

TRANSPORT DE L'ENERGIE SANS FIL (T.E.S.F)

Barousse Julien 1^{ère} S.7

Professeurs d'encadrement : M.Chanut et Mme Fayollas

SOMMAIRE

La problématique : Comment transporter de l'énergie sans fil ?

1. Présentation

- introduction
- historique
- risques et compatibilité

2. Etude détaillée du système

- dispositif d'émission d'ondes hyperfréquences
- dispositif de réception d'ondes hyperfréquences
- mise en forme de la puissance

3. Conclusion

- état de la recherche
- applications
- coût

4. Bibliographie

5. Lexique

1. Présentation

Introduction : L'énergie peut voyager sans aucun support matériel. Si les physiciens connaissent depuis longtemps le phénomène, il n'est maîtrisé que depuis peu.

Comme l'eau ou l'air, l'énergie est généralement assimilée en terme de ressource vitale pour l'humanité. Etant donné que 70% de l'énergie électrique est générée par la combustion de ressources fossiles(charbon, pétrole ou gaz naturel) se pose alors le problème de la répercussion inéluctable de ces combustions sur l'environnement (pollution, bouleversement climatique...) et aussi de la gestion de plus en plus difficile des stocks limités de ces ressources fossiles pour subvenir aux futurs besoins gigantesques d'énergie.

Pour y remédier, un concept intéressant et prometteur de fourniture d'énergie propre et renouvelable a vu le jour. Proposé par la NASA dès 1969, ce concept nommé SPS (Sonar Power Satellite) s'appuie sur le principe novateur de Transport d'Energie Sans Fil (TESF). Ce principe suppose 3 opérations relativement simples : la conversion de l'électricité en ondes, la transmission de ces ondes et enfin leur reconversion en électricité après réception. La première étape, la conversion d'électricité en onde, est des plus banales. C'est ce que nous faisons quand nous allumons la lumière : l'électricité est transformée en une onde ultracourte lumineuse. La deuxième étape, le transport, n'offre pas non plus de difficultés : toutes les ondes transportent de l'énergie. Les ondes sonores, par exemple, possèdent une énergie propre : elles font vibrer nos tympan. la dernière étape, la réception des micro-ondes et leur conversion en électricité consiste au redressement des courants produits dans une antenne avec une diode à haute fréquence, qui nous donne du courant continu.

Historique :

L'idée du transport d'énergie sans fil remonte au siècle dernier. Nikola Tesla, un physicien américain d'origine croate, avait imaginé d'utiliser les ondes électromagnétiques pour transporter l'électricité n'importe où dans le monde, sans ligne. Au début du siècle, il fait construire une tour de transmission à Long Island (New York) mais à l'époque les connaissances en TESH n'étaient qu'empiriques et le projet fut abandonné.

Proposé dès 1969 par Peter Glaser, le concept de SPS associé à celui de WPT pourrait être une solution écologique alternative en matière de fourniture énergétique de notre planète.

Dans cette voie, l'expérimentation terrestre de GoldStone de 1975 constitue une étape importante de validation du concept de TESH. En outre, en 1980, le département de l'énergie américain a manifesté son intérêt pour cette technologie en initiant un travail de recherche sous la direction de Bill Brown.

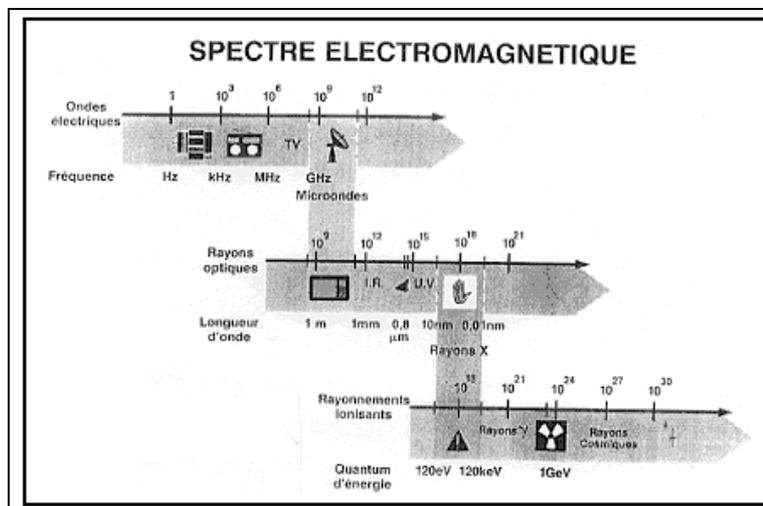
Toutefois, en dépit d'importants travaux de recherche et de nombreuses publications, peu de prototypes ou de démonstrateurs ont été réalisés.

En 1991, les meilleurs spécialistes des questions SPS et WPT se sont réunis à Paris lors du congrès international SPS-91. Lors de la conférence de clôture, en présence de Peter Glaser et de Bill Brown, initiateurs de ces concepts, plusieurs pistes de développements scientifiques et technologiques ont été évoquées et discutées.

En Avril 1994, lors d'une conférence au CNES à Paris, Peter Glaser a proposé une voie dans la conduite du projet SPS. Une des étapes de base est la réalisation de nouvelles démonstrations terrestres originales et écologiques de transport d'énergie sans fil.

Afin de franchir une nouvelle étape dans la validation expérimentale globale du projet SPS, deux nouvelles contraintes sont à considérer dans la réalisation de nouveaux dispositifs WPT point à point terrestre. D'une part il s'agit d'intégrer un tel dispositif WPT au sein d'un réseau de transport et de distribution d'énergie existant et d'autre part il est demandé au prototype d'être opérationnel en situation réelle de fourniture d'énergie d'un groupe d'habitations.

Risques et compatibilité :



Reste la question de la dangerosité de ces ondes. Il ne faut pas confondre micro-ondes et radioactivité. Les rayons X et les rayons gamma, par exemple, sont dangereux car il s'agit de rayonnements ionisants : la grande énergie des particules provoque des aberrations cellulaires à l'origine de cancers. L'effet des micro-ondes est plutôt comparable à celui du rayonnement solaire : une exposition excessive provoque des brûlures. Néanmoins, aucun risque qu'un oiseau traversant le faisceau soit grillé en vol : la législation française limite la puissance des rayons à 5 MW/cm² soit vingt fois moins que le rayonnement solaire. Pour augmenter la puissance transmise, il faut donc élargir les rayons ce qui impose des antennes de grandes dimensions. Les projets de centrales solaires orbitales prévoient ainsi des antennes de plusieurs kilomètres de diamètre pour une puissance équivalente à celle d'un réacteur nucléaire.

Le grand danger des Gammahertz !

Le 16 octobre 1996, un article paraissait dans le Canard Enchaîné, journal généralement bien informé, pour dénoncer les risques associés à "la numérotation thermostat 10". Dans le corps de l'article, étaient particulièrement visée la **"nocivité potentielle des ondes ultra-courtes et de haute fréquence frisant les 2 gammahertz..."**. Oublions le pléonasm (longueur d'onde et fréquence ne sont que deux présentations différentes d'une seule et même réalité) et portons toute notre attention sur les "gammahertz". Ce néologisme intéressant et incongru vient certainement d'une collision mentale entre les termes "Gigahertz" qui veut dire un milliard (Giga) d'oscillations par seconde (Hertz), soit des longueurs d'onde de l'ordre de la dizaine de centimètres et "rayons gamma" qui correspondent à des longueurs d'onde de l'ordre du picomètre (pico = 10⁻¹², soit un millième de milliardième), cent milliards de fois plus courtes que les premières. Un monde de différence ! La semaine suivante, le "Canard" faisait ses excuses à ses lecteurs.

L'exemple récent des "gammahertz" est typique des montées de peurs ancestrales qui se nourrissent de l'insuffisance de connaissance des sujets concernés. Le grand danger des gammahertz guette l'humanité à chaque coin de rue. La parade réside dans l'information et dans l'éducation.

Les micro-ondes à 2,45 GHz utilisées dans les 50 millions de fours ménagers et dans le système proposé pour Grand Bassin présentent un certain nombre de risques, qu'il faut connaître pour s'en protéger. Le feu est l'une des grandes conquêtes de l'humanité, mais on ne laisse pas les enfants jouer avec les allumettes. Il faut aussi savoir qu'un certain nombre de risques n'ont d'autre fondement que la rumeur (l'effet "gammahertz"...). Et il faut aussi savoir que réciproquement les systèmes TESF ne sont pas entièrement à l'abri d'un certain nombre d'activités humaines...

1 - Il n'y a pas de risque génétique

Le risque génétique (cancer, mutations, etc...) qui est souvent invoqué n'existe pas avec les micro-ondes dont l'énergie (proportionnelle à la fréquence) est un million de fois plus faible que celle des rayonnements ultraviolets où le danger commence.

Le risque "thermique" ou risque du "poulet grillé"

Les fours micro-ondes sont l'exemple le plus courant du fait que les micro-ondes peuvent transporter une énergie qui, en l'absence de dispositifs récepteurs comme les radiopiles ou les CWC, finit par se retransformer en chaleur. La limite du risque pour les êtres vivants est déterminé par la capacité de rejeter l'apport de chaleur dû aux micro-ondes. La puissance de référence la plus parlante est celle du rayonnement du soleil avec environ 1000 W par mètre carré exposé. Le rayonnement solaire direct est dangereux (insolation, brûlures de la peau). La limite de sécurité pour la densité d'énergie se situe aux environs de 500 W par mètre carré et par exemple il ne faut pas rester exposé à moins de 30 cm d'une lampe halogène de 500 W sous peine de brûlure (cette distance correspond à une surface sphérique de 1 mètre carré). Dans le système TESF envisagé pour Grand Bassin, la densité du faisceau ne dépassera pas 250 W par mètre carré, et on envisage même a priori de limiter cette densité à 50 W par mètre carré. Les oiseaux et les hommes pourront traverser sans danger le faisceau micro-ondes.

la compatibilité électromagnétique

Il n'y a pas a priori de risque de brouillage avec d'autres équipements, car les faisceaux micro-ondes pour le TESF utilisent une onde pure non modulée. Et même, au contraire, le faisceau TESF peut servir de support pour une communication, d'une manière similaire à ce qui est fait sur le réseau électrique quand EDF utilise les lignes de distribution pour transmettre des signaux vers les compteurs et autres appareils.

Il peut y avoir un risque de saturation de certains instruments sensibles exposés au faisceau, mais ce risque peut facilement être contrôlé par l'utilisation de filtres appropriés, à l'image de ce qui se fait en audio pour protéger les équipements Hi-Fi contre le bourdonnement à 50 Hz du courant domestique.

Le risque économique.

Les fréquences électromagnétiques sont des denrées rares, précieuses et convoitées. La fréquence de 2,45 GHz, particulièrement bien adaptée au transport d'énergie sans fil, fait partie des bandes de fréquence attribuées pour les utilisations industrielles (tels les fours ménagers et les systèmes de chauffage). Mais la pression des opérateurs de télécommunications pourrait dans un avenir proche remettre cette attribution en cause. On pourrait voir se développer des situations similaires à celles qui règnent dans le secteur de l'urbanisme où des terrains accaparés par la spéculation immobilière sont ensuite quelquefois réquisitionnés au prix fort pour par exemple la création d'autoroutes urbaines. Il se pourrait qu'à court terme les applications du TESF soient limitées à quelques sites particuliers, jusqu'au jour où la pression énergétique mondiale sera suffisamment forte pour justifier une récupération des fréquences qui entre temps pourraient être utilisées pour les communications. Ce risque est toutefois limité par le fait signalé précédemment qu'il n'y a pas nécessairement incompatibilité entre les applications énergétiques et les systèmes de communication sur une seule et même fréquence. L'utilisation du TESF pour le fonctionnement de certains "badges" de contrôle va en faveur de cette hypothèse.

2. Etude détaillée du système

Dispositif d'émission d'ondes hyperfréquences :

Ce système a pour but la transformation de la puissance électrique du réseau EDF en une onde hyperfréquence à 2,45 Ghz. Cette transformation s'effectue à l'aide de klystrons ou de magnétrons. Une présentation et une comparaison de ces deux types de sources sont présentées dans une première partie. L'onde obtenue est ensuite concentrée en un faisceau véhiculant une forte puissance, mais de densité de puissance faible, à l'aide d'antennes à réflecteur parabolique multifocale (RPM). Ces antennes font l'objet de la deuxième partie de la présentation. Enfin, un dimensionnement du système est proposé, sur la base d'un bilan de liaison, prenant en compte toute la chaîne de transmission d'énergie sans fil. Une source hyperfréquence unique ou multiple, de puissance totale environ 31kW, s'avère nécessaire. Pour projeter cette onde vers le système de réception et redressement, situé à 700 m en contrebas, 10 antennes RPM sont utiles. Le rendement total du système TESH complet est alors estimé à environ 25%. La solution utilisant 10 magnétrons contrôlés en phase est enfin préférée à la solution d'une source unique de forte puissance.

L'objectif est de transmettre une puissance P_e vers un site distant de 700 m et d'obtenir une puissance au niveau de l'utilisation de 10 kW.

Pour des puissances de cet ordre de grandeur, nous proposons l'emploi d'un des deux types de sources suivants :

- les klystrons
- les magnétrons.

Afin de pouvoir arrêter le choix sur l'une ou l'autre de ces technologies, nous débutons par un rappel du mode de fonctionnement de ces sources.

Le klystron est un tube électronique amplificateur ou oscillateur qui fonctionne en régime continu ou pulsé. Un jet d'électron est fourni par une cathode émissive associée à un ensemble de grilles focalisatrices. Ce jet d'électron est récupéré par un collecteur. En modulant à l'aide d'une première cavité résonante, la focalisation des électrons, nous obtenons une amplification importante au niveau de la deuxième cavité. C'est à ce niveau qu'est récupérée l'onde hyperfréquence de forte puissance. Il existe des klystrons fonctionnant sur le même principe avec 3 cavités.

Le magnétron est un oscillateur hyperfréquence susceptible de fournir des puissances importantes en régime continu ou pulsé. Sa bande passante est aussi très faible, mais son rendement est élevé. Le développement de son utilisation dans les fours à micro-ondes a considérablement fait chuter son coût. C'est la source hyperfréquence la plus répandue à l'heure actuelle.

Un magnétron comporte :

- * une cathode émissive, de forme cylindrique,
- * une anode cylindrique entourant la cathode percées de cavités régulièrement espacées et couplées à l'espace anode cathode,
- * un dispositif de couplage de sortie de ligne sur l'une des cavités.

Un champ magnétique axial B produit par un aimant permanent ou un électro-aimant, sert à incurver la trajectoire des électrons. Pour une valeur correcte de la tension anode-cathode, et du champ magnétique, les électrons peuvent être considérablement accélérés. Des cavités résonantes sont positionnées dans l'anode de telle façon que le couplage entre ces cavités et le faisceau d'électron maintienne un régime stationnaire. Dans cette condition, les électrons dans leur parcours cèdent de l'énergie à l'onde hyperfréquence entretenue par la structure périodique des cavités.

Nous proposons ci-dessous, une étude comparative des deux types de sources, en termes de rendement, durée de vie, puissance maximale disponible sur le marché et contrôle en phase.

- Le rendement :

Le rendement d'un magnétron est en général supérieur à celui d'un klystron de même puissance. Cette supériorité est due au fait que le champ est mieux confiné.

- La durée de vie :

La durée de vie des klystrons est plus importante que celle des magnétrons pour une puissance identique. La présence d'arcs électriques entre l'anode et la cathode des magnétrons utilisés à pleine puissance représente l'une des causes.

Aussi les constructeurs ne manquent pas d'indiquer que la durée de vie de ces systèmes est multipliée par deux pour un fonctionnement à la moitié de leur puissance maximale et en assurant un taux d'onde stationnaire faible (bonne adaptation à la charge).

- Valeurs maximales de puissances disponibles :

Le klystron est supérieur au magnétron dans ce domaine. Ainsi, on trouvera dans les catalogues des constructeurs, des puissances pouvant être supérieures à 50 kW (Thomson CSF) pour les klystrons, contre une valeur maximale de 30 kW (California Tube Laboratory) pour les magnétrons à la fréquence de 2,45 Ghz.

Antennes à réflecteur parabolique multifocale.

Si l'utilisation d'antennes à réflecteur parabolique conventionnelles (à symétrie de révolution ou à foyer décalé) reste tout à fait possible, cette étude de cas a permis l'introduction d'un type singulier d'antennes. Il s'agit d'antennes à réflecteur parabolique, à foyer décalé. Cependant, au lieu d'utiliser comme cela se fait conventionnellement une seule portion de paraboloïde représentée par une seule focale, le réflecteur est ici découpé en tronçons de paraboloïdes, représentant chacun une focale différente. L'idée est d'offrir une antenne ayant une surface projetée dans l'axe de l'émission égale à une antenne conventionnelle, mais occupant une profondeur et un espace moindre. Le réflecteur ainsi constitué est réalisé en treillis filaire d'espacement 2 cm, pour permettre une meilleure intégration environnementale et une moindre prise au vent.

Conclusion

Nous avons étudié un système d'émission dans le cadre de la réalisation d'une liaison TESH servant à la fourniture d'une puissance électrique de 10 kW aux gîtes touristiques de Grand-Bassin. Un nouveau type d'antenne à réflecteur parabolique multifocale a été développé et s'avère être prometteur. Un dimensionnement permet d'estimer à 10 le nombre d'antennes de ce type à utiliser, avec une puissance RF de 3 kW par antenne. Le rendement global de la liaison TESH complète (réseau EDF - utilisation) est estimé à 25% environ. Pour cette application, les magnétrons utilisés en pseudo-amplificateurs contrôlés en phases semblent mieux adaptés que les klystrons, pour des raisons de coût à l'achat, de coût de maintenance, de rendement (coût de fonctionnement), et d'évolutivité du système vers des puissances supérieures.

Dispositif de réception d'ondes hyperfréquences :

Dans le concept de transport d'énergie sans fil, la conversion de l'énergie transportée par l'onde en courant continu constitue un élément clé du système. Nous avons dénommé ce sous-ensemble "radiopile". Ce terme est à rapprocher de celui de photopile bien connu par les utilisateurs des rayonnements dans la gamme de l'I.R., le Visible et l'UV.

Comme pour les cellules photovoltaïques, notre objectif est de recueillir le maximum d'énergie transportée par l'onde électromagnétique et de la convertir en courant continu. Il existe deux techniques de base :

- les radiopiles, constitués par l'association d'une antenne ou d'un sous réseau d'antenne à un système de redressement à diode et de filtrage.
- le CWC (Cyclotron Wave Converter) qui est un tube à vide qui réalise le fonctionnement inverse du klystron.

La principale différence entre les deux systèmes se situe au niveau des puissances mise en jeu sur un élément de base. Le CWC travaille à des puissances de l'ordre du kW, tandis que la radiopile travaille à des niveaux de l'ordre du Watt. L'unité de réception prévoit l'utilisation des deux systèmes, mais l'accent sera mis sur les radiopiles. Les CWC seront installés en périphérie du système afin de mener une étude comparative.

Avant de s'attaquer à l'ensemble antenne et unité de redressement, nous allons voir les antennes utilisées à la réception.

Antenne de réception. Nous devons avoir à l'esprit que les contraintes sécurité et environnementale sont fortes. Nous nous plaçons d'emblée dans les conditions de fonctionnement qui respectent les normes actuelles, à savoir :

- faible densité de puissance de l'onde hyperfréquence (sécurité).
- intégration des antennes dans le paysage (environnemental).

Notre choix s'est porté sur les antennes filaires pour plusieurs raisons:

- technologie bon marché
- intégration aisée dans l'environnement
- transparence du système au rayonnement solaire.

La technologie ainsi retenue s'appuie sur les mêmes concepts que pour les antennes utilisées dans l'expérience de Goldstone par R. M. Dickinson et W. C. Brown, avec cependant quelques nouveautés. Les éléments de base ne sont plus des dipôles demi-onde, mais des dipôles H proposées par G. Pignolet. Ces dipôles présentent un gain de directivité supérieur à ceux des dipôles demi-onde et sont moins sensibles à la dépolarisation.

D'autre part, lors de l'expérience de Goldstone, chaque dipôle était connecté à un module de redressement, et la ligne bifilaire transportant les micro-ondes servait aussi de bus pour le transport de la puissance continue. Ceci n'est possible et intéressant que dans la mesure où la puissance micro-onde récoltée par chaque dipôle est suffisante pour assurer un bon rendement de conversion micro-onde continu. Il a été montré que le rendement de conversion augmente avec la puissance à l'entrée du module de conversion, pour un redressement à l'aide d'une seule diode. Dans la mesure où la liaison TESH de point à point se doit de respecter les normes de sécurité, tout en assurant un rendement suffisant, il a été proposé de grouper plusieurs éléments d'antenne, afin d'augmenter le rendement global. Cela doit se faire cependant, sans nuire au faible coût des systèmes initiaux que représente la technologie utilisée pour l'expérience de Goldstone, c'est pourquoi la technique de la ligne bifilaire a été conservée et préférée aux systèmes à câble hyperfréquence, de plus faible perte, mais aux coûts prohibitifs.

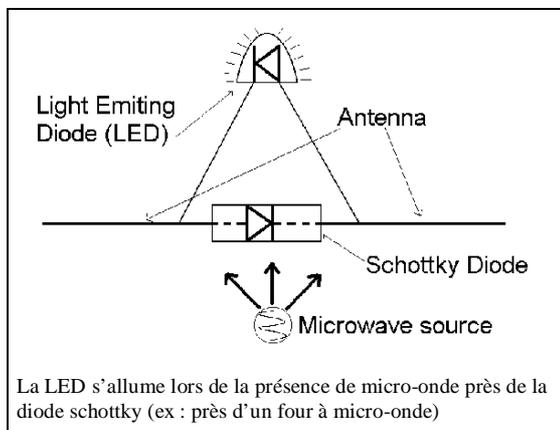
Des techniques utilisant de simples plaques de circuit imprimé époxy permettraient de diminuer encore davantage les prix, cependant, pour des raisons d'intégration dans le paysage, la technologie filaire a été préférée.

Circuit de redressement

Nous allons présenter les deux types de circuit de redressement étudié actuellement pour la conversion de l'énergie transportée par l'onde hyperfréquence en courant continu.

Le plus ancien est celui utilisant des diodes, mis à part sa faible puissance, ce type de système autorise un développement futur des radiopiles en technologie des circuits intégrés.

Les circuits à diodes.



Pour effectuer la conversion de l'onde hyperfréquence en courant continu, l'utilisation d'un pont de diode assure le meilleur rendement si le niveau du signal d'entrée est suffisant.

Comme nous travaillons à des très faibles densité de puissance (5 mW/cm²), nous utilisons un regroupement en sous-réseau des antennes de base avant d'attaquer l'unité de redressement.

Le problème actuel est le coût de ces diodes hyperfréquences et la puissance maximale admissible. Nous travaillons avec des diodes schottky japonaises de la société NEC qui ont un prix de vente très inférieur à ces équivalents du marché.

La puissance maximale autorisée pour cette diode est de l'ordre de 150 mW . Afin de pouvoir supporter la puissance de 2W présente au niveau de la charge de chaque sous réseau, nous serons amené à effectuer une mise

en parallèle et en série de 16 diodes. En assurant l'adaptation d'impédance sur une large bande de fréquence, différents auteurs ont présenté des simulations et des réalisations qui permettent d'atteindre des rendements de conversion de l'onde hyperfréquence en courant continu de l'ordre de 80% en moyenne.

Il est à noter que la présence d'éléments non linéaires (diodes) entraînent une dépendance du rendement vis à vis de la puissance redressée. Notre système d'émission fonctionne par palier de puissance pour assurer une régulation correcte en sortie. Cela nous amène à optimiser notre système en se basant sur la puissance de fonctionnement la plus usitée. Par conséquent nous définissons un rendement moyen de conversion inférieur à la valeur optimale. Nous adoptons un rendement moyen de 0,6 pour le système de redressement.

Le Cyclotron Wave Converter (CWC)

Le CWC est tube qui permet de transférer l'énergie d'une onde hyperfréquence à un flux d'électron continu grâce à une disposition appropriée du champ magnétique le long de son parcours. On peut dire que le CWC est un klystron fonctionnant en inverse. En sortie nous avons une tension de forte valeur (plusieurs kV) aux bornes d'une charge résistive. Les avantages de ce système sont :

- son rendement élevé : supérieur à 90 %
- sa forte puissance disponible en sortie: de 1 kW à 10 kW.

Ses inconvénients sont :

- nécessité de le polariser au préalable avec une tension élevée pour un fonctionnement correct.
- sa masse

Ces deux points limitent son champ d'utilisation. Nous le conservons néanmoins dans notre système pour le cas intéressant d'un système de réception unique (un réseau d'antenne et un CWC) pour des puissances de l'ordre de quelques kW.

Conclusion

Nous avons présenté un système de réception qui respecte les deux points primordiaux de notre étude de cas, à savoir:

- une sécurité selon les normes en vigueur dans le cas d'une exposition permanente
- une intégration possible du système dans l'environnement du site.

L'amélioration du rendement de conversion de l'énergie de l'onde hyperfréquence en courant continu peut être atteint en améliorant le système de réception à deux niveaux:

- le gain des antennes à la réception
- le développement de diodes spécifiques aux radiopiles.

Ces deux points sont intimement liés, à savoir, si vous augmentez le gain des antennes les diodes devront supporter une puissance supérieure. Le côté économique n'est pas négligeable si on arrive à réduire le nombre de diodes. Dans l'état actuel, nous estimons qu'un rendement de conversion de l'ordre de 60 % est tout à fait réaliste au niveau du système de réception.

Mise en forme de la puissance :

La puissance recueillie sous forme continue à la sortie des radiopiles nécessite une mise en forme avant utilisation finale. La charge est constituée par un réseau classique 220Vac /50 Hz/ 10 kVA. Nous devons nous attacher à obtenir le meilleur rendement possible tout au long de cette chaîne de transmission.

La faisabilité du système TESF dans le cadre de l'étude de cas de Grand Bassin est démontrée. Il reste à opérer les derniers choix stratégiques avant la mise en œuvre des éléments constitutifs.

D'une manière plus générale, la mise en œuvre d'un réseau de distribution alimenté à partir d'un système TESF met en œuvre les technologies les plus modernes relatives au conditionnement des réseaux:

- Compensateurs statiques d'énergie réactive
- Stockage des surcharges impulsionnelles
- Stockage d'énergie longue durée (batteries; hydraulique)
- Convertisseurs statiques (onduleurs, convertisseurs DC/DC)
- Pilotage automatisé (dispatching)

3. Conclusion

Etat de la recherche :

Puissance Source	Puissance Projetée	Puissance Reçue	Puissance Utilisateur
	conversion ~ ⇒ MO	Récupération faisceau	conversion MO ⇒ ~
	60%	60%	60%
50 kW	30 kW	18 kW	11 kW

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.

*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. En conséquence, à partir du moment où le rendement du TESF dépasse 5%, il peut fournir de l'électricité à un coût plus économique que les systèmes photovoltaïques actuels.

Applications :

CENTRALES SOLAIRES ORBITALES

Les Centrales Solaires Orbitales (CSO) furent proposées initialement comme une solution à la crise pétrolière des années 70, par un ingénieur américain d'origine tchèque nommé [Peter Glaser](#). Alors en poste au laboratoire Arthur D. Little, Glaser imagina un réseau de 50 km² de cellules solaires déployé sur des satellites mis à poste à une altitude de 36000 km au-dessus de points fixes de l'équateur. Un satellite sur une telle orbite géostationnaire, effectue une rotation autour de la terre en 24 heures et reste donc à tout instant en vis-à-vis d'un point fixe sur terre.

L'idée était élégante; les cellules photovoltaïques convertiraient l'énergie solaire en courant électrique. A son tour, ce courant électrique serait converti en onde hyperfréquence. Cette onde serait rayonnée selon un faisceau pointant vers une région déterminée de la surface terrestre. Au niveau de cette région, un réseau d'antennes de redressement (radiopiles), récupérerait

l'énergie contenue dans le faisceau et transformerait celle-ci en énergie électrique pour une utilisation sur site ou pour la distribution au travers d'un réseau électrique conventionnel.

Grand Bassin :

Comme beaucoup d' autres sites de La Réunion, Grand Bassin offre aux touristes et aux promeneurs des panoramas de niveau mondial. 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...(plus...)

Coût :

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

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.

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

4. Bibliographie

http://wb150.lerelaisinternet.com/tesf/tesf_main.htm

<http://www.sciences-et-avenir.com/archives/624/Demain.html>

<http://www.univ-reunion.fr/~lcks/spsConcl.htm>

<http://www.ac-grenoble.fr/yre/agency/library/missions/missrep1997/online/rap-nuc.htm>

5. Lexique

t.e.s.f : Transport de l'Energie Sans Fil

CWC : Cyclotron Wave Converter

SPS : Solar Power Satellite (centrale solaire spatiale)

RPM : réflecteur parabolique multifocale

Paraboloïde : surface du 2° degré dont le centre est projeté à l'infini et qui admet une infinité de plans diamétraux, tous parallèles à une même droite.

Directivité : direction préférentielle dans l'émission ou la réception de rayonnement électrique ou sonore.

Grand bassin : site touristique de la réunion