

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2392-1
(06/2021)

Applications de la transmission d'énergie sans fil par faisceau radiofréquence

Série SM
Gestion du spectre



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Rapports UIT-R

(Également disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REP/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre

Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2021

© UIT 2021

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RAPPORT UIT-R SM.2392-1

**Applications de la transmission d'énergie sans fil
par faisceau radiofréquence**

(2016-2021)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	2
2 Applications exploitant des technologies WPT par faisceau radiofréquence.....	3
2.1 Réseau de capteurs à alimentation sans fil	3
2.2 Chargement sans fil de dispositifs mobiles/portables.....	7
2.3 Surface de transmission d'énergie sans fil	10
2.4 Transmission MPT dans un tuyau	12
2.5 Bâtiments alimentés en hyperfréquence	13
2.6 Transmission d'énergie sans fil vers une cible en déplacement ou en vol.....	15
2.7 Transmission d'énergie sans fil point à point.....	21
2.8 Chargement sans fil de véhicules électriques	25
2.9 Satellite collecteur d'énergie solaire	29
3 Technologies employées dans des applications WPT	30
4 Organisations susceptibles de participer à la normalisation de la transmission WPT....	31
4.1 En Europe	31
4.2 Au Japon	32
4.3 Autres organisations internationales.....	33
5 Spectre pour la transmission WPT par faisceau radiofréquence	34
6 Résumé	34

1 Introduction

La transmission (ou le transfert) d'énergie sans fil (WPT) est considérée comme une technologie révolutionnaire. Grâce à elle, plus personne ne manquera de courant électrique.

La transmission d'énergie par ondes radioélectriques remonte aux premiers travaux de Nikola Tesla en 1899. C'est en effet à cette date que Tesla avait procédé aux premiers essais de transmission d'énergie sans fil: il avait employé une énergie basse fréquence à 150 kHz, mais cette tentative avait échoué. Parallèlement à la première expérience de transmission WPT menée par Tesla, M. Hutin et M. Le-Blanc avaient proposé en 1894 un appareil et une méthode permettant d'alimenter un véhicule électrique par induction en se servant d'un générateur de courant alternatif à environ 3 kHz [HUT 94]. Les véhicules électriques sont apparus peu après l'invention du moteur à vapeur, soit il y a environ une centaine d'années. La transmission WPT par induction, qui est un type de transmission WPT sans faisceau, et la transmission WPT par faisceau radiofréquence, appelée transmission WPT par faisceau, sont toutes deux apparues au début du XXe siècle.

Si la transmission d'énergie sans fil par faisceau radiofréquence est aussi développée aujourd'hui, c'est grâce aux travaux menés dans les années 1960 par William Brown, qui s'est servi de la technologie hyperfréquence (microondes) mise au point pendant la Deuxième Guerre mondiale. M. Brown est parvenu à transmettre de l'énergie hyperfréquence entre un émetteur et un récepteur (transmission point à point) et a atteint un rendement global (courant continu – hyperfréquence – courant continu) de 54% dans son laboratoire [BRO 73]. La transmission WPT exploitant les hyperfréquences est appelée transmission d'énergie en hyperfréquence (MPT). Au cours des années 1980 et 1990, beaucoup de projets de recherche sur la transmission WPT par induction visaient à alimenter sans fil des véhicules électriques [SHI 14]. Les câbles sans contact ont commencé à être commercialisés dès le début du XXIe siècle. La transmission WPT par induction a connu un tournant en 2006 lorsque le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) a fait la démonstration d'une technologie appelée transmission WPT à couplage par résonance [KUR 07]. Aujourd'hui, les techniques de transmission WPT par résonance font leur apparition sur le marché grand public. L'industrie automobile envisage d'utiliser la transmission WPT pour les véhicules électriques dans un avenir proche. À titre d'éléments de réponse à la Question UIT-R 210-3/1, des informations sur la transmission WPT fondée sur des techniques autres que la transmission par faisceau radioélectrique ont été publiées en 2014 dans le Rapport UIT-R SM.2303. Après la démonstration du MIT, les chercheurs se sont penchés sur différentes technologies de transmission WPT, notamment l'induction magnétique, le couplage par résonance et la transmission par faisceau radiofréquence, car ces technologies vont entraîner de véritables bouleversements.

On trouvera dans le présent rapport des informations portant sur les applications WPT utilisant un faisceau radiofréquence. L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT considère que la transmission d'énergie sans fil est définie comme étant la transmission sans fil d'énergie entre une source d'énergie et une charge électrique utilisant un champ électromagnétique. Elle considère en outre que les technologies WPT utilisent divers mécanismes, par exemple la transmission par rayonnement radiofréquence en champ lointain (WPT par faisceaux) et le couplage par induction, le couplage par résonance et le couplage capacitif en champ proche (WPT n'utilisant pas de faisceau). Les spécifications des faisceaux WPT ne précisent rien de particulier concernant des ondes électromagnétiques dirigées ou non dirigées. De plus, certaines configurations d'antenne permettront le mécanisme de transmission d'énergie par rayonnement quelle que soit la distance. Dans ces cas, l'utilisation des expressions champ proche et champ lointain n'est pas nécessaire. Le présent Rapport traite aussi la transmission d'énergie par ondes électromagnétiques rayonnées non dirigées. Ce domaine peut recouvrir des applications n'utilisant pas de faisceau, comme par exemple le captage d'énergie, mais il ne comprend pas l'induction magnétique, la résonance magnétique et la technologie de couplage capacitif, qui font l'objet du Rapport UIT-R SM.2303.

L'effet mutuellement exercé entre ces systèmes WPT et d'autres systèmes existants, ainsi que les aspects de sécurité (notamment l'exposition des personnes à des champs électromagnétiques) devront être étudiés plus en profondeur avant que ces technologies ne puissent être mises en œuvre.

- [BRO 73] Brown, W.C., «Adapting Microwave Techniques to Help Solve Future Energy Problems», 1973 G-MTT International Microwave Symposium Digest of Technical Papers 73.1, pp. 189-191, 1973.
- [HUT 94] Hutin, M. and M. Le-Blanc, «Transformer System for Electric Railways», US Patent Number 527,875, 1894.
- [KUR 07] Kurs, A., A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić, «Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances», Science, Vol. 317, p. 83-86, 2007.
- [SHI 14] Shinohara, N., «Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series)», ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014.1

2 Applications exploitant des technologies WPT par faisceau radiofréquence

La transmission WPT par faisceau radiofréquence présente les grandes caractéristiques suivantes:

- 1) Destinée aux transmissions par rayonnement quelle que soit la distance.
- 2) Non destinée au couplage par induction, au couplage par résonance ou au couplage capacitif.
- 3) Des applications diverses, notamment des capteurs à faible alimentation, des chargeurs sans fil de forte puissance, des transferts d'énergie considérables depuis des centrales électriques, etc.

2.1 Réseau de capteurs à alimentation sans fil

Aux termes de la Recommandation UIT-T Y.2221 [UIT 10], un réseau de capteurs s'entend d'un réseau constitué de nœuds capteurs interconnectés échangeant par communication filaire ou sans fil les données détectées. Les réseaux de capteurs sans fil comptent parmi les technologies de l'information qui se développent le plus rapidement, et selon le document technique UIT-T Y.2000 [UIT 14], ils devraient avoir des applications très diverses dans les réseaux de prochaine génération. Le rendement énergétique de ces réseaux est un facteur prépondérant. Le document contient notamment les dispositions suivantes:

«Les éléments du réseau de capteurs sans fil peuvent être répartis dans l'espace sur plusieurs kilomètres, notamment si l'utilisateur du réseau administre celui-ci par l'Internet. En outre, les nœuds capteurs peuvent être situés à des endroits inaccessibles, ou l'emplacement précis de chaque nœud capteur peut être inconnu. Au demeurant, un réseau de capteurs sans fil peut se composer de dizaines, de centaines ou même de milliers de nœuds capteurs. Dans ces conditions, il est exclu que les capteurs soient alimentés en énergie par l'utilisateur. Un nœud capteur doit donc consommer très peu d'énergie pour pouvoir fonctionner pendant des mois, voire des années grâce à une petite pile peu coûteuse. Pour consommer aussi peu d'énergie, les capteurs doivent impérativement être constitués de composants matériels ne nécessitant qu'une faible puissance.»

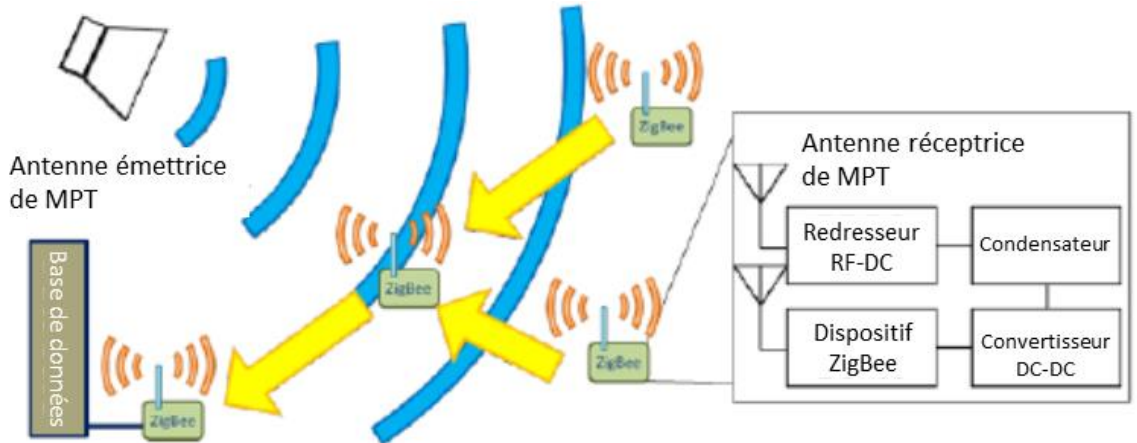
2.1.1 Travaux menés au Japon

Il est possible d'utiliser la transmission d'électricité hyperfréquence (MPT) vers un capteur sans fil pour ne pas avoir à utiliser de pile. De l'énergie peut ainsi être envoyée activement aux capteurs par voie hertzienne (Fig. 1). Ce système pourrait permettre de résoudre le problème mentionné ci-dessus. Une antenne redresseuse, qui se compose d'une antenne et d'un circuit de redressement à diodes, reçoit une onde radioélectrique et la convertit en courant continu. Le rendement de la conversion entre une

radiofréquence et le courant continu est théoriquement de 100%; dans la pratique, elle atteint environ 90% à 2,45 GHz pour une antenne redresseuse déployée.

FIGURE 1

Exemple de capteurs à alimentation sans fil (dispositifs ZigBee) [ICH 12]

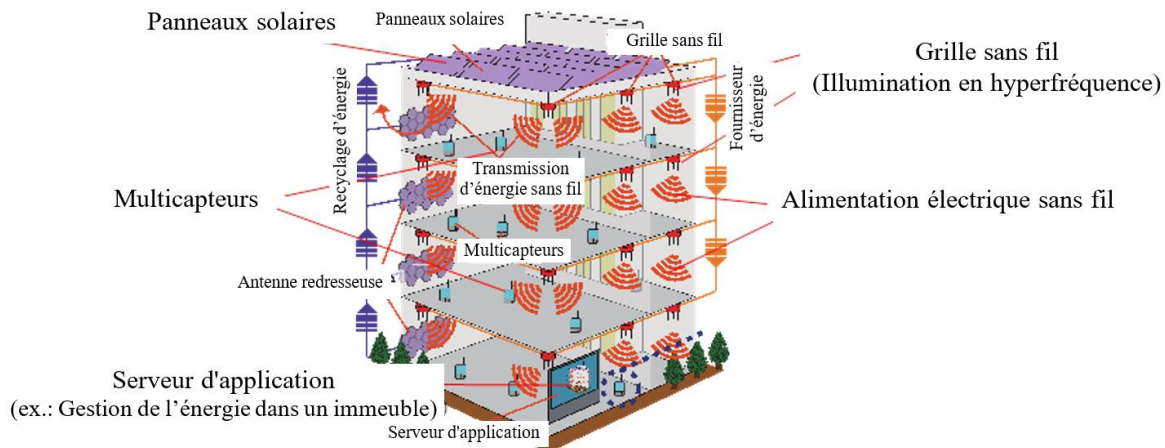


Le capteur ZigBee/IEEE802.15.4 offre la possibilité d'être alimenté en énergie sans fil. Le réseau ZigBee comporte un coordinateur, un routeur et un dispositif terminal. Le coordinateur n'est qu'un des éléments du réseau et a pour fonction de coordonner celui-ci. Le routeur relaie les données provenant d'autres routeurs et de dispositifs terminaux ainsi que les informations provenant des détecteurs. Le dispositif terminal n'envoie que des données; lorsqu'il n'est pas actif, il se met en veille. Sa consommation électrique est donc inférieure à celle des autres dispositifs. Le routeur et le dispositif terminal envoient au total près de 2 ms de données toutes les 1,14 seconde. Le coordinateur déconnecte l'un ou l'autre de ces appareils de son réseau s'il ne reçoit aucune donnée de sa part pendant 15 secondes. Le dispositif ainsi déconnecté doit ensuite effectuer les tâches nécessaires pour rejoindre à nouveau le réseau. Lorsque le dispositif terminal et le routeur se reconnectent au réseau et communiquent entre eux, ils consomment respectivement 9,46 mW et 57,4 mW pour le faire. S'ils ne se reconnectent pas au réseau et restent en veille, ils consomment respectivement 61,8 mW et 57,1 mW [ICH 12]. Cette consommation d'électricité est l'un des exemples illustrant le fait que le capteur ZigBee peut être exclusivement alimenté en hyperfréquence.

Un autre réseau de capteurs à alimentation sans fil, appelé grille sans fil ou illumination en hyperfréquence, a été proposé au Japon. Le principe de ce réseau est illustré dans la Fig. 2 [SAK 10] [MAE 13]. Ce système achemine sans fil de l'énergie et des informations à une puce RFID dans la bande des 920 MHz. Il utilise quatre canaux (1 W) sans détection de porteuse pour alimenter en énergie des RFID passives, et 77 canaux (1 mW) pour l'ensemble d'un réseau de capteurs composé de RFID actives. L'énergie reçue instantanément doit être supérieure à celle qui est consommée par le capteur. On contrôle la consommation moyenne d'énergie en faisant varier le coefficient d'utilisation. Dans une salle fermée, on utilise un émetteur à puissance variable et un système de porteuses à plusieurs fréquences, ces dernières permettant de réduire les ondes stationnaires et de créer une densité de puissance approximativement uniforme dans la salle.

FIGURE 2

Concept de grille sans fil (illumination en hyperfréquence) [SAK 10]

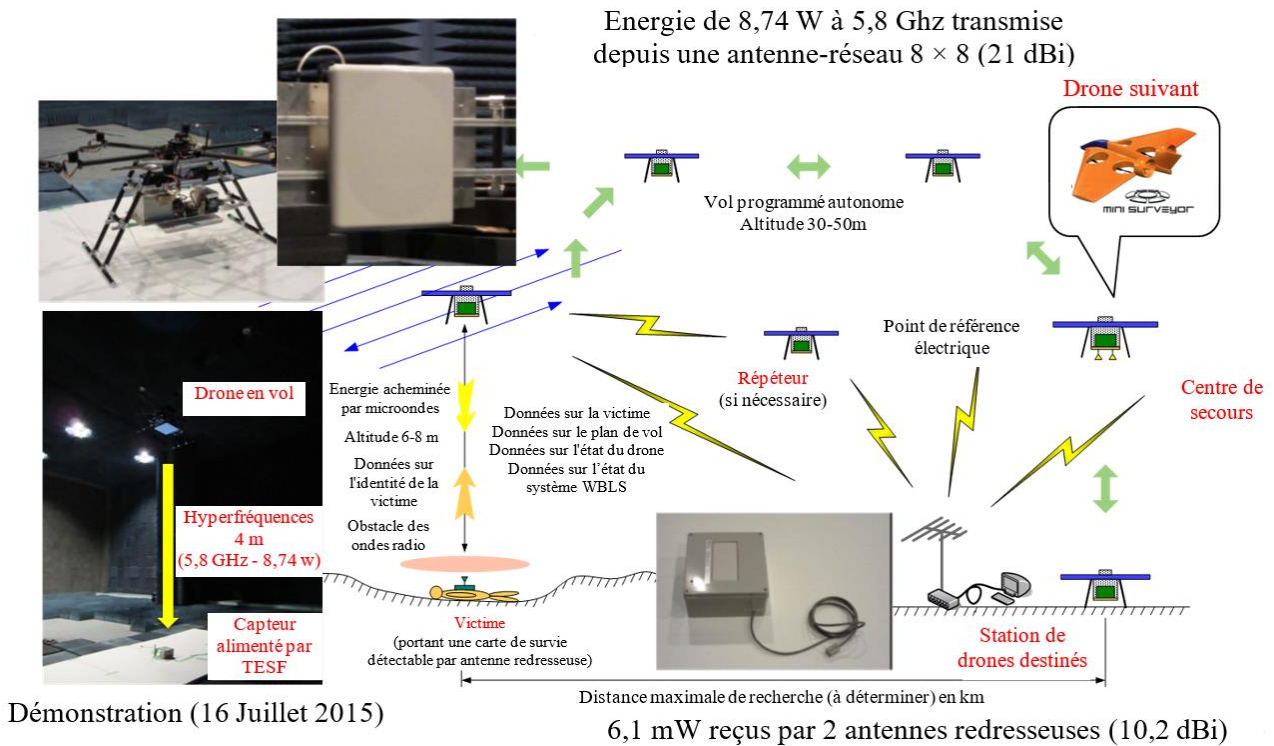


Une entreprise japonaise commercialise un capteur sans fil fonctionnant par transmission WPT dans la bande des 920 MHz [DEN 13]. L'application fonctionne sur une distance inférieure à 5 m. Le rendement de la conversion RF-courant continu est d'environ 60%. Cette entreprise propose d'utiliser le capteur pour détecter des événements dans des environnements de très hautes températures (85 à 120°C), pour détecter des objets en rotation ou en déplacement, et pour détecter des événements dans des environnements très exigeants, notamment en extérieur, en mer, etc. Elle fabrique aussi une antenne redresseuse à haut rendement dont le rendement de conversion RF-courant continu est d'environ 91,6% à 8 W, 2,45 GHz et 7 W [FUR 13].

Par ailleurs, une application de capteur sans fil embarquée sur un drone en vol a été proposée au Japon en 2015. L'un des points faibles de la transmission WPT tient au décalage entre l'énergie requise et la taille du système de transmission WPT, celui-ci comprenant des antennes et un émetteur d'ondes radioélectriques. Lorsque la distance entre l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice du système de transmission WPT grandit, le rendement du faisceau devient insuffisant par rapport aux besoins de l'utilisateur. Ce phénomène se produit aussi parfois avec le capteur du système. En utilisant un drone volant, on peut réduire la distance entre les deux antennes, ce qui permet de diminuer la taille du système de transmission WPT. Le système proposé est appelé «Système de détection sans batterie et sans fil assisté par multicoptère» (*Multicopter Assisted Wireless Batteryless Sensing System* ou WBLS). Le premier essai a été effectué en juillet 2015 à l'Université de Kyoto par le consortium d'étude WiPoT, situé dans cette université, et par la société *Autonomous Control Systems Laboratory Ltd.* Une énergie de 8,74 W à 5,8 GHz a été transmise en hyperfréquence depuis une antenne-réseau 8 × 8 (21 dBi) embarquée sur un drone en vol (multicoptère), comme l'illustre la Fig. 3. Le courant continu de 6,1 mW reçu et redressé alimente un capteur. Ce système pourrait apporter une assistance dans le secours aux victimes; il pourrait aussi permettre de placer des capteurs à alimentation sans fil dans un volcan, d'inspecter des infrastructures (ponts, tunnels), etc.

FIGURE 3

Concept du système WBS et démonstration effectuée en juillet 2015 au Japon



- [ICH 12] Ichihara, T., T. Mitani, and N. Shinohara, «Study on Intermittent Microwave Power Transmission to a ZigBee Device», Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012), pp. 209-212, 2012.
- [UIT 10] «Prescriptions de prise en charge pour les applications et services de réseaux de capteurs ubiquitaires dans l'environnement des réseaux de prochaine génération», Recommandation UIT-T Y.2221 (2010).
- [UIT 14] «Applications de réseaux de capteurs sans fil dans les réseaux de prochaine génération», document technique de l'UIT-T Y.2000 (2014).
- [DEN 13] DENGYO Corporation http://www.den-gyo.com/solution/solution10_b.html (en japonais).
- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, «Wireless Power Transmission to 10kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (in Japanese)», IEICE Technical Report, WPT2012-7, p. 36-39, 2013.
- [MAE 13] Maehara, D., R. Akai, G.K. Tran, K. Sakaguchi, S. Sampei, K. Araki, and H. Iwai, «Experiment on Battery-less Sensor Activation via Multi-point Wireless Energy Transmission», Proc. of 2013 IEEE 24th Annual Int. Sympo. On Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), p. 2346-2350, 2013.
- [SAK 10] Sakaguchi, K., R.P. Wicaksono, K. Mizutani, and T. Khanh, «Wireless Grid to Realize Ubiquitous Networks with Wireless Energy Supply (in Japanese)», IEICE Tech. Report, Vol. 109, No. 442.

2.2 Chargement sans fil de dispositifs mobiles/portables

Les technologies de chargement sans fil ne cessent d'évoluer et prennent actuellement en charge les transmissions par rayonnement quelle que soit la distance (transmission WPT par faisceau). La technologie WPT par faisceau peut offrir des améliorations considérables pour certaines applications par rapport à la transmission WPT sans faisceau, qui utilise des technologies de couplage par induction, de couplage par résonance ou de couplage capacitif.

La technologie WPT par faisceau peut être conçue et mise en œuvre dans de nombreux dispositifs électroniques professionnels ou domestiques de tailles différentes, ainsi que dans le secteur médical, l'industrie, le secteur de détail et l'industrie automobile, et elle garantit l'interopérabilité entre les produits. Ces dispositifs sont notamment les dispositifs à porter sur soi, les prothèses auditives, les écouteurs, les casques Bluetooth, les dispositifs IoT, les smartphones, les tablettes, les liseuses électroniques, les claviers, les souris, les télécommandes, les lampes rechargeables, les piles de forme cylindrique, les dispositifs médicaux et tout autre dispositif ayant des besoins de chargement analogues qui sinon devraient être équipés d'une batterie ou raccordés à une prise électrique.

Les émetteurs WPT par faisceau utilisent du spectre à bande étroite, généralement 400 kHz ou moins, pour transmettre l'énergie RF au dispositif client. L'émetteur est inactif tant qu'un dispositif client n'est pas identifié, authentifié et localisé à une distance zéro du socle de chargement WPT. La technologie hertzienne WPT par faisceau fonctionne avec un spectre similaire et repose sur des réseaux d'antennes et des techniques à focalisation du faisceau pour transmettre l'énergie RF vers l'emplacement précis où se trouve le dispositif client. Étant donné que certaines transmissions d'énergie WPT par faisceau provenant de systèmes de chargement sans fil sont dirigées en direction d'un dispositif client, ces systèmes ne devraient pas être considérés comme des éléments rayonnants isotropes, car ils focalisent leur énergie vers des emplacements précis et n'émettent qu'en présence d'un client autorisé.

2.2.1 Travaux menés au Japon

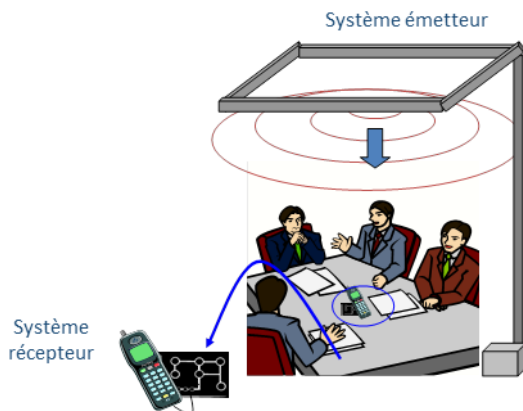
Les capteurs sont des dispositifs particulièrement bien adaptés à la transmission WPT par ondes radioélectriques car ils consomment extrêmement peu d'énergie. Cependant, bien d'autres types de dispositifs mobiles fonctionnant sur batterie devraient aussi pouvoir être alimentés ou chargés sans fil. C'est pourquoi un concept appelé «source d'énergie ubiquitaire» (UPS) a été proposé vers la fin des années 1990 [SHI 04] [SHI 05]. Il repose sur l'idée que les hyperfréquences sont présentes partout à tout moment (ubiquité) et qu'elles sont donc toujours disponibles pour transmettre de l'énergie sans fil.

Le concept de l'UPS est illustré dans la Fig. 4 a). De l'énergie est transmise en hyperfréquence dans la bande des 2,45 GHz (la bande de fréquences désignée pour les applications industrielles, scientifiques et médicales (ISM) se situe entre 2,40 et 2,50 GHz) depuis le périmètre d'un plafond pour recharger des téléphones mobiles. Il est parfaitement possible de créer une densité de puissance uniforme et de la transmettre en hyperfréquence dans une salle alimentée par UPS en installant des antennes sur le périmètre du plafond. Le choix des antennes émettrices s'est porté sur des antennes à fente car elles sont moins coûteuses. On a également choisi, pour la même raison, un magnétron dont la fréquence est stabilisée et dont la phase peut être contrôlée. Toutefois, comme le concept d'alimentation UPS vise à fournir «une source d'énergie transmise sans fil en permanence et partout», la conception des systèmes UPS est limitée par des critères de sécurité liés à l'exposition prolongée des êtres humains aux microondes. Le niveau de sécurité a été fixé en-dessous de 1 mW/cm^2 pour une exposition permanente de l'ensemble du corps humain. Dans une salle expérimentale de $5,8 \times 4,3 \text{ m}$, une énergie d'environ 150 W a été transmise en hyperfréquence depuis un magnétron pour créer une densité de puissance uniforme inférieure ou égale à 1 mW/cm^2 . Des antennes redresseuses à haut rendement sont également nécessaires car elles doivent pouvoir fonctionner avec cette énergie. Dans ces conditions, le système a réussi à charger des téléphones mobiles (Fig. 4 b)).

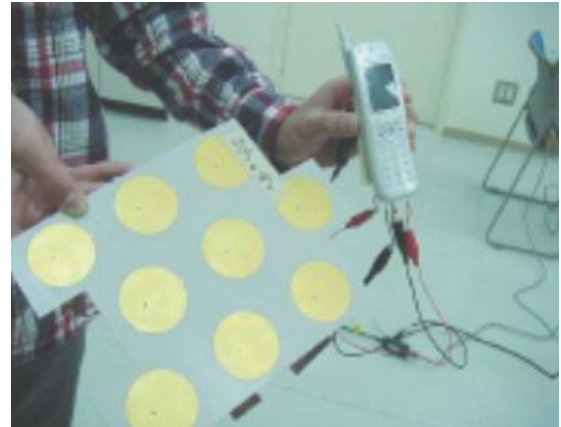
De plus, il reste possible d'utiliser un téléphone mobile dans la salle car l'énergie est transmise en hyperfréquence dans la bande des 2,45 GHz tandis que le système de communication exploite la bande des 1,9 GHz.

FIGURE 4

a) Concept de source d'énergie ubiquitaire (UPS)



b) Expérience de chargement électrique sans fil d'un téléphone mobile par le système UPS [SHI 04]

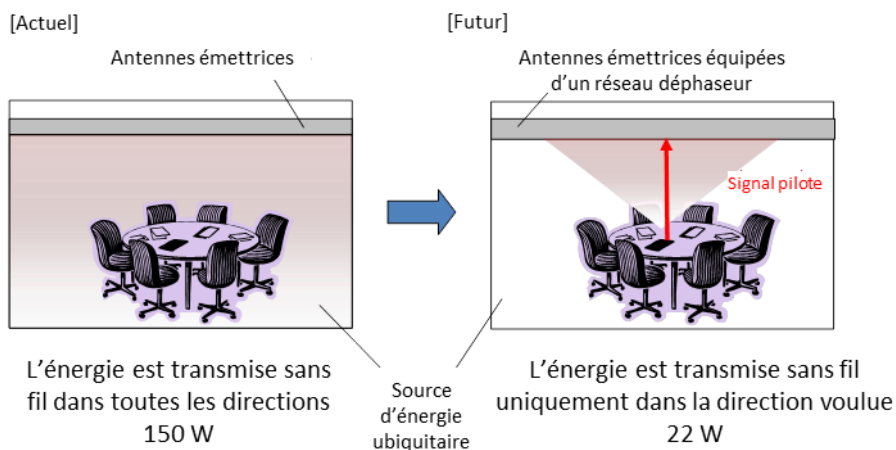


Pour améliorer les systèmes UPS, on peut employer un réseau déphaseur pour réduire la puissance d'émission totale et réduire tout rayonnement non souhaité dans les endroits où il n'est pas nécessaire de disposer d'une alimentation électrique (Fig. 5). Si un tel système UPS directif est employé dans une salle de dimensions équivalentes à celle de l'expérience précitée, l'énergie hyperfréquence requise n'est plus que de 22 W (contre 150 W dans un système UPS classique) pour obtenir une densité de puissance de 1 mW/cm^2 autour d'un dispositif. Néanmoins, un réseau déphaseur reste coûteux pour un système WPT et UPS commercial. Le coût de ce réseau dépend du coût de ses composants, et en particulier de celui du module de déphasage.

Certains systèmes dépourvus de déphaseur sont donc proposés pour réduire l'énergie hyperfréquence totale requise tout en modérant le coût [HAS 11].

FIGURE 5

Système UPS actuel et futur système UPS exploitant un réseau déphaseur



Un système UPS d'urgence a été proposé et une expérience a été effectuée en 2009 au Japon [MIT 10], comme nous l'avons indiqué dans la section 2.4. La Figure 6 illustre ce système expérimental. Un certain nombre de projets de recherche sont menés dans le monde pour mettre au point des stations de base d'urgence afin d'assurer le fonctionnement de téléphones mobiles depuis un ballon ou un dirigeable. Cependant, même si ces stations de base permettent d'assurer les communications d'urgence des téléphones mobiles, ceux-ci ne peuvent fonctionner sans électricité. C'est pourquoi un système UPS d'urgence a été proposé pour recharger sans fil ces téléphones de manière rapide et à intervalles réguliers. Au cours de l'expérience menée en 2009, un téléphone mobile a été chargé uniquement par transmission d'énergie sans fil depuis un dirigeable.

FIGURE 6
Illustration d'un système UPS d'urgence et photo de l'expérience (2009)



2.2.2 Travaux menés aux États-Unis d'Amérique

Plusieurs entreprises américaines ont développé des technologies WPT par faisceau analogues destinées aux cas d'utilisation des transmissions par rayonnement quelle que soit la distance. En 2020, une entreprise basée aux États-Unis a présenté une démonstration d'un système d'étiquetage numérique destiné aux revendeurs de détail qui ne nécessite ni branchement ni batterie. Cette technologie fonctionne à 2,4 et 5,8 GHz. Elle offre une portée de fonctionnement allant jusqu'à 10 mètres environ et peut également alimenter des smartphones, des dispositifs domestiques intelligents compatibles, des capteurs automobiles et de nombreux autres dispositifs. D'autres entreprises américaines ont des technologies qui fonctionnent à des fréquences différentes. Toutefois, la FCC n'autorise actuellement pas l'exploitation des technologies WPT par faisceau existantes à ces distances plus grandes dans les lieux publics aux États-Unis. Une autre entreprise américaine utilise les fréquences dans la bande des ondes millimétriques attribuée pour les applications ISM.

En outre, une autre entreprise américaine a présenté sa technologie, qui fonctionne dans les gammes de fréquences prévues pour les applications ISM et RFID dans la bande de fréquences des 900 MHz. [DAV-18].

- [FOW 20] Fowler, Ben, Consumer Reports. <https://www.consumerreports.org/emerging-technology/wireless-charging-the-next-leap-wireless-power/>.
- [DAV 18] Davies, Alex, ReThink, <https://rethinkresearch.biz/articles/ces-ossia-energous-unleash-rival-long-range-wireless-charging-specs/>.
- [HAS 11] Hashimoto, K., T. Ishikawa, T. Mitani, and N. Shinohara, «Improvement of a ubiquitous power source», Proc. of International Union of Radio Science (URSI) General Assembly 2011, CD-ROM CHGBDJK-1.pdf, 2011.

- [MIT 10] Mitani, T., H. Yamakawa, N. Shinohara, K. Hashimoto, S. Kawasaki, F. Takahashi, H. Yonekura, T. Hirano, T. Fujiwara, K. Nagano, H. Ueda, and M. Ando, «Demonstration Experiment of Microwave Power and Information Transmission from an Airship», Proc. of 2nd International Symposium on Radio System and Space Plasma 2010, pp. 157-160, 2010.
- [SHI 04] Shinohara, N., H. Matsumoto, T. Mitani, H. Shibata, T. Adachi, K. Okada, K. Tomita, and K. Shinoda, «Experimental Study on Wireless power Space» (in Japanese), IEICE Tech. Report, SPS2003-18, pp. 47-53, 2004.
- [SHI 05] Shinohara, N., T. Mitani, and H. Matsumoto, «Study on Ubiquitous Power Source with Microwave Power Transmission», Proc. of International Union of Radio Science (URSI) General Assembly 2005, CD-ROM C07.5(01145).pdf, 2005.

2.3 Surface de transmission d'énergie sans fil

2.3.1 Travaux menés au Japon

Compte tenu de la réglementation actuelle des ondes radioélectriques, un système de transmission d'énergie en hyperfréquence (MPT) fonctionnant par guides d'onde fermés représente une bonne application de cette technologie. Un tel système a été proposé et développé au Japon; il est appelé «système de transmission d'énergie par guide d'onde à deux dimensions (2DWPT)» ou encore «système à surface de transmission d'énergie sans fil» [SHD 07]. Dans un système 2DWPT, les hyperfréquences se propagent le long d'un guide d'onde plan et sont reçues de manière sélective par des dispositifs de réception spéciaux situés sur cette surface (Fig. 7). Le système 2DWPT doit lui aussi faire le compromis inévitable entre sécurité et capacité de transmission d'énergie. Les Figures 8 a) et 8 b) illustrent un système amélioré de surface de transmission WPT avec lequel on a démontré qu'il était possible de renforcer la compatibilité électromagnétique [NOD 11] [NOD 12]. Les hyperfréquences sont reçues dans un coupleur associant un résonateur en anneau à un guide d'onde (WRR). Le coupleur extrait l'énergie du guide d'onde à travers un isolant épais (Fig. 8 c)). Les objets extérieurs proches ou au contact de la surface ne sont pas exposés aux puissants champs électromagnétiques. Le coupleur a un facteur de résonance de haute qualité qui est essentiel pour permettre la transmission d'énergie sélective. Il est connecté à un circuit de redressement piloté de classe F. Le rendement total, défini comme le rapport entre la puissance du courant continu à la sortie du coupleur-redresseur et la puissance des hyperfréquences entrant dans la surface de transmission, était de 40,4% au maximum, pour une puissance en entrée des hyperfréquences de 1 W dans la bande des 2,4 GHz et un coupleur de $6,4 \times 3,6 \text{ cm}^2$ sur une surface de transmission de $56 \times 39 \text{ cm}^2$ (soit près de 100 fois la surface du coupleur) [NOD 12].

FIGURE 7
Système 2DWPT

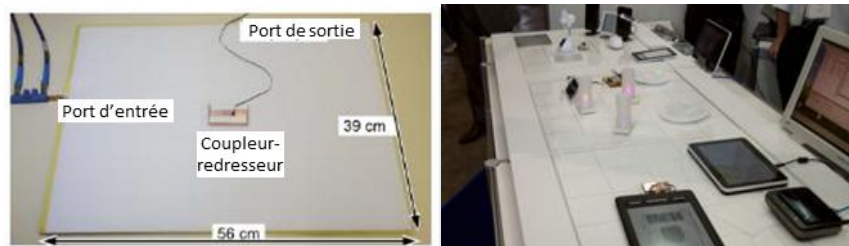
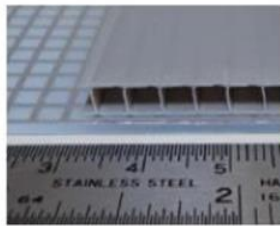


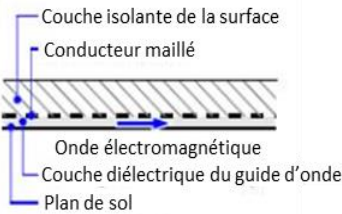
FIGURE 8

Surface de transmission d'énergie sans fil

a) Vue de la partie supérieure du guide d'onde plan au niveau de la tranche



b) Schéma en coupe



c) Récepteur de l'énergie transmise sans fil [NOD 11] [NOD 12]

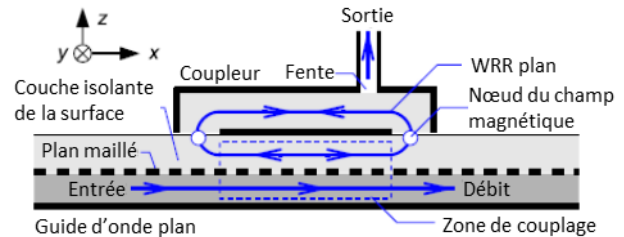
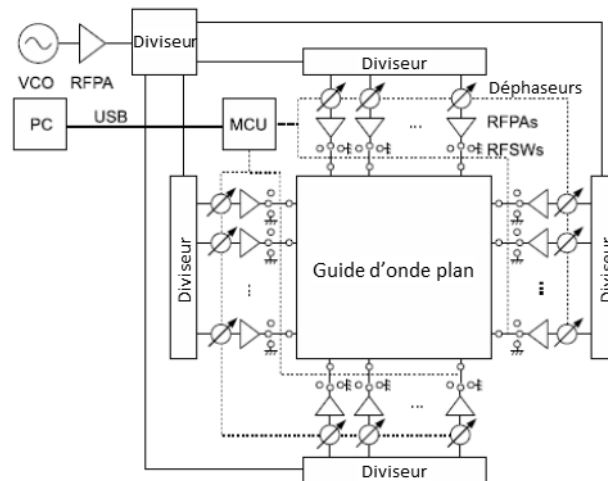


FIGURE 9

Diagramme du système d'alimentation électrique en hyperfréquence équipé d'un réseau déphaseur et comportant sept amplificateurs RF sur chaque bord [NOD 13]



Le système 2DWPT fonctionne dans les hyperfréquences, qui se diffusent selon les équations de Maxwell même lorsque les dimensions passent de 3D à 2D. Pour éliminer tout rayonnement non souhaité, on peut ajouter au système un réseau déphaseur pour obtenir un système équivalent au 3DWPT [NOD 13]. La Figure 9 représente une expérience effectuée à l'Université de Tokyo sur un système 2DWPT équipé d'un réseau déphaseur. Les résultats de cette expérience montrent que si l'on emploie le réseau déphaseur, la variation de rendement au point de réception de la surface est ramenée à une fourchette de 2 dB, alors qu'elle dépassait 10 dB sans le réseau déphaseur.

L'ARIB (Association of Radio Industries and Business) a normalisé le système 2DWPT dans la norme ARIB STD-T113 [ARI 15]. Ce système exploite la fréquence de $2,498 \text{ GHz} \pm 1 \text{ MHz}$ et sa puissance est inférieure à 30 W.

[ARI15] ARIB STD-T113 http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T113v1_0.pdf (en japonais).

[NOD 11] Noda, A., and H. Shinoda, «Selective wireless power transmission through high-Q flat waveguide-ring resonator on 2-D waveguide sheet,» *IEEE Trans. MTT*, Vol. 59, No. 8, pp. 2158-2167, 2011.

- [NOD 12] Noda, A., and H. Shinoda, «Waveguide-Ring Resonator Coupler with Class-F Rectifier for 2-D Waveguide Power Transmission», *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 259-262, 2012.
- [NOD 13] Noda, A., and H. Shinoda, «A Phased Array Feeding System for 2-D Waveguide Power Transmission (in Japanese)», *Proc. of IEICE, BSC-1-8*, March 2013.
- [SHD 07] Shinoda, H., Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, «Surface sensor network using inductive signal transmission layer», *Proc. of Int. Conf. on Networked Sensing Systems (INSS) 2007*, pp. 201-206, 2007.

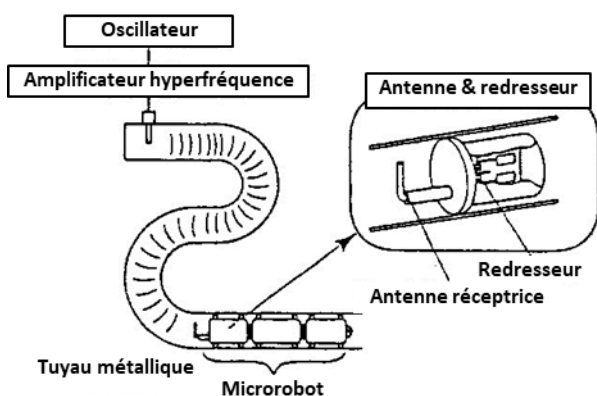
2.4 Transmission MPT dans un tuyau

2.4.1 Travaux menés au Japon

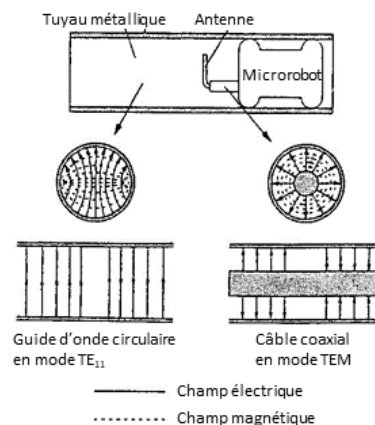
Dans les années 1990, un microrobot alimenté en MPT et capable de se déplacer à l'intérieur d'un tuyau a été mis au point au Japon. Le concept de ce robot est illustré dans la Fig. 10 a). Le système d'alimentation électrique en MPT fonctionnait dans la bande des 14 GHz, comme le montre la Fig. 10 b) [SHB 97]. Il se propageait dans un tuyau de 15 mm de diamètre agissant comme un guide d'onde circulaire en mode TE_{11} (Fig. 10 b)), avec un affaiblissement de transmission estimé à moins de 1 dB/m. L'antenne redresseuse, qui était composée d'une antenne unipolaire et d'un circuit de redressement, recevait l'énergie transmise en hyperfréquence et alimentait en courant continu redressé le système de pilotage inertiel du robot. Celui-ci était constitué d'une cellule piézoélectrique dimorphe. Lorsqu'une énergie de 1 W était transmise en hyperfréquence dans le tuyau, le microrobot recevait une énergie de 50 mW qui lui permettait de se déplacer dans le tuyau à une vitesse de 1mm/s.

FIGURE 10

a) Concept de robot alimenté en MPT pour se déplacer dans un tuyau



b) Méthode classique de conversion d'énergie provenant d'un guide d'onde circulaire et dirigée vers un câble coaxial [SHB 97]



Toujours dans les années 1990, un système de transmission MPT a été proposé au Japon pour alimenter un robot d'observation dans un tuyau de gaz [HIR 97] [HIR 99]. Le diamètre du tuyau de gaz était d'environ 155 mm, ce qui convenait à la propagation d'énergie hyperfréquence dans la bande des 2,45 GHz. Ce système MPT particulier a rencontré les problèmes suivants: 1) un affaiblissement d'origine inconnue au cours de la propagation dans des tuyaux de gaz rouillés; et 2) la complexité des branchements du réseau de tuyaux de gaz. L'affaiblissement de l'énergie pendant la propagation a été établi à la fois par des expériences et de manière théorique: il était de l'ordre de $-0,1$ à $-1,0$ dB/m. On

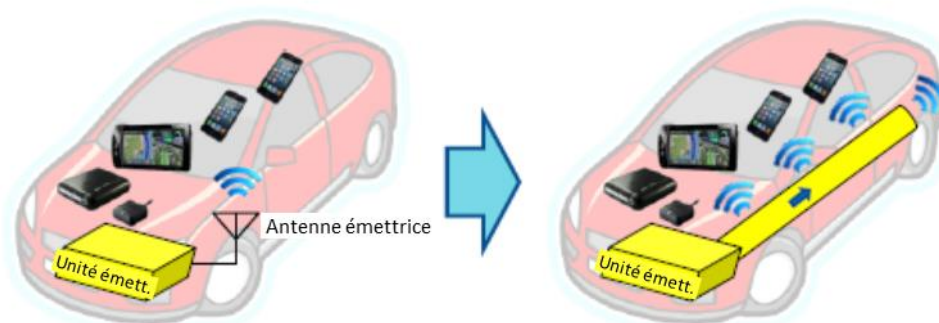
a conclu qu'il était suffisamment modéré pour que l'énergie puisse être acheminée en hyperfréquence dans le tuyau de gaz.

La complexité du réseau de tuyaux a posé un problème plus grave. Théoriquement, les ondes radioélectriques ne peuvent pas se propager à toutes les branches du guide d'onde, ce qui signifie que certaines branches ne seraient pas desservies. Les résultats des expériences ont confirmé la théorie, ce qui semble indiquer que le système MPT envisagé dans un réseau de tuyaux n'a que des applications limitées.

Un nouveau tube flexible destiné à acheminer des ondes radioélectriques a été proposé et mis au point en 2015 au Japon [ISH 15-1] [ISH 15-2]. Il était fabriqué en résine et portait un revêtement conducteur. Un système expérimental a été construit pour transmettre de l'énergie sans fil en émettant des ondes radioélectriques dans le tube; cette expérience a permis de confirmer la possibilité de transmettre sans fil une énergie de l'ordre de 100 mW dans la bande des 5,8 GHz. Ce tube sera employé pour alimenter sans fil des appareils dans un véhicule (voir Fig. 11).

FIGURE 11

Concept d'alimentation sans fil d'appareils dans un véhicule au moyen d'un tube flexible acheminant des ondes radioélectriques pour la transmission WPT [ISH 15-1]



- [HIR 97] Hirayama, K., N. Shinohara, K. Hashimoto, H. Matsumoto, T. Nakauchi, and Y. Yoshida, «Fundamental Study of Microwave Power Transmission to a Robot Moving in Gas Pipes (in Japanese)», *Proc. of IEICE Comm.*, p. 116, March 1997.
- [HIR 99] Hirayama, K., N. Shinohara, H. Matsumoto, and I. Nagano, «Study of Microwave Power Transmission to a Robot Moving in Gas Pipes (in Japanese)», *Proc. of IEICE Comm.*, p. 25, March 1999.
- [IHI15-1] Ishino, S., A. Kishimoto, Y. Takimoto, Y. Arai, Y. Huang, and N. Shinohara, «Study on WPT System Using a Radio Wave Hose as a New Transmission Line», *Proc. of 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc2015)*, P4.1, May 2015.
- [ISH 15-2] Ishino, S., T. Miyagawa, and N. Shinohara, «A New Slotted Waveguide Using a Resin Hose with Metallic Coating», *Proc. of 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Dec. 2015.
- [SHB 97] Shibata, T., Y. Aoki, M. Otsuka, T. Idogaki, and T. Hattori, «Microwave Energy Transmission System for Microrobot», *IEICE Trans. Electr.*, Vol.E80-C, No. 2, pp. 303-308, 1997.

2.5 Bâtiments alimentés en hyperfréquence

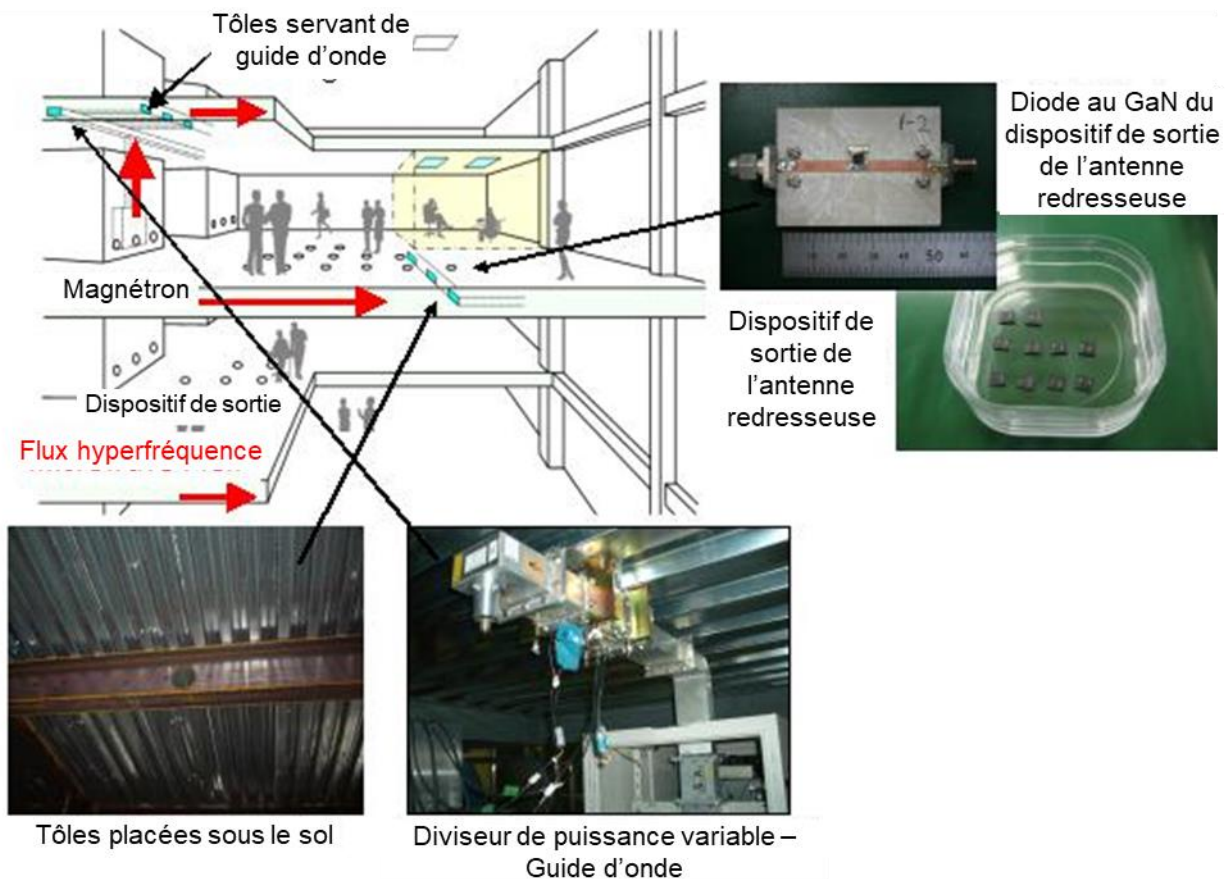
2.5.1 Travaux menés au Japon

Une entreprise de construction japonaise a proposé, conjointement avec l'Université de Kyoto, de construire un bâtiment alimenté sans fil en hyperfréquence [SHI 14]. Le système d'alimentation électrique proposé est illustré dans la Fig. 12. Il achemine de l'électricité sans fil au moyen de tôles

portant un revêtement conducteur et servant de guide d'onde. La fréquence des 2,45 GHz a été choisie en raison de la taille limitée des tôles ordinaires employées, et l'émetteur hyperfréquence choisi était un magnétron car ce dispositif est peu coûteux. Le flux d'énergie hyperfréquence pouvait être contrôlé par des diviseurs de puissance variable qui n'envoyaient de l'énergie qu'aux utilisateurs en faisant la demande, et qui bloquait le flux vers les lieux où il n'y avait pas d'utilisateur. Des antennes redresseuses disposées sous le sol convertissaient l'électricité en courant continu et servaient ensuite de source de courant continu. Il était très facile de régler la position des antennes redresseuses car les hyperfréquences étaient présentes pratiquement partout sous le sol. Le rendement total de la transmission d'énergie en hyperfréquence, depuis la source d'énergie jusqu'au courant continu, était estimé à 50%. Si les coûts de consommation électrique quotidienne du bâtiment équipé de ce système sont approximativement deux fois plus élevés que ceux d'un bâtiment alimenté de manière classique, le bâtiment coûte moins cher à construire. Il semble donc que le coût global du cycle de vie complet du bâtiment puisse être réduit par un système d'alimentation électrique en hyperfréquence.

FIGURE 12

Bâtiment équipé d'un système de transmission d'énergie en hyperfréquence



Dans la phase initiale, on envisageait de déployer ce système sans fil dans des immeubles de bureaux, dans lesquels les appareils électriques employés sont surtout des ordinateurs et d'autres instruments d'analyse, qui sont tous alimentés en courant continu. On estimait qu'un convertisseur en courant continu nécessitait moins de 50 W et que la puissance acheminée sans fil dans chaque pièce était supérieure à 3 kW. Le système disposait donc de suffisamment de puissance pour alimenter un certain nombre d'appareils électriques dans chaque pièce. Dans cette application, ce sont les hyperfréquences parcourant le guide d'onde qui constituent la source d'énergie ubiquitaire (UPS).

- [SHI 14] Shinohara, N., N. Niwa, K. Takagi, K. Hamamoto, S. Ujigawa, J.-P. Ao, and Y. Ohno, «Microwave Building as an Application of Wireless Power Transfer», *Wireless Power Transfer*, pp. 1-9, 2014.4.
- [TAK 09] Takahashi, K., J.-P. Ao, Y. Ikawa, C.-Y. Hu, H. Kawai, N. Shinohara, N. Niwa, and Y. Ohno, «GaN Schottky Diodes for Microwave Power Rectification», *Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)*, Vol. 48, No. 4, pp. 04C095-1 - 04C095-4, 2009.

2.6 Transmission d'énergie sans fil vers une cible en déplacement ou en vol

2.6.1 Travaux menés au Canada

La transmission d'énergie sans fil (WPT) par faisceau radiofréquence permet aussi d'alimenter une cible en déplacement ou en vol. Un groupe canadien travaillant au Centre de recherche sur les communications (CRC) a réussi à alimenter en vol un avion n'ayant embarqué aucun carburant. Cette expérience, menée en 1987, s'appelait SHARP (*Stationary High Altitude Relay Platform* ou plate-forme de relai stationnaire en haute altitude; voir Fig. 13); elle s'appuyait sur la transmission d'énergie en hyperfréquence (MPT) [SCH 88] [SHA 88]. Il s'agissait de transmettre en hyperfréquence un signal de 10 kW dans la bande des 2,45 GHz vers un modèle réduit d'avion de 2,9 m de long et de 4,5 m d'envergure, qui volait à une altitude de plus de 150 m.

2.6.2 Travaux menés au Japon

Au Japon, une expérience appelée MILAX a été menée avec succès en 1992 sur un modèle réduit d'avion sans carburant alimenté par des réseaux déphaseurs dans la bande des 2,411 GHz (Fig. 14) [MAT 93]. Il s'agissait de la première expérience au monde fondée sur une alimentation en MPT par faisceau et réseau déphaseur. Les projets SHARP et MILAX visaient à tester une plate-forme de relais stationnaire dans la stratosphère.

FIGURE 13

L'expérience SHARP d'alimentation en vol menée au Canada en 1987, et le modèle réduit d'avion au 1/8^e [SHA 88]



FIGURE 14

L'expérience MILAX d'alimentation en vol menée au Japon en 1992, et le modèle réduit d'avion ainsi que le réseau déphaseur



Au début du XXI^e siècle, on a proposé au Japon un projet de microvéhicule aérien (MAV) [MYS 12] et un projet d'avion destiné à l'observation de la planète Mars [NAG 11] [NAG 12]. Ces deux projets prévoyaient d'alimenter un petit avion par un système de transmission MPT (Fig. 15). Le projet de MPT vers le microvéhicule aérien était proposé par l'Université de Tokyo: les chercheurs transmettaient de l'énergie hyperfréquence dans la bande des 5,8 GHz vers un MAV en vol, qui envoyait alors un signal pilote dans les 2,45 GHz pour indiquer que la cible avait bien été détectée. Des antennes redresseuses avaient été disposées à la surface du MAV. Dans un premier temps, le réseau déphaseur se composait de cinq antennes cornets; son diamètre était de 330 mm et l'espace entre ses éléments était de 2λ . La puissance à la sortie de chaque antenne cornet était de 4 W .

Pour le système de base, les chercheurs ont choisi un réseau déphaseur composé de huit antennes microbandes dont l'espacement entre les éléments était de $1,36\lambda$. La puissance des hyperfréquences à la sortie de chaque antenne était de 8 W .

FIGURE 15

Premier concept d'alimentation en MPT d'un microvéhicule aérien [MYS 12]

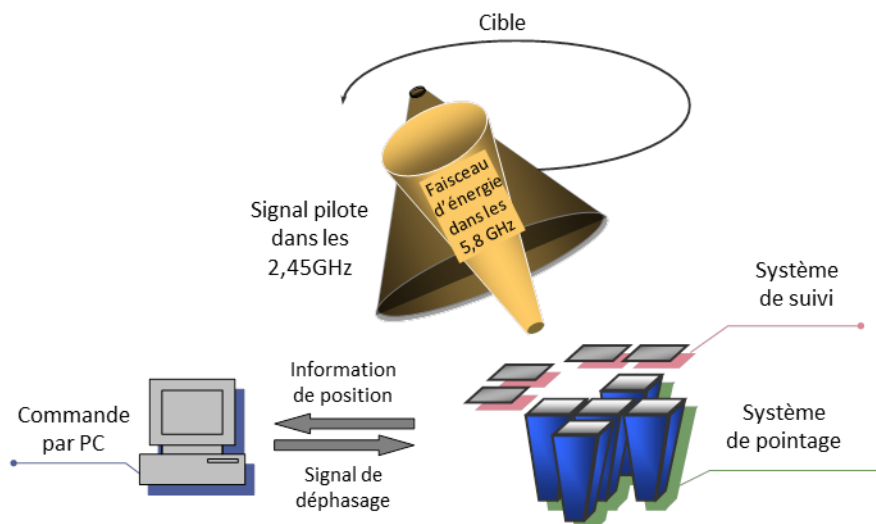
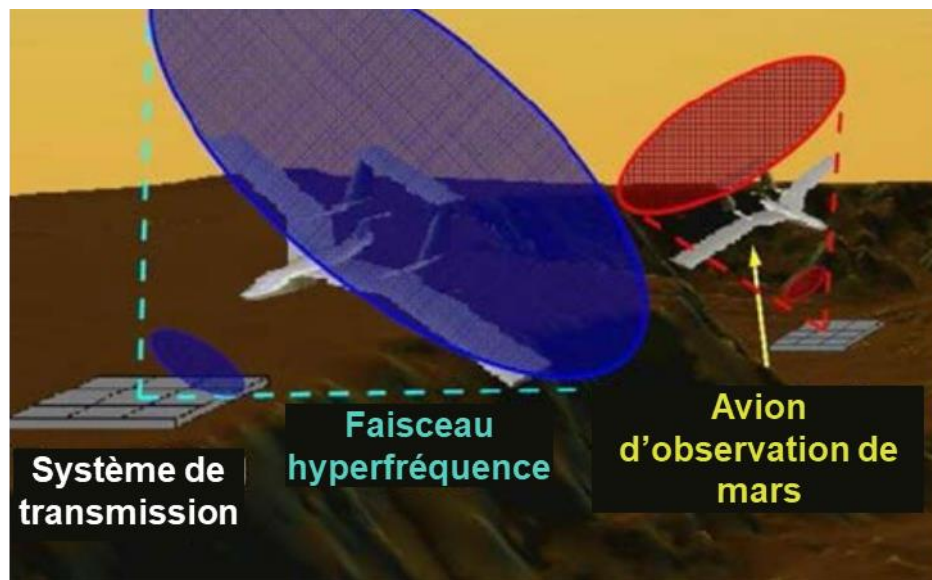


FIGURE 16

Description de l'alimentation en MPT d'un avion destiné à l'observation de Mars [NAG 11] [NAG 12]

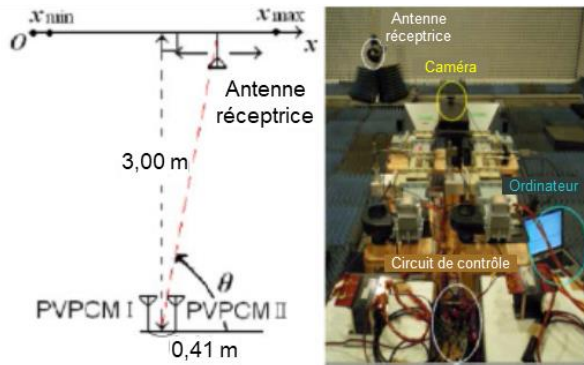


Le système d'alimentation en hyperfréquence de l'avion destiné à l'observation de Mars était proposé par l'Université de Kyoto et l'Institut de technologie de Kyusyu, au Japon. Pour pouvoir comprendre les propriétés physiques de Mars, il est utile de pouvoir observer en permanence de grandes parties de la planète. Jusqu'à présent, la surface de Mars a essentiellement été observée par un rover, mais celui-ci ne peut ni se déplacer rapidement ni observer des terrains accidentés – d'où l'intérêt d'un petit avion d'observation. Or pour qu'un avion puisse avoir un vol stable dans l'atmosphère très raréfiée de Mars, il doit être léger.

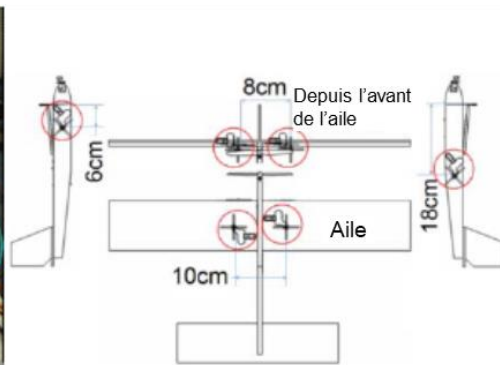
La transmission d'énergie en hyperfréquence est une technologie très prometteuse pour réduire, voire éliminer les besoins de carburant d'un aéronef. On trouvera dans la Fig. 16 le principe d'alimentation d'un avion d'observation de Mars qui pourrait être construit à l'avenir [NAG 11] [NAG 12]. La structure d'un système d'alimentation expérimental est proposée dans la Fig. 17. L'expérience était fondée sur un système MPT exploitant une antenne à réseau déphaseur qui comprenait des «magnétrons à contrôle de phase et à puissance variable (PVPCM)». Le PVPCM est une technologie dérivée du magnétron à contrôle de phase (PCM), qui a été mis au point à l'Université de Kyoto. Un PVPCM peut transmettre une puissance hyperfréquence de 61 dBm dans la bande des 2,45 GHz et permet de contrôler la direction du faisceau au moyen de la commande de phase [NAG 11]. L'émetteur suit l'emplacement de l'aéronef au moyen d'une caméra et d'une application de traitement d'image [NAG 12].

FIGURE 17

a) Diagramme et photographie du réseau déphaseur exploitant un magnétron



b) Alignement des six antennes redresseuses à la surface de l'avion pour les expériences au sol [NAG 12]



Il est aussi possible d'alimenter en MPT un rover en déplacement, comme le montre la Fig. 18. Une technologie MPT fondée sur une antenne intégrée active (AIA) est mise au point au Japon depuis 2004 [SHI 07]. Ce projet vise à i) créer un émetteur d'énergie hyperfréquence d'un excellent rapport poids-puissance (l'objectif étant d'atteindre un rapport inférieur à 50 g/W) en se fondant sur la technologie des AIA; ii) améliorer la gestion de la puissance de l'énergie hyperfréquence redressée à l'antenne redresseuse, au récepteur et au redresseur, notamment pour éviter des variations de la charge connectée; et iii) mener des expériences fondamentales sur la coexistence d'hyperfréquences de 100 W et d'ondes de 10 mW destinées à la communication sans fil. L'objectif choisi dans cette expérience consistait à alimenter par MPT un rover en déplacement. Le sous-système d'émission en hyperfréquence comportait une AIA composée de 32 éléments et d'un réseau d'antennes microbandes rectangulaires à polarisation rectiligne, ainsi que des amplificateurs de haute puissance à l'arséniure de gallium (GaAs) à trois étages fournissant 4 W en sortie. Il était monté sur une base diélectrique courbée pour augmenter la surface de refroidissement et produisait une puissance de 120 W dans la bande des 5,8 GHz. Il ne disposait pas de déphaseur. On trouvera dans la Fig. 19 une photographie de l'expérience MPT menée dans une chambre anéchoïde. Le rover ne se déplaçait qu'au moyen de l'énergie hyperfréquence fournie par le système MPT.

Par ailleurs, un groupe de l'Université de Ritsumeikan, au Japon, a effectué en 2015 une démonstration d'un système MPT alimentant un drone en vol (Fig. 20) [NIS 15]. Les chercheurs ont transmis par ondes radioélectriques une énergie d'environ 30 W dans la bande des 430 MHz pour alimenter le drone. Celui-ci était un modèle réduit pesant 25 g et nécessitant 2 W de courant continu pour pouvoir voler. Dans la version présentée, le drone pouvait survoler une antenne émettrice à une distance d'environ 10 cm. Ce système est en cours de révision.

Enfin, un groupe de l'Université du Colorado aux Etats-Unis et de l'ISAE en France a mis au point en 2015 un système de transmission WPT permettant de faire voler un microvéhicule aérien sans pilote (Fig. 21) [Dun15].

FIGURE 18

Système expérimental de MPT pour alimenter un rover en déplacement [SHI 07]

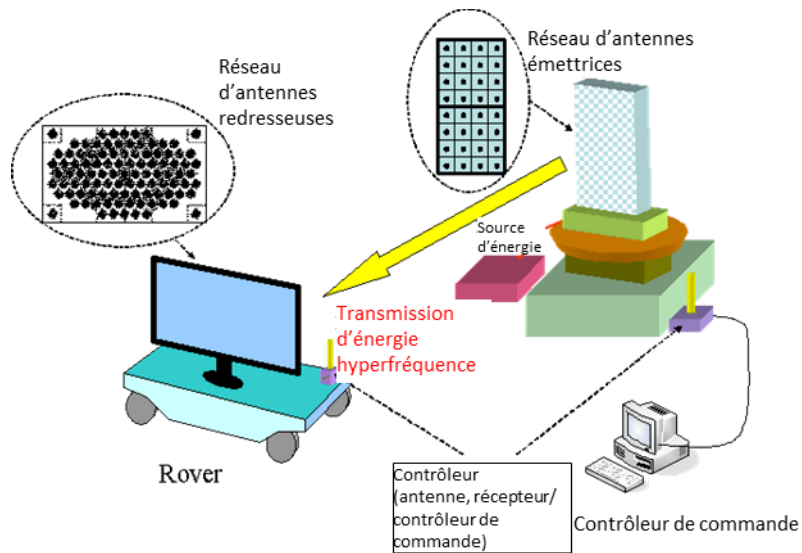


FIGURE 19

Expérience d'alimentation d'un rover en MPT [SHI 07]

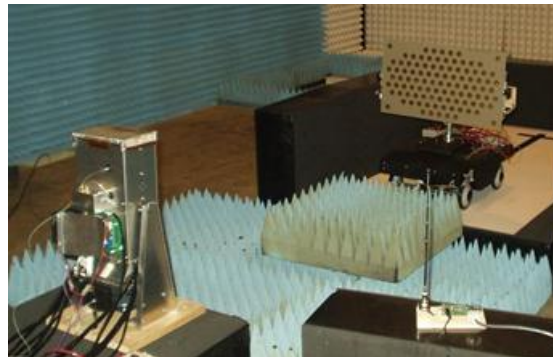


FIGURE 20

Système expérimental de transmission WPT vers un drone en vol [NIS 15] et sa démonstration au Japon (mars 2016)

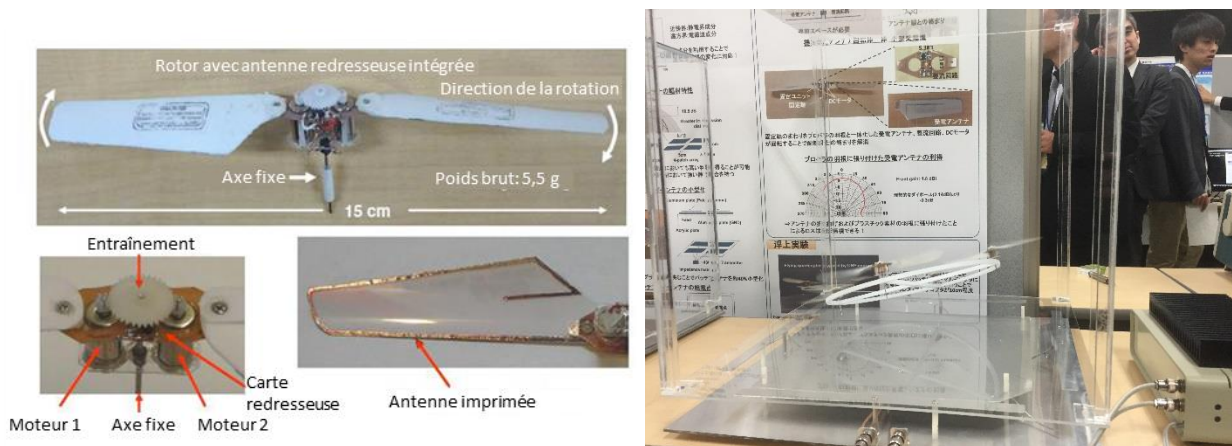
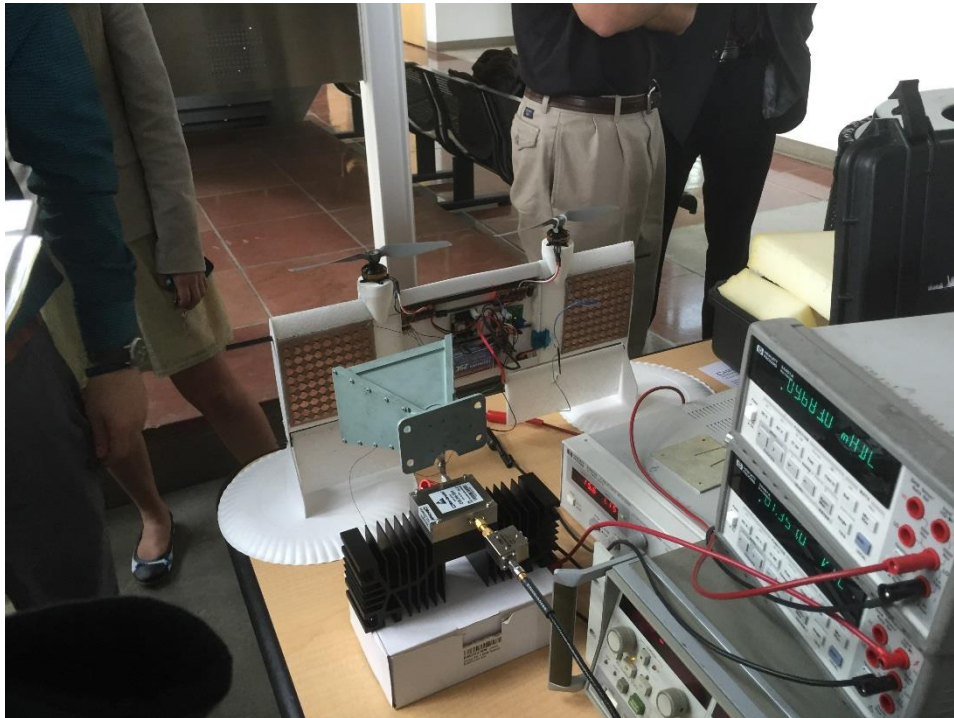


FIGURE 21

Système expérimental de transmission WPT vers un microvéhicule aérien sans pilote



- [DUN 15] Dunbar, S., F. Wenzl, C. Hack, R. Hafeza, H. Esfeer, F. Defay, S. Prothin, D. Bajon, and Z. Popovic, «Wireless Far-Field Charging of a Micro-UAV», *Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc)*, T1.2, May 2015.
- [NAG 11] Nagahama, A., T. Mitani, N. Shinohara, N. Tsuji, K. Fukuda, Y. Kanari, and K. Yonemoto, «Study on a Microwave Power Transmitting System for Mars Observation Airplane», *Proc. of 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2011)*, pp. 63-66, 2011.
- [NAG 12] Nagahama, A., T. Mitani, N. Shinohara, K. Fukuda, K. Hiraoka, and K. Yonemoto, «Auto Tracking and Power Control Experiments of a Magnetron-based Phased Array Power Transmitting System for a Mars Observation Airplane», *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 29-32, 2012.
- [NIS 15] Nishikawa, H., Y. Kiani, T. Furukoshi, H. Yamaguchi, A. Tanaka, and T. Douseki, «UHF Power Transmission System for Multiple Small Self-rotating Targets and Verification with Batteryless Quadcopter having Rotors with Embedded Rectenna», *Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc)*, T1.1, May 2015.
- [MYS 12] Miyashiro, K., F. Inoue, K. Maki, K. Tanaka, S. Sasaki, and K. Komurasaki, «Sequentially Rotated Array Antenna for Wireless Power Transmission to an MAV (in Japanese)», *IEICE Tech. Report*, WPT2012-30, pp. 59-61, 2012.
- [SHI 07] Shinohara, N., K. Nagano, T. Ishii, S. Kawasaki, T. Fujiwara, S. Nakayama, Y. Takahashi, S. Sasaki, K. Tanaka, Y. Hisada, Y. Fujino, S. Mihara, T. Anzai, and Y. Kobayashi, «Experiment of Microwave Power Transmission to the Moving Rover», *Proc. of Int. Sympo. on Antennas and Propagation (ISAP2007)*, 3B1-1, 2007.

2.7 Transmission d'énergie sans fil point à point

On peut facilement imaginer un système WPT point à point empruntant des ondes radioélectriques sur des kilomètres de distance à la place d'un système de transmission filaire (Fig. 22). Les systèmes WPT point à point fonctionnant dans les hyperfréquences sur une distance de plusieurs kilomètres faisaient partie des applications les plus prometteuses dans les années 1960. Brown et Dickinson ont mené leurs expériences en matière de transmission MPT au JPL dans les années 1975 (Fig. 23) [BRO 84]. Cependant, la taille des antennes émettrices et réceptrices, qui avait été définie de manière théorique, était trop grande pour permettre une application MPT point à point commerciale à un coût raisonnable afin de remplacer l'alimentation électrique filaire. Les systèmes MPT point à point ont été revus et de nouvelles expériences ont été proposées dans les années 1990 (Fig. 24) [SHI 98] [CEL 97]. Elles reposent désormais sur un réseau d'antennes redresseuses. Dans certaines circonstances, par exemple lorsqu'il faut acheminer de l'électricité au sommet d'une montagne ou dans une île et que le coût d'une solution filaire est trop élevé et/ou que les besoins en électricité sont sporadiques, le système MPT point à point présente un avantage évident par rapport au système filaire.

FIGURE 22

Représentation d'un système WPT point à point



FIGURE 23

Expérience d'acheminement d'énergie sur 1,6 km par un système MPT point-to-point. On a employé une antenne parabolique de 26 m et un émetteur Klystron de 450 kW fonctionnant dans la bande des 2,388 GHz, ainsi qu'un réseau d'antennes redresseuses de $3,4 \times 7,2$ m comme récepteur



FIGURE 24

Expérience d'acheminement d'énergie sur 50 m par un système MPT point-to-point effectuée au Japon en 1995. Le système fournissait 3 kW dans la bande des 2,45 GHz



2.7.1 Travaux menés au Japon

En février 2015, deux expériences de transmission d'énergie sans fil sur une longue distance ont été menées au Japon. L'une portait sur une distance de 55 m et fournissait 1,8 kW en hyperfréquence dans la bande des 5,8 GHz (Fig. 25). Les hyperfréquences étaient émises depuis un réseau déphaseur de 2,5 cm d'épaisseur équipé d'amplificateurs au nitrure de gallium (GaN) et à circuit intégré monolithique hyperfréquence (MMIC), ainsi que de déphaseurs MMIC à 5 bits. Le rendement de l'amplificateur haute puissance au GaN était d'environ 70% à 7 W dans les 5,8 GHz. Le réseau déphaseur fin et les amplificateurs au GaN avaient été mis au point par la société Mitsubishi Electric, et l'antenne redresseuse par IHI Aerospace. Dans cette expérience, on avait choisi un vecteur électromagnétique rotatif et recto-directif capable de détecter une cible pour repérer la position d'une antenne redresseuse et contrôler un faisceau hyperfréquence. Le système de détection de cible et de production du faisceau a été mis au point par JAXA et Mitsubishi Electric. L'autre expérience de transmission WPT sur une longue distance a été effectuée sur 500 m: un réseau déphaseur équipé d'un magnétron (fabriqué par Mitsubishi Heavy Industries) produisait une puissance de 10 kW dans les 2,45 GHz (Fig. 26). Les deux expériences ont été menées par JSS (*Japan Space Systems*) avec l'aide du METI (Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie). Ces expériences de terrain intervenaient après six années de recherche-développement consacrées à un projet de satellite collecteur d'énergie solaire. Le projet du METI se poursuit encore en 2017 et au-delà.

FIGURE 25

Transmission d'énergie en hyperfréquence point à point sur 55 m par réseau déphaseur fournissant 1,8 kW dans les 5,8 GHz avec des amplificateurs MMIC au GaN. Expérience menée au Japon par JSS et le METI (2015)

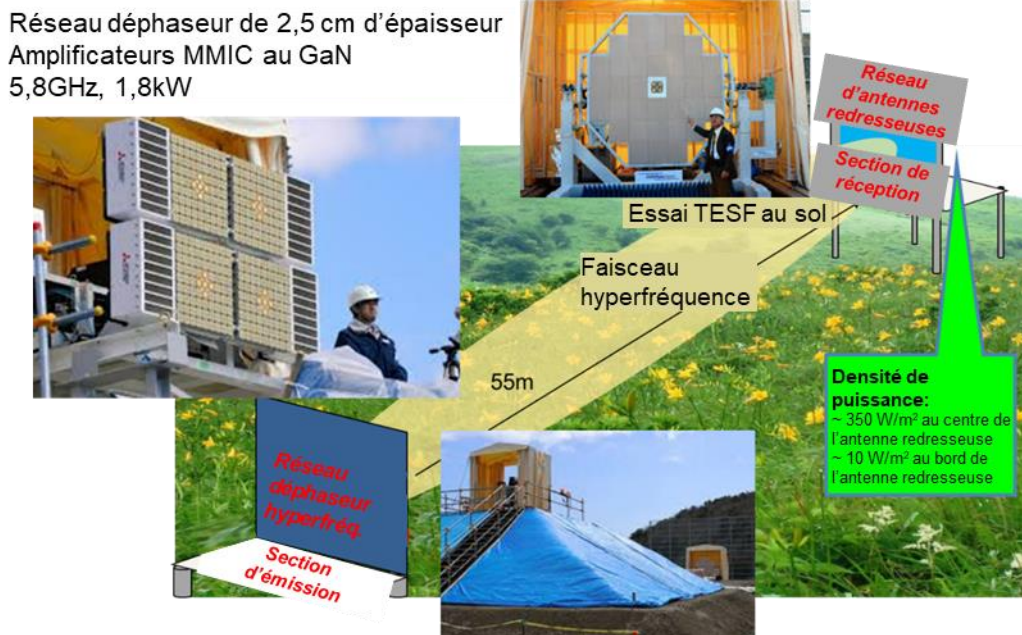
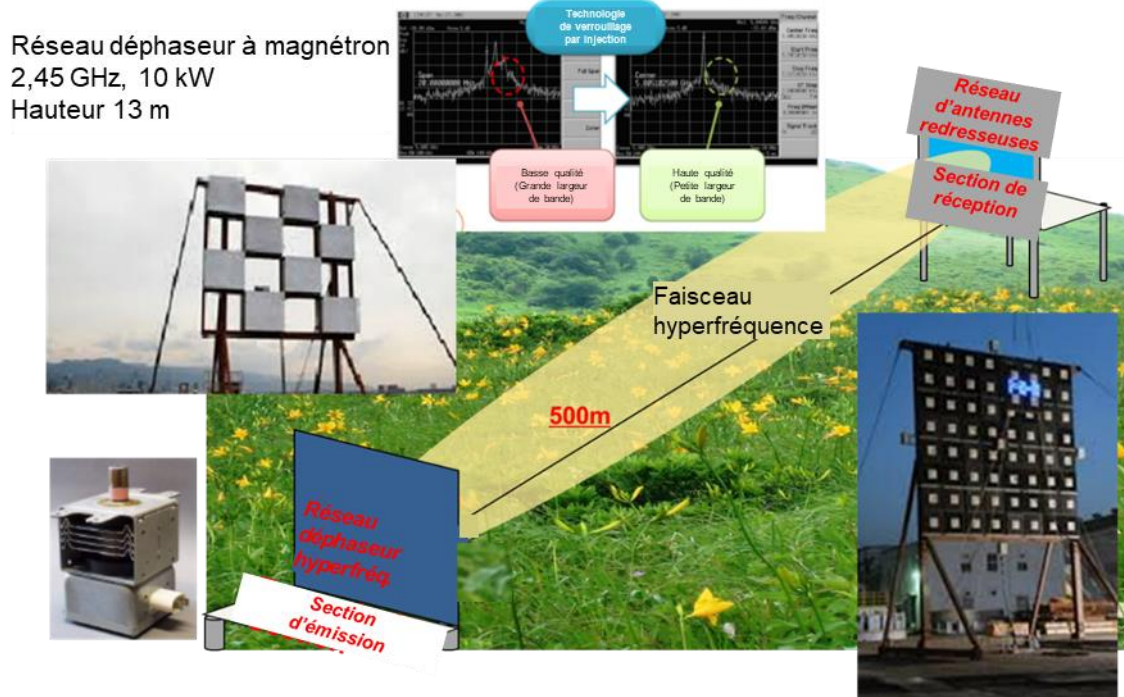


FIGURE 26

Transmission d'énergie en hyperfréquence point à point sur 500 m par réseau déphaseur à magnétron fournissant 10 kW dans les 2,45 GHz. Expérience menée au Japon par JSS et le METI (2015)

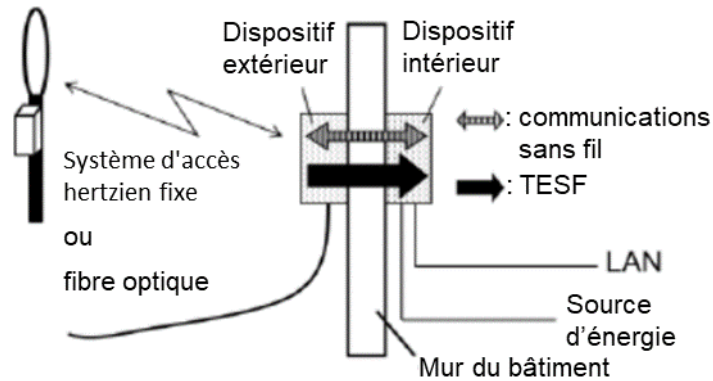


La taille de l'antenne et l'envergure d'un système MPT dépendent de la portée prévue du système. Au Japon, la société NTT et l'Université de Kyoto ont proposé un système MPT point à point fonctionnant sur courte distance, qu'elles ont appelé «système MPT pour un accès fixe sans fil» (FWA). La Figure 27 illustre le système proposé [HAT 12]. Le dispositif extérieur se connecte à l'Internet par un système d'accès hertzien fixe ou par fibre optique. Le dispositif intérieur et le

dispositif extérieur communiquent aussi entre eux sans fil. Le dispositif intérieur transmet de l'énergie en hyperfréquence au dispositif extérieur. Celui-ci peut fonctionner sans batterie. Il est préférable que les informations et l'énergie soient transportées par la même porteuse hyperfréquence afin de réduire la taille du système. Dans un premier temps, on avait choisi la fréquence des 24 GHz et une antenne redresseuse MMIC avec un filtre de sortie chargée de classe F, comme le montre la Fig. 2.7.6 de [HAT 13].

FIGURE 27

Concept de système d'accès hertzien fixe alimenté en hyperfréquence [HAT 12]



En 2015, l'Université de Kyoto et le groupe MHI ont mis au point un système de chargement sans fil, destiné à une voiturette électrique, qui acheminait 100 W en hyperfréquence dans la bande des 2,45 GHz (Fig. 28). C'est un exemple de système WPT point à point sur courte distance. En 2016, l'Université de Kyoto a étudié la possibilité de déployer ce système pour un usage quotidien des voiturettes.

FIGURE 28

Système de chargement sans fil d'une voiturette électrique



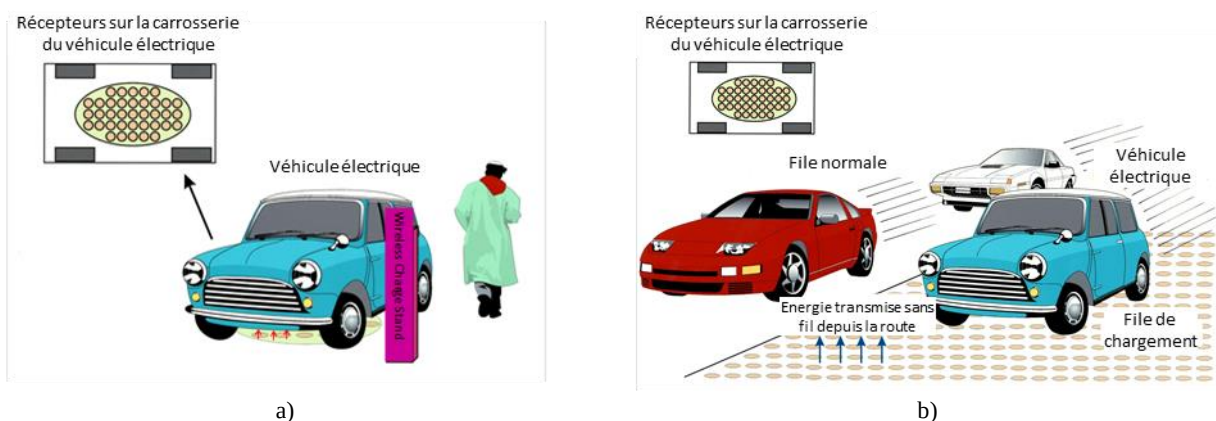
- [BRO 84] Brown, W.C., «The History of Power Transmission by Radio Waves», *IEEE Trans. MTT*, Vol. 32, No. 9, pp. 1230-1242, 1984.
- [SHI 98] Shinohara N. and H. Matsumoto, «Dependence of dc Output of a Rectenna Array on the Method of Interconnection of Its Array Element», *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 125, No. 1, pp. 9-17, 1998.
- [CEL 97] Celeste, A., J-D. L.S. Luk, J.P. Chabriat, and G. Pignolet, «The Grand-Bassin Case Study: Technical Aspects», *Proc. of SPS'97*, pp. 255-258, 1997.
- [HAT 12] Hatano, K., N. Shinohara, T. Mitani, T. Seki, and M. Kawashima, «Development of Improved 24GHz-Band Class-F Load Rectennas», *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 163-166, 2012.
- [HAT 13] Hatano, K., N. Shinohara, T. Seki, and M. Kawashima, «Development of MMIC Rectenna at 24 GHz», *Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, pp. 199-201, 2013.

2.8 Chargement sans fil de véhicules électriques

Les systèmes de transmission d'énergie en hyperfréquence peuvent exploiter non seulement des guides d'onde fermés, mais aussi de plus petites antennes si les distances sont courtes. On trouvera des illustrations du chargement sans fil de véhicules électriques au moyen d'un système MPT dans la Fig. 29. Les systèmes MPT sont pratiques pour alimenter sans fil des véhicules électriques en stationnement ou en déplacement car les antennes émettrice et réceptrice ne sont pas couplées. Un changement de position du véhicule électrique ne modifie donc ni l'impédance de l'antenne ni le rendement du système MPT. Les problèmes de sécurité ou de brouillage découlant des hyperfréquences sont réduits aussi bien pour les systèmes MPT fonctionnant par guide d'onde fermé que pour ceux qui fonctionnent sur une courte distance, car il n'y a pratiquement pas de diffusion d'hyperfréquences non souhaitées. Dans les systèmes de transmission d'énergie à courte distance, la puissance de l'énergie transmise sans fil peut aussi être augmentée dans la plage des kW car la transmission n'a pas d'effet sur les êtres humains ou d'autres êtres vivants entre les antennes émettrice et réceptrice.

FIGURE 29

Chargement sans fil de véhicules électriques a) en stationnement, et b) en déplacement



2.8.1 Travaux menés au Japon

Un système MPT a été proposé et mis en oeuvre pour des véhicules électriques (Fig. 30) [SHI 04]. Entre 2003 et 2008, des entreprises et des universités japonaises ont travaillé ensemble pour mettre au point un système MPT placé entre la route et la carrosserie d'un véhicule électrique et fonctionnant en hyperfréquence dans la bande des 2,45 GHz (Fig. 31) [SHI 11] [SHI 11-2]. Les chercheurs ont

employé des magnétrons et des antennes à fente pour réduire le coût du système. La distance entre les antennes d'émission et de réception était d'environ 12,5 cm, soit une distance de 1λ à une fréquence de 2,45 GHz. La batterie du véhicule électrique pouvait être chargée de manière efficace par transmission en hyperfréquence car le rendement théorique du faisceau était d'au moins 83,7%, et le rendement pratique en laboratoire était d'au moins 76,0% [SHI 11-2]. Ce rendement était suffisant pour alimenter le véhicule sans fil en hyperfréquence. Aux fins de cette application, une nouvelle diode Schottky au nitrure de gallium (GaN) a été employée pour accroître la puissance redressée et réduire le temps de chargement du véhicule.

En 2000, un système MPT avait déjà été mis au point pour un modèle réduit de véhicule électrique [SHI 04]. Pour réduire la perte d'énergie, la position du modèle réduit était détectée par des capteurs de positionnement et la puissance n'était transmise en hyperfréquence que vers cette position.

FIGURE 30

Système déployé sur la route pour charger sans fil un véhicule électrique en hyperfréquence et à courte distance [SHI 04]

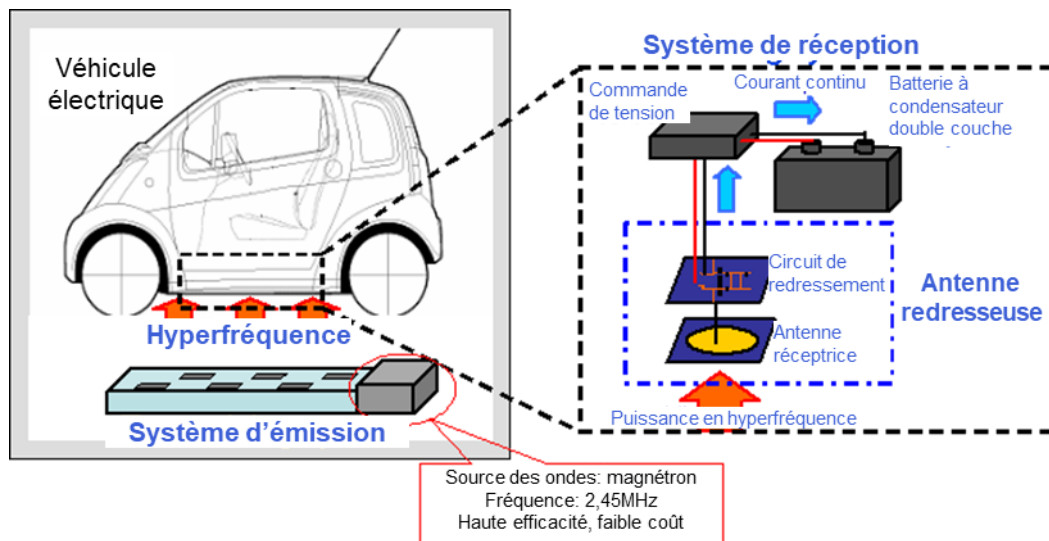
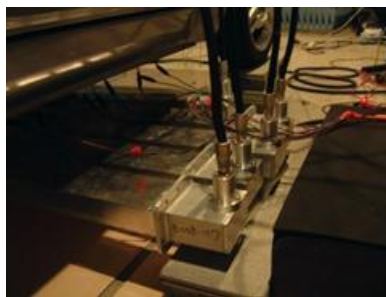


FIGURE 31

Expérience de chargement sans fil en hyperfréquence menée par l'Université de Kyoto. a) système, b) antenne émettrice en hyperfréquence sur la route, c) réseau d'antennes redresseuses sur la carrosserie du véhicule électrique [SHI 11-2]



a)



b)



c)

Entre 2006 et 2008, une entreprise japonaise a mené un projet de recherche-développement sur la transmission MPT destinée aux véhicules électriques en collaboration avec trois constructeurs automobiles japonais [SHI 13-2]. Pour réduire la perte de puissance, les chercheurs ont employé 1) une tension de 6,6 kV pour alimenter directement les magnétrons dans la bande des 2,45 GHz, ces magnétrons jouant le rôle d'émetteurs en hyperfréquence; 2) une enceinte de blocage autour de

laquelle les hyperfréquences circulaient entre les antennes émettrice et réceptrice; et 3) un système de recyclage de la chaleur. Le rendement total, en tenant compte du recyclage de chaleur, était d'environ 38% pour une puissance en sortie de 1 kW à une distance de 12,5 cm. Le prototype présenté en 2009 est illustré dans la Fig. 32.

En 2012, la filiale japonaise d'un constructeur automobile suédois et une entreprise japonaise ont entrepris de mettre au point un nouveau système MPT destiné à un camion électrique. Le précédent système avait rencontré des problèmes de couplage mutuel entre les antennes émettrice et réceptrice car la distance de la transmission MPT était trop courte. Le nouveau système MPT a donc été modifié: la transmission ne se faisait plus entre la route et la carrosserie du véhicule, mais entre une antenne de toit et le toit (Fig. 33) [SHI 13-1] [SHI 13-3] pour tirer parti des propriétés de la transmission WPT à longue distance. La distance entre les antennes émettrice et réceptrice montées sur le toit du véhicule électrique variait entre 2 et 6 m selon le type de véhicule employé. Pour conserver un rendement élevé à mesure que la distance augmentait, un système de réseau déphaseur a été prévu pour produire un faisceau plat en direction de l'antenne réceptrice.

Le 6 juillet 2012, les chercheurs ont testé une antenne redresseuse de 10 kW dont le rendement était de 84% dans la bande des 2,45 GHz pour un système WPT fonctionnant à une distance intermédiaire (Fig. 34) [FUR 13]. La densité de puissance reçue en hyperfréquence était supérieure à 3,2 kW/m² à une distance d'environ 4 m de l'émetteur.

FIGURE 32

Expérience de chargement sans fil en hyperfréquence menée par le groupe Mitsubishi Heavy Industries en 2009 [SHI 13-2]



FIGURE 33

Proposition de système de chargement sans fil d'un véhicule électrique sur une distance intermédiaire, et simulation du faisceau hyperfréquence par la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [SHI 13-1]

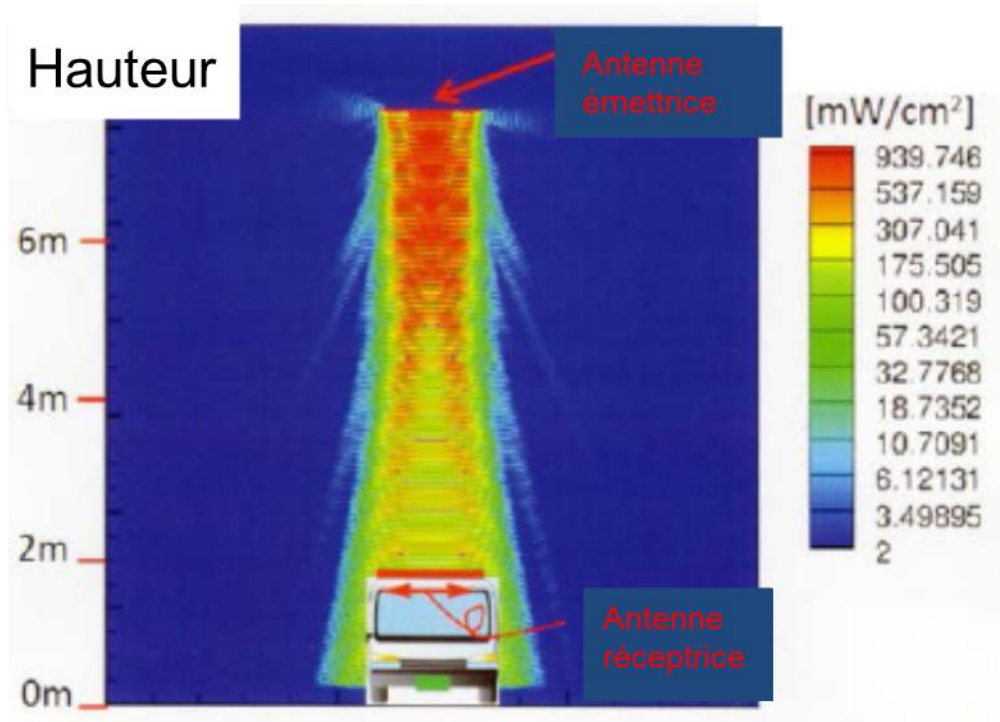


FIGURE 34

Antenne redresseuse de 10 kW fonctionnant dans les 2,45 GHz pour charger sans fil un véhicule électrique [FUR 13]



- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, «Wireless Power Transmission to 10kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (in Japanese)», *IEICE Tech. Report*, WPT2012-47, pp. 36-39, 2013.
- [SHI 04] Shinohara, N. and H. Matsumoto, «Wireless Charging System by Microwave Power Transmission for Electric Motor Vehicles (in Japanese)», *IEICE Trans. C*, Vol.J87-C, No. 5, pp. 433-443, 2004.
- [SHI 11] Shinohara, N., «Beam Efficiency of Wireless Power Transmission via Radio Waves from Short Range to Long Range», *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 10, No. 4, pp. 224-230, 2011.

- [SHI 11-2] Shinohara, N., «Wireless Charging System of Electric Vehicle with GaN Schottky Diodes», *Proc. of Int. Microwave Sympo. (IMS) Workshops*, WFA «Wireless Power Transmission», 2011.
- [SHI 13] Shinohara, N. and Yuta Kubo, «Suppression of Unexpected Radiation from Microwave Power Transmission System toward Electric Vehicle», *Proc. of 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, E3-4 (No. 290450), 2013.
- [SHI 13-2] Shinohara, N., «Wireless Power Transmission Progress for Electric Vehicle in Japan», *Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, pp. 109-111, 2013.
- [SHI 13-3] Shinohara, N., Y. Kubo, and H. Tonomura, «Mid-Distance Wireless Power Transmission for Electric Truck via Microwaves», *Proc. of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory (EMT-S2013)*, pp. 841-843, 2013.

2.9 Satellite collecteur d'énergie solaire

L'application la plus importante de la transmission WPT par faisceau radiofréquence et celle du satellite collecteur d'énergie solaire (SPS) [SPS 07]. Il s'agit d'un très grand satellite qui recueille de l'énergie solaire en orbite géostationnaire, à 36 000 km de la surface de la Terre (Fig. 35). Cette orbite ne connaît ni nébulosité ni période nocturne pendant toute l'année. La puissance captée par le satellite SPS est transmise au sol en hyperfréquence. La taille de l'antenne nécessaire pour obtenir un rendement élevé du faisceau lorsque la cible est aussi éloignée qu'un satellite SPS a été calculée de manière théorique et se situe autour de 2 km pour un fonctionnement dans la bande des 5,8 GHz. Cette taille est considérable mais pas impossible à réaliser. L'énergie acheminée en hyperfréquence n'est pas absorbée par l'air, les nuages ou la pluie. L'emploi de la technologie MPT depuis un satellite permet donc d'obtenir environ dix fois plus d'énergie solaire (une énergie stable et qui ne produit pas de CO₂) que depuis un système de captage situé au sol.

Un réseau déphaseur à haut rendement doit être employé dans le système MPT d'un satellite SPS car il faut diriger le faisceau d'énergie vers une petite antenne redresseuse au sol avec une marge d'erreur de 0,0005 degré. De plus, l'antenne émettrice du satellite SPS se déplace et fluctue en permanence. Pour des raisons économiques, le faisceau d'énergie doit être produit et transmis sans perte importante.

FIGURE 35
Satellite collecteur d'énergie solaire



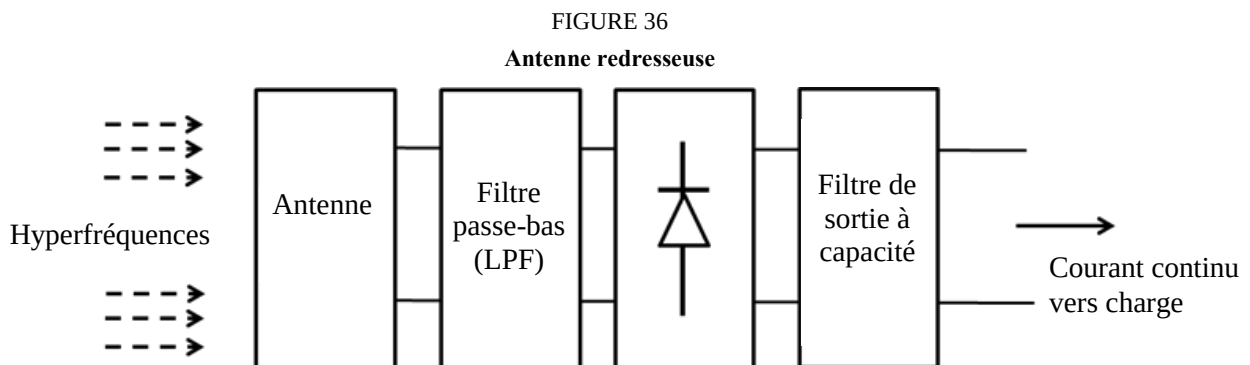
[SPS 07] Rapport du Groupe de travail intercommission de l'Union radio-scientifique internationale sur les satellites à énergie solaire, URSI, 2007: <http://www.ursi.org/files/WhitePapers/WPSPS-ReportMin.pdf>.

3 Technologies employées dans des applications WPT

Dans un système WPT fonctionnant par faisceau radiofréquence, on emploie des antennes pour émettre et recevoir des ondes radioélectriques. Ces antennes n'étant pas couplées de manière électromagnétique, le nombre d'émetteurs et de récepteurs est indépendant des paramètres du circuit d'émission et de réception. La théorie principale du système WPT par faisceau radiofréquence est fondée sur la formule de transmission de Friis. Les ondes radioélectriques permettant de transmettre de l'énergie sans fil n'ont pas besoin d'être modulées comme dans un système de communication hertzien.

Dans les applications de transmission WPT par faisceau étroit et dans une zone fermée, il est possible d'éliminer des rayonnements non souhaités en utilisant une technologie d'espacement des antennes. On emploie parfois une antenne à réseau déphaseur dans les applications de transmission WPT par faisceau étroit, car ces antennes permettent de contrôler la direction et la forme d'un faisceau destiné à de multiples antennes à variation de phase et d'amplitude. Ces antennes à réseau déphaseur ont été mises au point pour la transmission WPT et ont été testées sur le terrain [SHI 13].

Une onde radioélectrique est en elle-même de l'énergie électrique. La seule différence entre une onde radioélectrique et l'électricité tient à la fréquence. On emploie des ondes radioélectriques dans les bandes de fréquences des MHz et des GHz pour produire les faisceaux de la transmission WPT, ainsi que dans les applications de communication sans fil et de télédétection. En ce qui concerne l'électricité, on utilise un courant continu ou la fréquence 50/60 Hz (fréquence du réseau électrique). Il n'est donc nécessaire de convertir une fréquence radioélectrique en courant continu/fréquence du réseau électrique que pour des applications de transmission WPT, comme par exemple la transmission WPT par faisceau radiofréquence, par induction ou par couplage de résonance. On emploie une antenne redresseuse, c'est-à-dire une antenne équipée d'un circuit de redressement à diodes, pour recevoir et redresser l'énergie transmise en transmission WPT par un faisceau radiofréquence (Fig. 36). Le rendement de la conversion RF-courant continu de l'antenne redresseuse était d'environ 90% à 2,45 GHz [BRO 80] [FUR 13] et de 80% à 5,8 GHz [MCS 97]. L'antenne redresseuse peut être employée dans tous les types de transmission WPT fonctionnant par faisceau radiofréquence, par exemple dans la bande des ondes décimétriques [SAM 09], la bande X [EPP 00], la bande K [TAK 13] et la bande W [WEI 14].



[BRO 80] Brown, W.C., «The History of the Development of the Rectenna, *Proc. of SPS microwave systems workshop*», pp. 271-280, Jan. 15-18, 1980, at JSC-NASA.

- [EPP 00] Epp, L.W., A.R. Khan, H.K. Smith, and R.P. Smith, «A compact dual polarized 8.51GHz-rectenna for high-voltage (50 V) actuator applications», *IEEE Trans. MTT*, Vol. 48, No. 1, pp. 111-119, 2000.
- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, «Wireless Power Transmission to 10kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (in Japanese)», *IEICE Technical Report*, WPT2012-7, pp. 36-39, 2013.
- [MCS 97] McSpadden, J.O., L. Fun, and K. Chang, «A High Conversion Efficiency 5.8 GHz Rectenna», *IEEE MTT-S Digest*, pp. 547-550, 1997.
- [SAM 09] Sample, A.P. and J.R. Smith, «Experimental Results with two Wireless Power Transfer Systems», *Proc. of 2009 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, MO2A-5, pp. 16-18, 2009.
- [SHI 13] Shinohara, N., «Beam Control Technologies with a High-Efficiency Phased Array for Microwave Power Transmission in Japan», *Proceeding of IEEE*, vol. 101, Issue 6, pp. 1448-1463, 2013.
- [TAK 13] Takacs, A., H. Aubert, L. Despoisse, and S. Fredon, «K-band Energy Harvesting for Satellite Application», *Proc. of Int. Microwave Sympo. (IMS)*, WE3G-1, 2013.
- [WEI 14] Weissman, N., S. Jameson and E. Socher, «W-Band CMOS On-Chip Energy Harvester and Rectenna», *Proc. of Int. Microwave Sympo. 2014*, TH2C-5, 2014.

4 Organisations susceptibles de participer à la normalisation de la transmission WPT

S'il n'existe aucune organisation spécifiquement chargée de normaliser la transmission d'énergie sans fil, certaines organisations qui s'efforcent de promouvoir cette technologie pourraient participer à sa normalisation.

4.1 En Europe

WiPE (Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics, transmission d'énergie sans fil pour une électronique durable) [W 13]

[W 13] <http://www.cost-ic1301.org/>

L'organisation COST offre un cadre intergouvernemental à la coopération européenne en matière de recherche scientifique et technique. Créée en 1971, elle vise à renforcer la compétitivité de la recherche scientifique et technique menée en Europe à des fins pacifiques.

Le projet COST Action a pour but d'améliorer l'efficacité des circuits, des systèmes et des stratégies de transmission d'énergie sans fil conçus spécifiquement pour les systèmes sans batterie. Les capteurs sans pile, les puces RFID passives et les communications en champ proche (NFC) sont autant de concepts étroitement liés entre eux qui exploitent la transmission WPT et les systèmes de captage d'énergie pour alimenter en énergie à distance des dispositifs mobiles ou recharger à distance des batteries, afin de soutenir et encourager l'évolution de l'Internet des objets.

Dans ce contexte, ce projet vise à rassembler les concepteurs de circuits et de systèmes RF de tout profil pour 1) proposer de meilleures solutions en matière de circuits et de sous-systèmes afin d'améliorer le rendement des systèmes de transmission WPT; et 2) explorer la possibilité d'employer de nouveaux matériaux et technologies pour réduire les coûts et intégrer dans toute la mesure du possible l'électronique à son environnement et à ses applications cibles.

Le projet COST Action devrait notamment déboucher sur la création d'un grand réseau de spécialistes issus du milieu universitaire comme du secteur privé qui seront chargés de relever les défis actuels et futurs des projets de transmission WPT dans un contexte interdisciplinaire. Ils ouvriront ainsi la voie aux futures générations de solutions en matière de transmission WPT ainsi qu'aux réglementations connexes.

L'organisation COST constitue un cadre idéal pour mettre en commun à un niveau international les efforts déployés dans le domaine de la transmission WPT et placer l'Europe à l'avant-garde des travaux scientifiques et industriels menés à cet égard.

Le Comité directeur de l'organisation COST-WiPE compte actuellement 27 pays européens et plus d'une centaine d'entités qui participent régulièrement aux réunions et ateliers. Il organise aussi chaque année une formation pour des doctorants sur le thème de la transmission WPT.

L'organisation COST-WiPE se compose des cinq groupes de recherche suivants:

Groupe 1 – Systèmes de transmission WPT en champ lointain

Groupe 2 – Systèmes de transmission WPT en champ proche

Groupe 3 – Nouveaux matériaux et technologies

Groupe 4 – Applications (espace, santé, agriculture, systèmes automobiles, appareils domestiques)

Groupe 5 – Réglementation et incidences sur la société.

4.2 Au Japon

4.2.1 WiPoT (*Wireless Power Transfer Consortium for practical applications*, consortium pour la transmission d'énergie sans fil destinée à des applications pratiques) [WI]

[WI] <http://www.wipot.jp/english/>

Les objectifs de ce consortium sont les suivants: 1) répondre aux besoins de la société par de nouvelles idées et solutions liées à des technologies de transmission d'énergie sans fil, notamment dans le domaine de la transmission d'énergie en hyperfréquence; et 2) stimuler la mise au point d'applications pratiques de la transmission WPT. Pour atteindre ces objectifs, le consortium partage des informations non seulement sur des technologies, mais également sur des questions de normalisation et de sécurité et sur les besoins des utilisateurs. Il se charge aussi de promouvoir les technologies de transmission WPT, et notamment de MPT, dans le monde entier. Créé en 2013, il comptait 29 entreprises, 38 universités et trois instituts en mai 2016.

Les membres du consortium estiment que la transmission d'énergie en hyperfréquence pourrait constituer à l'avenir la technologie de base de tout système de transmission d'énergie sans fil. Le consortium se compose des groupes de travail suivants:

Groupe 1: Applications à large faisceau et faible puissance

Groupe 2: Applications à faisceau étroit et haute puissance

Groupe 3: transmission WPT dans une zone fermée

Groupe 4: Commercialisation

Groupe 5: Normalisation

4.2.2 BWF (*Broadband Wireless Forum*, forum sur la transmission d'énergie sans fil en large bande) [BWF]

[BWF] <http://bwf-yrp.net/english/>

Ce forum a pour but de contribuer à faire évoluer de manière raisonnable les nouveaux systèmes et services exploitant des ondes radioélectriques afin de promouvoir la commercialisation rapide et le développement international de ces systèmes et services en s'appuyant sur de nouvelles technologies de radiocommunication. À cette fin, il mène des travaux de recherche-développement, effectue des études, recueille des informations, assure une liaison et une coordination avec des organisations connexes, mène des activités de vulgarisation, etc. dans le domaine des nouvelles technologies de radiocommunication. Il comptait 128 membres au 11 janvier 2013.

Ses activités sont les suivantes:

- 1) Recherche-développement sur banc d'essai dans le domaine des nouvelles technologies de radiocommunication.
- 2) Exploration de nouvelles technologies de radiocommunication.
- 3) Recueil, échange et communication d'informations sur les nouvelles technologies de radiocommunication.
- 4) Liaison et coordination avec des organisations actives dans le domaine des nouvelles technologies de radiocommunication.
- 5) Vulgarisation des nouvelles technologies de radiocommunication et sensibilisation du public.
- 6) Autres activités nécessaires à la progression en direction des objectifs du forum.

Le Sous-Comité des applications technologiques est responsable du Groupe de travail sur la transmission d'énergie sans fil.

Au sein du BWF, le Sous-Groupe 5 du Groupe de travail sur la transmission WPT est chargé de rédiger des normes techniques sur la transmission WPT en hyperfréquence conformément aux protocoles de rédaction de l'ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*). Un projet de norme élaboré par le BWF sera soumis à l'ARIB pour approbation.

4.3 Autres organisations internationales

La *Microwave Theory and Technique Society* (Société pour la théorie et les techniques des hyperfréquences ou MTTs) de l'IEEE s'efforce actuellement de promouvoir la transmission d'énergie ou de courant sans fil ainsi que différentes technologies de conversion en s'appuyant sur des techniques de champ proche ou lointain, pour des plates-formes d'accès fixes ou mobiles. À cette fin, la MTTs a mis en place en 2001 le Comité technique 26, appelé «Transmission et conversion d'énergie sans fil» [TC 26]. Le captage d'énergie sans fil dans des fréquences radioélectriques relève aussi du domaine de compétence de ce comité. Dans le cadre de son Symposium international sur les hyperfréquences, le Comité organise chaque année depuis 2012 un concours de conception de systèmes pour des étudiants. 15 équipes provenant de 12 pays ont participé au concours en 2014.

Le Comité technique 26 organise aussi depuis 2013 une conférence internationale appelée «Conférence sur la transmission d'énergie sans fil». Cette conférence n'était en 2011 qu'un simple atelier, qui a été de nouveau organisé en 2012. Plus de 170 articles ont été soumis pour la Conférence de 2015.

L'Union radio-scientifique internationale (URSI) est une organisation composée de 10 commissions. Elle a mis en place un groupe de travail intercommissions (ICWG) sur les satellites collecteurs d'énergie solaire (SPS), car ce domaine est l'une des applications possibles de la MPT. Ce groupe a publié en 2007 un livre blanc sur les SPS en collaboration avec toutes les commissions, notamment celles qui travaillent sur les systèmes SPS, les technologies radioélectriques et la MPT, ainsi que sur les brouillages électromagnétiques, la radioastronomie et les questions de sécurité. L'assemblée générale de l'URSI, qui se tient tous les trois ans, a comporté des sessions sur les SPS et/ou sur la transmission WPT entre 2002 et 2014 (dernière assemblée en date). Une conférence générale sur le captage d'énergie en radiofréquences et la transmission WPT a été organisée lors de l'assemblée générale de l'URSI de 2014.

[TC 26] IEEE MTTs TC-26 <http://www.mtt-archives.org/~mtt26/>

5 Spectre pour la transmission WPT par faisceau radiofréquence

La transmission WPT par faisceau peut être considérée comme une application ISM (industrielle, scientifique et médicale), même dans le cas d'une exploitation en dehors des bandes désignées pour les utilisations ISM. Les systèmes WPT par faisceau peuvent également être qualifiés de dispositifs de courte portée, fonctionnant dans certaines bandes énumérées dans la Recommandation UIT-R M.1896 et dans le Rapport UIT-R SM.2153. Étant donné que les signaux WPT n'achèment normalement pas de communications de données, ces systèmes ne peuvent être considérés comme un service de radiocommunication classique.

Les principales bandes de fréquences actuellement proposées à certaines administrations pour les applications WPT sont les suivantes: 915 MHz (917-920 MHz), 2,45 GHz (2 400-2 500 MHz) et 5,8 GHz (5 725-5 875 MHz). Aux fréquences au-dessous de 800 MHz, les systèmes WPT ne sont pas capables de générer facilement la petite zone de champ souhaitée. Aux fréquences plus élevées, les systèmes deviennent inefficaces en raison de l'affaiblissement sur le trajet. La bande des 2,45 GHz est à privilégier par rapport à des bandes de fréquences plus élevées car les dégradations dues à la propagation y sont moindres. Dans le cas des applications pour lesquelles il est possible de remédier aux défaillances de transmission dues à la pluie en ayant recours à des systèmes de secours, à des alimentations de secours ou à un stockage adéquate de l'énergie, la bande des 5,8 GHz offre des avantages en raison de la réduction de taille des ouvertures. Par rapport à la bande des 2,45 GHz et à la bande des 5,8 GHz, la bande des 915 MHz présente des avantages techniques pour certaines applications et est moins encombrée par les appareils électroniques grand public.

6 Résumé

Le présent rapport traite d'applications possibles de la transmission d'énergie sans fil (WPT) par faisceau radiofréquence, de technologies employées dans ces applications et de bandes de fréquences susceptibles d'être utilisées à cette fin.

Les applications de la transmission WPT par faisceau radiofréquence étudiées actuellement sont les réseaux de capteurs à alimentation sans fil, les chargeurs sans fil de dispositifs mobiles, les surfaces de transmission d'énergie sans fil, la transmission d'énergie en hyperfréquence (MPT) dans un tuyau, les bâtiments alimentés en énergie en hyperfréquence, la transmission WPT destinée à une cible en déplacement ou en vol, la transmission WPT point à point, le chargement sans fil de véhicules électriques et les satellites collecteurs d'énergie solaire (SPS). Des technologies fondées sur un faisceau destiné à de multiples utilisateurs à courte distance, des technologies de transmission WPT dans une zone fermée et des technologies fondées sur un faisceau étroit destiné à un seul utilisateur à courte ou longue distance sont en cours d'étude et de développement.

Des technologies de transmission WPT exploitant un faisceau vers de multiples utilisateurs à courte distance ont été étudiées dans les bandes de fréquences des 915 MHz, des 2,45 GHz et des 5,8 GHz. Les applications de ces technologies en cours d'étude sont les réseaux de capteurs à alimentation sans fil et le chargement sans fil de dispositifs mobiles/portables.

Des technologies de transmission WPT dans une zone fermée ont été étudiées dans les bandes des 2,45 GHz et 5,8 GHz. Les applications de ces technologies en cours d'étude sont les surfaces de transmission d'énergie sans fil, la transmission d'énergie en hyperfréquence dans un tuyau et les bâtiments alimentés en énergie en hyperfréquence.

Des technologies de transmission WPT exploitant un faisceau étroit vers un seul utilisateur à courte ou longue distance ont été étudiées dans les bandes des 2,45 GHz et 5,8 GHz. Les applications de ces technologies en cours d'étude sont la transmission WPT destinée à une cible en déplacement ou en vol, la transmission WPT point à point et les satellites collecteurs d'énergie solaire.
