

Rapport du comité d'experts techniques sur les enjeux de coexistence dans les bandes 3,4 - 3,8 GHz ¹

Pour éclairer les questions techniques en rapport avec les réseaux mobiles, un comité d'experts techniques a été créé. Il rassemble des experts représentant les opérateurs de réseaux mobiles, des équipementiers, ainsi que des participants issus du monde académique et de l'ANFR. Sa présidence est assurée par Catherine Mancini, et son secrétariat par les services de l'Arcep. La composition du comité est décrite en Annexe 2 de ce document.

Dans la perspective de l'attribution de la bande 3,4 - 3,8 GHz pour la 5G, le comité d'expert a notamment examiné les enjeux de coexistence entre réseaux dans cette bande. Le présent rapport présente le résultat de ces travaux.

1 Présentation des enjeux de coexistence dans la bande 3,4 - 3,8 GHz

La bande 3,4 - 3,8 GHz est aujourd'hui partiellement attribuée à différents acteurs opérateurs de réseaux radio à très haut débit (THD radio) en LTE TDD ou de réseaux de boucle locale radio (BLR) en WiMAX TDD et FDD, voire LTE TDD, utilisant totalement ou partiellement les bandes de fréquences dans un certain nombre de départements métropolitains :

- Bande "THD Radio" : 3410 - 3460 MHz
- Bande "BLR2" : 3432,5 - 3447,5 MHz et 3532,5 - 3547,5 MHz
- Bande "BLR1" : 3465 - 3480 MHz et 3565 - 3580 MHz

La bande est aussi occupée par des réseaux qui utilisent des technologies TDD propriétaires conformes à la norme ETSI EN-302326, configurés avec des Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) inférieure à 30 dBm. L'analyse de la coexistence de ces réseaux fera l'objet d'un complément d'étude ultérieur.

Une partie de cette bande 3,4 - 3,8 GHz est aussi prévue d'être prochainement attribuée pour déployer les premiers réseaux 5G NR.

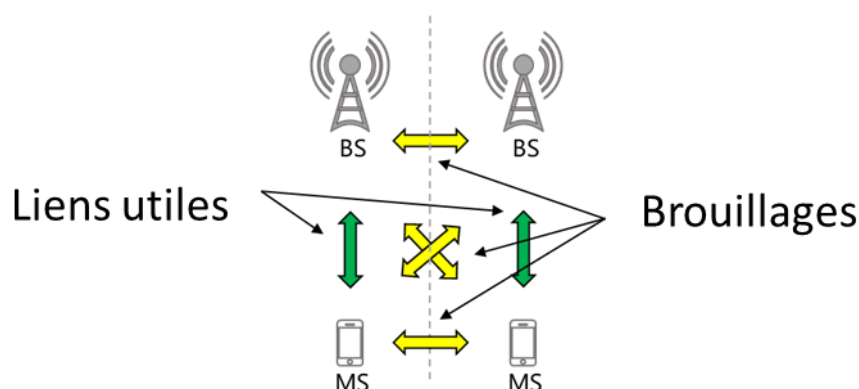
Tous les réseaux, existants et nouvellement déployés dans la bande de fréquences 3,4 - 3,8 GHz, devront pouvoir coexister en minimisant autant que faire se peut les potentiels impacts sur les performances de chacun d'eux.

L'usage de la bande en mode TDD nécessite à cet effet de mettre en place des techniques de coexistence entre plusieurs utilisateurs pour éviter les brouillages.

Avec l'utilisation des fréquences en mode FDD, l'écart duplex entre les fréquences du lien montant et celles du lien descendant constitue une bande de garde qui permet d'éliminer les risques de brouillages entre les deux sens des réseaux qui occupent des canaux adjacents par l'utilisation d'un filtre duplexeur.

¹ Le rapport ne traite pas les enjeux de coexistence avec le Service Fixe du Satellite et les systèmes régaliens, ainsi que de la problématique générale de coexistence aux frontières en mode TDD non synchronisé qui est traitée à la CEPT dans le cadre de la révision en cours de la recommandation REC(15)01.

Au contraire, le mode TDD dans lesquels les liens montant et descendant utilisent alternativement les mêmes fréquences peut créer des occurrences temporelles où deux réseaux sont l'un en émission, l'autre en réception, le premier jouant le rôle de brouilleur pour le second.



Cas de brouillage en mode TDD

À ce stade, trois solutions techniques principales sont identifiées pour permettre la coexistence de plusieurs opérateurs au sein de deux bandes de fréquences adjacentes exploitées en mode TDD pour des sites macro et *small cell outdoor*:

- la synchronisation des réseaux ;
- la séparation des réseaux (typiquement séparation géographique, telle qu'étudiée plus bas dans ce document) ;
- l'usage de bandes de garde et de filtres spécifiques par opérateur.

2 La synchronisation des réseaux

La synchronisation des réseaux est réalisée par l'adoption d'une horloge et d'une configuration de trame commune par tous les acteurs opérant dans la même zone géographique et dans la même bande. Précisons que les équipements TDD au sein d'un même opérateur sont toujours systématiquement synchronisés, faute de quoi les sites s'interféreraient entre eux. La problématique dont il est ici question concerne la synchronisation inter-opérateurs.

Dans le cas co-canal des réseaux de deux opérateurs, la synchronisation n'est pas suffisante pour permettre leur coexistence et une séparation spatiale des réseaux de l'ordre de grandeur couramment utilisée pour les réseaux FDD peut s'avérer nécessaire.

2.1 Analyse des trames 5G

Un panel de trames potentiellement utilisables en 2020 par les réseaux 5G NR TDD a été étudié par le comité d'experts.

Le tableau de synthèse qui suit décrit ces différentes trames selon une liste de caractéristiques et de performances, dont l'ordre ne préjuge pas d'une quelconque priorité :

- **Disponibilités des équipements** : disponibilité des équipements (réseaux et terminaux) permettant un déploiement commercial, avec pluralité de fournisseurs possible:

- « Dès 2020 » : plusieurs fournisseurs sont à même de fournir dès 2020 des d'équipements (réseaux et terminaux) compatibles avec la trame ;
 - « Risque de support partiel en 2020 » : pas de confirmation que plusieurs fournisseurs seront à même de fournir les équipements compatibles avec la trame dès 2020 ;
 - « Non disponible en 2020 » : pas d'équipements dans la roadmap des fournisseurs.
- **Compatibilité avec les trames 4G** : liste des trames LTE et WiMAX synchronisables avec la trame 5G considérée, sous réserve de disponibilité dans les équipements.
 - **Débit maximum par cellule** : débit maximum théorique avec 16 *layers*² MIMO en DL sans prendre en compte la surcharge de signalisation.
 - **Débit maximum par utilisateur** : débit maximum théorique avec 16 *layers* MIMO en DL sans la signalisation relative à la transmission des blocs de synchronisation en DL et sans les ressources allouées au canal PRACH en UL.
 - **Débit perçu par l'utilisateur** : débit simulé dans une cellule en tenant compte des effets statistiques (position du mobile, arrivée des paquets à transmettre, réémissions...). Résultats issus du rapport ECC 296.
 - **Débit en bordure de cellule** : débit simulé en bordure de cellule où les débits attendus sont généralement les plus faibles du fait des interférences entre cellules. Résultats issus des travaux du CEPT.
 - **Asymétrie** : Déséquilibre entre le lien montant et le lien descendant et comparaison avec les statistiques de trafic.
 - **Portée** : impact de la structure de trame sur la taille de la cellule 5G NR.

² un "*layer*" correspond à un des canaux qu'il est possible de transmettre simultanément avec une antenne massive MIMO . Ces *layers* sont utilisés entre différentes communications pour établir les schémas MIMO et Multi-User MIMO (Multi Input Multi Output)

	Trame	Largeur de bande	Disponibilité équipements	Compatible 4G existant ?	Débit max cellule théorique Mbit/s 10 MHz-100 MHz	Débit max utilisateurs théorique Mbit/s 10 MHz-100 MHz	Débit perçu par l'utilisateur (fonction de la vitesse d'arrivée des fichiers à transmettre)	Débit en bordure de cellule (fonction de la vitesse du mobile)	Asymétrie DL/UL	Portée								
Trames déjà analysés	1 DDDDDDSUU (offset nécessaire pour compatibilité LTE)	Pas d'impact de la largeur de bande, hormis pour le débit	dès 2020	LTE trame#1 = NON LTE trame#2 = OUI ^{note 1} Wimax 29 :18= NON Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON si SFconf7 utilisé pour LTE Wimax FDD = NON	DL : 621.1-7 147 UL : 121.3-1 389.7 Trame plus fort débit DL	DL : 77.7-893.3 UL : 15.2-173.7 Trame plus fort débit DL	<i>Trame de référence pour l'analyse des performances</i>	<i>Trame de référence pour l'analyse des performances</i>	84%/16% convient au trafic observé sur les réseaux	Référence								
	5 DDDSUDDDD (équivalent à la trame 1 sur l'interface Air, Alignée sur la trame LTE et ne nécessite pas d'Offset)																	
	2 DDDSUDDSUU										dès 2020	LTE trame#1 = NON LTE trame#2 = NON Wimax 29 :18= NON Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON Wimax FDD = NON	DL : 504.8-5 796.1 81% / trame 1 UL : 181.9-2 084.5 150% / trame 1	DL : 63.1-724.5 81% / trame 1 UL : 22.7-260.6 150% / trame 1	Non étudié par CEPT	Non étudié par CEPT	73%/27% convient au trafic observé sur les réseaux	Moins bonne portée DL (PD SCH) Trame la plus efficace en UL (+1.8 dB PUSCH)
	3 DDDSU										dès 2020	LTE trame#1 = NON LTE trame#2 = NON Wimax 29 :18= NON Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON Wimax FDD = NON	DL : 586.7-6 740.4 94% / trame 1 UL : 121.3-1 389.7 100% / trame 1	DL : 73.3-842.5 94% / trame 1 UL : 15.2-173.7 100% / trame 1	+7% à +18 % (+16% d'après TR37.910) par rapport à la trame de référence	-5% à +7% par rapport à la trame de référence	83%/17% convient au trafic observé sur les réseaux	Equivalent référence
	4 DDSU ^{note 2}										risque de support partiel en 2020	LTE trame#1 = NON LTE trame#2 = NON Wimax 29 :18= NON Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON Wimax FDD = NON	DL : 528.5-6 064.9 85% / trame 1 UL : 151.6-1 737.1 125% / trame 1	DL : 66.1-758.1 85% / trame 1 UL : 18.9-217.1 125% / trame 1	Non étudié par CEPT	Non étudié par CEPT	78%/22% convient au trafic observé sur les réseaux	Moins bonne portée DL (PD SCH) Trame plus efficace en UL (+1 dB PUSCH)

note 1 : un offset est nécessaire pour assurer la compatibilité de la trame 1 du tableau avec la trame n°2 de LTE défini par le 3GPP TR 36.211

note 2 : à noter que le nombre de *beams* serait inférieur à 8 sauf à utiliser le SCS de 60 kHz (limitation dans la signalisation des blocs PSS/SSS/BCH).

	Trame	Largeur de bande	Disponibilité équipements	Compatible 4G existant ?	Débit max cellule Mbit/s 10 MHz-100 MHz	Débit max utilisateurs 10 MHz-100 MHz	Débit perçu par l'utilisateur (fonction de la vitesse d'arrivée des fichiers à transmettre)	Débit en bordure de cellule (fonction de la vitesse du mobile)	Asymétrie	Portée
Nouvelles trames à analyser	6 ^{note 3} DSUDD (SCS 15 kHz)	Pas d'impact de la largeur de bande, hormis pour le débit	Non disponible en 2020	LTE trame#1 = NON LTE trame#2 = OUI Wimax 29 :18= OUI mais dépend de S Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON Wimax FDD = NON	BW ne peut pas être >50 MHz. Meilleure efficacité spectrale dans un rapport 270/266 par rapport à la trame DDDSU avec 30kHz de SCS	Pas d'analyse	+0.08% d'après TR37.910 par rapport à la trame de référence	Non étudié par CEPT	Pas d'analyse	Pas d'analyse
	7 ^{note 4} DSDU		Non disponible en 2020	LTE trame#1 = NON LTE trame#2 = NON Wimax 29 :18= NON Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON Wimax FDD = NON	Voir trame 4 si S à la même structure 1 transition UL/DL toutes les ms alors que la trame 4 a une transition toutes les 2 ms	Pas d'analyse	Non étudié par CEPT	Non étudié par CEPT	Pas d'analyse	Voir trame 4
	8 DDDDDSUUU		Non disponible en 2020	LTE trame#1 = OUI LTE trame#2 = NON Wimax 29 :18= OUI Wimax 33 :14 = NON Wimax 21 :12 = NON Wimax 35 :12 = NON Wimax FDD = NON	DL : 375- 4314 UL : 212-2431	Pas d'analyse	Non étudié par CEPT	Non étudié par CEPT	64%/36%	~+3dB en UL, moins de débit en DL

Note 3 : Ne permet pas de signaler 8 *beams*, limitation de la bande passante à 50MHz par porteuse.

Note 4 : Ne permet pas de signaler 8 *beams*

Le rapport technique du 3GPP TR37.910 utilisé pour la soumission à l'ITU-2020 fourni quelques éléments de comparaison pour les trame DDDDDDSUU, DDDSU utilisant 30 kHz de SCS et DDDSU utilisant 15kHz de SCS avec une porteuse à 4GHz.

2.2 Contribution des structures de trames à la latence radio.

Les performances de latence des structures de trames sont étudiées en détail dans le rapport TR 37.910 du 3GPP et le rapport ECC 296 de la CEPT. Les résultats des études mentionnées dans ces documents montrent que les trames étudiées permettent d'atteindre une latence sur l'interface radio inférieure à 4 ms correspondant au seuil défini par l'ITU-R pour un service 5G eMBB.

La latence réellement observée sur le lien radio est dépendante de nombreux paramètres environnementaux et est donc sujet à variation pour une même trame en fonction des conditions radio.

A noter que les trames de type DDDDDDDSUU ou DDDSUUUDDD (trame n°1 ou n°5 dans le tableau) ont une latence supérieure aux trames plus courtes (trames n°2, 3, 4). Il existe néanmoins des solutions pour améliorer les performances de latence du trafic utilisateur lorsque les trames n°1 ou n°5 sont utilisées. Ces solutions reposent sur :

- l'utilisation conjointe de la 4G dans le cadre de la connectivité duale;
- l'utilisation d'une autre bande 5G en mode FDD :
 - soit en mode SUL (*Supplementary UpLink*)
 - soit dans le cadre de l'agrégation de porteuses 5G.

A noter que ces solutions ne pourront pas forcément être mises en œuvre pour l'intégralité du trafic d'une cellule.

2.3 Définition de la synchronisation des réseaux

Afin que les réseaux soient synchronisés il convient de définir un ensemble de paramètres qui définissent la synchronisation entre tous les utilisateurs de la bande 3.4-3.8 GHz, en particulier :

1. une horloge de référence commune (par exemple Universal Time Clock (UTC) ou Temps Atomique International (TAI), +/- 1.5 μ s)³ permettant d'aligner le début de la trame.
2. une configuration de trame définie par une enveloppe temporelle (durée du lien descendant, durée sans émission, durée du lien montant) A ce stade, cette dernière sera basée sur l'enveloppe temporelle de la trame LTE TDD n° 2 sous-trame 7⁴

³ Cette référence peut être par exemple réalisée par un récepteur de système de positionnement par satellite (GNSS : Global Navigation Satellite System) comme GPS ou Galileo ou bien une traçabilité d'horloge sur un lien fixe, par exemple le protocole PTP (Precise Time Protocol) normalisé IEEE 1588. Si la référence d'horloge est perdue, l'équipement peut continuer de fonctionner pendant une durée appelée « holdover » dépendant de la qualité de son oscillateur local. Si la référence d'horloge est perdue trop longtemps de sorte que la dérive de l'oscillateur local risque d'excéder la précision requise de +/- 1.5 μ s, l'émetteur doit cesser d'émettre jusqu'à ce que son horloge de référence soit rétablie

⁴ En théorie toute configuration LTE possède un équivalent 5G-NR. En pratique le niveau d'implémentation des configurations NR et LTE-TDD fait que la trame LTE n°2 sous trame 7 (et son équivalent NR) est à ce jour l'option qui s'impose.

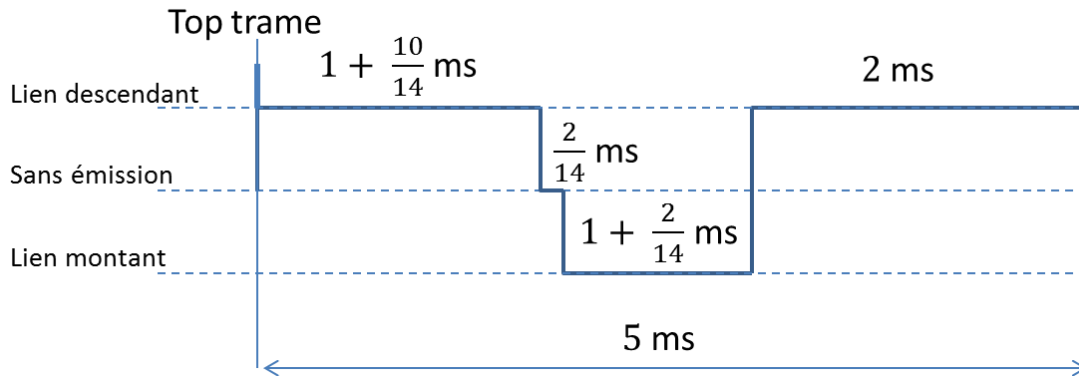


Figure 1 : enveloppe temporelle de la trame commune

Ces aspects sont décrits en détails dans les rapports ECC 216 et 296.

Dans le cas précis du « Special Slot », intercalé pour le passage de lien descendant vers lien montant dans la trame ci-dessus, le nombre de sous-symboles lien descendant doit être à minima fixé entre les acteurs. Il restera à évaluer si le nombre de sous-symboles de garde et lien montant peuvent rester au libre choix des opérateurs ou s'il est préférable de les figer.

2.4 Flexibilité dans le temps des changements de trames

Une fois la trame des réseaux 5G NR sélectionnée il sera possible de la changer dans le futur sans remplacement des équipements radios déployés car il s'agit d'une reconfiguration des paramètres de la station de base. Les terminaux se doivent d'implémenter l'ensemble des configurations de trame définies par l'écosystème.

Par contre, il existe des contraintes d'ordre opérationnel, puisque tous les sites de tous les réseaux doivent changer de configuration de trame simultanément, ce qui nécessite un travail préparatoire important et une forte mobilisation des équipes opérationnelles de chaque réseau pendant la période du projet, avec une garantie de succès ou de retour simultané à l'état initial si un opérateur devait rencontrer des difficultés lors du processus de reconfiguration.

3 La séparation spatiale des réseaux

3.1 Introduction

Dans le cas où la synchronisation avec les technologies existantes dans la bande ne serait pas retenue, se pose la question d'une coexistence par séparation géographique et par bande de garde pour les stations de base Macro.

Dans ce cadre il est nécessaire d'identifier deux cas de perturbation qui se cumulent :

- **brouillage** : les émissions hors-bande du brouilleur désensibilisent la victime dans son canal de réception (qui ne peut évidemment être filtré), ceci pouvant perturber ou empêcher des communications sur le réseau brouillé. Dans les études CEPT, le seuil de brouillage est typiquement positionné à $I/N = -6$ dB (correspondant à une désensibilisation de 1dB, permettant d'éviter de perturber significativement le réseau victime), où I est le niveau du brouilleur et N le bruit thermique dans la bande du récepteur de la victime.
- **blocage** : ce phénomène advient lorsque la chaîne de réception de l'équipements victime récupère de l'énergie dans les canaux voisins (adjacents ou non, dans la bande passante de son filtre RF) l'entraînant dans une plage de fonctionnement non linéaire empêchant le

filtrage du signal brouilleur plus bas dans la chaîne de réception, ce qui peut rendre la cellule inopérante en totalité pendant ces instants de brouillages⁵.

L'étude s'est dans un premier temps focalisée sur la coexistence des technologies LTE et WiMAX avec la 5G NR, puisque la majorité des réseaux existant dans cette bande utilisent ces technologies.

3.2 Principes méthodologiques

Afin de déterminer les pertes de propagation nécessaires ainsi que les distances de séparation correspondantes entre deux systèmes TDD non synchronisés (5G NR/LTE et 5G NR/WiMAX), deux méthodes sont notamment possibles :

- Utiliser une démarche statistique des impacts des interférences en simulant le comportement du brouilleur : c'est ce qui a été fait notamment dans le rapport ECC 296 de la CEPT pour simuler le cas où le brouilleur est un système AAS (comme de la 5G NR) et le système brouillé un système non AAS (comme du TDD LTE ou du WiMAX). Le critère du pourcentage de paquets perdus dans le sens montant vers la victime, ainsi que des hypothèses sur la répartition des terminaux ont été utilisés. Les résultats de ces simulations sont résumés dans le chapitre « 3.4 Autre cas de brouillage » de ce document. Des éléments complémentaires sont proposés dans le chapitre de l'annexe 1 « Informations complémentaires sur le rapport ECC 296 » dans ce document, qui ont notamment pour objectif d'illustrer l'approche statistique de simulations.
- Utiliser un bilan de liaison : cette méthode a été appliquée dans ce rapport dans le cas où les brouilleurs sont du TDD LTE ou du WiMAX et le système brouillé est la 5G NR. Les caractéristiques précises de ces systèmes TDD LTE et WiMAX déployés en France ont été pris en compte.

La méthode du bilan de liaison est décrite en ANNEX 1:. Elle est basée sur un calcul du niveau d'interférence dans le récepteur de la victime, et elle utilise peu ou pas d'éléments statistiques. De plus elle comporte un effet de seuil constitué par le dépassement du niveau maximal de puissance de brouillage admissible à l'entrée du récepteur. Ces différents éléments donnent habituellement des pertes de propagation plus importantes qu'avec une méthode utilisant des simulations.

Mais dans la mesure où l'objectif de l'étude est de déterminer les pertes de propagation nécessaires ainsi que les distances de séparation correspondantes garantissant qu'il n'y ait pas d'interférences, la méthode utilisant un bilan de liaison est bien adaptée. Les détails de la méthodologie, ainsi que les paramètres utilisés sont détaillés en annexe de ce document.

3.3 Résultats

Les calculs pour les différents cas envisagés par le comité sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Brouilleurs : Bref-PIRE (MHz-dBm)		Victime 5G-NR				
		Perte de propagation entre sites radios en co-canal	Perte de propagation entre sites radios en canal adjacent sans bande de garde	Perte de propagation entre sites radios en canal adjacent avec bande de garde*	Marge au 'blocking' due à la perte de propagation entre sites radios	
					Canal adjacent sans bande de garde	Canal adjacent avec bande de garde*
WiMAX TDD	7 MHz 54 dBm	186,6 dB	152,6 dB	139,3 dB	25 dB	11,7 dB
	7 MHz 51 dBm	183,6 dB	149,6 dB	136,3 dB	25 dB	11,7 dB
	10 MHz 47 dBm	178 dB	144,1 dB	131 dB	25 dB	12 dB
	7 MHz 46 dBm	178,6 dB	144,6 dB	131,3 dB	25 dB	11,7 dB
LTE-TDD	15 MHz 63 dBm	192,2 dB	149,8 dB	149,8 dB	16,5 dB	16,5 dB
	20 MHz 63 dBm	191 dB	148,7 dB	148,7 dB	16,7 dB	16,7 dB
WiMAX FDD	3.5MHz 40 dBm	176,6 dB	141,6 dB	127,9 dB	25 dB	11,4 dB

* La bande de garde a été calculée pour une largeur égale à un canal du brouilleur

Conversion des pertes de propagation en distances de séparation

Le tableau ci-dessous donne le résultat de la conversion entre valeur de perte de propagation en dB et distance de séparation correspondante pour les hauteurs d'antenne (Hant) spécifiées. Cette conversion a été réalisée en utilisant l'outil SEAMCAT dont le mode d'emploi est donné en Annexe 1 de ce document.

Brouilleurs : Hant (m)-BW(MHz)		Victime 5G-NR		
		Distance de séparation des sites radios en co-canal	Distance de séparation des sites radios en canal adjacent sans bande de garde	Distance de séparation des sites radios en canal adjacent avec bande de garde *
WiMAX TDD	41 m- 7 MHz	81,5 km	53,5 km	39,7 km
	58 m- 7 MHz	84,3 km	55,2 km	41,3 km
	70 m- 10 MHz	83 km	51 km	26,9 km
	75 m- 7 MHz	84,9 km	52,6 km	27,8 km
LTE-TDD	49 m- 15 MHz	92,8 km	53,2 km	53,2 km
	49 m- 20 MHz	89,3 km	52,5 km	52,5 km
WiMAX FDD	58 m- 3,5 MHz	77,4 km	45,8 km	18,9 km

* La bande de garde a été calculée pour une largeur égale à un canal du brouilleur

3.4 Autre cas de brouillage

Les résultats suivants sont issus du rapport ECC 296 :

		Study 1 (5% avg. throughput loss, P.452 20% time)	Study 2 (5% avg. throughput loss, P.452 50% time)
Co-Channel	AAS-AAS	60 km	50 km
	Non-AAS – Non-AAS		50 km
Adjacent Channel	AAS-AAS	10.5 km	14 km
	Non-AAS – Non-AAS		15 km

- Réseau A non-AAS vers réseau B non-AAS, représente deux réseaux LTE-TDD ;
- Réseau A AAS vers réseau B non-AAS, représente un réseau 5G NR vers un réseau LTE-TDD ;
- Réseau A AAS vers réseau B AAS, représente deux réseaux 5G NR.

L'étude 1 (*Study 1*) a également considéré les deux scénarios suivants dans le cas du réseau brouilleur = AAS et du réseau interféré = Non AAS :

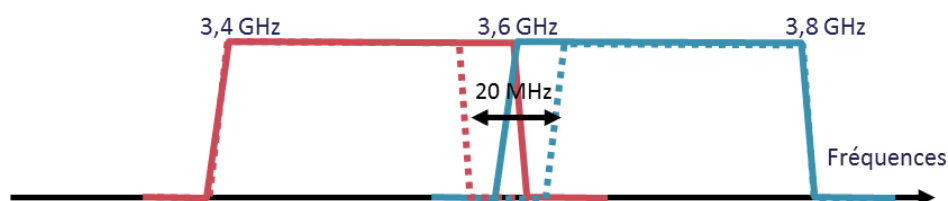
- Cas co-canal : distance de séparation = 60 km
- Cas canal adjacent : distance de séparation = 14 km

4 Usage de bandes de garde et de filtres spécifiques par opérateur

Les solutions de filtrage spécifique des équipements 5G « *Active Antenna System* » (« AAS ») permettant une coexistence entre réseaux non synchrones avec des bandes de garde et/ou des séparations géographiques plus faibles que celles indiquées ci-dessus ne seraient pas économiquement viables :

- Pas de possibilité de rajouter des filtres sur les sites au cas par cas parce que l'antenne et la partie active radio sont intégrées dans un équipement unique ;
- Produits spécifiques à faible économie d'échelle ;
- Nécessiterait néanmoins des bandes de garde de 20 MHz *a minima* en plus de filtres spécifiques.

Un filtrage en deux bandes de 200 MHz (3,4 - 3,6 GHz et 3,6 - 3,8 GHz) ne rendrait pas la coexistence plus simple à réaliser puisqu'en plus du besoin d'un équipement spécifique pour respecter le BEM (*Block Emission Mask*) restreint défini par la CEPT, une bande de garde de 20 MHz et une séparation géographique de plusieurs dizaines de mètre seraient encore nécessaires (la CEPT a utilisé une hypothèse de 70 m dans ses études pour définir le BEM restreint), ce qui n'est pas compatible avec un déploiement macro 5G NR dans des zones urbaines. Cette approche nécessitant une large bande de garde contribuerait, qui plus est, à laisser du spectre non utilisé.



5 References :

RÉFÉRENCE 1 : ECC REPORT 281 ANALYSIS OF THE SUITABILITY OF THE REGULATORY TECHNICAL CONDITIONS FOR 5G MFCN OPERATION IN THE 3400-3800 MHz BAND

RÉFÉRENCE 2 : 3GPP TR37.910 STUDY ON SELF EVALUATION TOWARDS IMT-2020 SUBMISSION

RÉFÉRENCE 3 : ECC REPORT 296 NATIONAL SYNCHRONISATION REGULATORY FRAMEWORK OPTIONS IN 3400-3800 MHz: A TOOLBOX FOR COEXISTENCE OF MFCNS IN SYNCHRONISED, UNSYNCHRONISED AND SEMI-SYNCHRONISED OPERATION IN 3400-3800 MHz

RÉFÉRENCE 4 : 3GPP TR 36.211 EVOLVED UNIVERSAL TERRESTRIAL RADIO ACCESS (E-UTRA); PHYSICAL CHANNELS AND MODULATION

AUTRES REFERENCES UTILES

- ECC REC (14)03, ECC DEC (07)02, EC DEC 2008/411/EC : ANCIEN FRAMEWORK REGLEMENTAIRE BLR
- ECC REPORT 203 : BEM 4G EN BANDE C. ECC REPORT 281 : BEM 5G AAS EN BANDE C
- ECC REPORT 216 : SYNCHRONISATION POUR RESEAUX TDD (TOUTES BANDES)
- ECC REPORT 287 : DEFRAGMENTATION DE LA BANDE C
- ECC DEC (11)06, CEPT REPORT 67 : FRAMEWORK REGLEMENTAIRE 4G ET 5G EN BANDE C
- ETSI EN 302326 : NORME HARMONISEE COUVRANT LES EMISSIONS BLR EN BANDE C
- <https://www.cbrsalliance.org/wp-content/uploads/2018/05/CBRS-Coexistence-Technical-Specification.pdf> §4.1

ANNEX 1: METHODOLOGIE

1 Méthode du bilan de liaison

Le niveau maximal autorisé de puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) d'un signal brouilleur peut être déterminé à l'aide de l'équation simple suivante:

$$PIRE_{MAX} = I_{MAX} - G_R(\theta) + L_P + L_R \quad (1)$$

où:

- $PIRE_{MAX}$: densité maximale autorisée de p.i.r.e. du dispositif brouilleur (dBm/ B_{REF}), pour laquelle il faut choisir une largeur de bande de référence appropriée B_{REF}
- I_{MAX} : niveau maximal de puissance de brouillage admissible à l'entrée du récepteur, valeur normalisée (dBm/ B_{REF})
- $G_R(\theta)$: gain d'antenne du récepteur brouillé dans la direction du signal brouilleur (dBi)
- L_P : perte de propagation entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception (dB)
- L_R : perte d'insertion (perte entre l'antenne du récepteur et l'entrée du récepteur) (dB). Le récepteur étant un système AAS, L_R est nul dans le cas qui nous intéresse.

On déduit de (1) que : $L_P = PIRE_{MAX} - I_{MAX} + G_R(\theta)$ (2)

Le niveau maximal de puissance de brouillage admissible à l'entrée du récepteur I_{MAX} est déterminé de la façon suivante :

- I_{MAX} = bruit thermique (dBm/ B_{ref}) + caractéristique de bruit du récepteur (dB) + I/N (dB) avec I/N étant le rapport signal sur bruit avec bruit thermique = -174 dBm/Hz (-114 dBm/MHz), facteur de bruit = 5 dB et I/N = -6 dB
- $I_{MAX} = -114 + 5 - 6 = -115$ dBm/MHz (soit -97,22 dBm/60 MHz, valeur qui sera également utilisée parce que la largeur de bande de la 5G NR a été fixée à 60 MHz)

Dans l'approche « pire cas », la valeur $G_R(\theta)$ maximale possible du gain d'antenne du récepteur NR brouillé dans la direction du signal brouilleur (LTE ou WIMAX) est choisie, soit 26 dBi.

Par ailleurs, la distance de séparation nécessaire entre le brouilleur et la victime (récepteur) est déterminée en fonction de la perte de propagation L_P . La recommandation ITU-R P452-16 avec l'outil SEAMCAT de la CEPT ont été utilisés à cet effet (voir le chapitre « Conversion des pertes de propagation en distances de séparation »).

L'égalité (2) permet de déterminer les pertes de propagation (puis les distances de séparation correspondantes) dans les deux cas suivants :

- Emissions dans le même canal : le système brouillé (5G NR) utilise l'ensemble des fréquences du système brouilleur. Puisque les systèmes brouilleurs considérés (TDD LTE et WIMAX) utilisent des antennes dont le tilt est à zéro, la $PIRE_{MAX}$ dans l'égalité (2) est considérée comme étant égale à la PIRE du système brouilleur.
- Emissions dans le canal adjacent : dans ce cas la $PIRE_{MAX}$ est obtenue de la façon suivante :
 - La fuite de puissance en émission (exprimée en mW) du système brouilleur (LTE ou WIMAX) est calculée en utilisant son ACLR (adjacent channel leakage power ratio).
 - La fuite de puissance en réception (exprimée en mW) du système brouillé (5G NR) est calculée en utilisant son ACS (*adjacent channel selectivity*).

- La fuite totale de puissance (exprimée en mW) est obtenue en ajoutant les deux fuites précédemment calculées.
- $PIRE_{MAX}$ est la traduction en dBm de la fuite totale de puissance.

Dans le cas des émissions dans le canal adjacent, les deux cas suivants ont été étudiés :

- Pas de bande de garde entre le brouilleur (LTE, WIMAX) et le système brouillé : dans ce cas, seule la contrainte ACLR1 du brouilleur a été prise en compte de façon à garantir que sur toute portion de la fréquence du récepteur, la 5G NR ne soit pas brouillée.
- Une bande de garde égale à la largeur du canal du brouilleur : dans ce cas seule la contrainte ACLR2 du brouilleur a été prise en compte de façon à garantir que sur toute portion de la fréquence du récepteur, la 5G NR ne soit pas brouillée.

Dans le cas des systèmes en bandes adjacentes, la dernière étape consiste à vérifier que les pertes de propagation qui ont été calculées sont suffisantes pour éviter l'éblouissement / le blocage du récepteur NR.

Il faut s'assurer que : $PIRE_{MAX} - L_p < I_{max-blocage}$

où:

- $PIRE_{MAX}$: densité maximale de p.i.r.e. du dispositif brouilleur (dBm/MHz)
- $I_{MAX-blocage}$: niveau maximal de puissance de blocage admissible à l'entrée du récepteur, valeur normalisée (dBm/MHz). Cette évaluation est faite en utilisant le même principe du cas pire avec un gain d'antenne maximum de 26 dBi. Sur la base de la spécification technique 38.104 du 3GPP, pour un système 5G-NR de couverture large, le niveau maximum de blocage du récepteur est de -43 dBm -26 dBi pour un système brouilleur d'une largeur de bande de 20 MHz. Cela correspond à une valeur de -82 dBm/MHz.
- L_p : perte de propagation entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception (dB) déterminée dans le cas où les systèmes sont adjacents.

Ce qui correspond à vérifier que la marge suivante est positive : $Marge = - (PIRE_{MAX} - L_p - I_{max-blocage})$

2 Paramètres

5G-NR Réception

Paramètre	Valeur
Fréquence	3500 MHz
Largeur de bande	60 MHz
Hauteur d'antenne	25 m
Tilt	0°
Gain maximum	26 dBi
Facteur de bruit	5 dB
ACS	46 dB
Niveau max. blocage	(-63) dBm/MHz

TD-LTE-Emission (éléments fournis par l'ARCEP)

Paramètre	Valeur	
Largeur de bande	15 MHz	20 MHz
PIRE	63 dBm	63 dBm
ACLR1	43 dB	43 dB
ACLR2	43 dB	43 dB
Hauteur d'antenne	49 m	49 m
Tilt	0°	0°

WiMAX -Emission (éléments fournis par l'ARCEP sauf mention contraire)

Paramètre	Valeur				
Largeur de bande	7 MHz	7MHz	10 MHz	7 MHz	3,5 MHz**
PIRE	54 dBm	51 dBm	47 dBm	46 dBm	41 dBm
Hauteur d'antenne	41 m	58 m	70 m	75 m	58 m
Tilt	0°	0°	0°	0°	0°
ACLR1*	34 dB	34 dB	34 dB	34 dB	34 dB
ACLR2*	38 dB	38 dB	38 dB	38 dB	38 dB

* ACLR1 et ACLR2 déterminés suivant la spécification ETSI EN 302 326-2 avec le masque défini pour les systèmes TDMA et utilisant la modulation OFDMA (classification ETSI : EqC-PET=O ; EMO6).

** Système FDD, les autres systèmes WiMAX sont TDD

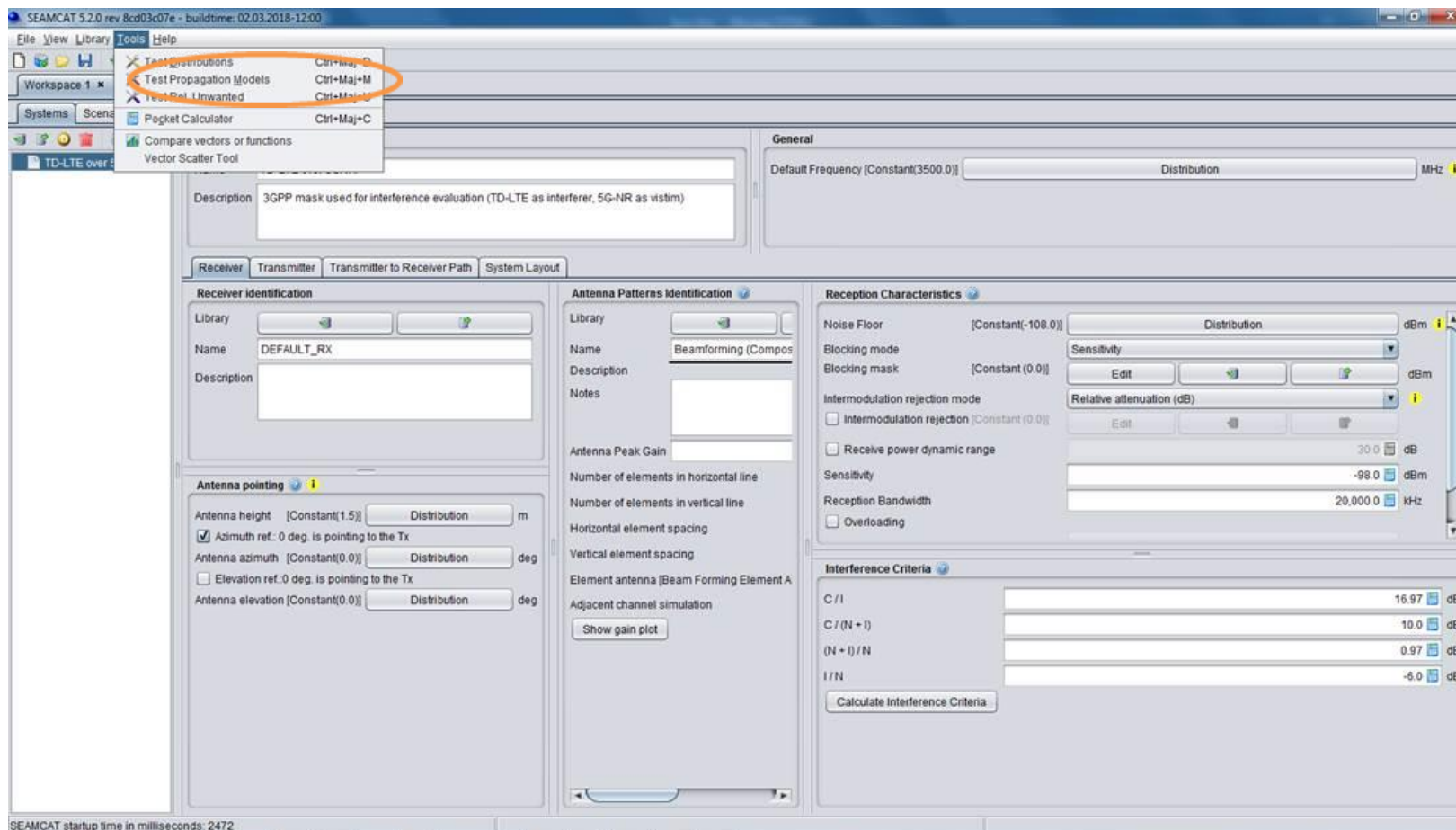
3 Mode d'emploi de l'outil SEAMCAT utilisé pour convertir les valeurs de perte de propagation en dB en distance de séparation géographique en km

Le comité d'experts techniques a souhaité que les distances de séparation correspondantes aux pertes de propagation apparaissent dans la synthèse du comité. Le modèle ITU-R P452-16 a été utilisé afin de répondre à cet objectif. Il est relatif à la recommandation du même nom sur la « Méthode de prédiction pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 0,1 GHz environ »

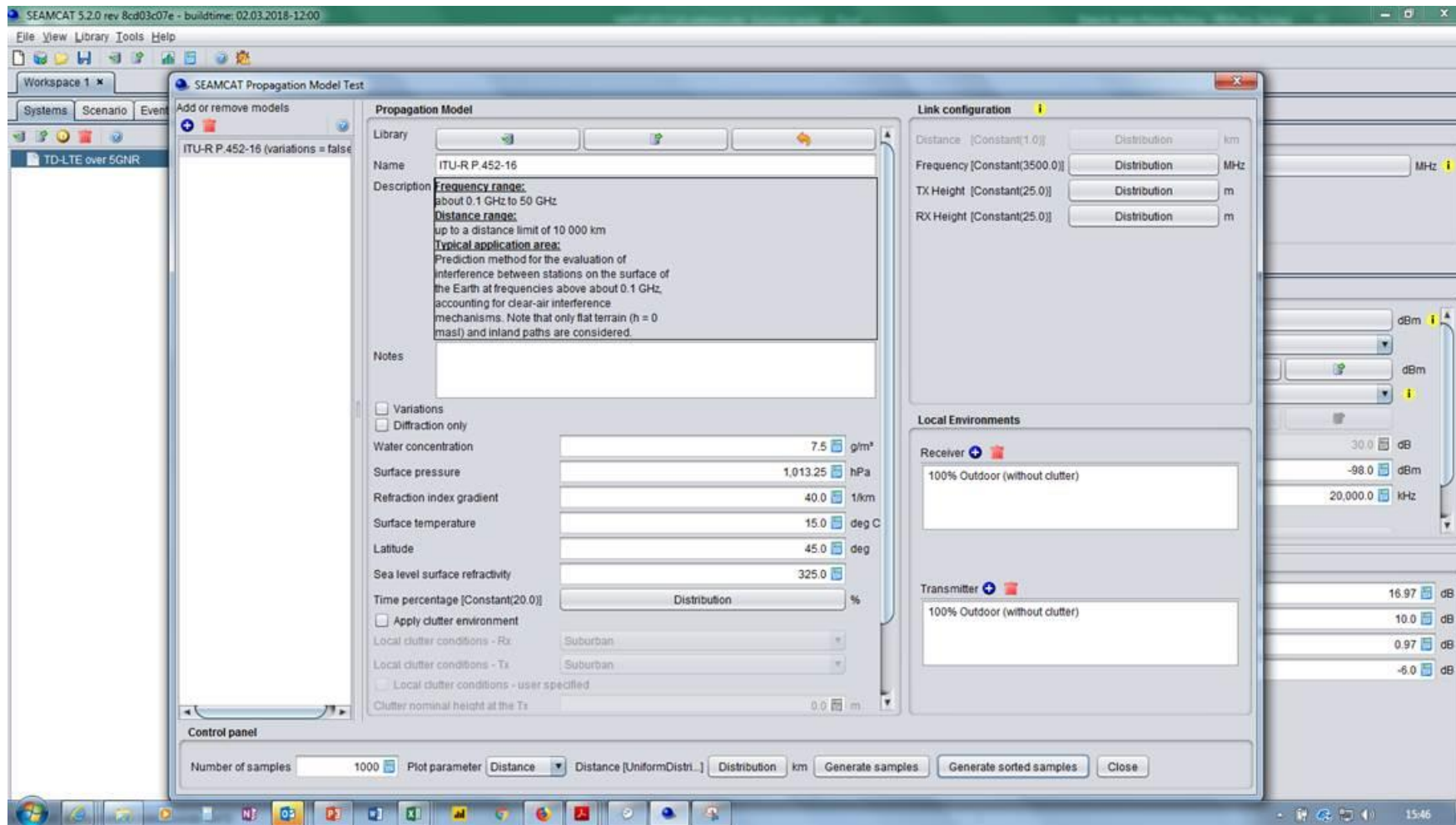
(https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.452-16-201507-I!!PDF-F.pdf).

L'outil SEAMCAT disponible sur le site de la CEPT (<https://www.cept.org/ecc>) a été utilisé pour la conversion des pertes de propagation en distances de séparation.

L'onglet 'Tools and Services' de la page d'accueil (<https://www.cept.org/eco/eco-tools-and-services/seamcat-spectrum-engineering-advanced-monte-carlo-analysis-tool>) est utilisé pour cette conversion. Cet outil est une application JAVA pour lequel il est nécessaire d'installer 'JAVA Runtime Environment (JRE)' pour l'exploiter. Lors de l'ouverture du logiciel, on a accès à un menu 'Test Propagation models' dans l'onglet 'Tools'.



Une deuxième fenêtre s'ouvre dans laquelle il est possible de paramétrer les conditions de calculs pour le modèle de propagation :

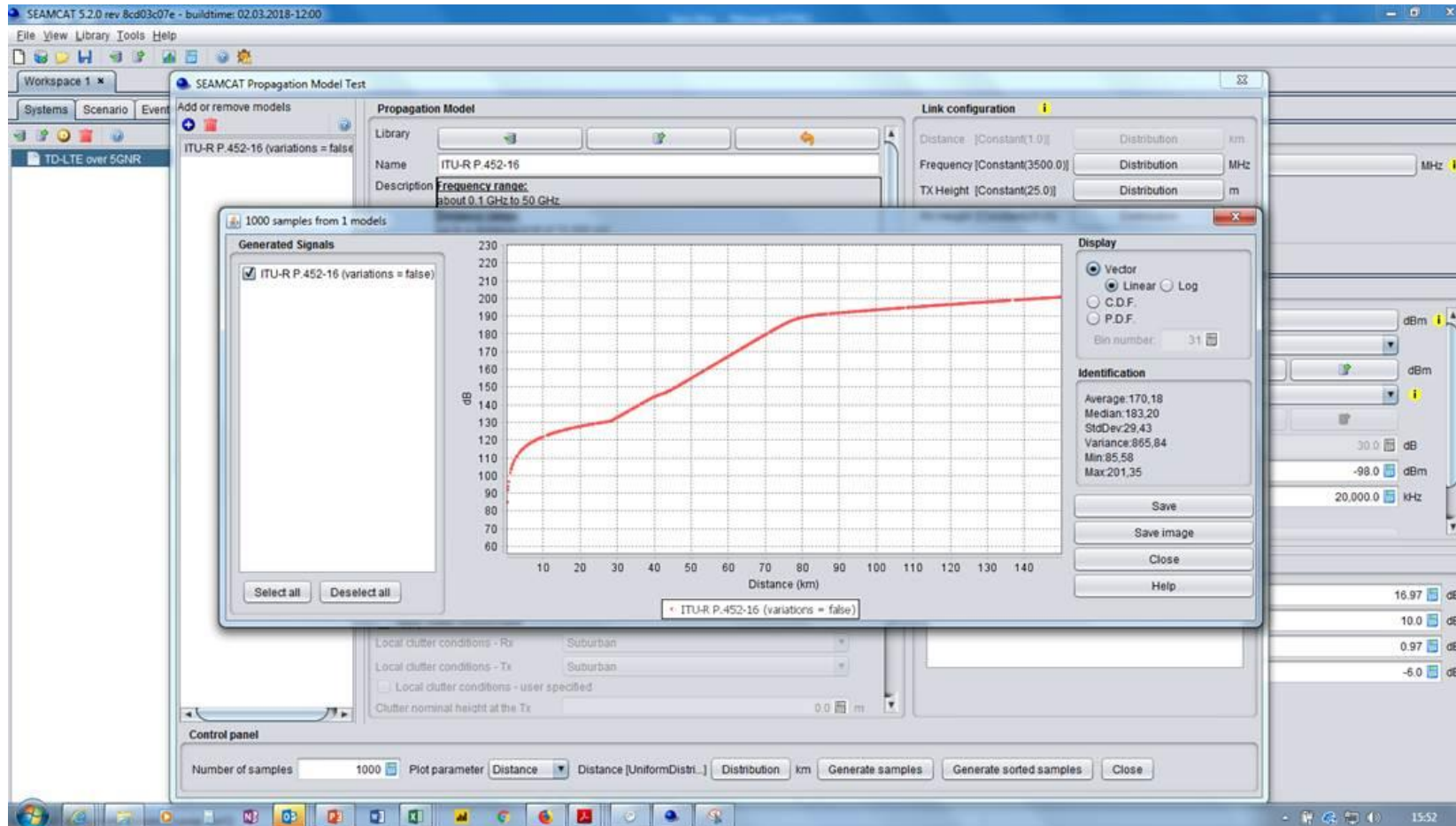


Il est alors possible de sélectionner le modèle ITU-R P452-16 relatif à la recommandation du même nom sur la 'Méthode de prédiction pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 0,1 GHz environ'.

Les différentes valeurs ont été ensuite choisies pour les paramètres suivants :

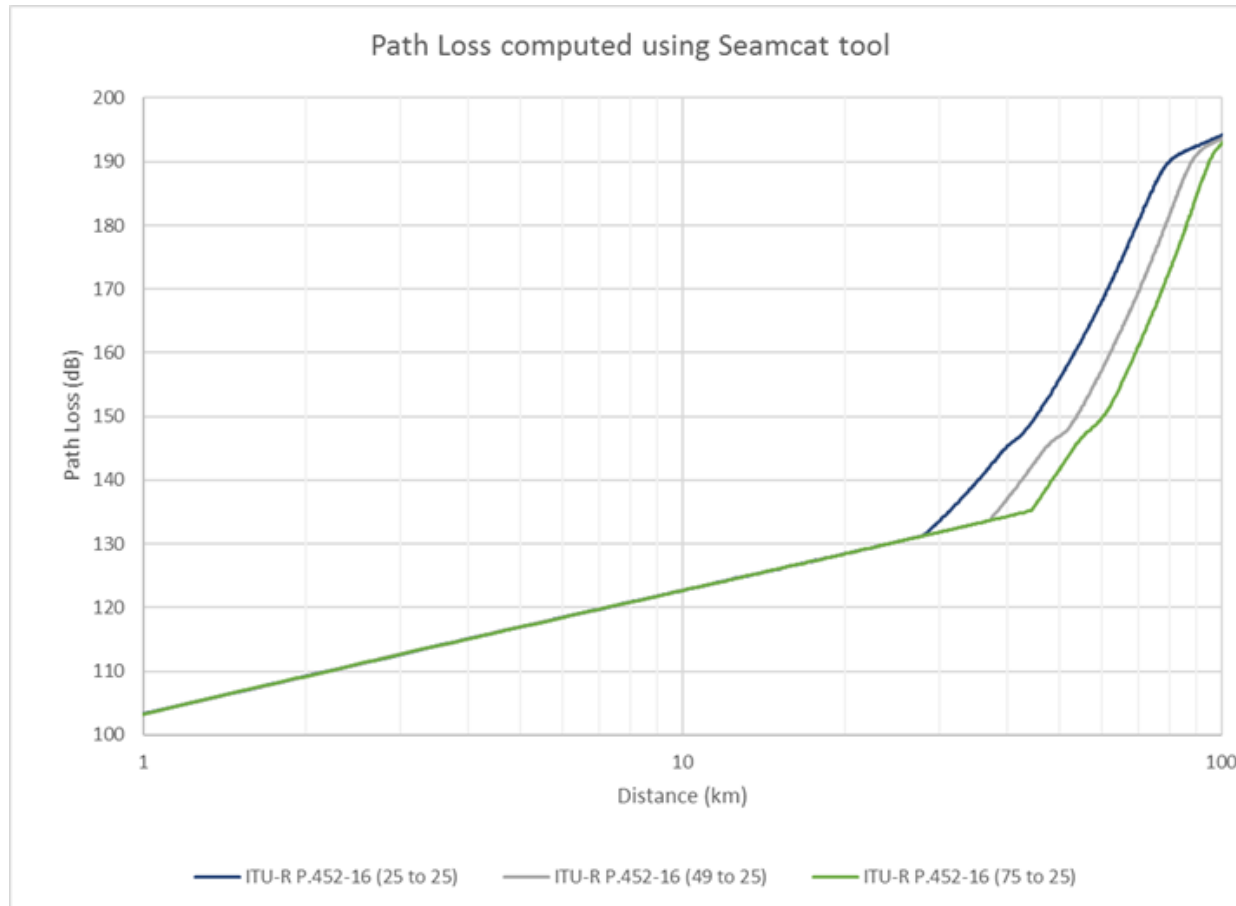
- Fréquence constante à une valeur de 3500 MHz.
- Hauteur de l'antenne émission constante aux valeurs successives : 25, 41,49, 58, 70 et 75m.
- Hauteur de l'antenne réception constante à la valeur de 25m.
- Concentration d'eau constante à une valeur de $7,5 \text{ g/m}^3$
- Pression à la surface de la terre constante à une valeur de 1013,25 hPa.
- Gradient de l'indice de réfraction constant à une valeur de 40 1/km.
- Température de surface constante à une valeur de 15 °C.
- Une latitude constante à une valeur de 45° (pas de variation notable lorsqu'une valeur de 49,6° est utilisée, latitude de Cherbourg).
- Un indice de réfractivité de surface au niveau de la mer constant à une valeur de 325.
- Un pourcentage de temps constant à une valeur de 20%.
- Une distance distribuée de façon uniforme entre 0.1 km et 150 km.

La génération des courbes et de leur sauvegarde au format excel se fait en cliquant sur le bouton 'Generate sorted samples', puis sur le bouton «Save' après avoir coché dans le cadre 'Display' le paramètre 'Vector':



Ceci permet de construire une feuille excel par concaténation des différentes tables nécessaires à la conversion ipertes de propagation en dB vers distance d'isolement.

La conversion recherchée est synthétisée par la courbe ci-dessous pour trois hauteurs :



4 Analyse de la variabilité possible des paramètres utilisés

Afin de mieux appréhender les différents résultats des bilans de liaison décrits précédemment dans le chapitre correspondant, le comité d'experts techniques a souhaité étudier la variabilité possible des paramètres utilisés en entrée et d'en évaluer les impacts sur ces résultats.

Les paramètres utilisés pour l'étude des bilans de liaison (voir chapitre correspondant) peuvent être classés en trois ensembles :

- Paramètres réels provenant directement des sites radios déployés en France et fournis par l'ARCEP:
 - LTE : PIRE, largeur de bande, ACLR1, Hauteurs d'antenne, Tilt=0°.
 - WIMAX : PIRE, largeur de bande, Hauteurs d'antenne, Tilt=0°.
- Paramètres standardisés (3GPP, ETSI) / équipements :
 - 5G NR : ACS, Facteur de bruit
 - LTE : ACLR2= ACLR1
 - WIMAX : ACLR1, ACLR2
- Des hypothèses complémentaires sur le système 5G NR :
 - Hauteur des sites : 25m
 - Largeur de bande : 60 MHz
 - Gain d'antenne en réception : C'est le pire cas qui a été choisie, avec le gain maximum possible en réception du système AAS NR, soient 26 dBi

La hauteur des sites de la 5G NR de 25 m reprend notamment l'hypothèse de l'étude N°1 décrite dans l'annexe 5 du rapport ECC 296 (voir chapitre suivant). D'autre part, ce paramètre semble réaliste. Il n'a donc pas donné lieu à une demande d'étude complémentaire de variabilité par le comité d'experts.

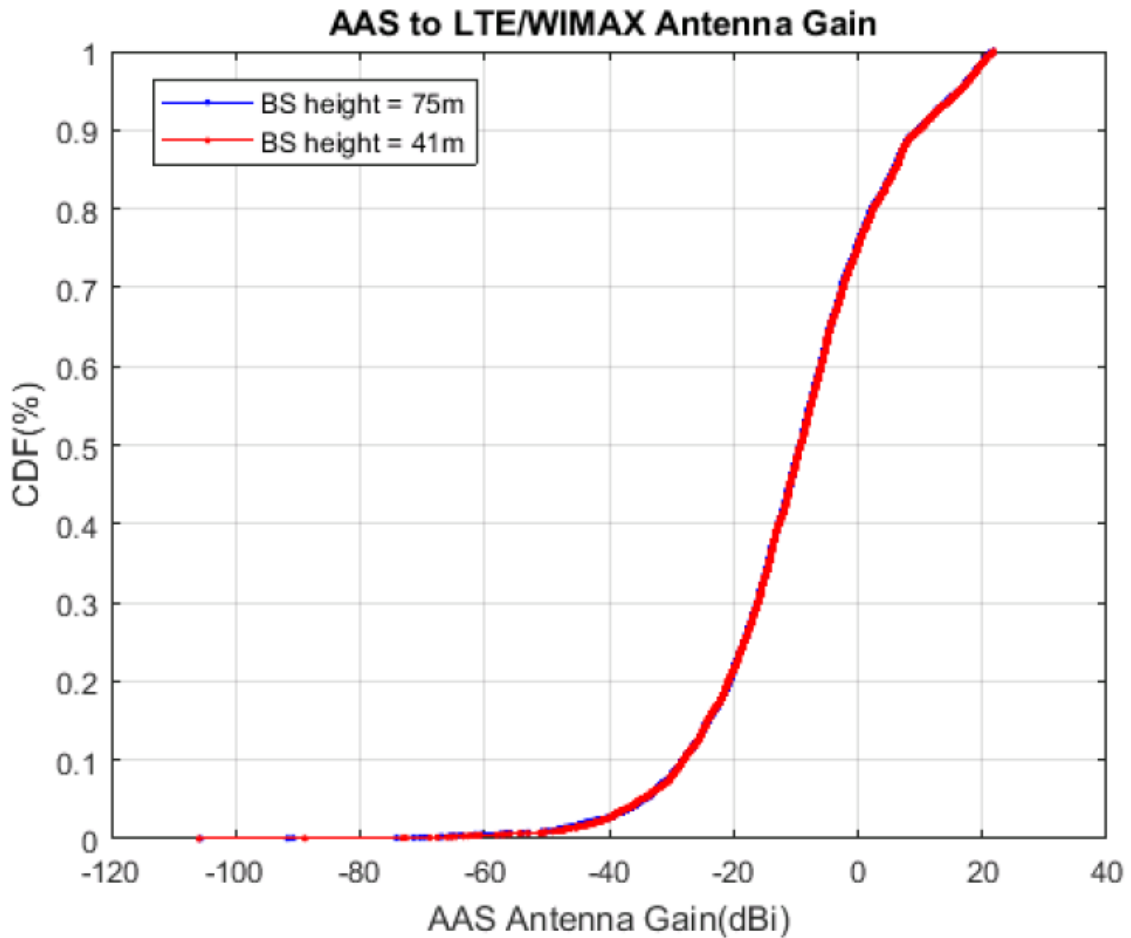
La situation de la largeur de bande 5G NR est différente. Même si c'est la valeur qui a été choisie par l'étude précitée, elle est par essence spéculative avant que les licences soient réellement attribuées aux opérateurs mobiles.

Pour l'effet de la variabilité du paramètre de la largeur de bande 5G NR, les deux constatations suivantes peuvent être faites :

- Vue la méthodologie utilisée, les pertes de propagation entre sites radio en co-canal sont indépendantes de la largeur de bande de la 5G NR.
- Différents calculs complémentaires ont été réalisés pour les pertes de propagation entre sites radios avec des canaux adjacents pour une largeur de bande 5G NR variant entre 40 MHz et 120 MHz : les pertes de propagation varient très peu, et donc aussi les distances de séparation correspondantes.

Le dernier paramètre qui a suscité toute l'attention du comité d'experts est la valeur du gain en réception du système 5G AAS NR.

Les courbes suivantes sont les résultats de simulations utilisant la même méthodologie que l'étude 1 décrite dans l'annexe 5 (voir chapitre suivant) du rapport ECC 296. Elles fournissent la fonction de distribution cumulative du gain en réception du système 5G AAS NR avec une hypothèse de distribution statistique des terminaux 5G NR dans la direction du brouilleur (LTE ou WIMAX).



Les différentes valeurs de gain du système 5G NR alternatives au pire cas (26 dBi) ont donné lieu à une réflexion du comité d'experts:

- 16,25 dBi : cela correspond à la fonction de distribution cumulative à 95% du gain en réception du système AAS NR.
- 17 dBi : Valeur de gain obtenue également suivant une approche de type probabiliste avec un résultat proche du précédent. Cela correspond à la moyenne des différents gains antennaires si 8 faisceaux (beams) sont utilisés pour un système AAS.
- 21 dBi : cela correspond à la fonction de distribution cumulative à 100 % du gain en réception du système AAS NR.

Pour la valeur de gain la moins importante (correspondant à des distances plus faibles), l'exemple suivant montre l'impact sur les pertes de propagation et les distances associées :

Brouilleurs : Bref-PIRE (MHz-dBm)		Perte de propagation entre sites radios en co- canal	Perte de propagation entre sites radios en canal adjacent sans bande de garde	Perte de propagation entre sites radios en canal adjacent avec bande de garde*
LTE- TDD	20 MHz 63 dBm	181,3 dB	138,9 dB	138,9 dB

* La bande de garde a été calculée pour une largeur égale à un canal du brouilleur.

Conversion des pertes de propagation en distances de séparation

		Victime 5G-NR		
		Distance de séparation des sites radios en co- canal	Distance de séparation des sites radios en canal adjacent sans bande de garde	Distance de séparation des sites radios en canal adjacent avec bande de garde *
LTE-TDD	49 m- 20 MHz	79,7 km	41,6 km	41,6 km

* La bande de garde a été calculée pour une largeur égale à un canal du brouilleur

Cependant, il est intéressant de noter que même en s'écartant notablement du pire cas, les distances de séparation restent importantes :

- Environ 80 km en co-canal.
- Plus de 40 km avec des canaux adjacents.

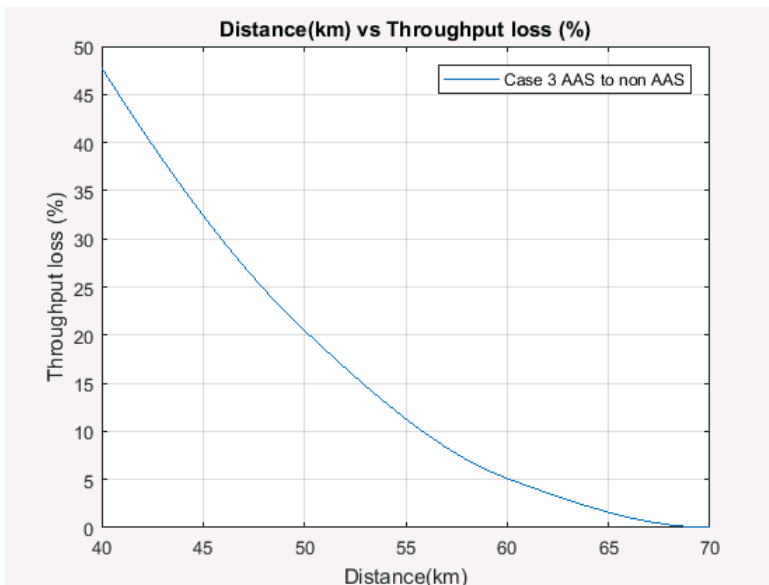
5 Informations complémentaires sur le rapport ECC 296

Ce chapitre a notamment pour objectif d'illustrer l'approche statistique de simulations

L'étude 1 décrite dans l'annexe 5 « Unsynchronised operation of two Macro BS MFCN networks not in the same area » du rapport ECC 296 fournit entre autres des informations dans le cas où le brouilleur est un système AAS et le système brouillé est un système non AAS.

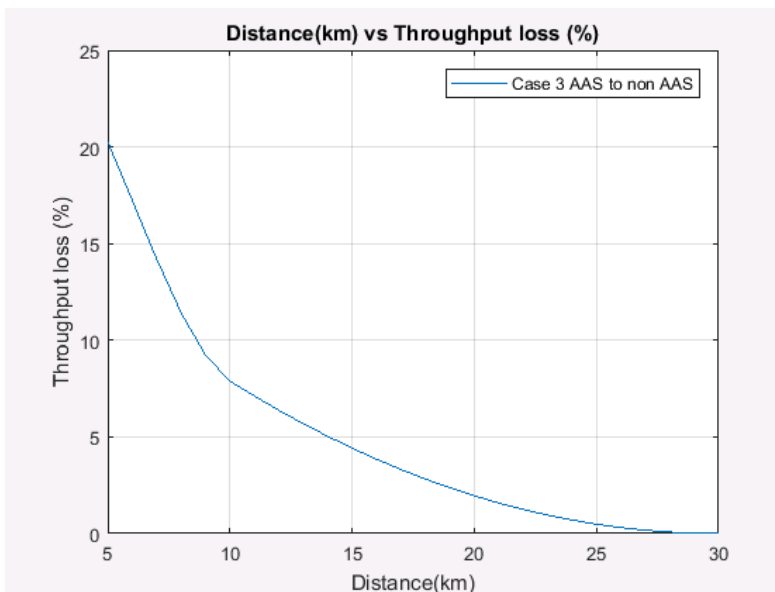
Dans le cas **co-canal**, l'étude indique qu'une distance minimum de séparation d'environ 60 km est nécessaire pour assurer une détérioration du débit moyen montant d'environ 5%.

L'étude fournit la courbe de détérioration du débit moyen montant en fonction de la distance, qui illustre l'approche statistique de l'étude (en plus d'autres éléments statistiques comme la répartition des terminaux et les gains de formations de faisceaux (*beamforming*) correspondants.



Il est intéressant de noter que dans ce cas co-canal une distance minimum de séparation d'environ 68 km est nécessaire si on ne tolère pas une détérioration du débit montant.

Dans le cas **de canaux adjacents**, l'étude indique qu'une distance minimum de séparation d'environ 14 km est nécessaire pour assurer une détérioration du débit moyen montant d'environ 5%. L'étude fournit également la courbe de détérioration du débit moyen montant en fonction de la distance qui illustre aussi l'approche statistique de l'étude.



Il est intéressant de noter que dans le cas de canaux adjacents une distance minimum de séparation d'environ 28 km est nécessaire si on ne tolère pas une détérioration du débit montant.

ANNEX 2: COMPOSITION DU COMITE D'EXPERTS TECHNIQUES

ANFR : Adrien Demarez

ARCEP : Direction Mobile et Innovation

Bouygues Télécom : Hervé De Tournadre, Cédric Levasseur, Vincent Lemoine, Vincent Merat

Ericsson : Zied Malouche, Arnauld Taffin

Free Mobile : Bertand Fiévet, Damien Genouville

Huawei : Michael Jolly, Jérôme Danneel

Orange : Jean-Philippe Desbat, Catherine Cano-Menda

Nokia : Jean-Pierre Balech

SFR : Benoit Thuillier, Pierre Lescuyer

Telecom ParisTech : Marceau Coupechoux