

LIVRE BLANC

Rayonnement des CEM dans les réseaux mobiles : Un examen plus approfondi des limites d'émission et des distances de sécurité

Par Vladan Jevremovic, PhD

Juin 2020

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	3
2	LIMITES DES RAYONNEMENTS EMF DANS LE MONDE.....	3
2.1	LIGNES DIRECTRICES DE L'ICNIRP.....	3
2.2	LIMITES D'EXPOSITION DES ADMINISTRATIONS LOCALES.....	5
3	RAYONNEMENT EMF ET CALCUL DE LA CONFORMITE EMF.....	7
3.1	ANTENNES PONCTUELLES.....	7
3.2	RÉSEAUX MULTIBANDES.....	8
3.3	COMMENT LE SPECTRE ET LA TECHNOLOGIE AFFECTENT LA DISTANCE DE CONFORMITÉ AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.....	9
3.3.1	SYSTÈMES DRT.....	9
3.3.2	Charge de la cellule de l'eNodeB.....	9
3.3.3	MIMO MASSIVE.....	10
3.4	EXEMPLES DE CALCUL DE CONFORMITÉ EMF - RÉSEAUX INTÉRIEURS.....	11
3.4.1	ÉTATS-UNIS.....	11
3.4.2	SLOVÉNIE.....	13
3.4.3	FÉDÉRATION DE RUSSIE.....	14
3.5	conformité aux rayonnements électromagnétiques dans le contexte du m-MIMO 5G NR.....	17
4	RÉSUMÉ.....	18
5	RÉFÉRENCES.....	18
	À propos d'iBwave.....	19

1 INTRODUCTION

Un rayonnement de champ électromagnétique (CEM) est une zone de champ électrique et magnétique (EM) en mouvement à travers un milieu. Ce milieu est généralement l'air, bien que les champs électromagnétiques puissent se propager dans d'autres milieux tels que l'eau ou le vide. Le mouvement des CEM est un sous-produit du courant électrique ; partout où il y a du courant électrique, il doit y avoir un rayonnement CEM à proximité. Les CEM sont parfois un sous-produit indésirable d'un courant, comme c'est le cas avec les lignes électriques à haute tension. Toutefois, dans les réseaux sans fil, le champ électromagnétique est le produit souhaité, car il transporte l'information d'une antenne vers les téléphones mobiles et les ordinateurs portables, et vice versa. Au fil des ans, des questions se sont posées quant à la nocivité pour l'homme des rayonnements électromagnétiques émis par les réseaux mobiles sans fil. Diverses agences gouvernementales et non gouvernementales se sont attaquées à ce problème dans le passé et ont défini ce qui constitue une émission de CEM acceptable.

Récemment, alors que la technologie 5G a commencé à être déployée à des fréquences d'ondes millimétriques, un débat public s'est engagé sur la question de savoir si le rayonnement électromagnétique d'un réseau 5G est nocif pour la population générale qui ne se doute de rien. Ce livre blanc résume les limites d'émission imposées par divers organismes internationaux, donne des informations théoriques sur le calcul de la distance de conformité au rayonnement EMF et donne des exemples numériques de la distance de sécurité par rapport à l'émission dans les réseaux sans fil d'intérieur dans certains pays du monde. Nous examinons également comment l'ajout d'un nouveau réseau 5G à un réseau multitechnologique (2G, 3G, 4G) existant à l'intérieur d'un bâtiment affecte la distance de conformité. Nous discutons également de la façon dont la technologie MIMO massive, qui est une partie importante des réseaux 5G, a un impact sur la distance de conformité, avec des exemples numériques générés par iBwave Design, un outil commercial de conception et de planification RF en intérieur.

2 LIMITES DES RAYONNEMENTS EMF DANS LE MONDE

2.1 LIGNES DIRECTRICES DE L'ICNIRP

La Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) fournit des avis et des conseils scientifiques sur les effets des rayonnements non ionisants (RNI) sur la santé et l'environnement afin de protéger les personnes et l'environnement d'une exposition préjudiciable aux RNI. Les rayonnements non ionisants sont des rayonnements de champs électromagnétiques compris entre 100 kHz et 300 GHz.

L'ICNIRP émet des recommandations sur la limitation de l'exposition pour les fréquences des différents sous-groupes du proche infrarouge. Elle élabore et publie des lignes directrices, des déclarations et des études utilisées par les organismes de radioprotection régionaux, nationaux et internationaux, tels que l'Organisation mondiale de la santé. L'ICNIRP est l'un des principaux contributeurs au dialogue scientifique international sur le proche infrarouge et à l'avancement de la protection contre le proche infrarouge[1].

Les limites fixées par l'ICNIRP reposent sur une analyse approfondie de la littérature scientifique afin d'identifier les effets potentiellement dangereux et leurs seuils. Les effets biologiques potentiellement dangereux sont basés sur la perturbation des comportements en cours associée à une augmentation de la température corporelle en présence de champs électromagnétiques. En raison du manque de données fiables sur les expositions chroniques, la plupart des publications concernent l'exposition à court terme (moins d'une heure) à l'énergie des radiofréquences. Les durées moyennes dans les limites de l'ICNIRP sont courtes (6 à 30 minutes) et reflètent des considérations thermiques.

L'ICNIRP fixe des limites d'exposition à l'aide d'un certain nombre de paramètres pour une large gamme de fréquences. L'une de ces mesures est le "débit d'absorption d'énergie spécifique" (DAS), qui correspond à la puissance par unité de masse absorbée (W/kg). Il s'agit d'une mesure utile à utiliser en dessous de 6 GHz, où les

CEM pénètrent profondément dans les tissus. Au-dessus de 6 GHz, les CEM sont absorbés plus superficiellement, et il est donc utile de décrire l'exposition en termes de densité de puissance absorbée par rapport à la surface (W/m^2). Cette mesure est appelée familièrement "densité de puissance". La densité de puissance est une mesure exclusive au-dessus de 10 GHz [1, tableau 5], tandis que le DAS est spécifié en dessous de 10 GHz [1, tableau 4], pour le corps entier, les membres et la tête. L'ICNIRP spécifie également le champ électrique et magnétique incident et la densité de puissance en dessous de 10 GHz, où "les niveaux de référence calculés sont censés être des valeurs moyennées dans l'espace sur l'ensemble du corps de la personne exposée, mais avec la condition importante que les restrictions de base sur l'exposition localisée ne soient pas dépassées" [1].

La CIPRNI fixe deux limites d'exposition différentes :

- Limites d'exposition professionnelle
- Limites pour le grand public

Les limites d'exposition professionnelle s'appliquent aux adultes exposés dans des conditions contrôlées dans le cadre de leurs activités professionnelles. Ces personnes sont formées pour être conscientes des risques potentiels liés aux CEM de radiofréquence et pour savoir comment appliquer les mesures d'atténuation des dommages appropriés.

Les limites fixées pour le grand public s'appliquent aux personnes de tous âges qui n'ont pas connaissance de leur exposition aux CEM ou qui ne peuvent pas la contrôler. Les différences entre les groupes suggèrent la nécessité d'inclure des restrictions plus strictes pour le grand public, étant donné que les membres du grand public ne sont pas formés pour atténuer les dommages ou n'ont peut-être pas la capacité de le faire. Les personnes professionnellement exposées ne courent pas plus de risques que le grand public, à condition qu'un dépistage et une formation appropriés soient mis en place pour tenir compte de tous les risques connus[2]. [2]

Les valeurs de référence pour le champ électrique et magnétique et la densité de puissance incidente en fonction de la gamme de fréquences sont indiquées dans le tableau 1 :

Exposure scenario	Frequency range	Incident E-field strength; E_{inc} ($V\ m^{-1}$)	Incident H-field strength; H_{inc} ($A\ m^{-1}$)	Incident power density; S_{inc} ($W\ m^{-2}$)
Occupational	0.1 – 30 MHz	$660/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	61	0.16	10
	>400 – 2000 MHz	$3f_M^{0.5}$	$0.008f_M^{0.5}$	$f_M/40$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	50
General public	0.1 – 30 MHz	$300/f_M^{0.7}$	$2.2/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	27.7	0.073	2
	>400 – 2000 MHz	$1.375f_M^{0.5}$	$0.0037f_M^{0.5}$	$f_M/200$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	10

Tableau 1 : Valeurs de référence de la CIPRNI, pour l'exposition, moyenne sur l'ensemble du corps pour le champ électromagnétique dans la gamme 100 kHz - 300 GHz [ibid, tableau 5].

Les réseaux mobiles fonctionnent dans la gamme 150 MHz - 40 GHz. Cela correspond aux trois gammes de fréquences du tableau ci-dessus : 30 - 400 MHz, 400 MHz - 2 GHz et 2 à 300 GHz.

La densité de puissance incidente S_{inc} est répertoriée dans les trois gammes de fréquences qui nous intéressent, et nous utiliserons S_{inc} pour calculer la distance de sécurité par rapport au champ de CEM rayonné par une antenne. La distance de sécurité est la distance à laquelle la densité de puissance S_{inc} est égale aux valeurs publiées dans le tableau 1. Cette distance est également appelée "distance de conformité" aux CEM. Si l'on s'approche plus près que la distance de conformité, l'homme risque d'être exposé à des rayonnements EMF nocifs provenant d'une antenne.

Sur la base des valeurs du tableau 1, nous présentons la variation de S_{inc} en fonction de la fréquence dans la gamme 150 MHz - 40 GHz :

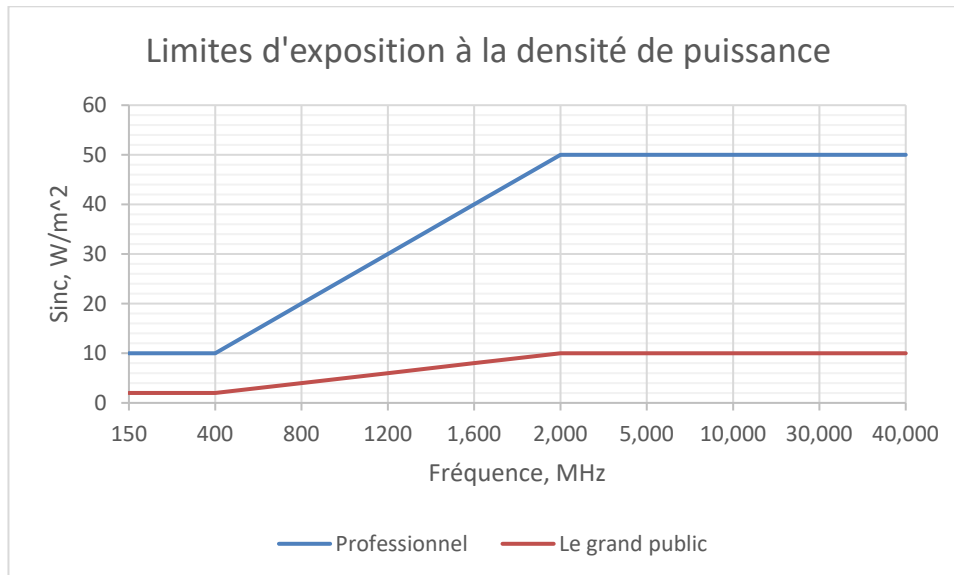


Figure 1 : Limites d'exposition aux CEM de la densité de puissance de l'ICNIRP pour les professionnels et le grand public.

La limite d'exposition professionnelle aux CEM est cinq fois supérieure à la limite d'exposition du grand public. Les limites professionnelles sont plus élevées parce que les personnes exposées professionnellement sont exposées aux rayonnements CEM dans des conditions contrôlées liées à leurs fonctions professionnelles et sont formées pour être conscientes des risques potentiels liés aux CEM de radiofréquence et pour appliquer des mesures appropriées d'atténuation des dommages.

Bien que l'ICNIRP recommande des limites d'exposition, elle n'a pas le pouvoir de les imposer aux gouvernements locaux. Celles-ci décident elles-mêmes d'accepter la recommandation ou de fixer leurs propres limites d'exposition.

2.2 LIMITES D'EXPOSITION DES AUTORITÉS LOCALES

Les limites d'exposition aux CEM au niveau mondial peuvent être classées en trois groupes distincts. Le premier groupe applique des limites de rayonnement CEM basées sur les recommandations de l'ICNIRP (ou similaires, IEEE c.95-1999), avec ou sans légères modifications. Les pays appartenant au premier groupe sont les États-Unis, le Canada et la plupart des pays d'Europe occidentale.

Le second groupe applique des limites de rayonnement CEM basées sur des documents scientifiques de la Chine et de la Russie qui utilisent une méthodologie différente de celle des documents scientifiques examinés par l'ICNIRP. Ces limites se situent à quelques pour cent de celles de l'ICNIRP et imposent donc des limites de rayonnement beaucoup plus strictes. Les pays appartenant au deuxième groupe sont la Russie, la Chine, l'Inde et certains pays d'Europe de l'Est. Contrairement aux limites de l'ICNIRP, ces limites ne sont pas conçues pour protéger contre l'augmentation de la température corporelle lors d'une exposition à court terme aux CEM. Elles partent plutôt du principe que l'exposition à long terme à de faibles niveaux d'énergie RF provoque des maux de tête, de la fatigue, de l'irritabilité, des troubles du sommeil et des vertiges. Les limites d'exposition en vigueur dans la Fédération de Russie proviendraient d'une étude sur les effets d'une exposition quotidienne de 3 heures à de faibles niveaux de radiofréquences sur des animaux de laboratoire [3].

Le troisième groupe applique, à titre de précaution, des limites de rayonnement CEM faibles à proximité des écoles, des terrains de jeux, des crèches et des maisons de retraite, car les occupants sont considérés comme les plus vulnérables aux rayonnements CEM. Ce groupe applique des seuils de CEM similaires aux limites de rayonnement de la CIPRNI dans d'autres zones accessibles à l'ensemble de la population. La Suisse, l'Italie et la Croatie font partie de ces pays.

La limite de la densité de puissance du rayonnement électromagnétique (W/m^2) pour les trois groupes est indiquée dans le tableau 2 [4], [5], [6]. Seule la limite la plus basse est indiquée, même si elle ne s'applique qu'à certaines zones, telles que les maisons de retraite ou les jardins d'enfants.

Pays	900 MHz	1800 MHz	2100 MHz
ICNIRP	4.5	9	10
Autriche	4.5	9	10
Bulgarie	0.1	0.1	0.1
Croatie	0.72	1.4	1.7
Chypre	4.5	9	10
République tchèque	4.5	9	10
Estonie	4.5	9	10
Finlande	4.5	9	10
France	4.5	9	10
Allemagne	4.5	9	10
Grèce	2.7	5.4	6
Hongrie	4.5	9	10
Irlande	4.5	9	10
Italie	0.1	0.1	0.1
Lituanie	0.45	0.9	1
Luxembourg	4.5	9	10
Malte	4.5	9	10
Pologne	0.1	0.1	0.1
Portugal	4.5	9	10
Roumanie	4.5	9	10
Slovaquie	4.5	9	10
Slovénie	0.45	0.9	1
Espagne	4.5	9	10
Suède	4.5	9	10
Royaume-Uni	4.5	9	10
Australie	4.5	9	10
Chine	0.4	0.4	0.4
Inde	0.45	0.9	1.1
Japon	6	10	10
Russie	0.1	0.1	0.1
Suisse	0.045	0.095	0.095
ÉTATS-UNIS	6	10	10

Tableau 2 : Limites de rayonnement de la densité de puissance des CEM du grand public (S_{inc}) en W/m^2 , pour l'UE et certains pays industrialisés non membres de l'UE [4], [5], [6].

Le tableau 2 montre que la limite de rayonnement de la densité de puissance S_{inc} varie considérablement d'un pays

à l'autre. Il y a donc peu d'espoir que l'on parvienne rapidement à une harmonisation mondiale des rayonnements CEM. Il est important de noter que, selon les lignes directrices de l'INCIRP (tableau 1), la limite de rayonnement ne change pas au-dessus de 2 GHz. Ainsi, les réseaux mobiles à ondes millimétriques 5G ne sont pas intrinsèquement plus dangereux pour la santé humaine que les réseaux 4G existants fonctionnant à 2,1, 2,6 ou 3,5 GHz.

3 CALCUL DU RAYONNEMENT EMF ET DE LA CONFORMITÉ EMF

3.1 ANTENNES À SOURCE PONCTUELLE

La plupart des sources de rayonnement dans les réseaux mobiles sont de grandes antennes panneaux (à l'extérieur) et de petites antennes omnidirectionnelles et directionnelles à l'intérieur. Il s'agit de sources de rayonnement ponctuelles, dont le champ électrique décroît comme $\sim 1/d$ dans le champ lointain, où d est la distance du point d'observation par rapport au centre de l'antenne. Le champ électrique au récepteur E est la somme du champ électrique direct E_d qui parcourt la distance d entre l'émetteur et le récepteur, et des N champs réfléchis E_r qui parcourent la distance R_i entre l'émetteur et le récepteur. En utilisant les coordonnées polaires, nous pouvons écrire le champ électrique résultant E comme suit :

$$E(d) = E_{direct} + \sum E_{reflected} \sim E_0 \left(G(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkd}}{d} + \sum_{i=1}^N \Gamma_i(\theta) G_i(\theta, \varphi) \frac{e^{-jkR_i}}{R_i} \right) \quad (1)$$

Où E_0 est l'amplitude du champ électrique à l'entrée de l'antenne, $G(\theta, \alpha)$ est le gain de l'antenne et $\Gamma(\theta)$ est le coefficient de réflexion de la surface réfléchi. Les champs électriques directs et réfléchis peuvent être calculés à l'aide d'un outil de conception et de planification RF qui utilise le Ray Tracing, tel qu'iBwave Design.

La densité de puissance S à la distance d de l'antenne peut être exprimée comme suit :

$$S = \frac{|E(d)|^2}{Z_0} = \frac{E_0^2}{Z_0} \left| G(\theta, \alpha) \frac{e^{-jkd}}{d} + \sum_{i=1}^N \Gamma_i(\theta) G_i(\theta, \alpha) \frac{e^{-jkR_i}}{R_i} \right|^2 \quad (2)$$

Où Z_0 est l'impédance de l'espace libre. En termes de puissance P_0 au port de l'antenne, la densité de puissance S est :

$$S = \frac{P_0}{4\pi} \left| G(\theta, \alpha) \frac{e^{-jkd}}{d} + \sum_{i=1}^N \Gamma_i(\theta) G_i(\theta, \alpha) \frac{e^{-jkR_i}}{R_i} \right|^2 \quad (3)$$

Le gain d'antenne G est tridimensionnel et, pour les antennes directionnelles, sa crête se situe le long de la direction perpendiculaire au panneau d'antenne. Cette direction perpendiculaire au panneau d'antenne est également appelée côté large de l'antenne, illustré par la ligne jaune dans la figure 2.

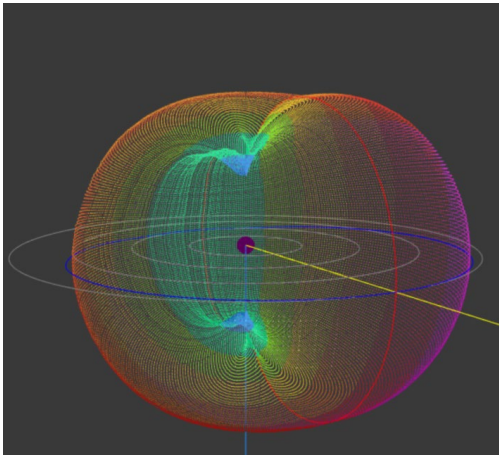


Figure 2 : Diagramme d'antenne directionnel tridimensionnel, avec antenne large le long de la ligne jaune

Le gain de l'antenne varie dans l'espace et, en coordonnées polaires, cette variation est fonction de l'angle horizontal α et de l'angle vertical θ . Le gain maximal, qui est toujours indiqué sur la fiche technique de l'antenne, se situe dans la direction du côté large, où $\alpha = 0^\circ$ et $\theta = 0^\circ$. Les diagrammes d'antenne bidimensionnels appelés diagrammes d'antenne verticaux ($\alpha = 0^\circ$) et horizontaux ($\theta = 0^\circ$) (ou "coupes") sont également indiqués dans les fiches techniques des antennes, comme le montre la figure 3.

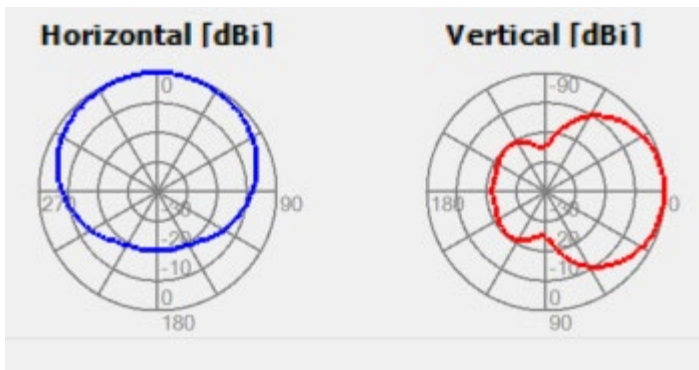


Figure 3 : Diagrammes d'antenne horizontaux et verticaux bidimensionnels tirés du diagramme d'antenne tridimensionnel de la figure 2.

La distance de conformité au champ lointain est une distance d , conformément à l'équation (3), à laquelle la densité de puissance S est égale à la limite de rayonnement EMF S_{inc} . Comme S est fonction du gain d'antenne G et du coefficient de réflexion Γ , la distance d n'est pas une constante, mais une fonction des coordonnées polaires α et θ . La distance d_{max} de conformité au rayonnement électromagnétique maximal est dans la direction du gain maximal de l'antenne, $G = G_0$. Pour une conformité de rayonnement EMF très conservatrice, nous pouvons supposer que la conformité de rayonnement EMF est d_{max} dans toutes les directions à partir de l'antenne. Cette hypothèse fonctionne bien pour les antennes omnidirectionnelles d'intérieur, car elles émettent une quantité similaire de rayonnement électromagnétique dans toutes les directions. Toutefois, cette hypothèse ne tient pas pour les réseaux d'antennes très directives, tels que les réseaux m-MIMO, qui seront abordés plus loin dans le présent document.

3.2 RÉSEAUX MULTIBANDES

Dans les réseaux sans fil multibandes, nous devons calculer la distance de conformité lorsque des antennes d'émission pour plusieurs bandes sont colocalisées et que tous les réseaux émettant dans différentes bandes de spectre sont actifs. C'est généralement le cas lorsqu'un réseau prend en charge plusieurs technologies : GSM, HSPA, LTE et 5G NR. Pour ce faire, nous introduisons un nouveau paramètre, R_f , qui est un rapport entre la densité de

puissance mesurée à une distance d et à une fréquence f , et la limite d'exposition S_{inc} à la fréquence f :

$$R_f = \frac{\text{Calculated } S \text{ distance } d \text{ and frequency } f}{\text{Exposure limit } S_{inc} \text{ at frequency } f} \quad (4)$$

R_f est calculé séparément pour chaque fréquence active du réseau. Si le réseau comporte 5 bandes différentes, par exemple 700, 850, 1900 MHz et 3,5 et 28 GHz, il y aura cinq valeurs R_f à calculer. L'objectif est de trouver la distance d de conformité au rayonnement EMF à laquelle la somme des cinq valeurs R_f est égale à 1.

$$\sum_{i=1}^5 R_f = 1 \quad (5)$$

Il s'agit d'un processus itératif, qui peut être décrit comme la recherche d'une racine de la fonction $f(x)=0$. Tout d'abord, choisissez une distance d_0 comme point de départ, calculez R_f à chaque fréquence en utilisant la distance d_0 , additionnez tous les R_f et vérifiez si la somme est égale à 1, dans une certaine tolérance. Si ce n'est pas le cas, la nouvelle distance d_1 est $2d_0$ si la somme est inférieure à 1, et si elle est supérieure à 1, $d_1 = d_0 / 2$. L'étape suivante consiste à recalculer R_f à chaque fréquence et à vérifier si la somme est égale à 1. Le processus est répété jusqu'à ce que nous trouvions une distance d pour laquelle la somme est égale à 1, dans une certaine tolérance.

3.3 COMMENT LE SPECTRE ET LA TECHNOLOGIE AFFECTENT LA DISTANCE DE CONFORMITÉ AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La distance de conformité du rayonnement EMF est fonction de la puissance d'entrée, du gain d'antenne, de la réflexion sur la surface et de la densité de puissance. Selon [2], la densité de puissance incidente S doit être moyennée dans le temps, et donc tous les paramètres qui contribuent à S doivent également être moyennés. Cela doit être fait si :

- Le spectre est partagé entre la liaison montante et la liaison descendante (systèmes TDD).
- La puissance d'entrée fluctue en raison de la variation de la charge cellulaire au niveau de l'eNodeB en temps réel (3G, 4G, 5G).
- La configuration de l'antenne fluctue en temps réel (MIMO massif)

3.3.1 TDD SYSTEMS

Lorsque la liaison montante et la liaison descendante partagent le spectre, la puissance d'entrée doit être moyennée dans le temps pour tenir compte de la période pendant laquelle la liaison descendante n'émet pas. Il faut connaître la durée d'émission de la liaison descendante en tant que fraction de la durée d'émission totale. Ensuite, la puissance moyenne \bar{P}_0 en fonction de la puissance nominale P_0 est la suivante :

$$\bar{P}_0 = P_0 \frac{T_{DL}}{T_{FRAME}} \quad (9)$$

Où P_0 est la puissance nominale de l'amplificateur en watts, T_{DL} est la durée de transmission de la liaison descendante dans une trame, et T_{FRAME} est la durée de la trame.

3.3.2 eNodeB CELL LOAD

La puissance d'émission d'un eNodeB fluctue en fonction du nombre d'UE qui émettent/reçoivent le signal. Le rapport entre le nombre d'UE actifs et le nombre maximal théorique d'UE actifs est appelé "charge cellulaire" de l'eNodeB. Les opérateurs conçoivent généralement leurs réseaux de manière à ce que la charge moyenne des cellules soit de l'ordre de 50 à 70 % pendant les heures de pointe. Un autre paramètre important est l'overhead, qui

est une fraction de la puissance d'émission réservée à la signalisation. Pour le LTE, il se situe entre 10 et 30 %, tandis que pour le 5G NR, il se situe entre 14 et 18 %. La puissance moyenne \bar{P}_0 en fonction de la puissance nominale P_0 est la suivante :

$$\bar{P}_0 = P_0 * (OH + (1 - OH) * CL) \quad (10)$$

Où OH est l'overhead en pourcentage, CL est la charge de la cellule en pourcentage, et P_0 est la puissance nominale de l'amplificateur en Watts.

3.3.3 MIMO MASSIVE

Les antennes MIMO massives (m-MIMO) sont des réseaux d'antennes bidimensionnels à formation de faisceaux qui forment un diagramme d'antenne à faisceau étroit et à gain élevé en direction d'un utilisateur. Certaines antennes m-MIMO sont statiques, ce qui signifie que chaque faisceau généré couvre une zone fixe d'un secteur de 120°. D'autres sont dynamiques, ce qui signifie qu'un faisceau suit un utilisateur en temps réel lorsqu'il se déplace à l'intérieur d'un secteur. La figure 5 montre à quoi ressemblerait un diagramme d'antenne m-MIMO statique avec 35 faisceaux si tous les faisceaux transmettaient un signal en même temps.

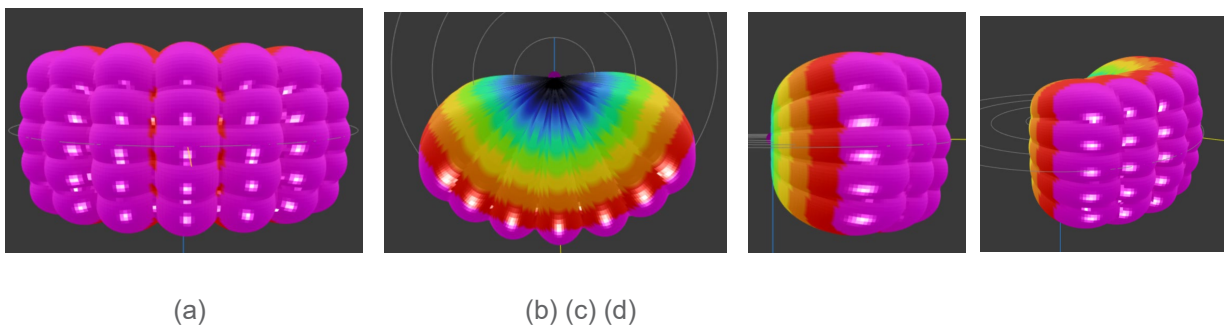


Figure 5 : (a) côté large (b) coupe horizontale (c) coupe verticale (d) vue latérale du diagramme d'antenne m-MIMO statique, tous les faisceaux étant actifs

Une formule permettant de calculer le gain d'un faisceau m-MIMO individuel est $G_{m-MIMO} = G_{antenna} + 10\log_{10}(N_{array})$, où $G_{antenna}$ est le gain de l'antenne individuelle dans le réseau et N_{array} est le nombre d'antennes. Si $G_{antenna} = 0$ dBi et $N_{array} = 64$, alors $G_{m-MIMO} = 18$ dBi.

La PIRE est la puissance isotrope rayonnée équivalente et est le produit de la puissance d'entrée P_0 et du gain d'antenne G . Dans le contexte du m-MIMO, la PIRE est définie par faisceau, de sorte que dans l'exemple ci-dessus, avec 35 faisceaux, nous aurions 35 PIRE. Toutefois, ces PIRE ne sont pas constantes dans le temps, car il n'est pas prudent que tous les faisceaux m-MIMO émettent en même temps, car cela dégraderait le SINR et réduirait le débit à l'UE. Seuls quelques faisceaux m-MIMO sont actifs à un moment donné, et la décision d'activer ou de désactiver les faisceaux est prise en temps réel, dans le but de réduire les interférences. Ainsi, le diagramme de rayonnement m-MIMO change en temps réel, et la commutation constante des faisceaux activés et désactivés signifie que la PIRE par faisceau doit être moyennée.

Selon [7], la puissance PIRE moyenne en watts par faisceau m-MIMO ne représente que 25 % de la PIRE instantanée. Cette référence indique que la valeur de 25 % est une estimation prudente et prend également en compte une répartition DL/UL typique dans un réseau TDD. Dans l'exemple ci-dessus, si l'alimentation de l'antenne est de 20 dBm et que le gain m-MIMO du 64 array par faisceau est de 18 dBi, la PIRE instantanée par faisceau est de 38 dBm. La réduction de la transmission de la PIRE en watts de 100 % à 25 % correspond à une réduction de 6

dB de la puissance sur l'échelle logarithmique, de sorte que la PIRE moyenne par faisceau est de $38 - 6 = 32$ dBm.

3.4 EXEMPLES DE CALCUL DE LA CONFORMITÉ AUX CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES - RÉSEAUX INTÉRIEURS

3.4.1 ÉTATS-UNIS

Selon le tableau 2, les États-Unis ont les limites d'émission de densité de puissance les plus élevées parmi les pays énumérés. La distance de conformité devrait donc être plus courte aux États-Unis que dans les autres pays énumérés dans le tableau. La figure 6 présente un exemple de calcul de la distance de conformité aux CEM dans 5 bandes de fréquences aux États-Unis (700, 850, 1900 MHz et 3,5 et 28 GHz), avec les limites de rayonnement imposées par la FCC [6], conformément au rapport sur les rayonnements CEM généré par iBwave Design.

Antenna ID	System ID	Composite power		Power density (W/Sq. m)
		Before ant. (dBm)	After ant. (EIRP) (dBm)	
TCVR1	System1	23.01	23.01	10.0000
TCVR1	System2	23.01	35.01	10.0000
TCVR1	System3	23.01	23.01	4.9733
TCVR1	System4	20.00	20.00	5.9600
TCVR1	System5	23.01	23.01	10.0000

EMF statistics (safety distance)						
System ID	Average (cm)	Std. dev. (cm)	Minimum		Maximum	
			Antenna ID	(cm)	Antenna ID	(cm)
System1	3.99	-	TCVR1	3.99	TCVR1	3.99
System2	15.88	-	TCVR1	15.88	TCVR1	15.88
System3	5.66	-	TCVR1	5.66	TCVR1	5.66
System4	3.65	-	TCVR1	3.65	TCVR1	3.65
System5	3.99	-	TCVR1	3.99	TCVR1	3.99

System legend
iBwave / 5G NR / 3.5 GHz / TDD - 10 MHz - n78 / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / 5G NR / 28 GHz / TDD - 400 MHz - n257 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / LTE / 700 MHz / FDD - 10 MHz - Band 12 / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / GSM / 850 MHz - Cellular / ALL / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / HSPA PLUS / 1900 MHz - PCS / All 5 MHz / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1

Figure 6 : Rapport de conformité aux CEM pour un système sans fil d'intérieur multitechnologie et multibande (marché américain).

Le GSM (système 4) est un système SISO. HSPA+, LTE et 5G NR sont des systèmes MIMO 2x2. 5G NR à 28 GHz (système 2) est un système m-MIMO à polarisation croisée (panneau 8x8x2).

Alors que tous les amplificateurs de puissance transmettent 20 dBm dans les ports d'antenne, les systèmes 2x2 MIMO ont deux amplificateurs, chacun alimentant une antenne à polarisation croisée. Pour le calcul de la conformité du rayonnement EMF, nous pouvons considérer les deux amplificateurs comme un seul amplificateur transmettant le double de la puissance (23 dBm). Par conséquent, tous les systèmes, à l'exception du GSM (système 4), indiquent 23 dBm comme puissance d'entrée.

Toutes les antennes sont des antennes omnidirectionnelles à 0 dBi, à l'exception de l'antenne m-MIMO à 28 GHz, qui a un gain de 18 dBi par faisceau. Une réduction du gain m-MIMO de 6 dB est appliquée à la PIRE du système 2,

comme expliqué au point 3.3.3.

La figure 6 présente les distances de conformité pour chaque technologie/bande. Cependant, nous devons calculer la distance de conformité lorsque toutes les technologies/bandes sont actives. En utilisant l'algorithme décrit à la section 3.2, nous obtenons le résultat suivant, selon le rapport de conformité au rayonnement EMF généré par iBwave Design :

Antenna ID	System ID	Composite power		Power density (W/Sq. m)
		Before ant. (dBm)	After ant. (EIRP) (dBm)	
TCVR1	System1	23.01	23.01	0.4831
TCVR1	System2	23.01	35.01	7.6571
TCVR1	System3	23.01	23.01	0.4831
TCVR1	System4	20.00	20.00	0.2416
TCVR1	System5	23.01	23.01	0.4831
TCVR1	All systems	29.54	35.88	9.3480

EMF statistics (safety distance)						
System ID	Average (cm)	Std. dev. (cm)	Minimum		Maximum	
			Antenna ID	(cm)	Antenna ID	(cm)
System1	18.15	-	TCVR1	18.15	TCVR1	18.15
System2	18.15	-	TCVR1	18.15	TCVR1	18.15
System3	18.15	-	TCVR1	18.15	TCVR1	18.15
System4	18.15	-	TCVR1	18.15	TCVR1	18.15
System5	18.15	-	TCVR1	18.15	TCVR1	18.15

System legend
iBwave / 5G NR / 3.5 GHz / TDD - 10 MHz - n78 / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / 5G NR / 28 GHz / TDD - 400 MHz - n257 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / LTE / 700 MHz / FDD - 10 MHz - Band 12 / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / GSM / 850 MHz - Cellular / ALL / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / HSPA PLUS / 1900 MHz - PCS / All 5 MHz / Sector number:: 2 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1

Figure 7 : Rapport de conformité EMF composite lorsque les 5 systèmes sont actifs (marché américain)

Le premier tableau de la figure 7 indique la valeur de la densité de puissance pour chaque système à la distance de conformité composite. Le second tableau indique la valeur réelle de la distance de conformité composite, $d = 18,15$ cm.

Il est intéressant de savoir quelle est l'influence de la technologie m-MIMO sur la distance de conformité. Pour répondre à cette question, nous avons calculé la distance de conformité lorsque seuls les systèmes NR non-5G sont actifs (GSM, HSPA+, LTE), puis lorsque tous les systèmes à l'exception du 28 GHz (m-MIMO) sont actifs. Nous comparons les résultats côte à côte, en centimètres, dans le tableau 3.

	Systèmes non 5G uniquement	Tous les systèmes sont actifs sauf m-MIMO	Tous les systèmes sont actifs, y compris m-MIMO
Distance de conformité, cm	7.8	8.8	18.15

Tableau 3 : Distance de conformité, en centimètres, avec et sans réseaux 5G NR (USA)

Il est clair que le m-MIMO 5G NR a une influence significative sur la distance de conformité au rayonnement EMF sur le marché américain. La distance de conformité a augmenté de 110 % lorsque la m-MIMO 28 GHz a été ajoutée à un système sans fil intérieur multitechnologie et multibande.

3.4.2 SLOVÉNIE

Pour le deuxième exemple, nous choisissons la Slovénie, car la limite de rayonnement de sa densité de puissance S_{inc} est un dixième de celle de la CIPRNI, comme le montre le tableau 2. Le réseau intérieur choisi est similaire, à l'exception de quelques changements dans les bandes de fréquences : 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 3,5 GHz et 28 GHz. Les technologies sont les mêmes : GSM, HSPA+, LTE et 5G NR. La technologie GSM est SISO. Les technologies HSPA+, LTE et 5G NR sont 2x2 MIMO. À 28 GHz, nous utilisons la technologie m-MIMO polarisée avec un panneau 8x8x2. Le rapport de conformité EMF généré par iBwave Design pour les différents systèmes est présenté dans la figure 8 ci-dessous :

Antenna ID	System ID	Composite power		Power density (W/Sq. m)
		Before ant. (dBm)	After ant. (EIRP) (dBm)	
TCVR1	System1	23.01	23.01	1.0000
TCVR1	System2	23.01	35.01	1.0000
TCVR1	System3	20.00	20.00	0.4500
TCVR1	System4	23.01	23.01	0.9000
TCVR1	System5	23.01	23.01	1.0000

System ID	EMF statistics (safety distance)					
	Average (cm)	Std. dev. (cm)	Minimum		Maximum	
			Antenna ID	(cm)	Antenna ID	(cm)
System1	12.62	-	TCVR1	12.62	TCVR1	12.62
System2	50.22	-	TCVR1	50.22	TCVR1	50.22
System3	13.30	-	TCVR1	13.30	TCVR1	13.30
System4	13.30	-	TCVR1	13.30	TCVR1	13.30
System5	12.62	-	TCVR1	12.62	TCVR1	12.62

System legend
iBwave / 5G NR / 3.5 GHz / TDD - 10 MHz - n78 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / 5G NR / 28 GHz / TDD - 50 MHz - n257 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / GSM / 900 MHz - GSM / P-GSM900 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / LTE / 1800 MHz - DCS / FDD - 10 MHz - Band 3 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / HSPA PLUS / 2100 MHz - UMTS / HSPA2100 - block I 5 MHz / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1

Figure 8 : Rapport de conformité aux CEM pour un système sans fil intérieur multitechnologie et multibande (Slovénie).

Comme dans l'exemple des États-Unis, la technologie 5G NR m-MIMO présente la plus grande distance de conformité. Le rapport de conformité EMF lorsque tous les systèmes sont actifs est présenté dans la figure 9 :

Antenna ID	System ID	Composite power		Power density (W/Sq. m)
		Before ant. (dBm)	After ant. (EIRP) (dBm)	
TCVR1	System1	23.01	23.01	0.0498
TCVR1	System2	23.01	35.01	0.7896
TCVR1	System3	20.00	20.00	0.0249
TCVR1	System4	23.01	23.01	0.0498
TCVR1	System5	23.01	23.01	0.0498
TCVR1	All systems	29.54	35.88	0.9640

EMF statistics (safety distance)						
System ID	Average (cm)	Std. dev. (cm)	Minimum		Maximum	
			Antenna ID	(cm)	Antenna ID	(cm)
System1	56.52	-	TCVR1	56.52	TCVR1	56.52
System2	56.52	-	TCVR1	56.52	TCVR1	56.52
System3	56.52	-	TCVR1	56.52	TCVR1	56.52
System4	56.52	-	TCVR1	56.52	TCVR1	56.52
System5	56.52	-	TCVR1	56.52	TCVR1	56.52

System legend	
iBwave / 5G NR / 3.5 GHz / TDD - 10 MHz - n78 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / 5G NR / 28 GHz / TDD - 50 MHz - n257 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / GSM / 900 MHz - GSM / P-GSM900 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / LTE / 1800 MHz - DCS / FDD - 10 MHz - Band 3 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / HSPA PLUS / 2100 MHz - UMTS / HSPA2100 - block I 5 MHz / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	

Figure 9 : Rapport de conformité EMF composite lorsque les 5 systèmes sont actifs (Slovénie)

Comparons maintenant cette distance de conformité avec la distance de conformité lorsque seuls les réseaux non 5G NR sont actifs, et lorsque tous les réseaux, à l'exception du m-MIMO 5G NR à 28 GHz, sont actifs. Les résultats sont présentés dans le tableau 4, en centimètres.

	Systèmes non 5G uniquement	Tous les systèmes sont actifs sauf m-MIMO	Tous les systèmes sont actifs, y compris m-MIMO
Distance de conformité, cm	22.6	25.9	56.5

Tableau 4 : Distance de conformité, en centimètres, avec et sans réseaux 5G NR (Slovénie)

Comme dans l'exemple des États-Unis, l'ajout d'un système 5G NR m-MIMO à 28 GHz a augmenté la distance de conformité de plus de 110 %.

3.4.3 FÉDÉRATION DE RUSSIE

Le dernier exemple est celui d'un pays qui a la limite de rayonnement Sinc la plus restrictive - la Fédération de Russie. D'après le tableau 2, la limite Sinc n'est que de 0,1 W/m² pour toutes les fréquences concernées. On peut donc s'attendre à ce que la limite de conformité des rayonnements CEM soit la plus élevée dans la Fédération de Russie.

Pour faciliter la comparaison entre les trois pays, nous utilisons le même système multitechnologique multibande en Fédération de Russie qu'en Slovénie. Le rapport de conformité EMF généré par iBwave Design pour les différents systèmes est présenté dans la figure 10.

Antenna ID	System ID	Composite power		Power density (W/Sq. m)
		Before ant. (dBm)	After ant. (EIRP) (dBm)	
TCVR1	System1	23.01	23.01	0.1000
TCVR1	System2	23.01	35.01	0.1000
TCVR1	System3	20.00	20.00	0.1000
TCVR1	System4	23.01	23.01	0.1000
TCVR1	System5	23.01	23.01	0.1000

EMF statistics (safety distance)						
System ID	Average (cm)	Std. dev. (cm)	Minimum		Maximum	
			Antenna ID	(cm)	Antenna ID	(cm)
System1	39.89	-	TCVR1	39.89	TCVR1	39.89
System2	158.82	-	TCVR1	158.82	TCVR1	158.82
System3	28.21	-	TCVR1	28.21	TCVR1	28.21
System4	39.89	-	TCVR1	39.89	TCVR1	39.89
System5	39.89	-	TCVR1	39.89	TCVR1	39.89

System legend	
iBwave / 5G NR / 3.5 GHz / TDD - 10 MHz - n78 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / 5G NR / 28 GHz / TDD - 50 MHz - n257 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / GSM / 900 MHz - GSM / P-GSM900 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / LTE / 1800 MHz - DCS / FDD - 10 MHz - Band 3 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	
iBwave / HSPA PLUS / 2100 MHz - UMTS / HSPA2100 - block I 5 MHz / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1	

Figure 10 : Rapport de conformité aux CEM pour un système sans fil intérieur multitechnologie et multibande (Fédération de Russie)

En comparant la figure 8 et la figure 10, on constate que la distance de rayonnement des CEM est environ trois fois plus grande en Fédération de Russie qu'en Slovénie, pour les bandes de fréquences où la densité de puissance est dix fois plus faible qu'en Slovénie. Ce résultat est prévisible, car la distance de conformité est l'inverse de la racine carrée de la densité de puissance.

Le rapport de conformité EMF lorsque tous les systèmes sont actifs est présenté à la figure 11.

Antenna ID	System ID	Composite power		Power density (W/Sq. m)
		Before ant. (dBm)	After ant. (EIRP) (dBm)	
TCVR1	System1	23.01	23.01	0.0052
TCVR1	System2	23.01	35.01	0.0819
TCVR1	System3	20.00	20.00	0.0026
TCVR1	System4	23.01	23.01	0.0052
TCVR1	System5	23.01	23.01	0.0052
TCVR1	All systems	29.54	35.88	0.1000

System ID	EMF statistics (safety distance)					
	Average (cm)	Std. dev. (cm)	Minimum Antenna ID	(cm)	Maximum Antenna ID	(cm)
System1	175.48	-	TCVR1	175.48	TCVR1	175.48
System2	175.48	-	TCVR1	175.48	TCVR1	175.48
System3	175.48	-	TCVR1	175.48	TCVR1	175.48
System4	175.48	-	TCVR1	175.48	TCVR1	175.48
System5	175.48	-	TCVR1	175.48	TCVR1	175.48

System legend
iBwave / 5G NR / 3.5 GHz / TDD - 10 MHz - n78 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / 5G NR / 28 GHz / TDD - 50 MHz - n257 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / GSM / 900 MHz - GSM / P-GSM900 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / LTE / 1800 MHz - DCS / FDD - 10 MHz - Band 3 / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1
iBwave / HSPA PLUS / 2100 MHz - UMTS / HSPA2100 - block I 5 MHz / Sector number:: 1 / Nb. of channels: 1 / Nb. of sources: 1

Figure 11 : Rapport de conformité EMF composite lorsque les 5 systèmes sont actifs (Fédération de Russie)

Répétons maintenant l'exercice en comparant cette distance avec la distance de conformité lorsque seuls les réseaux non 5G NR sont actifs, et lorsque tous les réseaux sauf le m-MIMO 5G NR à 28 GHz sont actifs. Les résultats sont présentés dans le tableau 5, en centimètres.

	Systèmes non 5G uniquement	Tous les systèmes sont actifs sauf m-MIMO	Tous les systèmes sont actifs, y compris m-MIMO
Distance de conformité, cm	63.1	74.6	175.5

Tableau 5 : Comparaison de la distance de conformité (cm) avec et sans réseaux 5G NR (Fédération de Russie)

L'augmentation de la conformité de la distance lorsque le m-MIMO 5G NR est ajouté est la plus élevée parmi les trois pays : 135%.

Résumons maintenant les résultats du tableau 3-5 :

Distance de conformité, cm	ÉTATS-UNIS	Slovénie	Russie
Systèmes non-5G uniquement	7.8	22.6	63.1
Tous les systèmes sauf m-MIMO	8.8	25.9	74.6
Tous les systèmes, y compris m-MIMO	18.15	56.5	175.5

Tableau 6 : Résumé de la distance de conformité aux CEM, en centimètres, pour les systèmes intérieurs multitechnologiques et multibandes dans les trois pays

Comme on pouvait s'y attendre, le pays où la limite de densité de puissance est la plus stricte (Fédération de Russie) présente la plus grande distance de conformité. Si l'on compare les technologies individuelles dans un système multitechnologique multibande, la 5G NR avec la technologie m-MIMO déployée a la plus grande influence sur la distance de conformité.

3.5 conformité aux rayonnements électromagnétiques dans le contexte du m-MIMO 5G NR

Voyons maintenant ce que signifie réellement la distance de conformité aux champs électromagnétiques dans le contexte d'un réseau m-MIMO 5G NR. Dans la section 3.1, nous avons indiqué que pour les réseaux 2G, 3G et 4G, la distance de conformité est un point dans la direction du côté large, où le gain de l'antenne a sa valeur maximale, A_g . Pour un système m-MIMO, il s'agit d'une collection bidimensionnelle de points, chaque point correspondant à un faisceau m-MIMO individuel.

Comme le montre la figure 5, le système m-MIMO que nous avons utilisé dans les exemples de calcul de la distance de conformité comporte 35 faisceaux individuels : 7 dans le plan horizontal et 5 dans le plan vertical. Chaque faisceau a une largeur de 15° , et ces 35 faisceaux couvrent donc un angle de 105° dans le plan horizontal et un angle de 75° dans le plan vertical. Ainsi, une distance de conformité pour un système m-MIMO est en fait une zone d'exclusion tridimensionnelle. Cette zone est illustrée dans la figure 12 ci-dessous.

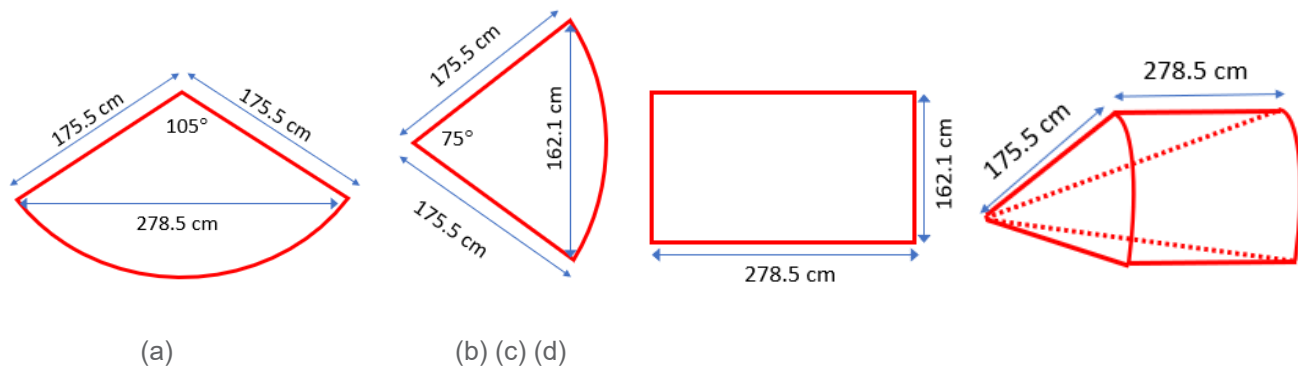


Figure 12 : (a) coupe horizontale (b) coupe verticale (c) vue large (d) vue 3D de la zone d'exclusion de la conformité EMF m-MIMO

Les systèmes m-MIMO ont un diagramme d'antenne très directionnel. Ce diagramme augmente considérablement la distance de conformité dans la direction des faisceaux m-MIMO. Toutefois, en dehors de ces faisceaux, le rayonnement électromagnétique est faible. Le calcul de la seule distance de conformité est suffisant pour les antennes omnidirectionnelles, car ces antennes rayonnent pratiquement la même énergie électromagnétique dans toutes les directions. Toutefois, si l'on ne connaît que la distance de conformité EMF pour le m-MIMO et que l'on suppose qu'elle s'applique dans toutes les directions autour du panneau d'antenne, on surestime largement le rayonnement EMF nocif. La zone d'exclusion du rayonnement EMF du m-MIMO est une limite tridimensionnelle qui englobe tous les faisceaux du m-MIMO. À l'intérieur de cette zone, les faisceaux m-MIMO transmettent la quasi-totalité de l'énergie électromagnétique. En dehors de cette zone, les faisceaux transmettent très peu d'énergie et le niveau de rayonnement EMF est donc acceptable.

Le calcul des dimensions de la zone d'exclusion du rayonnement EMF nous donne une meilleure idée de l'endroit où le rayonnement EMF est excessif. Dans cet exemple particulier, au lieu de supposer que la distance de sécurité du rayonnement EMF est de 175 cm dans toutes les directions autour du panneau, nous avons localisé la zone de rayonnement nocif dans un rectangle de 278,5 x 162,1 cm, à 175,5 cm du panneau dans la direction du côté le plus large.

4 RÉSUMÉ

La question des rayonnements électromagnétiques nocifs a récemment fait l'objet de nombreux débats dans le contexte du déploiement du réseau 5G. Le principal organisme international qui s'occupe de ce sujet est la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP). Sur la base de recherches médicales scientifiques, elle définit des limites de rayonnement CEM, qui sont adoptées "telles quelles" par certains pays dans le monde. Cependant, de nombreux pays préfèrent imposer des limites plus strictes, 10 fois, voire 100 fois inférieures aux recommandations de la CIPRNI. Nous avons donné un aperçu des limites d'exposition aux CEM dans certains pays industrialisés du monde et les avons comparées les unes aux autres. Nous avons également expliqué la théorie qui sous-tend le calcul de la distance de conformité au rayonnement EMF. Nous avons examiné comment cette distance varie pour les réseaux multi-technologies multi-bandes dans les bâtiments dans quelques pays qui ont des limites d'exposition au rayonnement EMF très différentes. Nous avons également examiné comment l'ajout de réseaux 5G NR aux systèmes existants dans les bâtiments affecte la distance de conformité. Nous avons identifié le MIMO massif (m-MIMO) comme la technologie qui a le plus d'impact sur la distance de conformité. Nous avons également présenté le concept de zone d'exclusion du rayonnement EMF, son lien avec la distance de conformité et les cas où il est approprié d'utiliser la zone d'exclusion au lieu de la distance de conformité.

5 RÉFÉRENCES

[1] <https://www.icnirp.org/en/home/home-read-more.html>

[2] Lignes directrices de l'ICNIRP pour la limitation de l'exposition aux champs électromagnétiques (100 kHz à 300 GHz), Health Phys 118(5) : 483-524 ; 2020

[3] Foster KR : Exposure limits for radiofrequency energy : three models. Université de Pennsylvanie ; 1908. https://www.who.int/peh-emf/meetings/day2Varna_Foster.pdf

[4] Institut national pour la santé publique et l'environnement, ministère de la santé, du bien-être et du sport, Royaume des Pays-Bas : Comparaison des politiques internationales sur les champs électromagnétiques (champs de fréquence électrique et champs de radiofréquence) : <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Comparison%20of%20international%20policies%20on%20electromagnetic%20fields%202018.pdf>

[5] : Lignes directrices de Santé Canada sur l'exposition aux radiofréquences : Code de sécurité 6 : <http://www.bccdc.ca/resource-gallery/Documents/Guidelines%20and%20Forms/Guidelines%20and%20Manuals/EH/EH/Section13Final06062013.pdf>

[6] Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to RF Electromagnetic Fields (Évaluation de la conformité aux directives de la FCC relatives à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques RF), FCC OET Bulletin 65, Edition 97-01

[7] "Time-averaged Realistic Maximum Power levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio base stations using Massive MIMO", IEEE Access, vol. 5, pp 19711-19719, September 18th, 2017.

À propos d'iBwave

Les solutions iBwave, la norme en matière de planification de réseaux intérieurs convergents, sont à l'origine d'une expérience sans fil exceptionnelle dans les bâtiments, permettant à des milliards d'utilisateurs finaux et d'appareils de se connecter à l'intérieur d'un large éventail de lieux. En tant que référence mondiale de l'industrie, nos solutions logicielles permettent une planification, une conception et un déploiement plus intelligents de tout projet, indépendamment de sa taille, de sa complexité ou de sa technologie. En plus d'un logiciel innovant, nous sommes reconnus pour notre support de classe mondiale dans 100 pays, la base de données de composants la plus complète de l'industrie et un programme de certification bien établi. Pour plus d'informations, visitez : www.ibwave.com.