

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2505-0

(07/2022)

Études d'impact et dangers auxquels l'être humain est exposé concernant les systèmes de transmission d'énergie sans fil utilisant des faisceaux radiofréquences

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 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 œuvre 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 mobiles, 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, 2023

©UIT 2023

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.2505-0

**Études d'impact et dangers auxquels l'être humain est exposé concernant
les systèmes de transmission d'énergie sans fil utilisant
des faisceaux radiofréquences**

(2022)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR).....	ii
1 Introduction	2
2 Caractéristiques de la WPT par faisceau	3
3 Études d'impact sur les systèmes existants.....	4
3.1 Étude A (915-921 MHz).....	5
3.2 Étude B (915-921 MHz)	8
3.3 Étude C (917-920 MHz, 2 410-2 486 MHz et 5 738-5 766 MHz)	11
3.4 Étude D (2 483,5-2 500 MHz).....	23
3.5 Étude E (915-921 MHz)	26
3.6 Étude F (61-61,5 GHz)	29
3.7 Étude G (915-921 MHz, 2 410-2 486 MHz et 5 738-5 766 MHz).....	31
4 Dangers auxquels l'être humain est exposé	34
5 Résumé	35
Annexe 1 – Contrôle de l'environnement d'exposition aux radiofréquences afin de respecter les lignes directrices relatives à la radioprotection: le cas du Japon	37
A1.1 Environnements d'installation des systèmes de WPT par faisceau	37
A1.2 Respect des lignes directrices relatives à la radioprotection (RRPG)	38

Abréviations/Glossaire

ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
CEI	Commission électrotechnique internationale
CIPRNI	Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
DSRC	communication spécialisée à courte portée (<i>dedicated short-range communications</i>)
DUT	dispositif soumis aux essais (<i>device under test</i>)
EMF	champ électromagnétique (<i>electromagnetic field</i>)
GSM	système mondial de communications mobiles (<i>global system for mobile communications</i>)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	télécommunications mobiles internationales (<i>international mobile telecommunications</i>)
ISM	industriel, scientifique et médical (<i>industrial, scientific and medical</i>)
LAN	réseau local (<i>local area network</i>)
LPWA	réseau de faible puissance à couverture étendue (<i>low-power wide-area network</i>)
LTE	évolution à long terme (<i>long term evolution</i>)
MSS	service mobile par satellite (<i>mobile-satellite service</i>)
OMS	Organisation mondiale de la Santé
RF	radiofréquence (<i>radio frequency</i>)
RFID	identification par radiofréquence (<i>radio frequency identification</i>)
RR	Règlement des radiocommunications (<i>radio regulations</i>)
SETS	service d'exploration de la Terre par satellite
SRD	dispositifs à courte portée (<i>short-range devices</i>)
WPT	transmission d'énergie sans fil (<i>wireless power transmission</i>)

1 Introduction

La technologie de transmission d'énergie sans fil (WPT) permet de transférer de l'énergie sans connexion filaire d'une source d'alimentation à un dispositif qui utilise ou consomme de l'électricité. Les innovations importantes en la matière peuvent libérer les utilisateurs des câbles d'alimentation et leur éviter de devoir changer piles ou batteries dès lors que les dispositifs sont alimentés en énergie électrique par voie hertzienne. Les technologies WPT peuvent se ranger dans deux catégories principales: la WPT sans faisceau, qui transfère l'énergie aux dispositifs à l'aide de moyens utilisant un couplage magnétique, capacitif ou inductif dans le champ proche, et que l'on utilise habituellement pour charger les dispositifs tels que les téléphones mobiles ou les véhicules électriques. et la WPT par faisceau, qui transfère l'énergie par voie hertzienne au moyen d'ondes radio sur de grandes distances (plusieurs mètres ou plus, avec la possibilité de couvrir des zones plus importantes).

Des réglementations, des normes et des lignes directrices opérationnelles relatives à la technologie WPT par faisceau sont actuellement en cours d'élaboration aux niveaux national, régional et international pour les technologies de chargement sans fil des appareils mobiles ou portatifs et pour les capteurs de l'Internet des objets (IoT) destinés aux applications de la technologie WPT par faisceau radiofréquence. Le Rapport UIT-R SM.2392 – Applications de la transmission d'énergie sans fil par faisceau radiofréquence, décrit des applications et des technologies futures de la WPT par faisceau. Ce Rapport porte essentiellement sur les applications des technologies WPT par faisceau radiofréquence, et précise que les dispositifs correspondants peuvent être classés comme des appareils industriels, scientifiques ou médicaux (ISM), des dispositifs à courte portée (SRD) ou des équipements de radiocommunication. Si les dispositifs à WPT par faisceau de type ISM et SRD sont le sujet du Rapport UIT-R SM.2392, le Rapport UIT-R SM.1896 dresse dans ses annexes la liste des gammes de fréquences en vue de l'harmonisation des SRD aux niveaux mondial et régional, tandis que les renvois **5.138** et **5.150** du Règlement des radiocommunications (RR) prévoient une liste de gammes de fréquences pour les dispositifs ISM. Par ailleurs, certaines administrations classent la technologie WPT par faisceau comme un service de radiocommunication qui doit faire l'objet d'une réglementation pour pouvoir être mis en œuvre dans la pratique au moyen de dispositions réglementaires. Pour atténuer l'impact des dispositifs WPT sur le fonctionnement des services de radiocommunication à mesure que la demande de spectre augmente, les parties intéressées examinent des solutions qui utilisent les bandes de fréquences désignées pour les applications ISM et d'autres solutions pour le partage du spectre avec les services de radiocommunication existants. La commercialisation de ces technologies WPT nécessite de réaliser des études visant à évaluer les effets des systèmes WPT sur les systèmes et les services de radiocommunication.

L'objectif du présent Rapport est de montrer, par la réalisation d'études d'impact et en démontrant la conformité vis-à-vis des réglementations internationales et/ou nationales en matière de radiofréquences et des lignes directrices relatives à l'exposition aux radiofréquences, comment les systèmes de WPT par faisceau considérés peuvent coexister avec les systèmes de radiocommunication. Les études comportent des mesures lors d'essais en laboratoire et sur le terrain, ainsi que des études théoriques et des simulations fondées sur les systèmes proposés. Ce Rapport a également pour but de guider les administrations qui souhaitent autoriser la mise en œuvre de technologies WPT par faisceau sur les gammes de fréquences proposées, afin de limiter les effets potentiels de la WPT par faisceau sur les services de radiocommunication. Enfin, on attend de ce Rapport qu'il contribue aux débats en vue d'établir des gammes de fréquences internationales et des réglementations pour les applications de la WPT par faisceau.

Les technologies de WPT par faisceau sont également traitées comme un service de radiocommunication assorti de mesures réglementaires nationales au Japon, comme indiqué au § 3.3 de l'Étude C du présent Rapport. En fonction des gammes de fréquences et des objectifs d'exploitation, des conditions techniques pratiques sont établies pour la coexistence avec les services de radiocommunication en place. En cas de brouillage préjudiciable, celui-ci peut être corrigé dans certains cas en déplaçant ou en réorientant le dispositif de chargement et/ou le dispositif affecté, ou en changeant la fréquence de fonctionnement du dispositif de chargement ou du dispositif affecté afin d'éviter l'utilisation de canaux de fréquences qui se chevauchent.

NOTE – Les études reflètent les expériences nationales des administrations et les approches de membres du secteur.

2 Caractéristiques de la WPT par faisceau

Le présent paragraphe donne des exemples des caractéristiques du système de WPT par faisceau.

TABLEAU 1

Exemples de caractéristiques radioélectriques des systèmes de WPT par faisceau

Système	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4	Système 5	Système 6	Système 7
Fréquence	915-921 MHz	915-921 MHz	915-921 MHz	917-920 MHz	2 410-2 486 MHz	5 738-5 766 MHz	61-61,5 GHz
Puissance de sortie	4 W	15 W	Jusqu'à 50 W	1 W	15 W	32 W	50 W
Gain de l'antenne	7 dBi	8,24 dBi	10 dBi	6 dBi	24 dBi	25 dBi	45 dBi ⁽¹⁾
p.i.r.e.	43 dBm	50 dBm	54,8 dBm	36 dBm	65,8 dBm	70 dBm	92 dBm ⁽¹⁾
Largeur de bande	500 kHz	500 kHz	500 kHz	200 kHz	s.o. ⁽²⁾	s.o. ⁽²⁾	10 MHz
Signaux de balise	Autres systèmes sans fil	Autres systèmes sans fil	Autres systèmes sans fil	Autres systèmes sans fil	Autres systèmes sans fil	Système sans fil réservé à la WPT par faisceau	Autres systèmes sans fil
Antenne	Antenne directive à grand angle	Antenne directive à grand angle	Antenne directive à grand angle	Antenne directive à grand angle	À formation de faisceaux	À formation de faisceaux	À focalisation de faisceau en champ proche
Applications	Chargement sans fil de dispositifs mobiles/portatifs Alimentation et chargement sans fil de réseaux de capteurs						

NOTE – Les spécifications techniques contenues dans ce tableau décrivent certaines des caractéristiques utilisées dans les études respectives. Elles ne doivent pas être interprétées comme des limites réglementaires, car il peut exister d'autres systèmes de WPT par faisceau d'une puissance supérieure à celle indiquée. Dans la plupart des cas, les limites d'émission hors bande applicables aux dispositifs WPT par faisceau sont fixées par les autorités concernées.

⁽¹⁾ Les valeurs de gain et de puissance isotrope rayonnée équivalente de l'antenne sont indiquées pour les cas où le dispositif destinataire de l'énergie émise se trouve dans le champ lointain de l'émetteur.

⁽²⁾ La réglementation applicable à ce système désigne sa largeur de bande occupée comme nulle parce que sa modulation est en ondes entretenues (CW).

3 Études d'impact sur les systèmes existants

Les systèmes existants susceptibles de nécessiter une étude d'impact sont les suivants:

- LAN hertzien (bande des 2,4 GHz, bande des 5,6 GHz);
- DSRC (bande des 5,8 GHz);
- IMT (bande des 900 MHz);
- MCA (bande des 920 MHz);
- LPWA (bande des 920 MHz);
- RFID (bande des 920 MHz);
- radioamateur (bande des 2,4 GHz, bande des 5,7 GHz);
- radar (bande des 5,6 GHz);
- liaison hertzienne à hyperfréquences (bande des 5,9 GHz);
- système de communication mobile par satellites (bande des 2,5 GHz),
- radioastronomie (bande des 1,4 GHz, bande des 2,7 GHz, bande des 4,8 GHz);
- SETS (active) (aux mêmes fréquences 5 470-5 570 MHz, sur des fréquences adjacentes 5 250-5 470 MHz);

- autres systèmes fonctionnant dans des bandes de fréquences adjacentes et/ou sur une gamme de fréquences dans laquelle peuvent se produire des émissions harmoniques.

3.1 Étude A (915-921 MHz)

Un dispositif émetteur de chargement à distance par voie hertzienne faisant office de dispositif soumis aux essais (DUT), fonctionnant entre 915 MHz et 921 MHz, a fait l'objet d'une étude d'impact en vue de démontrer son interopérabilité avec des dispositifs et des technologies sans fil fonctionnant sur la même bande de fréquences. Le DUT fonctionnait sur un seul canal caractérisé par une largeur de bande inférieure à 400 kHz et une puissance moyenne transmise déclarée maximale de 37,4 dBm. Le DUT était conçu pour charger des appareils à une distance inférieure ou égale à 30 cm. Le DUT était de surcroît conforme au titre 47, chapitre I, sous-chapitre A, partie 15 du Code des règlements fédéraux américain (au format électronique) lequel stipule, entre autres, que les dispositifs ne provoquent pas de brouillage préjudiciable et tolèrent le brouillage résultant du fonctionnement d'une station radio autorisée, par un autre élément rayonnant intentionnel ou non, par un équipement industriel, scientifique et médical (ISM) ou par un élément rayonnant accidentel.

Les essais ont été effectués dans deux pièces séparées. Le premier essai était un essai en conditions réelles dans une pièce ordinaire, le DUT étant posé sur un plan de travail en bois en présence d'autres signaux, comme illustré à la Fig. 1. À titre d'exemple des types de signaux présents, une gare ferroviaire émettait régulièrement des signaux de 900 MHz détectables dans la pièce. La seconde salle d'essai était une chambre anéchoïque conforme à la description figurant dans l'Annexe B.1.2 de la norme ETSI EN 302 208 V3.1.1 (2016-11) et illustrée à la Fig. 2. Cette chambre anéchoïque a été utilisée pour déterminer si les résultats obtenus dans la pièce ordinaire étaient reproductibles dans un environnement en espace libre et si une éventuelle dégradation du signal était due à l'environnement bruyant. Les essais ont été effectués suivant un protocole parfaitement identique dans les deux pièces, comme détaillé plus bas. Les résultats de chacun des tests ne présentant pas de divergences, une seule série de résultats est présentée ci-dessous.

FIGURE 1

Montage d'essai dans la salle 1 (espace ouvert)

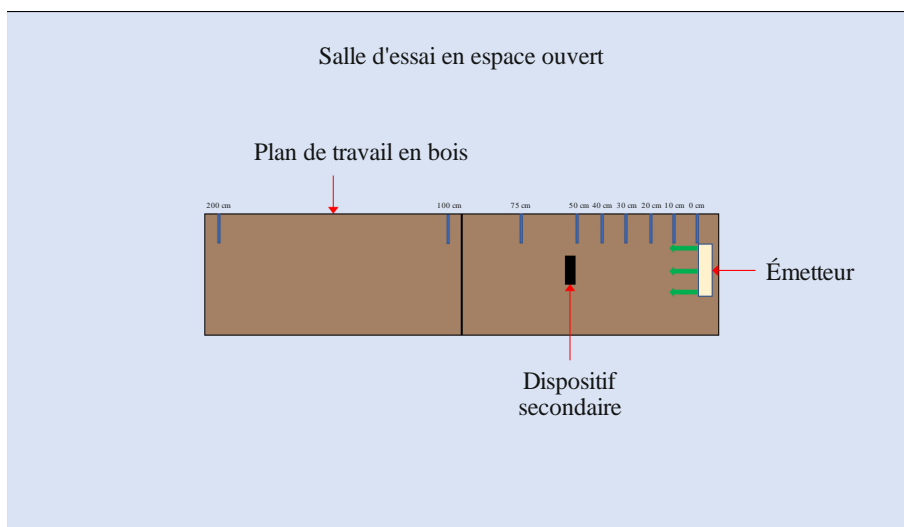
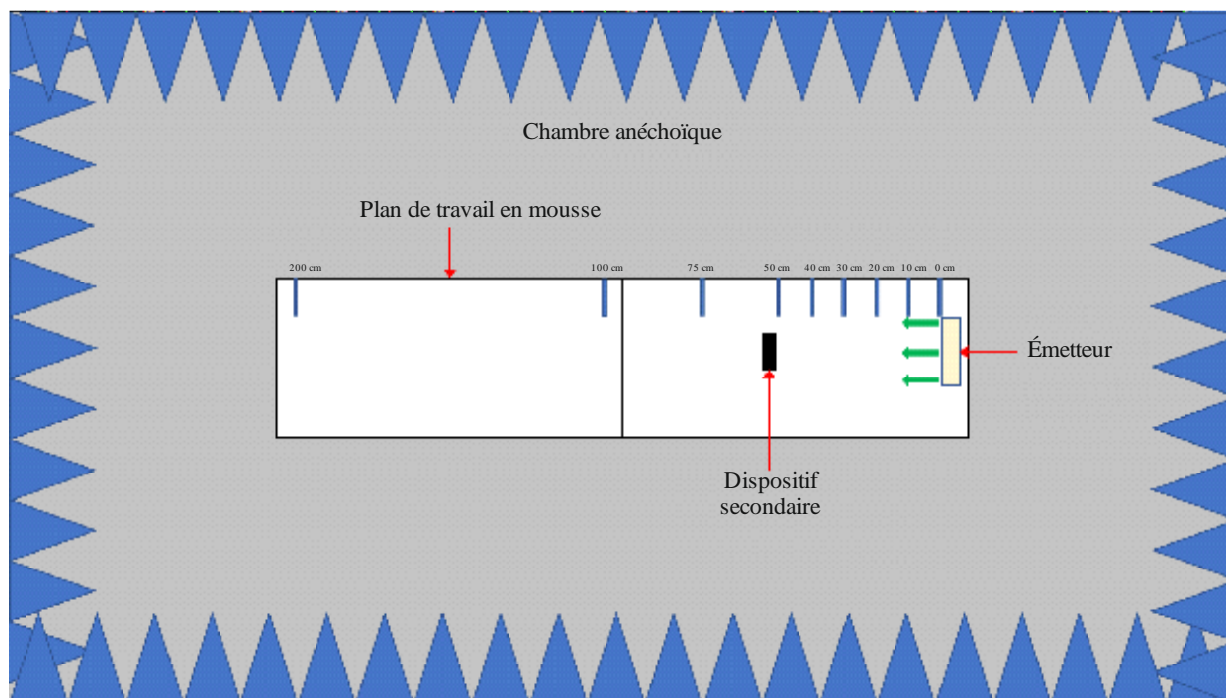


FIGURE 2

Montage d'essai dans la salle 2 (chambre anéchoïque)



Rapport SM.2505-2

Les essais ont été effectués sur les types de dispositifs sans fil ci-après:

TABLEAU 2

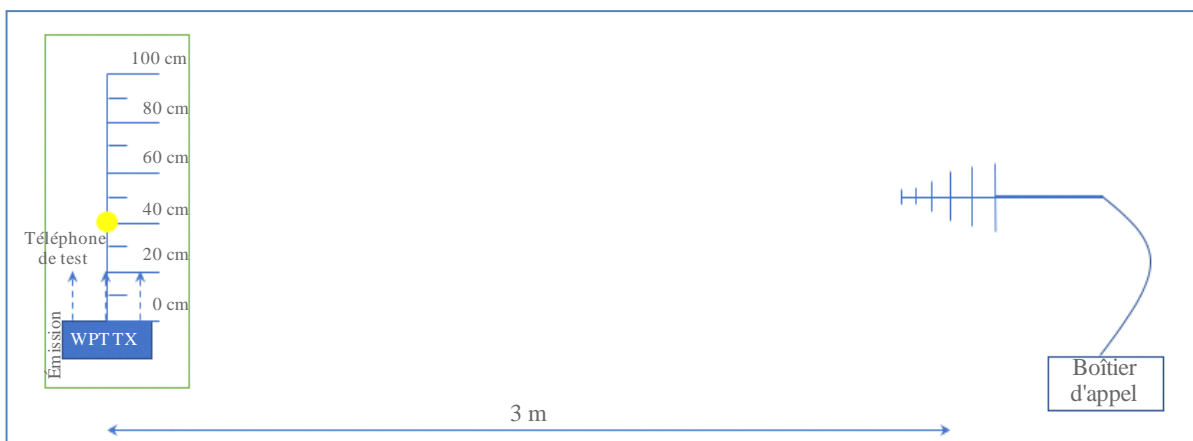
Types de dispositifs employés, fréquences et distances dans l'Étude A

N°	Type de dispositif	Gamme de fréquence (MHz)	Distance d'essai (cm)
1	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
2	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
3	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
4	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
5	Microphone sans fil et station de base	904,45-927,45 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 10, 30, 100, 200
6	Dispositif de correction auditive	863,25-864,75 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 10, 30, 100, 200
7	Dispositif de correction auditive	904,65-926,85 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 10, 30, 100, 200
8	Lecteur RFID	903-927 Saut de fréquence	0, 10, 30, 100, 200
9	Lecteur RFID	865-868 Saut de fréquence	0, 10, 30, 100, 200

Téléphone mobile: le DUT était placé à 100 cm d'un téléphone mobile, pour simuler un environnement de bureau. L'antenne cellulaire, reliée par une liaison filaire au simulateur de station de base, était placée à 3 m du DUT et du téléphone mobile. Un appel a été passé depuis le téléphone mobile vers le boîtier d'appel sur une fréquence spécifique de la bande GSM 900. Une fois la liaison téléphonique établie, le DUT a été allumé sur 917,5 MHz. Le signal de chargement a été vérifié au moyen d'un analyseur de spectre positionné dans la zone d'essai. L'appel a été surveillé pendant 60 secondes, après quoi l'état de l'appel a été enregistré (appel maintenu, ou appel terminé). La distance entre le DUT et le téléphone mobile a été réduite progressivement jusqu'à ce que le téléphone mobile touche le DUT (distance mesurée de 0 cm). Les essais ont été réalisés en utilisant cinq canaux différents.

FIGURE 3

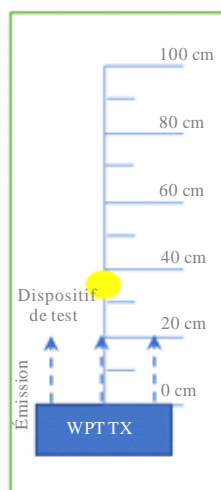
Montage d'essai pour l'étude d'impact sur téléphone mobile



Rapport SM.2505-3

FIGURE 4

Montage d'essai pour l'étude d'impact sur d'autres appareils fonctionnant sur la même bande



Rapport SM.2505-4

Les résultats ont montré que tous les téléphones pouvaient fonctionner sans brouillage préjudiciable sur au moins un canal, et sur tous les canaux lorsqu'ils étaient distants d'au moins 1 m du DUT.

Microphone sans fil et station de base: la station de base (récepteur) a été placée à 30 cm du DUT, tandis que le microphone (émetteur) a été déplacé à chaque distance d'essai. Le microphone (émetteur) a ensuite été placé à 30 cm du dispositif DUT, la station de base (récepteur) étant déplacée à chaque distance d'essai.

Lorsque la fréquence du dispositif audio était éloignée de celle du DUT, un brouillage faible ou l'absence de brouillage ont été constatés. Lorsque la fréquence de fonctionnement était proche de celle du DUT, les dispositifs ont subi un brouillage préjudiciable.

Dispositif de correction auditive: l'émetteur a été placé à 30 cm du dispositif DUT, le récepteur étant déplacé à chaque distance d'essai. Le récepteur a ensuite été placé à 30 cm du DUT, tandis que l'émetteur était déplacé à chaque distance d'essai.

Lorsque la fréquence du dispositif audio était éloignée de celle du DUT, un brouillage faible ou l'absence de brouillage ont été constatés. Lorsque la fréquence de fonctionnement était proche de celle du DUT, les dispositifs ont subi un brouillage préjudiciable.

Lecteur RFID: on a effectué avec le premier lecteur des lectures à 903,250; 904,250; 915,250; 915,750; 920,250; 926,750; et 927,250 MHz. Le paramètre d'émission du logiciel a été fixé à 30 dBm. Les étiquettes RFID ont ensuite été placées à 30 cm du DUT. On a effectué avec le second appareil des lectures à 865,00; 866,00; 867,00; 915,750; 920,250; 926,750; et 927,250 MHz avec les réglages par défaut. Les étiquettes RFID ont ensuite été placées à 30 cm du DUT.

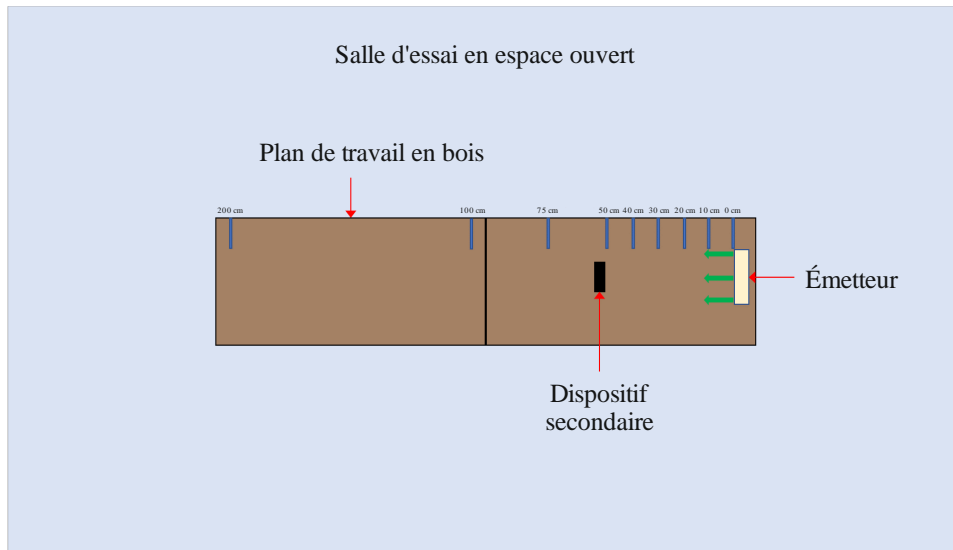
Les lecteurs RFID ont fonctionné sans erreur lorsque la distance entre le DUT et les lecteurs et étiquettes RFID était supérieure ou égale à 1 m.

3.2 Étude B (915-921 MHz)

Dans cette étude, le dispositif soumis aux essais était un chargeur par contact en champ proche RF monoclient. Les effets de ce chargeur, qui fonctionne quand un dispositif récepteur est placé sur sa surface, ont été testés pour établir son interopérabilité avec d'autres dispositifs et technologies sans fil. Le DUT utilisait le Bluetooth basse consommation pour s'appairer avec le dispositif récepteur et a transmis un signal de porteuse continu réglable entre 915 MHz et 921 MHz. La puissance moyenne déclarée maximale était de 33,0 dBm par port, avec une PER mesurée de 1,0 W et une PIRE de 1,64 W. Le DUT est conçu pour charger les appareils posés sur sa surface. Le DUT était de surcroît conforme au titre 47, chapitre I, sous-chapitre A, partie 15 du Code des règlements fédéraux américain (au format électronique) lequel stipule, entre autres, que les dispositifs ne provoquent pas de brouillage préjudiciable et tolèrent le brouillage résultant du fonctionnement d'une station radio autorisée, par un autre élément rayonnant intentionnel ou non, par un équipement industriel, scientifique et médical (ISM) ou par un élément rayonnant accidentel.

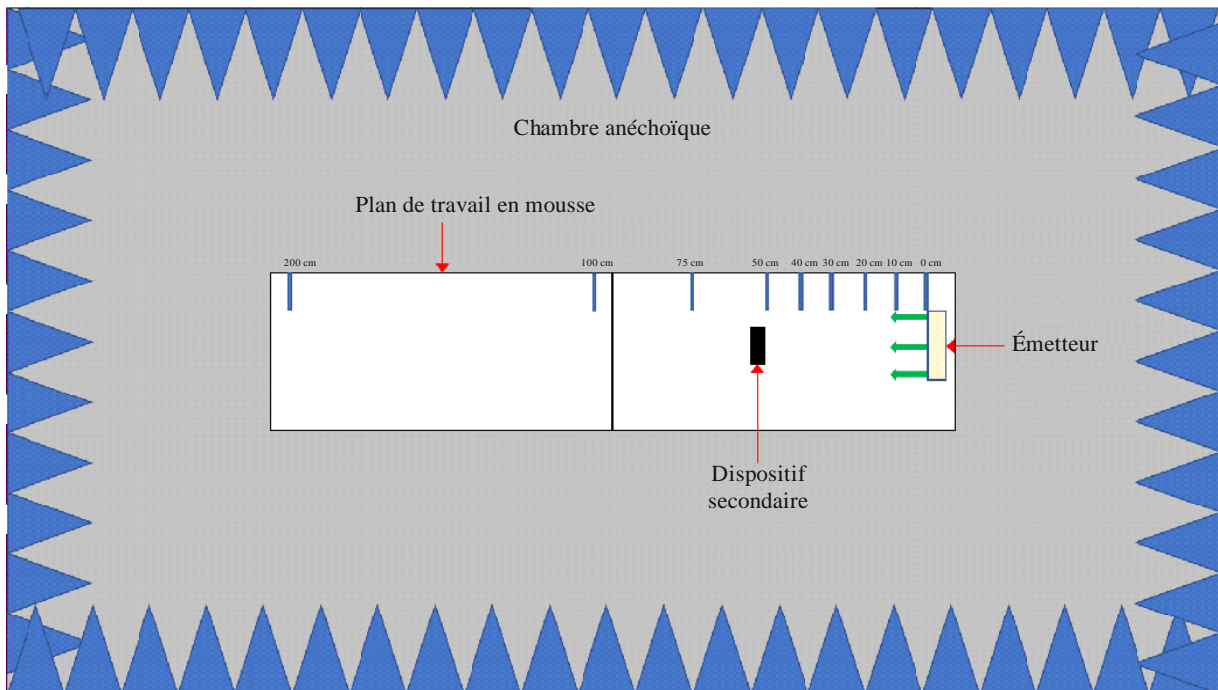
Les essais ont été effectués dans deux pièces séparées. Le premier essai était un essai en conditions réelles dans une pièce ordinaire, le DUT étant posé sur un plan de travail en bois en présence d'autres signaux, comme illustré à la Fig. 5. À titre d'exemple des types de signaux présents, une gare ferroviaire émettait régulièrement des signaux de 900 Mhz détectables dans la pièce. La seconde salle d'essai était une chambre anéchoïque conforme à la description figurant dans l'Annexe B.1.2 de la norme ETSI EN 302 208 V3.1.1 (2016-11) et illustrée à la Fig. 6. Cette chambre anéchoïque a été utilisée pour déterminer si les résultats obtenus dans la pièce ordinaire étaient reproductibles dans un environnement en espace libre et si une éventuelle dégradation du signal était due à l'environnement bruyant. Les essais ont été effectués suivant un protocole parfaitement identique dans les deux pièces, comme détaillé plus bas. Les résultats de chacun des tests ne présentant pas de divergences, une seule série de résultats est présentée ci-dessous.

FIGURE 5
Montage d'essai dans la salle 1 (espace ouvert)



Rapport SM.2505-5

FIGURE 6
Montage d'essai dans la salle 2 (chambre anéchoïque)



Rapport SM.2505-6

Les essais ont été effectués sur les types de dispositifs sans fil ci-après:

TABLEAU 3

Types de dispositifs employés, fréquences et distances dans l'Étude B

N°	Type de dispositif	Gamme de fréquence (MHz)	Distance d'essai (cm)
1	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20 30, 40, 50
2	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50
3	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50
4	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50
5	Microphone sans fil et station de base	904,45-927,45 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 30, 100, 200
6	Dispositif de correction auditive	863,25-864,75 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 30, 100, 200
7	Lecteur RFID	903-927 Saut de fréquence	0, 10, 30, 100
8	Lecteur RFID	865-868 Saut de fréquence	0, 10, 30, 100
9	Concentrateur intelligent	903-914	10, 30, 100
10	Bouton de commande	916	10, 30, 100

NOTE – Le concentrateur intelligent (Dispositif N° 9) et le bouton de commande (Dispositif N° 10) emploient la technologie de longue portée «LoRa» et ont été testés ensemble.

Téléphone mobile: le DUT a été placé à 50 cm d'un téléphone mobile. Un appel a été passé depuis le téléphone mobile vers le boîtier d'appel sur une fréquence spécifique de la bande GSM 900. L'antenne du boîtier d'appel a été placée à 50 cm du téléphone mobile. Un appel a été configuré entre le boîtier d'appel et le téléphone mobile soumis à essai, puis le DUT a été allumé et réglé sur une fréquence donnée. L'appel a été surveillé pendant 60 secondes, après quoi l'état de l'appel a été enregistré (appel maintenu ou appel terminé). Le DUT a été rapproché de 10 cm du téléphone mobile et le processus a été répété. L'essai a été poursuivi de la même manière jusqu'à ce que le DUT touche le téléphone mobile (distance mesurée de 0 cm).

Aucun brouillage préjudiciable n'a été constaté, dans aucune des configurations d'essai.

Microphone sans fil et station de base: quatre séries d'essais ont été menées. Au cours des deux premières, la station de base (récepteur) a été placée à 30 cm du chargeur, tandis que le microphone (émetteur) a été déplacé à chaque distance d'essai. Le DUT a fonctionné sur 918 MHz pendant la première série d'essais, puis à 917,5 MHz pendant la deuxième. Au cours de la troisième et de la quatrième série d'essais, le microphone (émetteur) a été placé à 30 cm du chargeur, la station de base (récepteur) étant déplacée à chaque distance d'essai. Comme précédemment, le DUT a été réglé sur 918 MHz, puis sur 917,5 MHz.

Le microphone n'a subi aucun brouillage préjudiciable notable, sauf dans la configuration où il fonctionnait sur 917,65 MHz et le DUT sur 918 MHz; dans ce cas de figure, un brouillage préjudiciable a été constaté lorsque le microphone était à 30 cm ou moins du DUT.

Dispositif de correction auditive: quatre séries d'essais ont été menées. Au cours des deux premières séries d'essais, l'émetteur a été placé à 30 cm du chargeur, puis le récepteur a été déplacé à chaque distance d'essai. Le DUT a fonctionné sur 918 MHz pendant la première série d'essais, puis à 917,5 MHz pendant la deuxième. Au cours de la troisième et de la quatrième série d'essais, le récepteur a été placé à 30 cm du chargeur, puis l'émetteur a été déplacé à chaque distance d'essai. Comme précédemment, le DUT a été réglé sur 918 MHz, puis sur 917,5 MHz.

Les essais ont montré que le dispositif de correction auditive n'était pas affecté par le DUT, en raison de la différence de fréquences entre les deux dispositifs.

Lecteur RFID: on a effectué avec le premier lecteur des lectures à 903,250; 904,250; 915,250; 915,750; 920,250; 926,750; et 927,250 MHz. Le paramètre d'émission a été réglé sur 30 dBm dans le logiciel, et le paramètre de réception sur 0 dBm. L'étiquette RFID a été placée à 30 cm du DUT et utilisée à la fréquence de 918 MHz, puis 917,5 MHz. Le second lecteur a été réglé pour lire aux fréquences de 865,00; 866,00; 867,00; et 868,00 MHz. Les essais ont été effectués avec les réglages par défaut. L'étiquette RFID a été placée à 30 cm du DUT et utilisée à la fréquence de 918 MHz.

Les résultats ont montré que les dispositifs RFID ont fonctionné sans dégradation significative au-delà de 30 cm.

Concentrateur intelligent avec bouton de commande: le concentrateur intelligent et le bouton de commande ont été utilisés avec les réglages par défaut, le concentrateur étant placé à 30 cm du DUT. Les résultats ont montré que le concentrateur intelligent et le bouton de commande ont fonctionné sans dégradation, dans toutes les configurations évaluées.

3.3 Étude C (917-920 MHz, 2 410-2 486 MHz et 5 738-5 766 MHz)

L'Étude C présente un résumé de l'étude réalisée par le Japon à l'occasion de l'élaboration de nouvelles règles applicables à la technologie WPT par faisceau sur les bandes de 917-920 MHz, de 2 410-2 486 MHz et de 5 738-5 766 MHz. Le Ministère japonais des Affaires intérieures et des Communications (MIC) a modifié les ordonnances ministérielles pertinentes en mai 2022 afin de délivrer des licences de «stations de radiocommunication locales» à certains types de dispositifs WPT par faisceau. Il faut entendre, par station de radiocommunication locale, un type de station existant qui n'est pas défini dans le RR mais qui figure dans les dispositions réglementaires nationales. Une nouvelle organisation, le JWPT (*Japan Coordinating Council for Wireless Power Transfer*), a été créée en janvier 2022 pour assurer la coordination opérationnelle en vue de prévenir les brouillages préjudiciables entre la WPT par faisceau et d'autres services de radiocommunication. Le MIC examine les demandes de licences de stations de radiocommunication locales de type WPT en se référant aux résultats de la coordination opérationnelle.

3.3.1 Bandes de fréquences et systèmes et services de radiocommunication existants pris en compte dans l'étude

Les systèmes et les services de radiocommunication existants opérant dans les bandes de 917-920 MHz, 2 410-2 486 MHz et 5 738-5 766 MHz concernées par l'étude, ou à proximité, sont recensés respectivement dans le Tableau 4, le Tableau 5 et le Tableau 6.

TABLEAU 4

**Systèmes et services de radiocommunication sur la bande 917-920 MHz
pris en compte dans l'étude**

Système	Fréquence (MHz)	Critère de protection	Références
Service MCA numérique	930-940 (liaison montante)	-108,8 dBm/MHz (dans la bande) -51 dBm (hors bande)	ARIB ⁽¹⁾ STD-T85 (Japon)
	940-945 (liaison descendante)		
Service MCA évolué	895-900 (liaison montante)	-110,8 dBm/MHz (dans la bande) -44 dBm (hors bande, séparation de 12,5 MHz)	3GPP TS36 104 v 8.3.0 (2008-9)
	850-860 (liaison descendante)	-119 dBm/MHz (dans la bande) -43 dBm (hors bande, modulation) -15 dBm (hors bande, onde entretenu)	3GPP TS36 104 v 8.3.0 (2008-9)
LTE-A (Bande 8)	900-915 (liaison montante)	-110,8 dBm/MHz (dans la bande) -44 dBm (hors bande, séparation de 12,5 MHz)	3GPP TS36 104 v 8.3.0 (2008-9)
	945-960 (liaison descendante)	-119 dBm/MHz (dans la bande) -43 dBm (hors bande, modulation) -15 dBm (hors bande, onde entretenu)	3GPP TS36 104 v 8.3.0 (2008-9)
RFID (passive)	916,7-923,5	-81 dBm/MHz (dans la bande) -30 dBm (hors bande, séparation de 2 MHz)	ARIB STD-T106 ARIB STD-T107 (Japon)
RFID (active)	915,9-929,7	-127 dBm/MHz (dans la bande) -80 dBm (hors bande)	ARIB STD-T108 (Japon)
Radioastronomie	1 400-1 427	-197,4 dBm/MHz	Rec. UIT-R RA.769-2

⁽¹⁾ Association of Radio Industries and Businesses (<https://www.arib.or.jp/english/>)

TABLEAU 5

**Systèmes et services de radiocommunication sur la bande 2 410-2 486 MHz
pris en compte dans l'étude**

Système	Fréquence (MHz)	Critère de protection	Références
LAN hertzien	2 400-2 497	-92 dBm (même canal) -66 dBm (canal adjacent) -50 dBm (autre canal adjacent)	IEEE 802.11-2016
Station de radiocommunication locale	2 400-2 483,5	-98 dBm (y compris un gain d'antenne de 11 dBi)	ARIB RCR STD-1 ARIB RCR STD-29 (Japon)
Système de transmission d'images mobile non habité (système hertzien pour drones et autres véhicules non habités)	2 483,5-2 494	-98 dBm (même canal) -72 dBm (canal adjacent) -56 dBm (autre canal adjacent) (y compris un gain d'antenne de 6 dBi)	Rapport consultatif MIC N° 2034 (Japon)
Service mobile par satellite géostationnaire	2 500-2 535	-124,9 dBm/MHz (dans la bande) -41 dBm (hors bande, séparation de 10 à 25 MHz)	Rapport consultatif MIC N° 2032 (Japon)
Service mobile par satellite non géostationnaire	2 483,55-2 500	-119,4 dBm/MHz	Rapport consultatif MIC N° 82 (Japon)
Service de radiodiffusion: réception dans le champ (FPU)	2 330-2 370	-102 dBm/MHz (liaison montante de relais mobile)	Rapport consultatif MIC N° 2024 (Japon)
Radioastronomie	2 695	-187 dBm/MHz	Rec. UIT-R RA.769-2
Radioamateur	2 400-2 450	-110,83 dBm/MHz	Exigence de la JARL ⁽¹⁾

⁽¹⁾ The Japan Amateur Radio League, Inc. (<https://www.jarl.org/English/0-2.htm>)

TABLEAU 6

**Systèmes et services de radiocommunication sur la bande 5 738-5 766 MHz
pris en compte dans l'étude**

Système	Fréquence (MHz)	Critère de protection	Références
LAN hertzien (W56)	5 470-5 730	-63 dBm (canal adjacent), -47 dBm (autre canal adjacent)	IEEE 802.11-2016
Communication spécialisée à courte portée (DSRC)	5 770-5 850	-42 dBm (classe 2, suscite un rejet de la réponse), -100 dBm (classe 2)	ARIB STD-T75 (Japon)
Service de radiodiffusion: liaison studio-émetteur (STL) et liaison émetteur-émetteur (TTL)	5 850-5 925	-101,6 dBm (niveau de bruit thermique équivalent)	ARIB STD-B22 (Japon)

TABLEAU 6 (*fin*)

Systeme	Fréquence (MHz)	Critère de protection	Références
Service de radiodiffusion: systèmes de réception dans le champ (FPU) et de liaison émetteur-studio (TSL)	5 850-5 925	-89,4 dBm (station relais fixe FPU)	ARIB STD-B33 (Japon)
Système de transmission d'images mobile non habité (système hertzien pour drones et autres véhicules non habités)	5 650-5 755	-98 dBm(dans la bande), -72 dBm (canal adjacent), -56 dBm (autre canal adjacent)	Rapport consultatif MIC n° 2034 (Japon)
Radar météorologique	5 250-5 372,5	-120 dBm (bruit), -40 dBm (onde entretenue)	Rec. UIT-R M.1849-2
Radioastronomie	4 700-5 140, 3 000-14 000	-187 dBm/MHz	Rec. UIT-R RA.769-2
Radioamateur	5 650-5 850	-110,83 dBm/MHz	Exigence de la JARL

3.3.2 Spécifications et paramètres utilisés lors de l'étude

Les spécifications attendues et les paramètres système utilisés lors de l'étude sont présentés dans le Tableau 7 et aux Figs 7 à 9.

TABLEAU 7

Spécifications attendues des systèmes de WPT par faisceau du commerce considérés

	Systeme 4 bande des 920 MHz	Systeme 5 bande des 2,4 GHz	Systeme 6 bande des 5,7 GHz
Puissance de sortie de l'antenne d'émission	1 W (30 dBm)	15 W (41,8 dBm)	32 W (45,0 dBm)
Canaux de fréquence	918,0, 919,2 MHz (2 canaux)	2 412, 2 437, 2 462, 2 484 MHz (4 canaux)	5 740, 5 742, 5 744, 5 746, 5 748, 5 750, 5 752, 5 758, 5 764 MHz (9 canaux)
p.i.r.e.	36 dBm max.	65,8 dBm max.	70,0 dBm max.
Tolérance de la largeur de bande occupée	200 kHz	Non précisée	Non précisée
Gain de directivité de l'antenne d'émission	6,0 dBi	24,0 dBi	25,0 dBi
Emplacement et hauteur de l'antenne d'émission	En intérieur	En intérieur, fixée au plafond et orientée vers le bas	En intérieur, fixée au plafond et orientée vers le bas
	2,5 m au-dessus du sol	5,0 m au-dessus du sol	4,6 m au-dessus du sol
Diagramme de directivité de l'antenne d'émission	Fig. 7	Fig. 8	Fig. 9

TABLEAU 7 (fin)

	Système 4 bande des 920 MHz	Système 5 bande des 2,4 GHz	Système 6 bande des 5,7 GHz
Environnement d'utilisation	Intérieur	Intérieur	Intérieur
	Environnement WPT contrôlé et/ou environnement WPT général	Environnement WPT contrôlé	Environnement WPT contrôlé
Modulation	Non précisée	Onde entretenue	Onde entretenue
Affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments	10,0 dB	14,0 dB	16,0 dB

L'«environnement WPT contrôlé» et l'«environnement WPT général» sont des environnements définis. On appelle «environnement WPT contrôlé»:

- les zones en intérieur et les zones fermées;
- les environnements dans lesquels il est possible de respecter les recommandations japonaises en matière d'exposition aux ondes radioélectriques dans la zone contrôlable, et/ou dans lesquels la personne responsable peut couper le transfert d'énergie des systèmes de WPT par faisceau en cas de dépassement des recommandations japonaises en matière d'exposition aux ondes radioélectriques dans la zone contrôlable;
- les environnements dans lesquels la personne responsable est en mesure de gérer et de contrôler les systèmes de WPT par faisceau et les services de radiocommunication existants afin de réduire ou d'éviter les brouillages préjudiciables dus aux systèmes de WPT par faisceau.

On appelle «environnement WPT général» tous les autres environnements dans lesquels il n'est pas possible de respecter les conditions ci-dessus.

FIGURE 7

Diagramme de directivité de l'antenne d'émission pour la bande des 920 MHz

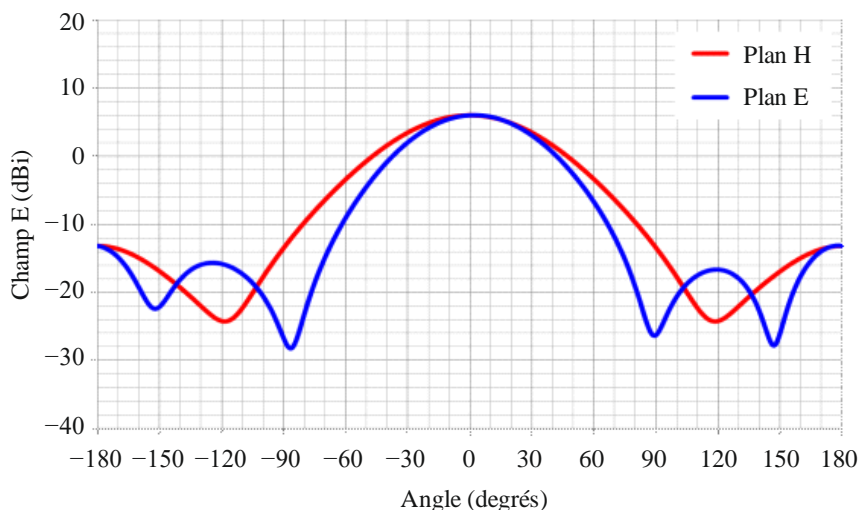
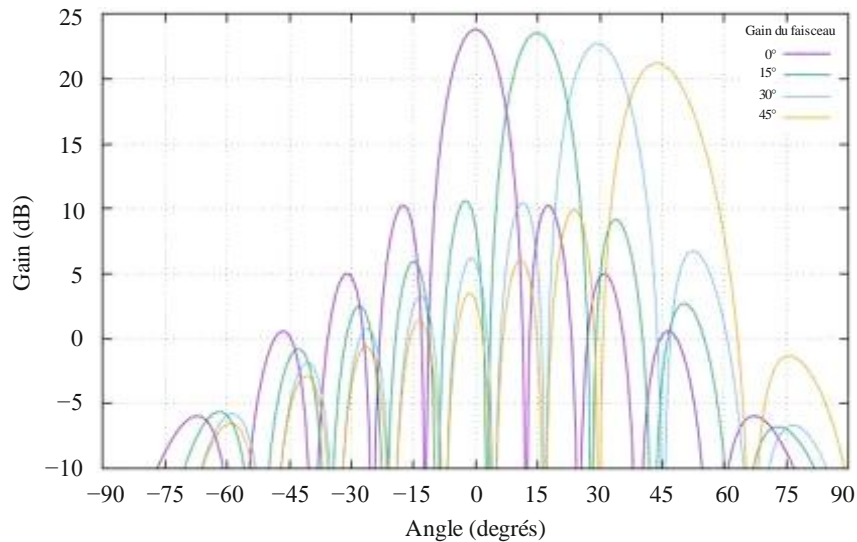


FIGURE 8

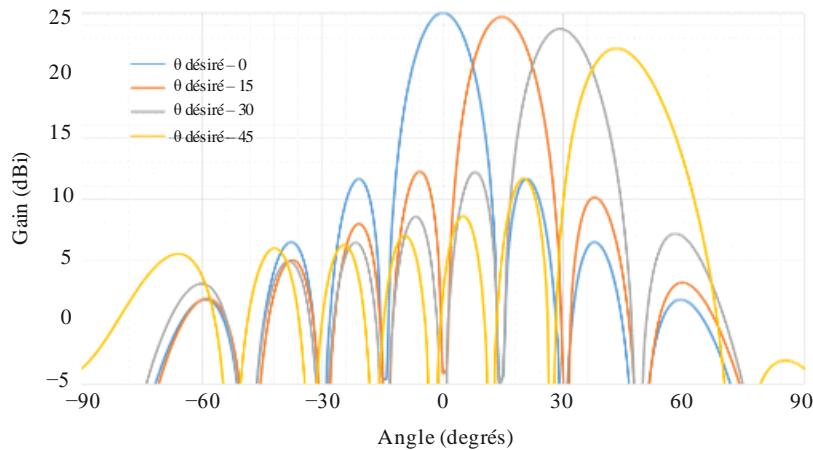
Diagramme de directivité de l'antenne d'émission pour la bande des 2,4 GHz



Rapport SM.2505-8

FIGURE 9

Diagramme de directivité de l'antenne d'émission pour la bande des 5,7 GHz



Rapport SM.2505-9

3.3.3 Prise en compte de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments

L'étude se fonde sur la définition de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments figurant au § 3 de la Recommandation UIT-R P.2109-1.

La valeur de cet affaiblissement dépend du matériau dont sont constitués les murs extérieurs. La Recommandation UIT-R P.2109-1 considère deux catégories de bâtiments: les bâtiments «à bon rendement thermique», qui emploient des matériaux de protection et d'isolation thermiques présentant des caractéristiques élevées de réflexion des ondes électromagnétiques; et les bâtiments «traditionnels» qui n'emploient pas ces matériaux. L'affaiblissement médian L_h peut être calculé à l'aide de la formule ci-dessous. Cet affaiblissement dépend également de la fréquence.

$$L_h = r + s \log(f) + t (\log(f))^2$$

où r , s et t sont les constantes données au Tableau 8, et f est la fréquence en GHz. Le Tableau 9 présente les résultats du calcul de l'affaiblissement médian pour les fréquences représentatives des trois bandes de fréquences utilisées dans les systèmes WPT transmettant l'énergie via un faisceau radiofréquence.

D'après la Fig. 1 de la Recommandation UIT-R P.2109-1, les bâtiments «à bon rendement thermique» donnent lieu à un affaiblissement important, de l'ordre de 15 dB par rapport aux bâtiments «traditionnels», mais il est peu probable que tous les murs extérieurs de ces bâtiments soient constitués de matériaux de construction à bon rendement thermique. L'étude a pris l'hypothèse de bâtiments «traditionnels».

TABLEAU 8

Coefficients des modèles utilisés pour le calcul de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments dans la Recommandation UIT-R P.2109-1

Élément	r	s	t
Traditionnel	12,64	3,72	0,96
À bon rendement thermique	28,19	-3,00	8,48

TABLEAU 9

Résultats du calcul de l'affaiblissement médian pour les trois bandes de fréquences employées en WPT par faisceau

Élément	920 MHz	2 450 MHz	5 750 MHz
L_h (Traditionnel)	12,5 dB	14,2 dB	16,0 dB
L_h (À bon rendement thermique)	28,3 dB	28,3 dB	30,8 dB

TABLEAU 10

Affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments utilisé pour les études d'impact de la WPT par faisceau

Élément	920 MHz	2,4 GHz	5,7 GHz
Affaiblissement dû aux murs	10,0 dB	14,0 dB	16,0 dB

3.3.4 Scénarios d'utilisation et conditions des études d'impact de la WPT par faisceau

Le Tableau 11 présente les scénarios d'utilisation et les conditions considérées dans les études d'impact de la WPT par faisceau.

Le Système 4 est utilisé principalement pour la WPT destinée aux réseaux de capteurs alimentés sans fil en électricité. Le Système 4 est employé en intérieur et dans un environnement contrôlé, dans lequel les équipements WPT sont commandés par les responsables de l'usine, de l'établissement de santé ou autre. La consommation électrique d'un capteur ne dépasse pas quelques centaines de μW .

Le Système 5 et le Système 6 sont principalement rencontrés en WPT destinée aux afficheurs de petite taille, en complément du Système 4. Le Système 5 et le Système 6 sont employés en intérieur et dans un environnement contrôlé, dans lequel les équipements WPT sont pilotés par les responsables de l'usine, de l'atelier, de l'entrepôt, ou autre. La puissance transmise aux dispositifs récepteurs peut atteindre plusieurs watts.

TABLEAU 11

Scénarios d'utilisation et conditions pour les systèmes de WPT par faisceau

Système de WPT par faisceau	Système 4 bande des 920 MHz	Système 5 bande des 2,4 GHz	Système 6 bande des 5,7 GHz
Environnement d'utilisation	Usine (intérieur), établissement de santé, etc.	Usine (intérieur), atelier (intérieur), entrepôt, etc.	Usine (intérieur), atelier (intérieur), entrepôt, etc.
Application	Chargement et alimentation électrique de réseaux de capteurs	Chargement et alimentation électrique de capteurs, d'afficheurs et de dispositifs d'information	Chargement et alimentation électrique de capteurs, d'afficheurs et de dispositifs d'information
Nombre de récepteurs par émetteur WPT	5 à 10 (réception simultanée)	1 à plusieurs dizaines (réception successive ou séquentielle)	1 à plusieurs dizaines (réception successive ou séquentielle)
Gamme de puissance	De quelques μW à plusieurs centaines de μW	De 50 mW à 2 W	De quelques mW à plusieurs centaines de mW
Distance de transfert de l'énergie	Inférieure à 5 m	Inférieure à 10 m	Inférieure à 10 m
Coexistence avec d'autres systèmes hertziens	Possible. Prendre les dispositions appropriées de réduction des brouillages et de protection contre les ondes radioélectriques.	Possible. Prendre les dispositions appropriées de réduction des brouillages et de protection contre les ondes radioélectriques.	Possible. Prendre les dispositions appropriées de réduction des brouillages et de protection contre les ondes radioélectriques.
Transfert d'énergie en présence de corps humains	Possible, à condition de respecter les limites indiquées dans les directives nationales relatives à l'exposition aux ondes radioélectriques	Arrêt du système	Arrêt du système

3.3.5 Résultats de l'étude

S'agissant des systèmes WPT prévus pour fonctionner sur la bande des 920 MHz, les paramètres du système pris en compte pour l'étude d'impact (voir le Tableau 7) étaient conformes au Règlement des radiocommunications, y compris en matière d'intervalles de transmission pour les systèmes RFID actuellement exploités dans la même gamme de fréquences. Les distances de séparation minimales ont été calculées en fonction des caractéristiques de la WPT par faisceau pour le cas où la distance de séparation géographique doit être réglementée. En outre, une simulation de Monte-Carlo au niveau du système a été réalisée pour évaluer la probabilité de brouillage des réseaux de communication mobile LTE et MCA par les systèmes de WPT par faisceau.

Pour les systèmes de WPT par faisceau destinés à fonctionner sur la bande des 2,4 GHz et la bande des 5,7 GHz, l'étude a été menée avec les paramètres du système (voir le Tableau 7) afin de déterminer les exigences techniques et les conditions d'exploitation requises en vertu du Règlement des radiocommunications actuellement en vigueur, qui régit notamment l'attribution des fréquences et les conditions d'exploitation. Un résumé des résultats de l'étude concernant la bande des 2,4 GHz et la bande des 5,7 GHz est présenté ci-après:

- 1) Il est impératif d'adopter un mécanisme de détermination des voies libres (CCA) pour assurer la coexistence avec les systèmes WLAN et/ou certaines stations de radiocommunication à faible puissance. Il s'est avéré que la qualité de fonctionnement des systèmes WLAN, notamment leur débit, peut être maintenue sans brouillage préjudiciable grâce à l'intégration du mécanisme CCA.
- 2) S'agissant de la radioastronomie, des radars météorologiques et des services de radiobalise, des distances de séparation minimales ont été définies.
- 3) En ce qui concerne les systèmes de radiodiffusion, les systèmes de communication mobile par satellite et les systèmes de communication spécialisée à courte portée (DSRC), des distances de séparation minimales ont été définies. En outre, la coordination opérationnelle a été abordée pour le cas où la WPT par faisceau causerait un brouillage préjudiciable.
- 4) S'agissant des systèmes de transmission d'images mobiles non habités (systèmes de communication sans fil destinés aux drones et autres véhicules non habités), des études portant sur des cas d'utilisation pratiques ont montré qu'il était possible de partager le spectre sans causer d'effets préjudiciables, à condition d'assurer la coordination opérationnelle éventuellement nécessaire entre les systèmes WPT et les systèmes de transmission d'images mobiles non habités.
- 5) Pour ce qui est des services de radioamateur, les conditions d'installation d'un système de WPT par faisceau assurant le partage du spectre ont été définies. En outre, les systèmes de WPT par faisceau ne doivent pas utiliser la bande des fréquences réservée aux systèmes Terre-Lune-Terre (EME) et aux systèmes de répéteurs. Une coordination opérationnelle est mise en œuvre entre les systèmes WPT et les systèmes de radioamateur.

Il a en outre été défini une règle globale de gestion des systèmes de WPT par faisceau portant sur l'environnement d'exploitation WPT et les CEM des fréquences radioélectriques des systèmes WPT, cette règle pouvant être appliquée à des cas d'utilisation spécifiques utilisant les bandes de fréquences afin de respecter les lignes directrices relatives à la radioprotection. Voir l'Annexe 1 pour de plus amples informations. Les exigences techniques et les conditions d'exploitation requises pour ne pas causer d'impact préjudiciable aux systèmes et services existants ont donc été déterminées.

On trouvera ci-dessous le résumé de l'étude pour chaque type de système préexistant.

3.3.5.1 Bande des 917-920 MHz

1) Service MCA numérique

L'étude s'est appuyée sur les méthodes d'examen et les résultats de l'étude antérieure sur la coexistence menée lors de l'introduction du système RFID dans la bande des 917-920 MHz. On a supposé que les conditions techniques d'évaluation de la WPT par faisceau dans cette bande étaient pratiquement les mêmes que celles du système RFID. Le risque d'effets préjudiciables est extrêmement faible si l'on conserve les conditions données et que l'on prend en compte la perte de propagation supplémentaire causée par l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments. Les conditions d'évaluation comprennent la distance de séparation, l'ajustement des conditions de réglage et les mesures d'atténuation du brouillage.

2) Service MCA évolué

La WPT peut être partagée par la station de commande (station de base: liaison descendante) en tenant compte de la directivité verticale.

La station mobile (liaison montante) peut être partagée lorsque les deux systèmes ne sont pas dans la même pièce, comme l'a montré une simulation de Monte-Carlo utilisant la formule de Hama étendue (300 m ou moins).

Lorsque les systèmes sont dans la même pièce, le degré d'amélioration requis est d'environ 10 dB, mais il peut être moindre car on s'attend à un affaiblissement dû aux obstacles et aux corps humains dans la pièce.

Toutefois, en cas d'utilisation du système WPT dans la même pièce, les utilisateurs du système WPT seront avertis du risque de brouillage causé aux stations MCA.

3) LTE-A (Bande 8)

Il est possible de partager le système WPT dans un environnement de type général, même en l'absence de limite de temps de transmission. D'autre part, le système WPT peut être partagé dans un environnement contrôlé, à condition de limiter le temps de transmission (arrêt de la transmission pendant 50 ms dans un délai de 4 secondes de la transmission).

4) RFID (passive)

Le système WPT et le système RFID peuvent partager un même canal s'ils sont distants d'environ 6 m. Lorsqu'il n'est pas possible d'assurer une telle distance de séparation, les systèmes pourront coexister à condition de changer le canal de transmission WPT et/ou le canal RFID, ou de les séparer par un mur.

5) RFID (active)

On estime que la RFID passive peut coexister avec la RFID active. Le système WPT peut donc coexister avec un système RFID actif, puisque les caractéristiques techniques de la WPT sont quasi identiques à celles d'un interrogateur RFID passif.

6) Radioastronomie

La distance de séparation minimum, à altitude égale, a été calculée en employant le modèle d'affaiblissement en espace libre. Elle est de 37,5 km avec un niveau de rayonnements non essentiels mesuré de $-60,5$ dBm/MHz. Un système WPT sera placé en dehors d'une zone réglementée, à la distance minimale de séparation d'une station de radioastronomie. Lorsqu'un système WPT ou une station de radioastronomie sont situés à une altitude différente, la distance minimale de séparation sera différente de celle calculée ci-dessus.

3.3.5.2 Bande des 2 410-2 486 MHz

On trouvera dans le Tableau 1 un exemple des caractéristiques radioélectriques d'un système de WPT par faisceau (non ISM).

1) LAN hertzien

Une simulation utilisant le mécanisme de détermination des voies libres (CCA) sur le système de WPT par faisceau a été menée pour étudier l'impact sur les dispositifs WiFi situés à l'extérieur de l'environnement WPT contrôlé. Il a été possible d'éviter une dégradation du débit de ces dispositifs WiFi par un paramétrage adéquat du mécanisme CCA, par rapport à la situation dans laquelle un autre point d'accès WiFi était utilisé au même endroit au lieu du système de WPT par faisceau à l'intérieur de l'environnement WPT contrôlé. Les antennes doivent être orientées de manière à ne pas se faire face directement, afin d'éviter l'endommagement des dispositifs.

2) Station de radiocommunication locale

Dans l'environnement contrôlé de la WPT par faisceau, le fonctionnement de la station de radiocommunication locale peut être géré et contrôlé par le même opérateur que pour la WPT par faisceau. En outre, dans un rayon de 84,9 m autour de l'emplacement du système de WPT par faisceau, il est possible de couper la transmission à l'aide du mécanisme CCA lorsque la radio locale est en train d'émettre. Les antennes doivent être orientées de manière à ne pas se faire face directement, afin d'éviter l'endommagement des dispositifs.

3) **Système de transmission d'images mobile non habité**

La distance de séparation a été calculée au moyen du modèle Hata étendu; elle était de 3,6 km entre le système de WPT par faisceau et le système de transmission d'images mobile non habité situé à l'extérieur et émettant sur le même canal. Toutefois, comme le système est généralement utilisé en dehors des villes et que les horaires et les lieux d'utilisation sont planifiés, la procédure de coordination permet d'éviter les brouillages préjudiciables.

4) **Service mobile par satellite géostationnaire**

La distance de séparation a été calculée en tenant compte du scénario le plus défavorable de brouillage hors bande, dans lequel la direction de la directivité de l'antenne du récepteur GEO MSS est exactement la même que celle du système de WPT par faisceau. Elle est de 30 m dans la partie nord du Japon. La distance de séparation et l'activation, si nécessaire, de la procédure de coordination permettent d'éviter les brouillages préjudiciables. Si besoin, la coordination opérationnelle est effectuée entre les systèmes WPT et les systèmes mobiles de communication par satellite.

5) **Service mobile par satellite non géostationnaire**

La distance de séparation calculée pour un brouillage dans la bande avec le modèle Hata étendu était de 0,96 km. Étant donné que le service mobile non géostationnaire par satellite est généralement utilisé là où le système mobile cellulaire n'est pas accessible au Japon et où la WPT par faisceau ne peut pas exister, les brouillages préjudiciables peuvent être évités. Si besoin, la coordination opérationnelle est effectuée entre les systèmes WPT et les systèmes mobiles de communication par satellite.

6) **Service de radiodiffusion: réception dans le champ (reportage électronique d'actualités mobile)**

La distance de séparation a été calculée dans divers scénarios et pour différents systèmes. Compte tenu de sa directivité, l'antenne ne provoque pas de brouillage préjudiciable lorsque la distance de séparation de 10 m est respectée en dehors de l'environnement WPT contrôlé. Les systèmes de WPT par faisceau doivent respecter les conditions de distance de séparation et d'installation nécessaires.

7) **Radioastronomie**

La distance de séparation a été calculée pour chaque station de radioastronomie opérant à 2 695 MHz en tenant compte de l'affaiblissement dû aux obstacles. Les distances de séparation minimum à altitude égale sont de 5,7 km ou de 1,6 km selon l'environnement du site. Pour éviter le brouillage préjudiciable causé à une station de radioastronomie, une zone d'interdiction délimitée par ces distances de séparation sera établie autour de la station de radioastronomie. L'antenne du système de WPT par faisceau est installée au plafond et rayonne principalement vers le bas. La limite de rayonnement horizontal est définie en termes de p.i.r.e. De ce fait, le rayonnement horizontal de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur constituera le scénario le plus défavorable lorsqu'une station WPT et une station de radioastronomie sont situées à la même altitude.

Lorsque l'altitude de la station de radioastronomie est supérieure à celle de la station WPT, le gain de directivité devient plus faible et la distance de séparation nécessaire diminue. En revanche, lorsque l'altitude de la station de radioastronomie est inférieure à celle de la station WPT, le gain de directivité augmente et la distance de séparation nécessaire s'accroît.

8) Étude d'impact pour la radioamateur

La distance de séparation a été calculée en tenant compte de l'affaiblissement dû aux obstacles. Deux des quatre fréquences du système de WPT par faisceau sont dans le même canal que le système de radioamateur, ce qui nécessite une distance de séparation de 4,4 km avec une antenne de radioamateur de 18 dBi. Il est possible d'éviter un brouillage préjudiciables en tenant compte de la perte de directivité de l'antenne et en utilisant si besoin une bande adjacente. Si la situation le nécessite, une coordination opérationnelle est mise en œuvre entre les systèmes WPT et les systèmes radioamateurs.

3.3.5.3 Bande des 5 738-5 766 MHz

1) LAN hertzien

Une simulation a été réalisée pour étudier l'impact du système de WPT par faisceau sur un système WiFi fonctionnant en dehors de l'environnement WPT contrôlé. En appliquant, au système de WPT par faisceau, le mécanisme CCA correctement paramétré, les effets observés sur le débit WiFi étaient équivalents à ceux constatés en présence d'un autre point d'accès WiFi au lieu du système de WPT par faisceau. Dans un environnement WPT contrôlé dans lequel un même opérateur commande les deux systèmes, la détection de porteuses fonctionne bien. Les antennes doivent être orientées de manière à ne pas se faire face directement, afin d'éviter l'endommagement des dispositifs.

2) Communication spécialisée à courte portée (DSRC)

L'étude de la distance de séparation a porté sur le scénario le plus défavorable, dans lequel la directivité de l'antenne du système DSRC correspond exactement à la direction du faisceau du système de WPT. La distance de séparation, calculée en s'appuyant sur le modèle d'affaiblissement en espace libre, était de 2,6 km entre le système de WPT par faisceau et la station de base de DSRC de classe 2. Il est probable que l'affaiblissement supplémentaire dû à la pénétration dans les bâtiments et l'affaiblissement dû à la directivité de l'antenne DSRC réduisent davantage le brouillage préjudiciable.

3) Service de radiodiffusion: liaison studio-émetteur (STL) et liaison émetteur-émetteur (TTL)

La distance de séparation, calculée au moyen du modèle d'affaiblissement en espace libre, était de 836 m entre le système de WPT par faisceau et la station de base STL-TTL pour un signal de bruit hors bande. Lorsque la différence de hauteur dépasse 5 m, on estime qu'un affaiblissement de 20 dB dû à la directivité de l'antenne STL/TTL peut réduire davantage le brouillage préjudiciable.

4) Service de radiodiffusion: systèmes d'interception dans le champ (FPU) et de liaison émetteur-studio (TSL)

La distance de séparation calculée était de 80 m entre le système de WPT par faisceau et la station de base FPU pour un signal de bruit hors bande. Lorsque la différence de hauteur dépasse 25 m, on estime qu'un affaiblissement de 14 dB dû à la directivité de l'antenne FPU peut réduire davantage le brouillage préjudiciable.

La distance de séparation, calculée au moyen du modèle d'affaiblissement en espace libre, était de 1 485 m entre le système de WPT par faisceau et la station de base TSL pour un signal de bruit hors bande. Lorsque la différence de hauteur dépasse 7 m, on estime qu'un affaiblissement de 20 dB dû à la directivité de l'antenne STL/TTL peut réduire davantage le brouillage préjudiciable.

5) **Système de transmission d'images mobile non habité**

La distance de séparation entre le système de WPT par faisceau et le système de transmission d'images mobile non habité situé en extérieur a été calculée au moyen du modèle d'affaiblissement en espace libre. Elle était respectivement de 23 km sur le même canal et de 185 m sur un autre canal adjacent. Toutefois, comme le système est généralement utilisé en dehors des villes, en des lieux définis et suivant des horaires planifiés, un moyen tel que la procédure de coordination permet d'éviter les brouillages préjudiciables.

6) **Radar météorologique**

La distance de séparation, calculée au moyen du modèle d'affaiblissement en espace libre, était de 3 308 m pour un signal de bruit hors bande du système de WPT par faisceau et chaque site de radar météorologique. Il convient de maintenir cette distance de séparation pour éviter les brouillages préjudiciables.

7) **Radioastronomie**

Les distances de séparation minimum à altitude égale ont été calculées en employant le modèle d'affaiblissement en espace libre. Elles s'élèvent respectivement à 1,1 km et à 1,7 km pour des stations de radioastronomie exploitant les bandes de 4 995 MHz et 10 650 MHz. Il convient de maintenir cette distance de séparation pour éviter le brouillage préjudiciable des stations de radioastronomie. L'antenne du système WPT par faisceau est installée au plafond et rayonne principalement vers le bas. La limite de rayonnement horizontal est définie en termes de p.i.r.e. De ce fait, le scénario le plus défavorable correspond à un rayonnement horizontal allant de l'intérieur à l'extérieur d'un bâtiment.

Lorsque l'altitude de la station de radioastronomie est supérieure à celle de la station WPT, le gain de directivité devient plus faible et la distance de séparation nécessaire diminue. En revanche, lorsque l'altitude de la station de radioastronomie est inférieure à celle de la station WPT, le gain de directivité augmente et la distance de séparation nécessaire s'accroît.

8) **Étude d'impact pour la radioamateur**

La distance de séparation a été évaluée en tenant compte de l'affaiblissement dû aux obstacles. Calculée au moyen du modèle d'affaiblissement en espace libre, cette distance était respectivement de 1,5 km et de 262 m pour des antennes de radioamateur de 30 dBi et de 15 dBi. La directivité de l'antenne et la procédure de coordination peuvent empêcher les brouillages préjudiciables. On mettra en œuvre la procédure de coordination opérationnelle entre les systèmes WPT et les systèmes de radioamateur.

3.4 **Étude D (2 483,5-2 500 MHz)**

3.4.1 **Description générale**

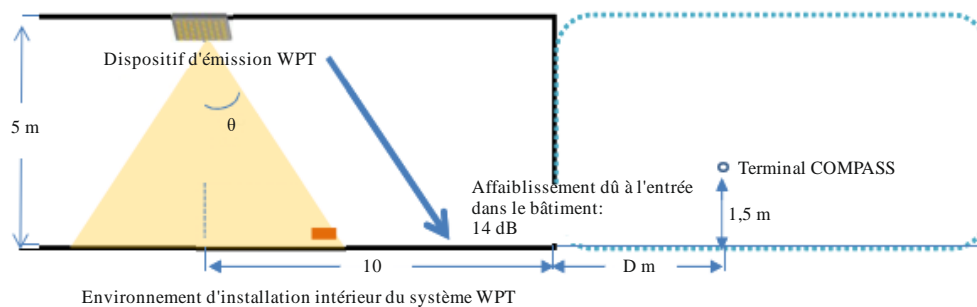
La bande de fréquences allant de 2 483,5 à 2 500 MHz est utilisée par les systèmes FS, Mobile, MSS, etc. L'Étude D, menée par la Chine, présente la simulation de l'analyse de compatibilité entre le système de WPT par faisceau et le système mobile par satellites géosynchrones COMPASS (ci-après «système MSS GSO COMPASS»). Les paramètres applicables au système MSS GSO COMPASS sont stipulés dans la Recommandation UIT-R M.1184 – Caractéristiques techniques des systèmes mobiles par satellite dans les bandes de fréquences inférieures à 3 GHz à utiliser pour élaborer des critères de partage entre le service mobile par satellite (SMS) et d'autres services.

La Figure 10 illustre le scénario de simulation correspondant, dans lequel le système de WPT par faisceau est placé dans une pièce ordinaire dont les murs ne sont pas ignifugés. La simulation prend pour hypothèse que l'émetteur du système de WPT par faisceau est fixé au plafond intérieur, à 5 m au-dessus du sol. Le terminal mobile du système MSS GSO COMPASS est situé à l'extérieur, à 10 m de distance de la région couverte par la WPT par faisceau. Lorsque l'émetteur du système de WPT par faisceau émet des signaux radioélectriques en direction du bas, ces signaux pénètrent dans les murs et sont susceptibles de brouiller le terminal mobile du système MSS GSO COMPASS.

En appliquant les critères de protection $I/N = -6$ dB et -10 dB, la présente étude met en œuvre la distance de séparation nécessaire à la protection entre l'émetteur de la WPT par faisceau et le terminal mobile du système MSS GSO COMPASS. En l'absence d'informations détaillées sur les paramètres des dispositifs de WPT par faisceau, l'étude a dû se contenter des paramètres donnés dans le Tableau 12.

FIGURE 10

Scénarios utilisés pour la simulation de brouillage entre un système de WPT par faisceau et un récepteur de système MSS GSO COMPASS



Rapport SM.2 505-10

3.4.2 Paramètres utilisés dans l'étude

On trouvera dans le Tableau 12 ci-dessous les paramètres employés pour la simulation.

TABLEAU 12

Paramètres utilisés dans l'étude

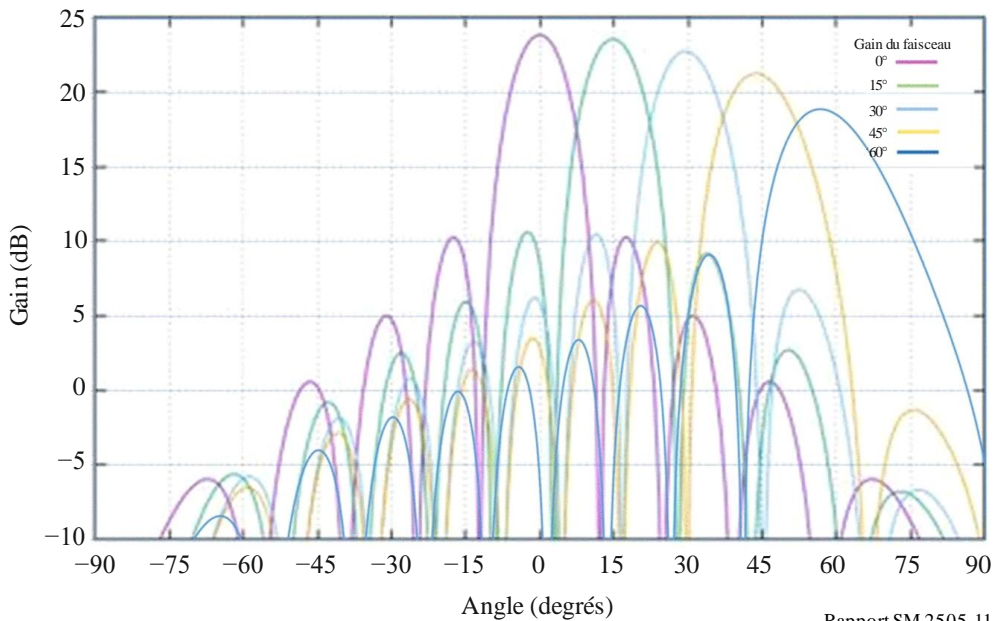
Émetteurs WPT par faisceau	Puissance de sortie	15 W (41,8 dBm)
	Fréquence centrale	2 484 MHz
	Largeur de bande	500 kHz (<i>Densité de puissance</i> = 14,8 dBm/kHz) 10 MHz (<i>Densité de puissance</i> = 3,8 dBm/MHz)
	Emplacement et hauteur de l'antenne d'émission	En intérieur, fixée au plafond et orientée vers le bas
		À 5,0 m au-dessus du sol
Gain de l'antenne d'émission	Fig. 11 (-5 dBi)	
	Affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments	14,0 dB

TABLEAU 12 (fin)

Récepteurs COMPASS GSO MSS	Hauteur des récepteurs	1,5 m
	Fréquence centrale	2 491,5 MHz
	Largeur de bande	16,5 MHz
	Température de bruit du terminal	330 K ($N_0 = -113,4142$ dBm/MHz) ($N_0 = -143,4142$ dBm/kHz)
Conditions de la simulation	Rapport brouillage/bruit	-6 dB/-10 dB
	Emplacement	Banlieue
	Modèle de propagation	Modèle Hata $L_{bs} = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - \alpha(h_m) + (44,9 - 6,55 \lg(h_b)) \cdot \log(d) - 5,4 - 2 (\log(f/28))^2$

La Figure 11 présente le diagramme de l'antenne d'émission du système WPT. Le diagramme d'antenne est celui utilisé au § 3.3 de l'Étude C. Comme illustré sur la figure, l'emploi d'une technologie de conformation de faisceaux par le système WPT produit cinq faisceaux présentant un angle de décalage hors axe de 60 degrés ou moins par rapport à l'antenne. Pour calculer la distance d'extinction du brouillage causés aux terminaux MSS GSO COMPASS, l'étude a choisi les mêmes paramètres que l'Étude C: elle tient compte principalement du faisceau présentant un déphasage de 60 degrés, l'angle de décalage hors axe du signal émis étant proche de 90 degrés lorsque le brouillage se produit (hauteur du système WPT: 5 mètres, hauteur du terminal MSS: 1,5 mètre, la distance d'extinction du brouillage entre les deux étant supérieure à 100 mètres). Le gain de l'antenne d'émission peut ainsi être réglé sur -5 dBi.

FIGURE 11
Diagramme de l'antenne d'émission



3.4.3 Résultats de l'étude

On trouvera dans le Tableau 13 ci-dessous les distances de séparation déterminées pour des largeurs de bande respectives de 500 kHz et 10 MHz pour l'émission du système de WPT par faisceau. Ces distances varient de 820 m à 2 160 m entre le système de WPT par faisceau et le terminal mobile du système MSS GSO COMPASS.

Il est indiqué dans le Rapport UIT-R SM.2392 que certains systèmes de WPT par faisceau fonctionnent en intérieur ou en extérieur. Les situations de brouillage constatées doivent être étudiées plus avant au cas par cas, afin de déterminer si la distance de séparation est suffisante; on notera en particulier qu'une distance de 2 160 m peut poser problème dans certains cas de figure.

Il est également important de souligner que les résultats de cette étude sont fondés sur les paramètres donnés au § 3.4.2. Les paramètres des futurs produits de WPT par faisceau proposés dans le commerce et leurs scénarios de mise en œuvre n'étant pas encore connus, des études complémentaires seront nécessaires.

TABLEAU 13
Distance d'extinction du brouillage

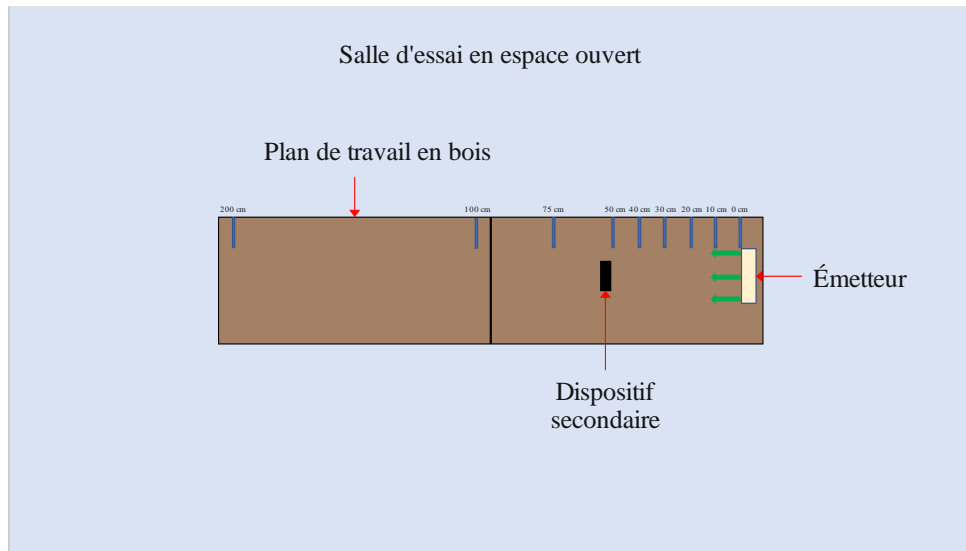
WPT PAR FAISCEAU Largeur de bande Tx	CRITÈRE I/N	
	-6 dB	-10 dB
500 kHz	1,72 km	2,16 km
10 MHz	0,82 km	1,03 km

3.5 Étude E (915-921 MHz)

Un dispositif émetteur de chargement à distance par voie hertzienne faisant office de DUT, fonctionnant entre 915 MHz et 921 MHz, a fait l'objet d'une étude d'impact en vue de démontrer son interopérabilité avec des dispositifs et des technologies sans fil fonctionnant sur la même bande de fréquences. Le DUT fonctionnait sur un seul canal avec une largeur de bande inférieure à 400 kHz et une puissance moyenne transmise déclarée maximale de 40,0 dBm. Le DUT était un appareil conçu pour charger d'autres dispositifs à une distance inférieure ou égale à 300 cm.

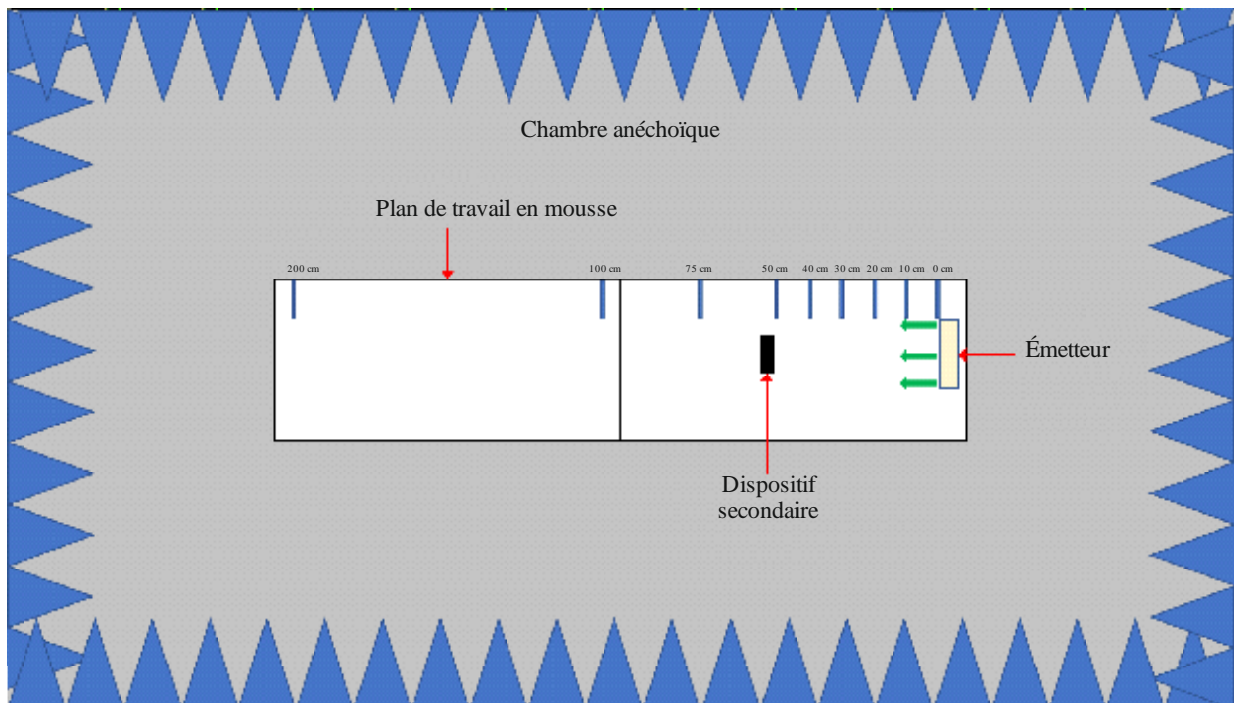
Les essais ont été effectués dans deux pièces séparées. Le premier essai était un essai en conditions réelles, conduit dans une pièce ordinaire, le DUT étant posé sur un plan de travail en bois en présence d'autres signaux, comme illustré à la Fig. 12. La seconde salle d'essai était une chambre anéchoïque conforme à la description figurant dans l'Annexe B.1.2 de la norme ETSI EN 302 208 V3.1.1 (2016-11) et illustrée à la Fig. 13. Cette chambre anéchoïque a été utilisée pour déterminer si les résultats obtenus dans la pièce ordinaire étaient reproductibles dans un environnement en espace libre et si une éventuelle dégradation du signal était due à l'environnement bruyant. Les essais ont été effectués suivant un protocole parfaitement identique dans les deux pièces, comme détaillé plus bas. Les résultats de chacun des tests ne présentant pas de divergences, une seule série de résultats est présentée ci-dessous.

FIGURE 12
Montage d'essai dans la salle 1 (espace ouvert)



Rapport SM.2505-12

FIGURE 13
Montage d'essai dans la salle 2 (chambre anéchoïque)



Rapport SM.2505-13

Les essais ont été effectués sur les types de dispositifs sans fil ci-après:

TABLEAU 14

Types de dispositifs employés, fréquences et distances dans l'Étude E

N°	Type de dispositif	Gamme de fréquence (MHz)	Distance d'essai (cm)
1	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
2	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
3	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
4	Téléphone mobile	Liaison montante 888,0-915,0 Liaison descendante 925,2-960,0	0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100
5	Microphone sans fil et station de base	904,45-927,45 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 10, 30, 100, 200
6	Dispositif de correction auditive	863,25-864,75 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 10, 30, 100, 200
7	Dispositif de correction auditive	904,65-926,85 Sélectionnable par l'utilisateur	0, 10, 30, 100, 200
8	Lecteur RFID	903-927 Saut de fréquence	0, 10, 30, 100, 200
9	Lecteur RFID	865-868 Saut de fréquence	0, 10, 30, 100, 200

Téléphone mobile: le DUT était placé à 100 cm d'un téléphone mobile, pour simuler un environnement de bureau. L'antenne cellulaire, reliée par une liaison filaire au simulateur de station de base, était placée à 3 m du DUT et des téléphones mobiles. Un appel a été passé depuis le téléphone mobile vers le boîtier d'appel sur une fréquence spécifique de la bande GSM 900. Une fois la liaison téléphonique établie, le DUT a été allumé sur 917,5 MHz. Le signal de chargement a été vérifié au moyen d'un analyseur de spectre positionné dans la zone d'essai. L'appel a été surveillé pendant 60 secondes, après quoi l'état de l'appel a été enregistré (appel maintenu ou appel terminé). La distance entre le DUT et le téléphone mobile a été réduite progressivement jusqu'à ce que le téléphone mobile touche le DUT (distance mesurée de 0 cm). Les essais ont été réalisés en utilisant cinq canaux différents.

FIGURE 14

Montage d'essai pour l'étude d'impact sur téléphone mobile

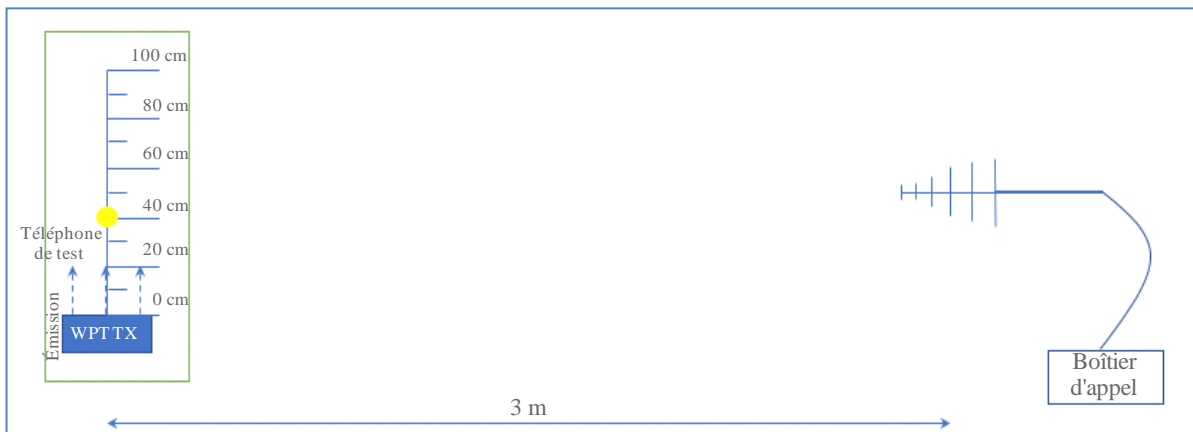
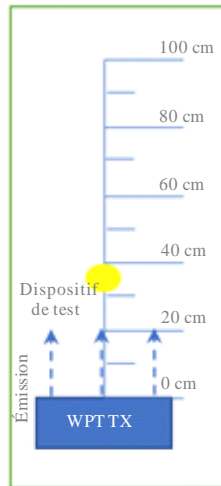


FIGURE 15

Montage d'essai pour l'étude d'impact sur d'autres appareils fonctionnant sur la même bande



Rapport SM.2505-15

Les résultats ont montré que tous les téléphones pouvaient fonctionner sans brouillage préjudiciable sur au moins un canal, et sur tous les canaux lorsqu'ils étaient distants d'au moins 1 m du DUT.

Microphone sans fil et station de base: la station de base (récepteur) a été placée à 30 cm du DUT, tandis que le microphone (émetteur) a été déplacé à chaque distance d'essai. Le microphone (émetteur) a ensuite été placé à 30 cm du dispositif DUT, la station de base (récepteur) étant déplacée à chaque distance d'essai.

Lorsque la fréquence de fonctionnement était proche de celle du DUT, les dispositifs n'ont subi aucun brouillage préjudiciable.

Dispositif de correction auditive: l'émetteur a été placé à 30 cm du dispositif DUT, le récepteur étant déplacé à chaque distance d'essai. Le récepteur a ensuite été placé à 30 cm du DUT, tandis que l'émetteur était déplacé à chaque distance d'essai.

Lorsque la fréquence de fonctionnement était proche de celle du DUT, les dispositifs ont subi un brouillage; à l'inverse, lorsque la fréquence du dispositif audio était éloignée de celle du DUT, un brouillage faible ou l'absence de brouillage ont été constatés.

Lecteur RFID: on a effectué avec le premier lecteur des lectures à 903,250; 904,250; 915,250; 915,750; 920,250; 926,750; et 927,250 MHz. Le paramètre d'émission du logiciel a été fixé à 30 dBm. Les étiquettes RFID ont ensuite été placées à 30 cm du DUT. On a effectué avec le second appareil des lectures à 865,00; 866,00; 867,00; 915,750; 920,250; 926,750; et 927,250 MHz avec les réglages par défaut. Les étiquettes RFID ont ensuite été placées à 30 cm du DUT.

Les lecteurs RFID ont fonctionné sans erreur lorsque la distance entre le DUT et les lecteurs et étiquettes RFID était supérieure ou égale à 1 m.

3.6 Étude F (61-61,5 GHz)

3.6.1 Services de radiocommunication pris en compte par l'étude

L'étude rapportée dans le présent paragraphe examine les limites d'émission hors bande nécessaires pour respecter les critères de protection pour le service d'exploration de la Terre par satellite sur bande passive, ou SETS (passive), et le service de radioastronomie (RAS). Elle porte sur l'emploi des segments de la bande ISM de 61 à 61,5 GHz par la WPT par faisceau.

3.6.2 Remarques relatives à la bande des 61-61,5 GHz

La technologie envisagée à cette fréquence implique une transmission à bande étroite dont la largeur de bande est d'environ 0,02% dans le cas de la bande ISM de 61 GHz. La largeur de bande maximale de 10 MHz a trois origines: le bruit de phase de la source de fréquence, la modulation de phase aléatoire incidente sur le signal émis (due à des ajustements mineurs effectués en continu par les déphaseurs des éléments d'antenne pour maintenir la focalisation sur la destination prévue), et la modulation à faible indice de la porteuse en ondes entretenues assurant les communications entre l'émetteur et la destination de la puissance, qui sert d'une part à maintenir une focalisation étroite de la bande sur la destination, et d'autre part à mettre en œuvre des dispositifs de sécurité active qui diminuent la puissance lorsqu'un objet, un être humain ou un animal domestique s'approche du volume à puissance surfacique (pfd) élevée à proximité de la destination prévue.

3.6.3 Effets de la WPT par faisceau sur la bande des 61-61,5 GHz

Cette bande est désignée comme une bande ISM par le RR N° 5.138, qui stipule que «l'utilisation de ces bandes de fréquences pour ces applications est subordonnée à une autorisation particulière donnée par l'administration concernée, en accord avec les autres administrations dont les services de radiocommunication pourraient être affectés. Pour l'application de cette disposition, les administrations se reporteront aux plus récentes Recommandations pertinentes de l'UIT-R». Cette bande est réservée en priorité aux services fixes, aux services inter-satellites, aux services mobiles et à la radiolocalisation. De nombreuses administrations ont en outre choisi cette bande et les bandes proches pour les dispositifs à courte portée, qui possèdent généralement des antennes à faisceau étroit, en raison de la courte longueur d'onde dans cette bande, et qui sont donc résistants aux sources ponctuelles de puissance RF.

La bande la plus proche attribuée au SETS (passive) se situe à 59-59,3 GHz (1,7 GHz en dessous) et la bande la plus proche attribuée au service RAS se situe à 76-77,5 GHz, 14,5 GHz au-dessus. Le SETS (bande passive) à 59-59,3 GHz se trouve dans la bande d'absorption par l'oxygène autour de 60 GHz et présente un affaiblissement de 13 dB/km dû aux gaz atmosphériques au niveau de la mer pour les trajets horizontaux; cet affaiblissement diminue à des altitudes plus élevées et pour des trajets avec un angle d'élévation plus important. Les conditions établies par le RR N° 5.138 semblent de fait appropriées pour protéger les autres services de la technologie employée sur cette bande.

3.6.4 Dangers pour l'être humain de la WPT sur la bande 61-61,5 GHz

La technologie envisagée pour ces bandes emploie des faisceaux à plusieurs éléments en réseau à commande de phase afin de concentrer la puissance sur une petite zone et ainsi assurer un transfert d'énergie efficace. Cette concentration entraîne une puissance surfacique (pfd) élevée au niveau et à proximité de la zone de réception de l'énergie, avec un risque de dépassement des limites fixées par les normes de sécurité applicables. Cette situation est évitée par des mesures actives qui détectent la présence d'objets à proximité du volume de pfd élevée et réduisent ou coupent les transmissions de puissance en cas de détection.

La stratégie visée consiste à s'assurer que les normes de sécurité applicables sont respectées: les systèmes utiliseront des dispositifs de protection multiples, fonctionnant de manière indépendante et pouvant être testés de manière indépendante, aptes à garantir le respect des limites d'exposition. Des capteurs peuvent être disposés de manière à s'assurer que les puissances élevées sont transmises uniquement s'il existe une destination autorisée prête à recevoir la puissance, aucun être humain ou animal ne se trouvant à une position proche où il serait exposé à des niveaux de puissance RF inacceptables. Ces capteurs permettent par exemple d'évaluer l'orientation de l'appareil chargé, notamment s'il est en mouvement, fixe ou posé sur une surface stable, de détecter passivement les mouvements à proximité et l'interruption du faisceau, et de détecter les signaux Doppler émis par l'appareil chargé ou par des personnes en mouvement. Ainsi, les distances entre le faisceau, l'appareil chargé et toute personne se trouvant à proximité peuvent être calculées en quelques millisecondes, ce

qui garantit l'arrêt du transfert d'énergie avant même qu'une personne ne croise la trajectoire du faisceau. Ces dispositifs de sécurité indépendants sont tous incorporés nativement au système WPT, ce qui signifie qu'ils sont inhérents au fonctionnement du conformateur de faisceaux du système WPT.

TABLEAU 15

Niveaux des normes de sécurité RF pour la bande des 61 GHz aux États-Unis

Bande (GHz)	Exposition maximale admissible (MPE) pour l'exposition professionnelle/contrôlée (mW/cm ²)	Exposition maximale admissible (MPE) pour l'exposition publique/non contrôlée (mW/cm ²)
61-61,5	5,0	1,0

3.7 Étude G (915-921 MHz, 2 410-2 486 MHz et 5 738-5 766 MHz)

Les radiotélescopes sont situés dans des régions isolées dans le but de limiter les brouillages et de permettre l'observation du cosmos dans des bandes de fréquences fortement sollicitées dans les zones urbaines. En complément, certains radiotélescopes fonctionnent dans des zones de silence radioélectrique administrées localement, dans lesquelles les émissions sont gérées sur l'ensemble du spectre radioélectrique, comme l'explique le Rapport UIT-R RA.2259.

Les dispositifs WPT fonctionnant dans des bandes de fréquences désignées pour l'utilisation d'applications ISM nécessitent une attention particulière, étant donné que leur fonctionnement est régi par le numéro **5.150** du RR. La radioastronomie est considérée comme un service de radiocommunication relevant du numéro **4.6** du RR.

3.7.1 Services de radiocommunication et bandes de fréquences pris en compte par l'étude

L'étude s'est intéressée à la compatibilité entre des services de radioastronomie et des dispositifs WPT fonctionnant sur trois bandes ISM choisies parmi les bandes du Tableau 1 et présentées dans le Tableau 16. L'étude a calculé l'isolation (en dB) du rayonnement WPT nécessaire pour atteindre les niveaux de protection prévus par la Recommandation UIT-R RA.769 pour la radioastronomie, à la fréquence de fonctionnement du système WPT (Tableau 16) et à trois fréquences utilisées par le service de radioastronomie (Tableau 17). Les calculs effectués aux fréquences de radioastronomie se fondent tous sur l'hypothèse d'une densité de puissance rayonnée de $-71,3$ dBW/1 MHz, qui est la valeur imposée par de nombreuses administrations quand il s'agit de limiter le rayonnement des dispositifs ISM au-dessus de 1 GHz; cette valeur correspond à un champ électrique de $500 \mu\text{V/m}$ mesuré à 3 m dans une largeur de bande de 1 MHz quand on la convertit en puissance au moyen de l'équation (2) du Rapport UIT-R RA.2131.

3.7.2 Détail des calculs

3.7.2.1 Rayonnement aux fréquences WPT

Les fréquences, les gains et les niveaux de puissance des systèmes WPT indiqués dans le Tableau 16 sont repris du Tableau 1 pour les Systèmes 2, 5 et 6. Les affaiblissements spécifiques *Atten_std* et *Atten_dry* (dB/km) proviennent de la Recommandation UIT-R P.676 pour une atmosphère sèche (*dry*) et une atmosphère standard (*std*). La grandeur *T_769* désigne la puissance surfacique au seuil de protection des services de radioastronomie, obtenue par interpolation à partir des valeurs de la colonne 8 du Tableau 1 de la Recommandation UIT-R RA.769-2.

TABLEAU 16

Paramètres de calcul pour les fréquences WPT

Fréquence (GHz)	P_wpt (dB W)	Gain_wpt (dBi)	T_769 (dB W/m ²)	Atten_dry (dB/km)	Atten_std (dB/km)	Δ à d = 100 km (dB)
0,920	11,761	8,24 0	-183	0,005	0,005	95 87
2,4	11,761	24 0	-177	0,006	0,006	105 81
5,8	15,051	25 0	-169	0,0075	0,009	114 89

3.7.2.2 Rayonnement aux fréquences de radioastronomie

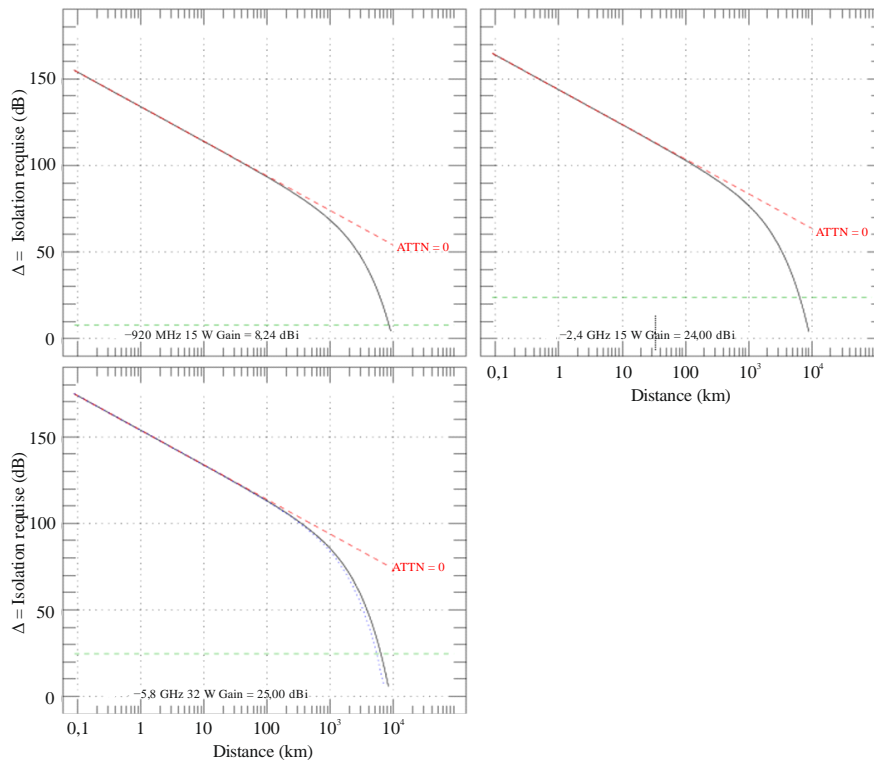
Les caractéristiques des bandes de radioastronomie indiquées dans le Tableau 17 sont tirées de la Recommandation UIT-R RA.769 et du RR N° 5.149. Les niveaux de puissance admis dans les bandes sont calculés en multipliant le facteur $P'_{wpt} = -71,3$ dB W/MHz par la largeur de bande de radioastronomie.

TABLEAU 17

Paramètres de calcul pour les fréquences de radioastronomie

Fréquence (GHz)	P_wpt (dB W)	Gain_wpt (dBi)	T_769 (dB W/m ²)	Atten_dry (dB/km)	Atten_std (dB/km)	Δ à d = 100 km (dB)
1,400-1,427	-57,0	0	-180	0,005	0,005	12
2,69-2,70	-61,3	0	-177	0,006	0,006	5
6,65-6,6752	-57,3	0	-168	0,0075	0,009	-1

FIGURE 16
Isolation requise aux fréquences WPT



Rapport SM.2505-16

3.7.2.3 Calculs

Dans cette étude, on a calculé la puissance surfacique émise par le système WPT à la distance $d(m)$ dans l'espace libre, en considérant un affaiblissement spécifique A (dB/km) = $Atten_dry$ et $Atten_std$, puis on a effectué la différence logarithmique entre cette puissance surfacique et les valeurs de seuil de la Recommandation UIT-R RA.769. Les résultats sont donnés pour les valeurs de gain WPT du Tableau 17, y compris 0 dBi. Le gain du système de radioastronomie est nul (0 dBi), comme c'est le cas dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour fixer les niveaux de seuil.

Plus précisément, l'étude a calculé les valeurs numériques de

$$\Delta \text{ (dB)} = P_wpt + Gain_wpt - T_769 - 10 \log(4\pi) - 20 \log(d) - A*d/1000$$

comme illustré respectivement à la Fig. 16 et à la Fig. 17 pour la fréquence WPT et la fréquence de radioastronomie. Dans chaque figure, les résultats sont présentés pour l'atmosphère sèche et l'atmosphère standard, mais la différence est à peine perceptible. Le gain WPT est indiqué afin de faciliter la détermination de l'isolation pour le cas d'un gain WPT de 0 dBi.

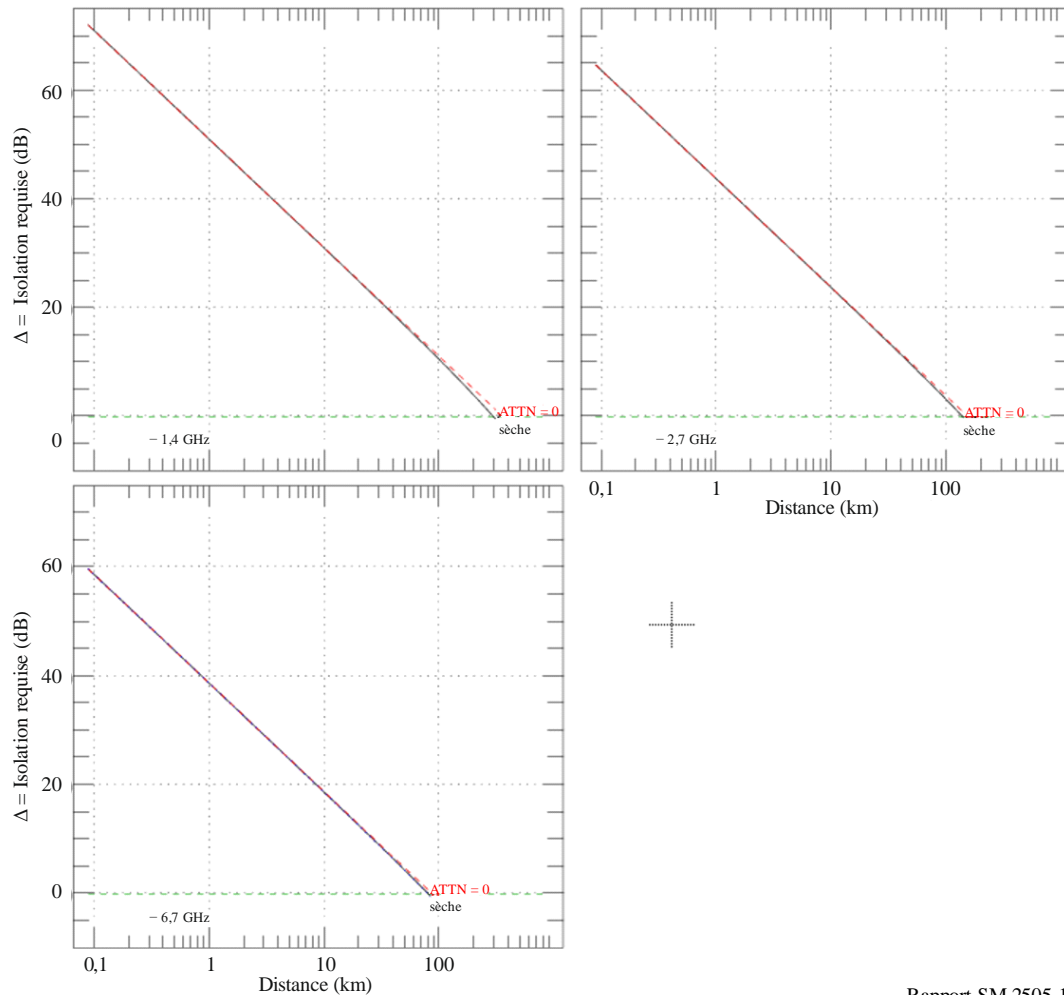
3.7.3 Résultats

Les résultats du calcul de Δ aux fréquences WPT sont présentés à la Fig. 16, tandis que la colonne la plus à droite du Tableau 16 indique les valeurs de Δ calculées pour $d = 100$ km (elles varient dans ce cas de 80 à 110 dB).

Les résultats dans les bandes de radioastronomie sont présentés à la Fig. 17, et les valeurs de Δ au niveau d'une séparation de 100 km en visibilité directe varient de -1 à 12 dB dans le Tableau 17.

FIGURE 17

Isolation requise aux fréquences de radioastronomie



Rapport SM.2505-17

3.7.4 Résumé

Il est nécessaire d'isoler les installations de radioastronomie vis-à-vis des dispositifs WPT fonctionnant sur les bandes ISM pour respecter les seuils de brouillage de la Recommandation UIT-R RA.769. Certaines circonstances imposent d'envisager des zones d'exclusion, sur la base des niveaux de puissance autorisés et des affaiblissements de propagation dus au terrain local. S'agissant des systèmes de radioastronomie fonctionnant dans les bandes en dehors des émissions fondamentales des systèmes de WPT par faisceau, les administrateurs nationaux doivent s'assurer que les émissions hors bande et les rayonnements non essentiels autorisés dans le cadre des normes réglementaires nationales actuelles ne causent pas de brouillage préjudiciable, en tenant compte des bilans de liaison, de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, de l'affaiblissement dû aux obstacles et au terrain, de la visibilité directe et des considérations relatives à la diffraction. Cette détermination peut également s'appuyer sur une combinaison de mesures et d'analyse.

4 Dangers auxquels l'être humain est exposé

Les administrations sont encouragées à se conformer aux lignes directrices fixées par les groupes d'experts de la CIPRNI et de l'IEEE, ou à respecter les limites définies par leur propres experts. L'exposition des êtres humains aux champs électromagnétiques (EMF) est régie par un certain nombre d'organismes de réglementation ainsi que par des organisations internationales d'experts telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

et la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (CIPRNI). On trouvera ci-dessous les lignes directrices de l'ICNIRP sur les EMF:

- 1) CIPRNI (1998): lignes directrices visant à limiter l'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variant dans le temps (jusqu'à 300 GHz);
- 2) CIPRNI (2020): lignes directrices visant à limiter l'exposition aux champs électromagnétiques (100 kHz à 300 GHz).

Le document IEEE C95.1-2019 est la «norme de l'IEEE relative aux niveaux de sécurité pour ce qui est de l'exposition des personnes aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques entre 0 Hz et 300 GHz».

La norme IEEE C95.1-2019 et les lignes directrices CIPRNI (2020) (ainsi que les lignes directrices CIPRNI (1998)) ont été harmonisées dans une large mesure: les niveaux d'exposition du corps entier aux valeurs limites de puissance surfacique au-dessus de 30 MHz sont identiques. En ce qui concerne l'exposition aux champs électromagnétiques due à la WPT par faisceau, les références les plus pertinentes sont l'ICNIRP (2020) et l'IEEE C95.1-2019.

Dans sa mise en œuvre pratique, la WPT par faisceau utiliserait des fréquences à partir des ondes décimétriques pour les systèmes de transmission, par exemple la bande des 920 MHz, la bande des 2,4 GHz et la bande des 5,7 GHz pour transmettre l'énergie. Les ondes hyperfréquences peuvent être diffusées à partir d'une antenne, de point à point ou de point à multipoint, sur une distance de quelques mètres ou plus. Contrairement aux utilisations de communication sans fil, le niveau de puissance électromagnétique transmise requis pour la mise en œuvre commerciale de la WPT par faisceau pourrait être plus élevé dans une certaine mesure, ou substantiel. On estime que l'exposition humaine aux champs électromagnétiques des systèmes de WPT par faisceau (y compris les dispositifs médicaux) devrait être évaluée, et qu'il convient de prendre les mesures supplémentaires qui s'imposent pour se conformer aux lignes directrices actuelles lors de la planification et de l'exploitation des systèmes de WPT par faisceau.

Pour répondre aux exigences techniques particulières ci-dessus, certaines mises en œuvre actuelles de la technologie WPT par faisceau envisagent d'adopter des mécanismes de détection du corps humain dans la zone où l'on s'attend à une exposition aux radiofréquences au-delà des limites prévues par les lignes directrices, afin d'interrompre la transmission de puissance ou de modifier la direction du faisceau d'énergie en cas de détection. Afin de faciliter la mise en œuvre de ces solutions techniques et d'assurer le respect des lignes directrices, certaines administrations ont également prévu d'examiner les conditions environnementales réglementaires pour les systèmes de WPT par faisceau. Voir l'Annexe 1 pour de plus amples informations.

5 Résumé

Il convient de noter que les études décrites dans le présent Rapport se réfèrent principalement à des réglementations nationales particulières.

Ces études démontrent que les systèmes de WPT par faisceau proposés peuvent généralement coexister avec les services et les stations de radiocommunication existants employés pour les essais. Des mesures d'atténuation pourraient s'avérer nécessaires dans certains cas, en fonction des réglementations nationales.

Les Études A, B et E ont présenté des données d'essai pour des systèmes de WPT par faisceau dans la bande 915-921 MHz fonctionnant dans le cadre de la réglementation nationale. Les résultats ont montré que ces systèmes peuvent coexister avec les dispositifs existants avec un très faible brouillage, à condition de respecter la réglementation et de mettre en œuvre les stratégies recommandées pour atténuer les effets sur l'utilisateur.

Les résultats présentés dans l'Étude C montrent que l'impact des systèmes de WPT par faisceau sur d'autres technologies hertziennes ou dispositifs sans fil dépend de facteurs tels que la puissance de sortie du système de WPT par faisceau, la distance entre les dispositifs et l'utilisation ou non des mêmes fréquences de fonctionnement. S'agissant des systèmes de WPT à faisceau fonctionnant dans la bande des 915-921 MHz, les résultats de ces études, compte tenu des réglementations nationales, montrent que, dans la plupart des cas, leur fonctionnement est possible et ne provoque que peu ou pas de brouillage pour les types d'appareils suivants: terminaux d'utilisateurs IMT, microphones et stations de base sans fil, dispositifs de correction auditive, lecteurs RFID, capteurs de porte/fenêtre, concentrateurs intelligents et prises de courant intelligentes.

L'Étude D a examiné, au moyen d'une étude de cas, la compatibilité entre la WPT par faisceau et le système MSS GSO COMPASS (fonctionnant dans la bande de fréquences 2 483,5-2 500 MHz). Les résultats de l'étude montrent que des distances de séparation de 820 m à 2 160 m sont nécessaires pour éviter les brouillages préjudiciables du système COMPASS par les systèmes de WPT par faisceau. Compte tenu du fait que certains systèmes de WPT par faisceau fonctionnent en intérieur ou en extérieur, et que les paramètres et le scénario de fonctionnement de ces systèmes ne sont pas connus, les administrations doivent réaliser des études plus approfondies, parfois au cas par cas, pour déterminer si la distance de séparation est suffisante (on notera en particulier que la distance de 2 160 m peut poser problème dans certains cas de figures).

L'Étude C présente également les conditions de partage des fréquences assorties de dispositions supplémentaires pour la protection des services en place et la protection du corps humain contre l'exposition aux radiofréquences des systèmes WPT. Un essai portant sur un système de WPT par faisceau fonctionnant dans la bande de 917-920 MHz dans des conditions techniques équivalentes à celles du système RFID existant démontre la capacité de coexistence avec des systèmes dans la même bande et dans les bandes voisines. Un autre essai mené dans les bandes de 2 410-2 486 MHz et de 5 738-5 766 MHz examine la mise en œuvre du mécanisme de détermination des voies libre sur les réseaux étendus (WLAN CCA) pour les systèmes WPT ainsi que les distances de séparation nécessaires. Une règle complète de gestion de l'exploitation des technologies de WPT par faisceau, notamment en termes d'environnement d'exploitation et de champs électromagnétiques, est fournie à titre de ligne directrice réglementaire.

L'Étude F indique que, sur la base de l'analyse de la qualité de fonctionnement des systèmes, les réglementations nationales actuelles sont suffisantes pour protéger les systèmes existants dans la bande de fréquences 61-61,5 GHz.

L'Étude G précise qu'il est nécessaire d'isoler les installations de radioastronomie vis-à-vis des dispositifs WPT fonctionnant sur les bandes ISM pour respecter les seuils de brouillage de la Recommandation UIT-R RA.769. Certaines circonstances imposent d'envisager des zones d'exclusion, sur la base des niveaux de puissance autorisés et des affaiblissements de propagation dus au terrain local. S'agissant des systèmes de radioastronomie fonctionnant dans les bandes en dehors des émissions fondamentales des systèmes de WPT par faisceau, les administrateurs nationaux doivent s'assurer que les émissions hors bande et les rayonnements non essentiels autorisés dans le cadre des normes réglementaires nationales actuelles ne causent pas de brouillage préjudiciable, en tenant compte des bilans de liaison, de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, de l'affaiblissement dû aux obstacles et au terrain, de la visibilité directe et des considérations relatives à la diffraction. Cette détermination peut également s'appuyer sur une combinaison de mesures et d'analyse.

Annexe 1

Contrôle de l'environnement d'exposition aux radiofréquences afin de respecter les lignes directrices relatives à la radioprotection: le cas du Japon

A1.1 Environnements d'installation des systèmes de WPT par faisceau

Le Conseil de l'information et de la communication du Ministère japonais des Affaires intérieures et des Communications (MIC) a défini deux catégories d'environnements d'installation des systèmes WPT: l'environnement WPT contrôlé et l'environnement WPT général. Ces catégories permettent de gérer et de contrôler l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences à laquelle les systèmes WPT soumettent le corps humain dans les bandes de fréquences des 920 MHz (915-930 MHz), des 2,4 GHz (2 400-2 499 MHz) et des 5,7 GHz (5 470-5 770 Mhz) utilisées au Japon, en vue de respecter les lignes directrices relatives à la radioprotection (RRPG) en vigueur dans le pays.

A1.1.1 Environnement WPT contrôlé

L'environnement WPT contrôlé est défini de la façon suivante:

- Il correspond à un espace intérieur clos dans lequel fonctionne le système de WPT par faisceau.
- Dans cet environnement, les niveaux des champs électromagnétiques radiofréquences WPT respectent la plage autorisée définie pour l'environnement contrôlé dans les RRPG. (La transmission d'énergie doit être interrompue lorsque le système détecte qu'un individu a pénétré dans la zone dans laquelle les champs électromagnétiques dépassent les limites fixées pour l'environnement contrôlé dans les RRPG).
- Lorsqu'un système de WPT par faisceau fonctionne dans l'environnement WPT contrôlé, afin d'éviter et d'atténuer les effets indésirables sur les autres systèmes de radiocommunication, le personnel chargé de l'installation du système WPT, l'opérateur du système WPT, le titulaire de la licence WPT et les autres personnes autorisées doivent être en mesure de gérer et de commander l'utilisation des autres systèmes de radiocommunication et les conditions d'installation des dispositifs d'une manière intégrée.
- Lorsque l'environnement WPT contrôlé concerné est contigu à d'autres espaces intérieurs (par exemple, des pièces adjacentes ou des étages voisins), les niveaux des champs électromagnétiques radiofréquences du système WPT doivent respecter la plage admissible des conditions de partage du spectre spécifiées avec les autres systèmes de radiocommunication, même dans ces espaces intérieurs, ou le gestionnaire du système WPT identique à l'environnement contrôlé WPT intérieur concerné doit être en mesure de gérer le partage coordonné du spectre de manière intégrée. (Cette disposition s'applique uniquement au fonctionnement sur les bandes des 2,4 GHz et des 5,7 GHz).

A1.1.2 Environnement WPT général

L'environnement WPT général est l'autre catégorie d'environnement d'installation intérieure WPT et désigne les environnements d'utilisation de la technologie WPT qui ne répondent pas à la définition de l'environnement contrôlé WPT. La transmission d'énergie sans fil à des capteurs de gestion de la qualité dans un entrepôt logistique (sur la bande 920 MHz uniquement), la transmission d'énergie sans fil à des capteurs d'observation dans un établissement de soins pour personnes âgées (sur la bande 920 MHz uniquement) sont des exemples de ce type d'environnement.

A1.2 Respect des lignes directrices relatives à la radioprotection (RRPG)

A1.2.1 Distance de séparation

On trouvera ci-après les distances de séparation qui ont été définies pour respecter les exigences en termes d'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences.

TABLEAU A1.1

Distances de séparation requises pour respecter les limites d'exposition aux radiofréquences des RRPG

Bande	Condition environnementale définie dans les RRPG	Coefficient de réflexion K = 1 ⁽¹⁾	Coefficient de réflexion K = 2,56 ⁽²⁾	Coefficient de réflexion K = 4 ⁽³⁾	Ajout de 6 dB à l'intensité EMF ⁽⁴⁾	
					Coefficient de réflexion K = 2,56	Coefficient de réflexion K = 4
920 MHz	Environnement contrôlé	0,102 m	0,163 m	0,203 m	0,325 m	0,4065 m
	Environnement général	0,227 m	0,364 m	0,456 m	0,727 m	0,912 m
2,4 GHz	Environnement contrôlé	2,45 m	3,92 m	4,90 m	7,82 m	9,80 m
	Environnement général	5,48 m	8,76 m	10,95 m	17,49 m	21,90 m
5,7 GHz	Environnement contrôlé	4,00 m	6,40 m	8,00 m	12,80 m	16,00 m
	Environnement général	9,00 m	14,30 m	17,80 m	28,50 m	35,70 m

⁽¹⁾ Aucune réflexion n'est prise en compte.

⁽²⁾ En tenant compte des réflexions dues au sol.

⁽³⁾ En tenant compte des réflexions à la surface de l'eau et dues aux éléments autres que le sol.

⁽⁴⁾ On ajoute 6 dB quand on s'attend à observer des réflexions plus importantes en raison des bâtiments (par exemple un immeuble de bureaux voisin du point d'évaluation).

A1.2.2 Indications générales

Dans le cas des systèmes de WPT par faisceau que l'on envisage d'utiliser dans la bande des 920 MHz, la distance de séparation nécessaire pour respecter les limites fixées par les RRPG est relativement faible; il est donc possible de faire fonctionner ces systèmes dans l'environnement WPT général.

Les systèmes que l'on souhaite utiliser dans la bande des 2,4 GHz et la bande des 5,7 GHz supposent la mise en place de mécanismes qui coupent la transmission d'énergie en cas de détection d'un corps humain dans la zone où l'exposition aux radiofréquences dépasse les limites fixées par les RRPG. Ces systèmes doivent en outre s'accompagner de mesures de sécurité visant à garantir le bon fonctionnement du mécanisme de détection et de protection. Certains mécanismes d'alerte, tels que la signalisation de la zone concernée et la mise en place d'une barrière, sont également préconisés.

Les émetteurs des systèmes de WPT par faisceau ne sont pas utilisés à proximité immédiate (moins de 20 cm) du corps humain dans les scénarios d'utilisation, et dès lors que l'on prend les mesures de sécurité appropriées décrites ci-dessus. Il n'est donc pas nécessaire d'étudier le débit d'absorption d'énergie spécifique (DAS) pour le corps humain à proximité.