

**RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS DE GRAND BASSIN A LA REUNION :**  
**CONCEPT OPERATIONNEL POUR LE TRANSPORT DE 10 KW PAR FAISCEAU MICRO-ONDES**

Guy Pignolet<sup>1</sup>, Joseph Hawkins<sup>2</sup>, Noboyuki Kaya<sup>3</sup>, Jean-Daniel Lan Sun Luk<sup>4</sup>,  
Frédéric Lefèvre<sup>5</sup>, Vladimir Loman<sup>6</sup>, Yoshihiro Naruo<sup>7</sup>, François Valette<sup>8</sup>, Vladimir Vanke<sup>9</sup>

**Résumé**

Le travail coopératif d'une **équipe internationale** a abouti à des solutions satisfaisantes pour la plupart des problèmes techniques posés dans l'étude de cas de Grand Bassin, étude initiée en 1994 pour évaluer les possibilités de fournir de l'énergie électrique à un groupe de gîtes au moyen d'un système de transport par faisceau micro-ondes semblable à celui envisagé pour les centrales électriques orbitales SPS.

Cette étude de cas a pointé l'attention sur les **questions d'environnement** et d'acceptation de ces systèmes par le public, car le défi principal était d'intégrer harmonieusement le système dans l'environnement général du site de Grand Bassin. Le caractère économique de l'installation et du fonctionnement était aussi un critère important. Il s'est trouvé que les caractéristiques physiques correspondant à la longueur d'onde de 122 mm utilisée par le système micro-ondes ont facilité la réponse à ce défi. Bien qu'il ait son importance à terme, le rendement technique global du système a été considéré pour le moment comme un problème secondaire.

---

Copyright © 1996 by the International Astronautical Federation. All rights reserved.

<sup>1</sup> Président, Science Sainte Rose, 14 Chemin du Jardin, 97439

Sainte Rose, France. E-mail : pignolet@grandbassin.net

<sup>2</sup> Directeur, Alaska Space Grant Program, U. of Alaska, POBox 755900 Fairbanks, Alaska 99775-5900, USA

<sup>3</sup> Dept. Computer & System Engineering, Kobe University, Rokkodai, Nada, Kobe 657, Japan

<sup>4</sup> Laboratoire de Génie Industriel, Université de la Réunion, 15 avenue René Cassin . BP 7151, 97715 St Denis Message Cedex 9, La Réunion, France

<sup>5</sup> Ecole d'Architecture Paris - Val de Marne, 11 rue du Séminaire de Conflans, 94220 Charenton le Pont, France

<sup>6</sup> Scientific Affairs, Romantis Ukraine, 37 Vasilkovskaya Str. Kiev 252122, Ukraine

<sup>7</sup> Space Power Systems Section, ISAS, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229, Japan

<sup>8</sup> CNRS, 1919 Route de Mende, BP 5051, 34033 Montpellier Cedex, France

<sup>9</sup> M.V. Lomonosov, Moscow State University V-234, 119899 Moscow, Russia

Dans le concept étudié, la source d'énergie est le réseau public de l'EDF. Elle alimente un réseau d'environ 30 éléments projecteurs disposés sur plusieurs rangées sur le pente du rempart de Grand Bassin pour former un faisceau micro-ondes d'un diamètre d'une vingtaine de mètres dont la densité d'énergie est sans danger. Selon la disponibilité, les générateurs de micro-ondes peuvent être soit des **magnétrons à phase contrôlée**, ou des **klystrons classiques**. A une distance de 700 mètres de l'autre côté de la rivière un réseau de réception mixte combine un jeu de petites antennes paraboliques en grillage pour des **convertisseurs cyclotrons inverses**, et un réseau de **radiopiles à fil** disposés en couronne. Une unité de régulation convertit le courant continu en courant alternatif sous une tension de 220 V pour l'alimentation des trois gîtes touristiques du fond de Grand Bassin. Un circuit **retour** par radio permet d'adapter la puissance du faisceau d'énergie aux besoins variables des

utilisateurs finaux. Les coûts d'installation du système seraient du même ordre de grandeur que les coûts des autres moyens plus conventionnels envisagés pour fournir l'électricité au groupe d'habitations. La puissance électrique fournie pourrait atteindre 10 kW, avec un rendement global attendu de l'ordre de 20%, avec des coûts opérationnels plus faibles que ceux d'autres systèmes tels que les panneaux photovoltaïques. Des problèmes juridiques et commerciaux demeurent, et des études complémentaires seront nécessaires pour les **questions de propriété et de tarification**.

Les études de conception de Grand Bassin ont déjà rapporté de nombreux résultats intéressants pour le **fonctionnement de bout en bout d'une liaison TESH opérationnelle**. La coopération suivie avec les organismes environnementaux et les utilisateurs potentiels du système a été d'une importance primordiale pour la bonne acceptation du projet. Il a été démontré que le TESH pouvait être une **solution pour des problèmes d'environnement**. La plupart des partenaires régionaux qui ont travaillé avec l'équipe scientifique du projet ont compris que le "modèle réduit" de Grand Bassin n'était pas seulement une solution aux problèmes particuliers d'un petit îlot isolé dans les montagnes, mais aussi une étape-clé importante dans le développement des systèmes SPS qui pourraient dans l'avenir offrir une source globale d'**énergie propre et durable** pour l'humanité.

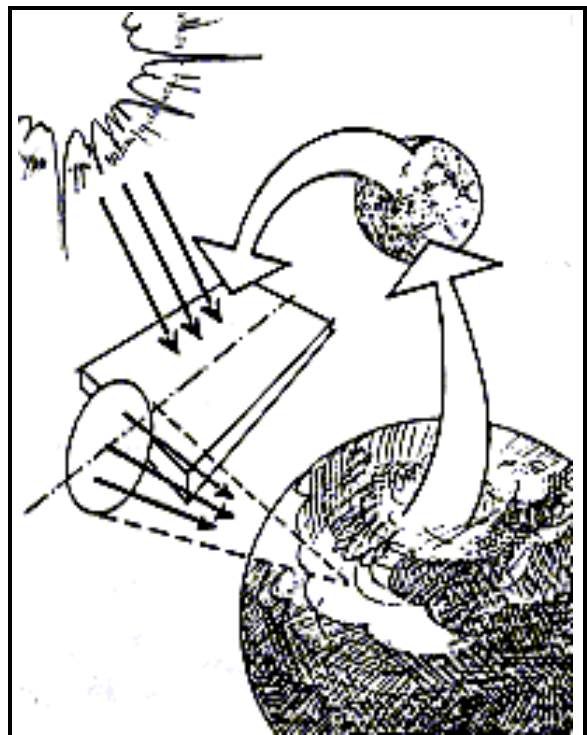
### 1 - introduction 1 : les énergies du futur

Les réserves estimées de pétrole et de gaz naturel pourront durer jusqu'à la moitié du 21ème siècle. On ne pense pas que les autres ressources fossiles (charbon) puissent durer plus de 2 ou 3 siècles. Il n'est pas certain qu'on pourra résoudre les problèmes de pollution radioactive de l'énergie de fission nucléaire, et de toute manière, les sources "bon marché" de combustible nucléaire ne semblent pas devoir durer plus longtemps que les sources de combustibles fossiles.

Pour l'humanité, la solution durable à long terme est de se tourner soit vers l'énergie nucléaire de fission, qui doit encore faire ses preuves en tant que source d'énergie bien contrôlée, et toutes les énergies renouvelables dérivées du solaire.

La technologie la plus prometteuse est celle des centrales solaires orbitales SPS [1], avec une collecte efficace de l'énergie solaire dans l'espace interplanétaire, et son transport vers la surface de la Terre au moyen de faisceaux micro-ondes. La faisabilité technique et économique du concept a été démontrée, en particulier si la Lune est utilisée pour la construction en orbite des centrales électriques géantes.

Le transport d'Énergie Sans Fil au moyen de faisceaux micro-ondes a été entièrement prouvé par des expériences nombreuses. Au Symposium SPS'91, à Paris [2], des premières initiatives ont été prises pour la réalisation de transports opérationnels d'énergie entre deux points à la surface de la Terre en tant qu'étapes vers des systèmes de plus en plus complexes allant jusqu'à la construction des systèmes SPS. Le MITI japonais a exprimé des avis en faveur de la construction de systèmes SPS pour les grandes agglomérations du Japon vers 2040.



*L'énergie du Soleil, captée dans l'espace par des SPS construits à partir de la Lune, et transportée vers la Terre par des micro-ondes*



l'éclairage de base. Mais il faudrait une puissance plus importante, en particulier pour les équipements ménagers comme les machines à laver et les congélateurs. Plusieurs solutions sont à l'étude, comme des groupes diesel ou des extensions du réseau EDF par des lignes aériennes ou enterrées. Le TESH est à ce jour la solution la plus intéressante à tous points de vue.

Dès le début de l'étude de cas, il est apparu clairement que Grand Bassin est un site très favorable pour le TESH, particulièrement dû au fait qu'une ligne moyenne tension à 4 kV est déjà en place du haut du rempart jusqu'à la mi-pente. Elle sert à alimenter les pompes électriques qui relèvent l'eau d'une grande conduite provenant d'une source située à plusieurs kilomètres en amont. De l'emplacement des pompes à l'emplacement envisagé pour le système de réception de l'énergie, la distance en ligne droite n'est que de 700 m.

### 3 - le défi de l'environnement

Comme beaucoup d'autres sites de La Réunion, Grand Bassin offre aux touristes et aux promeneurs des panoramas de niveau mondial [6]. Beaucoup d'attention est consacrée à la protection de l'originalité. Il serait difficilement envisageable de voir des câbles électriques en travers du paysage. Tout en remarquant que le site n'est pas complètement "propre" de ce point de vue, puisqu'il existe un câble pour le petit téléphérique qui monte et qui descend pour transporter le matériel et les produits agricoles entre le "monde" en haut du rempart et les habitations au fond du canyon. Pour l'essentiel, le câble reste proche des pentes du rempart, mais les responsables locaux et régionaux ne souhaitent pas voir l'installation d'autres câbles qui risqueraient de défigurer Grand Bassin. La solution des lignes électriques aériennes, qui serait nettement la plus simple et la moins chère, est à priori refusée. Les autres solutions possibles sont l'extension des panneaux photovoltaïques, un groupe diesel, une ligne électrique enterrée le long du sentier, ou le transport de l'électricité sans fil, par un faisceau micro-ondes.

Dans l'étude de cas, le défi est d'intégrer le système TESH envisagé aussi bien que possible dans l'environnement. La deuxième demande est d'arriver à un coût raisonnable. Puisque le système doit être

opérationnel et sortir du laboratoire, il faut qu'il soit d'un coût compétitif avec les autres solutions possibles, tant pour sa construction que pour son fonctionnement. Le rendement est la moins contraignante des demandes, et vient après l'assurance d'un fonctionnement sans interruption. On estime qu'une fois atteint l'objectif principal de faire fonctionner un système opérationnel, des recherches ultérieures pourront se concentrer sur l'amélioration des caractéristiques opérationnelles et sur le rendement, au grand bénéfice du développement technologique.

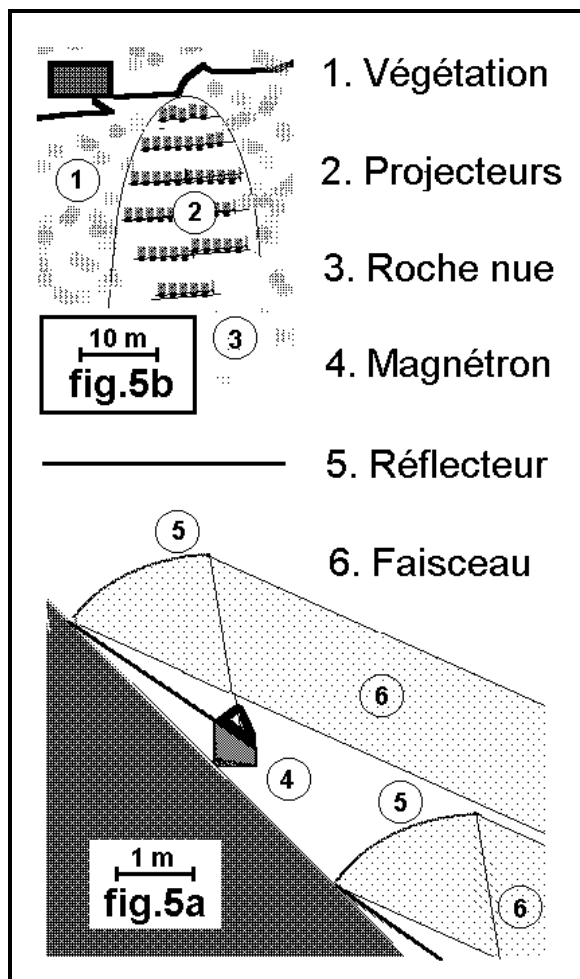


*Le paysage unique de Grand Bassin ne doit pas être défiguré par des lignes électriques aériennes*

Il ressort des études que le TESH serait la solution préférable tenu compte des problèmes environnementaux et économiques. Des groupes diesel seraient vraisemblablement plus simples à installer, mais beaucoup plus coûteux à faire fonctionner. Il serait difficile de multiplier la surface des panneaux photovoltaïques tout en respectant les contraintes d'intégration paysagère. La solution TESH conduit à des coûts d'équipement comparables à ceux d'une ligne enterrée, et bien que les pertes d'énergie soient actuellement plus grandes pour le système TESH que dans le cas d'une ligne enterrée, c'est le système TESH qui devrait être envisagé, parce qu'il offre un potentiel considérable pour le futur.

#### 4 - le système projecteur

Le système de projection des micro-ondes devrait utiliser un réseau multiple de projecteurs phasés pour deux raisons fondamentales : la raison la plus immédiate dit qu'il est plus facile d'intégrer dans le paysage un grand nombre de petites unités plutôt qu'une seule de grande taille; la raison à long terme dit qu'il y a des limites à la dimension des projecteurs d'une seule pièce, mais qu'il n'y en a pas pour la taille globale des systèmes multi-éléments. Comme le système devrait servir de banc d'essai pour la mise au point de systèmes plus importants, l'option d'un réseau a donc été retenue.



*Le réseau des 32 éléments projecteurs forme une ellipse le long de la pente, près des pompes de relevage de l'eau, là où arrive la ligne électrique moyenne tension*

Comme le coût est un autre facteur important, les magnétrons amplificateurs MDA [7] conçus par le Dr. Bill Brown ont été envisagés en premier. Cependant ils n'en sont qu'au commencement de leur mise au point, et pour le concept de référence de Grand Bassin, on a pensé plutôt utiliser des klystrons de 2 kW [8], qui sont disponibles sur le marché à des coûts unitaires d'environ 100 kF, soit un coût total de 2.5 MF. Pour diminuer le coût, le choix final pour une première opération s'est porté sur un klystron unique de 50 kW, d'un coût de 400 kF, en distribuant l'énergie par des guides d'ondes vers 32 éléments projecteurs séparés qui formeront le faisceau de micro-ondes.

La pente moyenne du rempart sur lequel le réseau de projecteurs doit être installé est de 45°, et le faisceau doit être dirigé dans une direction faisant un angle d'environ 20° avec le sol. Pour produire un faisceau compact, de section légèrement elliptique, le réseau devrait couvrir une zone de terrain d'environ 20 m en largeur et de quelque 60 m dans le sens de la pente. Le positionnement des éléments devra se faire avec une précision inférieure au cm.



*Le concept artistique d'un réflecteur "magnetal". Les formes courbes peuvent être arrangées aisément pour se fondre avec les buissons proches*



Des recherches architecturales ont été faites pour concevoir des réflecteurs spécifiques [9] s'intégrant bien dans le paysage, et une forme dite "magnétal" a été trouvée pour que les réflecteurs ressemblent aux buissons et aux arbustes qui poussent sur le rempart. Un prototype simple de 1,2 x 1,5 m a été construit et a fonctionné, constitué d'un système original de parabole de Fresnel à fils.



*Sur cette photo prise pendant la démonstration de La Plaine des Cafres, le grand réflecteur transparent de la parabole de Fresnel à fils (à droite de l'image) est à peine visible dans le cadre du paysage*

En juillet 1996, ce petit ensemble de démonstration a été présenté avec succès aux autorités municipales à la Plaine des Cafres, la commune sur laquelle est située Grand Bassin. Des éléments opérationnels seraient nettement plus grands, avec des dimensions d'environ 2 x 3 m. La disposition étagée du système de Fresnel, qui peut être complètement bi-dimensionnelle contribue de manière significative à démarquer le système des formes des paraboles classiques. Comme les micro-ondes produites sont polarisées une nappe mono-dimensionnelle de fils conducteurs, avec des espacements de 2 cm, suffit pour réfléchir les micro-ondes à 2,45 GHz sans gêner la visibilité.

Une autre solution a été proposée, avec un réseau circulaire plus compact dissimulé sous les structures d'une construction architecturale servant de point de vue d'où les touristes pourraient regarder le fond de Grand Bassin depuis le milieu de la pente, et admirer le panorama unique offert par cet environnement. Toutefois, une telle option serait spécifique et ne pourrait pas être transposée vers d'autres sites dans le cadre du développement des applications TESF.



*Une autre solution pour l'intégration paysagère : Un "guétali" architectural pourrait dissimuler le réseau projecteur sous ses structures.*

## 5 - le système de réception

Il est envisagé d'utiliser à la fois des radiopiles et des Convertisseurs à Cyclotron Inverse CWC pour le réseau de réception, pour pouvoir essayer et évaluer ces deux technologies dans des conditions opérationnelles. Le bon fonctionnement des deux systèmes a déjà été prouvé dans des expériences de laboratoire.



*Des vignes sont cultivées sur des structures en pergola semblables à celles qui pourront être utilisées pour la réception des micro-ondes*

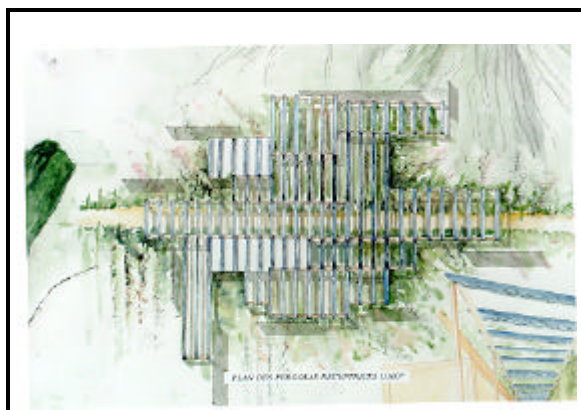
Le réseau combiné aurait environ 12 m de diamètre. Il serait disposé au dessus de constructions semblables aux structures en pergolas qui supportent les vignes avoisinantes. Pour des raisons d'esthétique, les recherches architecturales ont

proposé une extension des structures au-delà de la zone spécifique de réception, pour se démarquer des allures des paraboles classiques.

L'un des avantages du système est de permettre la culture de légumes en dessous de la structure, du fait que la lumière du soleil pourra passer au travers des panneaux de radiopiles ou du grillage des paraboles des CWC.

Une petite construction traditionnelle pourrait abriter le matériel de régulation du courant, et fournir un local de travail pour les techniciens et les chercheurs qui auront la responsabilité de contrôler le fonctionnement du système ou de faire les essais avec de nouveaux équipements plus perfectionnés pour préparer l'avenir.

Cette recherche d'une adaptation à l'environnement peut être considérée comme un laboratoire architectural dans la perspective du développement de recherches plus importantes sur l'intégration environnementale des technologies du 21ème siècle.

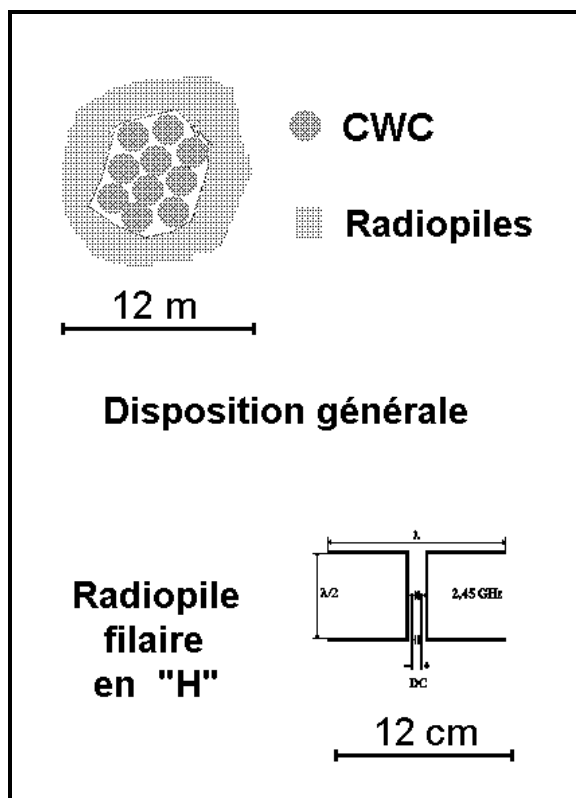


*En étendant les structures-supports au delà de la trace du faisceau micro-ondes, il est possible de les rendre discrètes dans le paysage environnant*

Les radiopiles en "H" ont été mises au point à l'ISAS, au Japon, et à l'Université de La Réunion [10]. Elles ont prouvé leur efficacité pour la récupération de l'énergie des micro-ondes. Des concepts plus perfectionnés [11] sont en cours de développement à l'Université de La Réunion. Le principal problème est la disponibilité de diodes Schottky bon marché utilisables pour un redressement dans la gamme des gigahertz. Il est

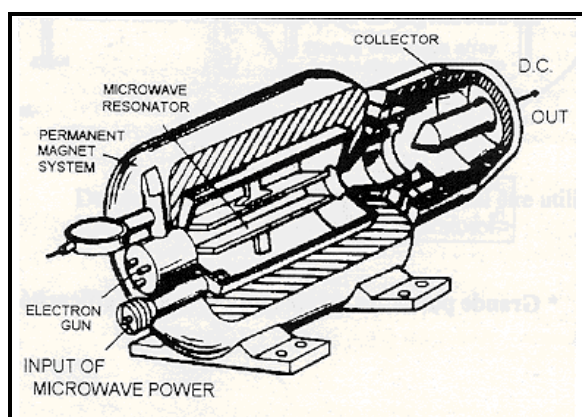
prévu d'utiliser des diodes NEC 1SS97 ou des équivalents. Tenu compte des caractéristiques des diodes et de leur limitations en tension et en courant (35 Volt et 150 mA), il pourrait être nécessaire d'utiliser jusqu'à 16 diodes unitaires pour chaque radiopile élémentaire, et la quantité de diodes nécessaires pourrait atteindre 100 000 unités. C'est la situation en 1996. Mais en raison des quantités nécessaires, il se peut qu'à l'avenir des diodes spécifiques adaptées au TESH soient créées en liaison avec les fabricants.

Un système de protection avec diodes Zener devra être mis en place pour limiter les tensions et protéger les diodes redresseuses contre les surcharges occasionnelles susceptibles d'entraîner des dégâts pour le système.



*Les radiopiles pourront être associées à des "cyclotrons inverses" pour reconvertir les micro-ondes en électricité*

Avec les CWC, il faut des réflecteurs paraboliques pour concentrer le faisceau de micro-ondes à basse densité d'énergie vers les systèmes redresseurs, qui pourront être situés directement au foyer des paraboles, ou en dessous des paraboles, au bout de guides d'ondes en col de cygne. L'ensemble des 6 ou 7 paraboles en grillage, semblables aux équipements utilisés pour les réflecteurs spatiaux, pourra laisser passer la lumière du soleil. Un ensemble de plusieurs paraboles de 3 m, disposées à la manière des pétales d'une fleur, se fait moins remarquer qu'une seule grande soucoupe, et peut facilement être intégré dans le paysage.



*Convertisseur Cyclotron Inverse CWC :  
Le faisceau d'électrons est accéléré par l'énergie des micro-ondes et produit une tension continue importante sur le collecteur*

En aval des radiopiles, qui produisent un courant continu à basse tension, et des CWC qui produisent un courant continu à haute tension, il est indispensable d'installer un régulateur-convertisseur de courant, avec une petite capacité de stockage, pour fournir un courant alternatif ordinaire, stabilisé à 220 V, pour l'alimentation des équipements ménagers.

## 6 - fonctionnement du système complet

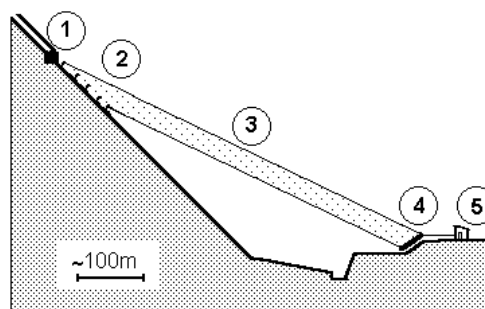
L'énergie de départ serait prise soit sur la ligne à 4 kV déjà en place, soit sur une nouvelle ligne qui suivrait le trajet déjà aménagé pour la première, celle qui alimente les pompes de relevage.

Il faut à partir de là installer une alimentation haute tension pour les générateurs de micro-ondes. Un

refroidissement par eau peut facilement être installé au moyen d'une petite dérivation sur les grosses canalisations.

A l'autre bout, après les systèmes de réception et de régulation, des lignes électriques protégées pourraient être posées à même le sol jusqu'aux trois gîtes, le long des canalisations d'eau qui existent déjà.

1. Pompes / Ligne électrique
2. Réseau de Projecteurs
3. Faisceau Micro-ondes
4. Réseau CWC/Radiopiles
5. Utilisateurs



*Schéma du Système TESF pour Grand Bassin  
La longueur du faisceau est d'environ 700 m  
Le fonctionnement est du type marche/arrêt à pleine puissance, avec un stockage sur batteries à la réception*

La demande de puissance variera au cours des journées. Un petit bloc de batteries sera utilisé pour faire face à des dépassements de puissance temporaires, et pendant les périodes où la projection du faisceau micro-ondes sera interrompue. Comme il n'est pas facile de régler le niveau de puissance des appareils utilisés pour la production des micro-ondes, le mode de fonctionnement de l'ensemble projecteur sera binaire, marche/arrêt, avec un



contrôle à distance depuis l'ensemble récepteur, au moyen d'une liaison radio.

### 7 - évaluation du coût et du rendement

Les estimations de coût pour un premier système opérationnel de TESF ont été divisés par un facteur de 20 depuis les premières estimations données en 1991. Les raisons en sont un meilleur choix du site pour une première installation, une diminution de la puissance requise, et surtout une diminution importante du coût des diodes de redressement dans la bande des GHz.

<b>Projection</b>	
Production des micro-ondes	400 KF
Equipements associés	600 KF
Travaux de génie	1 000 KF
<b>Réception</b>	
Radiopiles	300 KF
Equipement CWC	300 KF
Equipement de régulation	100 KF
Equipements associés	300 KF
<b>Coût de construction total estimé</b>	<b>3 000 KF</b>
<b>Etudes industrielles (10%)</b>	<b>300 KF</b>
<b>Prototypage industriel (10%)</b>	<b>300 KF</b>
<b>Coût total estimé du projet</b>	<b>3 600 KF</b>

*Un coût total du système comparable au coût d'une ligne enterrée*

Dans le concept de référence, les coûts d'installation se partagent sensiblement de manière équilibrée entre le système de projection et le système de réception. Les coûts de construction sont plus importants pour le réseau de projection en raison de la pente importante du rempart. Le coût total de la

mise en place d'un système TESF est comparable à celui d'une ligne électrique enterrée dans cet environnement où les conditions de travail sont difficiles.

Si l'étude de cas est suivie d'une réalisation effective, il sera nécessaire de faire des études industrielles plus complètes, pour un coût d'environ 10% du coût total du projet, et de construire une maquette prototype pour vérifier les choix industriels sur des éléments de projection et de réception grandeur nature. La recommandation est de construire un petit système complet capable de transporter une puissance d'environ 1 kW sur une distance de 100 m pour servir d'étape intermédiaire avant la réalisation définitive. C'est une question de développement technique, parce que ce n'est pas tout-à-fait la même chose que de construire un matériel de démonstration ou de se préparer pour une réalisation de type industriel.

Puissance Source	Puissance Projetée	Puissance Reçue	Puissance Utilisateur
	conversion $\sim \Rightarrow \text{MO}$	Récupération faisceau	conversion $\text{MO} \Rightarrow \sim$
	60%	60%	60%
<b>50 kW</b>	<b>30 kW</b>	<b>18 kW</b>	<b>11 kW</b>

*Le rendement global prévu du TESF est de 22%  
Par comparaison, le rendement économique du photovoltaïque n'est que de 5%*

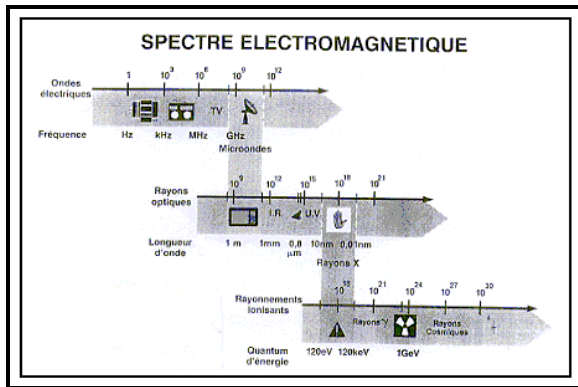
En laboratoire, des rendements globaux dépassant 50% ont été démontrés, avec des rendements dépassant 80% pour chacune des trois étapes essentielles du TESF : la conversion de l'électricité en micro-ondes, la récupération de l'énergie du faisceau sur le site de réception, et la reconversion des micro-ondes en électricité. Dans le cas de Grand Bassin, la première contrainte est une bonne

intégration dans l'environnement, le rendement est une contrainte secondaire. Ceci exclut l'utilisation de très grandes paraboles, dont le rendement pourrait être meilleur, mais il faut rappeler que l'objectif est un ensemble harmonieux, et non pas l'optimisation d'un critère spécifique aux dépens de l'art de vivre.

Dans le cas de Grand Bassin, les objectifs de rendement ont été fixés à 60% pour chacune des étapes du processus, ce qui conduit à un rendement global du système d'environ 20%, considéré comme acceptable pour un fonctionnement opérationnel. Le rapport de coût entre l'électricité du réseau public et l'électricité photovoltaïque est de l'ordre de 20 [12]. En conséquence, à partir du moment où le rendement du TESH dépasse 5%, il peut fournir de l'électricité à un coût plus économique que les systèmes photovoltaïques actuels.

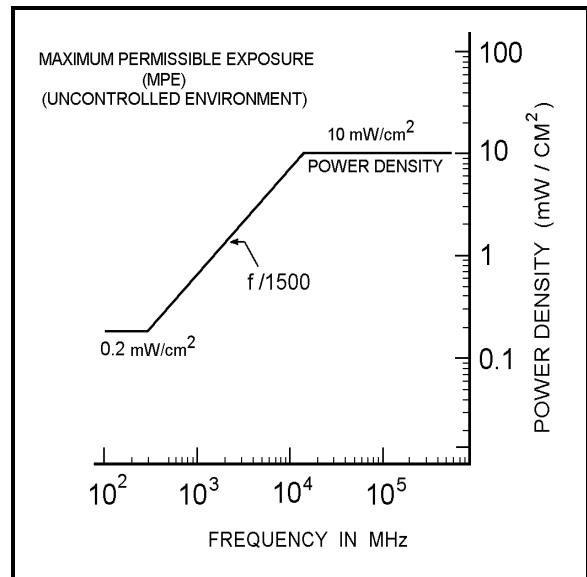
### 8 - sécurité et compatibilité du système

Le premier point à considérer est que le niveau d'énergie des micro-ondes à 2,45 GHz, avec une longueur d'onde de 122 mm, est environ un million de fois plus faible que le seuil nécessaire pour qu'un rayonnement soit ionisant et dangereux pour les cellules vivantes [13]. En conséquence, le risque de cancer ou d'altération génétique est totalement exclu, bien qu'il y ait des craintes populaires à ce sujet, liées au fait que la plupart des gens n'ont qu'une connaissance très limitée de la nature des ondes électromagnétiques.



Les trois régions du spectre électromagnétique : ondes radio, rayons optiques, rayons ionisants. Il n'y a aucun de risque de cancer avec les micro-ondes à 2,45 GHz. Le seul risque est thermique.

Le seul risque véritable avec les micro-ondes est le risque thermique, et l'image populaire est celle du poulet rôti. Les fours à micro-ondes sont utiles pour prouver que de l'énergie peut être transportée par les micro-ondes, mais les systèmes TESH ne sont pas des fours et la densité d'énergie peut être limitée à des niveaux sans danger. La référence de base est la densité d'énergie du rayonnement solaire à la surface de la Terre, qui est d'environ 100 mW/cm<sup>2</sup>. L'exposition au plein soleil n'est pas confortable et peut entraîner des brûlures. Le danger commence à partir d'environ 50 mW/cm<sup>2</sup> et les normes de sécurité pour une exposition continue aux micro-ondes ont été fixées un ordre de grandeur plus bas, à 5 mW/cm<sup>2</sup>, bien que des normes médicales américaines récentes aient fixé des niveaux plus faibles [14]. Il est important de comprendre que tout standard médical n'est qu'un compromis local entre les dangers et les avantages de l'utilisation des micro-ondes. Une densité d'énergie maximale de 25 mW/cm<sup>2</sup> est considérée comme acceptable pour les faisceaux de TESH car il n'est pas prévu que des humains ou des animaux restent en permanence dans le faisceau. La seule zone de danger dans l'ensemble du système est l'espace entre les sources et les réflecteurs de projection, où l'accès doit être interdit par des moyens de protection adaptés.



Les normes de fuites admises pour les fours micro-ondes (2,45 GHz) sont de 5 mW/cm<sup>2</sup>. La norme médicale US d'exposition maximale permise est de 1.6 mW/cm<sup>2</sup>.

Un risque particulier est celui d'interférences électromagnétiques avec du matériel électronique sensible. Le 2,45 GHz est situé au centre d'une bande de fréquence attribuée pour les applications Industrielles, Scientifiques et Médicales et à l'heure actuelle plus de 50 millions de fours micro-ondes fonctionnent sur cette fréquence à travers le monde. Dans le cas de Grand Bassin, le niveau de densité d'énergie de 25 mW/cm<sup>2</sup> est suffisamment faible pour ne pas présenter de danger, et il sera tout-à-fait possible pour des hélicoptères de traverser le faisceau sans danger. Et bien qu'il soit prévu que la densité d'énergie dans le faisceau soit supérieure à la norme des 5 mW/cm, il est possible de définir une enceinte virtuelle autour du faisceau telle qu'à l'extérieur de cette zone les règles de compatibilité électromagnétique soient pleinement satisfaites.

### 9 - problèmes de société

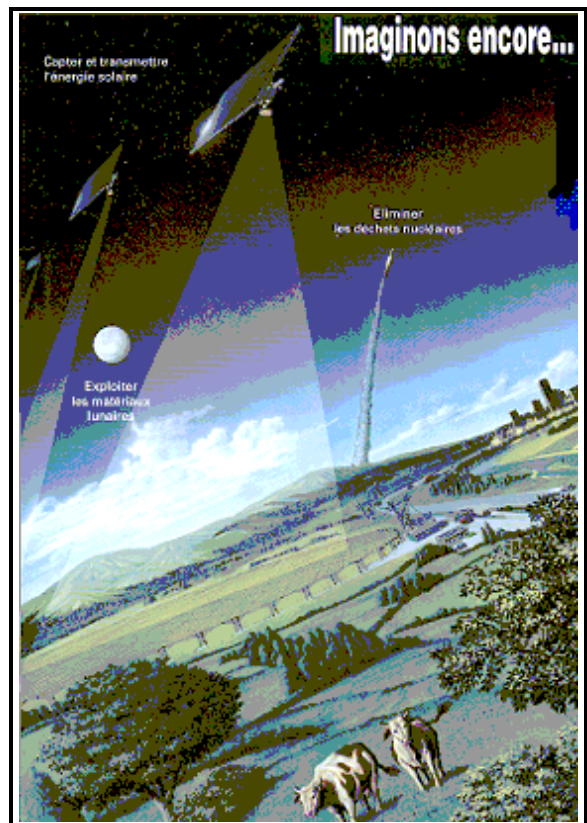
Le premier point est l'acceptabilité esthétique du projet. De grands efforts ont été faits pour concevoir des équipements de types nouveaux qui s'intègrent bien dans leur environnement naturel. En dehors des aspects structurels, il faut noter qu'avec une longueur d'onde de 122 mm, les systèmes TESF ne sont pas en compétition avec le rayonnement solaire pour l'utilisation des fréquences. En conséquence, et à la différence avec les systèmes photovoltaïques, il est possible de les peindre pour s'accorder avec les teintes environnantes. D'autre part, les systèmes TESF peuvent laisser passer la lumière et, en particulier sous la zone de réception, il est possible de réutiliser le terrain pour faire pousser des légumes ou d'autres plantes, ce qui permet une double utilisation de l'espace. Ces points sont des éléments importants pour l'acceptabilité du système.

Mais il reste quelques problèmes en ce qui concerne les questions de propriété et de facturation. Qui doit payer pour la construction du système ? Qui doit prendre soin de son entretien ? Quelles seront les relations avec EDF, la compagnie nationale d'électricité, pour les question de propriété du système de transport ? Comment seront facturés les utilisateurs ? Il faut traiter ces points le plus tôt possible pour éviter des frictions inutiles et pour trouver les moyens les mieux adaptés d'intégrer les nouvelles technologies du TESF dans les structures économiques et sociales existantes.

### 10 - introduction 2 : le futur des énergies

Avec ce schéma d'ensemble, l'étude de cas de Grand Bassin arrive pratiquement à son terme. Des présentations finales plus détaillées doivent être faites à la fin de novembre 1996 pendant les journées d'étude SPS-IdR'96 qui se tiendront à La Réunion.

Mais déjà le message est clair, et la conclusion générale de l'étude de cas est qu'un Transport d'Énergie Sans Fil pour Grand Bassin est réalisable, tant du point de vue technique que du point de vue socio-économique.



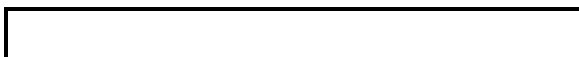
*L'étude de cas de Grand Bassin est une étape importante vers la maîtrise des futurs systèmes SPS pour une fourniture d'énergie durable pour la Planète Terre*

Les progrès se font par étapes. Le compte-rendu final de l'étude de cas sera la conclusion positive d'une étape. Il peut être, selon les décisions qui seront prises par les différentes parties intéressées, le

départ d'une nouvelle étape, qui conduirait à une réalisation effective d'un vrai système opérationnel. Si l'étape suivante est décidée, à son achèvement, les bénéficiaires en seront en premier lieu les habitants de Grand Bassin, mais également les Universités et les centres de recherche, la communauté économique et industrielle, qui aura franchi un pas de plus vers la maîtrise des systèmes TESF intégrés et des futurs systèmes énergétiques basés sur les centrales électriques orbitales SPS [15].

### 11 - remerciements

L'achèvement de l'Etude de Cas de Grand Bassin est une étape majeure vers la réalisation concrète d'un TESF opérationnel. Il a été possible grâce à tous les encouragements et tous les soutiens que l'équipe du projet a reçus de la part de nombreuses personnes : Peter Glaser, qui le premier a lancé le défi pendant le congrès SPS'91, Lucien Deschamps, de la SEE, qui a réuni les premières équipes, Patrick Hervé, aujourd'hui Président de l'Université de La Réunion, qui a donné le premier élan à La Réunion même, Rémi Carle, Directeur Général Adjoint de EDF, dont les conseils ont été fondamentaux pour la création d'un centre d'expertise à La Réunion, Denis Clément, Directeur Régional de l'Environnement à La Réunion, qui nous a aidés pour la sélection du site de Grand Bassin, le Professeur Makoto Nagatomo et son équipe de IISAS, qui nous ont aidés dans l'acquisition des bases techniques, André Thien-Ah-Khoon, Député-Maire de la commune du Tampon, où se trouve Grand Bassin, qui a de nombreuses occasions nous a apporté un soutien logistique. Et aussi Georges Posé, de Sainte Rose, qui nous a prêté un groupe électrogène pour les essais du projecteur, et Bernard Charles, Secrétaire des "Colonies de l'Espace", qui a fait les enregistrements vidéo des essais du système. Nous voudrions aussi remercier Jacques Breton, Chef du Département de la Prospective et de l'Evaluation au CNES, pour son soutien depuis le commencement. Nous sommes aussi très reconnaissants à tous nos collègues et amis du Japon, de Russie, d'Ukraine, des Etats-Unis, d'Allemagne, de France et d'Italie qui nous ont utilement conseillés tout au long de ces deux années et qui nous ont ainsi aidés à progresser vers l'avenir.



### 12 - bibliographie

- [1] Glaser, P., *The window of opportunity for wireless power transmission*, une conférence au CNES, 2 pl. M. Quentin, 75039 Paris Cedex 01, France, 1994
- [2] SPS'91, Proceedings, *SPS-91 Power from Space*, SEE Société des Electriciens et des Electroniciens, 48 rue de la Procession, 75724 Paris Cedex 15, France, 1991.
- [3] SPS-IdR'94, *Actes des Journées d'Etudes pour les Etudes de Cas à Moyen Terme - le Transport d'Energie Sans Fil*, Sofiom, c/o Bernard Montez, 19 Terre Rouge, 97417 La Montagne, Ile de La Réunion, France, 1995
- [4] Pignolet, G., *SPS-IdR Case Studies in Réunion Island*, Solar Energy, Vol 56, Nr.1, January 1996, Special Issue, *Wireless Power Transmission*.
- [5] Pignolet, G., Kaya, N., Lan Sun Luk, J.D., Naruo, Y., Vanke, V., *Demonstrating SPS Technologies on Earth : SPS-IdR Studies in Réunion Island, Towards point-to-point operational WPT*, WPT'95, Kobe 1995, Solar Power Review, P.O.Box 67, Endicott, New York 13761, USA
- [6] *Itinéraires réunionnais*, ONF Office National des Forêts, Saint-Denis, France, 1992.
- [7] Brown W, *Experimental radiation cooled magnetrons for space use*, Space Power, vol. 11 N°1, Endicott, NY USA, 1992
- [8] *High-Power CW Klystron*, Thomson Tubes Electroniques, Meudon La Forêt, France, 1986.
- [9] Pignolet G., *Antenna designs for wireless power transportation : the Grand Bassin case study in Reunion Island*, ISAP'96, Chiba, Japan, 1996.
- [10] Pignolet G., Lan Sun Luk J.D., *Design of a Low Cost Rectenna for a Low-Power SPS-2000 / WPT Demonstration Model*, ISAS Research Note N° 573, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229, Japan, 1995.
- [11] Pignolet G., Kaya N., Lan Sun Luk J.D., Naruo Y., Vanke V., *Enhancement of performance of a*



*rectifier system for wireless power transmission*, WPT'95, Kobe, Japan, 1995.

[12] Ecole d'été, *Electricité Solaire pour les zones rurales et isolées*, Unesco / Sided, 2 bis rue Jules Breton, 75013 Paris, France, 1995

[13] Pignolet G., *Integrating WPT/SPS studies with society : the case of Grand Bassin*, ISU Symposium Space of Service to Humanity, Strasbourg, France, 1996.

[14] CNES, *l'espace comment ça marche ?, à quoi ça sert ?*, CNES, Département Publications, 18 ave. E. Belin, 31055 Toulouse Cedex, France, 1995.

---

**LA REUNION - SPS-IdR'96**

**26 - 29 novembre 1996**

**JOURNEES D'ETUDES INTERNATIONALES**

**\* Présentations Finales  
de l'Etude de Cas de Grand Bassin  
\* Visites à Grand Bassin  
et aux autres sites potentiels pour le TESH  
\* Discussion des Projets Futurs  
et de la Coopération Internationale**

**contact e-mail :  
pignolet@grandbassin.net**