. MANKINS "The promise and the challenge of Space Solar Power in the 21st Century : Picking up the gauntlet" IAF Houston, Octobre 2002, communication IAC - 02 - R.1.02, 2002.
- [35] I. GÖKALP, M. CALABRO, H. HOLLANDERS et L. DESCHAMPS "Space solar energy : A challenge for the European (and International) community" IAF Houston, Octobre 2002, communication IAC - 02 - R.1.03, 2002. and Space Technol. Vol. 23, 2003.
- [36] A. CELESTE "Les étapes vers les centrales solaires orbitales". Actes du Colloque « Centrales solaires spatiales », Sunsat Energy Council, Paris, 21 mars 2003.
- [37] L. SUMMERER, F. ONGARO "Où capter l'énergie solaire ? Comparaison des concepts spatiaux et terrestres" REE, n° 9, octobre 2004 - p. 82 et 83.
- [38] L. DESCHAMPS "Space power systems and the new age of global environmental policy". Solar power satellites - WILEY - PRAXIS ch 4.12 - pp 623 - 625 - 2ème édition - 1997.

L ' a u t e u r

Lucien Deschamps Ingénieur SUPELEC, ancien Conseiller Scientifique EDF, Secrétaire Général de Prospective 2100, Membre Emérite de la SEE, Membre Correspondant de l'Académie Internationale d'Astronautique.