

TRANSMISSION D'ÉNERGIE A DISTANCE

François COSTA

LESIR-SATIE, ENS de Cachan - 61, av. du Président Wilson, 94230 CACHAN

Email : francois.costa@lesir.ens-cachan.fr

Résumé :

De nombreuses applications nécessitent de pouvoir transmettre de l'énergie sans contact sur des distances variables, de quelques centimètres pour les applications les plus courantes à quelques centaines de mètres voire des milliers de kilomètres pour des applications futuristes. Une tendance qui milite en faveur de la transmission d'énergie sans contact est le développement des appareils nomades. Cet article veut faire le point sur les domaines d'applications et les principes utilisés et montre les contraintes technologiques qui en résultent. La gamme d'application va de la brosse à dent électrique autonome jusqu'aux très futuristes satellites solaires !

1- Introduction

Avant d'aborder l'exposé des différentes techniques permettant le transfert d'énergie sans contact, il semble nécessaire d'examiner les besoins justifiant de ce principe, qui comme on le verra plus loin, a l'inconvénient d'un rendement de transfert assez médiocre en l'état de la technique actuelle.

L'absence de contact galvanique peut se justifier pour les catégories de systèmes suivants :

- systèmes pour lesquels le stockage d'énergie est limité : véhicules électriques, robots, éléments de machines outils, appareils domestiques portatifs.
- systèmes dans lesquels il est impossible d'établir une liaison galvanique pour des raisons de sécurité : appareils implantés dans le corps humain, domaine médical, applications domestiques à haute sécurité, domaine nucléaire.
- systèmes de badges pour l'authentification, le télépéage et les dispositifs de sécurité.
- systèmes à très haute immunité aux perturbations électromagnétiques, nécessitant un grand éloignement vis-à-vis de la source de perturbations.
- systèmes très éloignés entre lesquels une liaison galvanique est impossible : entre un satellite ou un aéronef et la terre par exemple.
- systèmes dans lesquels le contact galvanique induit une limitation de fonctionnement : engins de manutention, grues par exemple.

Différentes techniques de transfert d'énergie sont adaptées à chacun de ces cas.

A l'heure actuelle, les applications concrètes qui nécessitent ces techniques sont essentiellement limitées au domaine médical pour de très faibles

puissances (quelques 10W) et au domaine des applications industrielles (robotique, manutention) pour les fortes puissances. Dans les autres domaines, seules quelques réalisations expérimentales, des simulations ou des études prospectives existent. Les contraintes économiques, de fiabilité et de sûreté de fonctionnement, d'impact sur l'environnement, et parfois technologiques interdisent actuellement leur développement.

L'objectif de cet article est de décrire les deux grands principes de transmission d'énergie, en abordant leurs domaines d'application, leurs limitations, les améliorations potentielles.

2- Les principes de transmission d'énergie, généralités

Deux principes de transmission d'énergie sans contact utilisant les champs électromagnétiques sont essentiellement employés. L'article exclue les autres modes de transferts d'énergie à distance comme les faisceaux laser [DUCH91] ou les faisceaux de particules, qui sont réservés à des contextes très particuliers (espace) ou en sont à un niveau très avancé d'étude.

Les deux principes de transmission d'énergie par champs électromagnétiques se distinguent par la portée que l'on souhaite atteindre. Pour une transmission sur faible distance (par exemple comprise entre 10^{-3} et 10^{-1} m), le principe utilisé est l'induction magnétique. Les dispositifs s'apparentent à des transformateurs à air dans lesquels on focalise parfois les lignes de champ pour un meilleur rendement. Les principales applications se situent dans les domaines de :

- prothèses médicales, organes artificiels, monitoring : une littérature abondante décrit des principes d'alimentation de pompes cardiaques par ce moyen.
- la recharge du véhicule électrique et plus généralement de dispositifs "nomades" : téléphones mobiles, outillage électroportatif, accessoires électroménagers.
- l'alimentation de petits véhicules électriques sur des voies guidées ou non.
- Le domaine de la robotique et de la machine outil pour accroître les degrés de liberté et leur autonomie.
- Les applications telles que le chauffage par induction ou l'éclairage [EH96].

Dès lors que la distance de transmission dépasse la gamme précédente, le principe utilise la propagation de l'énergie par champs électromagnétiques. L'efficacité de transmission sur des distances comprises dans la gamme 10 à 10^6 m implique des fréquences de travail de l'ordre du GHz ou plus pour conserver une focalisation satisfaisante du faisceau et un rendement acceptable.

Les applications industrielles n'existent pas encore en terme de transmission, elles existent cependant en matière de chauffage par micro-onde à des puissances ne dépassant pas l'ordre du kW à la dizaine de kW. Cependant ce thème est à l'étude dans plusieurs laboratoires et fait l'objet de nombreuses études théoriques et de quelques expérimentations depuis une quarantaine d'années.

3- La transmission sur grande distance par faisceaux de micro-ondes

3.1- Historique

L'utilisation de faisceaux micro-onde pour la transmission d'énergie date du début des années 1950. L'observation spatiale étant inexistante et, dans le contexte de la guerre froide, l'armée américaine envisagea des plates-formes d'observation héliportées stationnaires en haute altitude (15 000m), qui seraient restées postées sur de longues périodes, d'où l'idée l'apport d'énergie par faisceaux directifs micro-ondes (fig. 3-0). La société Raytheon au travers des travaux de William C. Brown, spécialiste de la fabrication de tubes d'émission micro-onde participa initialement à ce programme (projet RAMP : Raytheon Airborn Microwave Plateform 1959). L'utilisation de micro-ondes (λ de l'ordre de 10cm, fréquence de l'ordre de 3GHz) est nécessaire afin de pouvoir utiliser des

réflecteurs et des lentilles de tailles raisonnables pour focaliser le faisceau. On démontra qu'il est théoriquement possible de transmettre de l'énergie micro-onde avec un rendement proche de 100% [GOU].

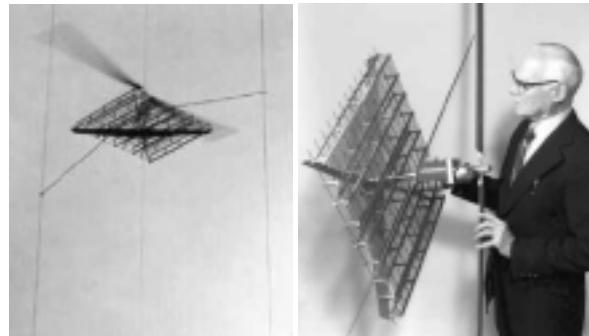


Fig. 3-0 – Prototype de plate-forme héliportée

A cette époque existaient différents problèmes liés à la technologie disponible :

- au niveau des sources de micro-ondes de forte puissance,
- au niveau du pointage des antennes,
- au niveau de la conversion micro-ondes –DC. Le concept d'antenne redresseur (rectenna) apparut : c'est une structure qui intègre le dipôle récepteur, un filtre anti-harmoniques et le redresseur, le principe sera détaillé plus loin.

Depuis ces années d'origine, des progrès ont été accomplis tant en matière de technologies à mettre en œuvre que de nouveaux concepts. Les exemples qui suivent relatent ces évolutions.

3.2- Projet SPS (Solar Power Satellite)

Ce concept a été introduit en 1968 par Peter Glaser [GLA83], [BRO92], [GAR] : un satellite en orbite géostationnaire capte l'énergie solaire disponible en permanence grâce à des photopiles, cette énergie est ensuite envoyée sur terre par faisceau micro-ondes. La figure 3-1 présente une vue d'artiste de ce concept.

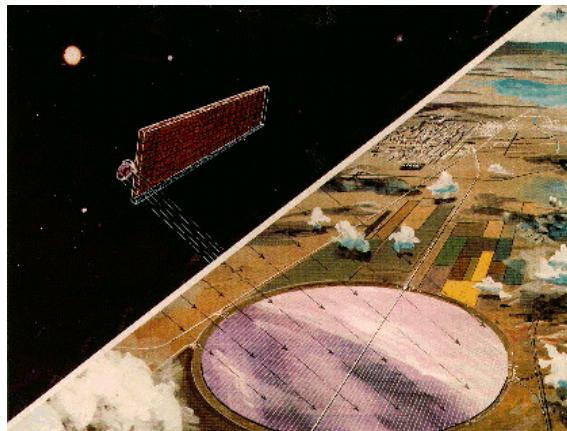


Fig.3-1- Concept du satellite SPS

Cette solution veut représenter une alternative à la disparition des énergies fossiles et aux restrictions d'utilisation de l'énergie nucléaire pour cause d'écologie. Les équipements sont dimensionnés pour une puissance fournie de l'ordre de 5 GW. Le satellite mesure 5200m x 10400m pour ce qui est de la surface de captage du rayonnement solaire. Celui-ci est de 1400W/m² dans l'espace, soit 40% de plus que sur terre avec un taux de disponibilité de 100%.

Le rendement de cette première conversion est estimé à 15%. L'antenne d'émission à réseau présente un diamètre de 1000m. La source micro-onde est constituée par 100 000 tubes klystron de 70kW de puissance unitaire émise. Le rendement de transmission DC-DC est estimé entre 58 et 72%, chiffres en réalité atteints en laboratoire à faible niveau de puissance transmise. Les antennes réceptrices au sol sont elliptiques (10km x 13km) et captent l'énergie sous une densité de l'ordre de 100W/m² à 2,45GHz. La figure 3-2 présente quelques détails de structure de ce premier concept de satellite SPS ainsi que la station de réception au sol.

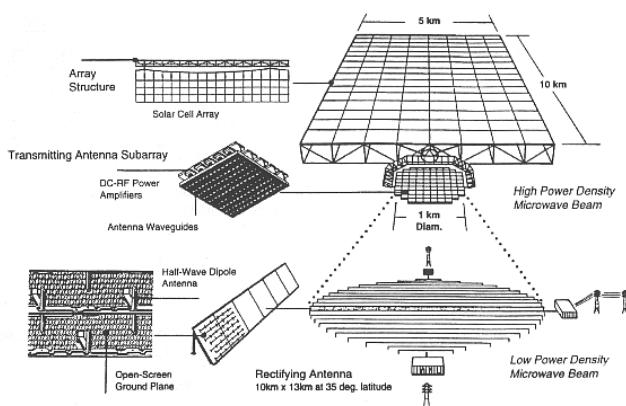


Fig.3-2- Détails du satellite SPS, première génération

Récemment (1997), la NASA a réactivé cette idée avec le concept de tours solaires (fig. 3-3) qui constitue une approche plus modulaire et standardisée du concept SPS, de façon à pouvoir lancer des modules par des fusées classiques. Par ailleurs, des progrès sensibles ont été réalisés sur les différents maillons technologiques, en particulier sur les cellules solaires pour lesquelles le rendement pourrait approcher 25%.

Chaque tour solaire peut fournir une puissance de 100 à 400MW pour un coût de 8 à 15 Milliards d'Euro, ce qui représente une réduction d'un facteur 30 par rapport au concept initial, soit un prix variant de 20 à 40 Euro/Watt. Les sources micro-onde sont à base de transistor de puissance RF et le pointage est réalisé grâce à des antennes électronique à balayage, technique maintenant classique en radar. Le satellite est en orbite intermédiaire vers 12000 km.

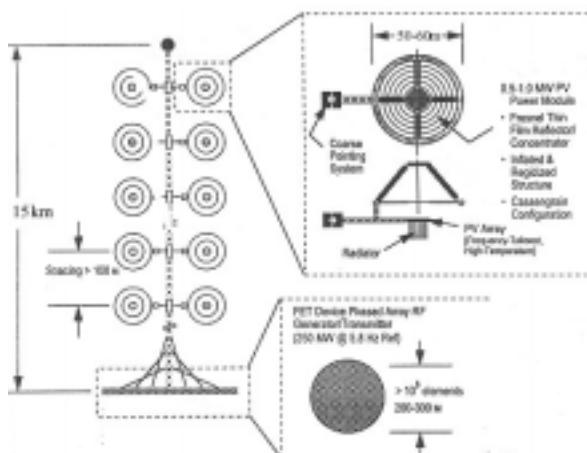


Fig.3-3 - Concept de tour solaire modulaire et détails de la structure

Un projet similaire est étudié depuis plusieurs années au Japon [OMI96], [SAK96], il s'agit du programme SPS2000. C'est un ensemble de satellites à défilement qui orbitent à 1100km

d'altitude sur le plan de l'équateur, chaque satellite peut transmettre 10MW. Plusieurs stations de réception sont situées à cette latitude et recueillent l'énergie. La figure 3-4 suivante illustre ce concept.

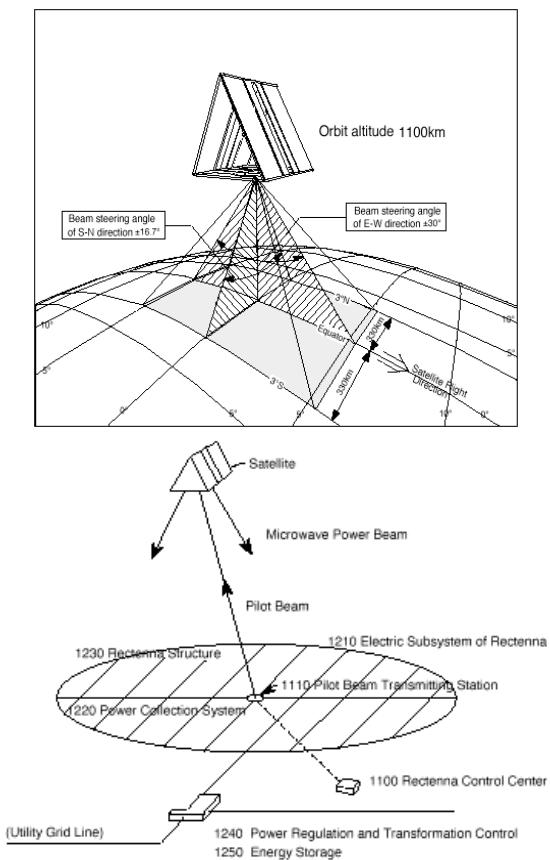


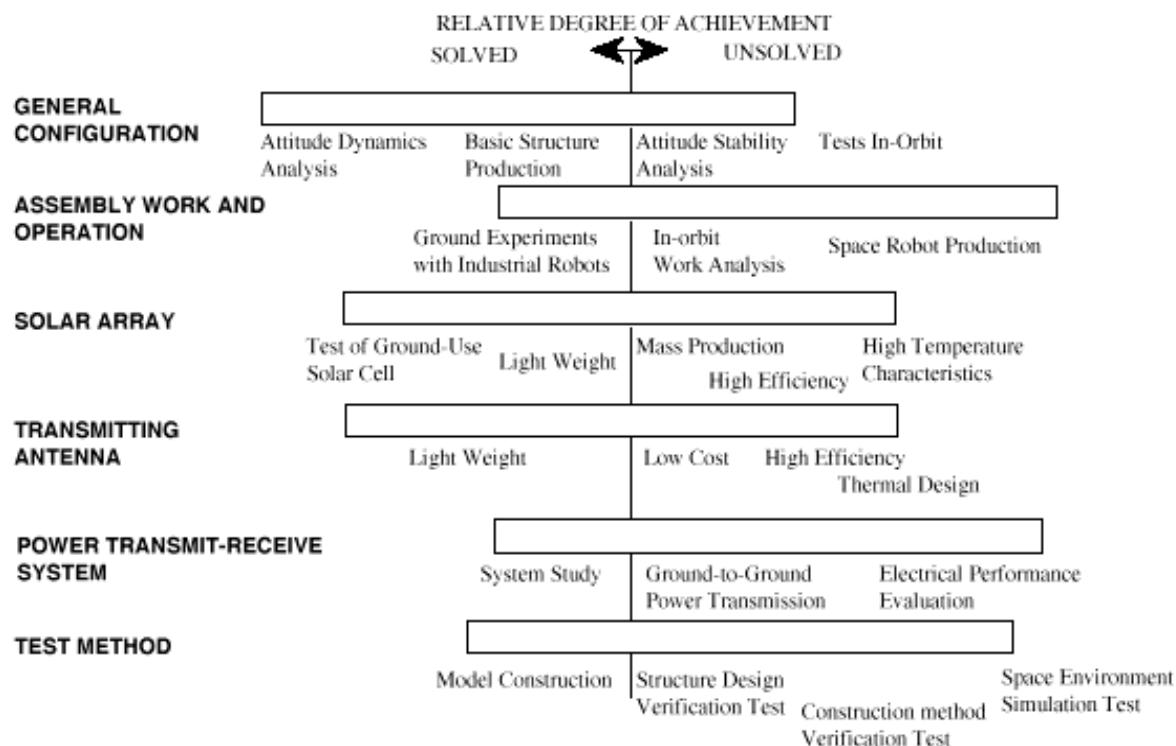
Fig. 3-4 – Satellite SPS2000 et station de réception

Le tableau suivant permet de comparer les coûts au Watt en capital (investissement à réaliser) et en production pour diverses sources d'énergies.

	charbon	gaz	nucl.	hydro	solaire	SPS
coût capital Euro/W	3,2	1,8	3,5	5,3	13	20/40
coût de production c/kWh	5	3	4,5	3	6	4

Il apparaît clairement que la solution SPS est encore peu compétitive, mais qu'elle est susceptible de devenir à moyen terme.

Enfin, plusieurs verrous technologiques subsistent à tous les niveaux du concept ainsi qu'une très grande méconnaissance des effets biologiques des micro-onde, comme le montre le document suivant tiré du site web de la NASA. Il y a donc de nombreux travaux à réaliser sur terre avant de voir le premier démonstrateur dans l'espace !



3.3- Autres projets dans l'espace ou aéroportés

D'autres projets utilisant la transmission de micro-onde dans l'espace ont été imaginés, tels :

- le projet LEO to GEO (Low Earth Orbit to Geostationary Orbit) : c'est un projet de véhicule spatial permettant le transfert de fortes charges (50T) d'une orbite basse à l'orbite géostationnaire en utilisant des propulseurs ioniques (Xénon) alimentés en énergie électrique transmise par faisceau micro-ondes depuis la terre [BRO84] ou depuis un satellite SPS en orbite basse.

Il consiste en un satellite réflecteur situé en orbite géostationnaire qui assure le transfert d'énergie entre stations ou véhicules spatiaux.

- le projet HALE (High Altitude Long Endurance aircraft) : c'est un avion sans pilote volant à une altitude de 20km durant plusieurs mois ou semaines pour assurer une fonction de relais de télécommunications ou de station météo de haute altitude, cette solution étant nettement moins onéreuse qu'un satellite, on revient là à l'idée d'origine.

3.4- Projet WPT (Wireless Power Transmission)

Dans ce cas, l'idée consiste à transmettre de l'énergie entre deux points fixes sur terre. Un démonstrateur est en cours de réalisation sur l'île de la Réunion d'une transmission sans fil de 10kW sur 700m par micro-ondes à 2,45GHz pour assurer la fourniture d'énergie à un village isolé (site de Grand Bassin) [LAN]. La densité d'énergie du faisceau est de 25mW/cm². Le respect du cadre environnemental a conduit à choisir cette solution. Le coût estimé est de l'ordre de 4MF. Le rendement global visé est de 20%, l'énergie est fournie par le réseau EDF. Les premiers essais de faisabilité ont eu lieu durant l'été 2001 pour une puissance transmise de quelques dizaines de Watt.

4- Principe de la transmission d'énergie par micro-ondes, limitations

4.1- Principe

Le principe consiste à transformer une puissance continue en énergie micro-onde puis à transmettre cette énergie via une antenne directive et enfin à assurer la conversion inverse sur une antenne redresseur de réception. Le schéma de principe est représenté à la figure 4-1. Un rendement de

transmission correct ne peut être obtenu que dans une zone de l'espace où le faisceau n'a pas trop divergé.

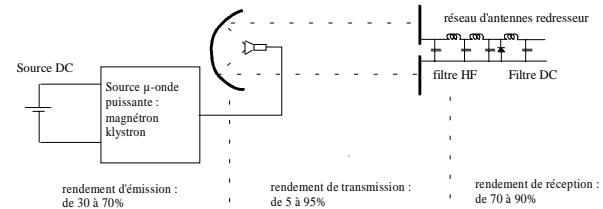


Fig. 4-1 - Principe de la transmission

4.2- Rendement de transmission

Plusieurs paramètres permettent de définir les caractéristiques et le rendement de la transmission. Dans les conditions de transmission décrites sur la figure 4-1 (faisceau faiblement divergent), l'expression de la densité de puissance χ obtenue au centre de l'ouverture de réception, dans l'axe de l'ouverture d'émission de surface A_e , à une distance d , délivrant une puissance P avec un rayonnement micro-onde de longueur λ est donnée par :

$$(1) \quad \chi = \frac{A_e \cdot P}{(\lambda \cdot d)^2}$$

Cette expression montre l'intérêt de travailler avec une faible longueur d'onde pour maximiser χ . Le rendement de la transmission dépend des paramètres A_e , A_r (ouverture de réception), d , λ . On définit un paramètre normalisé τ :

$$(2) \quad \tau = \frac{\sqrt{A_e \cdot A_r}}{\lambda \cdot d}$$

La courbe (figure 4-2) suivante résultant des travaux de [GOU] précise l'évolution du rendement de transmission (puissance reçue/puissance émise) en fonction de τ .

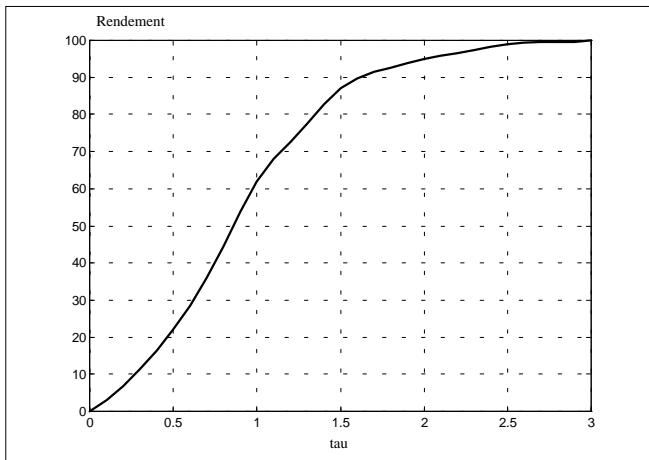


Fig. 4-2- Rendement de transmission

On constate donc la possibilité de transmettre de la puissance avec un rendement proche de 1. On remarque toutefois que la taille de l'ouverture d'émission croît avec la distance à laquelle on veut transférer l'énergie. En supposant $\lambda=10\text{cm}$ ($F=3\text{GHz}$), un rendement de transmission de 95%, soit $\tau=2$, et en supposant de plus que l'ouverture d'émission est quatre fois plus petite que celle de réception, $A_r=4.A_e$, on en déduit une relation entre le diamètre de l'antenne d'émission et la distance de transmission :

$$(3) \quad D = 0.36 \cdot \sqrt{d}, \quad D \text{ et } d \text{ en mètre}$$

Une transmission sur 10km nécessite donc une antenne de 36m de diamètre. On est donc amené à accepter une dégradation du rendement de transmission pour obtenir des dimensions d'antenne acceptables. Par exemple le projet sur l'île de la Réunion de transmission de puissance de 10kW est dimensionné pour un rendement global de 20%, soit un rendement de transmission de l'ordre de 50%. Le choix de la fréquence est important à plusieurs titres : il influe sur le rendement de transmission comme le montrent les équations (1), et (2). Par ailleurs, il dépend des propriétés physiques du milieu dans lequel s'opère la propagation. Il n'y a pas de restriction dans le vide, il est alors intéressant de travailler à la fréquence la plus élevée possible, compatible avec un bon rendement des tubes d'émission et du dispositif de réception.

La gamme de 35GHz semble bien adaptée à la technologie actuelle des tubes d'émission. Par contre dans l'atmosphère, le rendement décroît fortement au delà de 3GHz à cause de la présence de molécules d'eau, la fréquence de 2,5GHz est intéressante car il est possible d'utiliser des

magnétrons (puissance de l'ordre du kW) en réseau, analogues à ceux utilisés en chauffage micro-onde ou des klystrons. Le rendement est de l'ordre de 70% pour les magnétrons.

Même si l'atténuation dans l'atmosphère augmente fortement pour des fréquences supérieures à 3GHz, il existe cependant quelques fenêtres comme le montre la courbe 4-3. Notamment la fenêtre à 35GHz peut être intéressante pour des transmissions de quelques dizaines de kilomètres.

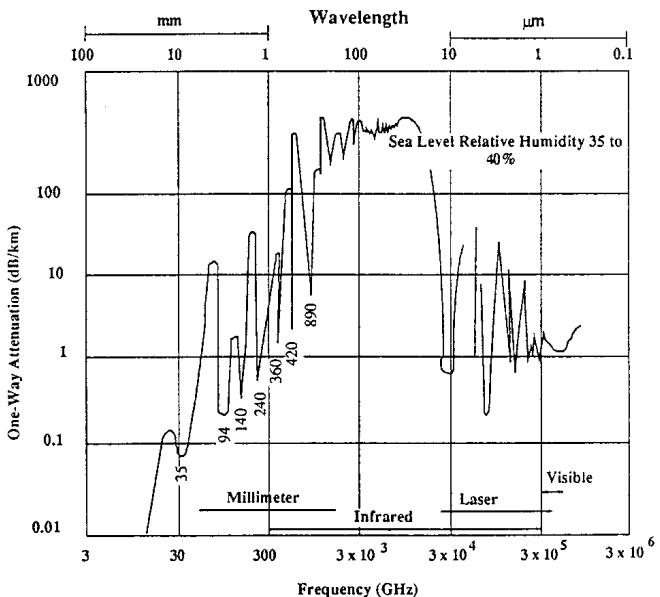


Fig. 4-3- Atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence

4.3- Les sources micro-onde

Les sources micro-onde de forte puissance sont essentiellement des tubes à vide [FIR91]. Leurs domaines d'applications actuels se situent dans les télécommunications, le radar et les applications d'instrumentation scientifique et médicale (accélérateurs). Leur gamme de fréquence s'étend de 1 à 100GHz. Les semi-conducteurs de puissance (As-Ga) adaptés à la gamme 1GHz-30GHz ne dépassent pas quelques dizaines de watt. La courbe 4-4 présente dans un plan puissance/fréquence, les technologies de sources micro-ondes actuellement disponibles [FAI].

Les dispositifs envisagés dans les applications de transmission d'énergie sont :

- le klystron qui est un tube amplificateur qu'on peut facilement associer pour constituer des sources très puissantes, son rendement n'excède toutefois pas 40%.
- le magnétron qui est un oscillateur et dont la mise en parallèle est délicate, car le contrôle de

phase est difficile et sa fréquence propre n'est pas toujours suffisamment stable. Il est cependant bon marché et son rendement peut atteindre 70%. Des travaux sont en cours sur le synchronisation des magnétron.

- D'autres variétés de tubes existent : gyrotrons, tubes à ondes progressives, mais leurs rendements inférieur à 30% ne permettent pas actuellement de les utiliser en transmission d'énergie, des études sont en cours pour améliorer leurs performances.

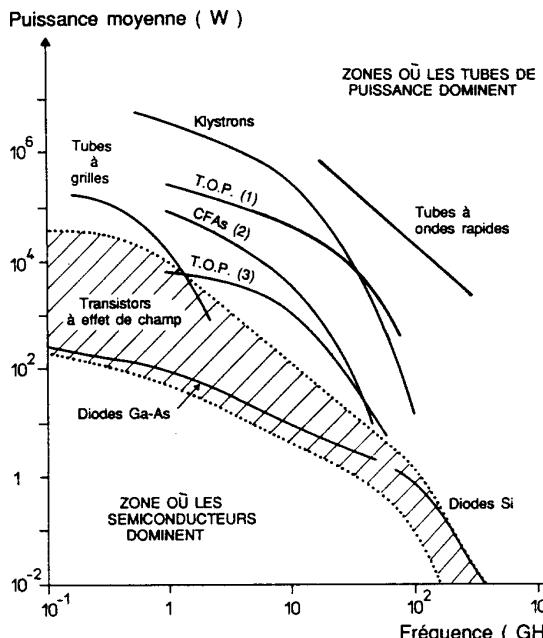


Fig. 4-4 -Technologies de sources à micro-ondes selon la fréquence

4.4- Conversion d'énergie en réception

Le convertisseur d'énergie micro-onde-courant continu est une antenne intégrant un filtre HF qui évite la re-émission des harmoniques du redresseur, un redresseur et un filtre BF. Ce dispositif est dénommé rectenna (rectifier-antenna) [BRO92], [SPA92], [LOG91], [PIGN96], [ITO91]. L'antenne est constituée de dipôles élémentaires associés en séries parallèles comme représenté sur la figure 4-5. Pour augmenter le rendement de réception, un réflecteur est associé au réseau de cellules.

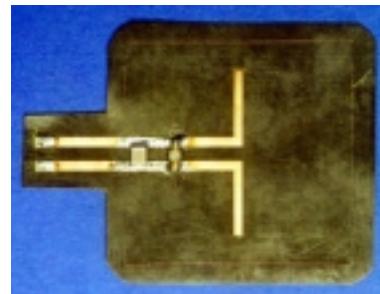
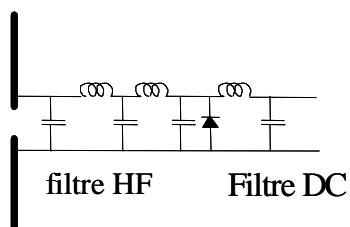


Fig. 4-5 a)–Principe du Rectenna et exemple de réalisation (5,8Ghz)

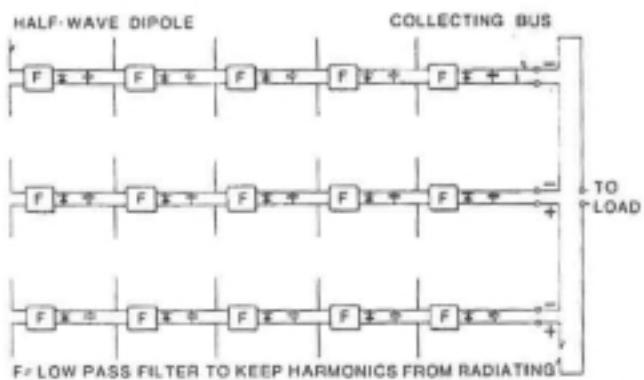


Fig. 4-5 b) – Association de cellules

La présence du filtre HF permet d'éviter la circulation dans le dipôle des courants harmoniques générés par le redresseur. Ceci optimise le rendement. La cellule de filtrage classique LC en sortie permet de restituer la composante continue de la tension redressée. La charge de sortie doit être adaptée pour un rendement optimal de la cellule comme l'indique la courbe de la figure 4-6.

Il ressort qu'à 2,45GHz, un rendement de 85% peut être obtenu, il se dégrade jusqu'à environ 70% à 35GHz. La diode détermine essentiellement le rendement, ainsi que son adaptation aux impédances des circuits de charge et de filtre.

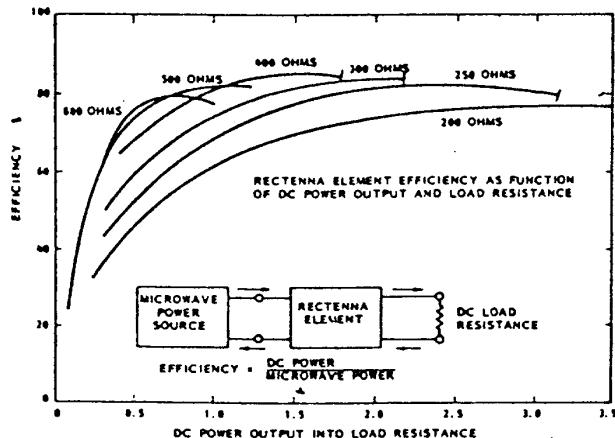


Fig. 4-6- Evolution du rendement de la cellule en fonction de la résistance de charge

4.5- Pointage du faisceau

Le pointage du faisceau est nécessaire dans les applications où les antennes sont susceptibles de bouger l'une par rapport à l'autre. Le rendement de transmission et la sûreté de fonctionnement imposent que la densité maximale de puissance du faisceau coïncide avec le centre de l'antenne réceptrice. Plusieurs techniques ont été proposées pour assurer le guidage du faisceau, elles supposent que le faisceau puisse être dirigé à l'émission et que l'antenne de réception soit munie de capteurs adéquats pour assurer le retour d'informations de guidage [FIT83].

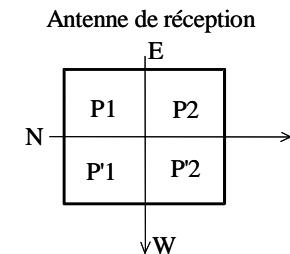
Le pointage peut être obtenu de deux façons : mécaniquement ou par utilisation d'antennes émettrices à balayage électronique [BAD84].

Un des principes de détection du faisceau sur l'antenne de réception est illustré à la figure 4-7. L'antenne de réception est subdivisée en quatre aires égales selon les directions NS et EW. Une mesure de puissance (P_1, P_2, P'_1, P'_2) est effectuée pour chaque zone. Un signal d'erreur est fourni dans chacune des directions NS et EW par la mesure de la différence de puissance dans les demi-plans correspondants comme indiqué :

$$(5) \quad \epsilon_{ns} = (P_1 + P'_1) - (P_2 + P'_2)$$

$$(6) \quad \epsilon_{ew} = (P_1 + P_2) - (P'_1 + P'_2)$$

Le principe de guidage consiste donc à annuler l'erreur dans chaque direction pour assurer une illumination uniforme de l'antenne et le centrage du faisceau.



système sans capteur

Fig. 4-7- Principe de guidage du faisceau sans capteur

La vitesse de poursuite de la cible est liée à sa taille. Les études proposées [BROW] suggèrent que l'erreur de pointage ne doit pas dépasser le 1000ème du diamètre de l'antenne de réception. Selon sa vitesse de déplacement, on obtient donc la période d'échantillonnage des informations de pointage. Cette contrainte peut donc être assez sévère en terme de contrôle pour des mobiles rapides tels les satellites à défilement ou les avions sans pilote.

4.7- Les limitations du principe

Actuellement les limitations sont de trois ordres, technologiques biologique et politique. Le premier point a été évoqué dans ce qui précède, concernant les derniers points, le CISPR, organisme international qui régit l'attribution des fréquences, refuse l'accord pour ce type applications de transfert d'énergie à 2,45GHz pour les raisons suivantes :

- interférences avec les télécommunications
- interférence avec l'observation astronomique
- effets physiologiques non connus [LEH91].

4.8- Conclusion

Compte tenu des éléments présentés, cette technique de transmission d'énergie est plutôt bien adaptée à la transmission espace-espace ou terre-espace. Dans ces situations, les contraintes biologiques et environnementales sont réduites et il est possible d'utiliser des fréquences élevées (>10GHz) de façon à réduire la taille des antennes. Les évolutions technologiques sur les dispositifs d'émission et sur les antennes de réception devraient permettre l'amélioration du rendement pour aboutir à des solutions économiquement viables. Les liaisons espace-terre ou terre-terre paraissent beaucoup plus contraignantes, compte tenu de la densité de puissance permise (50W/m²), de la gamme de fréquence possible (2,45GHz), et donc de la taille des antennes.

5- La transmission à courte distance par induction électromagnétique

5.1-Les grands domaines d'application

Les domaines principaux dans lesquels ce principe est employé sont par ordre d'importance (relativement aux publications observées) :

- les applications médicales : pour l'alimentation en énergie des organes artificiels (cœur artificiel, stimulateur cardiaque, instrumentation intégrée au corps) [SCHU71], [JOU96].
- les applications dans le domaine de la robotique : pour minimiser la connectique sur des bras manipulateurs ou des robots complexes [KAW96].
- les applications en matière de transport : en premier lieu en ce qui concerne la recharge des batteries des véhicules électriques [KLO95]. D'autres applications en matière de traction directe de véhicules automatiquement guidés ont été proposés et sont en cours de réalisation [JUF95]. Des prototypes de voitures miniatures existent [SAT96].
- les applications grand public : recharge d'appareils "nomades" : ordinateur [SAK96], téléphone cellulaire [SAK94], outils électroportatifs, éclairage fluorescent, etc.
- les applications militaires : systèmes de mise à feu sans contact pour des missiles [BRE84].

5.2- Les limitations du principe, quelques solutions viables

La transmission de puissance par induction peut être modélisée sous forme d'un transformateur chargé par une résistance R (figure 5-1). La présence du condensateur C permet de compenser une partie des chutes de tension inductives comme il est montré dans le calcul qui suit.

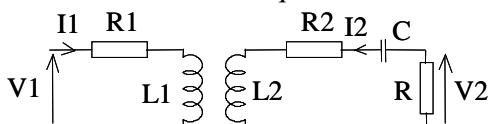


Fig.5-1- schéma équivalent du transformateur

Les pertes dans le transformateur sont données par

$$(1) \quad P_{pertes} = R_1 \cdot I_{1\text{eff}}^2 + R_2 \cdot I_{2\text{eff}}^2$$

Si on réalise la condition¹ $L_2\omega = 1/C\omega$, il en résulte que :

$$(2) \quad I_1 = -\frac{I_2}{j \cdot M\omega} \cdot (R + R_2) \cong -\frac{I_2}{j \cdot M\omega} \cdot R$$

en posant que $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$

avec k = coefficient de couplage

La puissance transmise au secondaire est :

$$(3) \quad P = R \cdot I_2^2$$

On en déduit l'expression des pertes en fonction de P et des éléments du schéma équivalent :

$$(4) \quad P_{pertes} \cong \frac{P \cdot R \cdot R_1}{(M\omega)^2} + \frac{P \cdot R_2}{R}$$

En dérivant cette expression par rapport à R, on trouve la valeur minimale des pertes pour :

$$(5) \quad R = M\omega \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

Le rendement maximal de transmission à cette condition devient alors :

$$(6) \quad \eta_i = \frac{P}{P + P_{pertes}} = \frac{k\omega}{k\omega + 2R_2 \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2} \cdot L_1 L_2}}$$

Ces calculs montrent l'existence d'une valeur optimale de charge (ou de couplage) pour minimiser les pertes. De ces expressions, on peut tirer les remarques suivantes :

- on cherchera toujours à maximiser le coefficient de couplage k pour assurer le meilleur rendement de transmission
- on adaptera la charge et le coefficient de couplage (relation (5)) pour être toujours situé aux pertes minimales.
- la fréquence intervient sur le rendement de transmission

Un second paramètre intéressant est le gain en tension du transformateur. L'expression est donnée par :

$$(7) \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{R \cdot M\omega}{[(M\omega)^2 + (R_1 \cdot (R + R_2))^2 + (L_1\omega \cdot (R + R_2))^2]^{1/2}}$$

On peut adopter un modèle équivalent du transformateur faisant apparaître les inductances de fuite, comme représenté figure 5-2. Par rapport au schéma précédent, on a : $I1 = L1 - M$, $I2 = L2 - M$, $L\mu = M$.

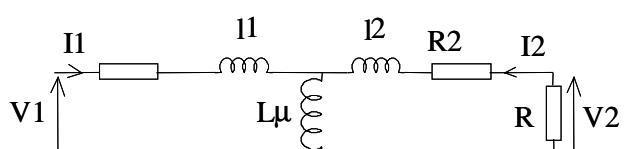


Fig. 5-2 -Schéma équivalent à inductances de fuites

On en déduit que le coefficient de couplage k s'exprime par :

¹ on peut démontrer que cette condition plutôt que la résonance avec l'inductance de fuite secondaire permet d'optimiser le rendement

$$(8) \quad k = 1/\sqrt{(1 + \ell_1/L_\mu) \cdot (1 + \ell_2/L_\mu)}$$

et que le rendement de transmission maximal devient :

$$(9) \quad \eta_r = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot R_2}{L_\mu \omega} \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}}$$

Pour obtenir un bon rendement de transmission , il faut minimiser le terme :

$$(10) \quad \frac{1}{Q} = \frac{2 \cdot R_2}{L_\mu \omega} \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{R_1 R_2}}{L_\mu \omega}$$

Comme on le verra plus loin, cette condition peut être obtenue soit en augmentant la fréquence, mais l'effet de peau tend aussi à augmenter R_1 et R_2 , soit à augmenter L_μ par des dispositifs de concentration de flux. Quelques structures classiques d'inducteurs ont été étudiées, les principales structures sont soit des solénoïdes coaxiaux, soit des bobinages en spirale. Elles sont représentées sur les figures 5-3 et 5-4.

5.2.1. Quelques structures d'inducteurs

- La structure de base est représentée figure 5-3, elle est constituée de deux bobines coaxiales à spires massées.

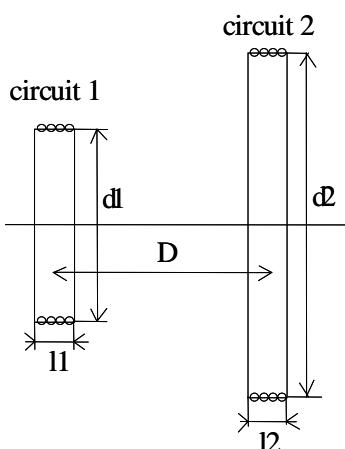


Fig. 5-3 -Cas de deux solénoïdes coaxiaux

On peut montrer que le coefficient de couplage pour cette géométrie est donné par :

$$(11) \quad k = \frac{8}{\pi \cdot \mu_0} \cdot \sqrt{\frac{\ell_1 \ell_2}{d_1 d_2}} \cdot \xi$$

la valeur de ξ est définie par des tables dans [40] en fonction du paramètre κ' défini par :

$$(12) \quad \kappa' = \frac{(1 - \frac{d_1}{d_2})^2 + (\frac{D}{d_2})^2}{(1 + \frac{d_1}{d_2})^2 + (\frac{D}{d_2})^2}$$

- La seconde structure classiquement utilisée est constituée d'inducteurs coaxiaux, bobinés en spirale, comme représenté figure 5-4. Il a été montré dans [41] que cette disposition permet d'améliorer le coefficient de couplage.

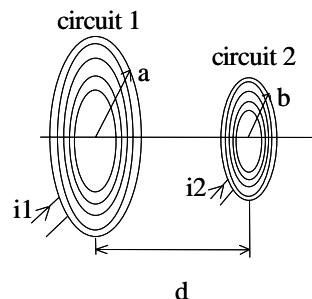


Fig. 5-4 -Inducteurs plat en spirale

Un exemple d'évolution de k en fonction du rapport d/a avec $a=b$, est donné à la figure 5-5 pour un inducteur en forme de couronne de petit rayon égal à 0,4 fois le grand rayon.

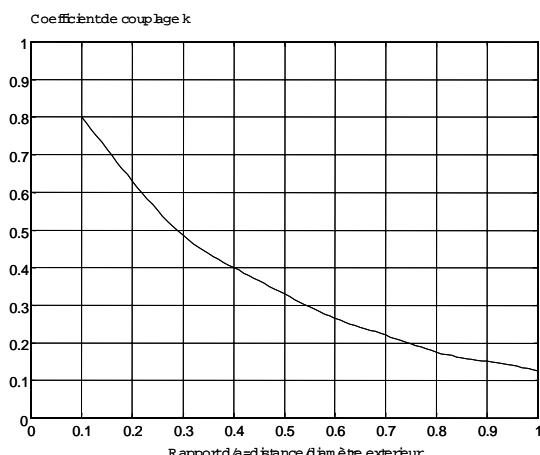


Fig. 5-5 -Evolution du rapport de couplage k avec l'éloignement des inducteurs
le rayon minimum est de 0,4.a (couronne)

On remarque que la décroissance de k est rapide avec l'éloignement. Pour une distance de l'ordre du rayon a , le coefficient de couplage est de l'ordre de 0.1.

5.2.2-Amélioration du gain en tension

Le gain en tension peut être amélioré en créant une double compensation des chutes inductives [JOU96] du modèle, comme représenté figure 5-6.

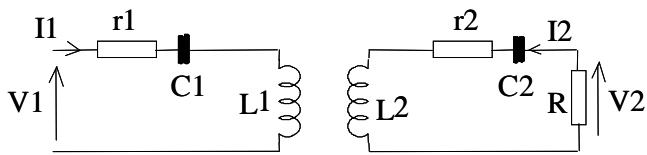


Figure 5-6 : système à double résonance

Les calculs concernant les pertes et la puissance transmise montrent que le rendement de transmission est identique au cas précédent de résonance unique. Par contre, cette solution permet d'améliorer le gain en tension. La nouvelle expression est donnée par :

$$(13) \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{R \cdot M\omega}{(M\omega)^2 + R_1 \cdot (R + R_2)}$$

Nous pouvons donc constater que cette expression est maintenant indépendante de L1 et L2. Si on la compare à celle établie précédemment, on peut constater le gain obtenu sur le terme du dénominateur. Cette solution est donc intéressante lorsque l'on cherchera à accroître le gain en tension, le rendement de transmission est cependant inchangé.

5.3 Applications

5.3.1-Applications en robotique

Dans le domaine de la robotique et de la machine-outil, l'alimentation en énergie de l'actionneur est un point important, d'autant plus sensible que le nombre d'actionneur est important (robots à grand nombre de degré de liberté). Les câbles d'alimentation limitent les déplacements et peuvent être source de perturbations électromagnétiques. Des solutions ont été proposées qui suppriment totalement le câblage mobile. Elles consistent à réaliser des transformateurs à circuit magnétique mobile en rotation [SKU91], comme représenté figure 20.

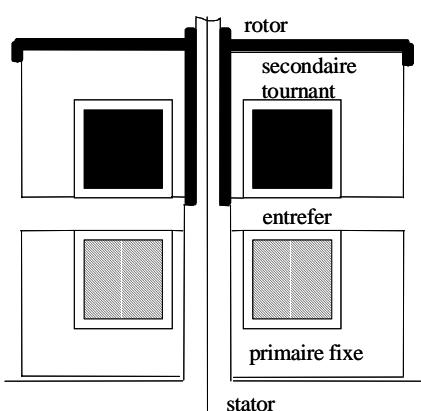


Fig. 5-7 - Transformateur à circuit magnétique mobile en rotation

Il est également possible par ce système, de transmettre des signaux de commande en ajoutant, sur le même circuit magnétique, des enroulements dédiés à cette fonction et en utilisant un principe de transmission modulée pour transmettre les données. La bibliographie présente des réalisations de l'ordre de la dizaine de kW pour un rendement de l'ordre de 90%, associé à des onduleurs commutant entre 20 et 100kHz. Dans ce type d'application, les entrefers peuvent être faibles (de l'ordre de 0,1 mm), assurant un bon couplage et donc un bon rendement. Un exemple de ce type d'application concerne le moteur de broche de centre d'usinage [HIR00]. L'usinage de pièces complexes nécessite que la broche puisse prendre des configurations très particulières comme représenté sur la figure 5-8. L'énergie et le contrôle doivent donc être transmis simultanément dans le moteur. Cette fonction est réalisée par un transformateur tournant à entrefer, qui assure le transfert d'énergie et de l'information, via des modem HF, comme représenté sur la figure 5-9, sur laquelle on reconnaît une structure classique de convertisseur résonnant dans laquelle on a inséré les dispositifs de communication.

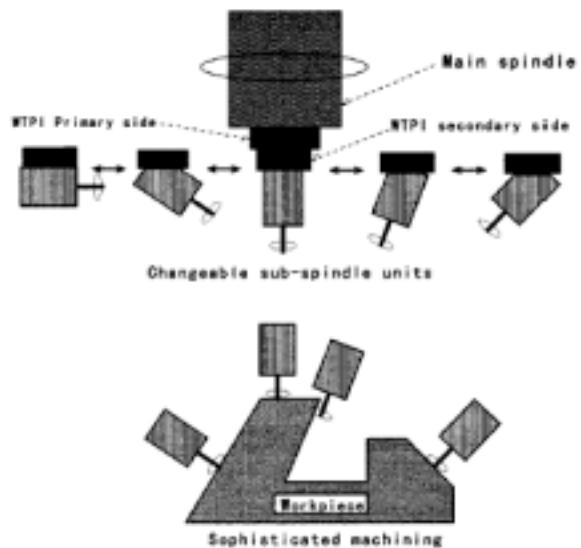


Fig. 5-8 – Usinage de formes complexes

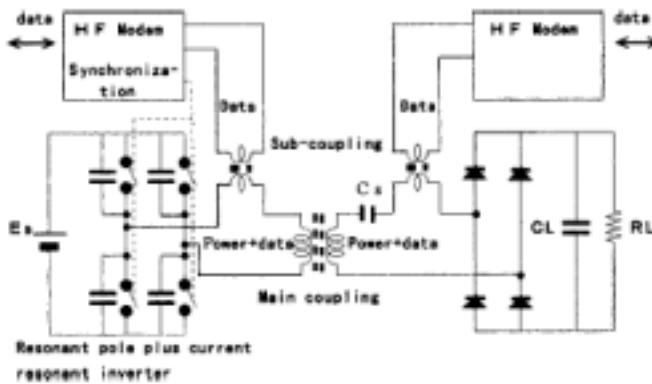


Fig. 5-9 –Exemple de structure permettant la transmission d'énergie et d'informations

Dans le but d'une très forte intégration de la broche amovible, les concepteurs ont utilisé un convertisseur direct au secondaire qui utilise des interrupteurs bidirectionnels (fig. 5-10). La machine est de type synchrone à commande en U/F=Cte, le terme U est ajusté au primaire alors que la fréquence statorique est contrôlée au niveau du convertisseur secondaire. Le modem HF permet dans ce cas de superposer les ordres de commande à la transmission d'énergie.

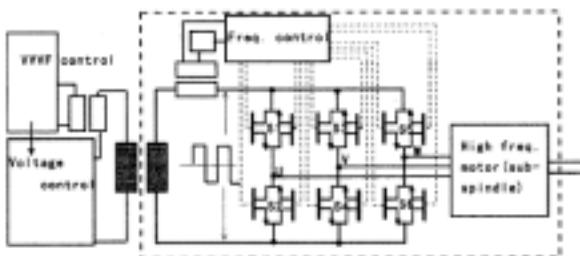


Fig. 5-10 –Convertisseur direct au secondaire

5.3.2- Applications concernant le véhicule électrique

Les enjeux industriels de la transmission sans contact sont importants sur ce thème. Ils sont essentiellement axés sur la charge des batteries et la traction.

5.3.2.1 La recharge rapide

L'objectif est de créer des bornes de recharge rapide d'usage sûr et analogue à la classique "pompe à essence". La connexion au véhicule doit être facile et permettre la transmission d'une puissance importante. Divers brevets, notamment américains, couvrent cet objectif [KLO], [HUS96]. Le couplage entre les inducteurs doit être important pour obtenir un bon rendement. Il en résulte donc que ce type de dispositif possède toujours un circuit magnétique ouvrable. Plusieurs brevets couvrent aussi ce type de transformateur [DIV94],

la figure 5-11 indique ce dernier principe avec lequel une puissance de l'ordre de 100kW est transmise.

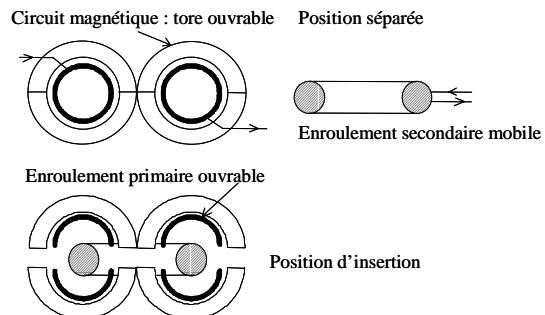


Fig. 5-11 -Principe breveté du transformateur à enroulement coaxiaux mobiles

Notons dans le même esprit, les projets TULIP et PRAXITELE [INR] qui intègrent des systèmes de transmission de données entre véhicules et surtout des aires de parking incluant, dans le sol sous le véhicule, un système de recharge des batteries sans contact. Ce cas concerne plutôt la recharge lente, ou le complément de charge.

Dans tous les cas cités, le dispositif de transfert d'énergie s'apparente à un transformateur où une des parties est mobile, que ce soit le(s) enroulement(s) ou le circuit magnétique. Le coefficient de couplage est donc toujours élevé.

5.3.2.2. L'alimentation directe par induction

Différents projets existent d'alimentation directe par induction d'un véhicule électrique. Citons le projet PATH aux Etats Unis qui prévoit de constituer des autoroutes "électriques". Des inducteurs sont enterrés sous la chaussée, régulièrement espacés. Les véhicules sont munis d'induits permettant la transmission d'énergie. L'objectif de ce projet est d'augmenter la fluidité du trafic par l'automatisation de sa gestion (débit, accès, sortie), de réduire les accidents de trafic, mais surtout d'annuler la pollution atmosphérique et sonore. Dans ce système, le véhicule est automatiquement guidé et sa vitesse peut être optimisée. La connexion de l'inducteur au bus alternatif est provoquée par le passage du véhicule. Des inducteurs auxiliaires contribuent au pilotage. Notons que des recherches sont engagées au Japon sur ce principe [SAT96] sous forme de maquettes de faible puissance (quelques 100W).

Un projet identique dans l'esprit est engagé en Suisse puisqu'il concerne un petit véhicule urbain (6 personnes) automatique, guidé par les inducteurs enterrés (projet Serpentine à Lausanne) [JUF95].

Le principe consiste à alimenter les deux inducteurs situés sous le véhicule lors de son passage comme représenté sur la figure 5-12 [GER97]. Les inducteurs au sol constituent le primaire d'un transformateur à air, le secondaire est embarqué. Ce système permet aussi le guidage du mobile.

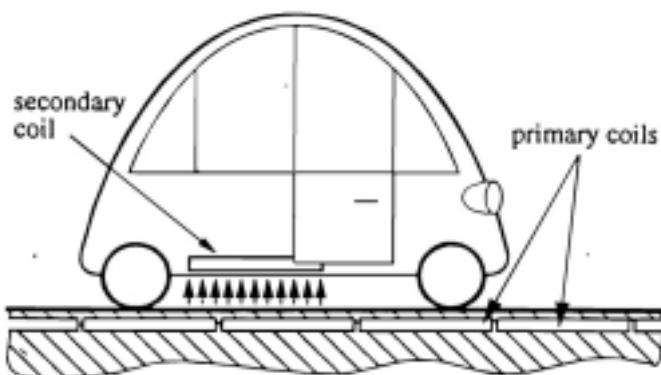


Fig. 5-12 – Principe d'alimentation séquentielle du véhicule

Le système d'alimentation associé est représenté sur la figure 5-13(a), ainsi que le modèle équivalent du transformateur constitué par ces trois boucles (b).

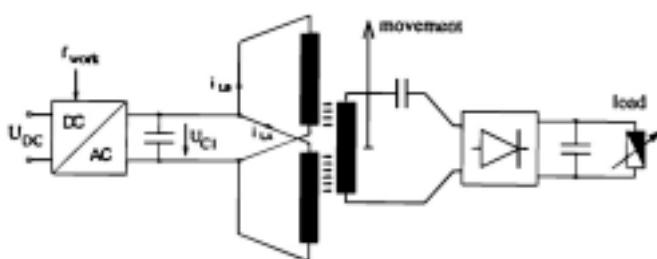


Fig. 5-13 (a) – Principe d'alimentation

Des condensateurs sont associés au circuits primaires et secondaires pour constituer les circuits résonnantes comme on en a vu le principe plus haut.

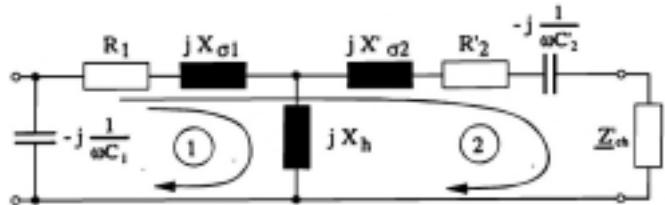


Fig. 5-13 (b) – Modèle équivalent du transformateur

On est donc en présence d'un système dans lequel le couplage dans le transformateur varie avec la position. Il en résulte donc une fréquence optimale de transmission de puissance pour chaque position et pour une charge donnée, comme l'indique la courbe de la figure 5-14.

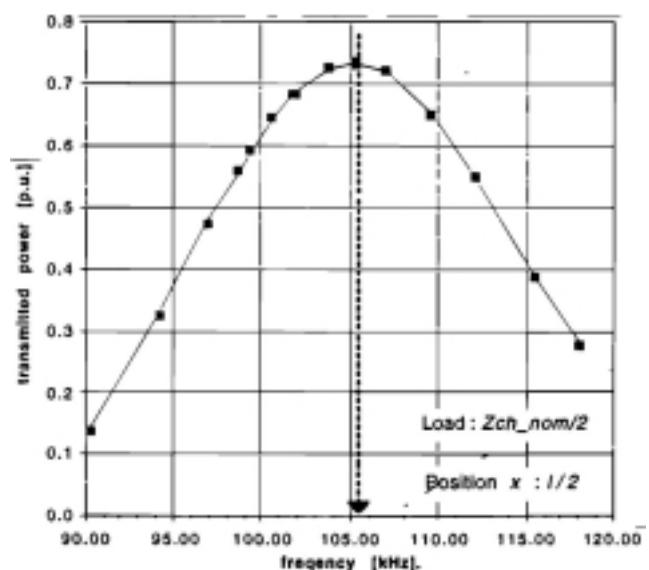


Fig. 5-14 – Courbe de puissance en fonction de la fréquence pour une position

Pour optimiser le transfert de puissance, il faut donc ajuster automatiquement la fréquence de fonctionnement à la position et à la charge (cf. éq. 5 et 6). La commande est donc du type MPPT (maximum power tracking), son détail est exposé dans [GER97].

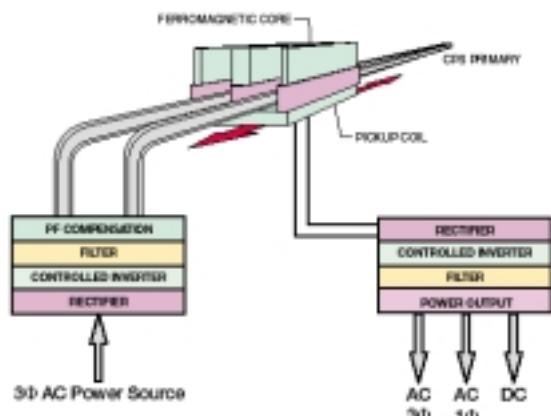
Ces différents projets nécessitent une infrastructure de contrôle de l'alimentation des inducteurs lors du passage du véhicule, et nécessitent aussi une gestion automatisée du trafic, donc des réseaux de transmission d'informations. Un des objectifs de ce genre de système est d'allier les contraintes d'un véhicule individuel (liberté de la destination, faible nombre de passagers) avec les contraintes de sécurité et d'automatisation d'un véhicule de transport collectif.

La maîtrise de la technologie des protocoles de bus de données, adaptés à l'échange de données et au

contrôle d'organes de puissance est importante dans ce domaine d'application [PAY96].

5.3.3 Applications industrielles

Le transfert d'énergie par induction est employé dans les applications de manutention où les déplacements s'effectuent sur de grandes distances et où la câblerie classique trouve ses limites : installations portuaires, zones de stockage, palettiseurs, etc. L'intérêt est de supprimer les enrouleurs de câble et la gestion de cette fonction, il en résulte plus de compacité des équipements et un gain de masse. Le principe est représenté sur la figure 5-15, une boucle primaire parcourue par un courant HF induit dans un secondaire mobile, le champs est canalisé par un circuit magnétique ouvert [VAHL02].



Principe de fonctionnement et exemple de structure de conversion AC-DC secondaire

Ce type de dispositif est employé pour transmettre une puissance pouvant aller jusqu'à 50kW.



Fig. 5-15 – Système d'induction mobile pour l'alimentation de mobiles en translation

5.3.4. Applications médicales

Les applications médicales constituent le domaine où on a cherché à transmettre de l'énergie sans contact depuis les années 60, avec des recherches

axées principalement sur le cœur artificiel [SCHU61] ou plus récemment, l'alimentation d'électrodes pour la stimulation musculaire des paraplégiques [SAT01] (fig. 5-16).

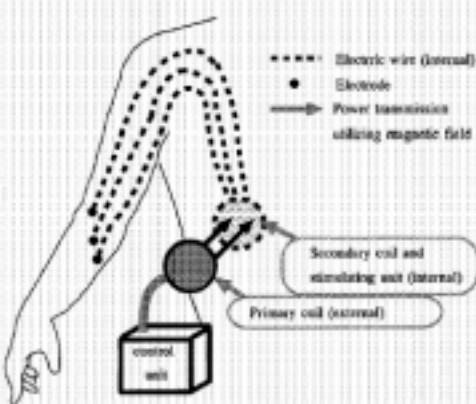


Fig. 5-16 – Principe de transmission utilisé dans le domaine biomédical.

Les rendements de transmission se situent de 20 à 50%. Cette faiblesse de rendement ne préoccupe pas les chercheurs car le niveau de puissance transmis reste faible. Les puissances nécessaires en pompage cardiaque seraient de l'ordre de quelques dizaines de Watt.

Les études entreprises depuis une trentaine d'année portent sur les points suivants :

- étude et modélisation des tissus biologiques en présence de champs électromagnétiques variables, en vue de la modélisation du couplage inductif [SCHU71] et des effets biologiques.
- étude de la forme, du centrage et de la distance entre inducteurs pour améliorer la transmission de puissance [MAT92], [ZIE96].
- étude de systèmes permettant la concentration du flux par utilisation de matériaux magnétiques nouveaux (amorphes) [NISH96].
- étude et optimisation des convertisseurs associés à ces transformateurs [MAT96], [JOU96] pour minimiser les pertes donc les échauffements et les effets biologiques résultants.
- étude de la transmission simultanée et par le même système, de l'énergie et de signaux.

Les points importants ressortant de ces études concernent la puissance maximale transmissible de l'ordre du kW au maximum, sans échauffement excessif des tissus biologiques. Cette considération limite la fréquence de transmission aux environs de 400kHz. Dans le but de minimiser les pertes, les convertisseurs associés utilisent les principes de la commutation douce (mode ZVS) ou du redressement synchrone [MAT96]. Dans ces conditions, des rendements de l'ordre de 65 à 78%

ont été obtenus pour une puissance transmise de l'ordre de 50W et pour un coefficient de couplage $k=0,1$. Quelques publications traitent de l'amélioration du couplage par utilisation de concentrateurs de flux en matériaux ferrite ou amorphe [NISH96]. Un exemple intéressant [MAT88] décrit un transformateur utilisant des fibres magnétiques en matériaux amorphe, autour desquelles sont tressés les conducteurs, de façon analogue à un tissus. La figure 5-17 précise cette structure dont l'intérêt est d'être souple et déformable.

L'intérêt de cette solution est la concentration du flux dans la zone d'entrefer, grâce aux fibres magnétiques. Le circuit peut se déformer, aspect intéressant pour ce type d'application. L'efficacité du dispositif est maximale quand la surface du primaire est approximativement double de celle du secondaire. Le dispositif paraît peu sensible à la largeur d'entrefer, il a été testé pour transmettre une puissance de l'ordre de 6W, les pertes fer ont été estimées inférieures à 0,2W.

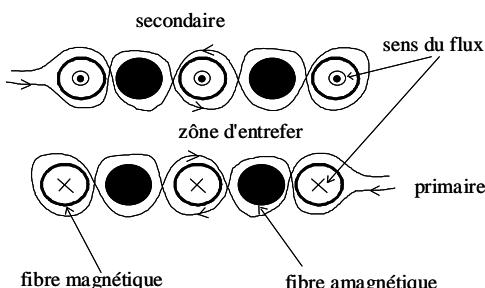


Fig. 5-17 -Transformateur à fibres magnétiques et conducteurs "tressés"

Les applications biomédicales génèrent des contraintes spécifiques ; nous avons déjà évoqué l'échauffement des tissus biologiques, il faut ajouter l'effet du champ électromagnétique sur le boîtier implanté (titane pour des raisons de neutralité biologique) dans le corps dans lequel se développent des courants de Foucault qui diminuent le rendement, la dégradation pouvant atteindre un facteur 2.

Les contraintes biologiques et d'environnement liées aux applications médicales sont restrictives en matière de fréquence de fonctionnement, de puissance transmises et de coefficient de couplage. Dans d'autres applications, ces contraintes pourraient être allégées, notamment dans le cas du transport (autoroute électrique). Il est concevable,

au vu des structures d'inducteurs proposées et au vu des convertisseurs à mettre en oeuvre, de transmettre des puissances de l'ordre de plusieurs dizaines de kW avec un rendement de l'ordre de 80%.

5.3.4. Les applications à grande diffusion

On peut ranger dans cette catégorie l'alimentation par induction des appareils "nomades" de la maison, outils portatifs, appareils électroménager, éclairage [EH96], téléphone, etc. L'inducteur est généralement placé dans l'embase du dispositif, l'induit est sur le mobile. Les puissances transmises sont modestes, de 1 à 100W, les fréquences de fonctionnement vont de 50Hz pour les dispositifs les plus simples à quelques 10kHz. Le rendement n'est pas un critère important dans ce type d'application.

Enfin, une dernière catégorie d'applications en très forte expansion concerne l'étiquetage électronique, la sécurité d'identification et le télépéage dans les transports (métro, autoroutes). Ce système utilise une carte intelligente munie d'un processeurs VLSI qui contient des informations d'identification et qui peut assurer un dialogue avec une base fixe. La carte mobile est alimenté par le signal modulé que lui envoie la borne fixe, le principe général est représenté sur la figure 5-18. Dans les systèmes actuels, la fréquence de la porteuse est de 13,56MHz et le protocole de communication est de type RS232. La distance de communication peut s'étendre de quelques centimètres à plus d'un mètre. Les puissances transmises dans ce cas sont modestes, de l'ordre de la dizaine de mW.

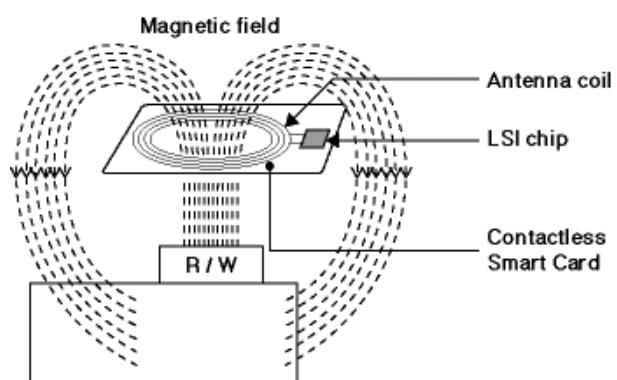


Fig 5-18 – Système de transmission énergie/information dans une carte intelligente

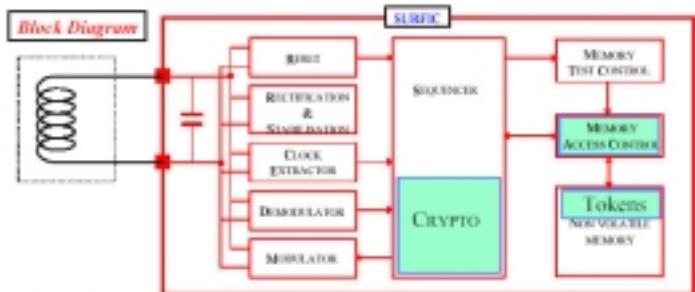


Fig 5-19 – Structure du circuit VLSI : l'énergie et l'information circulent passent par l'inducteur (doc. LETI)

6- Conclusion

La transmission d'énergie sans contact est donc utilisée dans de très nombreux domaines d'application, sur des distances très variables et sur une large plage de puissance transmise. Sa mise en œuvre efficace nécessite souvent des technologies avancées tant pour les matériaux employés que pour l'électronique de puissance qui permet d'optimiser le transfert de l'énergie ainsi que son contrôle. On constate de plus en plus souvent que la transmission d'énergie s'accompagne de celle de l'information, sous des formes plus ou moins complexes. Des applications très futuristes (satellites solaires) ont été imaginées, elles ont encore beaucoup d'obstacles technologiques et économiques à franchir. Cependant, il est remarquable de voir que des progrès réels ont été accomplis depuis 40 ans et qu'on peut envisager des démonstrateurs viables techniquement et économiquement. Il ne faudra peut-être plus attendre les 50 années annoncées pour voir la naissance de ces nouvelles sources d'énergie !

7- Bibliographie

- [BAD84] "Les micro-ondes", R. Badoual, éditions Masson 1984.
- [BRE84] "Arrangement for the contactless transmission of electric energy to missile during firing thereof", Brede, Kordel, brevet n°4445434, 01/05/1984.
- [BRO84] "The history of power transmission by radio waves" W.C. Brown, IEEE transactions on micro wave theory and techniques, vol MTT-32, n°9, sept. 1984.
- [BRO92] "Beamed Microwave power Transmission and its applications to space", W.C. Brown and E.E. Eves, IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. n°40, n°6, june 1992, pp.1239-1250.
- [BROW] "A transportronics solution to the problem of interorbital transportation", Final Report, NASA CR-191152, LeRC Cont. NAS3-25066 (1992).
- [COM82] "Dispositifs micro-ondes" Combes, éditions Masson 1982.

[DIV94] "Contactless coaxial winding transformer power transfer system", Divan, Klontz, Novotny, Lorentz, 23/08/94, brevet US n° 5341280.

[DUCH91] "Space power supply network using laser beam", Duchet, Cabaret, Laurens, Miscault, Toussaint Gex, proc. congrès SPS91, pp.554-557, Paris 1991.

[EH96] "L'induction rajeunit le principe de l'éclairage public", Electronique Hébdo n°237, oct. 1996, p.38.

[FAI] "Tubes pour hyperfréquences", G. Faillon, G. Fleury, E2355, Techniques de l'Ingénieur.

[FIR91] "Micro waves sources for power transmission in space", M. Firamin, SPS91, pp521-527.

[FIT83] "Combined antenna-rectifier arrays for power distribution systems", Fitzsimmons, Lund, Nalos, brevet US n° 4360741, 23/11/83.

[GAR] "Hyperfréquence, traité XIII", F. Gardiol, EPFL, éditions Dunod.

[GER97] « Contactless power transmission : frequency tuning by a maximum power tracking method », P. Germano, M. Jufer, congrès EPE97, Trondheim, pp.4.693-4.697.

[GLA83] « An electrical propulsion transportation system from low-Earth orbit to geostationary orbit utilizing beamed microwave power. » W.C.Brown and Glaser P. E., Space Solar Power Rev. 4, 119-129 (1983).

[GOU] "On the guided propagation of electromagnetic wave beam", Goubau, Schwering, IRE transactions on antennas and propagation, vol. AP9, pp.248-256.

[HIR00] « Integral Motor with Driver and Wireless Transmission of Power and Information for Autonomous Subspindle Drive », J. Hirai, Tae-Woong Kim, and Atsuo Kawamura, IEEE transaction on Power Electronics, vol. 15, N°1, jan. 2000, pp.13-20.

[HUS96] "Contactless battery charging system with high voltage", Husley, Woody, Radys, 22/10/96, brevet US n°5568036.

[INR] <http://www-rocq.inria.fr/praxitele>.

[ITO92] "Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception", T. Ito, F. & M. Fujita, actes du congrès ISAP 92, Sapporo, Japon, pp.489-492.

[JOU96] "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer", G.B. Joung, B.H. Cho, IEEE PESC 96, pp. 898-904.

[JUF95] "Contactless energy and information transmission for electric drive" M. Juffer, M. Perrotet, IMCSD95, San Josela.

[KAW96] "Wireless transmission of power and information through one high-frequency resonant AC link inverter for robot manipulator applications", A. Kawamura, K. Ishioka, J. Hirai, IEEE transaction on industry applications, vol N°32, pp. 503-508, mai/juin 1996.

[KLO] "Contactless battery charging system", Klontz, Divan, Novotny, Lorentz, brevet US n°5157319.

[KLO95] "An actively cooled 120kW coaxial winding transformer for fast charging electric vehicles", K.W. Klontz, D.M. Divan, D.W. Novotny, IEEE transactions

- on industry applications, vol 31, N°6, pp. 1257-1263, nov/déc. 1995.
- [LAN] « Point to point wireless power transportation in Reunion Island », J.D. Lan Sun Luk, A. Celeste, P. Romanacce, L. Chane Kuang Sang, J.C. Gatina, actes du congrès IAF97, Turin, Oct. 1997.
- [LEH91] "The environmental impact of SPS: a social view", L.P. Lehman, G.E. Canough, proc. du congrès SPS91, pp.195-200, Paris, aout 1991.
- [LOG91] "High frequency rectenna", Logan, Orvis, brevet US n°5043739, 27/08/91.
- [MAT88] "Implantable transformer for an artificial heart utilizing amorphous magnetic fibers", H. Matsuki, Yamaguchi, Watanabe, Murakami, Nadehara, Yamamoto, Jour. of applied physics, 64 (10), 15 nov. 1988, pp.5859-5861.
- [MAT92] "Investigation of coil geometry for transcutaneous energy transmission for artificial heart", H. Matsuki, M. Shiiki, IEEE transactions on magnetics, vol 28, n°5, pp.2406-2408, sept. 1992.
- [MAT96] "Transcutaneous DC-DC converter for totally implantable artificial heart using synchronous rectifier", Matsuki, Yamakata, Chubachi et Al; IEEE transactions on magnetics, vol 32, n°5, pp.5118-5120, sept. 1996.
- [NISH96] "An improvement of a transcutaneous energy transformer for a non invasive rechargeable cardiac pacemaker battery", T.H. Nishimura, T. Eguchi, T. Inoue et Al., actes du congrès IEEE PESC96, pp.316-321, Baveno, 1996.
- [NISH96] "An improvement of a transcutaneous energy transformer for a non invasive rechargeable cardiac pacemaker battery", Nishimura, Eguchi, Inoue et Al., IEEE PESC96, actes du congrès PESC96, pp.316-321, Baveno, juin 1996.
- [OMI96] "Development of a functional system model of the solar power satellite SPS2000", M. Omiya, K. Itoh, actes du congrès ISAP 96, pp.417-420, Chiba, Japon.
- [PAY96] "Electric drive communication using field bus", Paychère, Arnet, Juffer, congrès IMACS, Nancy, juin 1996, pp.225-230.
- [PIGN96] "Antenna design for wireless power transportation : the grand Bassin case study in Réunion Island", G. Pignolet, actes du congrès ISAP 96, pp.397-400, Chiba, Japon.
- [SAK94] "A novel high power converter for non-contact charging with magnetic coupling", Sakamoto, Harada, IEEE transactions on magnetics, vol 30, n°6, pp.4755-4758, nov. 1994.
- [SAK96] "Magnetic coupled power and data transferring system with detachable transformer", H. Sakamoto, S. Washimiya, IEEE transactions on magnetics, vol 32, n°5, pp.4983-4985, sept. 1996.
- [SAT96] "Stable energy transmission to moving loads utilizing nex CLPS", Sato, Murakami, Kikuchi et Al., IEEE transactions on magnetics, vol 32, n°5, pp.5034-5037, sept. 1996.
- [SAT01] « New Functional Electrical System Using Magnetic Coils for Power Transmission and Control Signal Detection », Takemi Sato, Fumihiro Sato, Hidetoshi Matsuki, , and Tadakuni Sato, IEEE transactions on magnetics, vol.37, N°4, July 2001, pp.2925-2929.
- [SCHU61] "high-level electromagnetic energy transfert through a closed chest wall", J.C. Schuder, H.E. Stephenson, J.F. Townsend, IRE Int. Conv. Rec., pt. 9, vol 9, pp.119-126, 1961.
- [SCHU71] "An inductively coupled RF system for the transmission of 1kW of power through the skin" J.C. Schuder, J.H. Gold, H.E. Stephenson, IEEE transaction on bio-medical engineering, vol BME -18, pp. 265-273, juillet 1971.
- [SKU91] "A new approach to power supplies for robots", A. Esser, H.C. Skudely, IEEE transactions on industry applications, Vol 27, N°5, Sept/oct 1991, pp.872-875.
- [SPA92] "Theoretical and experimental investigation of a rectenna element for microwave power transmission", J.O. McSpadden, T. Yoo, K. Chang, iEEE transactions on microwave theory and techniques, vol 40, n°12, december 1992, pp2359-2366.
- [VAHL02] Société VAHLE GMBH, Catalogue « CPS – Contactless power system ».
- [ZIE96] "geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils", C.M. Zierhofer, E.S. Hochmair, IEEE transactions on biomedical engineering, vol 43, n°7, pp.708-714, juil. 1996.