

# Performances 5G: étude comparée en zones rurales et urbaines

Marceau Coupechoux

▶ **To cite this version:**

Marceau Coupechoux. Performances 5G: étude comparée en zones rurales et urbaines. [Rapport Technique] Telecom paristech. 2021. hal-03367918

**HAL Id: hal-03367918**

**https://telecom-paris.hal.science/hal-03367918**

Submitted on 6 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# PERFORMANCES 5G: ÉTUDE COMPARÉE EN ZONES RURALES ET URBAINES

## RAPPORT REMIS À L'ARCEP DANS LE CADRE DU GROUPE D'EXPERTS EN RÉSEAUX MOBILES

MARCEAU COUPECHOUX
TELECOM PARIS, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS

Table des matières

1. Introduction 1
2. Processus de dimensionnement 2
3. Modèles de propagation radio 2
4. Correspondance entre SINR et débit 4
4.1. Voie descendante 4
4.2. Voie montante 5
4.3. Allocation des ressources sur la voie montante 5
4.4. Proportion des ressources voies montante et descendante en TDD 6
4.5. Calcul des débits crêtes $D_{max}$ 6
5. Bilans de liaison voie montante 6
5.1. Bilan de liaison à 700MHz 6
5.2. Bilan de liaison à 3.5GHz 8
6. Bilans de liaison voie descendante 8
6.1. Bilan de liaison à 700MHz 9
6.2. Bilan de liaison à 3.5GHz 10
7. Modèle de trafic de données 12
8. Résultats 14
References 15

## 1. Introduction

Ce rapport propose une méthodologie permettant de comparer les débits moyens obtenus par les utilisateurs 5G en zone rurale et en zone urbaine. Ces environnements sont caractérisés par des conditions de propagation radio et des choix de paramétrage de la technologie 5G spécifiques à chacune des zones. Par exemple, en zone rurale, la propagation radio est beaucoup plus favorable qu'en zone urbaine, les fréquences 5G utilisées sont plus basses, les largeurs de bandes sont plus petites et la charge est généralement plus faible. L'hypothèse principale est que la bande 700MHz est utilisée en zone rurale avec des largeurs de bande de 10 à 30 MHz et que la bande 3.5GHz est utilisée en zone urbaine avec des largeurs de bandes de 50 ou 100 MHz.

La notion de débit doit être précisée. On parlera de *débit crête* pour le débit maximal pouvant être atteint par une communication vers utilisateur seul dans la

*Date*: 5 octobre 2021.

cellule, bénéficiant de l'ensemble des ressources de la station de base et des conditions radio idéales. On parlera de *débit physique* pour le débit pouvant être atteint par une communication vers un utilisateur seul dans la cellule mais ne bénéficiant pas forcément des conditions radio idéales; en particulier le débit physique décroît avec la distance à la station de base dans les modèles considérés. Enfin, on parlera de *débit moyen*, lorsque l'utilisateur n'est plus seul dans la cellule mais doit partager les resources disponibles avec d'autres utilisateurs. Ils dépendent de la charge de la cellule. Pour donner un exemple, si deux utilisateurs sont simultanément actifs dans une cellule, leur débit moyen est la moitié de leur débit physique si la station effectue un partage équitable des ressources radio. Ce sont ces débits moyens que nous entendons comparer.

Une vue d'ensemble du processus de dimensionnement est donnée en section 2. Les différentes étapes et outils sont ensuite décrits en détail.

## 2. Processus de dimensionnement

Le processus de dimensionnement est montré sur la Figure 1.

- On part d'un débit physique cible en bordure de cellule sur la voie montante.
- On utilise des résultats de simulation de lien physique pour associer ce débit physique à une largeur de bande allouée à l'utilisateur et à un SINR cible (voir section 4).
- En utilisant un bilan de liaison sur la voie montante (voir section 5), on obtient le rayon de la cellule $R$. On discrétise la surface totale de la cellule en surfaces élémentaires dont l'union forme la cellule toute entière. On associe à chaque surface élémentaire ainsi obtenue une probabilité qui correspond à la proportion de cette petite surface par rapport à l'aire de la cellule.
- Pour chaque surface élémentaire, on calcule l'atténuation de parcours grâce à un modèle de propagation qui dépend de l'environnement considéré.
- En utilisant un bilan de liaison sur la voie descendante (voir section 6), on calcule le SINR pour chaque surface élémentaire.
- En utilisant une fonction d'approximation du débit, on associe à chaque SINR un débit physique (voir section 4).
- En utilisant un modèle de trafic de données (voir section 7), on obtient les débits moyens par utilisateur en fonction de la charge de la cellule.

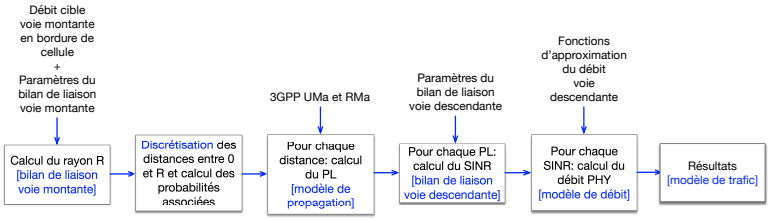



Figure 1. Processus de dimensionnement.

## 3. Modèles de propagation radio

Un modèle de propagation radio empirique permet de calculer une perte de puissance en fonction de différents paramètres de l'environnement (morphotype, hauteur de bâtiments, espacement des rues), du réseau (hauteurs d'antennes, fréquence) et de la distance entre l'émetteur et le récepteur. On distingue ici deux types d'environnements, urbain et rural, et deux fréquences porteuses, 700 MHz et 3.5 GHz.

Pour la 5G, l'UIT [1] a défini cinq environnements de test qui correspondent à un type de cas d'usage et à un environnement : 1) Indoor hotspot eMBB 2) Dense urban eMBB 3) Rural eMBB 4) Urban macro mMTC 5) Urban macro URLLC. L'UIT a défini des modèles de propagation pour les différents environnements dont : 1) UMa_A pour Dense urban eMBB à fréquence porteuse de 4GHz 2) RMa_A pour Rural eMBB à 700MHz 3) RMa_B pour Rural eMBB à 4GHz. Le 3GPP [2] a défini 3 types de scénarios pour la release R15 (un sous-ensemble des scénarios de l'UIT) : 1) UMi pour les micro-cellules 2) UMa pour les macro-cellules 3) InH pour l'intérieur des bâtiments 3) RMa pour le déploiement rural.

Pour notre étude, les modèles UMa et RMa pour les environnements urbain et rural respectivement semblent les plus appropriés. Cependant, d'après plusieurs opérateurs, le modèle RMa ne semble pas adapté au cas français. Les rayons de cellules prédits sont en effet très sous-estimés par rapport à ce qui est observé sur le terrain. Nous avons donc opté pour le modèle Hata Quasi Open [3] (HQO) qui fournit des résultats plus proches de la réalité. La Fig. 2 montre l'atténuation de parcours pour les modèles RMa, UMa et HQO en fonction de la distance entre émetteur et récepteur. On note en particulier qu'à 1 km, il y a une différence d'environ 30dB entre UMa et RMa et une différence de 40dB entre UMa et HQO.

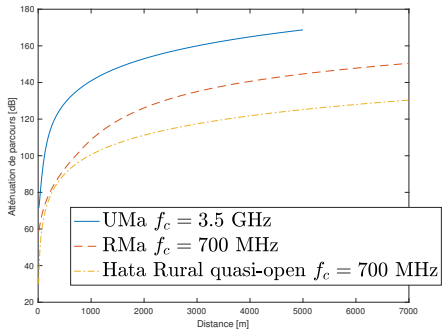



FIGURE 2. Atténuation de parcours en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Les valeurs des paramètres des modèles choisies pour l'étude numériques sont présentés en Tab. 1 et Tab. 2. Pour UMa, nous avons considéré une atténuation moyenne en prenant en compte la probabilité d'être en ligne de vue (LoS) ou pas (NLoS).

TABLE 1. Paramètres du modèle de propagation Hata Quasi Open (HQO) [3].

| **Paramètre** | **Valeur** |
|---|---|
| Fréquence $f$ [MHz] | 700 |
| Hauteur de la station de base $H_b$ [m] | 30 |
| Hauteur du mobile $H_m$ [m] | 1.7 |

En faisant abstraction des paramètres qui seront considérés comme constants dans l'étude, on peut écrire la perte de puissance comme une certaine fonction de la distance en environnement rural ou urbain:

$$PL = h_{Ru}(d) \quad (1)$$

$$PL = h_{Ur}(d) \quad (2)$$

TABLE 2. Paramètres du modèle de propagation UMa [2, Table 7.4.1-1].

| **Paramètre** | **Valeur** |
|---|---|
| Fréquence $f_c$ [MHz] | 3500 |
| Hauteur de la station de base $h_{BS}$ [m] | 30 |
| Hauteur du mobile $h_{UT}$ [m] | 1.7 |
| Écart-type effet de masque $\sigma_{SF}$ [dB] | 7 |
| Hauteur effective de l'environnement $h_E$ [m] | 1 |

## 4. Correspondance entre SINR et débit

Une fonction de correspondance entre le SNR et le débit physique est obtenue grâce à des simulations de niveau physique entre un émetteur et un récepteur. L'étude de ce rapport est fondée sur des résultats approximatifs de simulations fournis par des constructeurs. Pour faciliter la reproductibilité des résultats, on effectue un lissage des données (*local regression smoothing* avec la méthode Robust Loess et un span de 0.8 implémentée dans Matlab) et on approxime (avec la méthode Non Linear Least Square implémentée dans la fonction fitoptions de Matlab) les mesures par une fonction du type $\min\{a\log_2(1+SNR/b), D_{max}\}$, où $a$ et $b$ sont des paramètres et $D_{max}$ est le débit crête. Pour une meilleure approximation, on utilise un premier jeu de paramètres $a_1$ et $b_1$ pour les SNR faibles et un second jeu $a_2$, $b_2$ pour les SNR importants (après un certain seuil $\gamma_t$). Il faut noter que dans la suite de l'étude de dimensionnement, le SINR est assimilé au SNR, l'interférence étant vue comme du bruit (une hypothèse classique). Le modèle prend en compte les MIMO mais ignore les MIMO multi-utilisateurs.

4.1. **Voie descendante.** Le Tableau 3 montre les résultats obtenus pour les scénarios d'intérêt. On a considéré un espacement entre sous-porteuses de 30 kHz ($\mu = 1$ selon la terminologie de la norme), un modèle de canal PedA3 (un piéton se déplaçant à 3 km/h) sur la voie descendante (DL). Le paramètre $p_{DL}$ correspond à la proportion de ressources allouées à la voie descendante en TDD (voir section 4.4). Le calcul de $D_{max}$ est expliqué en section 4.5. Sur la voie descendante, on a toujours considéré par la suite que toute la bande était attribuée à l'utilisateur, la fonction de correspondance fournit donc directement le débit physique en fonction du SNR. On note $f_{DL}$ la fonction qui donne le débit physique $D$ en fonction du SNR $\gamma$ sur la voie descendante:

$$D_d = f_{DL}(\gamma). \tag{3}$$

TABLE 3. Approximations des correspondances débit - SNR ($\mu = 1$, PedA3, DL)

| $W$ | MIMO | $p_{DL}$ | $a_1$ | $b_1$ | $a_2$ | $b_2$ | $\gamma_t$ [dB] | $D_{max}$ [Mbps] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 MHz | $2\times 2$ | 1 | 6.5 | 2.6 | 9.0 | 9.8 | 25 | 111.3 |
| 20 MHz | $2\times 2$ | 1 | 13.8 | 2.6 | 19.2 | 9.8 | 25 | 226.9 |
| 30 MHz | $2\times 2$ | 1 | 21.0 | 2.6 | 29.3 | 9.8 | 25 | 342.4 |
| 50 MHz | $4\times 4$ | 0.74 | 50.3 | 5.7 | 76.7 | 24.7 | 25 | 842.5 |
| 100 MHz | $4\times 4$ | 0.74 | 103.3 | 5.7 | 157.5 | 24.7 | 25 | 1729.4 |

4.2. **Voie montante.** Sur la voie montante en revanche, comme la bande allouée à l'utilisateur est potentiellement variable dans notre modèle, on donne une fonction d'approximation du nombre de bits transportés par Ressource Element (RE). Les résultats sont donnés dans le Tableau 4. On en déduit ensuite le débit en fonction du nombre de RBs alloués et du SNR $\gamma$:

$$D_u = \frac{1}{T_s} N_{RB} \times 12 \times N_{pusch} p_{UL} a \log_2(1 + \frac{\gamma}{b}) \quad (4)$$

où $N_{pusch} = 11$ est le nombre de symboles PUSCH par slot et $p_{UL} = 23\%$ en TDD et $p_{UL} = 1$ en FDD. La durée du slot est $T_s = 0.001/2^{\mu}$ s. Finalement, on note $f_{UL}$ la fonction qui donne le débit $D$ en fonction du SNR $\gamma$ sur la voie montante:

$$D_u = f_{UL}(\gamma). \quad (5)$$

Inversement, on peut obtenir le SNR cible en fonction du débit physique cible:

$$\gamma = f_{UL}^{-1}(D_u). \quad (6)$$

TABLE 4. Approximations des correspondances débit - SNR ($\mu = 1$, PedA3, UL)

| MIMO | $a_1$ | $b_1$ | $a_2$ | $b_2$ | $\gamma_t$ [dB] | $D_{max}$ [bits/RE] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| rangs 1 et 2 | 0.8697 | 1.2956 | 1.1326 | 2.9125 | 15 | 11.1 |

4.3. **Allocation des ressources sur la voie montante.** Sur la voie montante, seule une partie de la bande est allouée à l'utilisateur. Il faut donc déterminer cette bande, c'est-à-dire le nombre de Ressource Blocks (RB) alloués. On désire maximiser la couverture. Si l'on fixe le nombre de RB alloués $N_{RB}$ et le débit physique cible $D_u$ sur la voie montante, on obtient le SINR associé $\gamma$ de la manière suivante:

$$\gamma(N_{RB}) = f_{UL}^{-1}(D_u), \quad (7)$$

où on a explicitement montré la dépendance à $N_{RB}$. Quand $N_{RB}$ croît, le SINR décroît ce qui est positif pour la couverture. En revanche, quand $N_{RB}$ croît, la puissance du bruit qui est proportionnelle à la bande décroît, ce qui est négatif pour la couverture. Dans le bilan de liaison, le SINR et la puissance du bruit apparaissent de manière linéaire en dB dans le calcul de l'affaiblissement de parcours maximal. On peut donc obtenir $N_{RB}$ de la manière suivante:

$$N_{RB} = \arg\min_x 10 \log(x\gamma(x)) \quad (8)$$

où le SINR est calculé en linéaire (et non en dB). Le minimum est pris sur l'ensemble des entiers entre 1 et le nombre maximal de RB, qui dépend lui-même de la bande du système. $N_{RB}$ et $\gamma$ apparaissent donc comme des fonctions $g_{UL}$ et $f_{UL}^{-1}$ du débit cible:

$$\gamma = f_{UL}^{-1}(D_u) \quad (9)$$
$$N_{RB} = g_{UL}(D_u) \quad (10)$$

4.4. **Proportion des ressources voies montante et descendante en TDD.** Le calcul de la proportion de ressources dédiées respectivement à la voie descendante $p_{DL}$ et à la voie montante $p_{UL}$ en TDD est obtenu de la manière suivante. Pour la bande 3.5 GHz, la trame TDD choisie par l'ARCEP est notée DDDDDDDSUU [4]. Le slot de transition est composé de 6 symboles voie descendante, 4 symboles de garde et 4 symboles voie montante. On a donc:

$$p_{DL} = (7 + 6/14)/10 = 0.74 \quad (11)$$

$$p_{UL} = (2 + 4/14)/10 = 0.23 \quad (12)$$

4.5. **Calcul des débits crêtes $D_{max}$.** Le calcul du débit théorique sur la voie descendante est tiré du document 3GPP TR 37.910 [5] et utilise la formule:

$$D_{max} = \frac{n_{CC}\nu p_{DL} Q_m f R_{max} N_{PRB}^{BW,\mu} \times 12(1 - OH)}{T_s^\mu} \quad (13)$$

La signification des paramètres et les hypothèses adoptées sont montrées dans le Tableau 5.

TABLE 5. Hypothèses de calcul du débit crête sur la voie descendante

| Paramètre | Signification | Valeurs | Remarques |
|---|---|---|---|
| $\mu$ | numérologie | 1 | Espacement de sous porteuse de 30 kHz |
| $T_s^\mu$ | Durée symbole OFDM [s] | $0.001/(14.2^\mu)$ | préfixe normal [6] |
| $n_{CC}$ | Nb. de porteuses | 1 | |
| $\nu$ | Nombre de flux MIMO | 2;4 | |
| $Q_m$ | Ordre de modulation | 8 | 256-QAM [6] |
| $f$ | Scaling factor | 1 | [5] |
| $R_{max}$ | Coding rate | 948/1024 | valeur max. [6] |
| $N_{PRB}^{BW,\mu}$ | Allocation max. de RB | 11 : 273 | fonction de W et $\mu$ [5] |
| $OH$ | Surcharge protocolaire | 0.14;0.18 | FR1-VD; FR2-VD [7] |
| $p_{DL}$ | proportion voie descendante | 1;0.74 | FDD;TDD (DDDDDDDSUU) |

Sur la voie montante, on calcule le nombre de bits pouvant être transportés par un RE en prenant en compte le taux de codage maximal $R_{max} = 948/1024$, le nombre de bit par symbole 64-QAM $N_b = 6$ et le nombre de flux MIMO $N_m = 2$ pour obtenir:

$$D_{max} = N_b N_m R_{max}. \quad (14)$$

Notons que la proportion de resources sur la voie montante, le nombre de RB et la proportion de symboles PUSCH par slot sont pris en compte dans l'équation (4). Il s'agit donc bien ici d'un RE de données (PUSCH) que l'on considère et non une moyenne sur l'ensemble des RE.

## 5. Bilans de liaison voie montante

5.1. **Bilan de liaison à 700MHz.** Remarques à propos des paramètres du bilan de liaison voie montante à 700MHz (Tab. 6):

(a) Frequency Division Duplex est le mode de duplexage adopté en France dans la bande 700 MHz.
(b) Ce débit est le débit physique cible en bordure de cellule. Plus le débit requis est élevé, plus le rayon de cellule est faible.
(c) Cette fréquence est utilisée par le modèle de propagation Hata Quasi Open.
(d) Il s'agit de la bande allouée à l'utilisateur sur la voie montante. Le mode de calcul est expliqué en section 4.3.
(e) Dans le modèle de propagation Hat Quasi Open, il est requis que la hauteur de l'antenne de la station de base soit supérieur à 30m. C'est une hauteur classique car, selon les modèles, la hauteur d'antenne par défaut peut varier entre 25m (modèle UMa) et 35m (RMa) selon les modèles de propagation.

TABLE 6. Bilan de liaison voie montante (Rural - 700 MHz)

| **Paramètres** | **Valeurs** | **Remarques** |
|---|---|---|
| Mode duplex | FDD | (a) |
| Débit [Mbps] | 0,5 | (b) |
| Fréquence [MHz] | 700 | (c) |
| Bande [MHz] | 2,16 | (d) |
| Hauteur d'antenne BS [m] | 30 | (e) |
| Hauteur d'antenne UE [m] | 1,70 | (f) |
| Probabilité de couverture | 0,9 | (g) |
| Écart-type effet de masque [dB] | 6 | (h) |
| **Transmission** | | |
| Puissance de transmission [dBm] | 23 | (i) |
| Gain d'antenne [dBi] | 0 | (j) |
| PIRE [dBm] | 23 | (k) |
| **Réception** | | |
| SINR [dB] | -4.13 | (l) |
| Densité du bruit [dBm/Hz] | -174 | (m) |
| Puissance du bruit [dBm] | -110.66 | (n) |
| Facteur de bruit [dB] | 2 | (o) |
| Gain d'antenne [dBi] | 17 | (p) |
| Pertes câble [dB] | 0.5 | (q) |
| Sensibilité [dBm] | -129.29 | (r) |
| **Marges** | | |
| Interférence [dB] | 3 | (s) |
| Effet de masque [dB] | 7.68 | (t) |
| Corps humain [dB] | 1 | (u) |
| Pénétration à l'intérieur des bâtiments [dB] | 15 | (v) |
| Total marges [dB] | 26.68 | (w) |
| **Rayon de cellule** | | |
| Perte maximale [dB] | 125.61 | (x) |
| Modèle de propagation | HQO | (y) |
| Rayon [m] | 5140 | (z) |

(f) La hauteur de l'antenne de l'utilisateur doit être supérieure à 1m dans le modèle Hata Quasi Open. Les modèles RMa et UMa choisissent par défaut une hauteur de 1.5m. La valeur choisie est donc un peu optimiste.

(g) La probabilité de couverture est la probabilité d'être couvert en bordure de cellule. Cette valeur est utilisée dans la formule de Jakes pour le calcul de la marge d'effet de masque. Les valeurs typiques sont 0.9, 0.95 et 0.99.

(h) L'écart-type de l'effet de masque est plus faible en environnement rural qu'en environnement urbain. La valeur choisie est typique de l'environnement rural.

(i) La puissance du mobile est spécifiée dans [8] pour la classe "Power class 3" dans l'intervalle de fréquences FR1. Le terminal peut avoir 2 antennes, mais une seule est généralement utilisée pour la transmission. Il n'y a donc pas de diversité en transmission.

(j) Le gain d'antenne du mobile est typiquement de 0dBi. La valeur peut être considérée comme un peu optimiste car elle ne tient pas compte de positions du mobile potentiellement défavorables.

(k) $(k) = (i) + (j)$.

(l) Le calcul du SINR cible est expliqué en section 4.2, équation (6).
(m) La densité spectrale du bruit est calculée de la manière suivante: $10\log_{10}(kT)$ où $k$ est la constante de Boltzman et $T = 290$ degrés Kelvin.
(n) $(n) = (m) + 10\log_{10}((d) * 1000000)$
(o) Il s'agit d'une valeur typique pour une station de base.
(p) Il s'agit d'une valeur typique à cette fréquence.
(q) Il s'agit d'une valeur typique lorsqu'on utilise un Remote Radio Head (RRH).
(r) $(r) = (l) + (n) + (o) - (p) + (q)$
(s) La valeur choisie est typique, voire un peu pessimiste en environnement rural.
(t) La marge est calculée en utilisant la formule de Jakes pour une pobabilité de couverture donnée par (g): $(t) = 1.28 \times (h)$
(u) Il s'agit d'une valeur typique lorsque le service considérée n'est pas la voix.
(v) Il s'agit d'une valeur typique à cette fréquence.
(w) $(w) = (s) + (t) + (u) + (v)$
(x) $(x) = (k) - (r) - (w)$
(y) Voir section 3.
(z) Le rayon de cellule est obtenu à partir de (x) et du modèle Hata Quasi Open, voir [3] pour les formules explicites.

5.2. **Bilan de liaison à 3.5GHz.** Remarques à propos des paramètres du bilan de liaison voie montante à 3.5 GHz (Tab. 7) :

(a) On utilise le duplexage TDD dans la bande 3.5 GHz.
(b) La bande allouée à l'utilisateur est calculée en utilisant la méthodologie présentée en section 4.3.
(c) L'écart-type de l'effet de masque est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural.
(d) Le SINR cible est calculé en utilisant la méthodologie présentée en section 4.2, équation (6).
(g) On considère un Adaptive Antenna System (AAS) tel que présenté en Figure 3. Cet AAS est constitué de 192 éléments d'antennes en polarisations croisées et organisés en 32 en sous-réseaux d'antennes de taille $3\times1$. Chaque sous-réseau a un gain d'antenne de 10 dBi.
(h) Chaque polarisation de chaque sous-réseau est associé à un TXRU, il y a donc 2 TXRU par sous-réseau et 64 TXRU au total.
(i) Les antennes en polarisation croisées ne sont pas utilisées pour la formation de faisceaux. Les deux ports d'antennes servent à réaliser de la diversité en réception mais le gain est déjà considéré dans le SINR cible.
(j) D'après plusieurs constructeurs, il s'agit d'une valeur typique qui ne dépend pas du nombre d'éléments d'antenne par sous-réseau.
(k) $(k) = (j) + 10 * \log_{10}((h)/(i))$
(l) Les amplificateurs de puissance sont intégrés à l'AAS, il n'y a donc pas de pertes câble.
(m) $(m) = (d) + (e) + (f) + (k) - (l)$
(n) Les pertes de pénétration à l'intérieur des bâtiments sont plus importantes à 3.5 GHz qu'à 700 MHz.
(o) Voir section 3.

## 6. Bilans de liaison voie descendante

Le bilan de liaison sur la voie descendante est utilisé pour associer à chaque surface élémentaire issue de la discrétisation de la surface de la cellule, un débit

TABLE 7. Bilan de liaison voie montante (Urbain - 3.5 GHz)

| **Paramètres** | **Valeurs** | **Remarques** |
|---|---|---|
| Mode duplex | TDD | (a) |
| Débit [Mbps] | 0,5 | |
| Fréquence [MHz] | 3500 | |
| Bande [MHz] | 10.08 | (b) |
| Hauteur d'antenne BS [m] | 30 | |
| Hauteur d'antenne UE [m] | 1,70 | |
| Probabilité de couverture | 0,9 | |
| Écart-type effet de masque [dB] | 7 | (c) |
| **Transmission** | | |
| Puissance de transmission [dBm] | 23 | |
| Gain d'antenne [dBi] | 0 | |
| PIRE [dBm] | 23 | |
| **Réception** | | |
| SINR [dB] | -4.48 | (d) |
| Densité du bruit [dBm/Hz] | -174 | |
| Puissance du bruit [dBm] | -103.97 | (e) |
| Facteur de bruit [dB] | 3 | (f) |
| Nombre d'éléments d'antennes | 192 | (g) |
| Nombre de TXRU | 64 | (h) |
| Nombre de ports d'antennes | 2 | (i) |
| Gain de sous-réseau d'antennes [dBi] | 10 | (j) |
| Gain de réseau d'antennes [dBi] | 25.05 | (k) |
| Pertes câble [dB] | 0 | (l) |
| Sensibilité [dBm] | -130.50 | (m) |
| **Marges** | | |
| Interférence [dB] | 3 | |
| Effet de masque [dB] | 8.96 | |
| Corps humain [dB] | 1 | |
| Pénétration à l'intérieur des bâtiments [dB] | 25 | (n) |
| Total marges [dB] | 37.96 | |
| **Rayon de cellule** | | |
| Perte maximale [dB] | 115.54 | |
| Modèle de propagation | UMa | (o) |
| Rayon [m] | 250 | |

physique. Dans notre cas, les surfaces élémentaires sont des anneaux de rayons intérieur et extérieur $d_{k-1}$ et $d_k$ respectivement (voir section 7). Le bilan de liaison sur la voie descendante permet donc d'associer un débit physique $D_d$ à une distance $d$. Pour la surface élémentaire $k$, on note ce débit et cette distance $c_k$ et $d_k$ respectivement pour rappeler la dépendance à $k$.

6.1. **Bilan de liaison à 700MHz.** Remarques à propos des paramètres du bilan de liaison voie descendante à 700MHz (Tab. 8) :

(a) Le débit physique $D_d$ est obtenu à partir de $(h)$ en utilisant la formule (3): $(a) = f_{DL}(10^{(h)/10})$.
(b) Toute la bande du système est allouée à l'utilisateur d'intérêt. Dans les simulations, on prendra $(b) = 10, 20$ ou 30 MHz.
(c) Il s'agit d'une valeur typique.

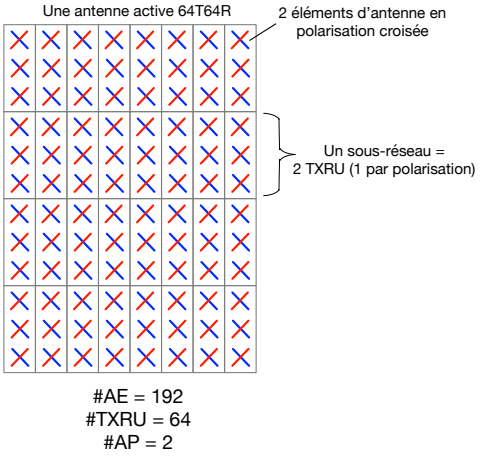



FIGURE 3. Système d'antennes actives 64T64R avec 192 éléments d'antenne (AE), 64 chaînes de transmission réception (TXRU) et deux ports d'antennes (AP).

(d) Deux antennes de transmission émettent chacune à la puissance (c).
(g) $(g) = (c) + 10\log_{10}((d)) + (e) - (f)$
(h) Le SINR à la distance $(q)$ est obtenu à partir de la puissance reçue, de la puissance du bruit et du gain d'antenne du terminal: $(h) = (m) + (l) - (j) - (k)$.
(k) Il s'agit d'une valeur typique pour un terminal mobile.
(k) Il s'agit d'une valeur typique pour l'antenne d'un terminal mobile.
(m) Il s'agit de la puissance reçue à la distance considérée $(q)$ en prenant en compte les marges: $(m) = (g) - (n) - (o)$.
(o) On utilise (q) et le modèle Hata Quasi Open pour calculer l'atténuation de parcourt (o) à cette distance, voir équation (1): $(o) = h_{Ru}((q))$.
(p) Voir section 3.
(q) C'est une entrée du bilan de liaison sur la voie descendante. Pour la surface élémentaire $k$ considérée en section 7, on prendra $(q) = d_k$.

6.2. **Bilan de liaison à 3.5GHz.** Remarques à propos des paramètres du bilan de liaison voie descendante à 3.5 GHz (Tab. 9) :

(a) Le débit physique $D_d$ est obtenu à partir de $(l)$ en utilisant la formule (3): $(a) = f_{DL}(10^{(l)/10})$.
(b) Toute la bande du système est allouée à l'utilisateur d'intérêt. Dans les simulations, on prendra $(b) = 50$ ou 100 MHz.
(c) Il s'agit d'une valeur typique.
(d) On adopte le modèle d'antenne active de la Fig. 3.
(e) On adopte le modèle d'antenne active de la Fig. 3.
(f) Les antennes en polarisation croisées ne sont pas utilisées pour la formation de faisceaux. Les deux ports d'antennes servent à réaliser de la diversité en transmission, mais le gain est déjà considéré dans le SINR cible.
(g) Cette valeur est fixe pour un sous-réseau quelque soit le nombre d'éléments d'antenne qui le constituent.
(h) On adopte le modèle d'antenne active de la Fig. 3.
(i) $(h) = (g) + 10\log((h))$.

TABLE 8. Bilan de liaison voie descendante (Rural - 700 MHz)

| **Paramètres** | **Valeurs** | **Remarques** |
|---|---|---|
| Mode duplex | FDD | |
| Débit [Mbps] | variable | (a) |
| Fréquence [MHz] | 700 | |
| Bande [MHz] | 10 | (b) |
| Hauteur d'antenne BS [m] | 30 | |
| Hauteur d'antenne UE [m] | 1,70 | |
| Probabilité de couverture | 0,9 | |
| Écart-type effet de masque [dB] | 6 | |
| **Transmission** | | |
| Puissance de transmission [dBm] | 43 | (c) |
| Nombre d'antennes de transmission | 2 | (d) |
| Gain d'antenne [dBi] | 17 | (e) |
| Pertes câble [dB] | 0.5 | (f) |
| PIRE [dBm] | 62.51 | (g) |
| **Réception** | | |
| SINR [dB] | variable | (h) |
| Densité du bruit [dBm/Hz] | -174 | (i) |
| Puissance du bruit [dBm] | -104 | (j) |
| Facteur de bruit [dB] | 7 | (k) |
| Gain d'antenne [dBi] | 0 | (l) |
| Puissance reçue [dBm] | variable | (m) |
| **Marges** | | |
| Interférence [dB] | 3 | |
| Effet de masque [dB] | 7.68 | |
| Corps humain [dB] | 1 | |
| Pénétration à l'intérieur des bâtiments [dB] | 15 | |
| Total marges [dB] | 26.68 | (n) |
| **Rayon de cellule** | | |
| Perte maximale [dB] | variable | (o) |
| Modèle de propagation | HQO | (p) |
| Distance [m] | variable | (q) |

(j) Il n'y a pas de pertes câbles car les amplificateurs de puissance sont intégrés au système d'antennes actives.
(k) $(k) = (c) + 10\log((e)) + (i)$.
(l) Le SINR à la distance $(s)$ est obtenu à partir de la puissance reçue et de la puissance du bruit : $(l) = (p) - (m) - (n)$.
(p) Il s'agit de la puissance reçue à la distance considérée $(t)$ en prenant en compte les marges et le gain d'antenne du terminal: $(p) = (k) + (o) - (q)$.
(r) On utilise $(t)$ et le modèle Hata Quasi Open pour calculer l'atténuation de parcours $(r)$ à cette distance, voir équation (2): $(r) = h_{Ur}((t))$.
(s) Voir section 3.
(t) C'est une entrée du bilan de liaison sur la voie descendante. Pour la surface élémentaire $k$ considérée en section 7, on prendra $(t) = d_k$.

TABLE 9. Bilan de liaison voie descendante (Urbain - 3.5 GHz)

| **Paramètres** | **Valeurs** | **Remarques** |
|---|---|---|
| Mode duplex | TDD | |
| Débit [Mbps] | variable | (a) |
| Fréquence [MHz] | 3500 | |
| Bande [MHz] | 100 | (b) |
| Hauteur d'antenne BS [m] | 30 | |
| Hauteur d'antenne UE [m] | 1,70 | |
| Probabilité de couverture | 0,9 | |
| Écart-type effet de masque [dB] | 7 | |
| **Transmission** | | |
| Puissance de transmission par TXRU [dBm] | 23 | (c) |
| Nombre d'éléments d'antennes | 192 | (d) |
| Nombre de TXRU | 64 | (e) |
| Nombre de ports d'antennes | 2 | (f) |
| Gain de sous-réseau d'antennes [dBi] | 10 | (g) |
| Nombre de sous-réseaux | 32 | (h) |
| Gain de réseau d'antennes [dBi] | 25.05 | (i) |
| Pertes câble [dB] | 0 | (j) |
| PIRE [dBm] | 66.11 | (k) |
| **Réception** | | |
| SINR [dB] | variable | (l) |
| Densité du bruit [dBm/Hz] | -174 | |
| Puissance du bruit [dBm] | -94 | (m) |
| Facteur de bruit [dB] | 7 | (n) |
| Gain d'antenne [dBi] | 0 | (o) |
| Puissance reçue [dBm] | variable | (p) |
| **Marges** | | |
| Interférence [dB] | 3 | |
| Effet de masque [dB] | 8.96 | |
| Corps humain [dB] | 1 | |
| Pénétration à l'intérieur des bâtiments [dB] | 25 | |
| Total marges [dB] | 37.96 | (q) |
| **Rayon de cellule** | | |
| Perte maximale [dB] | variable | (r) |
| Modèle de propagation | UMa | (s) |
| Distance [m] | variable | (t) |

## 7. Modèle de trafic de données

Dans cette section, on modélise un système dynamique dans lequel les utilisateurs arrivent dans la cellule, téléchargent un fichier et quitte la cellule. Plus précisément, on modélise une cellule par une file d'attente M/G/1/PS [9]. La cellule est divisée en $K$ surfaces élémentaires de débits physiques $c_k$, $k = 1, ..., K$ [bits/s], c'est le débit obtenu par un utilisateur de la surface élémentaire $k$, seul dans la cellule. Dans notre cas, les surfaces élémentaires sont des anneaux définies par des distances $d_0 = 0 < d_1 < ... < d_K = R$, où $R$ est le rayon de la cellule. La surface élémentaire $k$ est un anneau centrée sur la station de base et de rayons intérieur et extérieur $d_k$ et $d_{k+1}$ respectivement. Les arrivées sont poissoniennes de paramètre $\lambda_k = p_k\lambda$ [$s^{-1}$] dans l'anneau $k$, où $p_k$ est la proportion des arrivées dans la surface élémentaire $k$.

Les utilisateurs téléchargent un fichier de taille moyenne $B$ [bits]. La discipline de service est Processor Sharing, c'est-à-dire qu'à tout instant la capacité est partagée équitablement entre tous les utilisateurs actifs. Il faut noter que ce modèle ne prend pas en compte la fonctionnalité de MIMO multi-utilisateur (MU-MIMO).

Sur la Figure 4, un exemple de découpage de la cellule en zones de débit physique constant : à l'intérieur d'un anneau, le débit physique est supposé constant car la largeur de l'anneau est faible si $K$ est suffisamment grand. Le débit physique décroît avec l'atténuation de parcours et donc ici avec la distance à la station de base. S'il est seul dans la cellule, l'utilisateur bénéficie d'un débit moyen sur la voie descendante qui est égal à son débit physique.

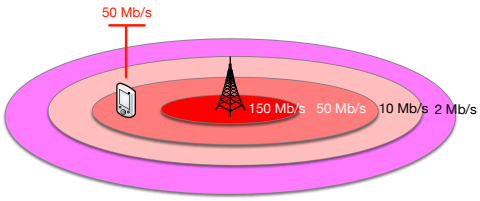



FIGURE 4. Exemple de découpage de la cellule en zones de débit physique constant.

La dynamique du système est la suivante. Un nouvel utilisateur arrive dans la zone $k$ avec probabilité $p_k$; à son arrivée, il télécharge un fichier; il est servi avec un débit $c_k/n$ quand il y a $n$ utilisateurs actifs; il quitte le système une fois le fichier téléchargé. Le débit d'un utilisateur dépend donc de son débit physique et du nombre d'utilisateurs simultanément actifs dans la cellule lorsqu'il trafique.

Sur la Figure 5, on montre le débit moyen dans une cellule faiblement chargée (les valeurs sont données à titre illustratif). À un certain instant, seuls quatre utilisateurs sont actifs. Le débit moyen d'un utilisateur est égal à son débit physique divisé par 4. Si la cellule devient fortement chargée (image du bas avec 10 utilisateurs simultanément actifs), le débit moyen diminue. Le débit moyen d'un utilisateur est maintenant égal à son débit physique divisé par 10. Le modèle de file d'attente nous permet de calculer le débit moyen lorsque le système est dynamique avec des arrivées et des départs aléatoires des utilisateurs.

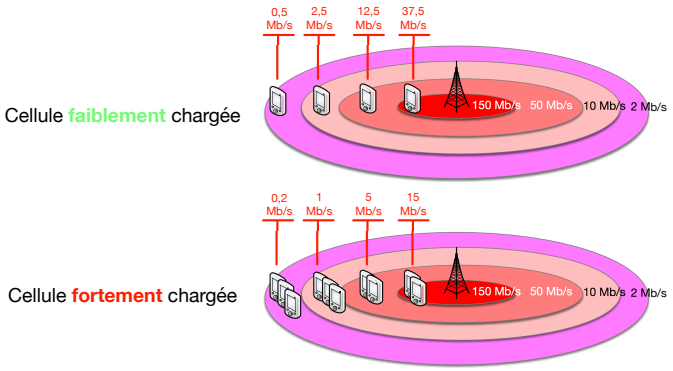



FIGURE 5. Débits moyens dans une cellule faiblement chargée et dans une cellule fortement chargée (valeurs illustratives).

La théorie de files d'attente définit en effet certaines grandeurs caractéristiques du trafic et fournit des paramètres de performance :

- La charge de la cellule est définie par :
$$\rho = \sum_k \rho_k = \sum_k \lambda B \frac{p_k}{c_k} \tag{15}$$
- Le système est stable si : $\rho < 1$, c'est-à-dire
$$\lambda B < \left( \sum_k \frac{p_k}{c_k} \right)^{-1} \tag{16}$$
- La capacité de la cellule est donc définie par :
$$C = \left( \sum_k \frac{p_k}{c_k} \right)^{-1} \tag{17}$$
en [bits/s], c'est le débit moyen maximal que la cellule peut servir avec ce modèle de trafic.
- Le nombre moyen d'utilisateurs dans la zone $k$ est :
$$N_k = \frac{\rho_k}{\rho} \tag{18}$$
- Le temps de séjour moyen d'un utilisateur dans la zone $k$ est :
$$T_k = \frac{B}{c_k(1-\rho)} \tag{19}$$
- Le débit moyen d'un utilisateur dans la zone $k$ est :
$$\bar{c}_k = c_k(1-\rho) \tag{20}$$
On remarque que ce débit moyen ne dépend pas de $B$.
- Le débit moyen des utilisateurs dans la cellule est :
$$\bar{c} = \sum_k p_k \gamma_k \tag{21}$$

Le Tableau 10 donne les valeurs numériques utilisées pour l'étude. La loi d'arrivée

TABLE 10. Paramètres du modèle de trafic

| Paramètre | Valeur |
|---|---|
| $K$ | 80 |
| $B$ [Mbits] | 1 |
| Loi d'arrivée des utilisateurs | Uniforme |

uniforme des utilisateurs dans la cellule implique que $p_k$ est la proportion de surface de la zone $k$, c'est-à-dire $p_k = (d_k - d_{k-1})^2/R^2$, $k = 1, ..., K$. La charge $\rho$ varie de 0 à 1 dans les résultats numériques.

## 8. RÉSULTATS

La Fig. 6 montre les débits moyens par utilisateur en fonction de la charge de la cellule dans les deux environnements considérés et pour plusieurs largeurs de bande. L'un des scénarios comprend une porteuse à 700 MHz avec 10 MHz de bande agrégée à une porteuse supplémentaire (SDL) à 1.4 GHz de 20 MHz.

De manière intuitive, plus la charge est élevée, plus les débits sont faibles; plus la largeur de bande est grande, plus les débits sont élevés. Les faibles largeurs de bande en zone rurale expliquent en grande partie les débits moindres observés dans ces zones. On peut toutefois noter qu'une cellule très faiblement chargée en zone rurale est susceptible de fournir un débit moyen plus élevé qu'une cellule très

chargée en zone urbaine et ce, malgré les différences de largeurs de bande. À largeur de bande totale constante (ici 30MHz), l'utilisation d'une bande supplémentaire à 1.4GHz ne modifie pas radicalement les débits moyens observés par rapport à une unique bande à 700 MHz.

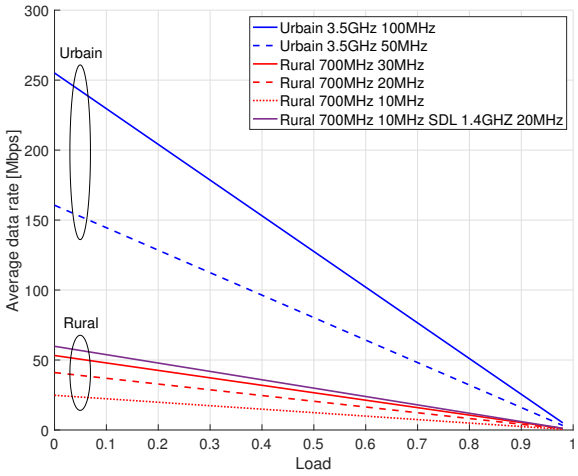



FIGURE 6. Débits moyens des utilisateurs en zones urbaines et rurales en fonction de la charge de la cellule.

Il faut bien noter que l'axe des abscisses de cette figure représente une charge *radio*. L'équation (15) montre que la contribution radio d'un utilisateur est inversement proportionnelle à son débit physique $c_k$. Ainsi, dans notre modèle, la charge radio d'un utilisateur en zone rurale est en moyenne plus importante qu'un utilisateur en zone urbaine. Il ne suffit donc pas de comparer les densités d'utilisateurs pour comparer les charges.

## REFERENCES

[1] ITU-R, "M.2412-0 Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020," Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en
[2] 3GPP, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 38.901. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm
[3] ——, "Radio network planning aspects," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 43.030. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/DynaReport/43030.htm
[4] ARCEP, "Décision 2019-0862 de l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes en date 2 juillet 2019 relative à la synchronisation des réseaux terrestres dans la bande 3,4-3,8GHz en France métropolitaine," Autorité de régulation des communications électroniques et des postes, Décision 2019-0862.
[5] 3GPP, "Study on self evaluation towards IMT-2020 submission," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TR 37.910. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/DynaReport/37910.htm
[6] ——, "NR; Physical layer procedures for data," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 38.214. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/DynaReport/38214.htm
[7] ——, "NR; User Equipment (UE) radio access capabilities," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 38.306. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/DynaReport/38306.htm
[8] ——, "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone," 3rd Generation Partnership Project (3GPP), TS 38.101-1. [Online]. Available: http://www.3gpp.org/DynaReport/38101-1.htm

[9] T. Bonald and A. Proutiere, "Wireless downlink data channels," in *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '03*. New York, New York, USA: Association for Computing Machinery (ACM), 2003, p. 339. [Online]. Available: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=938985.939020